研究開発の俯瞰

CRDS-FY2020-FR-03

研究開発の俯瞰報告書

ナノテクノロジー・材料分野（2021 年）

PANORAMIC VIEW REPORT

Nanotechnology/Materials Research Field (2021)

国立研究開発法人科学技術振興機構
研究開発戦略センター

研究開発の俯瞰報告書　概要

ナノテクノロジー・材料分野（2021 年）

JST研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット

社会の要請・ビジョン

■ Society 5.0の実現

- あらゆる人・コトがつながった超スマート社会の実現により、デジタル技術に立脚したビジネス、産業構造、社会システムへの変革が期待される。クラウドのサイバー世界と人々が生活するフィジカル世界をつなぐ境界領域（CPS）を支えるコア技術として、材料・デバイスへの期待が大きい。特に、IoTデバイス、最先端半導体、自動運転、ロボット、ポスト5G通信などに注目が集まる。

■ グローバルな環境・エネルギー問題の解決

- SDGsの達成、人間と地球が調和する持続的な発展への取り組みが進む。特にカーボンニュートラルの動きに呼応して世界中でエネルギー政策の見直しが進む。再生可能エネルギー大量導入に向け、発電技術、電力貯蔵技術、電力変換技術などの鍵を材料・デバイス技術が握る。
- 環境面では大量生産・大量消費・大量廃棄からの脱却を掲げた循環型社会（サーキュラーエコノミー）への取り組みが進む。大気や土壌汚染の改善・防止技術、海洋汚染（特にナノ粒子も含むマイクロプラスチック）の改善・防止技術がクローズアップされる。物質・材料・デバイスの研究開発において、資源循環過程を考慮した最適設計、最適製造を行うことが長期的な重要課題である。

■ 超高齢社会、ポストコロナ社会への適応

- 高齢人口の割合が増加するなか、健康寿命を延伸するためには「健康維持」「疾患治癒」「身体機能の補修・代替・拡張」がより重要になる。
- 感染症対策、未病段階における超早期診断のための生体情報モニターや簡便な在宅医療システム、難治疾患・がん・脳疾患などの根本的治療にナノテク・材料への期待は大きい。

社会・経済の動向

■ 経済的側面

- 米中の貿易摩擦や、新型コロナウイルス感染症流行拡大などによって、従来のグローバルサプライチェーンの脆弱さが明らかとなり、わが国の重要な位置を占める部素材産業の展望には不透明さが伴う。
- 日本は、高度なすり合わせを必要とするシステム化製品産業、高精度技術を必要とする製造装置産業、高性能・高信頼性を実現している部品や素材（部素材）産業に存在感を示してきた。しかし、NAND型フラッシュメモリ、パワートランジスタ、リチウムイオン二次電池(LIB)とその構成材料、炭素繊維などここ数年でシェアが低下しているものもみられる。
- 日本の特許国際競争力に着目すると、マイクロ構造・ナノテクノロジー、半導体、基本的な材料化学品、表面技術・コーティング、光学機器、有機ファイン・ケミストリー、高分子化学・ポリマーなどナノテク・材料分野と関連深い分野で高い競争力を保っているが、近年陰りもみられる。

■ 社会的側面

- 欧州各国を中心に、ナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進んでいたが、近年先端材料（アドバンストマテリアル）のリスク評価検討が進んでいる。
- ナノテク・材料研究への外国人人材の参画を短絡的に安全保障的危機としてとらえる議論があるが、研究開発のフェーズ、秘匿区分に応じた情報管理、輸出管理などに配慮した体制構築が重要。むしろ基礎研究フェーズでは積極的な国際連携を図ることが望ましい。
- オープンイノベーションの時代に入り、産学連携のエコシステムのあり方も変容をせまられるなかで、知的財産をどのように戦略的に取り扱いイノベーションにつなげるか、オープン・クローズ戦略など抜本的な検討が求められる。

世界の研究開発トレンド

次世代パワー半導体
SiC、GaNが実用化フェーズにSiの高性能化も着実に進む。Ga_2O_3、ダイヤモンドなどウルトラワイドギャップ半導体への関心が高まる。

次世代蓄電デバイス
LIBの着実な高性能化が進む中、全固体型、金属－空気、多価イオン、リチウム－硫黄などの革新電池の研究にも進展。一部のメーカから量産のアナウンス。

バイオファブリケーション
細胞からなる3次元組織体を生体外で構築する技術が進展。組織・臓器再生、創薬などの医療用途に加えて、培養肉製造への応用にも期待。

集積化 ﾏﾙﾁﾓｰﾀﾞﾙｾﾝｻ
AI等による危険予知や状況認識には、多種多様な情報（データ）が必要。信頼性が高く、様々なデータを取得可能なマルチモーダルセンサに期待。

脳型ＡＩチップ
次世代人工知能技術に要求される高度な情報処理の実現に向け、脳の構造・機能にヒントを得た情報処理技術とそのチップ化に期待。

量子ｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ
米国Google、中国科技大が量子優位性を実現、と相次いで発表。米国IBMも量子ビットの高集積化に向けた開発を進めるなど、競争が白熱。

循環可能な材料設計・創製
材料の使い捨てから再利用へのシフトに関心が高まりつつあり、材料における結合・分解の精密制御による循環可能な材料の設計・創製への期待が高まる。

多機能・複雑系材料設計・プロセス
高性能化、多機能化、相反する機能の共存などを実現する複雑な組成や構造を有する新材料の設計とプロセス技術に期待。

ﾃﾞｰﾀ駆動型材料設計・創製
機械学習などデータ科学的手法により物質設計・創製を革新。ロボットによる自律的探索や合成プロセスへデータ科学を活用し、材料開発期間を大幅短縮。

低次元・ﾄﾎﾟﾛｼﾞｶﾙ材料
低次元性やトポロジーに起因する特徴的な電子状態を活かした次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスの候補として、低次元材料やトポロジカル材料に注目。

3次元微細加工
セルフアライメント化と高アスペクト比化が先端半導体プロセスの重要な進化軸。選択的ALDや、超高選択比加工を可能にするALEへの期待が高まる。

オペランド計測
材料の合成過程やデバイスの動作状態の動的計測を通じて機構を解明。高機能材料・デバイスの開発を支援。

ナノテクノロジー・材料分野　研究俯瞰図

日本の現状・課題（俯瞰区分ごと）

■総論

- 長年の技術蓄積により、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術に伝統的に強み。
- 上記を支える計測・分析・評価・加工技術に関しても、強みを有する技術が多数存在。
- IoT社会実現に向けたセンサ・コンピューティングのヘテロ集積モジュール技術等に強み。
- データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携、ナノ物質・新物質のELSI/EHS/RRI、人材育成に課題。

■環境・エネルギー分野

- 再エネ利用、CO_2削減、資源循環の観点から世界的に研究開発が活発化。
- 日本は、太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリアで国プロが充実し基礎研究フェーズに強み。
- キーデバイスの研究開発に注力しすぎることで、システム全体を含めた製品普及フェーズでの後れが懸念。

■ライフ・ヘルスケア分野

- 日本は、バイオ材料、ナノDDS等のナノ医療システム、バイオ計測・診断デバイス、バイオイメージングなど基礎研究のレベルは高い。
- 医工連携・異分野融合が不十分。安全性評価・承認取得の難しさ、ベンチャー支援制度の不足など、応用研究・開発へつなぐための支援体制の構築が課題。

■ICT・エレクトロニクス分野

- 日本は、新概念にもとづくエレクトロニクスの基礎研究では存在感を発揮。
- 従来産業界に蓄積された技術・人材の散逸を防ぎ、有効利用するための仕組みが課題。
- 量子技術分野では国家戦略が策定され強化されつつあるが、他国と比較すると予算規模・増え方は十分とはいえない。

■社会インフラ分野

- 日本は、金属材料、複合材料ともに研究レベルが高く、炭素繊維の生産は市場的にも圧倒的にシェアが高い。
- SIPで開発してきたマテリアルズインテグレーションによる材料設計を活かした材料機能の高性能化が期待される。
- 中国・韓国における基礎研究、応用・開発研究が活発化してきており、競争力の維持が課題。

■物質と機能の設計・制御

- ナノテク・材料分野の中核をなす研究領域が含まれ、日本の競争力の源泉であり、活発な基礎研究が進む。
- 応用研究・開発研究では、低次元・トポロジカル材料など欧米と比較して劣勢にある研究領域も存在する。
- マテリアルズ・インフォマティクスが世界的に活発化。特に中国での論文・特許数の上昇傾向が著しい。

■共通基盤科学

- 日本は、微細加工関連技術では、半導体素子製造材料、欠陥評価技術で産業優位性を維持。積層造形・レーザ加工へも力を注ぐが、欧米中が先に実用化段階にある。
- オペランド計測分野で新規計測手法の開発に貢献。
- 理論・計算では、量子コンピュータを活用した量子化学計算で先頭集団を維持する。

主要国におけるナノテク・材料科学技術の基本政策・国家戦略動向

- 米国では、国家ナノテクイニシアティブ（NNI）を20年間にわたり継続し、AIエレクトロニクスや量子イニシアティブに接続。データ駆動型材料設計を目的としたMaterials Genome Initiative（2011~2016年）の後継プロジェクト化に向けた動きが加速。また、希少鉱物資源対策に関する大統領令を受けCritical Materials Instituteが2018年より継続。
- 欧州はHorizon 2020において、ナノテク・先端材料をKET's (key enabling technologies) として位置づけている。Graphene Flagship、Human Brain Project、Quantum Flagshipを大型予算（1Bユーロ）で推進。2021年に開始されるHorizon Europeの準備が加速。サーキュラーエコノミーへの移行、グリーン水素など環境・エネルギー関連の取り組みで世界を牽引。またナノELSI/EHSで世界のリーダーに。
- アジアでは中国の台頭が目立つ。中国製造2025など製造技術・材料デバイス技術の覇権獲得に向けた国家的取組が活発化。蘇州市などを中心とするナノテクイノベーション特区の整備により世界各国の企業、投資家の誘致にも力を入れる。台湾・韓国・シンガポールなどもナノテクの先端研究開発拠点を築き、世界のR&D、製造拠点を吸引。

めざす社会像
6つのニーズ、13のグランドチャレンジ

■ 安全・安心で豊かなデジタル社会

①コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス
生活空間、社会空間に張りめぐらされたセンサ群から得られるビッグデータを安全・高速・低消費電力で情報処理する革新的なコンピューティングデバイスの実現。

②安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信
人や物などの物理的実体（リアル）や大容量の情報（サイバー）のいずれも低環境負荷かつ安全に輸送、送達するインフラの実現。

1. 量子状態の高度制御
量子物性の高次制御によって新たなセンシング、通信、コンピューティングを実現。トポロジー等の新概念を導入することで従来エレクトロニクスを超える新機能を創出。

2. ポスト５Gデバイス・材料基盤
完全自動運転などの実現を支えるポスト5G通信技術で求められるミリ波・テラヘルツ帯の高周波域で作動する材料・デバイスの革新。

3. IoTデバイス集積
物理センサ、化学センサ等を統合的に用いたマルチモーダルセンサネットワークの構築による高付加価値情報の創出。

4. ナノ力学制御によるスマート材料
輸送・交通におけるCO_2排出量の大幅削減、摩擦によるエネルギー損失を大幅低減した機械機器、社会インフラ材料の超長寿命化や易修復などを実現する材料・デバイスの創製。

■ 健康で幸せな生活が可能な社会

③健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術
健康寿命の延伸等に資する疾患の超早期診断やヘルスモニタリング、身体機能の補助を行う医療デバイス等の実現。細胞や微生物を活用したバイオ技術による食料生産（人工培養肉ほか）。

④ 人と共生するロボット
負担の少ない高齢者介護、安全な社会インフラ保守管理などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力を補強・拡張可能な共生ロボットの活用。

5. ヘルスケアIoT
疾患の存在を示す指標（バイオマーカ）を検出・モニタリングする技術、環境中に存在するウイルス・細菌などを検知する技術など、ヘルスケアに必要なデータを取得するための技術開発。

6. バイオインスパイアード材料・システム
生物が有する巧妙な構造や機能、生物が低エネルギーで実現する動作や低環境負荷の物質生産に学んだ材料・デバイス、生産システムを人工的に構築。

7. バイオアダプティブ材料
生体環境に適合した材料の探索という従来の概念を超え、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料の設計・創製。

8. 脳型AI・スマートロボット
常に変化する開かれた環境の中で、人と一緒に連携して作業する自律・共生型のスマートロボットを実現。そのための高度な認識・判断を高エネルギー効率で行う脳型AIチップや小型高出力アクチュエータ、さらにこれらを統合するソフトロボティクスの開発。

■ 低環境負荷で持続可能な社会

⑤水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料
世界の人口増による著しい水不足や海洋汚染、CO_2・大気汚染問題、および世界のハイテク産業を支える希少元素をはじめとする鉱物資源枯渇の危惧や偏在性から生ずる価格高騰のリスクを解決するために必要な材料・デバイス。

⑥省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス
再生可能エネルギーを持続的かつ効率的に導入するために必要な省/創/蓄エネルギー用材料・デバイス。

9. サステナブル元素戦略
グローバルな課題解決に資する魅力的な機能を持った材料・デバイスの継続的創出のため、新機能の追求と元素・物質循環に代表されるサステナビリティを重視した材料創製を可能にする強固な材料開発基盤の構築。

10. カーボンニュートラル基盤
化石燃料利用の削減、再生可能エネルギー利用の増大のための継続的な材料・デバイス群の研究開発。蓄電池、燃料電池、太陽電池、グリーン水素利用技術、熱制御材料など。

■ 上記すべての基盤技術

11. 多機能・複雑系の材料設計
機能性材料の高度化に多元素化や複合化などの複雑化が避けられないなか、絨毯爆撃的な材料設計から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオペランド計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法の確立。

12. 材料合成プロセス設計基盤
材料やデバイスを合成・作製するプロセスについて、データ科学を用いて最適プロセスの発見を行うプロセス・インフォマティクスなどの設計基盤の構築。

13. 次世代オペランド計測
反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象に動的計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法を駆使して高速・高効率なデータ解析を実現。計測とプロセスを一体化したものづくりのための基盤技術を構築。

エグゼクティブサマリー

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生じる現象を取り扱う科学として発展してきたナノサイエンスを土台に置いている。ナノサイエンスの土台の上には、たゆまず進展してきた微細加工技術や、材料プロセスと成形が一体化した積層造形などの製造技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能におよぶ計測、第一原理電子状態計算による物質構造と機能の予測、シミュレーションやモデリングによる解析技術、データ科学などを柱とした共通基盤科学技術が構築され、そうした基盤技術を利用することで、元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングなどの物質と機能を結ぶ設計・制御技術が構築されている。そして、これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築され、それら多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、環境・エネルギー分野、ライフ・ヘルスケア分野、ICT・エレクトロニクス分野、社会インフラ分野の最先端を拓く技術が生み出される。下の俯瞰図には、以上述べた分野の構造が示されている。

図0　　ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2021年）

人類の文明は、古くから、その時代に利用できる材料と深く関係しており、材料技術の発展が社会や人々の暮らしのあり方を規定してきたといっても過言ではない。21世紀に入ってからは、それまで材料技術が担っていたテクノロジードライバーとしての役割を、ナノテクノロジーがともに担うようになった。ナノテクノロジー

は、材料技術と協調しながら社会や暮らしの変化をより一層加速し、異分野技術の融合、技術のシステム化を通して、現代社会の著しい変化をその根本で支えている。

一方で、ナノテクノロジー・材料科学技術が、社会の中で非常に幅広い領域で使われているという特性のために、それらが人体や環境に対して負の影響を与える可能性への懸念も増えている。世界が工業化し始めた初期から、工業廃棄物による各種公害、食品添加物や医薬品による食害・薬害などの人体や環境に対する安全性の問題は生じていたが、ナノスケールの大きさを持つナノ材料の場合には、事情はさらに複雑である。新規なナノ材料は、従来の材料とは異なる新物性を持つことがあり、従来の化学物質のように組成から大まかなリスクを推定することができないため、サイズ、形状、表面状態など多岐にわたる特性を総合的に考慮する必要がある。こうしたリスクの科学的評価には膨大な時間・資金・設備等リソースを要するため、国家主導や国際協調の枠組みのもと、環境・健康・安全（Environment, Health and Safety：EHS）の科学的側面からと、倫理的・法的・社会的側面（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）からの取り組みがなされている。また、ナノ材料が、広く国際市場で流通するためには、固有の用語、評価試験方法、リスク評価法などの多方面にわたる国際標準化が重要となっている。

ナノテクノロジーを世界で最初に国家イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative：NNI）として立ち上げ、世界中の研究開発戦略に大きな影響を与えた米国の公的投資は2001年以降の累計で300億ドル以上の規模に上る。トランプ政権以降、NNIの予算は減少に転じているが、2021年1月には、NNIをさらに次の 10年間へ向けてどのように展開するかを議論する「ステークホルダー・ワークショップ」をNNCO（National Nanotechnology Coodination Office）が開催するなど、バイデン政権下での動きが注目される。NNI予算の96%は、NIH、NSF、DOE、DOD、NISTの5省庁・機関で占められている。一例をあげるとNSFの2020年予算の合計には、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に対応した研究開発のためのCARES法（Coronavirus Aid, Relief, and Economic Security Act）にもとづく資金提供1,430万ドルが含まれており、ワクチン、センサ、マスク、フィルタ、抗菌性コーティング等が対象となっている。欧州はフレームワークプログラム「Horizon 2020」（2014年～2020年、74.8Bユーロ/7年）の枠組みの中で、ナノテクノロジー・材料分野の強化を図ってきた。 Horizon 2020の3つの優先領域、①Excellent science（24.4Bユーロ）、②Industrial leadership（17.0Bユーロ）、③Societal challenges（29.7Bユーロ）のうち、①の中で、10年間で総額1.0BユーロのFuture & Emerging Technologies（FET）テーマとして、「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」、「Quantum Flagship」の3つのプロジェクトが推進されてきた。2021年からは新たなプログラム「Horizon Europe」（2021年～2027年、95.5Bユーロ/7年）が開始される。その詳細は今後明らかになっていくが、これまでのHorizon 2020と同様に、ナノテクノロジー・材料に関する科学技術投資も強化されると考えられる。2020年7月の時点では、Horizon Europeは3つの柱、（1）第一の柱（Excellent science）：24.9Bユーロ、第二の柱（Global Challenges and European Industrial Competitiveness）：53.8Bユーロ、（3）第三の柱（Innovative Europe）：13.4Bユーロが割り当てられている。アジア地域においては、産業界・学術界のいずれにおいても、中国の台頭が著しい。2016年に「科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016～2020年）」では、中国政府が科学技術と経済、科学技術とイノベーションを直結させ、研究・開発から産業化までのイノベーション創出の全過程を視野に入れていることが示されている。13次五カ年計画で目標とされたほとんどの指標は、当初予定通りか前倒しで実現されていることからも、中国の科学技術力の進展が著しいことがわかる。さらに、2020年10月末に開催された中国共産党第19期中央委員会第5回全体会議において、科学技術を含む中国全体の2035年までの中長期計画および第14次五カ年計画の大枠が発表された。イノベーション主導の開発を中核に据

え、科学技術を通じて国を強化することが強調されており、人工知能、量子情報、集積回路、ライフ・ヘルス、脳科学、生物育種、航空宇宙、深海などの先端分野がプロジェクトの対象としてあげられている。2015年に発表された国家戦略「中国製造2025」では、ナノテクノロジー・材料分野のほとんどの部分をカバーする10の重点分野の国内外の市場シェア獲得と部材の自国生産をめざした施策が推進されている。その結果、半導体、人工知能（AI）、量子技術などの最先端技術や先端材料の研究開発において、特に米中間の競争が激化している。さらに、2019年末に中国で最初に確認された新型コロナウイルス感染症の世界的な大流行と、それによる世界の経済・産業の混乱はこの傾向に拍車をかけている。このことはわが国における研究開発計画にも影響を及ぼす可能性を秘めている。また、台湾・韓国・シンガポールをはじめとしたアジア諸国においても、ナノテクノロジー・材料の研究開発拠点を築き、世界の研究開発人材や資金を吸引しようとしている。

日本は材料・素材分野で基礎・応用ともに高いポテンシャルを有している。これは、長年、物質・材料研究を積極的に進めてきたことに起因しており、磁石、リチウムイオン電池、青色LED、光触媒、炭素繊維などのように、日本で発明、産業化された事例も多い。また、1980年から90年代に日本の電機産業が世界を席巻した背景には、それらの機器に使われた安価で高品質な部品・素材を供給する国内の大企業から中小企業までの部素材産業や製造装置産業企業群の存在があった。それらの企業群が提供する機能性材料・部品・装置の多くは、電機産業の多くが昔の勢いを失った現在でも世界的に大きなシェアを持ち続けている。個々の部素材においてわが国が占める市場の規模はそれほど大きくないが、部素材産業全体を面で見た場合にはわが国は大きな市場を有し、競争力を維持しているといえる。しかし、一方で、リチウムイオン電池の電極材料、液晶製造用フォトレジストやカラーフィルムなどの一部の液晶ディスプレイ材料、パワートランジスタといった、売り上げ規模や今後の市場成長が見込めるために新規参入/投資インセンティブの高い分野では、諸外国の急追によってシェアの低下傾向が見て取れることには注意が必要である。これまでの材料開発では、1つの新材料を生み出すために10年以上の開発期間がかかることもまれではなかったが、このようなグローバル競争の下ではこれまで以上に材料開発のスピードを上げることが課題である。

ナノテクノロジーの重要性が認識され始めた2000年前後には、現在世界の情報産業で支配的な地位にあるGAFA（Google、Apple、Facebook、Amazon）はいずれも、上場企業として存在しないか、数ある情報機器メーカーの1つに過ぎなかった。これらの情報処理産業の巨人達を育てたゆりかごは、その時点を挟む前後それぞれ20年の間、ムーア則に従い指数関数的に半導体の微細化が進み、それにより高性能化を実現し続けた電子機器である。これらを支えてきたのはナノテクノロジー・材料技術の進化といえよう。この先の20年、同じようなスピードで技術が進化を続けていくためには、情報通信技術のソフトウェアと並んで、ハードウェアの発展が必要であることは論をまたないであろう。これまで半導体の進化を支えてきた微細加工が限界に近づいていることは周知であり、ポストムーア時代を担う新技術体系に対する要求は高まりつつある。脳に学ぶことで、柔軟で低エネルギーの情報処理を実現しようとするニューロモルフィックコンピューティングや、量子力学原理を用いてある種の問題を高速に解く量子コンピューティングなどの革新的技術をはじめとした、新たな情報処理技術の研究開発を続けていくことが必要となっている。

以上の背景を踏まえて、本報告書第1章では、この分野における日本の課題とグランドチャレンジについて、CRDSにおける関連ワークショップや動向調査にもとづき俯瞰的にまとめている。また、先に示した俯瞰図から、31の主要な研究開発領域を抽出し、今、社会が要求する重要な6つのニーズの特定、およびそれらのニーズを解決するために戦略的に取り組むべき「13のグランドチャレンジ」について記述している。領域抽出に当たっては、「その技術が急激な進展を示し始めている（エマージング性）」、「その技術が社会や経済に与え

る影響が大きい（社会・経済インパクト）」、「技術的に重要で継続的に注視し続ける必要がある （継続性）」の3つの視点を重視した。これらの視点に立つことで、新たに出現する重要な領域の見落としや、技術的にも産業的にも重要性を失った領域の技術調査を避けることができる。また、この分野の挑戦課題であるグランドチャレンジの設定には、「社会の変化がもたらす新たな科学技術への要請」、「科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性」、「日本の産業競争力と国家安全保障の根幹となる技術の確保」を考慮した。これらの考え方は互いに相補的であるため、明確なターゲットを持った戦略的研究開発と、知的好奇心に駆動される新しい学術領域を開拓する基礎研究の両方を、挑戦課題にとりあげることができる。また、第2章においては、抽出した31の主要研究開発領域について、各々10ページ程度を割き、当該領域の意義、歴史的背景から現在の先端技術動向、今後の科学技術的課題、国際比較（日米欧中韓）の結果についてそれぞれ概略をまとめている。本報告書は、検討過程において総勢170名を超える産学官の専門家の協力によって、情報・意見を収集し、ワークショップ等での議論を重ねたうえで、CRDSの視点から見解をまとめたものである。

本稿執筆時点（2021年初頭）においては、新型コロナウイルス感染症が 世界的に猛威を振るっている。ナノテクノロジー・材料分野は、予防・治療などの感染症対策に直接的に貢献するのに留まらず、感染症の影響で起こる社会のさまざまな変化に対しても基盤技術として貢献することになる。本報告書において新型感染症に関連した特別な章を設けてはいないが、これを題材とした2回のワークショップの概要を1章に、感染症対策に資する基盤技術を2章に記述している。

Executive Summary

The nanotechnology/materials field stands on nanoscience which has developed as a science handling phenomenon occurring at the nanoscale, based on basic science fields such as material science, quantum science, optical science, life science, information science, and mathematical science. On the basis of nanoscience, the common basis of science and technology is built, which include manufacturing techniques such as microfabrication technology with steady progress, additive manufacturing with integrated material processing and molding, measurement technology spanning to sub-angstrom resolution represented by a super-high-resolution electron microscope, prediction of material structure and functions using the first principle electronic state calculation, and analysis techniques by simulation and modeling.

Design and control techniques for materials and their functions such as element strategy and molecular technology, materials informatics, control of interface and gap in materials, phonon engineering have been constructed using the above-mentioned basic technology. By combining these materials and their functions, we can produce new materials and devices and also create cutting-edge technologies in the fields of environment and energy, life and healthcare, ICT and electronics, and social infrastructure, depending on the purpose of its application. The structure of the field mentioned above is shown in the panoramic view on page 1 in Japanese version.

It would not be an exaggeration to say that the development of materials technology has defined the nature of our society and life. In the 21st century, nanotechnology has taken on the role of technology driver together with materials technology. Nanotechnology, in cooperation with materials technology is further accelerating the changes in society and daily life. Furthermore, it is fundamentally supporting the remarkable changes in modern society through the integration of technologies from different fields and the systematization of technologies.

On the other hand, because nanotechnology and materials are used in a very wide range of areas in society, there is increasing concern about their potential negative impact on the human body and the environment. Since the early days of the world's industrialization, there have been safety issues for the human body and the environment, such as various types of pollution caused by industrial waste, food and drug damage caused by food additives and pharmaceuticals, etc. However, the situation is even more complicated in the case of nanomaterials with nanoscale size. Since novel nanomaterials may have new physical and chemical properties different from conventional materials, the risk can hardly be estimated from the chemical composition of materials as with conventional chemicals. Therefore, it is necessary to comprehensively consider a wide range of properties such as size, shape, and surface conditions. Since the scientific assessment of such risks requires enormous resources such as time, money, and equipment, efforts are being made through national initiatives and international cooperative frameworks. There are such efforts from the scientific aspect of the environment, health, safety (Environment, Health and Safety, EHS) and from the ethical, legal, and social (Ethical, Legal and Social Issues, ELSI) aspect. Also, for nanomaterials to be widely distributed in an international market, it is important to promote many aspects of international standards, such as unique terminology,

evaluation test methods, and risk assessment methods.

The U.S. was the first country in the world to launch a national technology initiative for nanotechnology, National Nanotechnology Initiative (NNI), which has had a significant impact on R&D strategies around the world in this field. Public investment in the U.S. has totaled more than $30 billion since 2001. Since the Trump administration, the budget for the NNI has been decreasing. However, National Nanotechnology Coordination Office (NNCO) held a "stakeholder workshop" to discuss how to develop the NNI for the next decade in January 2021. We need to closely watch new movement under the Biden administration. 96% of the NNI budget is accounted for by five departments and agencies: NIH, NSF, DOE, DOD, and NIST. For example, NSF's total budget for fiscal year 2020 includes $14.3 million in funding under the CARES (Coronavirus Aid, Relief, and Economic Security) Act for research and development in response to novel coronavirus infections (COVID-19), including vaccines, sensors, masks, filters, and antimicrobial coatings.

Europe has been strengthening its nanotechnology and materials sector within the framework program "Horizon 2020" (2014-2020, €74.8B/7 years). In Horizon 2020 of EU, three priority areas are set up, which are ① Excellent Science (€24.4B), ② Industrial Leadership (€17.0B), ③ Societal Challenges (€29.7B). In the priority area of Excellent Science, following three projects, "Graphene Flagship", "Human Brain Project" and "Quantum Flagship" have been promoted as Future & Emerging Technologies (FET) with a total budget of 1 B € over 10 years.

A new program, Horizon Europe (2021-2027, €95.5B/7 years), will be launched in 2021. The details of this program will become clearer soon, but it is expected that science and technology investments in nanotechnology and materials will be strengthened, as in the previous Horizon 2020. As of July 2020, Horizon Europe has been allocated three pillars: (1) Pillar 1 (Excellent Science): €24.9B, (2) Pillar 2 (Global Challenges and European Industrial Competitiveness): €53.8 B, and (3) Pillar 3 (Innovative Europe): €13.4B.

In Asia, the progress of China is particularly prominent in high-tech industries and academic field. The 13th Five-Year Plan for Science and Technology Innovation (2016-2020), issued in 2016, shows that the Chinese government has directly linked science and technology to the economy and innovation, and is looking at the entire process of innovation creation, from R&D to industrialization. It is clear that the remarkable progress of China's scientific and technological capabilities from the fact that most of the indicators targeted in the plan have been achieved on time or ahead of schedule. Furthermore, at the 5th Plenary Session of the 19th Central Committee of the Communist Party of China (CPC) held at the end of October 2020, the general framework of the medium- and long-term plan up to 2035 and the 14th Five-Year Plan for the whole of China, including science and technology, was announced. The plan emphasizes strengthening the country through science and technology with innovation-led development at its core. The plan lists such advanced fields as artificial intelligence, quantum information, integrated circuits, life and health, brain science, biological breeding, aerospace, and the deep sea as targets

for projects.

Based on "Made in China 2025" issued in 2015, they are promoting several policies aimed at gaining domestic and international market share in 10 key areas covering most of the nanotechnology and materials fields, as well as producing components at own country. As a result, the competition of the research and development in the advanced technologies of semiconductor, AI, quantum technologies, and advanced materials is becoming fierce, particularly between China and the USA. In addition, the global outbreak of COVID-19 and the resulting global economic and industrial turmoil has accelerated this trend. This may affect the research and development planning in Japan.

In other areas in Asia including Taiwan, Korea, and Singapore are also building R&D platforms of nanotechnology and materials and are trying to attract human resources and funds from all over the world.

Japan has high potential in the field of materials, both in basic and applied research. This is because Japan has been actively engaged in materials research for many years. As a result, there are many examples of inventions and industrialization in Japan, such as Neodymium magnets, lithiumion batteries, blue LEDs, photocatalysts, and carbon fibers. The global dominance of the Japanese electronics industry in the 1980s and 1990s was supported by the presence of a group of domestic companies in the materials and manufacturing equipment industries, from large corporations to small and medium-sized enterprises, that supplied the inexpensive, high-quality parts and materials used in those devices. Many of the functional materials, components, and equipment provided by these companies continue to hold a large share of the global market even today when much of the electronics industry has lost its old momentum.

Even if the size of the market for individual materials and devices is not so large, Japanese industry as a whole can be said to have captured a large global market and maintained its industrial competitiveness. At the same time, however, it should be noted that in areas where future market growth is expected, such as electrode materials for lithium-ion batteries, color films for LCDs, and power transistors, there is a downward trend in market share due to the rapid growth of other countries. In the conventional material development method, it usually takes more than 10 years to develop a new material. But under this global competition, the challenge is to increase the speed of materials development more than ever before.

When the importance of nanotechnology began to be recognized around 2000, GAFA (Google, Apple, Facebook, and Amazon), the dominant players in the global information industry today, either did not exist or were just one of the many information processing companies. The cradle that nurtured these giants of the information processing industry was electronic equipment, which continued to make remarkable progress of its performance through the miniaturization of semiconductors according to Moore's Law for 20 years before and after that point. Such a dramatic progress of device performance has been supported by the evolution of nanotechnology and materials technology. In order to continue this evolution at the same speed

for the next 20 years, it is necessary to develop hardware technology as well as software one for information processing and communication areas. It is well known that the microfabrication that has supported the evolution of semiconductors up to now is approaching its limits, and there is a growing demand for technological innovation that will support the Post Moore era. It is necessary to continue research and development of innovative information processing technologies, such as neuromorphic computing, which attempts to realize flexible and low-energy information processing learned from the brain, and quantum computing, which uses the principles of quantum mechanics to solve certain complex problems that are almost impossible to solve in a reasonable time on present computers.

Based on the above background, in the first chapter of the report, we summarize the overview of these trends and prospects and describe especially issues in Japan and grand challenges in this field derived through related workshops and trend surveys organized by CRDS. We identify 31 major research and development areas from the panoramic view shown in the above. In addition, we described six social needs that we are facing and set the "13 Grand Challenges" to tackle strategically to solve those needs. In extracting the 31 areas, we focused on the following three perspectives: "innovativeness: a degree of rapid technological progress," "social and economic impact: impact of technology on society and economy," and "continuity: technological importance needed for continuous attention". By taking these perspectives, it is possible to avoid overlooking important new areas that emerge and to avoid technical investigations in areas that have lost their technological and industrial importance. In setting the grand challenges, three perspectives were taken into account: "the demand for new science and technology brought about by changes in society," "the need for strategic investment in line with the emergence of new trends in science and technology," and "securing technology that will be the basis of Japan's industrial competitiveness and national security". Since these ideas are complementary to each other, we can select both strategic R&D aiming to clear targets and curiosity-driven-research opening up to new academic fields as grand challenges.

In chapter 2, we will allocate about 10 pages for each of the 31 major research and development areas, which summarizes surveys on the significance of the area, historical background, current advanced technology trends, present science and technology issues, and international comparisons (Japan, the US, Europe, China, and Korea). In these review processes, we gathered information and opinions with the cooperation of about 170 experts from industry, academia and government, made intensive discussions at workshops and summarized the views from the standpoint of CRDS.

At the time of writing, in early 2021, COVID-19 is still raging around the world. Nanotechnology and materials will not only contribute directly to countermeasures against infectious diseases, such as prevention and treatment, but will also contribute as fundamental technologies to various changes in society caused by infectious diseases. Although this report

does not have a special chapter related to new infectious diseases, the outline of the two workshops held on this topic is given in Chapter 1, and the basic technologies that contribute to countermeasures against infectious diseases are described in Chapter 2.

はじめに

JST研究開発戦略センター（以降、CRDS）は、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を把握・俯瞰・分析することにより、科学技術イノベーション政策や研究開発戦略を提言し、その実現に向けた取組を行っている。

CRDSは2003年の設立以来、科学技術分野を広く俯瞰し、重要な研究開発戦略を立案する能力を高めるべく、その土台となる分野俯瞰の活動に取り組んできた。この背景には、科学の細分化により全体像が見えにくくなっていることがある。社会的な期待と科学との関係を検討し、科学的価値を社会的価値へつなげるための施策を設計する政策立案コミュニティーにあっても、科学の全体像を捉えることが困難になってきている。このような現状をふまえると、研究開発コミュニティーを含めた社会のさまざまなステークホルダーと対話し分野を広く俯瞰することは、研究開発の戦略を立てるうえでは必須の取り組みである。

「研究開発の俯瞰報告書」（以降、俯瞰報告書）は、CRDSが政策立案コミュニティーおよび研究開発コミュニティーとの継続的な対話を通じて把握している当該分野の研究開発状況に関して、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS独自の視点でまとめたものである。

CRDSでは、研究開発が行われているコミュニティー全体を4つの分野（環境・エネルギー分野、システム・情報科学技術分野、ナノテクノロジー・材料分野、ライフサイエンス・臨床医学分野）に分け、その分野ごとに2年を目途に俯瞰報告書を作成・改訂している。

第1章「俯瞰対象分野の全体像」では、CRDSが俯瞰の対象とする分野およびその枠組をどう設定しているかの構造を示す。ここでは、CRDSの活動の土俵を定め、それに対する認識を明らかにする。また、対象分野の歴史、現状、および今後の方向性について、いくつかの観点から全体像を明らかにする。この章は、その後のコンテンツすべての総括としての位置づけをもつ。第2章「俯瞰区分と研究開発領域」では、俯瞰対象分野の捉え方を示す俯瞰区分とそこに存在する主要な研究開発領域の現状を概説する。専門家との意見交換やワークショップを通じて、研究開発現場で認識されている情報をできるだけ具体的に記載し、領域ごとに国際比較も行っている。

俯瞰報告書は、科学技術に関わるステークホルダーと情報を広く共有することを意図して作られた知的資産である。すでに多くの機関から公表されているデータも収録しているが、単なるデータレポートではなく、当該分野における研究開発状況の潮流を把握するために役立つものとして作成している。政策立案コミュニティーでの活用だけでなく、研究者が自分の研究の位置を知ることや、他領域・他分野の研究者が専門外の科学技術の状況を理解し連携の可能性を探ることにも活用されることを期待している。また、当該分野の動向を深く知りたいと考える政治家、行政官、企業人、教職員、学生などにも大いに活用していただきたい。

2021年3月
国立研究開発法人科学技術振興機構
研究開発戦略センター

目次

1 ｜ 俯瞰対象分野の全体像 …… 1

1．1 俯瞰の範囲と構造 …… 1
1.1.1 社会の要請、ビジョン …… 2
1.1.2 科学技術の潮流・変遷 …… 7
1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図） …… 14

1．2 世界の潮流と日本の位置付け …… 17
1.2.1 社会・経済の動向 …… 17
1.2.2 研究開発の動向 …… 20
1.2.3 社会との関係における問題 …… 46
1.2.4 主要国の科学技術・研究開発政策の動向 …… 50
1.2.5 研究開発投資や論文、コミュニティー等の動向 …… 84

1．3 今後の展望・挑戦課題 …… 97
1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性 …… 97
1.3.2 日本の研究開発の現状と課題 …… 101
1.3.3 国として推進すべき重点テーマ …… 106
1.3.4 研究開発体制・システムのあり方 …… 111

2 ｜ 俯瞰区分と研究開発領域 …… 118

2．1 環境・エネルギー応用 …… 118
2.1.1 次世代太陽電池材料 …… 119
2.1.2 蓄電デバイス …… 130
2.1.3 パワー半導体材料・デバイス …… 140
2.1.4 エネルギーキャリア …… 152
2.1.5 分離技術 …… 159

2．2 ライフ・ヘルスケア応用 …… 168
2.2.1 バイオ材料 …… 169

2.2.2 ナノ医療システム …… 181
2.2.3 バイオ計測・診断デバイス …… 191
2.2.4 バイオイメージング …… 200

2. 3 ICT・エレクトロニクス応用 …… 212
2.3.1 新機能ナノエレクトロニクスデバイス …… 214
2.3.2 集積フォトニクス …… 224
2.3.3 スピントロニクス …… 236
2.3.4 MEMS・センシングデバイス …… 244
2.3.5 ロボット基盤技術 …… 254
2.3.6 量子情報・通信 …… 263
2.3.7 量子計測・センシング …… 273

2. 4 社会インフラ応用 …… 282
2.4.1 構造材料（金属） …… 283
2.4.2 構造材料（複合材料） …… 290

2. 5 物質と機能の設計・制御 …… 299
2.5.1 分子技術 …… 301
2.5.2 元素戦略・希少元素代替技術 …… 309
2.5.3 マテリアルズ・インフォマティクス …… 318
2.5.4 フォノンエンジニアリング …… 328
2.5.5 トポロジカル材料 …… 339
2.5.6 低次元材料 …… 349
2.5.7 複雑系材料の設計・プロセス …… 360
2.5.8 ナノ力学制御技術 …… 371

2. 6 共通基盤科学技術 …… 382
2.6.1 微細加工プロセス …… 383
2.6.2 積層造形・レーザ加工 …… 393

2.6.3　ナノ・オペランド計測技術 …… 403
2.6.4　物質・材料シミュレーション …… 415

2．7　共通支援策 …… 427
2.7.1　ナノ・マイクロマテリアルの ELSI/EHS、国際標準 …… 427

付録 1　検討の経緯 …… 454
付録 2　作成協力者一覧 …… 457
付録 3　研究開発の俯瞰報告書（2021 年）全分野で対象としている研究開発領域一覧 …… 461

謝辞

1 ｜ 俯瞰対象分野の全体像

1.1 俯瞰の範囲と構造

（1）研究開発領域の定義

まず、本報告書におけるナノテクノロジーおよび材料の定義とその特徴を述べる。

■ナノテクノロジーの定義と特徴

ナノテクノロジーの“ナノ”は、国際単位系（SI）接頭辞であるｎ（=10^{-9}）に由来するもので、対象物の長さスケールがナノメートルで記述されることを意味している。1ナノメートル（nm）の長さは、物質の最小構成単位である原子を数個並べた程度になる。一般的にナノサイエンスあるいはナノテクノロジーでは、1ナノメートルから100ナノメートル程度の範囲の世界を対象としているので、3次元的に原子が数個から数百万個集まった分子や原子団がこの領域に入る。ナノテクノロジーの特徴を明確に表現するため、ナノテクノロジーを以下のように定義する。

［ナノテクノロジー］
概ね1ナノメートルから100ナノメートルの領域において、物質を成長させ、加工し、そしてそのサイズのバルク・表面・界面の構造や、そこで生ずる諸現象を原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせて応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることにより、新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。

上記の定義にかかわる学術領域はすべてナノテクノロジーとして融合の対象となることから、異分野の融合はナノテクノロジーのもっとも大きな特徴であり、融合によって新しい技術領域が生まれる。正確には、学術的領域をナノサイエンス、技術的領域をナノテクノロジーと呼ぶべきであるが、一般的に両方をあわせてナノテクノロジーと称することが多く、本報告書でもこの考え方を採用する。

ナノテクノロジー（以降ナノテクと略記）の特徴が顕著に表れる事例として、ナノスケールでの材料プロセスをとりあげる。材料プロセスには、代表的な2つのアプローチがある。1つは、超LSI（大規模集積回路）などの基本的な微細加工技術であり、バルク材料や薄膜材料を削り込んで所望のナノ構造を得る「トップダウン・ナノ加工」、もう1つは、原子や分子あるいはカーボンナノチューブや微粒子などのナノ材料から出発して所望のナノ構造を自己組織的に形成する「ボトムアップ・ナノ形成」である。後者が実現できれば、ナノテクの究極の形成・加工プロセスとなりうる。自己組織化は、前者の限界を克服、あるいは前者を補完する後者の鍵となる概念である。そして、2つのプロセスの融合も重要となる。

これらによって形成・加工される「ナノ構造」の具体例としては、金属や半導体の超微粒子、ロタキサンなどの超分子、ゼオライトなどナノ空間・空隙を利用した材料、そして、0次元、1次元、2次元のカーボンナノ構造体としてのそれぞれC_{60}（フラーレン）、CNT（カーボンナノチューブ）、グラフェンがある。ロタキサンは、2016年ノーベル化学賞の受賞対象となった「分子機械」を構成する物質として記憶に新しい。また、バイオの世界に目を向ければ、生体物質はさまざまな「ナノ構造」で構成され、その機能はナノ構造自体やナノ構造間の複雑な相互作用を介して発現している。

ナノスケールの物質構造の最大の特徴は、①サイズ効果としての量子効果、②原子より10～100倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③表面・界面の原子の数が物質内部の原子の数に比較して無視できないほどに相対的に増えることから生じるナノ界面・表面効果などにあり、これらが通常にみら

れる物性とは全く異なる「ナノ物性」を生み出す。例えば、多様な触媒効果や、物質定数から解放されて自在に変化する電子的・磁気的・光学的・機械的・熱的特性である。今後、注目されるのは、物質内にデザインして作り込むナノ空間・空隙内を利用した電子、光子、スピン、フォノン、イオン、分子の多様な輸送現象であり、その制御法や実現法は、IoTに代表される第４次産業革命や、エネルギー分野、ライフサイエンス・医療分野において必須の技術と期待される。

■材料の定義と特徴

材料とは何らかの有用な機能を有する物質であり、材料技術は、物質科学をベースに工学的応用を図る技術である。工業で用いられる材料は、元の原料によって大きく次の４つに分けられる。

（1）金属材料

鉄やアルミニウムなどの金属、ステンレスなどの合金、アモルファス合金、あるいは、金属ガラスなど 。

（2）無機材料

セラミックスやガラス、非金属元素単体または金属元素と非金属元素の化合物、金属間化合物など 。

（3）有機・高分子材料

炭素を主要元素として、酸素、水素、窒素原子などで構成される物質の総称。これはプラスチックのような高分子化合物による樹脂、繊維や有機ＥＬなどの電子材料、自己組織化を利用した超分子集合体やゲル、固体と液体の中間的な性質を持つ液晶等を含む。

（4）生物材料

生物に由来する材料。主にタンパク質や核酸、糖鎖など 。

他の分類としては有機材料（生物材料を含む）と無機材料（金属材料を含む）の２つに区分することも一般的である。近年は、目的とする機能や特性を得るために上記材料を組み合わせた炭素繊維強化プラスチックなどの複合材料や、ナノレベルで複合化したハイブリッド材料が多数登場している。

また、重視される性質によって、力学特性（強度・靭性・延性）が主に要求される「構造材料」と、力学特性以外の機能を持つ「機能材料」に分類することもできる。機能材料については、導電性に注目して、超伝導体、導体、半導体、絶縁体という分類、磁性に注目して、強磁性体、反強磁性体、常磁性体、反磁性体という分類などがある。

今日において材料技術は、ナノメートルの領域にまで踏み込んだ組織制御技術、高分解能電子顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡などのサブナノメートルに及ぶ高精度計測、第一原理電子状態計算による構造および機能の予測、シミュレーションによる解析技術を柱として、さらに進化し続けている。

よってナノテクと材料との関係は、ナノテクはトップダウンあるいはボトムアップでナノスケールの構造を形成することにより新機能を発現する技術であり、さまざまな新材料を開発するための横断のコアテクノロジーとみることもできる。

1.1.1 社会の要請、ビジョン

（1）世界と日本

世界は今、社会・経済的にも地球・自然環境の面でも、そして地政学的にも、大きな変化のなかにある。

VUCAの時代（Volatility、Uncertainty、Complexity、Ambiguity）、平成から令和へ、そして21世紀に入って20年の節目を過ぎたが、20世紀型の価値観は転換を迫られて久しい。新型コロナウイルス感染症の世界的猛威によって、さらに不可逆な転換を迫られたとみるべきだろう。多様化・複雑化する社会にあって、人類・社会に求められる、あるいは問題とされる事象の多くは、歴史的な学問の体系にもとづき深く専門・細分化された単一学問分野では対処することが難しくなってしまった。SDGsの17の目標はその典型だが、科学技術が現代のさまざまな問題と向き合うには、これまで個々に発展してきた学問体系を越えて新しい分野を定義し取り組む、または複数の分野が連携することにより、新たな融合領域を生み出して取り組むことが求められている。そうすることで、既存の分野であっても新たな発見・進歩が誘発されることも期待できる。現代は多様な価値観が存在する。次なる変化を予測することは難しく、変化にいち早く適応するか、自ら変化を生み出し挑戦することが、未来社会を生きる将来世代に対する責任と結びついている。そのような中、日本は歴史的な転換点を迎えた。過去、資源制約のなか工業立国として製造業を生命線としてきた日本だが、サービス産業の成長、そして近年のデジタル技術に立脚したビジネス・産業構造の変革、グローバル化を進める産業がある一方で、互いの国を意識してより国際化を進めていく流れ、そして新型コロナウイルス禍と、対応を迫られる課題は目白押しである。他方では、いくつかの国・地域にみられるポピュリズムの台頭や、米中に端を発する貿易戦争・技術覇権争いを前にした複眼的な対応が求められている。わが国は人口減少に伴う少子高齢化の回避が難しく、社会保障費の上昇は未だ歯止めがかからない。各地の一次産業だけでなく、二次産業・三次産業もコロナ禍で多大な影響を受けている。一方で要請の高いハイテク産業を担う人材は不足している。日本は国のあり方、社会・行政・教育・福祉・経済、防災、感染症対策、あらゆる面で、従来の延長線ではない考えと行動が必要とされる。内外の環境変化に対応しながら、将来にわたり持続的な発展をするためいかなる方策をとるかが決定的に重要な局面にある。しかし、各種の統計指標で語られる日本の科学技術力の相対的な低下や人材不足等の諸問題への解は、見出されていない。さらに、国民生活にとっての生命線は、自国で必要最低量をまかなうことのできないエネルギー、資源、医薬品・医療機器、そして食糧の輸入であろう。2018年のわが国の輸入総額は約80兆円/年で、石化製品を含むエネルギー・資源関係がおよそ半分を占める。一方、現在の輸出は約81兆円/年で、自動車、機械・精密機器・電子部品、素材、が大半を占める。この輸出入の「入り」と「出」を使いながら、内需の産業と生活が実体経済として回っている（わかりやすさのために金融収支等を除いている）。すなわち、多くは工業製品の輸出によって、エネルギー・原材料の輸入がまかなわれているという大局的構造は、現時点でも続いていることは認識しておく必要がある。輸出を担う主要産業は、すり合わせ技術の集大成から生まれる自動車産業、機械・製造装置産業、長年の技術蓄積が必要な素材産業であり、その源泉にあるのが企業や大学等の研究開発である。世界中でモジュール化が進んできた今は、電気自動車用の蓄電池、自動運転用のAI/システム技術、5Gサービスの拡がりなどが、デジタルトランスフォーメーションの潮流とともに大競争を迎えている。わが国はこれらに活路を見出すことができるかどうかは全く予断を許さない状況にある。 AIに代表されるICT関連産業は重点化され投資が拡大しているものの、米中から台頭したGAFAやBATH等のプラットフォーマー企業への比肩を期待できる日本からの兆しはなかなか見つからない。サービス産業は日本のGDPの大半を占め、多様なサービスが日本企業により運営されているが、ICT関連産業においては海外企業の占めるウェイトが大きい。

今、AIのソフトウェア・プログラマー人材やデータサイエンティストが注目されているが、さらに着目すべきは、クラウドのサイバー世界と、素材・デバイスのフィジカル・現実世界との境界にまたがる領域にある。いわゆるサイバー・フィジカル・システム（CPS）の世界であり、Society 5.0を実現するうえでのコア技術が位置する概念である。この領域が、5Gやさらにその先の6Gの新市場を牽引していくと考えられる。 CPS

領域で活躍する人材はわが国においては圧倒的に不足しており、特に高度なテクノロジーを備えた人材への需要はしばらく止まないだろう。 CPS実現の要はAIとIoT、そしてロボティクスであり、AIの技術開発では米中が世界で圧倒するが、IoTやロボティクスに関しては日本にも大きな可能性がある。産業や生活空間におけるあらゆる物理的・化学的・生物学的なアナログ情報を、デジタル化してサイバー空間とつないでいこうとする大きな流れがあるが、技術的ボトルネックとなるのはサイバーとフィジカルのインターフェース、すなわち情報を取得し信号変換するセンシングデバイスと処理デバイス、それらを統合するシステムにあるといえる。アナログ情報をデジタルへ信号変換すること自体は容易だが、問題はIoTで得ようとしている多様なアナログ情報の多くが、微小・微弱であり、バラつき・ノイズが大きく、センサ材料・デバイス技術がボトルネックとなることである。しかし、これらには日本の産学が長年培ってきた技術的蓄積による基盤がある。今後のIoTデバイスはサービスが多様になるために、求められるデバイスも多様化し、ある特定の製品だけが他をすべて駆逐して“勝者総取り”とはならない。製品を出荷しているメーカーには大きなビジネスチャンスがあり、IoT機能を製品・サービスに付加することで、製品単体の売切り型から、製品ライフサイクルを通じたサービスビジネスへと変わっていく。 IoTではコストと機能が優先されるため、高コストの最先端微細加工半導体だけによらず、多様な半導体へのニーズが生まれている。電子部品、センサ、アクチュエータなどの異種機能を集積化して実現する半導体が肝となる。すでに多くの競争力ある企業（ロボット、自動車、機械、電子部品）が日本には集まっており、日本の半導体ウェハ生産能力も、最先端の口径300mmのラインだけでなく200mm以下も含めると世界的にトップクラスを維持している。今後、製造業、部品・部材・デバイス・機械産業の技術的・人的蓄積と、大学や国立研究機関などからの新しい技術提案とが噛み合って、IoT展開の可能性を追求していくことが日本再生の鍵となろう。

地球全体に目を向ければ、国連サミットでSDGsが採択され、人間と地球が調和する持続的な発展へ向けて取り組む流れはより強力になっていく。特に、境界条件が明らかになってきた地球環境と人間活動とを調和させ、そして誰一人取り残さない社会をどうすれば実現できるのかという、社会にとって多くの困難を伴うであろう大目標へと向かっている。大気・海洋・河川・土壌・森林の持続性や、生態系・動植物の多様性確保、貧困の撲滅、農業・食糧生産の持続性、教育や医療への公平なアクセス、感染症対策、温暖化の影響にも関連する災害対応・防災など、これらはいずれも一国だけでは成しえない目標であり、日本にとっても重要な検討課題である。例えば、再生可能エネルギーの導入拡大や、サーキュラーエコノミーの実現およびカーボンニュートラルの鍵とされる水素の利活用方策、マイクロプラスチックによる海洋汚染対策、AIやロボティクスを用いた先進医療技術などさまざまな挑戦が始まっており、これらの重要なドライバーの1つが、先端材料やナノテクによる革新であり、またそれを有効に動かすデジタルトランスフォーメーションである。

（2）私たちの生活に直結するテクノロジー

先端材料やナノテクは、私たちの生活を取り巻くさまざまな素材や製品の開発に用いられている。一般消費者が手にする製品であれば、日用品や衣料品、スマートフォンなどだが、これらは一見しただけではどんな素材でできているのか、どんな先端技術が活かされているのかはわからない。ましてこれほど普及したIT機器を構成する素材には、気を留める消費者はほとんどいないだろう。しかし、熱を発する人工繊維でできた衣服や、皆が楽しむ色鮮やかなSNS写真を生み出すディスプレイやスマートフォンのカメラ、さらには、排気ガスをほとんど出さない車や自動運転車など、社会が求める機能を次々に実現していく源泉には、いつも新材料や新デバイスがある。2014年のノーベル物理学賞の対象となった青色LEDも、材料のイノベーションを成し

遂げた研究者・技術者たちによってもたらされた。次に期待されるのは、抗ウイルスの表面機能を持った衣料素材の開発や、希少資源に頼らない環境に優しい材料、患者への負担が少ない治療や診断を実現する素材や機器、再生可能エネルギーを生み出したり貯めたりするデバイス、そして世界中の子供たちに夢を与えるような、あっと驚く機能を発揮するような新材料・新デバイスを用いたサービスであろう。さらに、廃水を綺麗にする材料や、災害に強い材料、壊れても自己修復する材料、光、電気、磁気、熱、音などのエネルギーを自在に制御して相互に変換する材料、危険を予測・検知するセンサなど、イノベーションが求められる領域は広がっており、そのための技術シーズへの期待は高い。こうした新材料・新デバイスのイノベーションを牽引している1つが、今も進化を続けているナノテクだと考えることができる。ナノテクは一般に1nmから100nm程度の範囲の微小世界を対象としているが、3次元で考えれば原子が数個から数万個集まった分子がこの領域に入る。物質が発現する多様な機能はこのスケールで生み出される。人間の目で観察できるサイズの世界では、人工物と生体は全く異質でつながらないものだが、ナノレベルの世界では共通の原子が見えて、類似の分子が確認できるようになる。つまり、人工物と生体との融合は「ナノの視点」を持って初めて可能になる。事実、ナノバイオテクノロジーという融合領域の研究が世界で進み、新たながん治療技術や、生体信号センサへの応用開発などにつながっていく。今般のような感染症ウイルスの分析デバイス開発にも、ナノテクは1つの鍵になっている。

こうした応用を実現するために欠かせない技術が、物質や材料を精密に制御・加工して、デバイス・製品を製造する技術である。その代表格が半導体プロセスにおける微細加工技術である。物体を削りながら構造形成する“トップダウン”の加工技術であり、半導体チップに用いられる最先端微細加工プロセスは、近年シングルナノ（10nm未満）世代の回路を構成するにいたり、極端紫外線（EUV）光を用いることで究極の微細加工技術として2018年に実用化された。現在の最新スマートフォンには7nm世代と呼ばれる技術が実装され、さらに今、5nm、3nm世代の開発が進んでいる。微細加工プロセスに実に20年ぶりの技術転換が起こった衝撃は大きく、今後しばらくは、5G～6G通信用半導体チップ製造や、AIを構成するコンピューターチップ製造のコア技術の1つであり続けるだろう。一方、生命の根源であるDNAからアミノ酸→タンパク質→細胞→組織→個体と“ボトムアップ”に形態を構成していく生体は、DNAらせん構造の直径が4nmほどであることから、微細加工技術が到達する極微スケールとほぼ同じサイズから始まる。そして自己組織化によってメートルスケールの構造を実現している。今、最先端のナノテクを駆使して、DNAやその関連分子をパーツとして複雑な構造物を人工的に合成する研究開発も行われている。ウイルスのワクチン開発に用いる技術の1つとしても期待が集まる。また、電子顕微鏡の分解能は0.039nm（2018年時点の世界記録）に達し、ナノからさらに2桁も小さな極微世界を観察できる究極的な技術にまで到達している。2017年のノーベル化学賞の対象となったクライオ電子顕微鏡の登場によって、生体内で重要な働きをしているタンパク質を3次元構造として観察することもできるようになってきた。原子分子のレベルまで見えるようになると、これを活用して生命の仕組みを解明することで、新たな医薬品や診断技術の開発、生体機能を制御・修復する材料の開発、新しいエネルギー変換技術や優れた材料の合成技術、さらには脳を模倣した人工知能型デバイスの開発などが視野に入ってくる。これらはまさに、先端科学技術の研究開発と、製品・サービスをデザインしていくビジネスによって初めて可能になるもので、多様なバックグラウンドを持つ専門家の協働と異分野融合が肝となる。

（3）次世代へ向かう変化の視点

日本の失われた30年とともに社会を取り巻く産業構造は様変わりしているが、情報機器のデジタル化によっ

て目に見えないサイバー空間は拡大し、市場を大きく牽引している。サイバー空間の構成要素であるインターネットもAIも、そこにある膨大なデータも際限なく拡大し、ICT産業やサービス産業を通じて使用される情報機器の進展と相まって、見えないサイバー空間を増幅させている。これらサイバー空間を実現する機器とその素材には、常にイノベーションが要請されている。上述のナノテクに関していえば、当初に期待された技術のいくつかは実現してきたといえるが、一方でまだ、自己組織化によって優れた材料が原子・分子から自動的に組み上がったり、複雑な機能を持ったナノマシンが大活躍したりといったことには距離がある。世界中で今も挑戦は行われているが、熱力学的な限界も明らかになり、2000年代初期の一種のフィーバーとは異なる、冷静で着実な研究開発が継続しているとみるべきだろう。同時に進むのが、先端技術のELSI/EHSの側面である（ELSI：Ethical/倫理的, Legal/法的, and Societal/社会的 Issues、EHS：Environmental, Health, and Safety）。ブダペスト宣言以来「社会における、社会のための科学」が国際的な共通項となったが、日本では自然科学と人文社会科学との間にある隔たりや、先端科学技術と企業経営との乖離に課題があり、私たちは今、大きな問いを投げ掛けられている。

図1.1.1-1はSociety 5.0で掲げられるビジョンの実現に際し、その基盤となるナノテク・材料技術の例を示すものである。社会の変化とともに求められる応用技術は変化していくと考えられるが、その基盤となる技術群を磨き続け、社会とともにその新たな方向性を見出していくことが一層重要であろう。

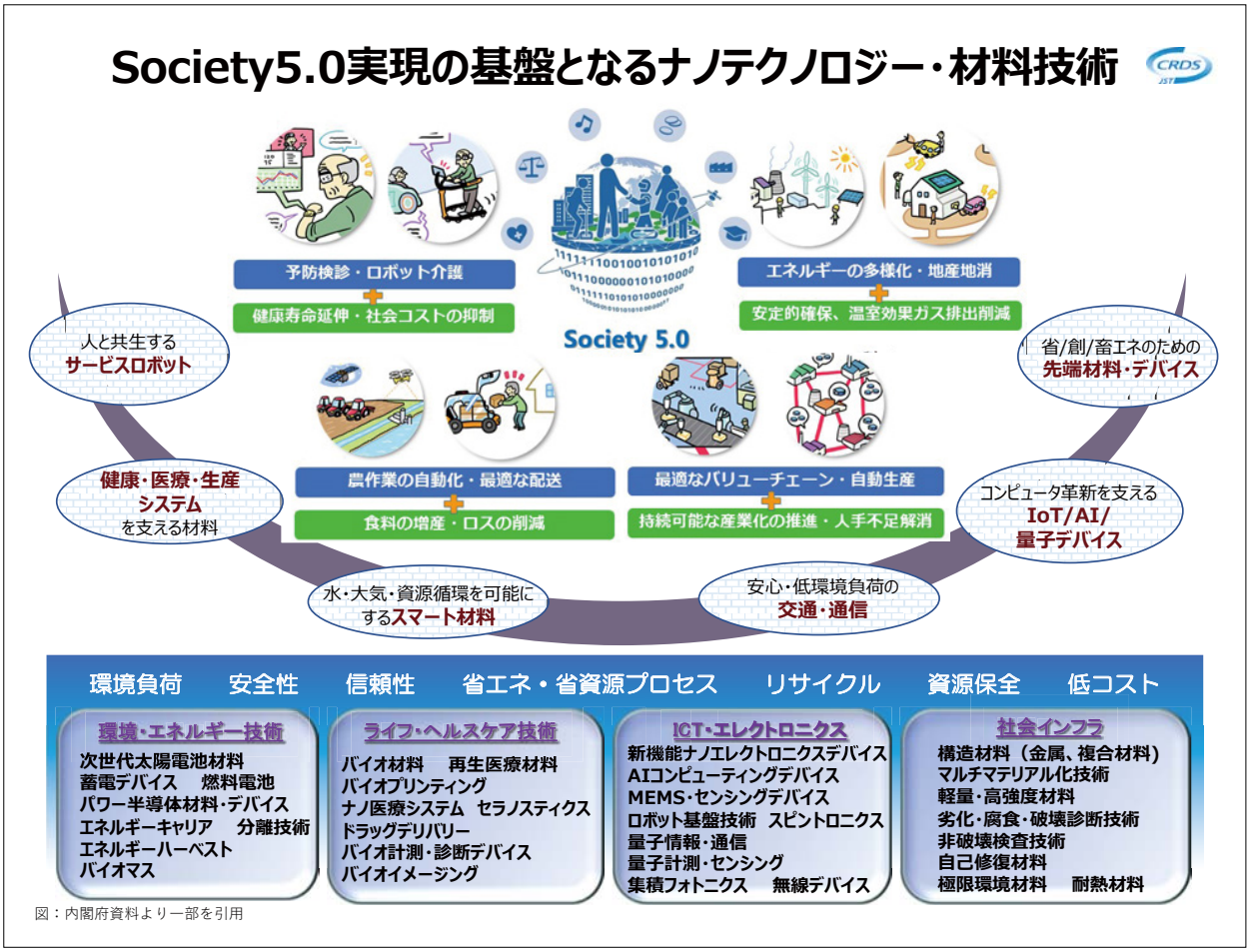


図1.1.1-1　Society 5.0実現の基盤となるナノテクノロジー・材料技術

1.1.2 科学技術の潮流・変遷

本項ではまず、材料とナノテクのそれぞれの観点から技術進化の歴史的変遷を概観したうえで、今起きつつある技術的な潮流を述べる。

（1）材料科学技術の進化の歴史

金属、プラスチック、セラミックス、半導体など、多様な材料が新たに出現することにより社会の変革がもたらされてきた。鉄鋼を中心とする構造材料が18世紀の産業革命を支え、ジュラルミンなど軽量合金が航空機時代をもたらした。ナイロンの発明は日常生活、とりわけ衣料・服飾界に革命を招来し、半導体をはじめとする電子材料は情報通信の飛躍的発達をもたらした。材料科学技術が、新しい機能を持つ材料や飛躍的な性能向上をもたらす材料を生み出し、時代を切り拓いてきたといえよう。日本はこれまで、物質・材料研究を積極的に進め、新材料技術の開発では世界に先行する場面が多く、部素材の基幹産業を支えながら新しい産業を生み出してきた。以下、これまでを振り返り、材料の発展に対する日本の貢献についていくつかの例をあげる。

1980年にJ. B. Goodenoughと水島公一（当時、Oxford大学）により、リチウムイオンを吸蔵するリチウム遷移金属酸化物を電池の正極に使用する電池が提案された。1980年代には、負極に炭素、正極に$LiCoO_2$という正負極材料を組み合わせた現在のリチウムイオン電池の原型にあたる基本構造が吉野彰（当時、旭化成）により考案され、1986 年に実用的なプロトタイプが完成した。1991 年に実用化され、その後ノートパソコンや携帯電話のようなポータブル電子機器に広く使用できるようになった。リチウムイオン電池の大型化が進み、電気自動車の蓄電池や非常用電源、さらには気象条件によって時間的に出力が変動する太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの定置用蓄電池としても実用化が加速している。リチウムイオン電池を開発した一人として吉野彰は2019年にノーベル化学賞を受賞した。繰り返し充電可能かつ軽量で高出力なリチウムイオン電池はワイヤレス機器普及の基盤となり、こうした機器は生活に欠かせないものとなった。今後さらなる普及拡大が予想され、化石燃料に頼らない社会の実現可能性を高めたことによる貢献は、ノーベル賞受賞理由において「人類に最大の恩恵を与えた」として高く評価されるにいたった。

1917年に本多光太郎が初めて人工的に合金で構成される永久磁石KS鋼を開発したが、永久磁石でもっとも強力とされているネオジム磁石は、1984年に住友特殊金属（現：日立金属）の佐川眞人によって発明された。その後改良が重ねられ、現在、ネオジム磁石は電気自動車、風力発電、ハードディスクやMRIなどさまざまな分野で利用されている。その生産量は年々上昇を続け、焼結製品だけでも世界で年産13万トンに達している。

1968年の本多健一と藤嶋昭（当時、東京大学）による酸化チタンを用いた光電気化学（ホンダ-フジシマ効果）の発見は、その後数十年を経て、耐候性に長けた汚れのつかないセルフクリーニング（光触媒コーティング）技術として1,000億円規模の産業を生み出すにいたっており、また人工光合成という究極のクリーンエネルギー技術に挑戦する研究開発では、日本が世界の最先端をリードしている。

1986年には、赤﨑勇と天野浩（当時、名古屋大学）により窒化ガリウムの高品質な単結晶膜形成等の研究成果が生まれ、1993年に中村修二（当時、日亜化学工業）らによりInGaN（窒化インジウムガリウム）を用いた高輝度の青色LEDが開発された。その後1996 年には、量子井戸構造を用いた青色LED および青色レーザが世界で初めて実用化された。この青色LEDと蛍光体とを組み合わせることで白色LEDが実用化された。白色LEDの実現により、液晶ディスプレイのバックライト光源、高効率な一般照明、車載ヘッドランプなどとして世界的に普及が進んでいる。高輝度で省エネルギーの白色光源を可能とする青色LEDの発明に対して、赤﨑・天野・中村の三氏は2014年にノーベル物理学賞を受賞した。さらに今、コロナ禍において屋内の

ウイルスを不活化する紫外線LEDランプに展開し、ウイルス防護・対策の手段として普及拡大が期待されている。

1995年に、ハードディスクに情報を高密度に書き込み、その記録を高速に読み取る磁気ヘッドに関して、宮崎照宣（東北大学）らが室温で有為な大きさ（20%）の磁気抵抗比を持つトンネル磁気抵抗素子（トンネル障壁材料はAlO_x）を開発した。その後、2004年に湯浅新治（産業技術総合研究所）らは、トンネル磁気抵抗素子のトンネル障壁材料を酸化マグネシウムに置き換えることにより、磁気デバイス応用の鍵を握る磁気抵抗比の大幅向上を達成した。2007年に実用化され、現在の大容量ハードディスクの磁気ヘッドとして世界中で使用されている。

1994年、細野秀雄（東京工業大学）らによって発見された、TAOS（透明アモルファス酸化物半導体）は、アモルファス相でも高い電子移動度を有する透明な酸化物半導体である。この一種であるIGZO（In-Ga-Zn-O）を半導体材料として用い、ディスプレイ応用などで低消費電力化が可能な薄膜トランジスタ（TFT）としての動作を2004年に実証した。現在スマートフォンやタブレット端末をはじめとした製品にディスプレイとして組み込まれている。

ナノスケールの特徴的な構造を持つナノカーボン材料においても日本の貢献は大きい。その代表例の1つであるフラーレン（C_{60}）は、1984年にクロトー（英）、スモーリー（米）、カール（米）によって発見されたが、炭素の6員環と5員環からなるサッカーボール構造については、1970年、大澤映二（当時、北海道大学）が構造モデルを発表している。同じく、代表的なナノカーボン材料であるカーボンナノチューブ（CNT）は、1991年、飯島澄男（当時、NEC）が発見し、炭素6員環ネットワークが筒状になった構造モデルを発表している。1970年代から炭素繊維を研究していた遠藤守信（信州大学）は、その後、気相法によるCNTの成長技術を開発し、量産化技術へと発展させた。このように日本が主導してきたナノカーボン材料は、2004年に登場した炭素の2次元原子層であるグラフェンへと発展し、特異な電気的、機械的、化学的性質を有することから、電子デバイス、スーパーキャパシタ、ディスプレイ、強靭な複合材料、医療・バイオ用材料などの工学的応用への期待が高まっている。日本が世界市場の過半を有する複合材料の代表である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、1961年における進藤昭男（産総研）らによるPAN系炭素繊維の製法開発とそれに続く日本の企業による長年の製品開発の結果、高品質の軽量高強度材料として量産化が可能となり、航空機や自動車への採用が進むにいたっている。図1.1.2-1に日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクトとして主要な事例をあげておく。以上の例も含め、物質・材料の発見から応用技術が開発され、試作品の完成、信頼性の確保、量産化技術の開発を経て世に出るまでは通常、15～30年といった長い年月を要する。近年はグローバルな開発競争が激しくなっており、研究開発から実用化までのスピードが要求され、日本が先導的な役割を果たせるかは予断を許さない状況になっている。その意味で、進展の著しい計算科学やデータ科学を駆使することによる、物質・材料に関する未知の知識発見や最適化を高効率に行おうとするマテリアルズ・インフォマティクスの研究開発アプローチが世界的に拡大している。

（2）ナノテクノロジーの進化の歴史

20世紀後半は科学技術の進歩によって、驚異的な経済発展が遂げられた世紀である。その先駆けとなったのが量子力学の登場である。量子力学をベースに物理や化学に大きな発展があり、特に第二次世界大戦後はそれら学問を基盤にした工学が発展し、新技術が生まれ、多くの産業が開花した。とりわけ半導体産業は、1947年のBardeen、Brattain、Shockleyらによるトランジスタの発明を起点に興り、後にムーアの法則と呼ばれる半導体技術の微細化ロードマップに従う形で集積回路チップ上の素子の微細化と高集積化が進み、電子機器の飛躍的な性能向上と普及につながっていった。

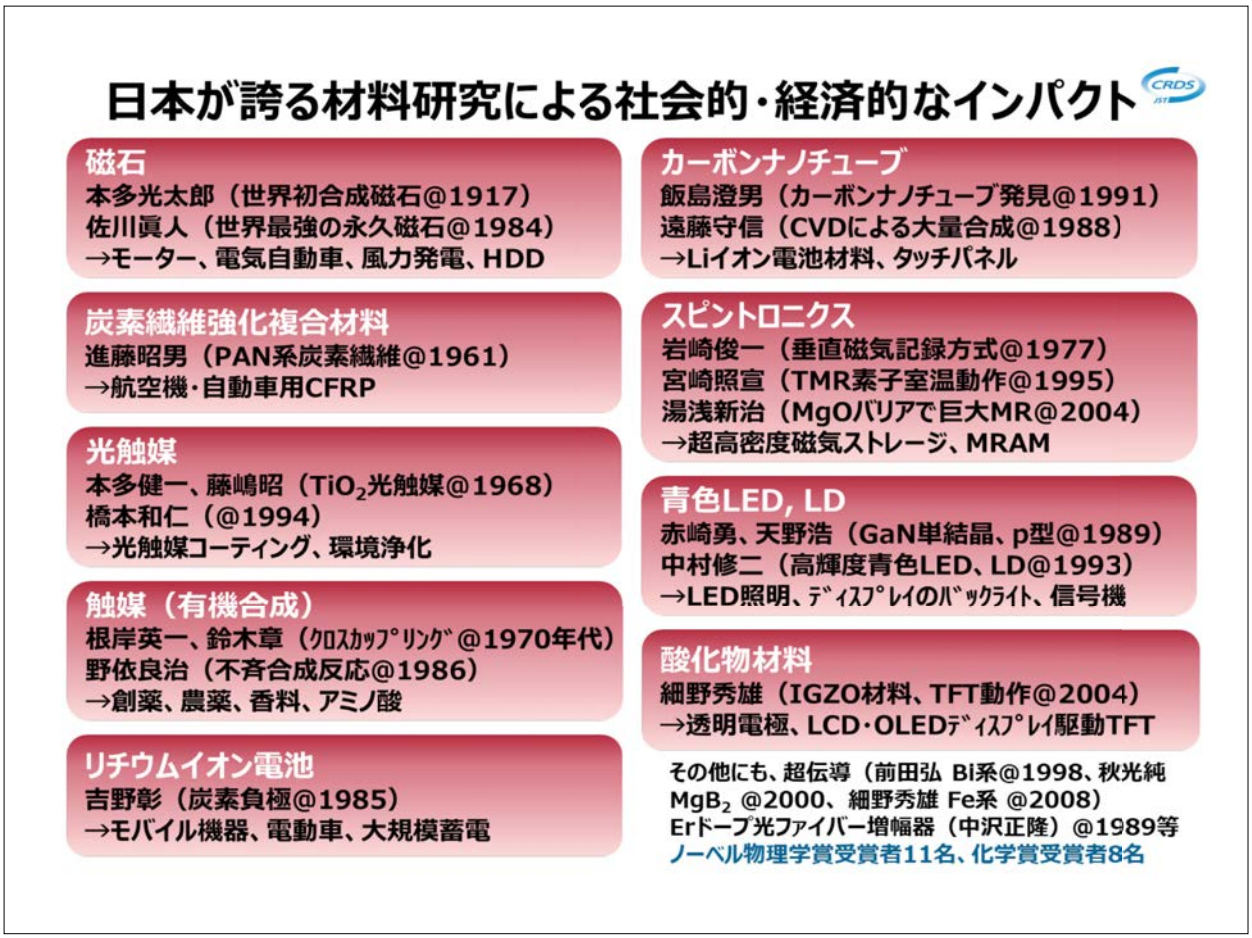


図1.1.2-1　　日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクト

このような先端技術の流れのなかで、後のナノテクノロジーの興隆を予見した言葉として、ノーベル物理学賞を受賞した米国のFeynmanのコメントが良く引用される："There's a plenty of room at the bottom"。1959 年、米国物理学会の講演で原子分子レベルの現象を扱う科学技術の可能性を予告したものである。その3 年後の1962 年、久保亮五（東京大学）は金属微粒子における量子サイズ効果を理論的に計算し、ナノサイズになると通常のバルク材料とは異なる性質が現れることを示した。これは、ナノスケール効果の最初の具体的理論予測といえる。他にも1960 年代には、日本の大きな貢献として、トンネルダイオードでノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈の半導体超格子の提案と実験（当時、米国IBM 研究所、1969 年）がある。1974 年の生産技術国際会議において、谷口紀男（当時、東京理科大学）が初めて「ナノテクノロジー」という言葉を用いて、技術の概念提唱を行っている。

図1.1.2-2は社会・産業の変遷とともに、ナノテクノロジーがどのように進化してきたのかを示したものである。図に示すように、1990年代になると、半導体のLSIがコンピュータや通信機器をはじめ多くの電子機器に広く使われるようになり、電子機器のデジタル化が急速に進んだ。一方、東西冷戦の終結以降、米国において軍のなかに閉じ込められていた多くの先端技術が民間に開放され、積極的に民用展開が図られていく。GPSやARPANET（Advanced Research Projects Agency Network）などの通信ネットワーク技術がその代表例であろう。やがて、ARPANETはインターネットに進化して人々の生活に大きな影響を与えるように

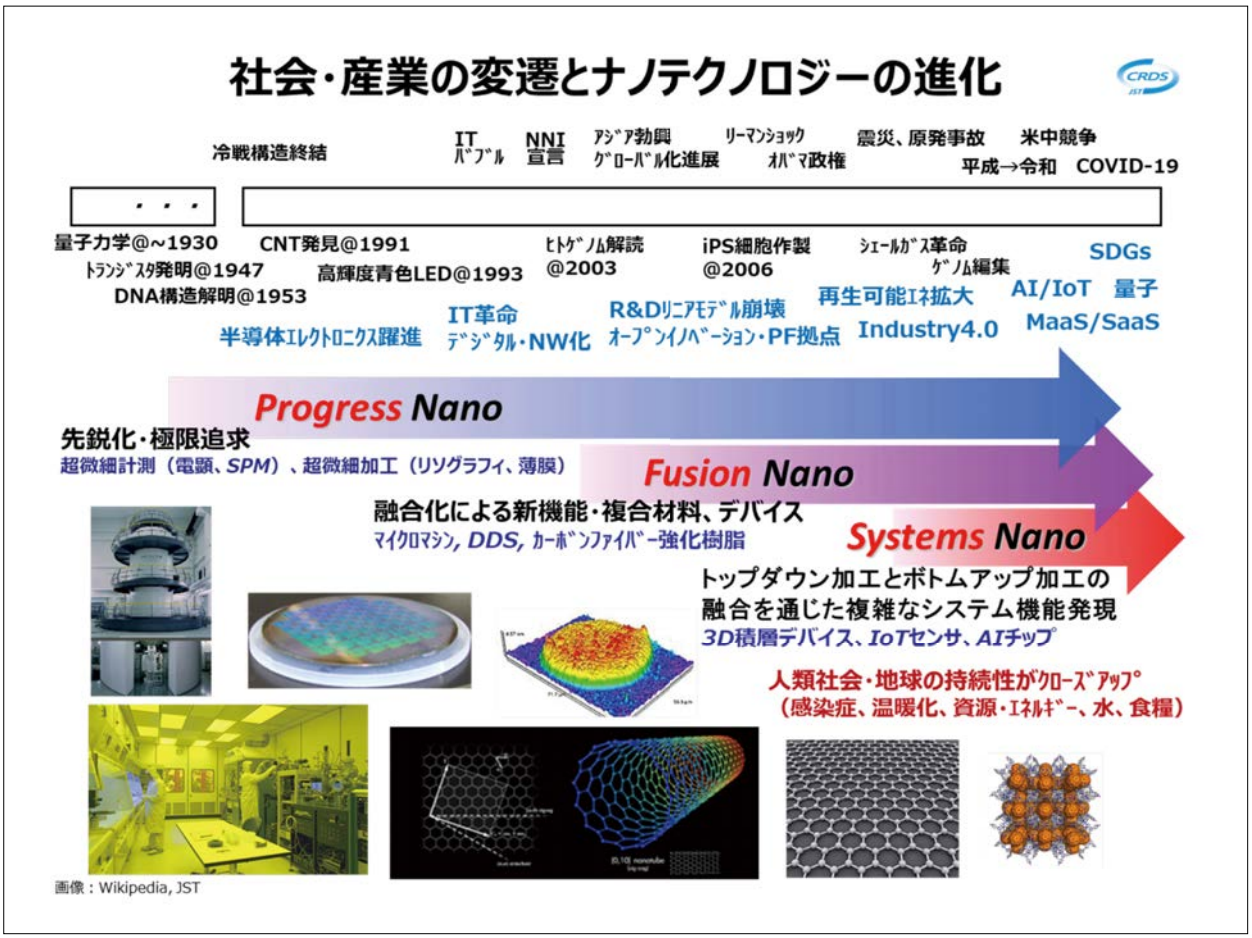


図1.1.2-2　　社会・産業の変遷とナノテクノロジー・材料の進化

なる。先に述べた半導体の微細化技術の進展により、電子機器のデジタル化が進むとともに、インターネットを中心に進展する情報のネットワーク化が、その後のIT革命を牽引した。1990年代後半以降、半導体の微細化限界が顕在化するにつれ、それを突破する技術革新（3次元積層技術やEUV極短紫外線露光技術）が求められるようになる。同様にハードディスクなどのストレージの世界でも半導体のムーアの法則を上回るスピードで、記憶セル領域の微細化、記憶容量の大規模化が進み、技術革新が常に求められた。これらがナノテクの研究開発をドライブし、IT革命を支えるナノエレクトロニクスの研究が時代の中心的テーマでもあった。

2000年代に入ると、米国が「国家ナノテクノロジーイニシアティブ（National Nanotechnology Initiative：NNI）」を開始する。米国は当時のIT革命を支える情報通信技術やソフトウェア技術で、またバイオテクノロジーの分野で他国の追随を許さず、それらの技術が生み出す産業分野で独走状態にあった。一方で、21世紀の先端技術産業を展望すると、物質科学に裏打ちされたナノスケールの物質制御技術の重要性がクローズアップされつつあった。当時、すでに物質科学をベースとする新しい技術として、CNTやGaN青色発光素子などが日本で生まれており、21世紀も米国が経済的、軍事的な覇権を握るためには物質科学をベースとするナノテクの技術開発競争で世界をリードすべきとの強い危機意識が、NNIにつながったとみられる。

同じく2000年頃から、生命科学分野でも技術の大きな躍進がみられる。きっかけはヒトゲノムの解読技術

や遺伝子組み換え技術に代表されるバイオテクノロジーである。生命科学の躍進に対して、多くの情報科学者やナノテク・材料研究者が生命科学・バイオテクノロジーとの境界領域の研究開発に参入した。その後の進歩は著しく、ES細胞研究やiPS細胞の創出をはじめ、ゲノム編集のような新技術の獲得が次々と起こり、まさに100年前の量子力学が創生期から実用へと徐々に向かった様を彷彿とさせる。現在の先端技術産業を支える物質科学の源に量子力学のベースがあることを考えると、生命科学分野の膨大な知の蓄積が人類にもたらす恩恵は計り知れないが、同時に倫理的な側面や安全性についても社会的な合意形成やルール作りが必要になっている。量子力学という新しい学問分野の出現からそれを産業として現在まで発展させるのに人類は100年余を要した。しかしこれまでに物質科学をベースに発展してきた分子・原子レベルの計測技術、シミュレーション技術、データ科学、ナノスケール微細加工や物質合成技術といったナノテクが強力なツールとして機能することで、はるかに短い期間で、生命科学における知の蓄積が、医療・診断・健康といった社会・産業技術として開花するものと期待される。事実、遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物等から得られる生体情報を数値化・定量化するための技術やデバイス・装置のほとんどが、ナノテクや材料技術の寄与なくしては実現不可能なものである。ナノ粒子をキャリアとした薬物送達システム（ナノDDS）は、疾患部位へ効率的に薬物を到達させ、薬効を制御するとともに副作用の低減を可能にした。温度感受性ポリマーは細胞培養基材に応用され、生体に移植可能なシート状の細胞集合体形成を可能としている。

デジタルテクノロジーの恩恵を受けながらこの20年間に私たちの生活は驚くほど豊かになった一方で、SDGsのような人類社会の持続性にかかわる重大かつ根源的な課題に直面している。化石資源から発せられるCO_2をはじめとする温室効果ガスに起因する地球温暖化問題、世界全体での人口増大や経済活動の拡大に起因する、エネルギー、水、食糧、資源の不足・枯渇、環境汚染や感染症対策などである。この解決には科学技術の総力をあげた取り組みが不可欠であり、なかでも物質科学をベースに情報科学や生命科学を融合した領域でのイノベーションが求められており、ナノテクの進歩は欠かせない要素である。

ここまで、ナノテクを取り巻く環境の歴史的変遷を述べたが、時代の要請、技術の進展に伴って、ナノテクの役割は進化していった。その進化の過程は技術の先鋭化→融合化→システム化と3つのステージをたどっていくものとして国際的に認識されているが、新しい技術の登場、新しい社会的課題の顕在化によって、上記の過程は繰り返され、それらは重層的、階層的に世代推移をしている（ナノテクの進化過程については俯瞰報告書2017年版を参照）。

（3）現在の技術潮流

■ Society 5.0の実現

Society 5.0の実現には、コンピューティング技術の向上がボトルネックになる。その性能向上の担い手である集積回路は微細化の限界に直面しており、従来の CMOS ロジック回路によるノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上が困難になってきている。電子機器の発展において、半導体、特にCMOSの微細加工技術の進展が果たしてきた役割は非常に大きい。インテル社創業者の一人であるゴードン・ムーア氏提唱の「ムーアの法則」をよりどころに、IBM 社のロバート・デナード氏による「スケーリング則」の設計指針もあり、3 年または 2 年で 4 倍の集積度と 20～30%の動作速度向上および低消費電力化を達成してきた。半導体産業は微細化による技術革新で電子機器の高性能化と製造コスト低減を可能にし、その適用対象を大型計算機からパーソナルコンピュータ、デジタル家電、モバイル、クラウドサーバへと変えながら、電子機器産業全体を牽引してきた。

1998年から国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for

Semiconductors：ITRS）が発行されるようになり、ムーアの法則を堅持する課題を国際的に共有する活動へと発展し、国際学会でも新たなデバイス構造や材料適用の提案が相次いだ。 ITRSは2017年以降、IRDS（International Roadmap for Devices and Systems）に衣替えし、半導体からより広がって次世代コンピューティングデバイス・システムのロードマップを公表している。現在はIRDSの2020年版ロードマップが公開されており、次世代AIデバイス、脳型コンピュータ、量子コンピュータ、これらを実現するデバイス新構造や新材料など、より広範な新デバイス・新材料が取り上げられている[1]。

半導体の微細化限界を突破するためには 3つの方向性があるとされる。1つ目は、さまざまな機能のデバイス（CMOS、スピンデバイス、フォトニックデバイスなど）を 3次元的に集積化する流れである。2つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新計算原理・新アーキテクチャを取り入れるアプローチによるものである。3つ目は、デバイスを構成する材料そのものを見直そうとするものであり、近年ではトポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的特性を活かし、消費電力低減と超高速化を同時に実現する革新デバイスの創製をめざす流れである。 EUVやナノインプリントリソグラフィなどの露光技術や3次元化集積技術の導入により、今後も微細化・集積化は当面続くものと予想されるが、集積回路の性能向上、消費電力低減の傾向は確実に鈍化している。IoTの進展やビッグデータなど、巨大で複雑なデータ処理への要請が高まり続けていることから 微細加工だけによらない性能向上をめざす動きは活発化してきている。すでにメモリでは3次元に積層することでスケーリングを実現するデバイスが量産され、ロジックデバイスでもチップを積層する技術が導入されている。今後はシステムレベルで新たなアーキテクチャが展開されることが重要になる。 Society 5.0 の実現に向けては、新しいコンピューターシステム、アルゴリズム、アーキテクチャ、デバイス・材料などの技術レイヤー全体を含むコンピューティング技術の革新が望まれている。

一方、ビッグデータを活用したCPSの進展は、ナノテク・材料の技術開発そのものにも大きな影響を与え始めている。日々更新され、新規に追加される大量の材料データが蓄積されることで、そこから新たな材料に関する知識発見が可能となり、所望の特性を持つ材料の効率的な探索、開発が可能になる。材料科学技術と情報科学技術の融合が必要であり、データ駆動型材料開発、材料研究開発のDX化の取り組みは、世界的な競争領域であり進展への期待は大きい。コンピュータの能力向上は、材料、部品、さらには複合システム品の設計開発を行うシミュレーション技術の可能性を広げている。量子力学が支配するナノスケールの構造から始まって、最終製品に近いマクロスケールの複合システム品までを一貫して設計するマルチスケールシミュレーションの研究開発も進む。さらには、これらのデジタル化された設計データをもとに、目的の構造物を自在に作成可能な3Dプリンティング技術の進歩も著しく、情報科学技術に牽引されるCPS、DXの進展が、ナノテク・材料・デバイスの製造技術を含む、ものづくり技術全般の革新をもたらしている。

■ポスト/withコロナ時代のヘルスケア・医療に求められる新たなナノテクノロジー・材料

コロナ禍によって、わが国の社会保障・ヘルスケア・医療体制は本報告書執筆の2021年初頭段階で重大な局面が続いている。逼迫する医療資源のみならず、感染の日常的な予防技術やその仕組み、より正確な診断・分析技術、重症化の抑制、ワクチン開発などに、新たなナノテク・材料科学技術の適用とそれらの早期実用化が求められている。コロナ禍以前から、わが国では平均寿命が年々延び、1975年に女性77.35歳、

1 IRDS 2020 Edition, https://irds.ieee.org/editions/2020（2021年2月16日アクセス）

男性72.15歳だったものが、2019年には女性87.45歳、男性81.41歳と、10年近く延びている。一方で健康寿命と平均寿命には10年程の開きがあり、この差はなかなか縮まらない。人生における不健康な期間をできる限り短縮し、健康寿命を延ばすことは、QOL（Quality of Life）向上による活力ある社会の実現と、医療や介護にかかる社会保障費抑制の観点から喫緊の課題である。できるだけ病気にならないこと（健康維持）、罹患した病気を治すこと（疾患治癒）、身体の機能低下・損傷部位を補うこと（身体機能の補修・代替）が必要となる。未病段階における超早期診断、健康状態に直結する生体情報のモニター、簡便な診断技術・システム、難治疾患・がん・脳疾患・感染症等の根本的治療、機能を失った組織を代替する技術など、多数の医療・健康ニーズが存在する。これらの医療・健康ニーズに応える技術への要請は年々高まっており、例えば、生体成分やウイルスの高感度検出・分析技術、無炎症・無感染の埋め込みデバイス・ウェアラブルデバイス、組織・臓器再生、ヒト組織・生体環境モデルによる試験研究環境、in vivo診断・治療などの研究開発が期待されている。

感染症をはじめとする諸課題に対応するこれら技術の実現には、生体と物質の間で生じる諸現象を制御する材料・デバイスが必須である。例えば、生体組織が再生し機能を発揮するように細胞を誘導する材料や、生体と物質・情報をやりとりすることで検査・診断・治療を行う材料・デバイス、体外で細胞の3次元組織化を実現しモデル組織を構築する材料などが該当する。一方、生体組織や細胞、体液などの生体を構成する成分に接して利用される「バイオ材料」は、機能発現の以前に生体から異物認識されない生体適合性を有することが不可欠であり、そのためには多様な生体環境に対する適合性の発現メカニズムを解明することが鍵になる。

医薬品の開発は、長期にわたり多額の投資を要するが、新規医薬品（低分子化合物）開発の成功率は0.004%と極めて低く、また、臨床試験に入ったものであっても承認にいたる確率は40%程度である。これは前臨床試験において動物で確認された効果がヒトでは得られないこと、いわゆる種差によるところが大きい。動物実験の削減・撤廃に向かう世界的な動きへの対応と、ヒトの薬物動態評価をin vitroで行うことが可能な評価系の確立が求められている。このことが、医薬品開発の高速化・効率化へ結びつく。

■大転換に向かう環境・エネルギー政策、産業と科学技術への期待

今、世界の環境・エネルギー政策は大転換に向かっている。サーキュラーエコノミー、カーボンニュートラル、水素社会、再生可能エネルギーの急拡大など、産業界におけるESG投資の拡大とDXの進展・浸透とともに、各国の環境・エネルギー政策は大幅な転換を求められている。日本の原発事故に端を発した原子力エネルギーに対する見直し、あるいは国・地域によって方向性が分かれてきた原子力や化石資源への依存度合に関する政策変化は、各国の安全保障政策と深く関係し、地政学的な変動が起きている。同時に、SDGs、温暖化・気候変動、生物多様性確保、食糧生産、大気・土壌・海洋汚染・水資源不足など、複雑な地球的問題との連関のなか、各国は中長期的なエネルギー政策の検討を進めている。

再生可能エネルギーに関しては、太陽光や太陽熱エネルギーを利用した発電や風力発電の出力変動と需要家側の負荷変動の影響をバッファする大型の蓄電池や、電気自動車（EV）に代表されるモビリティ用の蓄電池などを普及させていくためにナノテク・材料・デバイス技術の革新が欠かせないと認識されている。発電技術そのものに関しては、電力変換効率とともに耐久性・安定性へのニーズが特に高まっており、また蓄電池に関しては、コバルト等の偏在希少資源依存への対策・代替だけでなく、これまで注力されてきた容量と出力密度向上に、急速充電特性を兼ね備えることへのニーズが特に高まっている。モバイルやIoT、EV、ドローンなどの用途には、蓄電池の性能向上はまさに核となる課題であり、世界的な大競争となっている。日本は世界に先駆けてリチウムイオン二次電池の技術開発を行い、技術的には、これまでずっと世界のトップを走り

続けてきたが、産業の面では近年、中国・韓国をはじめとする国々が市場シェアを拡大しており、日本は厳しい競争にさらされている。特に競争の激しくなっている電池を構成する主要材料（電極、電解質、セパレータ）だけでなく、EVへの実用化が期待される全固体蓄電池で、競争力強化につながる技術革新が求められている。

また、より大きな規模で、各国のエネルギーミックスを再生可能エネルギー中心に変えていくことを考えたときにも、風力、太陽光、熱、地熱、海洋などのさまざまな自然エネルギーから電気エネルギーへの変換、エネルギー採取適地から大規模消費地へのエネルギー貯蔵・輸送のため電気エネルギーと化学エネルギーの間の変換などにも、材料技術の発展は大きく関与することになる。高効率な太陽電池、風力発電用モータや構造材料、炭化水素やアンモニアなどのエネルギーキャリア技術、燃料電池、人工光合成技術などがそうした技術要素となる。

利用可能なエネルギーを生み出す技術だけでなく、社会が生産・消費するさまざまなものを、原料から製造し、使用後に廃棄するまでのすべての過程でのエネルギー消費を削減するためにも材料技術の発展が求められる。あらゆる素材・デバイスの作成・使用過程において、省エネ技術は経済的にも環境的にも極めて重大な課題となっている。

環境面では、大気や土壌汚染の改善・防止技術、河川・海洋汚染（特にナノ粒子も含むマイクロプラスチック）、そして建築物を含む社会インフラの持続性がクローズアップされる。サーキュラーエコノミーの観点から、物質・材料・デバイスを、原料段階から、製造・加工、使用・消費、廃棄、リサイクルの循環まで、科学技術と社会制度・法規制の変革によっていかに実現させるかが、長期的な重要課題となる。もっとも多く使われる主原料である鉄、炭素、水素、酸素、窒素、リンをはじめとして、その他の鉱物元素や生物資源など、あらゆる資源の利用が持続可能となるような技術が強く求められている。同時に、生態系・生物多様性への影響を最小限に抑えることが求められており、自然環境への影響や相互作用が考慮されるものでなければならない。すなわち、環境への影響を考慮しながら、物質資源と生物資源の適切な利活用を実現していくことが、未来を見据えた世界共通の課題である。究極的には、製品として使用したすべての資源を、合理的に再利用するプロセスを実現することが目標となるだろう。そのための要素技術として、例えば、希少資源の低エネルギーな抽出・分離や、採掘・精錬時の環境影響の解決（不要物質や汚染物質を出さない技術）、代替技術、バイオマスの高効率生産、新素材として注目されるセルロースナノファイバーなどを用いることによる、石化製品の代替が期待されている。普及には素材としての性能だけでなく、プロセス・エネルギーコストや、原料資源を大量生産・消費した際の環境影響を、経済性を両立させながら抑えることができるかどうかにかかっている。

1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図）

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生ずる現象を取り扱う科学として発展してきたナノサイエンスを土台に置いている。その土台の上に、作成・合成、評価・分析、解析・設計を行うための基盤技術が構築され、その技術を用いて具体的な物質・機能の設計・制御が実現される。そして、デザインされた物質・機能をデバイス・部素材に適用し、最終的に環境・エネルギー、ライフ・ヘルスケア、情報通信（ICT）・エレクトロニクス、社会インフラなどの分野に対し、横断的に革新をもたらすイノベーション・エンジンとして機能する。これらの全体像を俯瞰図として図1.1.3-1に示す。

ナノサイエンスの土台の上には、たゆまず進展してきた微細加工技術や、材料プロセスと成形が一体化した積層造形などの製造技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能に及ぶ計測、第一原理電子状

態計算による物質構造と機能の予測、シミュレーションやモデリングによる解析技術、データ科学などを柱とした共通基盤科学技術が構築される。そうした基盤技術を利用することで、元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングなどの物質と機能を結ぶ設計・制御技術が構築されている。

これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築され、それら多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、エネルギー・環境分野、ライフ・ヘルスケア分野、ICT・エレクトロニクス分野、社会インフラ分野に貢献することになる。個々の部素材・デバイスの中には、複数の分野で役割を果たすものも多く存在するが、図1.1.3-1では代表分野に集約して記載する。

これら部素材・デバイスは最終的にはシステムとして組み上げられ、低環境負荷、安全性、信頼性、レジリエンス、省エネ・省資源プロセス、リサイクル、資源保全、低コストといった特性も加味されたうえで、持続可能社会の実現（Society 5.0の実現、SDGsの達成）へとつながる様々な社会ニーズに解決策を与える。

また、科学技術が市場あるいは社会に浸透するかどうかを判断する際には、倫理的受容性・持続可能性・社会的要請といった観点からの検討も必要となり、ELSI（倫理的・法的・社会的課題）、EHS（環境・健康・安全）、RRI（責任ある研究・イノベーション）といった考え方にもとづいて、自然科学者と人文社会科学者の対話も必要となる。さらに、研究・技術開発を進めるうえでは施策として重要となる、人材育成策、知財・

図1.1.3-1　　ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2021年）

主要な研究開発領域 （31領域）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	次世代太陽電池材料
	蓄電デバイス
	パワー半導体材料・デバイス
	エネルギーキャリア
	分離技術
ライフ・ヘルスケア応用	バイオ材料
	ナノ医療システム
	バイオ計測・診断デバイス
	バイオイメージング
ICT・エレクトロニクス応用	新機能ナノエレクトロニクスデバイス
	集積フォトニクス
	スピントロニクス
	MEMS・センシングデバイス
	ロボット基盤技術
	量子情報・通信
	量子計測・センシング
社会インフラ応用	構造材料（金属）
	構造材料（複合材料）

俯瞰区分	研究開発領域	
物質と機能の設計・制御	分子技術	
	元素戦略・希少元素代替技術	
	マテリアルズ・インフォマティクス	
	フォノンエンジニアリング	
	トポロジカル材料	
	低次元材料	
	複雑系材料の設計・プロセス	
	ナノカ学制御技術	
共通基盤科学技術	加工・プロセス	微細加工プロセス
		積層造形・レーザ加工
	計測・分析	ナノ・オペランド計測技術
	理論・計算	物質・材料シミュレーション
共通支援策	ELSI・EHS	ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準

図1.1.3-2　　主要研究開発領域

標準化戦略、融合連携促進策やインフラ整備などの共通課題を、俯瞰図面右側に「共通支援策」としてまとめて記述してある。特に、ナノ物質においては同一分子式・重量であっても、形状や表面状態などにより機能活性や有害性が大きく変化するため、健康・環境への影響やリスク評価・管理の検討が重要であり、近年国際的にもナノテクのELSI/EHS/RRIが大きな課題として取り扱われている。

ナノテク・材料分野は、この俯瞰図に示す階層を形成しながら、社会におけるほとんどすべての分野のあらゆるニーズに関係している。現代は、社会の変化スピードが著しく速く、複雑で予測しにくい時代である。俯瞰図上では社会ニーズとして「安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信」「コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス」「健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術」「人と共生するロボット」「水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料」「省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス」の6つをあげているが、これらのニーズも時代の変化とともに変わりうる。しかし、このニーズがどのように移り変わろうとも、図1.1.3-1の下側に示したナノテク・材料に関する科学技術が、変化する社会ニーズに追随し、解決していく/いかなければならないことは間違いない。

本報告書では、国内外の研究開発動向、マクロ環境などを総合的に把握したうえで、ナノテク・材料分野において少なくとも今後10年間程度は定常的に注視すべき研究開発領域として、31領域を抽出した（図1.1.3-2）。これら個々の領域の研究動向や方向性、国際比較について第2章に記載している。

1.2 世界の潮流と日本の位置付け

1.2.1 社会・経済の動向

ナノテクノロジー・材料（ナノテク・材料）分野は、環境・エネルギー、ICT、社会インフラ、健康・医療、モビリティなどさまざまな応用を先導して支える基盤技術となっているが、要求される技術はこれら応用のさらに上位にある社会情勢や経済・産業動向にも大きく影響される。以下では、ナノテク・材料分野に密接に関係する社会・経済の動向について述べる。

世界規模での大きな社会動向としては、貧困・格差の問題、気候変動、エネルギー問題など世界的に取り組まなくてはならないものとして国連で採択されたSDGsがある。 SDGsの17の開発目標には、水・衛生、エネルギー、インフラ・産業化・イノベーション、気候変動など、ナノテク・材料と密接にかかわるものや、間接的に貢献するものが多数あり、SDGsを見据えて研究開発を進めていくことが求められる。

また、東日本大震災をはじめとする様々な災害からの復興・再生の実現、2050年カーボンニュートラル、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策（=グリーン成長戦略）、健康長寿社会の形成、新型コロナウイルス感染症感染拡大の克服など、日本の社会的課題の解決、IoTやAIに代表されるサイバー・フィジカル・システム（CPS）、Society 5.0の実現に向けた取組が必要になっている。これまでも、ナノテク・材料は、モータ用の高性能磁石、軽量高強度の炭素繊維、青色発光ダイオードなどの実用化により、各種製品の軽量化、省電力化で社会的に大きなインパクトを与えており、今後もSDGs、CPS、感染症対策といった方向性を見据えた取組が重要になっていく。

なかでも、地球温暖化や海洋プラスチック問題に端を発し循環型社会（サーキュラーエコノミー）へのシフトを欧州が急速に進めており、CO_2排出量削減のためのCO_2補捉・利用技術や再生可能エネルギー利用技術、材料の利用効率を改善する技術やリサイクル・リユース技術などナノテク・材料研究の重要性が国際的に増してきている。

また、自動車のCASEの動きも重要である。 CASEは、Connected、Autonomous、Shared/Service、Electoricの頭文字を取ったもので、従来の自動車の概念を大きく変える。自動車産業は日本においてそれ自体の規模が大きいだけでなく、関連部材を含めて裾野の広い産業であり、その影響は非常に大きい。電動化のための蓄電材料やモータ材料、車体軽量化のための新材料技術、自動運転や衝突回避用各種センサ技術など必要な技術も多岐にわたる。

これまで、日本は、エンジンやモータ、モータ制御技術などのコア技術をベースにした自動車やロボットなど、高度なすり合わせ・システム化技術を必要とする産業、高精度技術に裏打ちされた半導体製造装置や計測・分析装置のような製造装置産業、高性能・高信頼性で優位に立つ部品や素材（部素材）産業において、世界に存在感を示してきた。新エネルギー・産術技術総合開発機構（NEDO）が実施している主要先端製品・部材の売上高と世界シェア分析によるとわが国の部素材産業は、機能性材料分野を中心に、市場規模が小さくても高い世界シェアを確保している製品を多数有し、部素材産業全体では面として大きな市場を獲得している。しかし、これまで高いシェアを獲得していた部素材の中でも、半導体プロセス用フォトレジストやシリコンウェハ、CMOSセンサなど高いシェアを維持できているものがある一方で、NAND型フラッシュメモリ、パワートランジスタ、リチウムイオン二次電池（LIB）やLIB用正極材料、半導体用サファイヤ基板、炭素繊維などは、

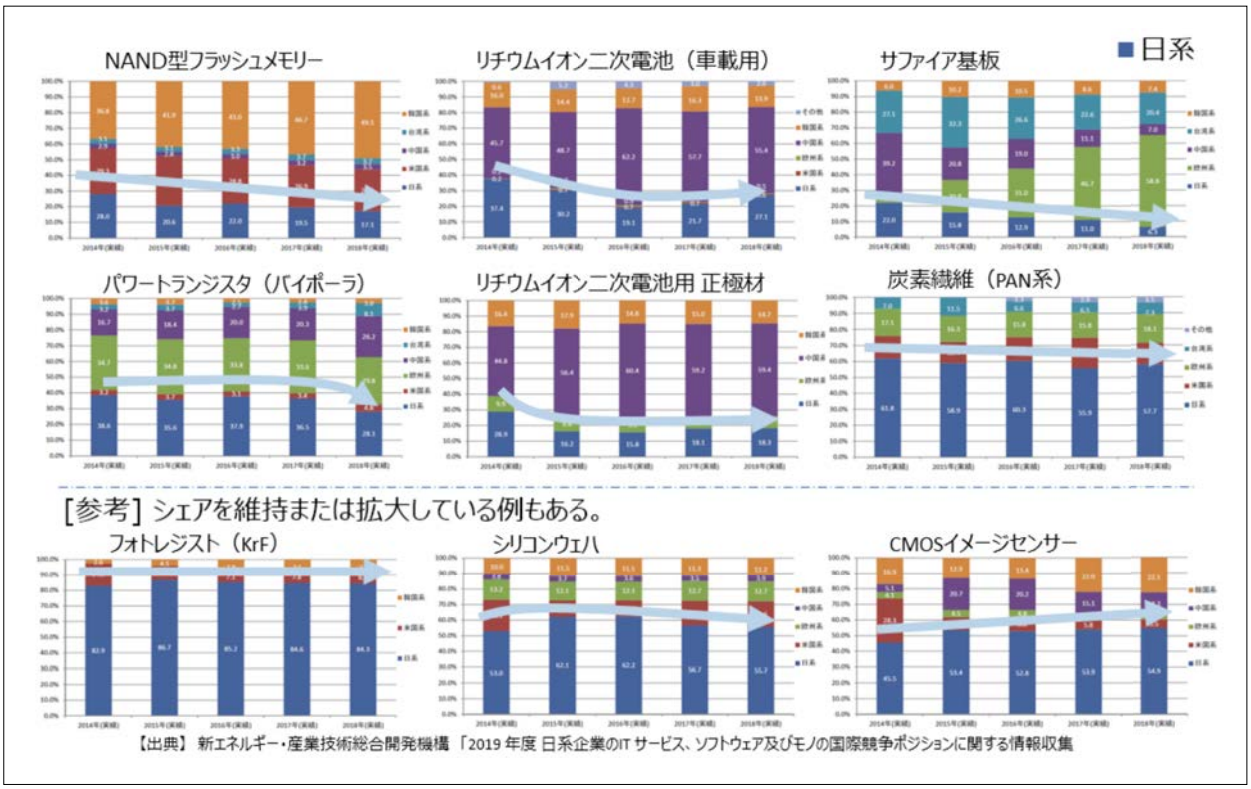


図 1.2.1-1　　主な部素材の国際シェアの推移（2014～18年）[1]

ここ数年間でシェアが低下しているものもみられる（図 1.2.1-1）。

日本の特許国際競争力を分析するため、世界知的所有権機関（WIPO）の35技術分類についてErnstらの手法を使って実施した結果[2]、2020年時点において、当該技術分野の日本の特許の平均的価値が世界標準の1.2倍以上の分野としては、医薬品（1.65）、マイクロ構造・ナノテクノロジー（1.60）、半導体（1.45）、基本的な材料化学（1.33）、表面技術、コーティング（1.31）、AV機器（1.29）、基本的な通信処理（1.27）、光学（1.26）、有機ファイン・ケミストリー（1.24）、高分子化学・ポリマー（1.21）、電気機械器具・エネルギー（1.20）があげられる（図 1.2.1-2。（ ）内の数字は、世界標準に対する特許の価値の比率）。さらなる分析が必要であるが、これら技術分野の多くは、ナノテク・材料技術に強い関連のある分野である。しかし、2011年から2020年までの推移をみると、ほとんどの技術分野において、特許ファミリー数の伸び率ほどには、特許総資産価値が伸びておらず、1特許ファミリーあたりの価値が低下していることがわかる（図 1.2.1-3）。このように、特許国際競争力においても、日本の地位低下がみられている。（なお、特許動向の国際比較については、「1.2.5 研究開発投資や論文、コミュニティ等の動向」により詳しい分析を載せているので併せて参照されたい。）

1　新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「2019年度成果報告書　日系企業のITサービス、ソフトウェア及びモノの国際競争ポジションに関する情報収集　情報収集事業（2）「モノを中心とした情報収集と評価」」令和2年3月（委託先 株式会社富士キメラ総研）

2　H.Ernst, N. Omland, World Patent Information 33（2011）34–41（分析委託先Lexis Nexis Japan / Patent Sight Japan）。Patent Sight Japanのデータを基にJST-CRDSで図を作成。

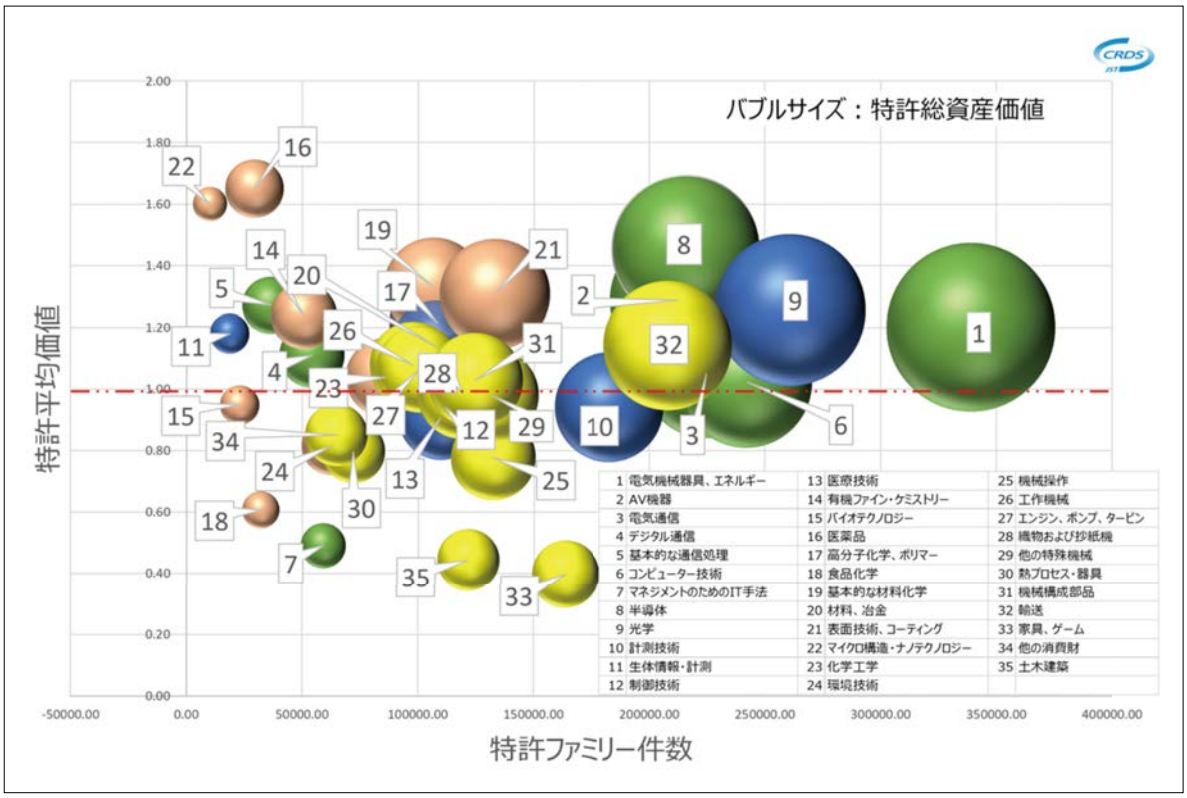


図 1.2.1-2　　WIPO 35 技術分類の特許国際競争力分析

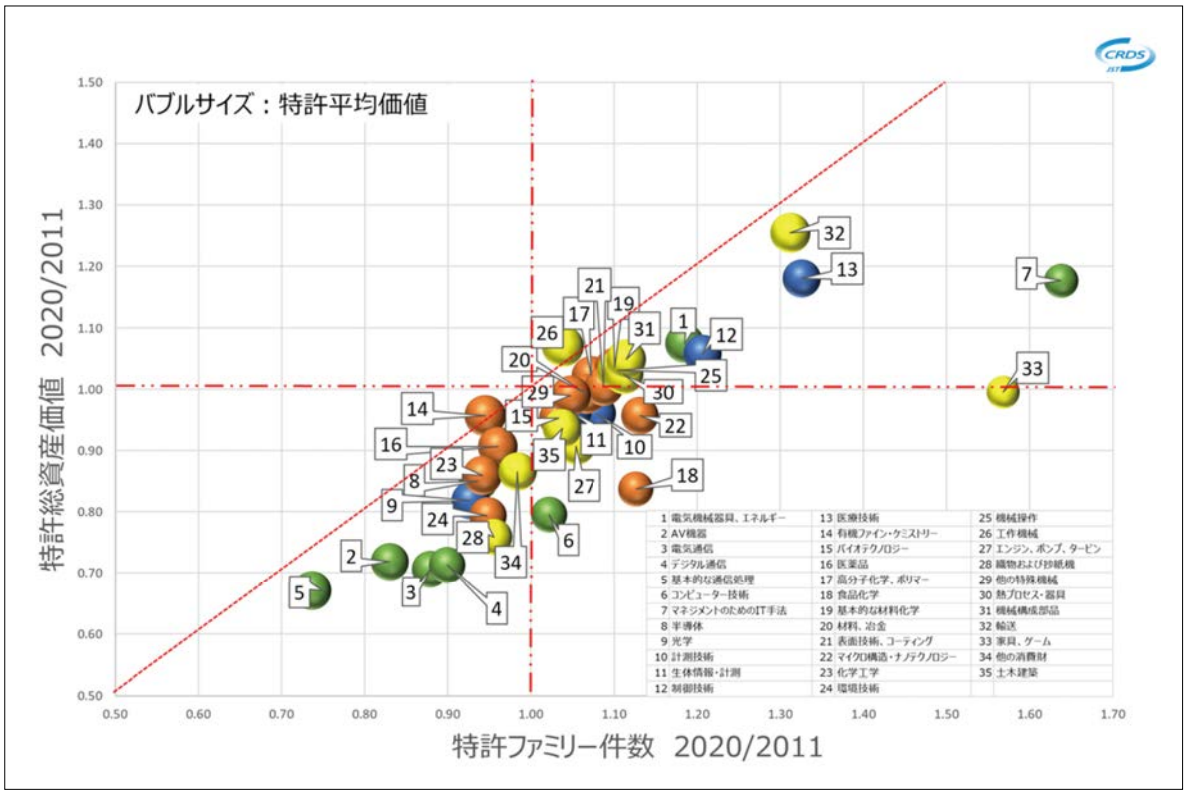


図 1.2.1-3　　WIPO 35 技術分類の特許国際競争力の推移（2020／2011 比率）

さらには、米中や日韓の貿易摩擦や、新型コロナウイルス感染症流行拡大などによって、従来のグローバルサプライチェーンの脆弱さが明らかとなり、これまでの国際的な役割分担に変化が起こることが予想され、わが国にとって重要な位置を占めていた部素材産業にも影響を与えることが予想される。

このように、社会構造・経済の動向に大きな変化が起きている時期であり、材料・デバイスに対する基礎研究から開発・製品化、サービスまで含めたバリューチェーン全体での戦略の再構築が求められる。

1.2.2 研究開発の動向

■世界的な研究開発トレンド

ナノテク・材料分野における、近年の世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流を図1.2.2-1に示す。これらの技術は、（1）すでに広く普及しているが、そのさらなる性能向上が、それが利用される装置・機器の性能を飛躍的に向上させると期待されているもの、（2）実用化段階にはいたっていないが、機能の高さが実証されており、実用化達成時には社会に大きなインパクトを与えると考えられているもの、（3）現時点で優れた機能の実証や具体的用途の想定は明確にされていないが、その現象・原理が斬新で今後の研究開発により、さまざまな用途が開ける可能性が見込まれるもの、のいずれかの特徴を持つものである。

図1.2.2-1　　世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

以下では、上記の観点でCRDSが同定した12の材料・デバイス・技術それぞれに対して、注目すべき研究開発動向や政策動向について詳述する。

次世代パワー半導体

現在普及しているパワーエレクトロニクス用のパワーデバイスには、主にシリコン（Si）半導体が用いられている。現在も、微細化・トレンチ構造などのMOSFETデバイス構造の改良や、わが国発のIGBT新技術「IGBTスケーリング」の効果実証がなされるなど、Siパワーデバイスの性能向上が進んでいる。また、大口径Siウェハを用いた量産技術開発による低コスト化が、欧州や米国、中国で進められている。一方で、Siの材料定数の限界から来るデバイス性能の限界も指摘されており、高耐圧化と低損失化を両立できるワイドバンドギャップ半導体材料の研究開発もさかんに行われている。次世代パワー半導体であるSiCおよびGaNはすでに実用化フェーズに進んでおり、システムの高効率化と、高周波動作による小型化が可能となった。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発も重要となっている。

国内では、経済産業省の「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」が2014年度から2019年度まで実施され、Si-IGBTスケーリングの実証やデジタルゲートドライブ、SiCの応用技術開発などが進められた。2014年度から2018年度まで内閣府が主導した戦略的イノベーション創造プロジェクト（SIP）では、SiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンドに関する包括的な研究開発が実施された。研究費のおよそ半分がSiC 関係に投入され、高耐圧デバイス用の多層膜ウェハやその伝導度制御、6.5kV 級の SJ-MOSFET および 20kV 級のバイポーラ（IGBT、PIN ダイオード）デバイス、小型・高温・高速動作が可能な次世代モジュール、SiC-MOSFET/SBDモジュールのパワーエレクトロニクス機器・システムへの応用研究が進められた。2018年11月からのSIP第2期では、ユニバーサルスマートパワーモジュール（USPM）への応用をめざしたGa_2O_3パワートランジスタ開発が行われている。文部科学省、環境省でもGaN パワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016 年には文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、名古屋大学を中心に GaN デバイスの研究開発が精力的に進められている。

欧州では、EU内のエネルギー融通、CO_2削減などを主目的として、パワーエレクトロニクス機器・パワー半導体関連の技術革新のための各種プロジェクトが展開されてきた。2017 年度から始まったR3-Powerupでは、STMicroelectronicsがコーディネーターとなり、Si-300mmパイロットラインを活用して、個別半導体素子開発からロジック、アナログデバイスとパワーデバイスの統合によるシステムオンチップ、パワーIC開発を進めている。2019年からはInfineonがコーディネーターを務めるPower2Powerがスタートし、300mmウェハによる1700V Si-IGBT技術、200℃動作での電力密度20%向上、キャリアライフタイムの50%向上などを目標に掲げている。ドイツではGa_2O_3結晶成長および物性研究に関する大型研究プロジェクトGraFOxが2016年から実施されてきた。パワーエレクトロニクス機器・システム関連では、アーヘン工科大学がドイツ最大の電力・ガス供給会社エーオンからの研究資金を得て次世代直流電力供給ネットワークの研究プロジェクトを推進している。

米国では、エネルギー省（DOE）や国防総省（DOD）からの補助金による研究プロジェクトが継続的に行われている。 DOEエネルギー高等研究計画局（Advanced Research Projects Agency-Energy：ARPA-E）では、CIRCUITS（Creating Innovative and Reliable Circuits Using Inventive Topologies and Semiconductors）やBREAKERS（Building Reliable Electronics to Achieve Kilovolt Effective

Ratings Safely）などのプログラムが実施され、SiやSiC、GaNパワーデバイスを用いた回路技術や実装技術が研究されている。また、米国でのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体（SiC、GaN）の大規模適用により省エネルギー化をめざすプロジェクトPowerAmericaが、2015 年から5年間、DOE主導で実施された。2019年から米国の複数大学が研究チームを結成し、ARPA-Eの資金援助を受けて、中電圧・高電圧高速直流遮断器に関する最長5年の研究プロジェクトを推進している。これは現在の交流給電ネットワークの一部を直流送電・配電に置換、あるいは併用の実現をめざしたもので、その要の技術が高速直流遮断器である。 Ga_2O_3結晶成長および物性研究にも、DODから大型研究ファンドが相次いで投入されている。2019年からは空軍研究所（AFRL）とコーネル大の共同研究としてUCoE（University Center of Excellence）が始まり、Ga_2O_3材料およびデバイスの研究開発が行われている。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから、豊富な研究資金が各研究機関に配分されていると考えられる。 SiCの材料、デバイス、システムの垂直統合開発をthe National Key Research and Development Program of Chinaの一環で行っており、多くの人材と予算が投入されているといわれている。また多くの大学や研究所がこの1～2年でGa_2O_3の研究開発を始めており、急激な盛り上がりをみせている。

韓国では MOTIE/KEIT と呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンドDevelopment of epitaxies and power devices technologiesが2017年より実施されている。

次世代蓄電デバイス

元々は携帯機器用の電源として開発され普及したリチウムイオン電池（LIB）は、現在では、電気自動車、家庭用蓄電池、電力貯蔵などの大型蓄電用途にまでその適用範囲を広げ、生活に欠くことのできない電源デバイスの地位を確立した。 IoT機器の高機能化や、再生可能エネルギーの大量導入用バッファなどの重要な用途においては、蓄電池の性能向上への期待は強く、高性能な電池の開発が渇望されている。ここで、蓄電池の性能とは、エネルギー密度（体積あたり、あるいは、重量あたり）、出力エネルギー密度、充放電回数（寿命）、安全性、コストなど、さまざまなものがあるが、一般にそれらはトレードオフの関係にある。

LIBは現在もっともバランスの取れた性能を持った蓄電デバイスである。小型LIBの主力であるスマートフォン向けラミネート型電池は、従来からの黒鉛負極とコバルト酸リチウム（$LiCoO_2$：LCO）正極の組み合わせのままで、電極の工夫、セパレータ・電解液の最適化、導電材の選定により、エネルギー密度が290 Wh/kg（720 Wh/l）にまで向上している。 EV用途の角型あるいはパウチ型については、安全性のために初期に採用されたマンガン酸リチウム（$LiMn_2O_4$：LMO）正極から、航続距離延長の要請に応えるために、ニッケルコバルトマンガン三元系酸化物（$LiNi_xCo_yMnzO_2$：NCM）正極に移行しており、さらなる低コスト、高エネルギー密度化の要請から、less/no-Co化、Ni-rich化の開発が推進されており（NCM333→NCM523→NCM622→NCM712→NCM811）、エネルギー密度も小型LIBに近づいている。負極材に関しては、人造黒鉛系が主流であるが、安価な天然黒鉛の配合比の向上が課題となっている。容量向上のため、シリコン（Si）あるいは一酸化ケイ素（SiO）を担持した黒鉛の開発が推進されているが、充放電時の膨張収縮による劣化という本質的課題は解決されておらず、Si/SiO含有比率は10%未満で、物理的に膨張を抑制できる小型円筒型電池での採用に留まっている。

このように大容量化が進んできたLIBも、そろそろ、エネルギー密度の限界（350 Wh/kg）がみえてきており、リチウムイオン電池の性能を凌駕するいわゆる次世代電池の必要性が強調されている。現在、全世界的に、500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる二次電池を目標にした研究開発がなされている。その有力

候補としてリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、および、リチウム空気電池などが注目を浴びている。

「リチウムイオン」電池の「イオン」たる所以は、金属状態のリチウムが電池内に存在しないことにあるが、最近の革新電池においては、金属リチウム負極に再挑戦する動きが活発である。そもそも、最初のリチウム電池は負極に金属リチウムを使っており、その初期の製品で起こった発火事故から、より安全な炭素インターカレーションの負極に移っていった経緯があるので、これは、金属負極へのリベンジの流れといえる。

リチウム遷移金属酸化物電池は、リチウムイオン電池になる直前まで開発されていたものと同じ構成であるが、その頃問題となったリチウムデンドライト生成による短絡を防ぐため電極上に強固な固体電解質皮膜（Solid Electrolyte Interphase：SEI）を作るなどの工夫で、安全性を高める試みがある。現状0.5C以下の低レートにしか耐えられないが、Sion Power社（米国）では480 Wh/kgのエネルギー密度で、350サイクル以上の寿命を達成している。

リチウム硫黄電池は、硫黄の放電中間生成物であるポリスルフィドアニオンの電解液への溶出が課題であったが、メソーポーラスカーボンをホスト材として、その細孔内に硫黄を固定化することによって、その溶出を防止するという新技術が発表されてから研究開発が再燃し、さまざまな見地から研究されている最も論文件数の多いリチウム金属電池系となった。課題は多く残っているが、Oxis Energy社（英国）では約400 Wh/kgのエネルギー密度で、数十サイクルの寿命を達成している。

リチウム空気電池は、$2\ Li + O_2 \leftrightarrows Li_2O_2$の充放電反応を利用する。水素や炭化水素燃料の燃料電池で必要な正極での酸素の4電子還元が不要であるという利点があるが、絶縁性放電生成物のLi_2O_2や、副生成物のLi_2CO_3の分解過電圧が大きくエネルギー効率が低くなる。まだ、実用的なセルで評価できる技術レベルにはいたっていないが、放電電圧は約2.7 V、約400 Wh/kgのエネルギー密度を達成している。正極活物質をセル内に持っていないため、理論上のエネルギー密度は高く、次々世代電池として研究が続けられている。

リチウム全固体電池は、電解質が固体であることを意味しているだけなので、正負極が革新電池であっても、現行LIBであっても、また、電解質が有機物であっても無機物であっても全固体電池にすることができるが、現在、もっとも注目を浴びているのはリチウム遷移金属酸化物電池に無機固体電解質を適用する研究開発である。

固体電解質としては、硫化物系と酸化物系に大別できるが、硫化物系固体電解質を用いた全固体電池の開発が先行している。硫化物系の長所は、有機電解液に匹敵するほど高いイオン伝導率、固体としての柔らかさにより、電極との密着が良い点にあるが、水と反応して有毒ガスを発生するなど安全性や安定性は、酸化物系に劣る。一方、酸化物系はリチウムイオン伝導度が硫化物系に比べて1～2桁低いうえに、硬くて扱いづらい材料ではあるものの、大気中でも安定なため製造上では大きな利点がある。電池としての充放電性能的には、LIBには遠く及ばないが、大手電子部品各社（TDK、FDK、村田製作所、太陽誘電）が省電力化の進むIoT機器やウェアラブル機器用途に表面実装型（Surface Mount Device：SMD）の薄膜型全固体電池（酸化物系固体電解質）を開発中であり、一部量産化が始まっている。

注目すべき国内外のプロジェクトとしては、［日本］JSTのALCA-SPRING（Li硫黄、Li空気、Li全固体、Mg電池）、約150億円（2013-2022）、NEDOのRISING2（フッ化物シャトル、亜鉛空気、コンバージョン、硫化物電池）、約150億円（2016-2020）、［米国］エネルギー省のBattery500（Li/TMO、Li硫黄、Li全固体）、50Mドル（2016-2020）、［中国］国家重点研究開発計画「新エネルギー車」重点項目内（先端リチウムイオン電池、Li/TMO、Li硫黄、Li空気、Li全固体電池）、110M元（2016-2020）、［欧州］Horizon 2020（2014-2020）内 次世代電池、90Mユーロ（2020）、Battery 2030+が継続、ASTRABAT（Li全固体電池）、7.8Mユーロ（2020-2023）、SOLiDIFY（Li全固体電池用材料）、7.8Mユーロ（2020-

2023）、［韓国］次世代リチウム金属二次電池核心源泉技術開発、24.3B ウォン（2018-2023）などがある。

バイオファブリケーション

バイオファブリケーションは、生体機能を有する3次元組織体を生体外で構築する技術である。近年、細胞研究の進展に加え、マイクロ・ナノ加工技術およびマイクロ・ナノ流体デバイス技術の発展によって、実際の生体組織に近い3次元の構造・機能を持つ組織体の構築が可能になってきた。特に、細胞を望みの位置に配置することが可能なバイオプリンティング技術の登場によって、研究者人口が世界的に増加している。

バイオプリンティングは細胞外マトリックス成分や生理活性物質など、目的の組織を構築するのに必要な因子を含む材料（バイオインク）とともに細胞を精密に3次元配置する技術であり、3DプリンタとCADアプリケーションの普及により研究開発が進展している。バイオインクには細胞の生存と機能を維持すると同時に、目的とする組織・臓器に特異的な細胞外環境の再現、印刷に適した粘弾性、構築された組織体の構造維持などさまざまな役割・性質が求められ、これらの要求を同時に満たす材料や印刷技術の研究開発が必要になっている。また、熱や光、電場、圧力、pH などの外部刺激に応答するスマートマテリアルを用いた4Dバイオプリンティングも登場している。

バイオファブリケーションにより構築される3次元組織体は、再生医療への応用に加え、創薬のための動物代替モデルとしての期待が高く、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現するOrgan-on-a-Chipへの適用をめざす研究がさかんになっている。また、最近では医療応用に限らず、牛や豚などの動物の細胞を用いた培養肉の研究にバイオファブリケーションが応用され、食肉と同様の味や食感の再現、社会実装可能な低コスト化をめざした研究開発が進められている。今後は、より複雑な組織・臓器の再現に向けて、目的の細胞への分化誘導に適した生化学的性質・力学的性質を持つ培養基材や、組織の微小環境を模倣する技術、血管ネットワークの新生を促進する技術などの研究開発が求められる。

米国にはNIHを中心に多くの関連研究プログラムが存在する。NIHの研究機関の1つであるNCATS（National Center for Advancing Translational Sciences）では、複雑なヒト組織を模倣した3次元組織をバイオプリンティングで作る3-D Tissue Bioprinting Program が進められている。また、NCATSでは、Tissue Chip for Drug ScreeningプログラムがDARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）、FDA（Food and Drug Administration）との協力の下に進められている。さらに、将来の医療につながる新しい技術を生み出し、基礎研究から臨床研究まで広範に適用することを支援するNIHのBTRCs（Biomedical Technology Resource Centers）の枠組みで、組織工学、3D プリンティング、バイオプリンティング関連の新技術開発を行うCECT（Center for Engineering Complex Tissues）が置かれ、複数の研究組織による連携の下で研究が推進されている。

欧州ではORCHID（Organ-on-Chip in development）コンソーシアムによる強力な研究体制の下、Organ-on-a-Chipの研究開発が2019年まで、欧州圏の著名大学、ドイツの Fraunhofer、ベルギーの半導体コンソーシアムであるIMEC等、研究機関と企業の参加により進められた。また、EUが2019年にまとめた報告書「100 Radical innovation breakthroughs for the future」において、将来的に影響力がもっとも高いとみられる100の技術イノベーションの1つとして「Bioprinting」が取り上げられている。

日本ではAMEDにおいて、平成29年度よりOrgan-on-a-Chipに関するプロジェクト「再生医療の産業化に向けた評価基盤技術開発事業（再生医療技術を応用した創薬支援基盤技術の開発）」が実施されている。また、JST未来社会創造事業「持続可能な社会の実現」領域の本格研究として令和2年度より「3次元組織工学による次世代食肉生産技術の創出」が開始されている。バイオプリンティングに用いられるバイオインク

や、3次元組織体を構築するための培養基材など、バイオファブリケーションにおいては材料やその加工技術の果たす役割が極めて大きい。日本の強みである材料創製・加工技術、マイクロ・ナノデバイス技術、さらにはiPS細胞などの細胞関連技術を活かした研究開発の推進が期待される。

集積化マルチモーダルセンサ

ビッグデータ解析やAIなどの新しい情報処理技術の進展に伴って、多種多様な情報を取得するための機能を集積したマルチモーダルセンサ技術が重要性を増している。収集・蓄積されたさまざまなデータに高度な分析を施すことにより、何かが起きる予兆などの高次で重要な情報を導き出すことが、自動運転や社会インフラ保守、医療・ヘルスケア、農業など様々な応用領域において求められている。

このような用途に向けて、多岐にわたるセンサの研究開発が進められている。イメージセンサやMEMS技術によるマイクロフォン、圧力センサ、加速度センサなどの物理センサは高性能化・高感度化が達成され、すでに実用に供されているが、応用領域によっては、さらなる高感度化、低消費電力化、小型化、低コスト化が求められている。一方、医療・ヘルスケアや農業などの応用領域では、化学・バイオセンサ（ガスセンサ、臭いセンサ、生体物質センサなど）の実用化が期待されているが、現状では安定性、再現性、耐久性などに課題があり、これらの課題解決をめざして研究開発が進められている。また、複数のセンサを並列で使用するアレイ化技術によって、センサ性能を向上させることも重要な課題である。物理センサ、化学・バイオセンサなど異種のセンサを組み合わせてアレイ化することで、同時に複数の計測ターゲットの検出・分析を行うことが試みられている。さらに、複数のセンサと、センサの制御や取得データの処理を行う回路を集積・実装する技術も重要な研究開発課題となっている。

米国ではDARPAが慣性センシング（ジャイロ）技術を中心に、高周波無線、低消費電力センサなどのMEMS関連技術の開発を継続的に支援している。例えばPRIGM（Precise Robust Inertial Guidance for Munitions）プログラム、SPAR（Signal Processing at RF）プログラム、N-ZERO（Near Zero Power RF and Sensor Operations ）プログラムなどがある。また、NSF（National Science Foundation）では2000年代にSensors and Sensor Networksプログラムにおいて、民間では行われない長期的視野に立ったテーマでセンサに関する多くのプロジェクトを推進した。他にも米国では、UC Berkeley、NASA、JPL（Jet Propulsion Laboratory）などで軍事応用を含め活発にセンサ関連の研究開発が行われている。

欧州では、フレームワークプログラムにもとづいて将来のスマートシティ実現を目標に掲げ、それに資する各分野でセンサネットワーク関連技術の研究開発を推進している。 Horizon 2020においてもMEMS関連技術を支援しており、IMEC、MINATECでMEMSやマイクロ流路を活かした新しいバイタルセンサなどのデバイスを研究している。欧州は化学センサ、バイオセンサの研究者数が多い。

日本では、JSTのCOI STREAMにおいて、ヘルスケア関連のセンシングを扱うプロジェクトが実施されている。また、JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（OPERA）の「マルチモーダルセンシング共創コンソーシアム」において、イオンイメージセンサを基盤に、複数の物理・化学現象を同時に検出するマルチモーダルセンシングの研究開発がマッチングファンド形式の産学共同で進められている。 NEDOでは2019年に「IoT社会実現のための超微小量センシング技術開発」プロジェクトが開始され、2020年には内容を拡充して「IoT 社会実現のための革新的センシング技術開発」と名称を改めて推進されている。日本はセンシング技術に強く、世界シェア50%以上を有するイメージセンサを筆頭に、日系企業によるセンサの世界シェアは3割を超える。レベルの高い日本のセンサ基盤技術の融合化・統合化を進めることにより、集積化マルチモーダルセンサの実用化への進展が期待される。

脳型AIチップ

画像認識、音声認識・翻訳、自動運転、病気の診断、新材料探索、デバイス設計など様々な用途に人工知能（AI）技術が用いられるようになってきた。これらの用途は、これまでコンピュータが行ってきた単純な計算やプログラムされた演算・画像処理・制御とは質的にも異なる、認識・予測・判断といった人間に近い高度な情報処理が重要になっており、AI技術のさらなる高度化や低消費電力化が期待されている。現在のAI技術は主に高性能サーバ上でソフトウェアにより深層学習（CNNなど）を行うことで実現されている。膨大な数のデータを学習させて、画像認識などの処理を行っており、消費電力が膨大である。

現在の情報処理性能向上の担い手である半導体集積回路はすでに加工寸法が10nm程度になってきて微細化の限界に直面しており、従来のCMOSデジタル回路の微細化・高集積化によるプロセッサの高性能化・低消費電力化は難しくなってきている。このため、従来のノイマン型のプロセッサだけでなく深層学習用のプロセッサも含めて、アルゴリズムや回路アーキテクチャ、デバイス・材料などの技術レイヤーに跨り新たなコンピューティング技術の研究開発が望まれている。

最近では、TPU（Tensor Processing Unit）など深層学習専用のプロセッサを開発して、処理速度の向上と消費電力削減が行われるようになってきたが、大幅な消費電力低減にはいたっていない。深層学習用のプロセッサの高速化・低消費電力化に関して、研究開発レベルでは、高い精度で演算が可能な32ビットや64ビットのデジタル回路の代わりに、4ビット、2ビットと演算精度を落としたデジタルCNN回路や、アナログ回路を使ったもの、さまざまな物理現象を利用したリザバーコンピューティング、などが報告されるようになっているが、現状では人間の脳のエネルギー効率にはほど遠い。

一方、深層学習などでは脳機能の単純化したモデルが応用され、その有用性がすでに実証されているが、脳科学の進展は著しく、ライフサイエンス・医療分野では、脳の病気の原因解明などで脳の研究が進んでおり、分子レベルからニューロン・細胞、神経ネットワーク、脳全体にいたる様々な階層での脳の機能が明らかになりつつある。このような脳科学の進展を踏まえ、これらの脳に関する知見から脳による情報処理の精緻なモデルを作り、エレクトロニクス分野に利用しようという動きが国内外で活発になってきている。

コンピュータアーキテクチャの国際会議（ISCA、HPCA、MICROなど）や、半導体回路・デバイスの国際会議（ISSCC、VLSI、IEDMなど）では、ディープニューラルネットワークのハードウェア実装事例が多数報告され、研究開発の大きなトレンドとなっている。例えば、半導体集積回路に関する最先端の国際会議「IEEE International Solid-State Circuits Conference（ISSCC）」では、2018年、2019年連続で、深層学習や脳模倣・脳型コンピューティングに関するプレナリートークが行われており、注目を集めている。またアナログデジタル混載の強化学習のニューロモルフィックアクセラレータ試作や、エッジでの学習をめざしたニューロモルフィックプロセッサ、不揮発性メモリReRAMを用いたCNN回路、各種物理現象を利用したリザバーコンピューティングなどが報告されている。

米国では、プロセッサとプログラムの記憶装置間のアクセス速度が性能を律則するというフォン・ノイマン・ボトルネック問題が顕在化しつつあることから、IEEE「Rebooting Computing Initiative」が設立され、脳型、量子、光計算などによる新たなコンピューティングを模索する動きが加速している。2008年よりDARPAのSyNAPSEプログラムでニューロモルフィックチップの開発が進められてきたが、2016年にはIBMによりニューロシナプティックコンピュータチップ「TrueNorth」が報告されるにいたっている。一方、深層学習を組み込んだ専用のアクセラレータTPUがGoogleにより開発され2015年より実装されている。NSFでは「Expedition in Computing」プログラムを実施し、量子コンピュータアーキテクチャ、DNAコンピューティング、分子コンピューティング、視覚野ニューロモルフィック計算などの5年間プロジェクトに最大年200

万ドルの研究助成を行っている。

欧州では、10年間で1.0Bユーロの巨額のプロジェクトFET（Future and Emerging Technologies）の1つであるHuman Brain Project（2013年～）のサブプログラムのなかで、従来のノイマン型のコンピュータよりも桁違いの演算速度、エネルギー効率をめざしたニューロモルフィックコンピュータや次世代のニューロモルフィックチップの開発が進められている。

中国では、第13次五カ年計画で、2台の100 PFLOPSのスパコンシステム（Sunway）の取り組みを実施した。また、清華大学において時分割方式で処理するニューロンを持つニューロモルフィックチップ、中国科学院でニューラルネットワーク処理用のアーキテクチャなどの研究を行っている。

韓国では、KAIST（韓国科学技術院）などで、動的再構成可能なシストリックアレイから構成される画像認識用プロセッサ、畳み込み演算の並列化や冗長なメモリアクセス削減などの特徴を持つCNN計算用プロセッサなどの研究を行っている。

日本では、新学術領域「人工知能と脳科学の対照と融合」（2016年）および「脳情報動態を規定する多領野連関と並列処理」（2017年）が脳科学と人工知能を結びつける研究として開始されている。2017年には神経の動作原理にもとづく革新的な人工知能の開発をめざすWPI「ニューロインテリジェンス国際研究機構（IRCN）」が発足している。2018年度からは、レイヤー統合的な新たなコンピューティングに向けてのプログラムが、内閣府、経済産業省（NEDO）、文部科学省（JST）で開始されている。内閣府では戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期として「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」が始まり、そのなかの一部として超低消費電力IoTチップの開発を進める。NEDO事業としては、AIチップの研究開発に特化した「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」および「AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業」が開始されている。JSTではCREST「Society 5.0を支える革新的コンピューティング技術」、さきがけ「革新的コンピューティング技術の開拓」が開始され、デバイスからアーキテクチャ、アルゴリズムにいたる幅広い計算ドメイン指向の研究開発が行われている。また、これまでAI技術についてはソフトウェアを中心に、情報処理学会、人工知能学会で議論されてきたが、2019年には応用物理学会でデバイス・材料のAI応用をめざすフォーカストセッション「AIエレクトロニクス」が創設されデバイス・材料の研究者を含めた研究開発が活発化している。

量子コンピューティング

2019年10月にGoogleが、超伝導量子ビット方式で開発した53量子ビットマシンで量子優位性を実証した、と発表してから、量子コンピュータに対する世界的な関心がより一層高まっている。2020年12月には中国科学技術大学のグループが、光を使った量子コンピュータで量子優位性の実証に成功した、と発表した。将来の量子コンピュータに対する期待がかつてないほど高まっている状況である。

量子コンピュータの研究開発は、加速度的な拡大傾向が世界的に続いている。研究開発において現在先行している超伝導方式では、Google、IBMなどのトッププレーヤーは50～70量子ビットのレベルでの高精度な量子ビット制御に取り組んでおり、いずれも、今後数年間で数100～1,000量子ビットの実現を目標に掲げている。一方で、量子ビット数が増えても演算精度が低いと性能を発揮することができないため、量子ビット操作に伴う演算精度にも注目する必要がある。イオントラップ方式では、IonQ（米）が32量子ビットで、これまでになく高い演算精度（99.9 %）の量子コンピュータ開発に成功しており、2021年の早い時期にクラウド経由でプロセッサの提供を開始することを発表した。イオントラップ方式では、Honeywell（米）も2020年に開発を開始した。光を量子ビットに用いる形式でも、量子ビット数を増やすための新しい方式や小

型集積化に向けた試みがなされている。シリコン量子ビット方式では、2ビットレベルの高演算精度（99％超）の量子状態制御が実現している。

今後数年のうちには、演算精度がさほど高くなく、量子ビット数も数10～数100程度といった量子コンピュータが、比較的容易に使用できるようになると予想される。そのような近未来の量子コンピュータでもスーパーコンピュータを上回る潜在能力を持っているため、それを有効活用しようという動きが出てきている。この方向性はNoisy Intermediate-Scale Quantum（NISQ）技術と呼ばれ、世界的に活発な探索が行われている。特に、変分量子アルゴリズムの量子化学計算や機械学習への応用がさかんに研究されている。

以上はいずれもゲート型量子コンピュータ（万能量子コンピュータ）と呼ばれるタイプである。それ以外にも、イジング問題の最適化に特化した量子アニーラの研究開発が、超伝導量子ビット方式を採用しているD-Wave（カナダ）やNECを中心に着実に進められている。 D-Waveは5,000量子ビット超の商用ハードウェアシステムを発表するなど、集積化を積極的に進めている。

量子科学技術に関して主要国はそれぞれ国家戦略を構築しており、それにもとづく新たな国家プロジェクトを進めている。そのなかで量子コンピュータは最重要課題と位置づけられ、特に米国、EU、中国では巨額の投資にもとづいた研究開発が行われている。

北米では、米国で2018年に発表された国家戦略方針（The National Quantum Initiative Act）にもとづく国家プロジェクト投資が進んでいる。大統領府は2021年度予算要求として量子情報研究に7億1,000万ドルを計上した。エネルギー省（DOE）は米国内に5つの学際的な量子情報科学（QIS）研究センターを設立し、そのために2020年からの5年間で最大6億2,500万ドルを投資する。 NSFは、2020年からの5年間で最大7,500万ドルを投資して量子技術に関する3つの研究所（QLCI）を設立すると発表したが、その1つが量子コンピュータを対象としている。カナダでは、政府により設立された財団 Sustainable Development Technology Canada（SDTC）が、カナダの光量子コンピュータをめざすベンチャー企業Xanadu Quantum Technologies Inc.に440万カナダドルを2020年1月に投資した。

EUでは、欧州委員会の求めに応じて2016年に産官学でロードマップ（Quantum Manifesto）をとりまとめた。それにもとづいて、2018年にEU Quantum Flagshipが発足した。2020年までは立ち上げフェーズであり、2021年から本格化する予定である。また2019年には、QuantERAコンソーシアムによる2,000万ユーロを投じる第2回プロジェクト公募もなされた。英国は、2014 年から進められている The UK National Quantum Technologies Programme に対する2019年からの追加投資（産業界からの投資も含めて総額3億5,000万ポンド）を表明した。ドイツでは、EU Quantum Flagshipの一翼をなすOpenSuperQプロジェクトで、ユーリッヒ研究所にD-Waveの量子コンピュータを2021年までに導入する計画を発表した。フランスでは、イノベーション省（MESRI）が2021年1月に発表した量子国家戦略のなかで、量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であると表明した。

中国では、「科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画（2016～2020年）」の重点領域の1つとして「量子通信・量子コンピュータ」を指定し、積極的な投資を進める。建設中の量子情報科学国家実験室（安徽省合肥市、総工費760億元[3]）は、第1研究棟が2020年に完成しており、大型研究開発拠点として中国における量子研究の中心になるものと思われる。また、中国科学院と中国IT大手のアリババ（阿里巴巴）グルー

3 リファレンスによっては総工費70億元とするものもある。

プは、共同で量子計算実験室を設立し、量子情報科学の先進的研究および量子コンピュータの開発に取り組んでいる。現在、11ビットの量子コンピュータのクラウドサービスを展開している。習近平国家主席が中共中央政治局の勉強会で、量子科学技術の重要性について発言した（2020年10月）との報道がなされており、今後も量子科学研究を国家として強力に推進していくものと予想される。

日本でも「量子技術イノベーション戦略」が2020年1月に策定され、その戦略にもとづいて量子技術の研究開発が推進されている。量子コンピュータ関連では、文科省Q-LEAPの枠組みで、超伝導量子ビットハードウェア開発を行う「量子情報フラッグシップ」が2018年に、NISQ型量子コンピュータの応用研究を中心とする「量子AIフラッグシップ」が2020年に発足した。2020年度に始まった内閣府ムーンショットプロジェクトでは、目標6に「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」が設定された。NEDOは「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発/【研究開発項目〔2〕】次世代コンピューティング技術の開発」に関する公募を2020年に行っており、そのなかにアニーリングマシン開発および周辺技術開発が含まれる。持続的な量子技術分野の人材層の強化を目標とした文科省Q-LEAPプロジェクト「人材育成プログラム」が2020年から開始した。

循環可能な材料設計・創製

地球温暖化や産業廃棄物問題への社会的関心の高まりを背景に、従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会から脱却し、循環型社会を構築すべきであるという考え方が欧州の循環型経済（サーキュラーエコノミー）をはじめ世界中で主流になり、ものづくりの在り方を大きく変えようとしている。最近特に話題になっている海洋プラスチックごみ問題にみられるように、素材としてのプラスチックが人類にもたらす多大な便益に疑問の余地はないものの、使い終わった後にどう廃棄・リサイクルするかといった問題が大きくクローズアップされている。すなわち、安定で劣化しにくい構造をめざしてきたこれまでの材料設計から、使用後に原料などへ分解できる循環型材料へのシフトへの期待が高まっている。

しかしながら、この実現に資する「分解の科学」は、その重要性が産学ともに認識されながらも国内外において未発達である 。一方で、近年、有機化学における安定結合活性化技術、高分子化学における分解性材料の設計、材料科学における複合材料の界面制御などの進展があり、分解の科学の体系的理解と循環型材料の開発に取り組む段階にある 。「分解」をキーワードに異分野の研究者が集うことにより、循環型社会に貢献するサイエンスの確立と分解性の精密制御という新しい付加価値をもつ材料開発の進展が期待されている。

日本では、NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（2017～2022年度）において、いわゆる「都市鉱山」の有効活用による資源循環システム構築を目的として、使用済み電子機器の自動認識・解体・選別システム、廃部品の製錬原料別自動選別システム、多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発のほか、リサイクルコスト評価にもとづく鉱種・製品選定のための情報連携システムの開発に取り組んでいる。また、NEDO「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」（2020～2024年度）では、環境負荷が少なく、かつ高効率なプラスチック資源循環システムを実現するため、複合センシング・AI等を用いた廃プラスチック高度選別技術、材料再生プロセスの高度化技術、高い資源化率を実現する石油化学原料化技術、高効率エネルギー回収・利用技術の開発を一体的に推進している。さらに文部科学省においては、2021年3月、持続可能な循環型社会の実現に不可欠な「分解の科学」を分子レベルからマクロレベルまで多階層的に理解し、学問的に体系化することをめざした戦略目標「資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」が設定され、2021年度からJST戦略的創造研究推進事業における新規研究領域が発足する予定である。

欧州における循環型経済は域内の国際競争力の向上、持続可能な成長、新規雇用の創出を実現する産業政策の一環として位置づけられている。2010年に策定された成長戦略「欧州2020」では旗艦イニシアティブの1つに「資源効率的な欧州（Resource efficient Europe）」を掲げ、2011年9月に資源効率性の向上のためのロードマップを発表した。その後、2014年9月に行われたロードマップの進捗評価で、資源効率性の実現のために循環経済への転換が必要とされた。2015年12月に公表された「循環経済のためのEU行動計画」では、循環経済の具体化に向けた優先分野と行動計画が示された。優先分野の1つであるプラスチックでは、2018年1月に「プラスチック戦略」が策定され、再使用（Reuse）、修理（Repair）、再生（Recycle）に対するニーズを考慮したプラスチック製品の設計と製造等の必要性が示された。同戦略にもとづき、2019年5月には「特定プラスチック製品の環境影響減少に関わる指令」がEU理事会で採択された（同6月に発効）。同指令により、使い捨てプラスチック製品の使用禁止や、再生プラスチックの飲料ボトルへの使用目標などが定められた。2019年12月に新体制を発足させた欧州委員会は、同月に「欧州グリーン・ディール（European Green Deal）」を公表し、2050年に温室効果ガス排出を実質ゼロにする「気候中立（Climate-neutral）」を目標に掲げた。2020年3月には欧州グリーン・ディールを支える柱の1つとして「循環経済行動計画」が発表された。同行動計画は、2015年の行動計画を更新する形で新たな重点7分野（電子機器・情報通信技術（ICT）、バッテリ・車両、包装、プラスチック、繊維、建設・建物、食料・水・栄養）を設定し、分野ごとに循環型経済のための設計と生産に焦点を当てた「持続可能な製品」に関する政策を導入するとしている。

米国DOEでは、2019年11月、エネルギー効率の高いプラスチックリサイクル技術の革新をめざす包括的取組「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」の開始を発表した。また2020年2月にはDOEと米国化学工業協会（ACC）でプラスチックリサイクル技術開発の協力覚書を締結した。これらにおいて、材料開発の側面からは、プラスチックのアップサイクリング（高付加価値物質への転換）や、リサイクルを考慮したプラスチック材料の設計などがあげられている。さらに、2020年3月にはプラスチックリサイクルの研究開発プログラムBOTTLE（Bio-Optimized Technologies to Keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment：熱可塑性プラスチックを埋立地や環境から遠ざけておくためのバイオ最適化技術）を開始した。対象分野は（1）リサイクル性の優れたプラスチックまたは生分解性プラスチックの開発、（2）従来のプラスチックを分解およびアップサイクルする方法の開発、（3）BOTTLEコンソーシアムとの協働体制の構築、の3つである（予算総額は2,500万ドル、プロジェクト期間は3年程度）。なお、BOTTLEコンソーシアムは新プラスチック設計およびリサイクル戦略を開発するための産学官の枠組みで、国立再生可能エネルギー研究所、オークリッジ国立研究所、ロスアラモス国立研究所が主導することになっている。また、NSFは2020年からEmerging Frontiers in Research and Innovation（EFRI）programの枠組みのなかで使用済みプラスチック材料の解重合技術開発を目的とした「Engineering the Elimination of End-of-Life Plastics（E3P）」プロジェクトを開始した。

中国では2005年に「循環型経済の発展加速に関する国務院の若干の意見」において資源効率性向上を目標に掲げ、循環経済に向けた政策推進を開始した。2009年に「循環経済促進法」により法的基盤を整備したうえで、2013年に「循環経済発展戦略及び短期行動計画」を発表した。同行動計画では、各産業セクターで循環型システムを構築して、サプライチェーン全体で廃棄物の減量化、再使用、再資源化活動を推進することや、インターネット技術も活用して統合的な回収・処理・再資源化を実現する新ビジネスモデルを構築することなどが打ち出されている。

多機能・複雑系材料設計・プロセス

地球温暖化抑制のための温室効果ガス（CO_2）の削減、環境負荷の低減、自動車の自動運転やIoTなど高度な情報化社会をめざすSociety 5.0の実現など、さまざまな社会的課題の解決に向けて、技術を根本から変革し大幅な性能向上や高機能化などを実現できる材料・デバイスへの要求はますます高まってきている。例えば、電池、半導体素子、磁石、軽量高強度素材、熱電材料、高温耐熱材料などに対しては、高機能化が求められることはもちろん、大容量/小型/軽量、高速動作/高耐圧、高保磁力/高飽和磁化/高耐熱性、高強度/高靭性、高電気伝導/低熱伝導、高耐熱性/高耐久性といった複数の機能や相反する機能の同時実現が求められるようになっている。

このような機能材料開発に対する高度な要求に対し、これまでそれぞれの応用分野でさまざまな試行錯誤が行われた結果、多くの高機能材料が発見され材料開発が継続されてきたが、それぞれで限界に近づいている。もはや、それぞれの応用分野でこれまでに知られている単純な組成や熱力学的にも安定で作りやすい構造の材料だけでは対応できなくなっており、未知の可能性を秘めているさらに複雑な組成や、従来手法では作製が困難なため未利用となっている多様な安定相の活用へ対象を広げていくことが必要になってきている。このような未踏かつ広大な材料探索空間においては、材料の基礎的な研究対象としてだけでなく、応用上も非常に魅力的であり、新たな材料探索・創製に対するパラダイムシフトを起こすことにもなると考えられる。しかし、このような膨大な材料探索空間に対して闇雲に探索していくことは効率が悪く、何らかの指針にもとづいて材料設計をすることが必要である。考慮すべきパラメータが多く、それらの相互作用なども含めて全ての役割を明確にして制御することは非常に困難であるため、これまでほとんど手が付けられてこなかった。

一方、第一原理計算や量子モンテカルロ法などのシミュレーション技術、ビッグデータ解析、機械学習、ベイズ推定などのデータ科学を用いたデータ駆動型材料設計技術（マテリアルズ・インフォマティクス）が材料探索の効率性を飛躍的に向上させる手法として世界的にも注目を集め、最近急速に進展している。また、同時に多様な組成の材料を作製するコンビナトリアル手法の開発や、ロボットを用いたハイスループット実験室の構築など、新しい研究手法も発展してきている。このような新しい研究手法を活用することによって、広大な探索空間の中から目的の機能を有する特定の組成や構造、安定相の選択、さらには、実用的に使えるようにするための作製プロセスの構築も可能になると期待される。まさに、未踏領域の材料開拓に果敢に挑戦する時期になってきたといえる。

このような多機能化をめざした複雑系材料の創製に関連した海外の動向としては、エネルギー関連材料、構造材料など応用分野を横断した多元素材料やハイエントロピー材料の国際会議が活発化している。例えば、多元素系材料の国際会議として、「21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds（ICTMC-21）」［September 9-13, 2018 in Boulder, Colorado, USA］が開催されており、応用分野としては太陽光発電、熱電発電、電池、発光体、機能材料、超伝導体にわたり、3元および多元素化合物に関連する全てのトピックをカバーしている。この年のテーマは非平衡プロセスとなっており、材料そのものの特性だけでなく、多元系の作製プロセスへの関心も高まっている。また、最近ではハイエントロピー合金に関するシンポジウムが増えてきており、TMS（The Minerals, Metals & Materials Society）やMRSなどの定期大会だけでなく、「International Conference on High-Entropy Materials（ICHEM 2018）」［February 19-20, 2018 in Paris, France］など独立した国際会議としても多数開催されている。

国内においては、1986年に多元素系の半導体材料を対象にした「三元・多元機能性材料研究会」が応用物理学会のなかに作られ、現在では「多元素系化合物・太陽電池研究会」として、化合物太陽電池、透明導電膜、熱電発電、光触媒、スピントロニクスなど多元化合物に関する知識および技術の向上・発展をめざ

した活動を行っている。また、ハイエントロピー合金に関する活動としては、平成30年度に新学術領域「ハイエントロピー合金：元素の多様性と不均一性に基づく新しい材料の学理」［平成30年度～令和4年度］が立ち上げられている。また、日本金属学会で2018年秋に「ハイエントロピー合金の材料科学」のシンポジウム開催、日本機械学会誌の2018年3月号で【特集：注目の新規金属材料「高エントロピー合金」】が掲載、といった活動があり、ハイエントロピー合金に対する関心が高まってきている。さらに、2019年から複数の学会で多様な安定相のエンジニアリングに関するシンポジウムが開催され（日本結晶成長学会［2019年10月］、応用物理学会［2020年3月、2020年9月］など）、結晶成長、太陽電池、触媒、熱電変換、パワー半導体、などさまざまな研究分野にまたがるコミュニティ形成が活発化している。

データ駆動型材料設計・創製

2011 年の米国「Materials Genome Initiative：MGI」をきっかけに、従来の実験・理論・計算科学に加えて、材料データベースと機械学習などの情報科学的手法を併用することで物質探索・設計手法に新機軸を導入し、開発期間とコストを大幅に削減するデータ駆動型材料開発が世界中で精力的に行われている。

米国MGI自体は2016年に終了したが、各省4つのセンター（CNGMD、CHiMaD、SUNCAT、PRISMS）を中心にマテリアルズ・インフォマティクスにかかわる研究開発が活発に継続されている。米国でのデータ駆動型材料設計には3つの方向が見られる。1つ目は、第一原理計算を主体として物質の構造や物性に関するデータを作り出し、所望の性能や機能を持つ物質・材料を見つけ出そうとする流れであり、実験と計算科学にもとづくデータベースとデータ科学にもとづく各種分析ツールを組み合わせ、物質の網羅的スクリーニングを行うものである。その例として、マサチューセッツ工科大学（MIT）のグループ（現在は UC Berkeley）とローレンス・バークレー国立研究所による“Materials Project”があげられる。2つ目は、コンビナトリアル合成・計測によるハイスループットデータ収集であり、実験家を中心に、高速に物質を合成し、物性を計測し、データベース化するとともに、視覚化ツール、分析ツールを用いて最適物質、構造を予測しようとするものであり、エネルギー省傘下の国立研究所ネットワークのもとで、High-Throughput Experimental Materials Collaboratoly（HTE-MC）のプログラム推進が代表的な例である。3つ目は、統合計算材料工学（Integrated Computational Materials Engineering：ICME）の流れであり、構造材料を中心に、結晶構造（第一原理計算）から高次構造までさまざまなスケールのモデリングをリンクさせ、また、加工プロセスと組織構造の相関もデータにより統合していくものである。 NIST が立ち上げたCenter for Hierarchical Materials Design（CHiMaD）を中心に材料特性の予測、材料開発の支援を実施している。 CHiMaD は2014年からの5年プログラムとして実施されてきたが、2019年にはさらなる5年間の継続が決定された。また、The President’s Council of Advisors on Science and Technology（PCAST）が2020年6月に発出したレポートにおいて、MGIを再活性化し、スケールアップするべきであると指摘されており、施策化の動きなどに注意しておく必要がある。

欧州においては、FAIR原則（Findable, Accessible, Interoperable, Re-purposable/Reusable）の重要性が認識されつつあるなかで、2018年9月に「FAIR Data Infrastructure for Physics, Chemistry, Materials Science, and Astronomy e.V.（FAIR-DI）」が発足している。この団体は、Horizon 2020で2015年からファンディングされているNOMAD-CoE（Novel Materials Discovery- Center of Exellence）を主軸におくが、材料分野にとどまらずバイオ分野・天文学分野とも横串を刺す形で FAIR原則に従うデータ管理の実現と、そのための世界的なデータインフラストラクチャを構築することを目的としている。エクサスケールのHigh Performance Computingについては「MAterials design at the eXascale

（MAX）a European centre of excellence」が設置され、スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）が中核的な役割を果たしている。また、材料モデリングの産業応用を目的として設立された欧州材料モデリング協議会（European Materials Modeling Council: EMMC）が、データ市場の立ち上げをめざして、市場でデータを流通させるために必要な共通記述様式の策定を進めており、Horizon 2020のプロジェクトとしては2018年に終了したが、2019年7月に非営利法人化してその後も活動を継続している。

中国においては、上海および北京においてデータ駆動型材料開発が精力的に行われている。 上海においては、2014 年に上海大学材料ゲノム研究所、2016 年に上海交通大学材料ゲノムイニシアティブセンターが設立されている。さらに上海付近の関連機関間で Shanghai Institute of Materials Genome（SiMG）というアライアンスを設立している。北京においては、2016 年に中国科学院物理研究所および北京科技大学等が共同で北京材料ゲノム工学イノベーションアライアンス、2017 年には中国鋼研科集団有限公司等も参画する北京材料ゲノム工学イノベーションセンターを設立し、潤沢な資金と人材を活用した研究開発を実施している。また、国家重点研究開発計画の1つとして「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」が2016年から開始され、2018年までの3 年間に計44 件の採択課題に、総額約8 億元の研究資金も投入されている。

わが国においては、JST 研究開発戦略センターが2013年8月に戦略プロポーザル「データ科学との連携・融合による新世代物質・材料設計研究の促進（マテリアルズ・インフォマティクス）」を発行し、マテリアルズ・インフォマティクスの重要性について政府に提言を行った。その後、2015 年にJST において「国立研究開発法人を中核としたイノベーションハブの構築支援事業」が開始され、物質・材料研究機構（NIMS）を中核機関とする「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（Materials Research by Information Integration Initiative：MI²I）」（PL：伊藤聡、2015 ～ 2019年度）が発足し、蓄電池材料、磁性材料、伝熱・熱電材料を具体的テーマとしてデータ駆動型材料研究開発に取り組んできた。

また、2016年より開始した経済産業省 / NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト（超超プロジェクト）」（PL：村山宣光、2016 ～ 2021 年度）では、有機系機能材料を対象に計算科学を駆使して材料の「構造」と「機能」を結びつけたデータ群を作り出し、マテリアルズ・インフォマティクスと融合することで革新的な機能性材料の創製・開発の加速化をめざしている。

2018年には内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program：SIP）（第2 期）として、「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（PD：三島良直、2018 ～ 2022 年度）が開始され、マテリアルズ・インテグレーション（MI）の素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代MIシステムを世界に先駆けて構築するとともに、MI を活用して競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立に取り組み、発電プラント用材料や生体用材料、航空用材料等を出口として、先端的な構造材料・プロセスの事業化をめざしている。

JST 戦略的創造研究推進事業においては、2015 年にさきがけ研究領域「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクスのための基盤技術の構築」（研究総括：常行真司、2015 ～ 2020 年度）、2016 年よりCREST・さきがけ複合領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」（研究総括：雨宮慶幸、副研究総括：北川源四郎、CREST:2016 ～ 2023 年度、さきがけ:2016 ～ 2021年度）、2017年よりCREST 研究領域「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」（研究総括：細野秀雄、2017 ～ 2024年度）が相次いで発足した。わが国においてもマテリアルズ・インフォマティクスが物質・材料開発を行う際の強力なツールの1つとして確立されつつある。また、2020年6月に文部科学省、経済産業省合同の戦略準備委員会から「マテ

リアル革新力強化のための政府戦略に向けて」という取りまとめ文書が発表された。そのなかで日本として戦略的にデータを創出し、活用するための基盤、マテリアルDXプラットフォーム構想が打ち出されており、文部科学省を中心に2021年度からその具体化が始まる。

一方で、今後、データ駆動型材料設計・創製をより高度に実現するためには、材料探索・設計手法であるマテリアルズ・インフォマティクスだけでなく、新たな技術領域との融合も重要になってくる。具体的には、実空間での自律的探索システムとして重要な技術となるロボティクスや、蓄積したプロセスのデータを活用して目的とする材料の適切な合成プロセスを探索するプロセス・インフォマティクスとの融合・連携が重要になってくると思われる。

データ駆動型材料創製にロボティクスを活用する方向性としては、全自動で自律的に新材料を探索していくclosed loop手法があげられる。「実験計画策定→合成→評価→実験計画策定」のサイクルを研究者が関与することなく行うものであり、最近のデータ科学/人工知能技術の進展もあり、このclosed loop手法が注目されるようになってきている。このため、国内外でロボットを活用した実験システムの構築が進められている。国内では、東京工業大学で全固体電解質の成膜プロセスの最適化を全自動で自律的に行うシステムが構築され、10倍のスループットで実験が進められることを実証している。カナダのブリティッシュコロンビア大学では、人工知能（AI）アルゴリズムによって制御されたロボット「Ada」を開発し、有機太陽電池薄膜の最適化実験では、できるだけ高い移動度を持つ薄膜組成を発見することを目的とした自律的反復実験を実施し従来は9カ月かかっていたものが、5日間でできたとしている。また、リバプール大学では、一般的な自走式ロボットを改良し人間の化学者と同じ機器を用いた実験ができるようにしたmobile robotic chemistと呼ばれるロボットを開発した。実験装置を自動化するのではなく、自由に動くことのできるロボットに研究者・作業者の代わりを務めさせるというモジュール型のアプローチであり、今後の展開が期待される。

4つの科学（実験科学、理論科学、計算科学、データ科学）をフル活用して目的材料の合成プロセスを効率的に探索する方法であるプロセス・インフォマティクスもデータ駆動型材料設計・創製にとっては重要なものになっていく。マテリアルズ・インフォマティクスによって設計された新規物質を合成するプロセスの最適条件を探ることを目的としており、これによって従来は未開拓であった材料創製空間までも含めて合成プロセスの探索が可能になると期待される。

これらの技術を材料研究に積極的に取り込み、“新規材料の予測・設計”だけでなく“新規材料の合成・創製”までを一貫して効率的に行うことができる次世代のデータ駆動型材料設計・創製へとステップアップすることが求められている。

低次元・トポロジカル材料

シリコンを中心としたこれまでの半導体は、ムーアの法則に従って微細化、集積化が進み、低消費電力化と高速動作、メモリ容量の増大を実現してきたが、微細加工の極限に近づきつつあり、性能向上の限界に直面しつつある。この限界を打破するアプローチの1つとして、材料面ではシリコンを凌駕する電荷移動度を持つグラフェンに代表される低次元材料や、非磁性の欠陥や不純物に対して電子が堅牢（ロバスト）な輸送特性を持つトポロジカル絶縁体に代表されるトポロジカル材料が注目されている。

• 低次元材料

低次元材料の研究開発を行う意義は、①「原子～分子レベルでの薄さ、細さ」という構造的特徴を持った物質が示す特異な物性やその応用の探求と、②複数の二次元物質をビルディングブロックとした新たな材料

の創生や、二次元物質の積層界面を作ることで生じる新たな機能の探求の2つがあげられる。前者に関しては、グラフェン、カルコゲン化物シートなどにみられる特徴的な電子状態（層数に依存した電子バンド構造の変調、Dirac電子系の出現、非常に高い電子移動度など）とそれを用いたエレクトロニクスデバイス、遷移金属酸化物や水酸化物ナノシートの優れたエネルギー貯蔵・変換機能（電極活物質、電極触媒）とそれを利用したエネルギーデバイス、低次元物質特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用したオプトエレクトロニクスやスピントロニクスデバイスなどがあげられる。後者に関しては、二次元ナノシートを1枚1枚操作して基板表面の望みの場所に配置した例や、基板上に隙間や重なりがほとんどない形（稠密配列）で単層膜として堆積させ、これをレイヤーバイレイヤーで反復して多層ナノ構造や超格子構造を構築することを可能とした例や、結晶格子の大きさや対称性の異なる異種の二次元物質を積層して母相には無いトポロジカルな性質を発現させた例、同種の二次元物質をひねって積層することで母物質では現れない物性を発現させた例などがある。二次元結晶の組み合わせは実質無限に存在し、適切な組み合わせを選ぶことで有用な機能性を創出することが可能であると同時に、界面の超構造等に着目することで想像もしなかったような物性が発現することが分かってきている。

日本では、NEDO「希少金属代替材料開発プロジェクト」のなかの「透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」（2007～2011年度）、NEDO「革新的ナノカーボン材料先導研究開発」（2011～2012年度）、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト/グラフェン基盤研究開発」（2012～2014年度）、科学研究費新学術領域「原子層科学」（2013～2017年度）、NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」（2014～2016年度）、JSTのCREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」（2016～2021年度）などが推進されてきた。また、産業界では、世界的なグラフェン研究の展開のなかで、その応用と産業化での関心が高まり、2010年に化学技術戦略推進機構（現・新化学技術推進協会）で企業の情報交換の場としてのグラフェン研究会、2011年には技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構（TASC）グラフェン事業が企業5社と産業技術総合研究所により設立された。また、2013年には産総研グラフェンコンソーシアムが立ち上がり、企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として機能を果たしている。

一方、EU、米国、韓国、シンガポール、中国等、世界各国でも基礎科学から応用研究、産業実用化までをめざす大型プロジェクトや産業界での実用化に向けた展開が行われている。特に、2010年度ノーベル物理学賞受賞を契機として、欧州においては2013年から10年間10億ユーロの計画でGraphene Flagshipが開始され、欧州の当該分野の科学技術水準の向上と産業応用の加速化を推進する原動力として機能している。

EUから独立した英国においては、Manchester大学内に2015年に設立されたNational Graphene Research Center（総額6,100万ポンド）や、EPSRC（英国工学物理科学研究評議会）によるvan der Waalsヘテロ二次元材料やフレキシブル光電子材料開拓への投資（総額3,700万ポンド）などをはじめとして、総額1.5億ポンド規模の研究投資が行われている。

ドイツでは、基礎から応用にいたる二次元材料とそのデバイス応用研究をMax Planck Institute、大学、Fraunhofer Instituteが相互に役割分担し切れ目のない強固な研究開発体制を構築している。特に、Graphene FlagshipとパートナーのRWTH アーヘン工科大学とAMO GmbH（産学連携オープンイノベーションを促進する非営利団体）とが共同で、Aachen Graphene & 2D-Materials Centerを2017年に設立し、CVDによるウェハスケールでのグラフェンおよびTMD（Transition Metal Dichalcogenides：遷移金属ジカルコゲナイド）等の二次元材料による大規模集積デバイス・回路・システムの先端研究を国家的に推進している。 Graphene Flagship Work Package 6：Sensor（主幹：デルフト大学）、7：Electronic Devices（主幹：AMO GmbH）、10：Wafer Scale Integration（主幹：CNIT, Italy）の3本のプロジェクト、お

よびEuropean Commission のFlagship-Era（FETデバイスシステムの先端研究推進プロジェクト）によるTUGRACO（Towards Ubiquitous Graphene based RF Communications）プログラムを中心として2014～2020年の7年間で100億円規模の研究投資を行っている。

中国では、泰州巨納新能源有限公司が中国初のグラフェン国家基準「グラフェンおよび関連二次元材料（GB/T 30544.13-2018）」が2018年に制定され、グラフェン、CNT、および関連二次元材料の基礎から産業応用にいたる全領域を対象として35億円/年規模の研究投資を行っている。

韓国では、韓国政府主導のKorean Graphene Hubが2013～2018年の6年間で約200億円の研究投資を行っている。また、半官半民のGraphene Materials and Components Commercialization Projectが産業応用に重点を置いて2013～2018年の6年間で230億円規模の研究投資を行っている。

シンガポールにおいても二次元材料の研究開発に80億円規模の研究投資を行っているとみられる。

• トポロジカル材料

トポロジーは位相幾何学という数学の分野で発展してきた学問体系であるが、2000年以降、それを物質系に適用することで、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相として「トポロジカル物質」が登場した。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体においては、物質の内部は絶縁体状態であるにもかかわらず、物質の表面、つまり外部との境界（3次元系であれば表面、2次元系であれば端）にトポロジーに特徴づけられた特異な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きをそろえていること（スピン運動量ロッキング）が特徴である。また、トポロジカル絶縁体の派生物質であるトポロジカル超伝導体の中にマヨラナ粒子が存在しうること、トポロジカル半金属の1種であるワイル半金属の中にワイル粒子が存在することなどが相次いで発見されている。通常の物質とは異なり、トポロジカル物質には非磁性の欠陥や不純物に対して堅牢（ロバスト）な性質を持つ電子が存在するため、スピントロニクスや量子コンピューティングへの応用に大きな期待が寄せられている。さらに、実空間におけるトポロジーに起因したスキルミオンは、高密度高速メモリへの応用に向けた精力的な研究が行われている。

日本では、内閣府最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「強相関量子科学」（2009～2013年度、中心研究者：十倉好紀・東京大学教授（当時））および最先端・次世代研究開発支援プログラム（NEXT）「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」（2010～2013年度、安藤陽一・大阪大学教授（当時））において、トポロジカル絶縁体や周辺のトポロジカル物質に関して世界を牽引する成果が生まれている。またJSPS科研費新学術領域「対称性が破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（2010～2014年度、領域代表：前野悦輝・京都大学教授）、同じく新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（2015～2019年度、領域代表：川上則雄・京都大学教授）で着々と上記分野における基礎学術基盤が築かれつつある。さらに、2018年にはこれまで蓄積された基礎研究成果を元にデバイス応用へ向けた研究を加速することを目的として文部科学省の戦略目標「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」が設定された。それを受けて、JSTにおいては戦略的創造研究推進事業CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域（2018～2025年度、研究総括：上田正仁・東京大学教授）およびさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」領域（2018～2023年度、村上修一・東京工業大学教授）が発足している。

一方で米国では、Gordon and Betty Moore財団の助成プログラムEPiQS（Emergent Phenomena in Quantum System）Initiativeのなかで第1ステージ（2014～2019年）に引き続き、第2ステージ（2020

～2025年）においてもトポロジカル物質を含む量子物質における創発物性の基礎研究を支援している。さらに、Microsoft Research Station Qではディレクターに数学者のMichael Freedman（1986年フィールズ賞受賞）を迎え、トポロジカル量子コンピューティングの研究に着手している。ドイツのエクセレンス戦略におけるエクセレンスクラスターの1つとして、2018年よりケルン大学を中心とした「Matter and Light for Quantum Computing：ML4Q」が開始され、トポロジカル量子コンピューティング実現へ向けた研究開発が開始されている。その他、カナダCIFAR（Canadian Institute for Advanced Research）や中国のSCCP（Shanghai Center for Complex Physics）などにおいてもトポロジカル絶縁体などの研究がさかんに行われている。

3次元微細加工

最先端の半導体プロセス技術では、微細化と3次元構造化の流れのなかでセルフアライメント化と高アスペクト比化が重要な進化軸となっている。特に近年、3D NAND型フラッシュメモリやDRAM等の製造で、50超の超高アスペクト比の絶縁膜加工が要求されており、ドライエッチング技術分野で最重要課題の1つとなっている。

トップダウンの微細加工では、短波長光リソグラフィ（ArF液浸、EUV露光技術）、多重露光、セルフアライメントの3つが重要なキーテクノロジーであり、なかでも特にセルフアライメントパターニングの実現には、超高選択比加工技術が要求される。超高選択比加工を可能にする次世代技術として有望視されているのが原子層エッチング（Atomic Layer Etching：ALE）である。従来のALEは反応生成物の脱離を主にArイオン照射で行っていたが、近年、反応生成物を熱脱離させるThermal ALE技術の研究開発が日立ハイテク社を中心に活発化している。Thermal ALEは最先端の3次元FinFETなどの製造に用いられつつある。

トップダウン技術の先にはボトムアップ技術の登場が期待され、セルフアライメントとセルフアセンブリを実現できる選択的原子層堆積（Area-Selective Atomic Layer Deposition：AS-ALD）や、ブロックコポリマー（block copolymer）を用いた誘導自己組織化（Directed Self-Assembly：DSA）パターン形成が有力候補にあがっている。3次元加工には、アスペクト比に依存しない成膜、加工技術も必要となる。そのため、高アスペクト比化の進展に応じて加工レートや洗浄レートが低下する本質的な課題を解決するため、自己停止プロセスであるALDやALEのニーズが今後高まると予想される。

国内では、微細加工関連の大型研究体制・プロジェクトとして、超先端電子技術開発機構（ASET、1996年～2013年）、半導体MIRAIプロジェクト（2001年～2010年）、あすかプロジェクト（2001年～2010年）が実施されたが、それ以降は、国内の半導体メーカー数の減少とともに、目立った動きはない。ここに国内戦略の大きな課題があると考えられ、デバイスメーカーや装置メーカー、大学を巻き込んだ、新しいプロジェクトの発足が期待される。

米国、欧州では産業界を中心にALD/ALEに関する研究が推進されている。特にベルギーのIMECがコンソーシアムとして業界内での存在感を示している。IMECは、AS-ALDの分野で大手装置メーカーとの研究開発を活発に行っており、近隣のアイントホーフェン工科大学（オランダ）でも、ALD/ALE分野で先駆的な研究を行っている。

韓国の通商資源部（MOTIE）はALDの開発に積極的で、3～4年計画のプロジェクトが進められている。装置メーカー1社、部品、材料、解析関連の企業、および大学や国立研究所が参加する形態で、韓国ではこれが典型的なプロジェクト体制となっている。MOTIEは、半導体・ディスプレイ事業の人材育成、大学教員教育を行っており、ALD/ALE関連の人材育成プロジェクトも行われている。

ALD/ALE技術では、材料ごとに最適なガスケミストリーや表面処理が異なるため、材料とプロセスの

データベース化が強く求められている。また脱離物の分子量が大きいので、脱離中に分解し、加工速度が安定しない課題がある。分解反応を抑制する目的で添加するガス（Stabilizer）の検討も必要である。特にThermal ALEは非常に新しい技術であり、今後大いに発展する可能性を秘めている。

オペランド計測

オペランド計測とは、実際の使用環境・動作環境下での研究対象の特性解明を目的として、主に時間変化を明らかにする計測技術のことである。「オペランド（operando）」という言葉は“working”や“operating”を意味するラテン語で、2002年に触媒分野で使われ始めた。近年の環境・エネルギー問題への対応として、触媒材料やデバイス（蓄電池、太陽電池など）の新規開発・高機能化をめざし、機能を発現している状態の対象を計測する「オペランド計測」が急速に進展してきた。また計測対象は、触媒材料・デバイスにとどまらず、生きた細胞や組織などの生体試料にまで広がりつつある。

計測プローブとしては、ナノスケール分解能が比較的容易に実現する走査プローブ顕微鏡（SPM）や透過型電子顕微鏡（TEM）、ならびに非破壊・非侵襲・高透過能などの特性を持つ量子ビーム（放射光X線、中性子線、レーザなど）が代表的である。 SPMでは、表面ポテンシャル分布をナノスケール計測できるケルビンプローブフォース顕微鏡（KPFM）がデバイス内部の電位分布計測に適用されている。太陽電池デバイスや全固体型リチウムイオン電池に対し、平坦な内部界面を創製する技術が確立されており、KPFMを用いて電池反応のダイナミクスを動画的に可視化できる。 TEMでは、機械学習による画像解析法を取り入れることで低い電子線照射量の計測でも明瞭な画像を得ることが可能となった。計測の高速化や、電子線照射に弱い計測対象の低侵襲計測が容易になり、GaAs半導体p-n接合部の電位分布や、全固体型リチウムイオン電池のLiイオン分布のオペランド計測が実現した。放射光X線では、そのコヒーレンスを活用した可視化技術がオペランド計測の強力なツールとなりつつある。コヒーレント回折イメージング（CDI）、タイコグラフィーをXAFSと融合させたスペクトロ・タイコグラフィー、Bragg回折を用いたコヒーレント回折イメージング（BCDI）などの活用により、10 nmスケール分解能での3次元イメージングの実現が期待されている。中性子線では、時間分解オペランド計測が本格的に始まっている。パルス中性子と外部刺激とを同期させるストロボスコピック測定法が確立されつつあり、稼働中のモータやトランスの漏れ磁場、印加電圧変化による圧電素子の構造変化、焦電材料の温度・電場変化、磁気スキルミオンの形成過程などのオペランド測定が実現されている。レーザによるオペランド計測では、コヒーレントラマン顕微鏡を生体関連分子の画像化に利用する例が増えてきた。この手法の持つ高い化学的選択性、感度、イメージング速度により、細胞イメージングの強力なツールとなっており、細胞内構造の同定、代謝の観察などに広く利用されている。

諸外国で、オペランド計測に特化した大型プロジェクトは見当たらない。米国ではDOEによる「オペランドSPM：可変圧力＆温度」プロジェクトが2015年から走っている。次世代エネルギーデバイスに関する応用志向的プロジェクトでオペランドSPMの研究開発が進展しているものと思われる。

欧州ではEU Horizon 2020のエネルギー関連プロジェクトのなかでオペランド計測の研究開発がサポートされている。また、欧州プロジェクト「Nanoscience Foundries and Fine Analysis（NFFA）」は、ナノテクノロジー研究環境の統合とオープンアクセス化を志向したものである。英国EPSRCによる「Enabling next generation lithium batteries」プロジェクトも注目に値する。欧州と中東の加速器ベース施設へのアクセスと利用サポートのプログラムCALIPSOplusが用意されている。

日本でも、オペランド計測に特化した大型プロジェクトは見当たらない。JST未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」領域（2018年度～）、未来社会創造事業大規模プロジェクト型「界面マルチスケール4次元解

析による革新的接着技術の構築」（2018年度～最大10年間）、ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト（2015～2020年度、特別重点期間2020年度）、CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」（2019～2025年度）、科学研究費補助金新学術領域研究「ハイパーマテリアル：補空間が創る新物質科学」（2019～2023年度）、「ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・反応プロセスの創成」（2018～2022年度）、「ミルフィーユ構造の材料科学－新強化原理に基づく次世代構造材料の創製」（2018～2022年度）、「蓄電固体界面科学」（2019～2023年度）、特別推進研究「原子・イオンダイナミックスの超高分解能直接観察に基づく新材料創成」（2017～2021年度）の一部課題として、TEM、放射光、X線、中性子線などによるイメージング技術関連のプロジェクトがある。また、放射光X線のオペランド計測では、NEDOの「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」（2016～2020年度）、文部科学省が実施している「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」（2012～2021年度）が深く関連している。計測技術を対象としたプロジェクトとしては、ナノテクノロジープラットフォーム事業（2012～2021年度）、JST CREST/さきがけ「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」（2016～2022年度）などが進んでいる。

日本国内の各研究拠点でもオペランド計測を志向した動きが目立つ。NIMS 先端材料解析研究拠点では、第4期中長期計画プロジェクト（2016～2022年度）の主要テーマの1つとして「表面敏感オペランドナノ計測法の開発と先進材料応用」を取り上げている。金沢大学は、文部科学省世界トップレベル研究拠点（WPI）プログラムの支援を受け、2017年にナノ生命科学研究所（NanoLSI）を設立した。産総研と東京大は共同で、産総研・東大 先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ（OPERANDO-OIL）を2016年に設立した。

■分野別の俯瞰ワークショップのサマリー

CRDSでは2019年版の俯瞰報告書発行以降、国内外の社会情勢、科学技術の動向を踏まえ、4つの領域「光技術」「プロセス・インフォマティクス」「感染症対策へのナノテクノロジー・材料分野の貢献」「ポストコロナ時代に求められるナノテクノロジー・材料分野の研究開発」を俯瞰ワークショップのテーマとして取り上げた。

それぞれについて、識者へのインタビューを含む事前調査および俯瞰ワークショップを開催し、各領域における技術・産業の状況の把握、注目される科学技術の潮流、今後求められる技術、研究開発の方向性などについて議論を行った。

以下では、各ワークショップから得られた知見、注目動向、今後の方向性、制度・政策上の課題等について要約を記載する。議論の詳細については、各ワークショップの報告書（CRDSの web ページに公開）を参照されたい。

❶ 光技術

光技術に関する先端動向や社会ニーズなどを俯瞰し、そのなかで日本として産業的な優位性を持つために集中的に強化すべき技術領域を特定し、その強化方法・体制などについて議論を深め、光技術の俯瞰図の更新と今後の研究開発の方向性を見出す目的でワークショップを開催した。光の技術は光通信、自動運転、ディスプレイ、イメージセンサ、LED 照明、太陽電池、レーザ加工、計測・評価装置などの民生用製品や産業用製品に広く使われ、情報処理・通信分野、エネルギー分野だけでなくバイオ・医療分野への利用も進んできている。今後は、各技術の高度化はもとより、異分野の技術との融合・統合により新たな技術領域や応用分野を作り出していくことが期待されるが、以前は日本が先端技術を保有し競争力が強かっ

た産業分野（エレクトロニクス、通信機器、計測装置など）において、産業競争力が低下しているといった問題も顕在化している。これらを踏まえ、今後、大きな発展が期待され注目される光技術に関して、日本が強化していくべき技術・応用領域、異分野融合や人材育成も含めた研究体制、などについて議論し、図1.2.2-2の分野俯瞰図をはじめ今後の研究開発の方向性を得た。

（1）注目される光科学技術、社会・産業上重要な分野、保持しておくべき基盤技術

・人と光との関わりとしてディスプレイや照明、バーチャルリアリティなどエンターテイメントの視点などが重要
・AI/IoT の時代における光のアナログ性を活かしたコンピューティングへの応用、イメージング技術、LiDAR 等のセンサ、メタサーフェスなどが注目
・量子光学、レーザ光源、レーザ加工、レンズなどの基盤技術の維持が必要

（2）日本として強化していくべき分野

・AIや量子など高度で低消費電力の情報処理の基盤となるナノフォトニクス・光集積回路技術
・LiDARなどの3次元イメージング、バイオイメージングなどの各種イメージング技術による情報の取得技術
・産業用の小型・高出力・短パルスレーザ光源、殺菌・滅菌用の深紫外光源などの先端レーザ光源技術
・5G・6G無線通信インフラおよびコンピュータ対応の光通信技術

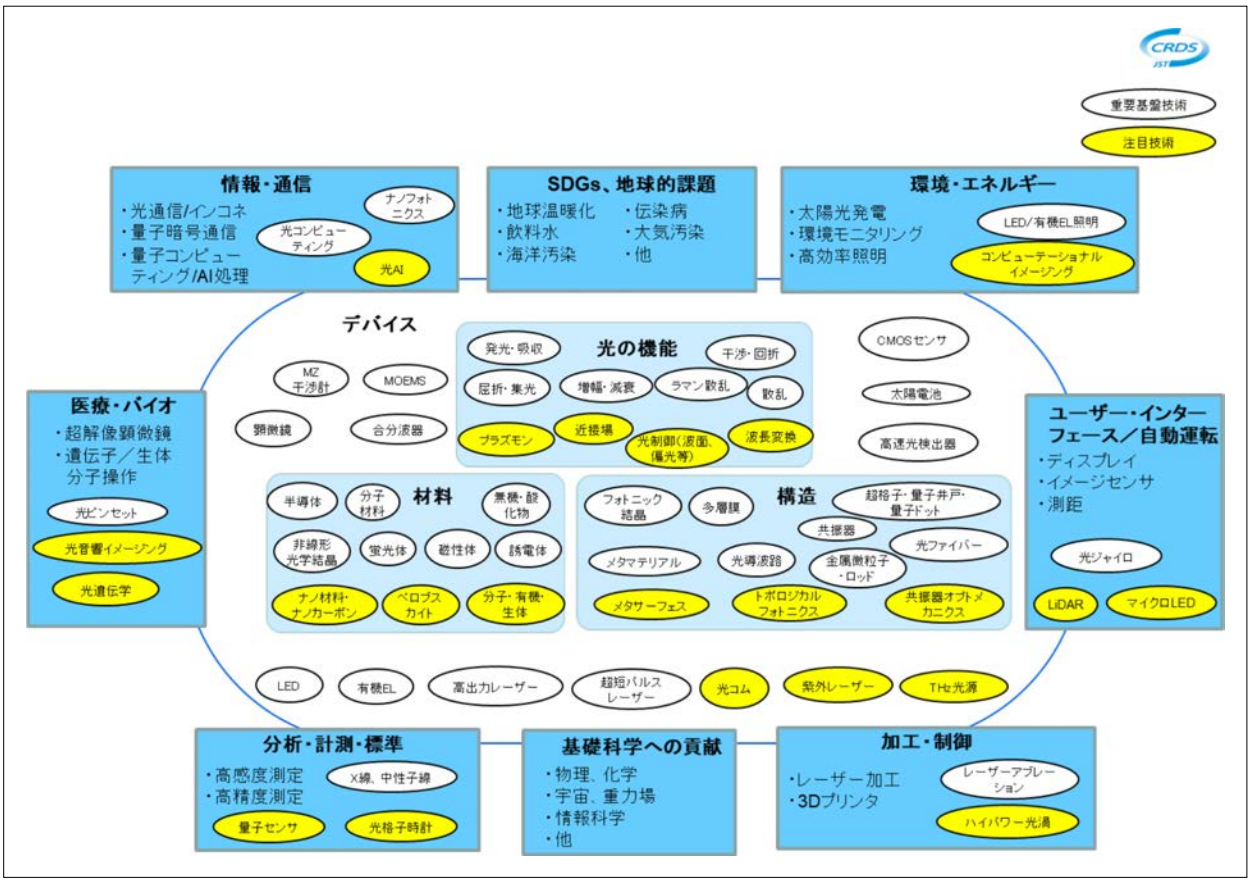


図1.2.2-2　　光技術の俯瞰図と注目技術

・日本の強い材料と光技術との融合による機能性光材料技術

（3）光の分野で日本が世界に伍していくために必要な体制・仕組み

・日本の持つレーザなど様々なものづくりのシーズ技術とデジタル技術を組み合わせてアイデアを実現可能とする拠点・仕組みを検討し、様々な人が集まり新たな光技術・製品を生み出す場として世界に発信することが重要
・材料分野や化学分野、医学分野など異分野と光技術の連携を促進するために、学会活動やファンディングシステム、ナノテクノロジープラットフォームのような共用施設やファブ機能の充実が必要
・新たな研究開発のアイデアを生かせるように、多様性や高リスクを容認し、裾野を広げる基礎研究ができる体制や環境の整備、および企業と大学間や研究者間を橋渡しするコーディネーターの充実が必要

（4）光技術の俯瞰図

・世界の視点からSDGs への貢献、重力場などの基礎学理への貢献
・光の波面制御、偏光制御、量子光学、医療・バイオで重要となるX 線、電磁波領域での新たな光源

（5）今後の光技術発展への期待

・多様化する社会や顕在化する地球規模の課題をより強く意識し、より広い視点で分野融合・連携を進め、従来想定されないような応用も含めて光技術（光学・フォニクス技術）を活かす新しい方向性を見出すことが必要
・光技術自体についても、硬直化することなく新しい概念や材料を積極的に取り入れる柔軟性が求められ、これらにより基礎科学の深化への貢献を期待

❷ プロセス・インフォマティクス～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～

材料合成プロセス開発にデータ科学の手法を導入し、これまでにできなかった材料の合成や、既存の材料の特性向上を可能にするサイエンス/テクノロジーである「プロセス・インフォマティクス」について研究開発の現状と将来の発展の可能性、解決すべき課題などに関する議論を深める目的で、「無機結晶・多結晶」分野、「触媒、有機材料」分野の２回に分けてワークショップを開催した。

先行するマテリアルズ・インフォマティクスにおいては、すでにいくつかの成果が得られており、新材料開発に一定の役割を果たし始めているが、多くの場合、候補となる新材料の組成・構造が予測されているだけで、その材料が「実際に作れるのか」、「どう作るのか」までが示された例はほとんどない。これは、物性物理学の豊富な知見の蓄積により材料の組成・結晶構造からその物性をかなり正確に予測できるようになっているのに対し、特定の製造プロセスにより材料がどのように合成されていくかに関する予測可能性は非常に限定されていることに起因している。これは、材料の組成・構造を決めるパラメータ空間よりも、製造プロセスを特徴づけるパラメータ空間の方がはるかに広大であることが１つの要因であると思われる。また、昨今の先端材料に求められる特性には、従来以上に高度な性能や、相反する性能を併せ持つことが求められるようになっており、これまで行われてきた材料合成手段を超えた合成手段、準安定状態や非平衡状態を積極的に利用するような、新たな物質合成スキームを検討する必要が出ている。このような、新合成プロセスの構築には、従来よりもはるかに精緻なプロセスパラメータの制御が必要になると予想されるため、プロセス開発の手法自体を革新していくことが求められている。

プロセス・インフォマティクスは、プロセス探索を実験とデータ科学の融合により加速し、最適プロセスの構築を実行可能にするものと期待される。また、図1.2.2-3に示すように、マテリアルズ・インフォマティクス、計測インフォマティクスと密に連携した、データ駆動型のものづくりの基盤を世界に先駆け構築することで、日本の材料創製研究の基盤を強化することができると期待される。

2回のワークショップおよび総合討論を通じて、以下のような研究開発の方向性が示された。

• 今後の研究開発の方向性

（1）プロセス・データの特徴、重要性

・産業界の持つデータのうち、個々の企業の競争力の源泉となるものは機密性が高く開示を求められるようなものではない。文献・特許に記載されているデータは、必要なパラメータがそろっていないケースが多く、補助的な役割として使用するのが適してる。

・実験などにより、斉一なデータを取得し、蓄積することが非常に重要である。

・プロセス内で起きていることのその場計測やシミュレーションと密に連携させることが重要である。

・装置の劣化や、実験条件以外の環境因子（温度や気圧など）も考慮する必要がある。

・データの取扱ルールを明確にする必要がある。すべてオープンにするのは不可能だが、インフォマティクスを機能させるためには、できるだけオープンにする必要がある。オープン/クローズドシェア/クローズド区分の設計が極めて重要である。

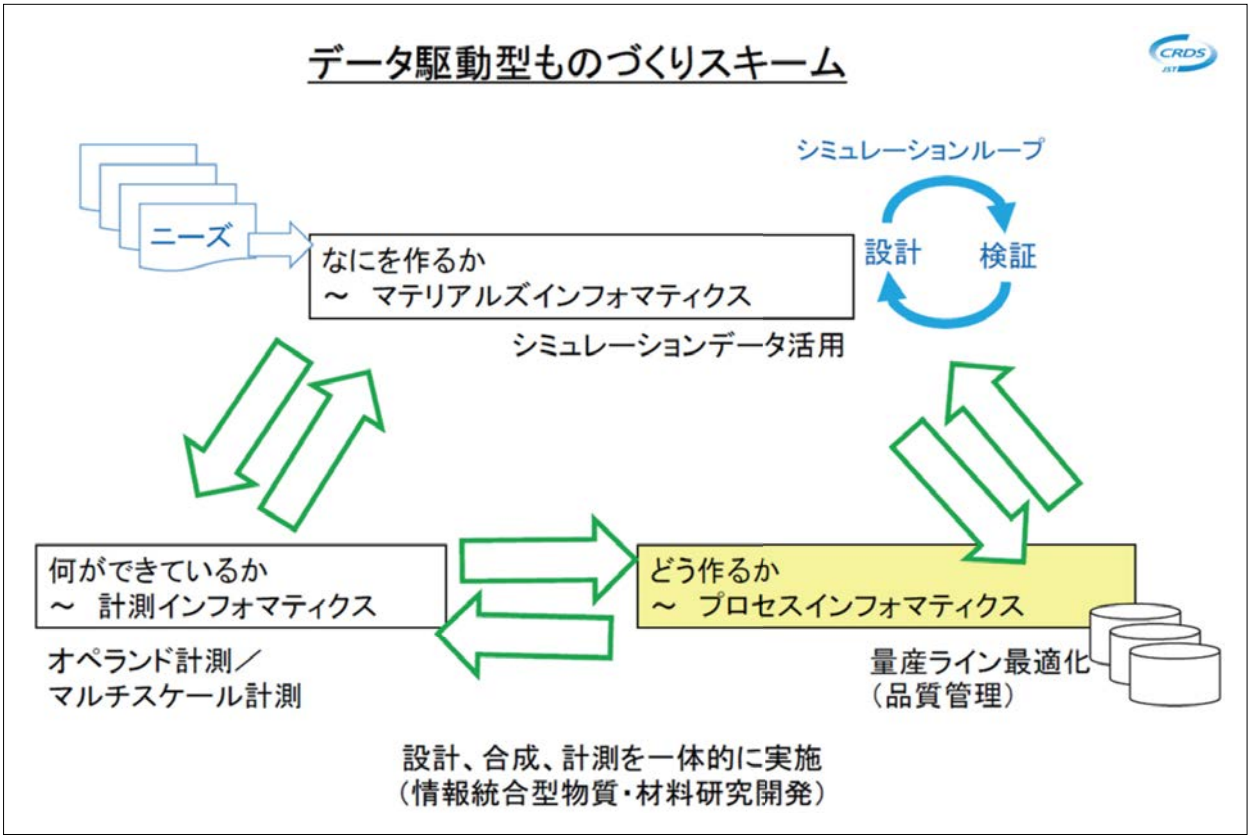


図 1.2.2-3　　データ駆動型ものづくりスキーム

・将来的には、例えばデータ取引のように新たなビジネスモデルが生まれてくる可能性もある。

（2）実験データとシミュレーションの連携

・実験によって十分なデータ数を取得するのは膨大な時間がかかる。シミュレーション技術を上手に活用するべきである。

・ただし、特に予想できないデータを生み出すという意味で実験データは重要であり、ハイスループット合成・計測実験を積極的に活用することが望まれる。

（3）プロセス・インフォマティクスの拠点

・プロセスごとの拠点としてプロセス・センターを設け、産官学がその環境を活用して実験することで、データや知見が集まるような仕組みが有効と思われる。

・プロセス・センターには、実験DX（合成装置と評価装置）と、データを蓄積するサーバ、技術者、データ科学者がいる形が良い。

（4）人材

・プロセス・インフォマティクスの推進には、複数の専門性を持つ人材が必要。マテリアルを理解したうえで機械学習などのデータ科学の専門性も身につけるキャリアパス形成手段が、現在の日本には不足しているので、整備する必要性がある。

❸ ナノテク・材料研究が実現する新興感染症対策能力の持続的強化～ポストコロナ時代を見据えて～

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的パンデミックという危機に際し、緊急の感染症対策とポストコロナ社会の強靭化に向けた検討・取組がさまざまな分野で進められている。このような状況下、ナノテク・材料分野においてもポストコロナの新時代を見据え、新興感染症対策能力の持続的強化という観点でいかに貢献しうるか、研究開発の動向を俯瞰し検討する目的でワークショップを開催した。貢献が期待されるナノテク・材料技術に関してCRDSが行った予備的検討を踏まえ、「将来の医療基盤技術を生むナノテク・材料」「診断・ウイルス検出・感染予防を革新するナノテク・材料」「未来医療に向けた最先端科学技術の展開」の3つのテーマを設定し、各分野の専門家による話題提供をもとに議論を行った。議論の結果から浮かび上がった、今後の研究開発の方向性、システム・制度上の課題・問題点を以下に示す。

• 今後の研究開発の方向性（図1.2.2-4）

・空気中のウイルスの検知・捕捉・除去技術、ウイルスの可視化技術、ウイルス感染を知らせるウェアラブルデバイスの開発

・迅速なPCR検査実施を可能にするロボットやオンサイト診断システムの開発

・感度・特異性が高く、迅速な抗原検査法の開発

・大量のサンプル中に含まれる極微小量ターゲットの濃縮・分離を行う前処理技術の開発

・1種類のウイルスだけでなく、多項目を同時に検出し、統合的に判断するシステムの構築

・材料表面の構成元素・構造がウイルスに及ぼす影響の解明

・ウイルスが高度な分子複合体であるとの観点にもとづく、材料との相互作用の検討

• システム・制度上の課題・問題点

・ナノテク・材料分野の研究者にとっては、研究用の臨床検体などの試料の確保が課題

・世界で新型コロナのワクチン開発が進んでいるが、日本はmRNAワクチンやDNAワクチンの原料を大量に、

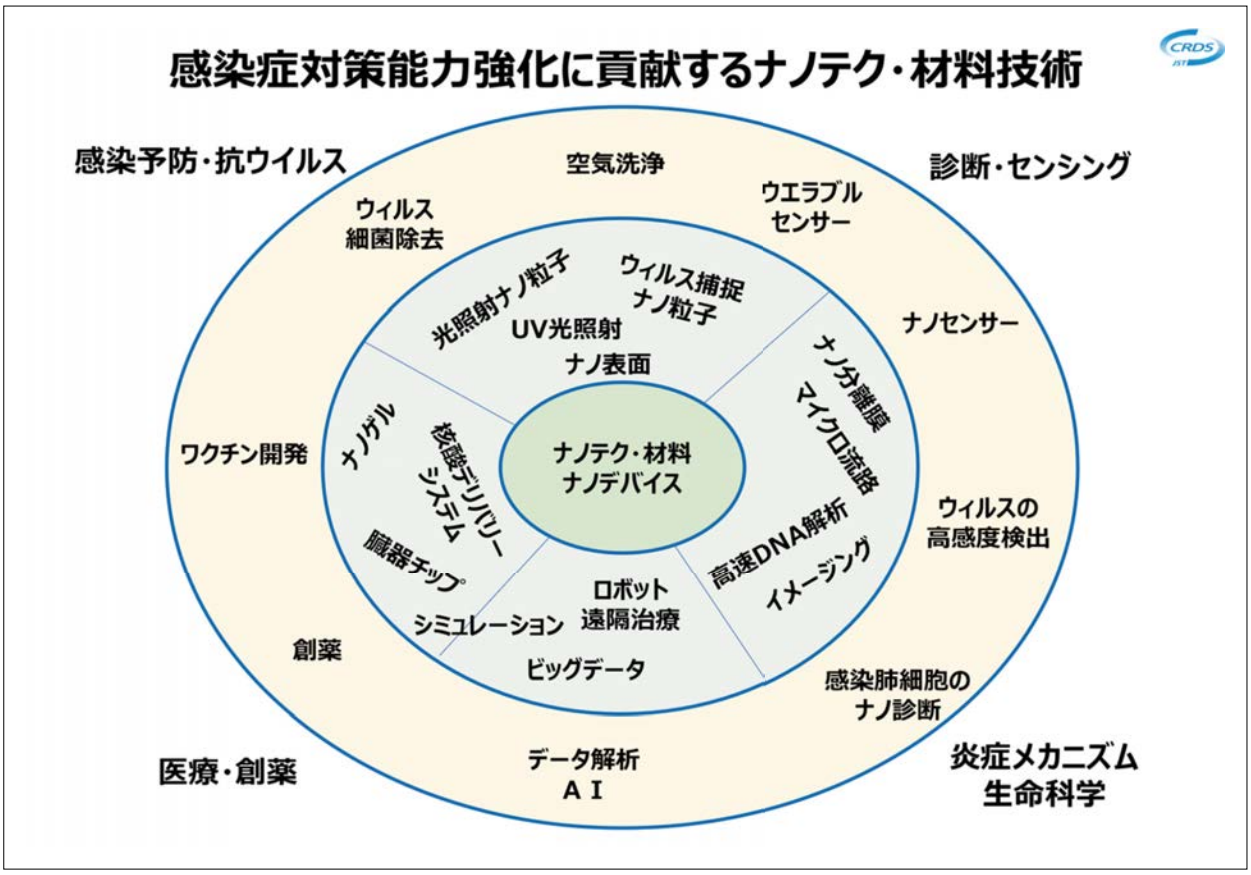


図 1.2.2-4　　感染症対策能力強化に貢献するナノテク・材料技術

GMP（Good Manufacturing Practice）基準を満たして製造する能力が不足

・ビッグデータ活用の重要性が増している反面、その処理や保存に課題

・感染症対策をいかに持続的に行うか長期戦略としてとらえることが必要

・一方で、新型コロナ危機のような大きな出来事があったときに、目的に向けて研究者が迅速に集合し、対応することが可能な枠組みも必要

❹ ポストコロナ時代における研究開発・人材育成手法の変革と注目すべき技術領域

❸では新型コロナウイルス感染症の世界的な流行を受けて、「ナノテク・材料分野がポストコロナ対策能力強化にいかに貢献しうるか」を題材として当研究分野と新型感染症との直接的な関わり、研究開発の方向性に関するワークショップを紹介した。一方で新型コロナウイルス感染症が社会・経済に与えた多大な影響を中長期的に考慮し「新型感染症により変容する社会に対しナノテク・材料分野がどのように貢献しうるのか」についても議論することが重要であるとの視点に立ち、本ワークショップを実施した。

新型コロナウイルス感染症への対応で大きな変化がもたらされた、研究開発現場の現状と課題を俯瞰し、新しい生活様式（ニューノーマル）下に求められる研究開発活動、教育・人材育成のあり方、今後重要となる研究領域、について議論を行った。コロナ以前と同じ研究開発のあり方では生産性が著しく低下するのは明白であり、研究環境、教育現場のデジタルトランスフォーメーション（DX）を加速させるのが急務であり、具体的に以下の方向性を得た（図1.2.2-5）。

• 今後の研究開発の方向性

（1）研究開発環境の整備

・実験室や共用施設の遠隔化・自動化などのDXによるニューノーマルでの生産性向上
・スマートデバイスを駆使した遠隔実験などのDXを支えるツール群の整備
・DXを契機としたデータの共用化およびそのマネジメントルールの整備

（2）人材育成方策

・リアルでしか伝えられない実験技術やノウハウなどの伝承のデジタル化、もしくはリアルとデジタルのハイブリッド化
・デジタルを活用し、個人のライフスタイルに合わせたフレキシブルかつ孤独感の解消された研究・教育環境の構築
・デジタルツールによるニューノーマルでの人的交流、国際交流手法の開拓
・DXの推進によるナノテク・材料分野の魅力度向上による優秀な人材確保

（3）強化すべき研究開発領域

・ニューノーマルで増大する情報処理ニーズに応えるための5G・ポスト5Gの通信技術、低消費電力の半導体デバイス、量子コンピューティングなどの革新的コンピューティング

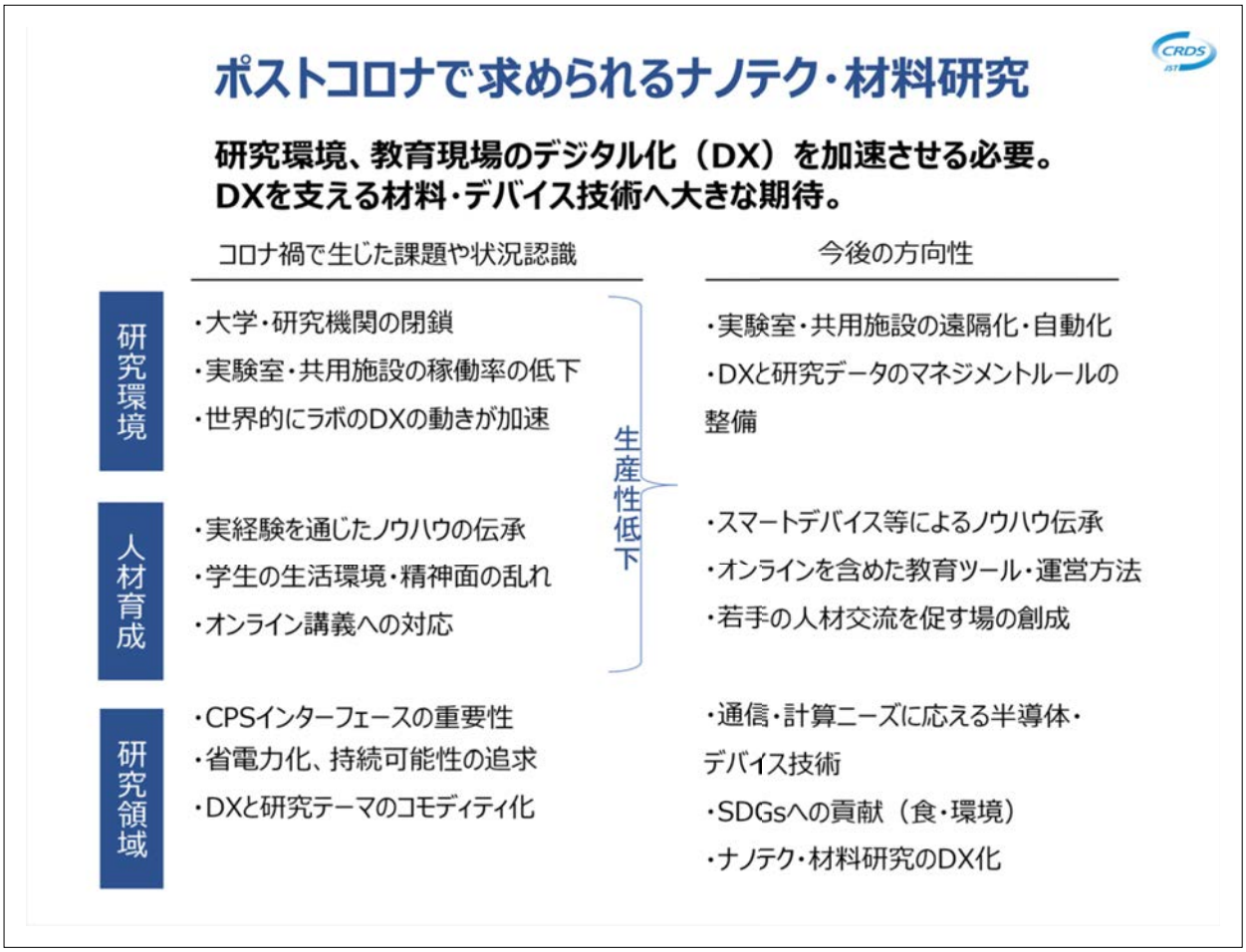


図1.2.2-5　ポストコロナで求められるナノテク・材料研究

・サイバー空間と物理空間の融合（Cyber-Physical System）を支えるインターフェースとしてのセンサ、アクチュエータ
・自然災害、天災に強いレジリエントな分散型社会を支える分散型製造プロセス開発、サーキュラーエコノミー、SDGsなど持続可能な社会を支える環境・エネルギー技術、食糧生産技術
・ハイスループット実験とインフォマティクスの融合による自動・自律的な材料・デバイス開発手法の創出

1.2.3 社会との関係における問題

■ 化学物質・ナノ材料の人と環境への安全性

ナノテク・材料科学技術は、それを応用した部素材・デバイスを通じて幅広い応用領域に関係しているため、社会や生活との関わりの様相も多岐にわたっている。そのなかで、人体や環境への安全性は、特に社会とのつながりが強い問題として古くから認識されてきた。明治時代の鉱毒事件に始まる公害は、日本の近代工業が急速に発展した高度成長期には、大きな社会問題となり、経済・産業の発展と工業排出物による環境への悪影響の軽減をどのように折り合わせていくかに様々な工夫がなされた。1960年代に制定された、公害対策基本法、大気汚染防止法、水質汚濁防止法、土壌汚染対策法など各種法律は、新たに判明した問題に対処するために適時改訂されながら、化学物質による環境汚染や人体に対する害が可能な限り顕在化しないよう運用されてきた。

しかし、化学物質の環境・人体への害や毒性は急性のものばかりではない。何十年もの放出・暴露の結果、初めてそれが認識された、フロン（オゾン層破壊が問題となるまでは、不燃性、人体無害の理想の溶媒とされた）や、アスベスト（肺の障害の原因として全廃されるまで、安価で効果の高い断熱材として重宝された）などのように、当初は想定しなかった重大な問題により、多大な対策コストが発生する、場合によっては取り返しのつかない永続的影響を残す例もある。こうした事例を受け、新規化学物質が製造・輸入される前の、化学物質の事前審査、継続的な管理措置、性状に応じた規制措置などを定めた「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（化審法）などによる、可能な限りの予防策が設けられているが、それにより完璧な防護がなされているわけではない。

ナノスケールの大きさを持つナノ材料の場合には、事情はさらに複雑となる。ナノテク・材料科学技術の特徴の1つが、バルク材料では発現しないような新規で有用な機能を引き出せるという点にある。しかし、このことは、バルクとしては毒性・危険性がない物質であっても、ナノ材料化した際にも有害性がないとは必ずしも言い切れないことを意味しており、従来材料知識から毒性・危険性を持つと予想される元素、官能基、分子への規制・対策を行うことを基本とする化審法の網をすり抜ける可能性が高い。

ナノ材料は、少なくとも1次元の大きさが100 nm以下で人工的に製造された材料を指すことが一般的である。最近では、10 nm以下のサブナノマテリアル材料も増えており、分子状物質と変わらない大きさである。このようなサイズの低減により、生体にとっては組織浸透性が向上することに加え、比表面積が大きくなることで電子反応性や界面反応性も向上し、高機能化が実現している。今日では、その優れた機能を利用するために、医薬品、化粧品、食品などの多くにナノ材料が含まれており、私たちがナノ材料を体内に入れる機会は非常に多くなっている。こうしたなかで、安全性を確保するためには、「生体影響や環境影響」の評価は当然ながら、サイズや表面性状をはじめとした「物性」との連関を解析することが必要となる。この観点から、さまざまなナノ材料を細胞/動物に添加/投与し、その応答が解析されているものの、ハザード同定に軸足が置かれており、研究者の専門性に応じて解析項目も設定されがちである。リスクの解析には、暴露実態に沿っ

た生体応答/細胞応答評価が求められる。すなわち、ハザード情報のみならず、吸収・分布・代謝・排泄や蓄積といった動態情報を定性・定量解析し、「暴露実態」を解明することで、リスク解析に資する情報の集積を図ることが必要となる。

最近、欧州各国を中心に、ナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進んできた。このことは、事業者がナノ材料を活用したサービスを行うに際し、事業推進の可否に決定的な影響を及ぼすことになる。ナノ材料の定義、分類、測定方法、評価方法、評価結果の解釈は国際協調で進むが、関連データの共有は十分に進んでおらず、また、対象範囲やばらつきも多いことから、あらゆるナノ材料に完全に対応するような取組は現実的でなく、不可能と考えられている。一方、現時点において「ナノであるがゆえに特有」の負の健康影響や環境影響は、科学的には確定していない。近年はどちらかといえば「ナノであるがゆえに特有」の生体作用機序は存在しないのではないかといった専門家の見解も広がりつつある。これを断定的に考えるべきではないが、従来型の化学物質のガイドライン類が、基本的にはナノ材料の評価にも適当であるとする考え方が広がってきている。

日本の化審法に相当するEUでの化学物質規制は2007年から施行された「化学物質の登録、評価、認可及び制限（REACH）に関する規則（REACH規則）」で、このなかでは、「2020 年までに人の健康や環境に対する著しい有害な影響を最小化する方法で化学物質が生産され、使用されることを達成することを目的とする」とうたっている。2019年からは、ナノ材料が本格的に対象となり、それらの安全性を評価するためのOECDによるリスク評価の為の試験法ガイドラインの開発や改良が欧州を中心に急ピッチで進められている状況にある。近年では、ナノ材料を含めた先端材料やそれらを複合的に組み合わせた新規物質をアドバンストマテリアル（Advanced Materials）と捉え、ナノ材料からより広い分野に対する新材料の安全性をどう評価すべきであるかという方向に議論は広がっている。

評価対象がナノ材料からアドバンストマテリアルに拡大しても、その生体への吸収性や反応性の点に関しては、検討すべきことはナノ材料の時と同様であると考えられている。しかし、健康評価の毒性学的観点よりも行政的なリスク評価・管理体制へのインパクトは大きく、さまざまな材料の原料としての化学物質の評価体系のなかで行おうとしてきたナノ材料評価に対し、単なる一材料としての評価だけではなく最終（消費者）製品としての製品評価を行うことが求められるアドバンストマテリアル評価では、異なる行政的な管理体系が必要となる。現状では、特定の化学物質にどのような条件で暴露されるのか、例えば環境に放出されたのちの環境からの暴露か、医薬品として直接体内に入れた暴露かによって、評価法が異なっており、安全性評価の整合性の点から問題がある。

一方では、長期暴露による発がん性を中心とした評価法には課題が残っている。慢性影響の評価を確定する為の試験は、動物実験などの長期毒性試験に頼らざるをえず、アドバンストマテリアルに含まれる数多くの物質に対して、すべてに対してそのような試験を行うことは現実でなく、より効率的な試験法の開発が必要となる。今後、社会的なニーズにかなったアドバンストマテリアルを用いた製品は、広範かつ長期に渡り使用され続けることが想定されるが、この長期的な暴露による将来のリスクを回避するとともに、安全性を担保してかつ国際的競争力を高めた製品を市場に提供するための評価システム構築の必要性が高い。

従来の化学物質の評価においても、カテゴリー化・グルーピング（類似の物質を括って評価する）、リードアクロス（評価対象物質の特性を、類似物質の既評価物質の特性から類推する）、QSAR（Quantitative Structure Activity Relationship/定量的構造活性相関：物質の構造や基本的な物理化学特性値から有害性等を推定する）が行われてきた。ナノ材料またはアドバンストマテリアルにおいて、評価の効率化が求められていることは、単なる試験コスト削減に留まらず、最近強まっている動物試験削減の動きや、新材料の活用

によるイノベーションへの期待を背景にしている。

研究者と社会の多様なステークホルダーによる、相互作用的なプロセスを経て科学技術研究の成果を社会へ還元させるべきであるという「責任ある研究とイノベーション（RRI）」の考え方が国際的に拡がり、わが国の第５期科学技術基本計画では「社会と共創する科学技術」が掲げられた。不確実性やリスクを科学的に払拭することが難しい新興科学技術（Emerging Science and Technology）であるナノテクやアドバンストマテリアルの研究開発では、社会とこのような新しい関係を築くことが重要になる。

ナノ材料を用いた消費者製品が増加するにつれて、製品の製造から使用済み製品の廃棄やリサイクルまでの、全ライフサイクルを対象にしたヒトや環境への影響を明らかにする研究が行われるようになってきている。安全性について特に関心を集める代表的なナノ材料の１つであるカーボンナノチューブは、繊維状で高アスペクト比と形状的にアスベストに類似しているのではないかとされるが、両者の使用環境におけるサイズには相違があり、生体影響に関する相違は科学的に十分に明らかでない。2017年には、アスベストとカーボンナノチューブを比較し、両者によるがんや中皮腫等の発症にいたるメカニズムの解明をめざした研究が注目された。

日本では、毒性学を含めた安全性研究やリスク評価の体制は欧米に比較して脆弱であり、特に材料開発研究との協力体制が弱い。日本における安全性評価研究は、個別研究課題としてごく部分的に存在しているのみの状況であり、諸外国のような戦略的な体制からはほど遠い。諸外国との継続的な積み重ねの差によって、国際市場を想定したナノ材料・ナノ製品の開発およびその競争力に、差がつくことが危惧される。諸外国と日本のこうした環境の違いは、産業界、特にベンチャー・スタートアップとして新規ナノ材料の事業化を行う際などに、第三者的な評価を行うためのコストと開発期間の差となって現れ、起業マインドに水を差すことにつながる。また、大企業であっても、特に日本では経営層レベルで科学技術面のELSIに関する知識・認識不足のために、長期にわたる継続的投資が行われにくく、研究開発が頓挫してしまうことがある。ナノ材料を作製する事業者が、官と連携してリスク評価を行い、結果を社会に伝える機能の構築と、社会と共に歩む研究開発文化の醸成が課題である。

アドバンストマテリアルのリスク評価全体を、公的研究機関が、産学と連携して定常的に担っていく必要がある。欧米にみられるように、関連する公的研究機関の研究者が「組織の壁を越えて連携する仮想組織」を構築し、それを支える定常的な財源が課題である。特に、高度なリスク評価技術を身に着けた技術者が、プロジェクト期間の終了とともに現場を離れざるをえない状況は好ましくない。そこで、行政的な管理を待つのではなく、自主的にアドバンストマテリアルの種類等を把握し、さらに慢性毒性に関する情報を取得しながら安全性の高いマテリアルの自給体制構築をサポートするようなシステムをどう作るかが課題である。このような継続的総合リスク評価を行っていくことができれば、各企業が新規に開発するマテリアルに対して、高度な毒性学的情報にもとづいたリスク評価が行いやすくなり、企業による付加価値の高い製品開発を支援することができるようになると考えられる。

日本ではナノテクの研究者を志す人に向けた優れたカリキュラムを提供する大学・大学院は多いが、その一方で、学生がRRIの文脈に触れる機会は少ない。現在の日本の大学・大学院教育のなかではそのような機会を得ることは難しい。日本では、大阪大学のナノサイエンスデザイン教育研究センターが、ナノテクの社会受容に関わる課題をテーマとし、ナノテク・ナノ材料研究開発に携わる研究者・学生が様々な課題の最新の動向に触れる機会を提供する「特別集中講座『ナノテクノロジーデザイン特論Ａ』」を継続して開講している。

ナノテクのRRIに関連する施策としては、日本ではJST社会技術研究開発センター（RISTEX）「先進技術の社会影響評価（テクノロジーアセスメント）手法の開発と社会への定着」（2007～2011年度）の終了後は目立った取り組みがなく、この成果を具体的に活かすような施策も実施されていない。ナノテクに限らずテクノ

ロジーアセスメント全般について、継続した施策が無いといえる。同時に人材（自然科学の素養も持つ社会科学者）の育成も課題であり、それには彼らのキャリアパスの確立も含まれる。

■外国人研究者と産業競争力、安全保障

日本の大学や国立研究所は、少子高齢化を背景にした高度外国人人材活用の一環として、外国人学生や研究者を積極的に迎え入れるさまざまな施策を取っている。大学の自然科学分野では、2019年度2万人程度の外国人留学生がいたが、卒業後多くの外国人が、日本国内で研究開発の職業についている。こうして、若い外国人研究者は、日本の先端的材料研究を支えており、一部の研究機関では、外国人学生、ポスドク抜きでは研究活動の継続が事実上不可能であるケースさえある。こうした状況、特に国立研究所における、外国人研究者頼みの現実に対して、「国費を投じた最先端の研究開発の結果が、留学生、ポスドクが帰国する際に諸外国に持ち帰られ、それが、ゆくゆくは日本の産業競争力の低下や、安全保障上の危機につながる」といった論調の危惧が語られることもある。これは、ある面では正しい警鐘といえるが、必ずしもそうとはいえない側面も多い。

科学的インパクトが高く萌芽的な基礎研究を行っている研究室に、勤勉で能力の高い若手外国人研究者がいることは、周辺の日本人若手研究者に良い刺激を与え、研究室全体の活性化につながる。一般に、材料の基礎研究が実際に応用されるまでには長い年月がかかるため、ここで、外国人研究者を通じて持ち出された情報が、技術が実用化される頃にはその知識が陳腐化しているか、あるいは、広く知れ渡って世界の共通認識となっているかのどちらかのケースが多いからである。基礎研究フェーズでの外国人排除は研究の効率を落とすことこそあれ、競争力の維持になる可能性は低いため、積極的な国際連携を図るべきであろう。

一方で研究開発の内容が、実用化間近な研究開発であったり、重要な企業秘密あるいは国防にかかわる研究であったりする場合には、前述の危惧は確かに存在し、情報の漏洩による悪影響が国に不利益を及ぼす可能性も十分に考えられる。この問題は、結局は、民間企業の知財のオープン・クローズ戦略と同様な構造を持つ、研究開発の内容に応じたゾーニングの問題であり、外国人研究者が多く在籍すること自体が、即座に何らかのリスクにつながるわけではない。安全保障関連などの高い秘匿性が必要な研究開発に関しては、民間企業であれ、公的研究機関であれ、情報の秘匿区分に応じて情報に関与できる人間を制限・管理し、輸出管理の関係法令に則った取り扱いを行っている。

また、この問題の根本にあるのは、先端研究を志望する日本人の若者が少なくなっていることである。少子化の影響から生じる分以上に、この分野の若い日本人研究者が減っているとするならば、その原因を調べて改める必要がある。科学の道を志すこと自体が、若者にとって魅力のないものになっているとすれば、長期的な視点からの若手研究者の待遇改善や魅力の向上策が求められる。適切な管理のもと、国際共同研究や留学生等の研究活動を含む基礎研究が停滞しないような仕組みを持つことが重要である。

■ 大学等研究、および産学共同研究における知財戦略

大学等で優れた発見、発明がなされた場合、その技術を有効な形で出願するだけでなく、その特許の民間企業による利用が促進されるようにライセンス営業活動や、特許範囲に抜けがないかを把握するための特許マップ構築などを行う必要がある。このために、当該特許範囲の抜けを補完する特許を所有する国内外の研究機関と国際的な交渉を行う実務者の確保、また重要な特許を海外の多数の国に出願する経費の確保、さらには出願を維持、管理するための資金を確保することは、上記目的を達成するために必須である。

日本の大学からは、近年、年間1万件を超える特許出願がなされ、ナノテク・材料分野はそのおよそ1/4

を占めている。これらの特許権の実施等で日本の大学全体が受ける収入は、2018年度で44億円強となっている。一方で米国の大学全体が受ける特許収入は年間25億ドル近くに達しており、桁違いの差がある。米国ではバイドール法の制定以降、産学連携の推進、大学による特許取得、企業へのライセンスが急伸している。これが米国大学による巨額の特許実施収入に結びついている。一方、日本でも米国に遅れること20年の1999年に日本版バイドール法が制定され、国の方針として大学自らが特許のライセンス収入を稼ぐように方向づけられた。しかしながら、日本においてはそれ以降、産学連携が活発化するという兆候はみられず、大学所有特許の企業へのライセンス供与は低調のままで、実施料収入の日米差は依然として大きく開いている。

特許を出願、維持するためには、相応の費用が必要だが、日本の大学では上記のように保有特許によるライセンス収入が不調のため、特許の出願・維持に消極的になる傾向がみられる。特に事業の国際化が進む現況では、海外における特許権の確保は重要となるが、国内特許に比べ費用がかさむため抑制傾向にある。現状のままでは大学や独法への大規模な国費の投入の結果生まれた研究成果がなんら知財として守られなくなる可能性があり、もはや個々の機関での対応では困難になっている。今や、大学等の知財を一元的に管理する組織体制の構築等、抜本的な検討が必要と考えられる。特に、1つの大学が出願した特許の有効性を高めるためには、国内外の多数の研究機関が保有する権利を相互に利用できるような創造的かつ協調的な体制の構築も必要とされる。

一方でオープンイノベーションの時代に入り、産学連携のあり方も大きく変わりつつある。産業化に大きな研究開発リソースの投入が必要な、長期的で重要な技術テーマについては、産業界を含む多くの研究機関が参画するオープンイノベーション拠点型の産学連携が必要になってくる。その成否はオープンな研究部分とクローズな研究部分をどう切り分け、そこで生まれる知財をどのように取り扱うかにかかってくる。巧妙な知財戦略により、半導体分野における自らの研究開発活動を世界レベルで大きく発展させたのが欧州のIMECであり、その知財戦略から学ぶべきことは多い。

1.2.4 主要国の科学技術・研究開発政策の動向

■総説

2001年以降に世界各国で推進されたナノテク・材料に関係する大きな取り組みについて述べる。図1.2.4-1は、主要国の近年のナノテク・材料に関係の深い政策・戦略をまとめたものである。

2001年に、米国が、ナノテクノロジーをイノベーションのエンジンとして位置づけ、大々的な投資を行う計画を発表したのを皮切りに、日本、韓国、次いで台湾、中国、EUが、それぞれ独自のナノテクノロジー推進のための国家計画を立ち上げた。日本は80年代からナノテク・材料関係の研究開発を国家として推進してきており、米国に遅れることなく、第2期科学技術基本計画策定に盛り込む形で国をあげて推進した。2006年以降、アジア諸国、BRICsなど、多くの新興国が同様にナノテクノロジー国家計画を策定し、イノベーションをめざして先端科学技術への国家投資を開始した。マレーシア、ベトナム、タイ、イランもナノテクノロジー国家計画を策定し、現在は数十カ国に達している。また、昨今では、米中覇権争いを契機とし、対抗陣営への産業・技術依存の軽減、資源安全保障の確立をめざす動きも目立ってきている。

以下に、各国個別にナノテク・材料分野の政策、研究開発・産業化の動向、現状を概括する。

日本

■基本政策

2020年10月、内閣官房は統合イノベーション戦略推進会議（議長：官房長官）の下に「マテリアル戦略有識者会議」を設置し、2030年の社会像・産業像を見据え、Society 5.0の実現、SDGsの達成、資源・環境制約の克服、強靭な社会・産業の構築等に重要な役割を果たす「マテリアル革新力」を強化するための検討を開始した。ここで「マテリアル革新力」とは、物質、材料、デバイスといった「マテリアル」のイノベーションを創出する力を意味する。2021年1月19日に開催された統合イノベーション戦略推進会議において中間論点整理が示され、本戦略の基本方針として、「産学官共創による迅速な社会実装」「本質研究とイノベーション基盤の強化」「人材育成等の持続的発展性の確保」の3点が掲げられた。さらに、年度末に最終報告がなされる予定である。

これに先立ち、2020年7月に閣議決定された「統合イノベーション戦略2020」では、「マテリアル革新力」を強化するための政府戦略を、AI、バイオ、量子技術、環境に続く重要戦略の1つとして、産学官関係者の共通のビジョンの下で策定することが盛り込まれた。

「マテリアル革新力強化戦略」は、2021年1月20日に内閣府から示された「科学技術・イノベーション基

主要国のナノテク・材料科学技術政策・国家戦略

日本		◆ 政府「マテリアル革新力強化戦略」を策定（2021）、第6期科学技術・イノベーション基本計画においてに同戦略を実行（2021） ◆ 文科省・経産省が公表した「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて（戦略準備会合とりまとめ）（2020.06）」及び統合イノベーション戦略2020をもとに、マテリアルDX-プラットフォーム構想を開始（2021.04-） ◆ Q-LEAP（2018-）を開始
米国		◆ National Nanotechnology Initiative（2001-） ◆ Materials Genome Initiative（MGI）の後継策の一つとして、NISTが High Through-put Experimental Material Collaboratory（HTE-MC）を実施（2017-） ◆ DARPA Electronics Resurgence Initiative（2018-）、National Quantum Initiative（2019-） ◆ Critical Mineral Executive Order発令（2017.12）（2020.09）
欧州	EU	◆ Horizon 2020（2014-2020） - Future and Emerging Technologies（FET）として、2019年よりBattery 2030+を開始 ◆ Horizon Europeの開始(2021-2027)
	独	◆ ハイテク戦略2025（HTS2025）（2018-2025） ◆ Quantum Technologies –from basic to markets (2018-2022、最長2028) ◆ 水素戦略2020（The National Hydrogen Strategy）（2020-）
	英	◆ UK Nanotechnologies Strategy（2010-） - BIS（現BEIS）が中心となって策定した省庁横断の国家ナノテクノロジー戦略 ◆ UK COMPOSITES STRATEGY（2009-） - BISを中心に航空機、自動者向けの耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料の開発 ◆ UK Quantum Technologies Programme (2014-)
	仏	◆ SNR France Europe 2020（2015-） - 10の社会的課題に対する重点的研究方針として、希少資源への依存度減少、化石燃料からの脱却、新材料設計、センサーを特定 ◆ Nano 2022 (2018-) - 次世代マイクロエレクトロニクスの研究開発拠点および製造拠点の形成
中国		◆ 国家中長期科学技術発展計画綱要（2016-2020） - 先端技術8分野の一つに「新材料技術」、重大科学研究4分野の一つに「ナノ研究」 - 13次五か年計画「中国製造2025」、「インターネット+」 ◆ 国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年） ◆ 国家重点研究開発計画の一つとして「材料ゲノム工学のｷｰﾃｸﾉﾛｼﾞｰと支援ｷｰﾃｸﾉﾛｼﾞｰ」を開始（2016-） ◆ 中国製造2025 半導体自国化へ向け投資拡大。R&D投資を対GDP比で1.5%程度から3%程度へ引き上げる
韓国		◆ 第4期ナノ技術総合発展計画（2016-2025）米国の技術レベルを100%としたときに、92%まで到達させる ◆ 第3次National Nanotechnology Map（2018-2027） - 70のコアテクノロジーを同定。ポータブル人工知能、ポータブル無線通信、無人飛行機、超急速充電電池などの開発を推進

図1.2.4-1　主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略

本計画（答申素案）」においても第６期基本計画中に着実に研究開発を実施する分野別戦略の１つとして位置づけられ、「世界最高レベルの研究開発基盤を有している強みを生かし、産学官関係者の共通ビジョンの下、産学官共創による迅速な社会実装、データ駆動型研究開発基盤の整備と物事の本質の追求による新たな価値の創出、人材育成等の持続発展性の確保等、戦略に掲げられた取組を強力に推進する」とされている。

これらの一連の大きなムーブメントのきっかけとなったのは、2020年４月に文部科学省および経済産業省の下に設置された「マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合」である。2020年２月から開始された予備的検討を踏まえて設置されたこの会合では、統合イノベーション戦略2020および第６期科学技術基本計画を視野に入れた本格的な検討が行われた。2020年６月に、マテリアル革新力強化のための政府戦略策定に向けた基本的な考え方、今後の取り組みの方向性等をとりまとめた「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて（戦略準備会合取りまとめ）」を公表するに至った。

特筆すべきは、新型コロナウイルス感染症の世界的流行に伴い、データやAI、ロボットを活用した新たな研究開発手法や研究開発現場の本格導入の必要性の高まり、マテリアルの研究開発現場や製造現場全体のデジタルトランスフォーメーション（DX）が急務であることを受けて、マテリアル研究開発の川上から川下までのデータが持続的・効果的に創出、共用化、蓄積、流通、利活用される「マテリアルDXプラットフォーム」の必要性についても言及がなされたことである。

文部科学省では、これらを受けてマテリアルDXプラットフォーム構想実現に向けた取り組みを開始し、「データ中核拠点の形成」「データ創出基盤の整備・高度化」「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」の３つを主軸とする事業を計画している。そのうちの１つであるマテリアル先端リサーチインフラについては2020年12月に公募を開始し2021年３月に採択機関が公表された。同事業は2021年度から10年間の計画で、大学・国立研究開発法人等において、広範に充実した最先端設備群及び技術・ノウハウを有するハブ機関と、一定の領域で特徴的な設備・技術を有するスポーク機関からなるハブ＆スポークによる全国体制の構築を行う。また、各機関が保有する設備・技術・ノウハウ・データを共用することで、わが国におけるマテリアル研究開発を先導し支える研究インフラ・プラットフォームをめざす。今後、マテリアル先端リサーチインフラの利用を通じて創出されるデータを、物質・材料研究機構が担うデータ中核拠点と接続させることが計画されている。

さらに材料創製・計測・理論計算に加えてデータサイエンスが有機的に連携することでマテリアル革新力を強化することをめざした「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」の検討が進んでいる。事業期間は同じく2021年度からの10年間の計画であり、まず開始の2021年度はFS期間として、2022年度に本格移行する予定である。 FSでは、「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて（戦略準備会合取りまとめ）」において特定された８つの重要技術領域（エネルギー変換マテリアル、マテリアルの高度循環技術、高度デバイス機能マテリアル、量子・電子マテリアル、極限機能マテリアル、バイオ・高分子マテリアル、ナノスケールマテリアル、マルチマテリアル化技術）において特に社会ニーズが高く、革新的な成果が期待され、DXによるインパクトの高い材料課題を特定する。そのうえで、材料・設備コミュニティの連携体制を確立するとともに、各材料課題における最適なDXの方法論を具現化することとしている。

一方、経済産業省においては、プロセス・イノベーション・プラットフォームの構築を計画しており、2021年度を目途に、重点領域（日本の国際競争力の高いマテリアル）を同定し、産業技術総合研究所地域センター（つくば、中部、中国）に高機能材料（触媒、セラミックス、セルロースナノファイバー等）の製造プロセスデー

タを一気通貫、ハイスループットで収集できる設備環境（プロセス・イノベーション・プラットフォーム）を整備、運用を開始するとしている。

また、NEDOにおいては2021年2月に「マテリアル革新技術先導研究プログラム」の公募を開始した。ここでは、わが国の新産業創出に結びつく有望なマテリアル分野の中長期的な課題を解決していくために必要となる技術シーズ、特に事業開始後15年から20年以上先の社会実装を見据えた、革新的なマテリアル技術シーズの発掘・育成を行い、データを活用した製造プロセスの高度化や資源制約を抱える原料のサプライチェーン強靱化、新型コロナウイルスをはじめとするウイルス感染症対策など、マテリアル・イノベーションを加速する研究開発を後押しすることで、将来の国家プロジェクト等に繋げていくことを目的としている。公募対象の具体的な課題は下記の4つである。

・データを活用した革新的マテリアル製造プロセス・インフォマティクス技術の開発
・超高品質・超高信頼性・超耐久性を有するスーパーファインセラミックスを実現する基盤技術の開発
・資源産出国への実質的転換を実現する革新的マテリアルプロセス技術の開発
・ウイルス感染症対策の社会実装を加速する新規マテリアル関連技術の開発

■これまでの経緯

2000年以降、世界の主要国でナノテクノロジーへの大規模な国家投資戦略がスタートしたが、それに先立ち日本は、1980年代から科学技術庁と通商産業省が重層的にナノテクノロジーの国家プロジェクトを推進してきた。具体的には、科学技術庁所管の新技術事業団（現在の科学技術振興機構）が1981年から創造科学技術推進事業（後に戦略的創造研究推進事業ERATO）として始めた林超微粒子プロジェクトと他10件以上のプロジェクト、通商産業省所管の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が大型プロジェクトとして1992年に発進させた「原子分子極限操作技術」（アトムテクノロジープロジェクト）がある。これらはいずれも、日本が科学技術戦略を本格的に構築し始めた第1期科学技術基本計画策定（1996年）以前にスタートしたプロジェクトである。日本では上記の経緯があったため、米国ナノテクノロジーイニシアティブ（National Nanotechnology Initiative：NNI）の発進とほぼ同時期にナノテク・材料科学技術を推進する国家計画が比較的順調にスタートした。第2期（2001～2005年度）と第3期（2006～2010年度）においては、重点推進4分野および推進4分野が選定され、「ナノテクノロジー・材料」は重点推進4分野の1つとして、ライフサイエンス、情報通信、環境とともに、10年間にわたって重点的な資源配分が行われた。

第3期（2006～2010年度）は、5 領域「ナノエレクトロニクス領域」、「ナノバイオテクノロジー・生体材料領域」、「材料領域」、「ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域」、「ナノサイエンス・物質科学領域」で重要な研究開発課題が設定・推進された。そこでの主な成果・取り組みは以下のとおりである[4]。

●国家基幹技術「X線自由電子レーザ」、「ナノテクノロジー・ネットワーク」等のインフラの整備
●日本初のオープンイノベーション拠点「つくばイノベーションアリーナ」（TIA-nano）による産学官連携の強化
●府省連携プロジェクト：『元素戦略プロジェクト』（文部科学省）と『希少金属代替材料プロジェクト』（経

4 総合科学技術会議「分野別推進戦略総括的フォローアップ（平成18～22年度）」, https://www8.cao.jp/cstp/project/bunyabetsu2006/followup.html（2021年2月17日アクセス）

済産業省）の着実な進捗等

以上、日本が連綿として継続してきたナノテクノロジーへの投資効果がようやく諸所に顔を見せ始めてきたと認識する。

第４期（2011～2015年度）においては、科学技術の重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）の政策へと舵が切られ、そのなかでナノテク・材料領域は、政策課題三本柱の横串的横断領域と位置づけられた。しかし、このような横断領域は独立したイニシアティブとして設定されなかったため、国際的にも「日本では基本政策においてナノテクノロジーが重点化されなくなった」と認識される事態が起こった。その後、科学技術イノベーション総合戦略2014では、ナノテクノロジーは産業競争力を強化し政策課題を解決するための分野横断的技術として重要な役割を果たすという旨が明記された。また、同総合戦略2015では、「重点的に取り組むべき課題」の１つである超スマート社会の実現に向けた共通基盤技術や人材の強化、において、センサ、ロボット、先端計測、光・量子技術、素材、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等の共通基盤的な技術として、改めて位置付けが明確化された。

第５期（2016～2020年度）では、過去20年間の科学技術基本計画の実績と課題として、研究開発環境の着実な整備、ノーベル賞受賞に象徴されるような成果があげられた一方で、科学技術における「基盤的な力」の弱体化、政府研究開発投資の伸びの停滞などが指摘された。このなかで、ナノテクノロジーは「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」の１つに位置づけられた。超スマート社会「Society 5.0」への展開を考慮しつつ10年程度先を見据えた中長期的視野から、高い達成目標を設定し、その目標の実現に向けて基盤技術の強化に取り組むべきとしている。さらに、基礎研究から社会実装に向けた開発をリニアモデルで進めるのではなく、スパイラル的な産学連携を進めることで、新たな科学の創出、革新的技術の実現、実用化および事業化を同時並行的に進めることができる環境整備が重視された。 Society 5.0 の実現に貢献する11のシステムが特定され、その１つに「統合型材料開発システム」がある。計算科学・データ科学を駆使した革新的な機能性材料、構造材料等の創製を進めるとともに、その開発期間の大幅な短縮を実現することを目標としている。そこで注目される施策が、「統合型材料開発システム」に関する３府省連携施策である。内閣府SIP「革新的構造材料」（2014～2018年度）における「マテリアルズインテグレーション」、文部科学省・JST「イノベーションハブ構築支援事業」の１つとしてNIMSに発足した「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI^{2}I）」（2015～2019年度）、経済産業省・NEDO・産業技術総合研究所を中心とする「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016～2021年度）がそれに相当する。これら３府省のプロジェクトが補完的に研究開発を実施していく体制が、総合科学技術イノベーション会議ナノテクノロジー・材料基盤技術分科会を通じて構築された。さらに、2018年度からは内閣府においてSIP第２期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）が開始されている。ここでは、炭素繊維強化プラスチックや粉末・3D積層材料を対象として、既存の材料データベースを活用することと並行して、新プロセス・評価技術に対応したデータベースの構築を図り、材料科学・工学と情報工学を融合した逆問題マテリアルズインテグレーション（MI）を援用することによるマテリアル革新を実現し、社会実装に向けた開発期間・開発費用を低減することを目的としている。

一方で、科学技術イノベーション総合戦略2016、2017においては、Society 5.0の実現に向けたプラットフォーム構築に必要な基盤技術であるサイバー空間関連技術やフィジカル空間（現実空間）関連技術の開発

を横断的に支える技術として「素材・ナノテクノロジー」が位置づけられ、統合型材料開発システムとともに早期構築を進める、とされている。

また、統合イノベーション戦略を通じたその後の政策展開において、世界の国々が投資を強化し研究開発競争が加速するAI、バイオテクノロジー、量子技術といった3つの先端技術分野の強化が最優先の取り組みとして強調される反面、ナノテクノロジー・材料に関する記述はそれぞれの技術領域に散見されるのみとなった。

そのような中、文部科学省は2018年8月に「ナノテクノロジー・材料科学技術研究開発戦略」を策定し、材料やデバイスを「マテリアル」という言葉でまとめ、未来社会実現への壁を打破しながら産業振興と人類の幸せの両方に貢献する「マテリアルによる社会革命（マテリアル革命）」の実現を目標として掲げた。翌2019年10月には「イノベーション創出の最重要基盤となるマテリアルテクノロジーの戦略的強化に向けて（第6期科学技術基本計画に向けた提言）」を策定した。ここでは、上記の「ナノテクノロジー・材料科学技術研究開発戦略」の内容をもとに、物質や材料、デバイスにかかる科学技術である「マテリアルテクノロジー」が今後のわが国における最重要の基盤技術であることを明示したうえで、マテリアルテクノロジーの持つ重要性や強みを基本認識として整理するとともに、今後の研究開発の推進の方向性と必要となる具体的取り組みについて提示している。

■研究開発プロジェクト

現在の日本の研究開発政策のトレンドを把握するために、現在推進中の主な研究開発プログラム・プロジェクトを俯瞰する。図1.2.4-2から1.2.4-11にナノテク・材料分野に関連するプロジェクトを抜粋している。

内閣府に設置された総合科学技術・イノベーション会議では、府省・分野の枠を超えて基礎研究から出口（実用化・事業化）までを見据えて図1.2.4-2のような研究開発プロジェクトを実施している。2014年度より、わが国の産業にとって将来的に有望な市場を創造し、日本経済の再生を果たしていくという趣旨で「戦略的イ

日本の大型研究開発プロジェクト（総合科学技術・イノベーション会議）

※ナノテク・材料関係を抜粋

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期 2018-22年度	
フィジカル空間デジタルデータ処理基盤	PD：佐相 秀幸（富士通）
統合型材料開発システムによるマテリアル革命	PD：三島 良直（AMED）
光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術	PD：西田 直人（東芝）

ムーンショット型研究開発制度 2020年度-	
ムーンショット目標４ 2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現	PD：山地 憲治（RITE）
ムーンショット目標６ 2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現	PD：北川 勝浩（阪大）

図1.2.4-2　日本の大型研究開発プロジェクト（SIP第2期、ムーンショット型研究開発制度）

ノベーション創造プログラム（SIP）」を開始した。同じく2014年度より、実現すれば産業や社会のあり方に大きな変革をもたらすハイリスク・ハイインパクトな挑戦的研究開発を推進する「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」を開始し、ともに2018年度末で終了している。2017年12月の「新しい経済政策パッケージ（平成29年12月閣議決定）」において、当初は2019年度開始予定であった次のSIPを1年前倒しで開始することが決定され、2018年度より「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期」の研究開発課題が各プログラムディレクター（PD）の下で推進されている。

さらに、日本発の破壊的イノベーションの創出をめざし、従来技術の延長にない、より大胆な発想にもとづく挑戦的な研究開発を推進する新たな制度として「ムーンショット型研究開発制度」が創設された。ムーンショット目標の設定に際しては、一般から解決を期待する社会課題や実現すべき未来像を公募、その意見にもとづいて2019年3月～7月に開催された「ムーンショット型研究開発制度に係るビジョナリー会議」において検討がなされた。さらに、2019年12月に開催された「ムーンショット国際シンポジウム」においても、ムーンショット型研究開発制度の運営およびムーンショット目標について議論がなされ、2020年1月の総合科学技術・イノベーション会議（第48回）にて、ムーンショット目標1～6が決定された（ムーンショット目標7については、2020年7月の健康・医療戦略推進本部（第30回）で決定）。その後、各目標における研究開発プロジェクトのプロジェクトマネージャー（PM）の公募・選考・決定がなされ、研究が開始された。

文部科学省では、世界トップレベルの研究推進や産学連携促進・イノベーションの創出といった観点から研究拠点を整備している（図1.2.4-3）。世界トップレベルの研究拠点形成をめざし、「世界最高レベルの研

日本の主な研究拠点型プロジェクト（文部科学省）

※ナノテク・材料関係を抜粋

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）2007年度-	
化学反応創成研究拠点（ICReDD）2018年度-	前田 理（北大）
ナノ生命科学研究所（NanoLSI）2017年度-	福間 剛士（金沢大）
トランスフォーマティブ生命分子研究所（ITbM）2012年度-	伊丹 健一郎（名大）
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I2CNER）2010年度-	ペトロス ソフロニス（九大）
カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）2007年度-	大栗 博司（東大）

WPIアカデミー 2007年度-	
材料科学高等研究所（AIMR）	折茂 慎一（東北大）
物質-細胞統合システム拠点（iCeMS）	北川 進（京都大）
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（MANA）	佐々木 高義（NIMS）
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I2CNER）	ペトロス ソフロニス（九大）

革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）2013-21年度	
さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点	東北大学、NECソリューションイノベータ
自分で守る健康社会拠点	東京大学
スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点	川崎市産業振興財団
活力ある生涯のためのLast 5Xイノベーション拠点	京都大学、パナソニック
「サイレントボイスとの共感」地球インクルーシブセンシング研究拠点	東京工業大学、ソニー
人間力活性化によるスーパー日本人の育成拠点	大阪大学、パナソニック
コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点	東京大学
革新材料による次世代インフラシステムの構築拠点	金沢工業大学、大和ハウス工業
世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点	信州大学、日立製作所
持続的共進化地域創成拠点	九州大学、NTT西日本

図1.2.4-3　日本の主な研究拠点型プロジェクト（WPI、COI）

究水準」「融合領域の創出」「国際的な研究環境の実現」「研究組織の改革」の4つの要件を満たす「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」として、2007年に5拠点を採択した。その後、2010年に1拠点、2012年に3拠点、2017年に2拠点、2018年に2拠点を新規採択し、全13拠点（うち、ナノテク・材料分野に関係するものは8拠点）に達している。 WPI拠点のうち、2007年度に採択した京都大学iCeMS、物質・材料研究機構MANA、東北大学AIMRの3拠点に関しては2016年度で補助金が終了、東京大学Kavli IPMUは2021年までの支援延長となっている。また、2016年11月に開催された第3回研究力強化に向けた研究拠点の在り方に関する懇談会（主査：平野眞一・上海交通大学講席教授）においてWPIの長期計画や補助金終了後の措置等について議論がなされた。その結果、2017年度より新たに公募が開始され、補助金終了後のWPI拠点をはじめとする日本トップレベルの拠点をネットワーク化し、それらの持つ経験・ノウハウを展開することで全国的な基礎研究力の強化につなげる枠組み“WPIアカデミー”を立ち上げ、WPIの成果最大化に向けた取り組みが始まっている。また、2016年度末に終了した上記3拠点および2019年度末に終了した九州大学I²CNERに関しては現在も運営費交付金での支援によって活動を継続している。

2013年度より、将来社会のニーズから導き出される社会の姿、暮らしの在り方を設定し既存分野・組織の壁を取り払い、企業だけでは実現できない革新的なイノベーションを産学連携で実現することを目的とした「革新

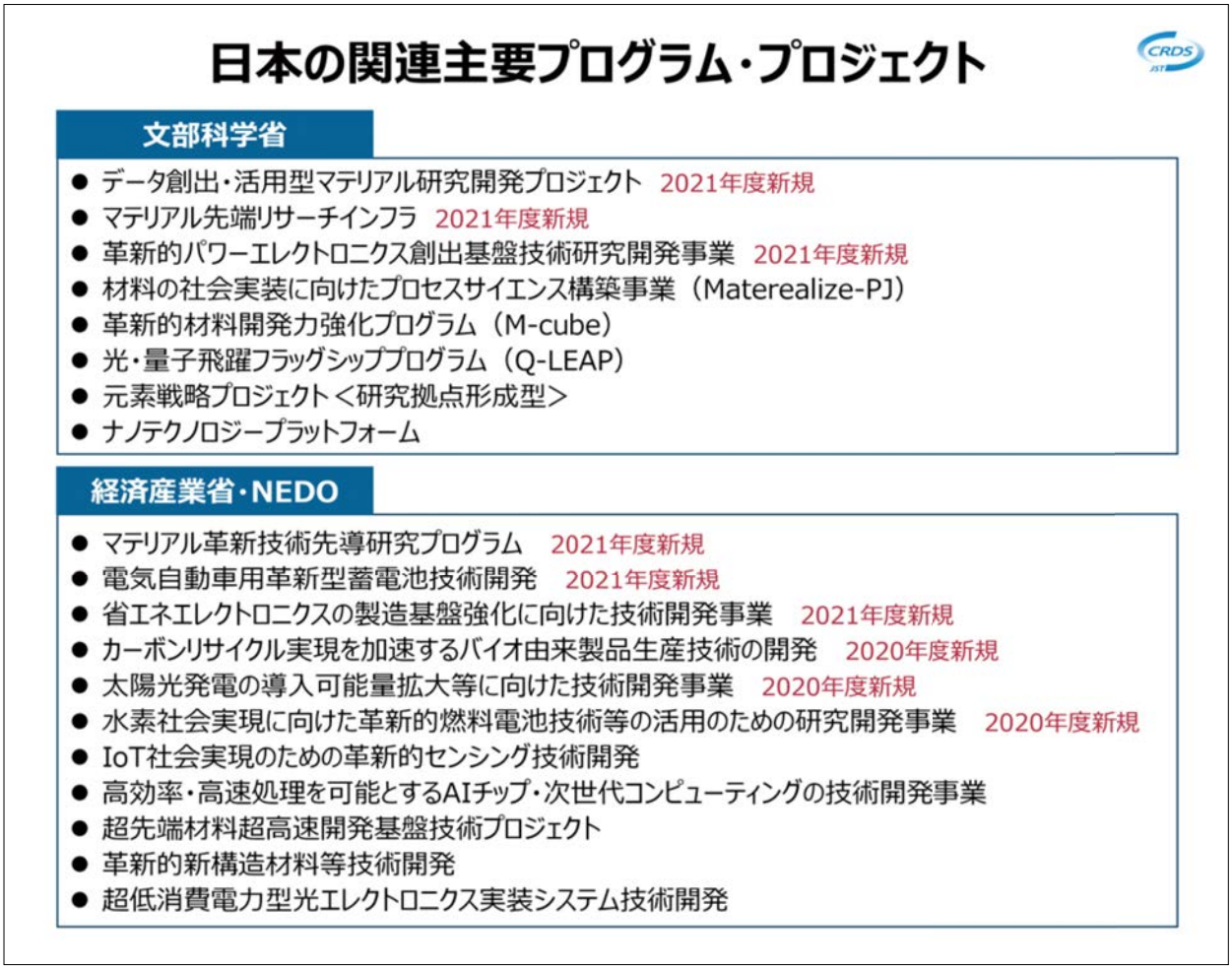


図1.2.4-4　　日本の主な研究開発プログラム（文部科学省、経済産業省）

的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）」が開始された。現在、研究活動も後半期に差し掛かっている。

その他、文部科学省、経済産業省では、国が支援すべき特定のテーマについて拠点形成やネットワーク化、産学連携、産業化などを促進するさまざまな観点からプログラムを推進している（図1.2.4-4）。このなかで特に注目されるのは、文部科学省における「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」「マテリアル先端リサーチインフラ」、およびNEDOにおける「マテリアル革新技術先導研究プログラム」である。いずれも2021年度から開始される新規事業であり、わが国のマテリアル革新力強化に向けたアクションに位置づけられる。

JSTの戦略的創造研究推進事業は、日本が直面する重要な課題の達成に向けた基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す創造的な新技術を創出することを目的にしたトップダウン型の競争的資金である。そのなかで「CREST」では、国が定める戦略目標の達成に向けて、課題達成型基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す革新的技術シーズを創出するためのチーム型研究を推進している（図1.2.4-5）。一方、「ERATO」では卓越したリーダーの下、独創性に富んだ課題達成型基礎研究を推進し、新しい科学技術の源流を創出することを目的としている。いずれのプログラムも高い能力と大きな可能性を持った研究者が、挑戦すべきと考える研究テーマに存分に没頭できる体制を提供している（図1.2.4-6）。

また、JSTでは2017年度より、社会・産業ニーズを踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット（出口）を明確に見据えた技術的にチャレンジングな目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化が可能かどうか見極める研究開発を実施する、未来社会創造事業を新たに設置した。ここでは、「探索加速型」と「大規模プロジェクト型」の2つのアプローチを採用している。「探索加速型」では、探索研究から本格研究へと段階的に研究開発を進めることを原則とし、文部科学省が定める領域を踏まえ、JSTが「科学技術で作りたい未来社会像」に関して提案募集を行う。提案募集結果を通じて設定された「重点公募テーマ」にもとづき、研究開発課題を公募している。一方、「大規模プロジェクト型」では、科学技術イノベーションに関する情報を収集・分析し、現在の技術体系を変え、将来の基盤技術となりうる「技術テーマ」を文部科学省が特定し、その技術テーマにかかる研究開発課題に集中的に投資している（図1.2.4-7）。なお、本事業はステージゲート方式が導入されている。

JSTでは、上記の戦略的創造研究推進事業や未来社会創造事業以外にもイノベーションの創出に向け、特色のある産学連携プログラムを推進している（図1.2.4-8）。「S-イノベ」はJSTの基礎研究事業等の成果をもとにテーマを設定し、そのテーマのもとで産業創出の礎となりうる技術を実用化に向けて長期一貫してシームレスに研究開発を推進するもの、「産学共創基礎基盤研究プログラム」は産業界で共通する技術的課題（技術テーマ）の解決に資する大学等による基盤研究を推進するもの、「先進的低炭素化技術開発（ALCA）」は新たな科学的・技術的知見にもとづいて温室効果ガス削減に大きな可能性を有する技術を創出するための研究開発を推進するもの、「ACCEL」はイノベーション指向の研究マネジメントにより、技術的可能性の証明・提示および適切な権利化まで推進するものである。また、2016年度から開始している「産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（OPERA）」は、産業界との協力の下、大学等が知的資産を総動員し、新たな基幹産業の育成に向けた「技術・システム革新シナリオ」の作成と、それにもとづく学問的挑戦性と産業的革新性を併せ持つ非競争領域での研究開発を通して、基礎研究や人材育成における産学パートナーシップを拡大し、わが国のオープンイノベーションを加速することをめざしている。

また、2020年度からは新たに「創発的研究支援事業」および「共創の場形成支援プログラム」（既存の拠点型産学連携制度（COI、OPERA、イノベーションハブ等）を大括り化）を開始している。

「創発的研究支援事業」は、特定の課題や短期目標を設定せず、多様性と融合によって破壊的イノベーションにつながるシーズの創出をめざす「創発的研究」を推進するものである。既存の枠組にとらわれない自由

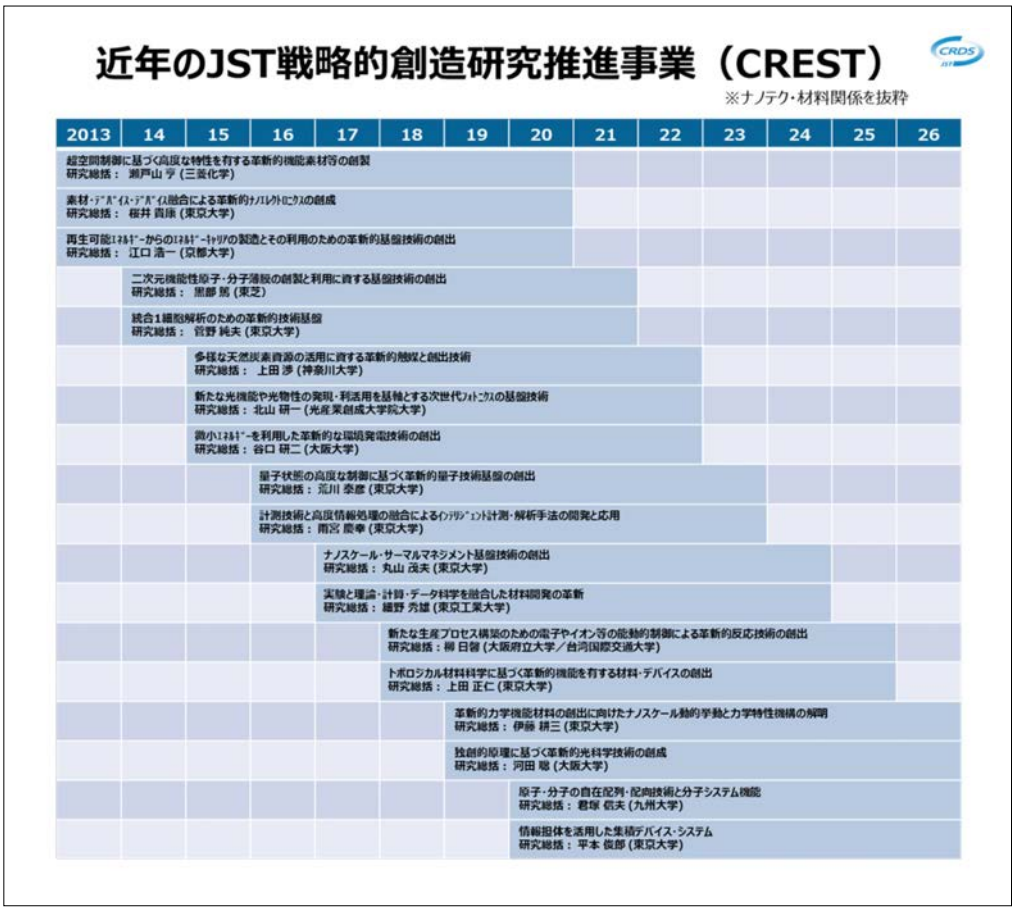


図 1.2.4-5　　近年のJST戦略的創造研究推進事業（CREST）プロジェクト

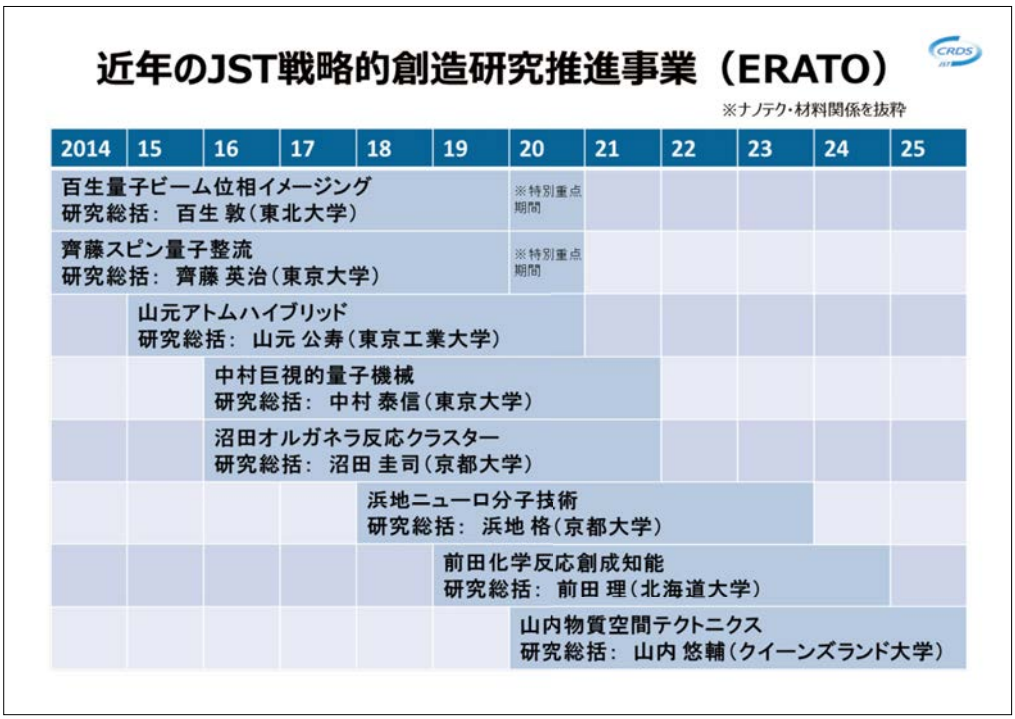


図 1.2.4-6　　近年のJST戦略的創造研究推進事業（ERATO）プロジェクト

JST未来社会創造事業（MIRAI）

探索加速型	重点公募テーマ
「超スマート社会の実現」 領域 運営統括：前田 章（元日立製作所）	• 多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築（2017年度-） • サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI （2018年度-） • サイバーとフィジカルの高度な融合に向けたAI技術の革新（2019年度-） • 異分野共創型のAI・シミュレーション技術を駆使した健全な社会の構築（2020年度-）
「持続可能な社会の実現」領域 運営統括：國枝 秀世（JST/名古屋大学）	• 新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新（2017年度-） • 労働人口減少を克服する"社会活動寿命"の延伸と人の生産性を高める「知」の拡張の実現（2017年度-） • 将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出（2018年度-） • モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり（2019年度-） • 社会の持続的発展を実現する新品種導出技術の確立（2020年度-）
「世界一の安全・安心社会の実現」領域 運営統括：田中 健一（三菱電機）	• ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築（2017年度-） • ヒューメインなサービスインダストリーの創出（2017年度-） • 生活環境に潜む微量な危険物から解放された安全・安心・快適なまちの実現（2018年度-） • 食・運動・睡眠等日常行動の作用機序解明に基づくセルフマネジメント（2019年度-） • 心理状態の客観的把握とフィードバック手法の確立による生きがい・働きがいのある社会の実現（2020年度-）
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域 運営統括：橋本 和仁（NIMS）	• 「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現（2017年度-）
「共通基盤」領域 運営統括：長我部 信行（日立製作所）	• 革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現（2018年度-）

大規模プロジェクト型	技術テーマ
運営統括：大石 善啓（三菱総研）	• 粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術（2017年度-） • エネルギー損失の革新的な低減化につながる高温超電導線材接合技術（2017年度-） • 自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術（2017年度-） • 通信・タイムビジネスの市場獲得等につながる超高精度時間計測（2018年度-） • Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発（2018年度-） • 未来社会に必要な革新的水素液化技術（2018年度-） • センサ用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術（2019年度-） • トリリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術（2020年度-）

図1.2.4-7　　JST未来社会創造事業

で挑戦的・融合的かつ多様な研究に、若手を中心とする研究者が専念できる環境を確保しつつ、原則7年間（途中ステージゲート審査を挟んで最大10年間）にわたり長期的に支援する（図1.2.4-9）。

一方、「共創の場形成支援プログラム」は、大学等を中核に、産学連携を軸として、自治体、市民など多様なステークホルダーを巻き込んだ産学共創により、SDGsにもとづく将来のあるべき社会像（拠点ビジョン）の実現に向けた研究開発を推進し、プロジェクト終了後も持続的に成果を創出する自立した産学共創拠点の形成をめざしている。

日本学術振興会（JSPS）では、2020年に従来の新学術領域研究（研究領域提案型）の見直しが行われ、次代の学術の担い手となる研究者（45歳以下の研究者）の参画を得つつ、多様な研究グループによる有機的な連携の下、さまざまな視点からこれまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導することなどを目的として「学術変革領域研究」を創設した。助成金額や研究期間等に応じて、「学術変革研究（A）」と「学術変革研究（B）」の2つの区分が設置された（図1.2.4-10）。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、経済産業行政の一翼を担う公的技術開発マネジメント機関として、「エネルギー・地球環境問題の解決」と「産業技術力の強化」という2つのミッションを掲げ、企業、大学および公的研究機関の英知を結集して、技術開発・実証に取り組んでいる（図1.2.4-11）。

近年のJST事業

※ナノテク・材料関係を抜粋

戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ） 2009年度-	
スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発	PO: 安藤 功兒（産総研）

産学共創基礎基盤研究プログラム 2010年度-	
テラヘルツ波時代を切り拓く革新的基盤技術の創出	PO: 伊藤 弘昌（東北大）
革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築	PO:加藤 雅治（新日鉄住金）
革新的次世代高性能磁石創製の指針構築	PO: 福永 博俊（長崎大）

ACCEL 2013年度-	
スローライト構造体を利用した非機械式ハイレゾ光レーダーの開発	馬場 俊彦（横国大）
スーパーバイオイメージャーの開発	染谷 隆夫（東大）
半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開	田中 耕一郎（京大）

先端的低炭素化技術開発（ALCA）革新技術領域 2013年度-	
耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料	PO: 原田 幸明（NIMS）
バイオテクノロジー	PO: 近藤 昭彦（神戸大）

産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（OPERA） 2016年度-	
IT・輸送システム産学共創コンソーシアム	領域統括: 遠藤 哲朗（東北大）
有機材料極限機能創出・社会システム化共創コンソーシアム	領域統括: 大場 好弘（山形大）
埋込型・装着型デバイス共創コンソーシアム	領域統括: 齋藤 直人（信州大）
量子アプリ共創コンソーシアム	領域統括: 中野 貴志（阪大）
機能性バイオ共創コンソーシアム	領域統括: 三谷 啓志（東大）
マルチモーダルセンシング共創コンソーシアム	領域統括: 澤田 和明（豊橋技科大）
やわらかものづくり革命共創コンソーシアム	領域統括: 古川 英光（山形大）
物質・エネルギーリノベーション共創コンソーシアム	領域統括: 北 英紀（名大）
超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム	領域統括: 木下 恒暢（京大）
全固体電池技術共創コンソーシアム	領域統括：菅野 了次（東工大）
酸化制御共創コンソーシアム	領域統括：井上 豪（阪大）

図1.2.4-8　　近年のJST諸事業

JST新規事業（創発、共創の場）

※ナノテク・材料関係を抜粋

創発的研究支援事業 2020年度-

創発プログラムオフィサー（PO）

伊丹健一郎（名古屋大）	【専門分野】合成化学、分子ナノカーボン科学、触媒科学、生物活性分子
井村順一（東工大）	【専門分野】制御工学
川村光（豊田理研）	【専門分野】物性科学
北川宏（京大）	【専門分野】固体物性化学、低次元電子系物性、錯体化学、ナノ物質科学

共創の場形成支援プログラム 2020年度-

共創分野 【育成型】 ◆みやぎマテリアルセンター ◆有限鉱物資源の安全かつ革新的な高効率・再循環・超クリーン精製技術による循環型社会の実現 ◆資源を循環させる地域イノベーション・エコシステム研究拠点 ◆小規模循環型リビングイノベーション共創拠点 ◆FUTUREライフスタイル社会共創拠点 ◆フォトニクス生命工学研究開発拠点	PO: 久世 和資（旭化成） PL：佐藤 一志（仙台高専） PL：中道 勝（QST） PL：菊池 康紀（東大） PL：瀬戸山 亨（三菱ケミカル） PL：長谷川 泰久（名古屋大） PL：藤田 克昌（大阪大）
政策重点分野（量子技術分野） 【本格型】 ◆量子ソフトウェア研究拠点 ◆量子航法科学技術拠点	PO: 石内 秀美（元EIDEC） PL：北川 勝浩（大阪大） PL：上妻 幹旺（東工大）
政策重点分野（環境エネルギー分野） 【本格型】 ◆先進蓄電池研究開発拠点	PO: 菅野 了次（東工大） PL：金村 聖志（NIMS）

図1.2.4-9　　JST新規事業（創発、共創の場）

科学研究費補助金　学術変革領域研究

※ナノテク・材料関係を抜粋

学術変革領域研究（A）
新学術領域研究（研究提案型）の後継となる区分であり、学問分野に新たな変革や転換をもたらし、既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指す研究、または当該学問分野の強い先端的な部分の発展・飛躍的な展開を目指す研究を対象とする。
（期間５年、単年度当たり5000万円以上3億円まで）

2020-2024年度

研究領域名	領域代表者名
動的エキシトンの学理構築と機能開拓	今堀　博（京都大学）
高密度共役の科学：電子共役概念の変革と電子物性をつなぐ	関　修平（京都大学）
マテリアルシンバイオシスのための生命物理化学	山吉　麻子（長崎大学）
超秩序構造が創造する物性科学	林　好一（名古屋大学）
散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学	的場　修（神戸大学）

学術変革領域研究（B）
より挑戦的かつ萌芽的な研究に小規模・少人数で短期的に取り組み、将来の学術変革領域研究（A）への展開が期待されるものとし、学問分野に新たな変革や転換をもたらし、既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指す研究を対象とする。
（期間３年、単年度当たり5000万円以下）

2020-2022年度

研究領域名	領域代表者名
機能性ラマンプローブによる革新的多重イメージング	神谷　真子（東京大学）
高分子材料と高分子鎖の精密分解科学	沼田　圭司（理化学研究所）
重水素学：重水素が示す物性の理解と活用	中　寛史（名古屋大学）

図1.2.4-10　　科研費・学術変革領域研究

NEDOの主要プロジェクト

※ナノテク・材料関係を抜粋

分野	事業・プロジェクト名	研究期間
太陽光発電	太陽光発電主力電源化推進技術開発	2020-24
燃料電池・水素	水素利用等先導研究開発事業	2014-22
	水素社会構築技術開発事業	2014-22
	超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業	2018-22
	燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業	2020-24
蓄電池	革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発	2016-22
	先進・革新蓄電池材料評価技術開発（第2期）	2018-22
省エネルギー	環境調和型プロセス技術の開発	2017-22
	戦略的省エネルギー技術革新プログラム	2012-21
	未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発	2015-22
	高温超電導実用化促進技術開発	2016-20
ネットワーク／コンピューティング	超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発	2013-21
	高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発	2016-27
	AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業	2018-22
	Connected Industries推進のための協調領域データ共有・AIシステム開発促進事業	2019-21
	ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業	2019-
3R・水循環	高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業	2017-22
	革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発	2020-24

分野	事業・プロジェクト名	研究期間
新製造技術	高輝度・高効率次世代レーザー技術開発	2016-20
	積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業	2019-23
材料・部材	二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発	2014-21
	有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発	2014-21
	革新的新構造材料等研究開発	2014-22
	植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発	2016-20
	超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト	2016-21
	機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発	2019-25
	IoT社会実現のための革新的センシング技術開発	2019-24
	海洋生分解性プラスチックの社会実装に向けた技術開発事業	2020-24
	炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発	2020-24
	次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト	2020-24
	カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発	2020-26
希少金属	次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発	2014-21
ロボット・AI	次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発	2015-22
	ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト	2017-21
	人工知能技術適用によるスマート社会の実現	2018-22
	革新的ロボット研究開発基盤構築事業	2020-24

図1.2.4-11　　NEDOの主要プロジェクト

米国

■基本政策

• National Nanotechnology Initiative（NNI）[5]

米国家ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）は、2001年の開始以降、20年間にわたって継続推進されてきた。20省庁が参加する省庁横断の国家イニシアティブであり、大統領府のOSTP（Office of Science and Technology Policy）に設置されたNSET（Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee）で、OMB（行政管理予算局）も参加のもと企画・推進されている。第1次NNI戦略プラン（2001～2005年度）に始まり、2016年度からの第6次NNI戦略プランまで発出されているが、2020年現在これは更新されていない。 NNIのビジョン・ゴールは一貫して、①ワールドクラスのナノテク研究開発プログラムの推進、②商業的および公共的利益のために新技術の製品への移転を促進する、③ナノテクの教育資源と熟練労働力を確保し、ナノテクを推進する研究インフラとツールセットを整備し維持する、④ELSI・EHS対策によるナノテクノロジーの責任ある発展、である。 NNIでは教育やアウトリーチに積極的に施策展開を図ってきており、これらは継続的に取り組まれている。2001年から2021年予算（要求）までを含めると、NNIは累計で310億ドル以上の規模である。図1.2.4-12は主要省庁別のNNI予算年次推移であるが、2021年度予算は約17億ドルの要求となっており、前年比6%減である（2020年12月時点）。

NNIの投資はプログラム構成エリア（Program Component Areas: PCA）への戦略的な配分比率に従っ

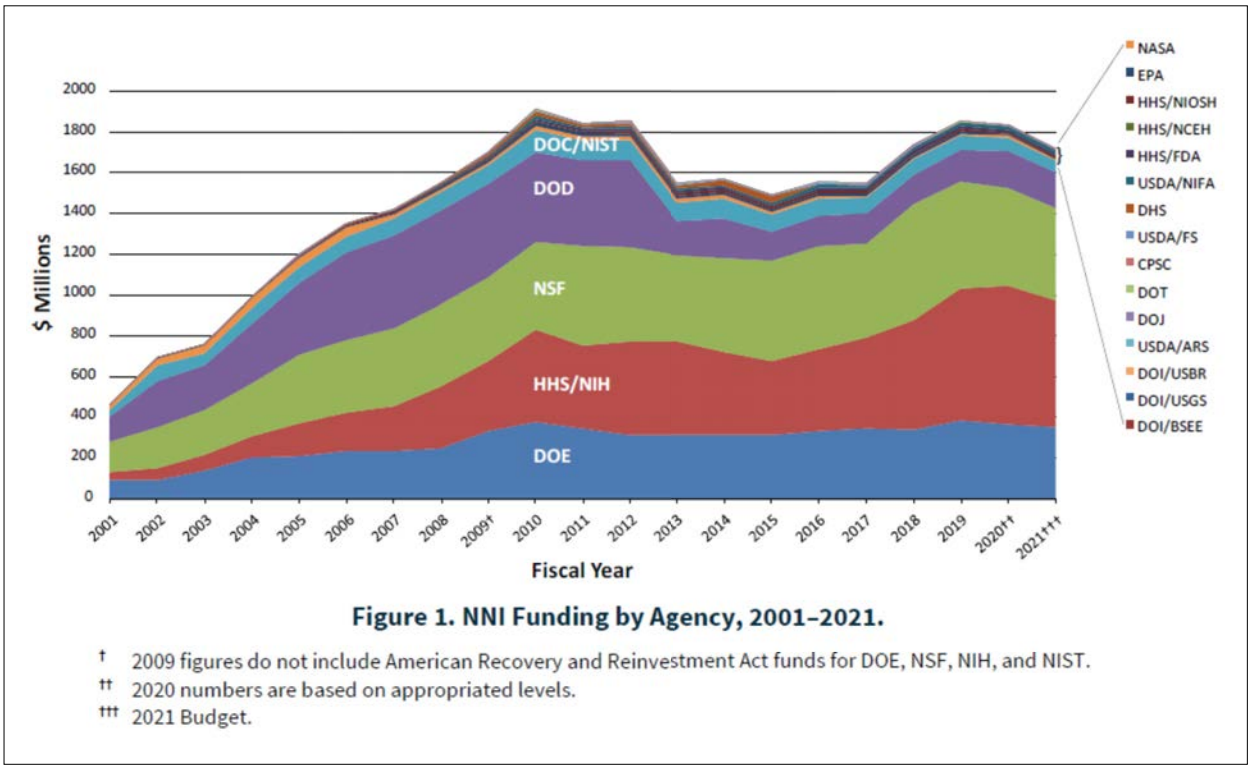


図1.2.4-12　　米国NNIの省庁別予算推移

5 ・NSTC NSET： NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE STRATEGIC PLAN, February 2016.
・NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE SUPPLEMENT TO THE PRESIDENT'S 2021 BUDGET.

Proposed 2021 Agency Investments by Program Component Area
(dollars in millions)*

Agency	1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs) and Grand Challenge	1a. Nanomanufacturing NSI	1b. Nanoelectronics NSI	1c. NKI NSI	1d. Sensors NSI	1e. Water NSI	1f. Future Computing GC	2. Foundational Research	3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems	4. Research Infrastructure and Instrumentation	5. Environment, Health, and Safety	NNI Total
CPSC	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
DOC/NIST	4.7	3.7	-	-	0.7	0.3	-	10.0	16.1	25.8	1.8	58.4
DOD	13.2	0.4	-	-	12.8	0.0	-	127.5	29.4	1.7	0.2	172.0
DOE	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	182.3	33.9	136.6	0.0	352.8
DOJ/NIJ	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	1.5	0.1	0.0	1.6
DOT/FHWA	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5
EPA	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0
HHS (total)	21.4	0.5	-	-	20.9	0.0	-	155.8	392.6	35.9	41.4	647.1
FDA	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	13.6	13.6
NCEH	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
NIH	21.4	0.5	-	-	20.9	0.0	-	155.8	392.6	35.9	16.8	622.5
NIOSH	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	10.9	10.9
NASA	0.6	0.4	-	-	0.2	0.0	-	4.7	4.6	0.0	0.1	10.0
NSF	53.5	32.0	-	-	8.5	13.0	-	282.3	73.8	33.4	10.5	453.5
USDA (total)	7.5	2.5	-	-	3.0	2.0	-	3.8	11.0	1.0	2.0	25.3
ARS	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	-	0.0	3.0	0.0	0.0	3.0
FS	1.5	1.5	-	-	0.0	0.0	-	1.8	0.0	0.0	0.0	3.3
NIFA	6.0	1.0	-	-	3.0	2.0	-	2.0	8.0	1.0	2.0	19.0
TOTAL	**100.9**	**39.5**	**-**	**-**	**46.1**	**15.3**	**-**	**766.4**	**563.3**	**234.6**	**58.0**	**1723.2**

図1.2.4-13 NNIにおけるPCA別の2021年度各省予算配分案

て実施されてきた。 NNIの戦略面での変化は、PCAの中でEHS（環境、健康、安全）を2009年以降独立させて、さらに2015年度以降は図1.2.4-13のようにNanotechnology Signature Initiatives（NSIs）を省庁横断型で強化する項目として定めたことにある。2020年時点ではこのPCA5構成を継続している。 NSIsの内「1b. ナノエレクトロニクスNSI」と「1f. ナノテクノロジーにインスパイアされた未来コンピューティングのグランドチャレンジ」は終了となる。これらに関する取組は、最近設立されたSemiconductor Leadership R&D Working Groupの下で調整されることになる。また、次の新しいNSIトピックも現在検討されている。

トランプ政権以降、NNIの予算は減少に転じているが、バイデン新政権における方向性は本報告書作成の時点では公表されていない（2020年12月時点）。2021年1月には、NNIをさらに次の decade（10年間）へ向けてどのように展開するかを議論する「ステークホルダー・ワークショップ」をNNCO（National Nanotechnology Coordination Office）が開催するなど、バイデン政権下での動きが注目される。 NNI予算の96%は、NIH、NSF、DOE、DOD、NISTの5省庁・機関で占められている（図1.2.4-13）。 NSFの2020年予算の合計においては、新型コロナウイルス感染症に対応したナノテク研究開発のためのCARES法にもとづく資金提供1,430万ドルの一部が含まれており、ワクチン、センサ、マスク、フィルター、抗菌性コーティング等が対象となっている。

NSFでは特にナノデバイス・システムに焦点を当てている。AI・データ科学を活用してのナノ構造材料・デバイス・システム設計や、AIシステムに用いるためのナノスケール・コンピューティング・ハードウェアの開発、量子コンピューティングに向けたデバイス、細胞ナノバイオマニュファクチャリングなど、未来産業の種を支援する。また、共用施設や共用ネットワークの設立と運営、主要装置の更新、技術者育成・支援・強化が2021年に計画されている。ナノテクの研究と商業化を進めるために必要なツール、計測解析、材料設計・合成、次世代計測器に関連する研究が含まれている。 NSFは5年間で総額8,400万ドルの投資を計画しており、全国のサイトにある共用施設ネットワークであるNNCI（National Nanotechnology Coordinated Infrastructure）を更新する。現在は16のノードと13のパートナーサイトで構成され、69のユニークな施設と2,000以上の機器へのオープンアクセスを提供している。 NNCIは4年目に13,350人以上のユーザーがあり、そのうちの29%は外部ユーザーで、およそ2,000人の企業ユーザーが含まれていた。これら施設は最先端のツールへのアクセスを提供し、NNIのエコシステム全体をサポートしている。研究インフラへの投資は、先進製造、半導体研究開発のリーダーシップ、国家量子イニシアティブなど、他の多くの国家優先事項をサポートするインフラとして機能している。

NISTは2021年には、単一原子デバイスプロジェクトを通じ、シリコン中に正確に配置されたリンのドーパントから作られた3または4量子ビットシステムの動作を実証し、シリコンドーパントデバイスにおける量子情報の操作を確立することを期している。並行して、ドーパントアレイの拡張アレイを系統的に研究し、従来のコンピューティングでは対応できない量子多体問題に取り組むための量子シミュレータとしての動作確立を計画している。 NISTはユニークな世界レベルの施設を提供しており、中性子研究センターとナノスケール科学技術センター（CNST）、ナノファブがある。超薄膜作製用の原子層蒸着装置、プラズマ化学気相成長装置、ジョセフソン接合形成を行うアルミニウム電子ビーム蒸着、原子間力顕微鏡などの最先端のツールの更新が計画されている。また、小型化・多重化X線・ガンマ線超伝導転移端センサ、第2世代のリニアックコヒーレント光源（LCLS-II）、および他のX線光源を配備することが計画されている。

DOEの基礎エネルギー科学局（BES）は、電子、原子、分子のレベルで物質とエネルギーを理解し、予測し、最終的に制御することを目標に、材料科学、化学、地球科学、バイオサイエンスの分野における基礎的なナノ科学研究を支援している。この研究は、主に大学と DOE の国立研究所における研究プロジェクトのほか、エネルギー・フロンティア研究センターやエネルギー・イノベーション・ハブなどの大規模センターを通じて実施される。またBESは、5つの共用ナノスケール科学研究センター（NSRC）を運営しており、クリーンルーム、ナノ加工施設、最先端電子顕微鏡などが揃っている。運営資金により自ら最先端の研究を行うとともに、これら施設のユーザープログラムを通じて技術支援を行っている。利用者は、ナノサイエンスのためのX線シンクロトロン、中性子源、高性能計算機設備を共同利用することができ、また、大学院生やポスドクにトレーニングを提供している。2021年の計画には、装置や機能をアップグレードして整備するための再資本化投資が含まれている。

NIHは、ナノテクを活用して、生体組織の再生と修復を誘導する構造物を生産し、生体分子を特定の動態のまま組織に送達させ、感染と炎症を制御するなどの研究に取り組んでいる。 NIHにとって重要な変化は、2020年に国立がん研究所（NCI）のがんナノテクノロジー・エクセレンス（CCNE）センターが終了することである。革新的がんナノテクノロジー研究（IRCN）プログラムは、ナノ材料およびナノデバイスと生物学的システムとの相互作用の基礎的理解に焦点を当てた研究プロジェクトを引き続き支援する。 NCIへのナノテク研究の申請は増加しており、これらの新技術をがん研究と治療に導入することに取り組んでいる。これらは遺伝子および薬物送達システム、臨床分子イメージングおよびプローブ開発、放射線治療学等の研究部門

予算に反映されている。 NCIはまた、有望ながんナノメディシンを成熟させ、その後の臨床試験でのさらなるスケールアップと評価への参入を可能にするために、「Toward Translation of Nanotechnology Cancer Interventions」という新しいプログラムを設立した。 NIHには、医療機器、ナノ治療薬、薬物送達システム、新規放射線治療薬、臨床研究のためのナノテクノロジーベースのワクチンプラットフォームが含まれている。また、心血管系、肺、および血液疾患の診断・治療のための標的となるナノ材料を開発するため、人工血液代替品ナノ材料、血栓症・感染症を軽減するナノ構造化表面コーティング、心筋再生を促進するためのナノスキャフォールドの開発に焦点を当てている。

DODでは、物質の相転移や材料の変形を含むさまざまなエネルギー吸収メカニズムを利用して、爆風波、弾道衝撃、機械的振動から身体や設備を保護するための軽量で強力な材料の開発に重点を置いた研究を行っている。具体的な材料には、高分子複合材料、超弾性金属合金、超高強度セラミックなどが対象である。ナノ構造材料における基本的な光学的、電子的、および輸送・反応現象の理解と、ポータブル電源、通信、信号処理、および検出用デバイスの大幅な進歩を可能にするための研究投資が行われている。また、量子情報処理とリザバーコンピューティングへのナノフォトニックアプローチに取り組み、スピントロニクス応用のための二次元材料のヘテロ構造を開発する。さらに、フォノン−ポラリトン格子、メタ磁性ナノ構造における磁性制御、ハイブリッドナノ構造における光学特性強化、生きている細胞をワイヤレスで制御できる自己組織化ナノスケールトランスデューサの開発など、生物学的システムとのインターフェースや制御のための、新しいアプローチの開発を進める。

PCA5のナノEHSや、潜在的な環境、健康、安全への影響に焦点を当てた研究開発の取り組みは、責任ある開発に不可欠であるとしてNNIの開始以来、現在まで重要目標として継続されている。これにはナノEHS問題と、潜在的な倫理的、法的、社会的影響（ELSI）の両方が含まれており、労働者、消費者、および環境を保護することを目的としている。また、これらの知識は一般の人々のナノテクに対する信頼性と規制の確実性を確立し、ナノテクのイノベーションの市場移行を促進するものである。ナノテクの応用市場セグメントの多様性を考えると、ナノEHS研究は米国のイノベーションと産業競争力にとって不可欠と位置づけられており、この点は日本のそれとは大きな違いである。過去NNIではナノELSI/EHSプログラムに累積で13億ドル以上を投資してきた。 NIH傘下の国立環境衛生科学研究所（NIEHS）におけるNational Toxicology Program は最近、労働者のナノ材料の低容量暴露による潜在的な健康影響をよりよく理解するために、齧歯類モデルを用いた多層カーボンナノチューブの吸入による免疫系への影響の評価を完了した。NIOSHは、空気中のナノ粒子の検出と測定が可能な直接読み取り装置の開発、試験、評価を計画している。産業界と協力して、ナノ材料のライフサイクルを通してナノ材料のリスクの「実世界」での実用的な評価方法を開発し、ナノカーボン、金属ナノ粒子、ナノセルロース、ナノクレイ材料の安全性を評価する。 NISTは、ナノプラスチックを評価するナノ流体測定装置と光学顕微鏡法に関する研究開発を実行している。また、ナノ粒子の特性評価に使用される機器の正確な較正を可能にするために、ポリスチレン、金、シリカを含むさまざまな材料から成るナノ粒子標準物質（SRM）の開発、および空気中の人工ナノ粒子への消費者の暴露を評価するための計算ツールの改良を行っている。 NSFは、工学局のナノEHSプログラムの名称を「ナノスケール相互作用」に変更しており、持続可能なナノテクノロジーセンターを支援している。

- Materials Genome Initiative（MGI）

マテリアルゲノムイニシアティブはオバマ政権において開始後、初期の5年間でイニシアティブ自体は終

了し、国家政策上は後継が顕在化していなかった。しかしNISTや大学では活発な活動をしており、大統領科学技術諮問会議（PCAST）が2020年6月に発出したレポート「RECOMMENDATIONS FOR STRENGTHENING AMERICAN LEADERSHIP IN INDUSTRIES OF THE FUTURE」において、ポストMGIとして以下の点でテコ入れすべきことが指摘されており、注目に値する（下記）。

関連してNISTは、MGI後継策の1つとして、HTE-MC（High-Throughput Experimental Material Collaboratory）を2017年に立ち上げている。HTE-MCは、高品質な実験データを迅速に大量取得してデータベースに登録し、材料設計を大幅に改善するための材料合成・特性化・データ管理サービスの統合型ネットワークである。サンプル・ライブラリとデータ/メタデータ・レコードを紐づけ、永久的なコードを付与している。サンプルそれぞれと各設備には、クイックレスポンス（QR）コードが付いている。これにより、サンプル・ライブラリに関連づけられたすべてのデータおよびメタデータをワンステップで発見することが可能になっており、また、バーチャル研究所内のさまざまな測定装置でサンプル測定する際に、新しく測定したデータとサンプル・ライブラリとを自動的に関連付けすることができるようになっている（図1.2.4-14）。“Collaboratory”は、Collaboration + Laboratoryの造語で、複数の研究所の壁を取り除いた組織、バーチャル研究所を意味している。データの取り扱いについて求められるFAIR（Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability）ガイドラインを実践している。また、初期は公的資金が必要としつつ、その後は官民協力により自律的な運営ができる体制をめざして活動している。

“RECOMMENDATIONS FOR STRENGTHENING AMERICAN LEADERSHIP IN INDUSTRIES OF THE FUTURE” からの引用：

＜レコメンデーション 1.21：MGI を再活性化し、スケールアップすべき＞

MGI は、米国内での材料の発見と応用展開を加速し、維持するためのインフラを開発するための、連邦政府のマルチステークホルダー・イニシアティブである。

その関連として、NIST へ委託し作成された 2018 年の報告書（Economic Analysis of National Needs for Technology Infrastructure to Support the Materials Genome Initiative）には以下が示されている。

米国の材料イノベーション・インフラの改善による潜在的な経済的利益は、年間 1,230 億ドルから 2,700 億ドルと推定されている。したがって PCAST は以下のアクションを推奨する。

・AI と量子を MGI の中心に置き「新たな材料発見の加速ワークフロー」を開拓する。

・マテリアル・グランドチャレンジのセットを定義する。

適切な専門家グループに委託し、幅広い分野（ワクチンの発見、農業用肥料、リチウム電池など）で米国が成功するために追求すべき、もっとも重要な材料を定義する。

今後 5 年間で発見すべき材料のトップ 5、10 年間でのトップ 10 材料、20 年間でのトップ 20 材料、の 3 つのカテゴリーを定義する。

・マテリアル・グランドチャレンジのために、DARPA スタイルのコンテストとアワードを立ち上げる。

・「新材料発見の加速」ミッションをサポートするために、米国国立研究所におけるソフトウェア工学と計算能力への投資を拡大する。

https://science.osti.gov/-/media/_/pdf/about/pcast/202006/PCAST_June_2020_Report.pdf

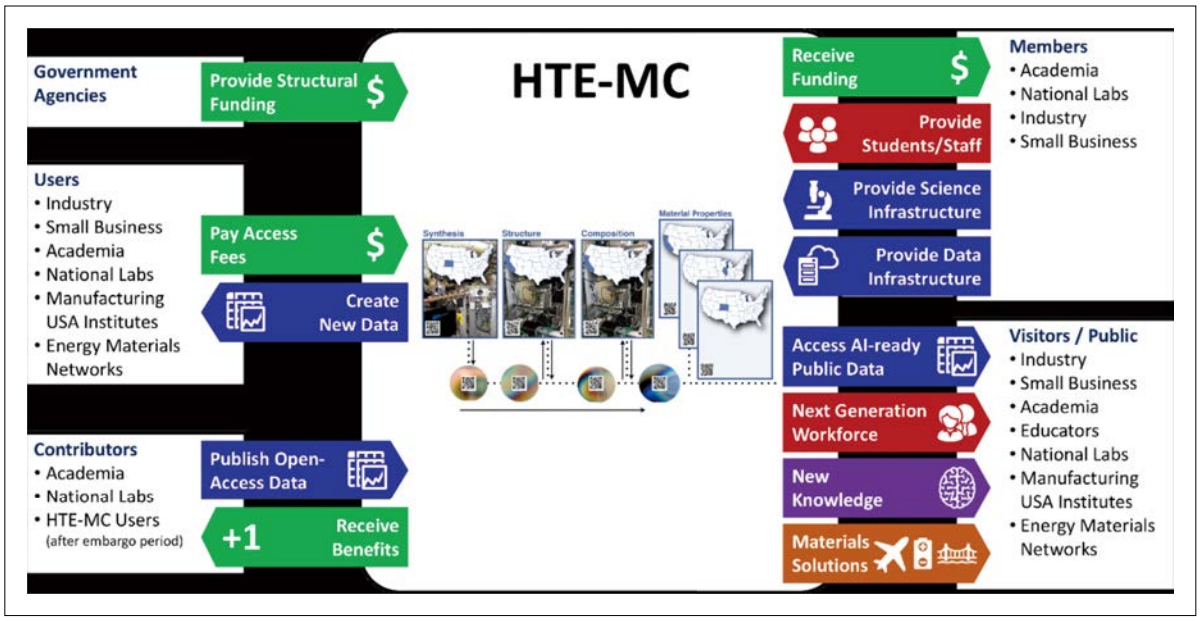


図1.2.4-14　　High-Throughput Experimental Material Collaboratory[6]

■希少資源対策

希少鉱物に関する2017年12月の大統領令「Critical Minerals Executive Order」発令を受けて、DOEの Innovation Hub の1つ Critical Materials Institute（CMI）が、2018年以降の5年間の継続となっている。 CMIは2012年にAmes研究所に設置され、5年間120Mドルの予算で研究開発投資を行ってきた。日本でいえば元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）に対応するような集中型の研究拠点である。米国の経済と安全保障において脆弱性の要因となりうる希少鉱物の輸入依存の低減と安定供給ルートの確保を目的とし、その後内務省が希少鉱物リストとして35鉱種を指定している。また、2019年6月には商務省（Department of Commerce：DOC）が政府機関全体の行動計画を含む希少鉱物の供給確保戦略を発表し、リサイクルや代替技術の開発、サプライチェーン強化など希少鉱物の対外依存度低減に向けた方策を打ち出している。

さらに、2020年9月には大統領令「希少鉱物を敵対的な外国に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処（Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries）」が発出された。本大統領令は米国内の希少鉱物サプライチェーンの確保と拡大に向け、輸入制限措置をはじめ資源マッピングやリサイクル、プロセス技術への資金提供など必要な行政措置を整備するよう関係省庁に指示するものである。

CMIでは、クリティカルマテリアルの国内サプライチェーンの確立に向けた課題に対処するため、産業界と協力して取り組む4つの研究開発プロジェクトを選定した（総額400万ドル、2020年10月）。それらを表1.2.4-1の表に示す。さらに、臨界材料のフィールド検証と実証、および次世代の抽出、分離、処理技術に

6　NIST HP：https://www.nist.gov/programs-projects/high-throughput-experimental-materials-collaboratory（2021年2月17日アクセス）

表1.2.4-1　CMIが2020年に開始した研究開発プロジェクト

プロジェクト名	概要
半連続石灰熱による希土類元素の還元製造	磁石製造に必要なレアアース金属の生産と精製を商業化するために、既存のマグネシウム加工装置を適応させる。国内の磁石サプライチェーンにおけるレアアース金属の生産と精製に対応。
リチウムイオン電池からコバルト、リチウム、マンガンを回収するためのSO_2浸出と電解析出	リチウムイオン電池のリサイクルの経済性向上のために、使用済み電池から金属を分離し、電池製造のサプライチェーンで再利用するために電池の重要材料を再生する新しい方法を模索。
アイダホ・アイアンクリーク鉱床鉱石からのコバルト選鉱の改善	物理的および化学的分離方法を組み合わせて、不要物質を除去し、アイダホ州中央部のアイアンクリーク鉱床で採掘された鉱石から高濃度のコバルトを生成。コスト、エネルギー消費、発生する廃棄物の削減に役立てる。
ミズーリ州のコバルトの可能性を解き明かす	採掘された鉱石から物質を除去し、ミズーリ州の資源から他の貴重な金属とともにコバルトを回収するための新規かつ経済的なプロセスを開発。米国の外国資源への依存度を30%削減できる可能性がある。

焦点を当てた研究開発のための3,000万ドルの資金提供を発表している。

■IEEE IRDS（International Roadmap for Devices and Systems）

米国政府の政策ではないが、米国機関・企業の影響が大きいことから本項にて紹介する。

IRDSは、旧国際半導体ロードマップITR（International Technology Roadmap for Semiconductors）の後継の枠組みであり、2017年以降はIRDSとして衣替えし、半導体から広がって次世代コンピューティングデバイス・システムのロードマップを公表しており、2020年版も公開されている。ロードマップ策定において米国の企業・研究機関関係者はリーダーシップを発揮しており、日本も応用物理学会を通じて産学の人材がロードマップ策定に関与している。次世代AIデバイス、脳型コンピュータ、量子コンピュータ、これらを実現するデバイス新構造や新材料について、強化して取り上げられている。トランプ政権においてもDARPAが「Electronics Resurgence Initiative（電子技術復活イニシアティブ）」を開始したところであり、関連の深い構成となっている。最先端の防衛技術を支えるのは、半導体、部材、製造技術であるとの認識のもと、5年で15億ドルを拠出するイニシアティブである。バイデン新政権ではこのような方向性作りに米国のリーダーシップを発揮しつつ、安全保障上の最重要項目の1つとして、一層の取り組みがなされるのではないかと予想される。

欧州（EU）

■基本政策

欧州はフレームワークプログラム「Horizon 2020」（2014年～2020年、74.8Bユーロ/7年）の枠組みの中で、ナノテクノロジー・材料分野の強化が図られてきた。2021年からは新たなプログラム「Horizon Europe」（2021年～2027年、95.5Bユーロ/7年）が開始される。 Horizon Europeの詳細はまだわからないが、これまでのHorizon 2020と同様に、ナノテク・材料分野に関しても強化されると考えられる。以下、これまでのHorizon 2020と、今度のHorizon Europeで予想されるナノテク・材料関係の政策動向や主なプログラムについて記載する。

Horizon 2020のなかでは、デジタル化、スマート化を強く進める大きな政策目標を掲げ、マイクロエレクトロニクス・ナノエレクトロニクスの分野の強化を図ってきた。政策的には、「Digital Single Market」としてデジタル化の活動の最大化やEUでのデジタルバリューチェーンの構築をめざし、R&D投資をGDPの3%とすることや米国との生産性のギャップを埋めることなどを目標とした。 Horizon 2020は3つの優先領域にそれぞれ次の予算が割り当てられていた。

①Excellent science：24.4Bユーロ

②Industrial leadership：17.0Bユーロ

③Societal challenges：29.7Bユーロ

①のなかでは、10年間で総額1.0BユーロのFuture & Emerging Technologies（FET）が注目され、「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」、「Quantum Flagship」の3つのプロジェクトが推進されているが、これらはナノテク・材料分野と深くかかわっている（後述）。②では、ナノテクノロジー、材料、ICT、バイオテクノロジー、マニュファクチャリング、宇宙が関係する「Leadership in enabling and industrial technologies（LEITs）」に13.5Bユーロの予算が投じられた。また、このLEITsのなかで、競争力強化や成長の機会を与え、社会的課題の解決に貢献する戦略的技術分野としてKey Enabling Technology（KET）が設定され、ナノテクノロジー、先端材料、先進製造技術、バイオテクノロジーの4つの技術分野が選ばれ推進された。

電子コンポーネントとシステムにおける欧州の優位性を高めるために、産業界がリードするパブリック・プライベート・パートナーシップ（PPP）のモデルとして、ECSEL（Electronic Components and System for European Leadership）プログラムが総額約5Bユーロ（EU:1.2Bユーロ、参加国:1.2Bユーロ、企業:2.6Bユーロ超）で進められた。ここでは、高いTRL（Technology Readiness Level）を狙って、ナノエレクトロニクスの研究開発と応用までのバリューチェーンを結びつけ、パイロットラインの構築までを視野に入れた活動を展開した。また、ECSELに関連して、2015年よりNEREID（Nanoelectronics Roadmap for Europe: Identification and Dissemination）において、半導体のデバイス技術からシステムデザインまでを含めたロードマップの作成活動が行われている。この活動は、国際半導体技術ロードマップ（ITRS）の後継として2016年に発足した国際デバイスおよびシステムロードマップ（IRDS: International Roadmap for Devices and Systems）とも密に連携している。また、ナノエレクトロニクスのデザインやデバイス作製を行うインフラとしてASCENT（Access to European Nanoelectronics Network）が構築されており、産業化に結びつく研究を支援している。これはLeti、IMEC、Tyndall National Institute（Irland）の連携で2015年に作られ、14nm以降のバルクおよびSOIのCMOSデバイス、ナノワイヤ、二次元材料、FinFETなど最先端のプロセスが扱えるようになっている。

Horizon Europeは、最先端研究支援、社会的課題の解決、市場創出の支援の3本の柱からなり、2020年12月の時点では以下の予算が割り当てられている。

（1）第1の柱（Excellent science）：24.9Bユーロ

（2）第2の柱（Global Challenges and European Industrial Competitiveness）：53.8Bユーロ

（3）第3の柱（Innovative Europe）：13.4Bユーロ

第1の柱ではERC（欧州研究会議）を通じたフロンティア研究の支援やマリーキュリーアクションによる人材育成を実施する。第2の柱ではミッション志向型研究の導入や、欧州パートナーシップの実施などを通じた社会的課題解決と欧州の産業競争力強化をめざす。また、第2の柱には6つの社会的課題群（クラスター）として、「ヘルス」、「文化、創造性、包摂的社会」、「社会のための市民安全」、「デジタル・産業・宇宙」、「気候・

エネルギー・モビリティ」、「食糧・生物経済・資源・農業・環境」が設定されており、それぞれに個別の課題領域と産学連携の「欧州パートナーシップ（European Partnership）」が含まれている。第3の柱ではEIC（欧州イノベーション会議）を新設し、中小・ベンチャー企業支援により基礎研究の成果をイノベーションにつなげていく。3つの柱のなかでは、主に第1の柱と第2の柱がナノテク・材料分野にかかわると考えられる。

産学連携を支援する枠組みとして「欧州パートナーシップ」があり、FP6から始まり、FP7、Horizon 2020でも実施されてきた。先に述べたようにHorizon Europeでは第2の柱に位置づけられており、この柱の予算の最大50%（=約25.0Bユーロ）がこれに充てられる予定である。2020年7月時点で49のパートナーシップ候補が欧州委員会より提案されており、ナノテク・材料分野に関係するものとして、デジタル・産業・宇宙クラスターの「High Performance Computing」、「Key Digital Technologies」、「AI, data and robotics」、「Photonics Europe」、「Clean Steel -Low Carbon Steelmaking」、「European Metrology」、気候・エネルギー・モビリティクラスターの「Clean Hydrogen」、「Batteries: Towards a competitive European industrial battery value chain」などがある。

■研究開発プロジェクト

10年間で1.0Bユーロという巨額のプロジェクトFET（Future and Emerging Technologies）FlagshipsがHorizon 2020のExcellent scienceのなかで進められており、ナノテク・材料分野にかかわるものとして、2013年開始の「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」と、2018年開始の「Quantum Flagship」がある。また、Flagshipsに類似した取り組みで、「Battery 2030+」という大型の研究イニシアティブが2019年3月にスタートしているので、これらについて簡単に紹介する。

「Graphene Flagship」では、21カ国から146機関、1,200人以上がかかわっている。研究領域としては、基礎科学、材料、健康・医療、センサ、エレクトロニクス、フォトニクス、エネルギー、複合材料、グラフェン関連材料の製造があり、15の科学技術的なワーク・パッケージで研究が進められている。このプロジェクトの計画では2013～2016年が立ち上げ、2016～2018年がコア1プロジェクト、2018～2020年がコア2、2020～2022年がコア3とし、ロードマップを作成している。2019年までの顕著な成果としては、高性能な光検出器や光変調器の開発などがあり、論文数：3,114件、スピンオフ企業：12社などの数値があげられている。

「Human Brain Project」では脳科学から医療、コンピューティングまで含む多様な学術領域の幅広い研究が進められている。研究活動は8つのサブプロジェクト（Neuroinformatics Platform、Brain Simulation Platform、Neuromorphic Computing Platform、Widening Scientific Impact、Medical Informatics Platform、Neurorobotics Platform、High-performance Analytics & Computing Platform、Advancing Brain Science and Medicine）で行われており、19カ国から116機関、850人以上が参加している。このなかでナノテクノロジー/ナノエレクトロニクスと関係の深いのはNeuromorphic Computing Platformであり、従来のノイマン型のコンピュータよりも桁違いの演算速度、エネルギー効率をめざしたニューロモルフィックコンピュータや次世代のニューロモルフィックチップの開発をめざしている。異なるモデルによる2つのニューロモルフィックコンピュータ（BrainScaleS system、SpiNNaker system）用のチップの開発と、それを用いたシステムでのシミュレーションなどのサービスを提供している。

「Quantum Flagship」は2018年10月から新たに開始されたものであり、ここでは5つの領域（Quantum Communication、Quantum Computing、Quantum Simulation、Quantum Metrology and Sensing、Basic Science）で研究が進められ、140件の応募から20件のプロジェクトが選ばれている。2018年10月

～2021年9月までは立ち上げ期間として、132Mユーロの予算が付けられている。2019年にはQuantERAコンソーシアムによる20Mユーロを投じるプロジェクト公募もなされた。2021年から本格化の予定である。プロジェクトの内容でナノテク・材料分野に関するものとしては、超伝導、トラップイオン、2次元物質/光集積回路を用いた量子コンピュータおよびその基礎技術開発や、ダイヤモンドNVセンターを用いた磁気センサ、コンパクトな原子時計、量子センサとMEMS技術による新たなセンサなどがある。

Flagshipsに類似した取り組みで、「Battery 2030+」という大型の研究イニシアティブが2019年3月にスタートしている。 Battery 2030+の目的は、超高性能で安全で持続可能なバッテリを開発することにあり、研究機関、業界、公的資金提供者を結集する長期的な研究イニシアティブになっている。バッテリ技術（特にモビリティとエネルギー分野）の飛躍的な進歩に向けて、欧州の電気化学、材料科学、デジタル技術を向上させていく。また、新しい電池の化学を探求するために、人工知能、ビッグデータ、センサ、コンピューティングなどの技術を利用する新しい科学的アプローチに焦点を当てている。2020年9月から新フェーズに入り、7つの研究プロジェクトが開始され、Horizon 2020からプロジェクト全体で40.5Mユーロ の予算が提供される。7つのプロジェクトは、BIG-MAP、INSTABAT、SENSIBAT、SPARTACUS、BAT4EVER、HIDDEN、BATTERY2030PLUSであり、それぞれにコーディネートする機関が割り当てられており、Battery 2030+イニシアティブの下で連携して進められている。

ドイツ

ドイツ連邦政府は2006 年に、研究開発およびイノベーションのための包括的な戦略である「ハイテク戦略（High-Tech Strategy）」を発表した。これは省庁横断型の戦略であり、幅広い施策や戦略が網羅されている。さらに、2010 年には、このハイテク戦略を更新するものとして、「ハイテク戦略2020（High-Tech Strategy 2020）」を発表した。ドイツが今後どの分野に力を入れていくかを社会的な課題から導き出して明示しており、気候、エネルギー、健康・栄養、交通・輸送、安全・コミュニケーション技術の重点5分野を特定した。さらに2014 年秋に、第3期となる「新ハイテク戦略（New High-Tech Strategy）」を発表、前戦略を踏襲するかたちで、経済成長が見込まれる6分野（デジタル経済と社会、持続可能な経済とエネルギー、イノベーティブな職場、健康的な生活、インテリジェントな交通・輸送、市民安全の確保）を特定した。2018年には、3回目の更新として「ハイテク戦略2025（HTS2025）」を発表した。ここでは未来のためのガイドラインとしてドイツにおける繁栄、持続可能な発展および生活の質を向上させることを目標に、研究とイノベーションを結集させることを強調している。基幹産業である自動車・機械・化学を今後も支える「未来技術」として、マイクロエレクトロニクス（通信システム、5G通信技術）、材料（電池、3Dプリント、軽量化、製造技術、宇宙航空）、バイオテクノロジー、ナノテクノロジー、人工知能（機械学習、ビッグデータ）、量子技術といった技術領域を位置づけている。連邦政府は2019年に約200億ユーロを投資、さらに2025年までに産業界・州政府合わせて対GDP比で3.5%を研究開発に投資するとしている。また、デジタル化やさまざまな分野のキーテクノロジーに関して、欧州における他の国々との国際協力関係を強固にすることによって、ドイツだけでは実現不可能な研究開発を推進することを掲げている。

ハイテク戦略2025と連動して、連邦教育研究省（BMBF）は2015 年に「材料からイノベーションへ」と題したナノテク分野の基本計画[7]を発表した。

7 https://www.werkstofftechnologien.de/（2021年2月17日アクセス）

同プログラムは研究成果をより効率的に技術移転し、市場性のある製品に結びつける目的で設置されたもので、過去に実施された「ナノイニシアティブ・アクションプラン2010」、「アクションプラン・ナノテクノロジー2015」の後継と位置づけられており、現状では2024年まで、毎年1億ユーロ規模の助成を予定している。BMBFは応用分野、先端材料、バッテリ材料、デジタル技術を重点的に取り組んでいる。

応用分野としては以下を重点分野として研究開発を推進している。

・エネルギーおよび蓄電システム：ガス発電タービンや風力発電タービンの材料研究や、新しい電気貯蔵システム用材料。
・モビリティと輸送：電気自動車用バッテリ技術や水素貯蔵システム用材料。
・健康およびQOL（Quality of Life）：セルフクリーニング・抗菌材料や空気・水用フィルターシステムなどQOLに貢献する材料や、インプラント用材料、医薬品製剤用材料。
・循環型材料社会：材料利用効率の向上、希少な再生不可能な原材料の代替、リサイクル、廃棄物のリサイクル、二次原材料の使用など。
・建築材料：建物のエネルギー効率を改善するための断熱材、防汚性塗料、光触媒など。

革新材料研究についても、長期的視点で力を入れており、インテリジェント材料、ハイブリッド材料、炭素材料、または磁性材料に取り組んでいる。

蓄電池の研究については、ワイヤレスデバイス、グリーン発電、電気自動車などの観点から特に重視しており、材料から電池製造、リサイクルまでのバリューチェーン全体にわたる研究開発を推進している。ポストLiイオンバッテリである金属空気電池や金属硫黄電池にも取り組んできている。また、バリューチェーン全体（原材料から部材、セルの製造、トータルバッテリシステムまで）をドイツでカバーすることもめざしている。

デジタル技術と材料研究の関わりについては、2つの方向性を示している。1つ目は、材料革新により、プロセッサ、データストレージ、伝送技術などの情報通信技術の絶えず成長するパフォーマンスを支える研究開発であり、もう1つは、マルチスケールモデリングやシミュレーションやデジタルツイン、AIを活用したデータ科学などによる材料創製研究の革新である。

さらに、連邦政府は2018年に基本計画「量子技術－基礎研究から市場へ－（Quantum Technologies - basic to markets －）」（2018～2022年、最長2028年まで）を発表し、2021年までに量子技術領域の研究開発に約6億5,000万ユーロを投資する予定であるが、2020年6月には未来パッケージの一部として、量子研究開発支援に20億ユーロの追加投資が発表された。量子コンピュータ、量子シミュレーション、量子ベース計測科学、量子システムの基盤技術（実験装置、プラント技術、レーザ）などを重点領域として、ドイツにおける量子技術を科学的にも経済的にも将来確固たるものにすることを目的として、研究センターの設置、産業界とのネットワーク構築、産学連携プロジェクトの推進、人材育成などに取り組んでいる。

また、2020年には、自動車、機械、化学などドイツの従来の主力産業に加えて水素製造を新しい核とすることをめざし「水素戦略2020（The National Hydrogen Strategy）」が発表された[8]。連邦経済エネルギー省（BMWi）の所掌であり、研究開発とインフラ整備に70億ユーロ、海外への技術支援に20億ユーロ、計90億ユーロの投資を予定している。再生可能エネルギーのみによる電気分解で生成される CO_2 フリーな水素である“グリーン水素”の導入・普及をめざし、研究開発関連では、水素製造技術、Power-to-X技術（電

8 https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6（2021年2月17日アクセス）

力から燃料への転換技術）の商業化、水素製造・輸送・貯蔵・利用の安全性確保ならびに関連する計測技術・監視技術の革新に取り組む計画である。

英国

英国政府はEU離脱による科学技術界全体に広がる懸念や不安を払拭するため、EU離脱後も英国人分の研究資金を助成することや、2017年より産業戦略チャレンジ基金（ISCF：Industrial Strategy Challenge Fund：for research and innovation）の新設を決めている。2019年度までに公募し決定したもので、ナノテク・材料分野に関係するもの（チャレンジ名称）としては、製造技術・新材料（26Mポンド/4年、2017年）、量子技術（20Mポンド/4年、2018年）、量子技術実用化（70Mポンド/4年、2019年）等がある。2014年から進められているThe UK National Quantum Technologies Programmeに対してはこのような追加投資もあり、産業界からの投資も含めると総額350Mポンドになる。このように、英国は量子技術の強化を図ってビジネスにつなげていく姿勢が明確になっている。

また、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（Department for Business, Energy & Industrial Strategy：BEIS）は研究インフラへの投資を継続し、2021年度までに58億ポンドを投資することを決めている。このなかには、サー・ヘンリー・ロイス先進材料研究所（マンチェスター）に1.26億ポンド、ライフサイエンス・物理科学全英中核研究センター（オックスフォード）に1.03億ポンドの投資などが含まれている。また、新技術とイノベーション支援への投資（2020～2021年）として、材料加工研究所（Materials Processing Institute）に22Mポンドの予算が付けられている。

英国のナノテク・材料分野の戦略の基盤となっているのは、BEISの前身であるビジネス・イノベーション・技能省（Department for Business, Innovation and Skills：BIS）が2010年に出した「英国ナノテクノロジー戦略」である。国民、産業界、学界のニーズを反映しながら、新興技術（Emerging Technology）・実現技術（Enabling Technology）であるナノテクノロジー分野で政府が安全で信頼できる持続可能な方法でイノベーションを支援し、利用を促進することにより、英国の経済および消費者はナノテクノロジー開発から便益を受けるとしている。この戦略の対象には、医療技術、製造技術、設計技術、機器・機械技術、構造材料などが広範囲に含まれている。また、2014年の科学技術イノベーションに関する戦略「Our Plan for Growth：Science and Innovation」では、英国が研究開発で世界をリードする重要な技術として8つの技術を設定しており、そのなかの1つがナノテクノロジーと先端材料となっている。

2009年には、耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料の開発と同分野の産業競争力の向上に向けて、BISにより「英国複合材料戦略（The UK Composites Strategy）」が発表された。また、その推進として、「高付加価値製造カタパルト（High Value Manufacturing Catapult）」のなかで、この複合材料戦略に沿った国立複合材料センター（National Composite Center）をブリストル地区に設立している。このセンターはブリストル大学内に設置されているが、インペリアル・カレッジ、マンチェスター大学、シェフィールド大学、クランフィールド大学とも共同研究を行っている。また、GKN社やロールス・ロイス社も参加して、年間20億円程度の大規模な研究拠点となっている。

グラフェンの研究とその実用化に向けた取り組みも顕著である。マンチェスター大学のアンドレ・ガイム教授とコンスタンチン・ノボセロフ博士のグラフェン研究が2010 年のノーベル物理学賞を受賞したことを受け、2011 年10 月に5,000 万ポンドを投じてグラフェン・グローバル研究技術拠点（Graphene Global Research and Technology Hub）を設立することを決定した。2013 年にはマンチェスター大学内に国立グラフェン研究所（National Graphene Institute）が作られ、80社を超える企業が参加して異分野融合

の研究が進められている。また、2018 年度には、大学や公的機関の研究者と産業界との協力によるグラフェン材料の応用・商業化の促進やハイテク分野における雇用の創出をめざして、産業界主導の開発を行うグラフェン技術応用イノベーションセンター（Graphen Engineering Innovation Centre）が同大学内に開設（総額60Mポンド）され、現在はパートナー企業が20社程度となっている。

フランス

フランスでは、2009年に「国家研究・イノベーション戦略（SNRI）」が取りまとめられた。これに関連して、2009年、ナノテクノロジーによるイノベーションを推進するため、「Nano-INNOV」イニシアティブが策定・実施された。ナノテクノロジーの産業化を加速するため、グルノーブル、サクレ、トゥルーズにナノテク研究開発の統合センターが設立され、2009年に7,000万ユーロが配算されている。2013 年7 月、それまで別々に制定されていた高等教育の基本法と研究の基本法とが統合され、高等教育・研究法が制定された。この法律を踏まえ、研究開発の分野では、「（研究・技術移転・イノベーションのための戦略的アジェンダ）France Europe 2020」という基本戦略が策定された。この戦略的アジェンダでは、9つの社会的課題にもとづいた研究の方向性が示されるとともに、研究戦略会議の設置、新たな高等教育・研究評価機関（HCERES）の設置、研究拠点の強化、などの制度改革の方向性も示された。ここではナノエレクトロニクス、ナノマテリアル、マイクロ・ナノ流体工学といった領域が優先領域としてあげられている。また、Horizon 2020 における優先領域である、先進材料も優先項目にあがっている。さらに、一連の制度改革が進んだ2015年3月には、現行の戦略である「SNR（国の研究戦略）France Europe 2020」が公表された。 SNR France Europe 2020 はFrance Europe 2020 を洗練したもので、2020年までを視野に入れた研究戦略である。10項目の社会的課題を特定し、それらに対する重点的研究方針を定めている。ナノテク・材料分野に関連するものとして、希少鉱物への依存度減少、エネルギーや化学に使用する化石系炭素化合物の代替品、新材料の設計、センサなどが重点的研究方針としてあげられている。

一方、2018年3月にマクロン大統領がAI戦略を発表し、2022年までに総額15億ユーロが投資される。AI戦略のなかでは、ナノテクノロジーも重要な基盤技術として位置づけられており、それに呼応するかたちで同年エレクトロニクス分野の産業競争力向上を掲げる戦略「Nano 2022」が発表された。 Nano 2022では2018年から2022年までの間に総額10億€が投資される計画であり、自動運転や5G通信分野で欠かせない次世代マイクロエレクトロニクスの研究開発拠点および製造拠点の形成を目標としている。

フランス初の独立したファンディング・エージェンシーとして2005年に設立されたフランス国立研究機構（ANR）は競争的研究資金の配分を主たる業務としているが、ナノテク・材料分野にも多くの研究助成を行っている。2020年7月には「2021年行動計画（Plan d’action 2021）」が発表され、2021年のANRの研究助成の全体的な展望について記載されている。これは、昨年発表された「2020年行動計画」を継承するかたちで、人工知能、人文社会科学（Social and Human Science：SHS）、量子技術、バイオ製剤製造、神経発達障害における自閉症、希少疾患におけるトランスレーショナル・リサーチ（基礎研究を実用化へつなげる橋渡し研究）を国の戦略的優先事項として指定している。イノベーション省（MESRI）は2021年1月に量子国家戦略を発表した。そのなかで、量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資予定であることを表明した。

また、ANRは日仏の科学研究における協力促進を目的に2017年12月にJSTと協力枠組み合意を締結した。この合意にもとづき、2018年よりJST戦略的創造研究推進事業（CREST）において、日仏研究者による日仏共同研究プロジェクトに対する支援を開始しており、ナノテク・材料分野では、以下の研究領域での共同プ

ロジェクトが進んでいる。

・量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出（研究総括：荒川泰彦・東京大学特任教授）
・革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明（研究総括：伊藤耕三・東京大学教授）

オランダ

オランダ科学研究機構（NWO）は、2018年に発表した、2019～2022年の新しい戦略“NWO strategy 2019-2022”のなかで、オランダの研究の科学的・社会的インパクトをさらに高めることを目的として、5つの観点（研究協力、人材育成、研究開発、研究施設、知財）からの抱負を示している。研究開発の観点では、引き続き基礎研究を重視し、ハイリスクの先駆的研究に対するプログラムを実行していく。また、戦術的に重要な科学的・社会的課題の解決に向け、チーム研究により注力していく、と記されている。今後、オランダ国家研究アジェンダを定期的に更新しつつ、研究開発を戦略的に展開していくために国内の科学界をコーディネートしていく。NWO科学部門では、この新戦略およびステークホルダーからのインプットにもとづいた2019～2022年戦略的マニフェスト“Off the beaten track”を発表している。このマニフェストには、3年間にわたるNWO科学部門の方針が示されている。

ナノテク研究開発の面では、施設共用プログラム“NanoLabNL”に参加している7拠点（AmsterdamのAMOLF NanoLab、DelftのKavli NanoLab、Else Kooi Lab（ともにTU Delft内）、TNO NanoLab、EindhovenのTU/e NanoLab、EnschedeのMESA+ NanoLab（U Twente内）、GroningenのZernike NanoLab（U Groningen））が充実している。この“NanoLabNL”プログラムは、欧州域内でのナノシステム研究用のクリーンルーム施設を連携させた、欧州横断インフラ組織である“EuroNanoLab”コンソーシアム（2020年現在、フランス、オランダ、ノルウェー、スウェーデンを中心に、欧州14カ国にある44のクリーンルームが参加）にも参加している。

2019年にオランダ国内の量子技術に関する産学官のステークホルダーによってアジェンダ“National Agenda on Quantum Technology”が策定され、オランダ政府に提出された。このアジェンダでは、世界的な量子技術研究拠点であるQuTech（Delft）、QuSoft（Amsterdam）、QT/e（Eindhoven）を中心に、オランダを量子技術分野で世界を牽引するハブとするための提言がなされた。「量子コンピュータや量子センシングなど6つの研究領域におけるイノベーション実現」「エコシステム構築とマーケットおよびインフラ形成」「教育、知識、技術」「量子技術に関する社会対話の推進」の4つに関する取り組み方針が明示され、1億200万ユーロ/年（既存プログラム分の6,900万ユーロ/年を含む）を支出することを提案している。このアジェンダにもとづき、オランダ政府は2,350万ユーロを初期投資することを決定した。

中国

中国の科学技術・イノベーション政策の基本方針は、2006年2月に国務院から発表された「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006～2020）」に記載されている。また、2016年5月には、国務院から「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」が発表されている。世界が劇的に変動するなか、後者は次期の科学技術イノベーション中長期計画を前倒しで示した形になっている。直近での実施事項については、この2つの基本政策を踏まえて計画された「科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016～2020年）」に記載されている。従来の科学技術五カ年計画と異なり、本計画は名称に「イノベーション」が入っており、中国政府が科学技術と経済、科学技術とイノベーションを直結させ、研究・開発から産業化までのイノ

ベーション創出の全過程を視野に入れていることがうかがえる。

国家中長期科学技術発展計画綱要においては、2020年までに中国を世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることが目標とされている。本計画綱要にもとづく科学技術行政の特徴は、欧米を追う立場にあるサイエンスの強化に重点を置くことで、中国は「世界の工場」から「自主イノベーション」を引き起こす国になるよう科学技術戦略を転換しようとしている点にある。特に、先端科学技術インフラの建設が計画的に進められ、重イオン加速器（蘭州CAS）、シンクロトロン放射光施設（上海）、スーパーコンピュータ「天河2号」（2013年6月～2015年11月までスパコンランキングTOP500で1位）および「神威・太湖之光」（2016年6月～2017年11月までスパコンランキングTOP500で1位）、次世代DNAシーケンサー（北京他、日本を凌駕）、核融合施設（ITERにも参加）、量子科学実験衛星「墨子号」（世界初）など、急速に充実してきている。本計画綱要では、次世代のハイテクおよび新興産業発展の重要な基盤を構成し、ハイテクイノベーション能力を総合的に体現する先端技術8分野が掲げられており、そのうちの1つとして「新材料技術」が指定されている。具体的には、ナノテクの研究を基礎として、ナノ材料とナノ素子を研究するとともに、超伝導材料やインテリジェント材料、エネルギー材料等のほか、優れた機能を持つ特殊機能性材料や新世代の光通信材料を開発するなどの目標が設定されている。また、重大科学研究計画4テーマの1つに「ナノテクノロジー研究」が設定されている。

一方、国家イノベーション駆動発展戦略綱要は、2050年までを見据えた15年間の中長期戦略である。本戦略綱要では2050年までにイノベーション強国を実現するためのロードマップが掲げられ、2030年までの経済競争力の向上に関する核心的で重要な内容、社会発展の差し迫った需要、国家の安全に関する重大問題をしっかりと踏まえて重点的投資を行い、各省庁による投資の役割分担と連携を強化するとされている。

これら2つの綱要を踏まえた第13次五カ年計画においては、具体的な目標として、2020年までにイノベーション能力を世界15位に引き上げることをめざし（2020年はWIPOの世界イノベーション指数で14位、中国の科学技術発展戦略研究院の国家総合イノベーション・インデックスでは15位）、2020年までにR&D経費の対GDP比を2.5%に（2019年2.23%）、2020年までに国際科学論文被引用回数ランキングを世界2位に（2017年世界第2位）それぞれ引き上げること、2020年までにPCT特許出願数を2015年から倍増させること等が設定されている。また、ナノテク・材料分野に関しては、産業技術の国際競争力の向上につながる「新材料技術」、基礎研究の強化にかかる「新材料の設計と製造工程に関する研究」、2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトのなかの「新素材の研究開発と応用」等について記載がある。

2015年には製造業の高度化をめざす「中国製造2025」が国家戦略として公表された。「中国製造2025」は、中国が製造大国から製造強国へ転換するための国家戦略であり、強化すべき重要な産業分野として10の重点分野「次世代IT技術産業」「高級NC旋盤とロボット」「航空・宇宙設備」「海洋工程設備と高性能船舶」「先進的な軌道交通設備」「省エネルギー・新エネルギー自動車」「電力設備」「農業機械」「新材料」「バイオ医薬品と高性能医療機器」が掲げられている。なお、米国の反発等により「中国製造2025」は2019年以降、言及が避けられていたが、ポストコロナに向けた戦略の一環として、2020年4月に国内の企業・研究機関を対象に新規研究案件の募集が行われた。対象はビッグデータや5Gを活用した工場生産効率化の研究であり、2020年の追加投資額は計7億元（約105億4,200万円）となっている。

また、2020年10月末に開催された中国共産党第19期中央委員会第5回全体会議において、科学技術を含む中国全体の2035年までの中長期計画および第14次五カ年計画の大枠が発表された。イノベーション主導の開発を中核に据え、科学技術を通じて国を強化することが強調されており、人工知能、量子情報、集積回路、ライフ・ヘルス、脳科学、生物育種、航空宇宙、深海などの先端分野がプロジェクトの対象としてあげられている。

なお、財政資金の使用効率を高めることを目的に、中国では研究開発資金やプロジェクトの改革が進められ、代表的な研究開発計画である「973計画（国家重点基礎研究発展計画）」「863計画（国家ハイテク研究発展計画）」などが2016年に国家重点研究開発計画に統合された。2017 年末までに「基礎研究」「先端技術」「社会生活」「農業技術」「国際協力」の5 つのカテゴリーで 50 の重点プログラム（テーマ）が開始され、「基礎研究」のカテゴリーを構成する8テーマのうちの1つがナノテクノロジーとなっている。

中国では、国家レベルで複数のナノ科学技術拠点が構築されている。具体的には、国家ナノ科学技術センター（NCSNT）（北京）、国家ナノテクノロジー・工程研究院（天津）、ナノテクノロジー・応用国家工程研究センター（上海）、国家ナノテクノロジー国際イノベーションパーク（蘇州）が設立されており、ナノ科学技術産業化の役割を担っている。

2011年3月に中国科学院（CAS）の院長に就任した白春礼は、2003年に北京に設立されたNCSNTの理事長であり、中国のナノテク政策を牽引している。 NCSNTは米国NSFと共同ワークショップ開催などで関係を深め、また、英国Royal Society of Chemistryと共同で“Nanoscale”という国際学術誌を発刊した。同誌は白春礼がアジアのregional editorを務め、最初の公式インパクト・ファクターは4.11という高い数字を記録している（現在は6.895）。また、NCNSTは北京で2年に一度開催されるナノ科学・技術国際会議（China NANO）を主催しており、2019年8月の第8回会議（China NANO2019）では参加国数40カ国以上、約2,700人の参加者を集めた。

北京が基礎科学、大学の企業モデル構築などの中国全体戦略の知の中心とすれば、上海や蘇州は技術開発や起業拠点の中心といえる。特に、1994年に建設がスタートした蘇州工業園区（Suzhou Industrial Park：SIP）はシンガポール政府との共同による都市開発を進め、ナノテクノロジー（Nanopolis）やバイオテクノロジー（Biobay）を中心とする70万～80万人規模のハイテク都市 に成長した。各大学の技術センターやCAS傘下のナノテクノロジー・ナノバイオ蘇州研究所（SINANO）が産学ナノ拠点として工業園区の中心にあり、蘇州市、江蘇省、国の各レベルで、世界各国から誘致された企業集団や起業家のイノベーションをめざす活動に効率的なサービスを提供している。SINANOでは材料の成長、特性評価、デバイス製造のすべてのプロセスを1つの超高真空環境下に統合したナノテク真空相互接続実験装置（Nano-X）が、2019年からオープンプラットフォームとして国内外のユーザーに全面的に開放されている。

韓国

韓国は、2018年2月「第4期科学技術基本計画」を公表し、また、同年7月に「国家技術革新システム高度化に向けた国家R&D革新」を発表した。国家R&Dの方向を従来の技術獲得・経済性重視から人と社会に重点を置くとの方針を示している。これらに先立ち発表された「革新成長に向けた人中心の第4次産業革命対応計画」（I-KOREA4.0）（2017年11月）ではナノテク・材料に関連する未来型新産業として、以下を掲げている。

- 電気自動車・水素自動車の普及拡大
- 先端技術産業の融合・複合推進戦略を策定し、半導体、ディスプレイ、炭素産業など第4次産業革命の実現に必要な先端新素材・部品の開発
- 製薬・バイオなどの革新技術開発、人材育成、事業化・海外進出支援を通じた、製薬・バイオ、マイクロ医療ロボットなどの医療機器産業の育成

韓国のナノテク政策は、従来からの、「ナノ技術開発促進法（2003 年制定）」にもとづき、「第４期ナノ技術総合発展計画（2016～2025年）」を運営している。ナノテクの競争力について、製造業のリーディング技術開発を掲げ、米国の技術レベルを100%としたときに、92%のレベルに到達するとしている。その過程で、12,000人の高度ナノテク人材を育成する。また、ナノテク産業でグローバルリーダーとなることを掲げ、ナノテクベース製品のマーケットシェアを12%にすることを目標値に設定、ナノテク関連ベンチャーを1,000社設立するとした。韓国におけるナノテク分野への公的研究開発投資は、2013年以降、2012年以前までと比較して倍増しており、年間５億ドルを超える規模である。その内訳は研究開発86%、共用研究インフラ10%、人材育成4%の配分となっている。

また、2018年４月、第４次産業革命や未来社会の中核領域を後押しするため「未来素材源泉技術確保戦略」を公表した。科学的・社会的問題に先行的に対応するために必要な「30の未来素材」を導出するとともに、中長期R&D投資戦略をまとめている。

<30の未来素材>

①超接続社会のためのスマート素材（８つ）：増大するデータ・電子機器のモバイル化に対応して機器の高速・超低消費電力・大容量化を実現するインテリジェント素材

②超高齢化社会のためのウェルネス・バイオ素材（９つ）：超高齢化や生活習慣の変化に伴う慢性疾患の急増に対応できる生体適合材料

③持続可能な社会に向けた環境変化対応素材（５つ）：さまざまな大気汚染により発生する環境問題を最小限に抑え、自然からエネルギーを生成することができる素材

④災害から安全な社会のための安全素材（８つ）：地震、原発稼働・廃棄時に安全が確保可能な材料、突然の停電や社会災害発生時に効率的に対応可能な素材

ナノテクの共用施設としてナノ総合技術院（旧ナノファブ・センター）がKAISTを中心に全国６カ所に設置されている。2018年には、ナノファブ・センターの機能高度化を決めた。急変する技術の変化に産学官が先行的に対応できるように、カスタマイズされたサービスを中心に、超低消費電力ナノデバイス、フレキシブルディスプレイ、インテリジェントセンサなど、産業需要が急増している分野の標準的な工程を構築する。企業の製品開発成功の可能性を高めるためにステップバイステップのプロセスの結果を検証する試験認証システムを構築する。ナノファブは、ナノ融合先端デバイスの公認試験・認証機関へと発展させるとしている。

KAISTは、自らのVision 2031 Global Value-Creative Leading University のなかで、教育、研究、起業家精神、グローバル化の追求を掲げている。ナノサイエンス、ナノテクノロジー分野においても果敢な投資を行っており、４つの分野、材料科学と材料工学（Materials science and engineering：MSE）、化学・生体分子工学（Chemical and biomolecular engineering：CBE）、電子工学（Electrical engineering：EE）、化学（Chemistry）がその研究の中核をなしている。特にMSE分野は、28人の専任教授、425人の学生を擁し、物質の原子、ナノ、マイクロスケールの構造および組成が、その電気的、光学的、機械的、磁気的、熱的振る舞いにどのように関係しているかの理解に注力している[9]。

9 Seungbum Hag et al.,"Nanoscience and Nanotechnology at the Korea Advanced Institute of Science and Technology, *ACS Nano* 13(2019):doi:10.1021/acsnano.9602772

ナノテクのELSI/EHSについては予算を重点化し、省庁横断の1st Comprehensive Plan for NanoSafety Managementを2011年に発表して以降、継続的な取り組みを進めている。また、ナノテク関連政策を支援する政府組織として、2,000名のナノテク研究者を会員に擁する韓国ナノ科学技術協会（KoNTRS）が、ナノテク科学の推進・ネットワークの構築・教育の促進に貢献してきたことが特徴である。

2018年に韓国政府は、関連10省庁の合同で作成した「第3次National Nanotechnology Map（2018～2027）」を発表した。世界における第4次産業革命の到来によって、センサ、バッテリ、自動運転車、バイオチップ、IoTなど、将来のコア技術に関して、ナノテクの重要性が再浮上したと認識し、2027年に向けて研究開発投資を強化するとしている。ポータブルな人工知能、スピード無制限通信、無人飛行機、超急速充電電池等の開発を進めることを掲げている。韓国におけるナノテク関連産業は、2016年時点で国内総製造業売上高（約1,418兆ウォン）の9.5%に相当する約135兆ウォンまでに成長している。しかし近年、ナノテクの量的・質的レベルの向上が停滞し、特定分野に事業化が偏り、売上高の大部分を大企業が占めるなど、中小企業主導の市場形成が遅れている状況に懸念が持たれている。韓国におけるナノテク関連製造業の分野別売上高比率は、ナノエレクトロニクス（90.1%）、ナノ材料（7.5%）、ナノ製造装置・機器（1.7%）、その他（0.7%）であると推計されている。

「第3次National Nanotechnology Map（2018～2027））」の主な内容は次のとおりである。

○戦略的技術：韓国における未来社会の3大目標である「便利で楽しい生活」、「地球とともに生きる生活」、「健康で安全な生活」について、「ナノテクノロジーで実現する未来技術30」を選定し、将来技術の実現に必要な詳細ナノテクロードマップが作成された。30の未来技術を実現するための、70のコアテクノロジーが同定されている。

○「便利で楽しい生活」のために、超微細加工を活用して、より速く、より正確で鮮明な特性を持つ人工知能半導体、IoTデバイス、未来ディスプレイなどの開発を推進する。

○「地球とともに生きる生活」のために、ナノマテリアルの革新的な現象を利用し、無限のクリーンエネルギー、ナノ粒子除去、水資源の生産技術を構築する。

○ナノ物質界面の迅速な伝達特性を利用し、簡便・正確で効果的な予防・診断・治療により「健康な生活」を実現する。また、安全な食品、災害安全技術の開発を通じて「安全な生活」を実現する。

○ナノデバイス、ナノエネルギー・環境、ナノバイオ、ナノマテリアル、ナノプロセス・ナノ計測・機器、ナノ安全など、ナノテク6大分野の開発。

○ナノファブ・センターの機能高度化とともに、実習中心の専門人材教育プログラムを企業と連携することで、雇用創出する。企業における技術の商業化のサポートにより、ナノ融合産業の雇用を拡大する。

○（ナノ安全）ナノ安全基準の設定、認証システムの確立など、ナノ物質とナノ物質を含む製品の全サイクル安全管理システムを構築する。

ロシア

ロシアは、国家予算を重点的に配分することを目的に選定した8つの優先的科学技術分野の1つに「ナノシステムと材料産業」を掲げており、2007年に承認された「ナノ産業発展戦略」によってナノテク重視の方向性を明確に打ち出した。これを受けて、ナノテクの産業化のための投資会社「RUSNANO」が国の100％出資により誕生し、2020年度末までに1,500億ルーブルの投資を行い、ロシアのナノテク産業の市場規模を1

兆3,000億ルーブル、うちRUSNANO投資企業による売上高を6,000億ルーブルにするとの計画である。また、ロシアにおける科学技術発展に向けた優先分野の実現と、研究開発分野への投資誘致拡大を目的としたモスクワ大学イノベーション科学技術センターでは、優先対象分野の1つとして新素材ナノテク研究、ナノ機械製造をあげている。

ロシアにおける科学技術予算は他国と比べ少なく、2010年代前半には、2020年までにロシア全体の研究開発投資の対GDP比を3%にまで増加させたいとの意向を持っていた。しかし研究費総額は横ばいで、2017年度時点での対GDP比は1.11%に留まっている。民間投資の割合増加についても引き続き課題としている（研究費負担割合は諸外国において民間が過半数を占めているのに対して、ロシアでは2017年度時点で66.2%が政府負担である）。

他方、ロシアは他国との共同研究開発に熱心であり、欧州のプロジェクトにも積極的に資金を投入している。たとえば、X線自由電子レーザのような巨額の予算を必要とするプロジェクト（独ハンブルグのDESY）に対して、RUSNANOがドイツと同等規模の資金を拠出したことが知られている。また、アジア太平洋地域との協力にも関心が高く、各国の企業との共同ファンドが設立されている。インドネシアやインドにおける航空宇宙関連、中国におけるITや新エネルギー、新材料関係の共同ファンドなどがあげられる。フレキシブルディスプレイで米国企業、風力発電関係で日本の企業との協力も検討されている。

台湾

台湾は、第1期台湾ナノテクノロジー計画（2003～2008年/5.55億ドル）で、ナノ産業化63%、インフラ・コア施設15%、先端学術研究20%、教育2%の配分で戦略投資を実施し、第2期6年計画（2009～2015年）では7.12億ドルを計上している。産業化振興策を含め、インフラへの計画投資（全国10カ所）、将来の人材育成のための小中高一貫教育（米国のK-12相当）用教科書作り、教師の育成など、バランスの取れた計画を着実に進めている。2015年から開始されたナノ科学革新応用テーマ計画（Innovation and Application of Nanoscience Thematic Program：IANTP）では、科学的発見にもとづく橋渡し研究を推奨することでこれまでのナノテクノロジー計画を加速することを目的としている（2015年から2018年までに2,640万ドルを投資）。「バイオテクノロジー・医学（投資割合51%）」「エネルギー・環境（同20%）」「エレクトロニクス・オプトニクス（同17%）」「評価・合成（同12%）」の4つの重点分野に対して、「コンセプト開発」から「プロトタイプ実証」まで（技術成熟度レベルTRL2～4に相当）を促進することで、社会的課題の解決や産業発展に貢献することをめざしている。

特に、ナノテク産業の振興のために導入したナノテク利用製品の公的認定制度「ナノマーク（nanoMark）」システムが社会に浸透して、2019年5月時点で、18社、1,299製品がその認定を受けている。認定基準は、（1）利用している技術が100ナノメートル以下のスケールであること、（2）機能が明確であること、の二点である。また、2017年よりナノマークの管理を経済省から台湾ナノテクノロジー産業発展協会（TANIDA）に移管している。

ナノマークシステムが産業の振興に有効に働くことが証明されたため、類似のシステムがイランやタイのナノテク政策のなかに取り入れられ始めている。また、マレーシアのナノ製品認証プログラムNANOverifyとnanoMarkの間で相互認証を行う取り組みを開始し、2020年4月に相互認証第1号企業が誕生している。

ナノテク標準化について、ISO/TC229、IEC/TC113に、アジアナノフォーラム（ANF）の代表として国際標準化活動に積極的に参加し、また、OECD/WPMN、WPNでの活動にも参加している。

低炭素エネルギー技術に関連する材料研究を推進するEUのM-ERA.NETに2012年から加入している。

また、毎年、ナノテクの国際展示会Nano Taiwanを開催している。

シンガポール

2020年12月、シンガポール首相府管轄下の国家研究基金（NRF）は、官民合同の研究・革新・企業評議会（RIEC）が策定した2021～2025年の5カ年「研究・イノベーション・エンタープライズ2025年計画（RIE2025）」を発表した。本計画の予算総額は250億SGD（約1兆9,500億円）で、前回の5カ年計画RIE2020を32%上回っている。RIE2025では、新しい優先研究分野として、「製造・貿易・コネクティビティ」「健康・人の潜在能力の向上」「都市ソリューション・環境変化に対応した持続可能な技術」「スマート国家・デジタルエコノミー」の4つを掲げ、総額約65億SGD（予算総額の26%に相当）を投資予定である。「製造・貿易・コネクティビティ」のなかに、MEMS、先端材料など、複数の産業分野の競争力強化に有用な技術開発の強化、および、製品製造時の有害物質発生を最小化する技術などの持続可能な製造技術に関するイニシアティブの立ち上げが含まれている。上記の優先研究分野以外では、大学や科学技術研究庁傘下の研究機関の強化（29%、73億SGD）、企業のイノベーション活動および起業家育成（21%、52億SGD）、分野非限定の新規研究分野（15%、37.5億SGD）、人材育成（9%、22億SGD）となっている。

このような科学技術産業化政策への積極投資のもと、A*STARが運営するナノインプリントファウンドリ（NIF、2013年～）や、大学を中心として英語環境の下で国際的なナノ研究開発拠点が築かれている。シンガポール国立大学に設置されている主なセンターを以下にあげる。

・NUS Nanoscience and Nanotechnology Initiative（NUSNNI）
・Centre for Advanced 2D Materials（CA2DM）
・Centre for Quantum Technologies
・Singapore Synchrotron Light Source（SSLS）
・Centre for Ion Beam Applications（CIBA）
・Solar Energy Research Institute of Singapore

タイ

タイは、サイエンスパーク（TSP）内に各科学技術分野のセンターを集積した国家科学技術開発庁（NSTDA）を持つ。そのなかに国立ナノテクノロジー・センター（NANOTEC/研究者100余名）があり、政府のナノテクノロジー施策の責任を負う。国家科学技術イノベーション計画（2012～2021年）において、国家ナノテクノロジー政策フレームワーク（2012～2021年）が策定され、NANOTECマスター計画が2012～2016年、2017～2021年にわたって継続されている。産業政策は、農業重視から先端技術によるイノベーションをめざす政府方針に切り替わり、10年で科学技術投資をGDP比0.2%から2%にまで増やすとしている。また、ナノテク研究のターゲット分野を「医療と公衆衛生」「環境」「食糧と農業」「解析・測定」「エネルギー」の5つに指定し、2018年10月、ナノテクの研究ネットワークを構築することに加え、研究開発により生み出された技術の実用化を推進するために、7つの大学とMOUを締結した。ナノ安全に関しては積極的に取り組んでおり、2016年にはナノ製品ガイドラインを公表している。台湾と連携し、Nano Qというナノ製品認証制度を開始している。

中東

中東では、UAEとイランがナノテクノロジーの政府計画を持つ。特に、イランは量・質ともに充実したナノ

テクノロジー国家計画と組織（Iran Nanotechnology Initiative Council：INIC）を有し、多様な研究開発プロジェクトだけでなく、共用研究開発インフラネットワークの運営、国際標準化の推進、ナノテク教育・人材育成政策など、ソフト面が非常に充実している。2017年以降、毎年「ナノ安全に関する欧州アジア対話（EU-Asia Dialogue on Nanosafety）」を開催、また2018年には「国際ナノテクノロジーオリンピック（International Nanotechnology Olympiad：INO）」のイベントをイラン国内で相次いで開催（2021年1月にオマーンで開催予定だった第2回INOは新型コロナウイルス感染拡大の影響で2022年に延期）するなど諸外国を巻き込んだ活動が活発化してきている。また、過去数年で、ナノテク分野の論文数・増加率とも世界のトップクラスに仲間入りするまで躍進している。

コラム

アジア・ナノ・フォーラム

2004年に産業技術総合研究所（AIST）／経済産業省／新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）／物質・材料研究機構（NIMS）が起案して創立されたアジア・ナノ・フォーラムANF（Asia Nano Forum／asia-anf.org）では、アジア圏のナノテクノロジー推進に関するネットワーク・コミュニティ形成、情報交換、人材育成等を目的とした活動が行われている。 ANFは2007年にNPOとして独立している。

2020年末時点でのANFのメンバーは、アジア・太平洋地域の9経済圏の各主要研究機関から構成され、日本、韓国、台湾、タイ、マレーシア、ベトナム、オーストラリア、イランを含む（※アジア地域ではないが欧州からオーストリア政府機関が参画している）。日本からは産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、科学技術振興機構がメンバーとなっている。

ANFの主な活動内容は、毎年のサミット会議（ANFoS）および実行委員会（ExCo）開催による各国の情報交換、テーマ別の4つのワーキンググループ活動（ナノテクノロジー標準化、施設利用ネットワーク、ナノ安全・リスクマネジメント、ナノ商業化）である。

1.2.5 研究開発投資や論文、コミュニティー等の動向

■研究開発投資

2000年以降、世界の主要国でナノテクへの大規模な国家投資戦略がスタートした。わが国では科学技術基本計画の第2期（2001～2005年度）および第3期（2006～2010年度）において、重点推進4分野の1つに「ナノテクノロジー・材料」分野が選定され、「ライフサイエンス」「情報通信」「環境」の3分野とともに10年間にわたって重点的な資源配分が行われた。その後、科学技術基本計画は重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）へと舵が切られたが、「ナノテクノロジー・材料」に関しては、第4期（2011～2015年度）では政策課題を解決するうえでの共通基盤的な技術として、第5期（2016～2020年度）では新たな価値創出のコアとなる基盤技術として位置づけられ、戦略的投資が続いている。

総務省統計局「2019年（令和元年） 科学技術研究調査結果の概要」によると[10]、2018年度のわが国の科学技術研究費（以下、研究費という）は19兆5,260億円（前年度比2.5%増）である。その内訳としては、

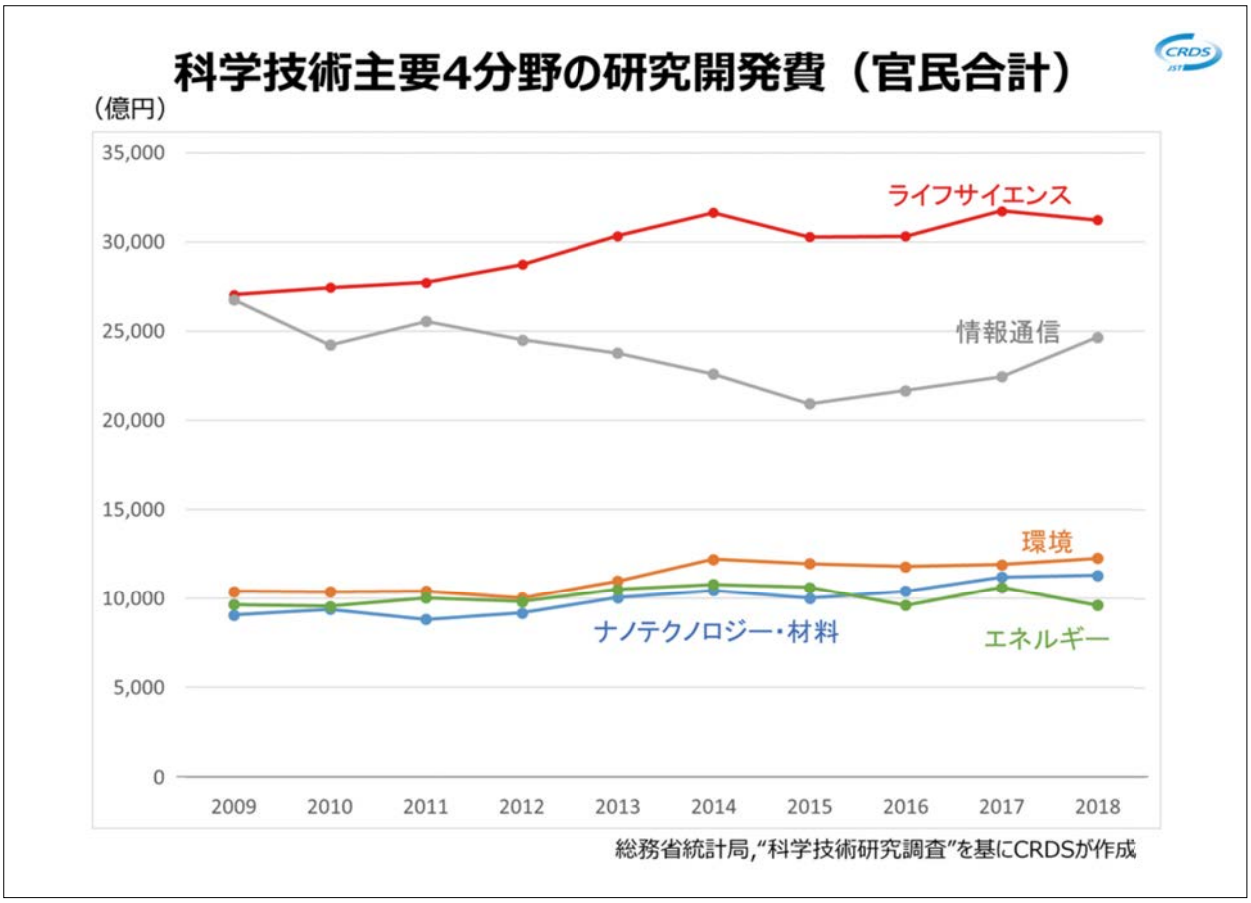


図1.2.5-1　科学技術主要4分野の研究開発費（官民合計）（縦軸／億円、横軸／年）

10 総務省統計局「2019年（令和元年） 科学技術研究調査結果の概要」, https://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/kekkagai/pdf/2019ke_gai.pdf（2021年2月17日アクセス）

企業が14兆2,316億円（同3.1%増）、大学等が3兆6,784億円（同1.0%増）、非営利団体・公的機関が1兆6,160億円（同0.4%増）となっている。また、特定の目的のために使用した研究費のうち、「ナノテクノロジー・材料」は1兆1,310億円で前年度比0.9%増となっている。「ライフサイエンス」は3兆1,226億円（同1.6%減）、「情報通信」は2兆4,670億円（同9.9%増）、「環境」が1兆2,264億円（同3.0%増）、「エネルギー」が1兆580億円（同2.4%増）となっている。図1.2.5-1に、2009～2018年度の「ライフサイエンス」「情報通信」「ナノテクノロジー・材料」「環境」「エネルギー」の研究費の推移を示す。「ナノテクノロジー・材料」の研究費は微増傾向にあるものの、この10年間「環境」「エネルギー」とともに1兆円前後で推移している。

各国における国家投資の規模を「ナノテクノロジー・材料」分野だけ切り出して比較することは、各国における科学技術政策あるいは産業政策の基本構造やデータ集計方法が異なることから困難である。LuxReserch社の報告（2014年データ）によると、世界のナノテクノロジーへの官民R&D投資は米国が最大であり、米国では企業による投資が増加しているが、その一方で民間の投資家による投資は減少傾向にあるという。なお、世界最大のナノテク政策である米国NNI（National Nanotechnology Initiative）における2021年度予算は17億ドル超（要求額）である。米国や日本を含む主要国の科学技術・研究開発政策に関する詳細は前項「1.2.4主要国の科学技術・研究開発政策の動向」を参照されたい。

■学会の動向

図1.2.5-2は、日本と米国のナノテク・材料に関連する主要学会について、近年の会員数の増減を示したものである。日本では会員数はおおむね減少傾向にあり、産業界からの会員数が減っていることが主要因と認識されている。日本では日本化学会の会員数が15年間で約9,000人減、その他の学会も15～20年の間に2,500人～4,000人程度減っている。米国ではここ10年でAmerican Physical Society（APS）、American Chemical Society（ACS）は会員数を増やしているが、Materials Research Society（MRS）では約2,000人減少している。

■論文からみる研究コミュニティの動向

主要国のナノテク・材料分野における論文執筆研究者数の推移を図1.2.5-3に示す。2019年に日本は約3万人で第4位に位置しているが、米国・中国と、日本を含む他の主要国とでは開きが大きい。2009年からの変化をみると、ナノテク・材料分野で論文を執筆している研究者数は欧米諸国が1.6～2.2倍、韓国は2.1倍、中国は4倍以上に伸びているが、日本は1.3倍の伸びに留まっている。なお、データベースへの収録誌数自体が増加しているため、これらの増加率がそのまま研究者人口の増加率に比例するわけではないことに留意が必要である。

研究者コミュニティ（主な学会動向）

【日本】

学会名	会員数（最新）	会員数（過去）	年会参加者（2019年度）
応用物理学会	20,106名 (2020年12月10日現在)	23,109名 (2002年12月末)	中止 (春)/6,166名 (秋)
日本物理学会	15,328名 (2019年12月末)	19,396名 (2002年12月末)	3,284名 (秋・物性関係)
日本化学会	25,487名 (2020年2月末)	34,514名 (2005年2月末)	中止
高分子学会	9,152名 (2020年3月末)	12,148名 (2004年3月末)	2,840名
日本金属学会	4,885名 (2020年2月末)	7,421名 (2006年2月末)	1,237名(春)/1,580名(秋)

【米国】

学会名	会員数（最新）	会員数（過去）
American Physical Society（APS）	54,069名（2019）	46,269名（2008）
Materials Research Society（MRS）	14,092名（2019）	約16,000名（2008）
American Chemical Society（ACS）	約163,000名（2019）	158,422名（2005）

➢ 日本では会員数は減少傾向にある

図1.2.5-2　研究者コミュニティ（主な学会動向）

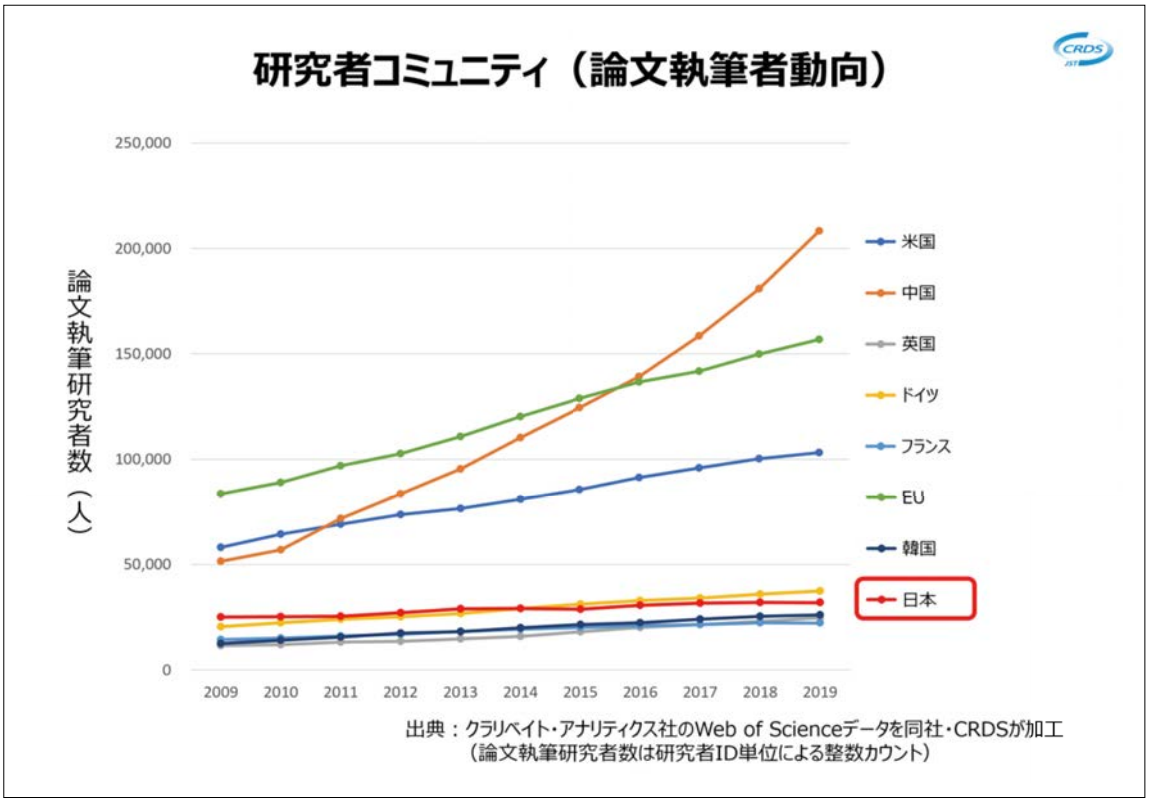


図1.2.5-3　ナノテク・材料分野の論文執筆研究者数の国別推移

各国の統計によると、主要国の研究者数は過去25年以上にわたって増加傾向にあり、21世紀に入ってからは中国と韓国の伸びが目立つ。一方で、近年の日本は、やや頭打ちとなっている。文部科学省が毎年発行している科学技術要覧の令和元年度版によると、各国の研究者数は、中国（174.0万人/2017年）、米国（137.1万人/2016年）、日本（67.6万人/2018年、専従換算）、ドイツ（42.0万人/2017年）、ロシア（41.1万人/2017年）、韓国（38.3万人/2017年）、英国（28.9万人/2017年）の順となっている。また、研究者のうち企業研究者の割合は、韓国（81.3%/2017年）、米国（75.8%/1999年）、日本（73.7%/2018年、専従換算）、中国（60.7%/2017年）、フランス（60.3%/2017年）、ドイツ（60.2%/2017年）の順となっており、欧州の主要国である英国（37.9%/2017年）では低めになっている。

■科学技術（研究開発）アウトプット（論文）の国際比較

主要国のナノテク・材料分野における論文数を比較したものを以下①～③に示す。論文数はいずれも分数カウント（共著者数で除して計算する方法）で表している。本分野の論文動向の総論としては、ここ10年ほどで中国が大きく伸び、長らく世界のトップにあった米国を抜いて量的（論文数）にも質的にも（ここでは被引用トップ10%論文のことを指して「質」と表現する）トップになっている。日本は論文の質・量ともに頭打ちの傾向が続く。

①ナノテク・材料分野の論文数の推移を図 1.2.5-4に示す。2019年の論文数は中国、EU、米国の順で、他の主要国は米国の1/3程度以下である。中国の伸びが群を抜いている。日本は横ばいが続く。

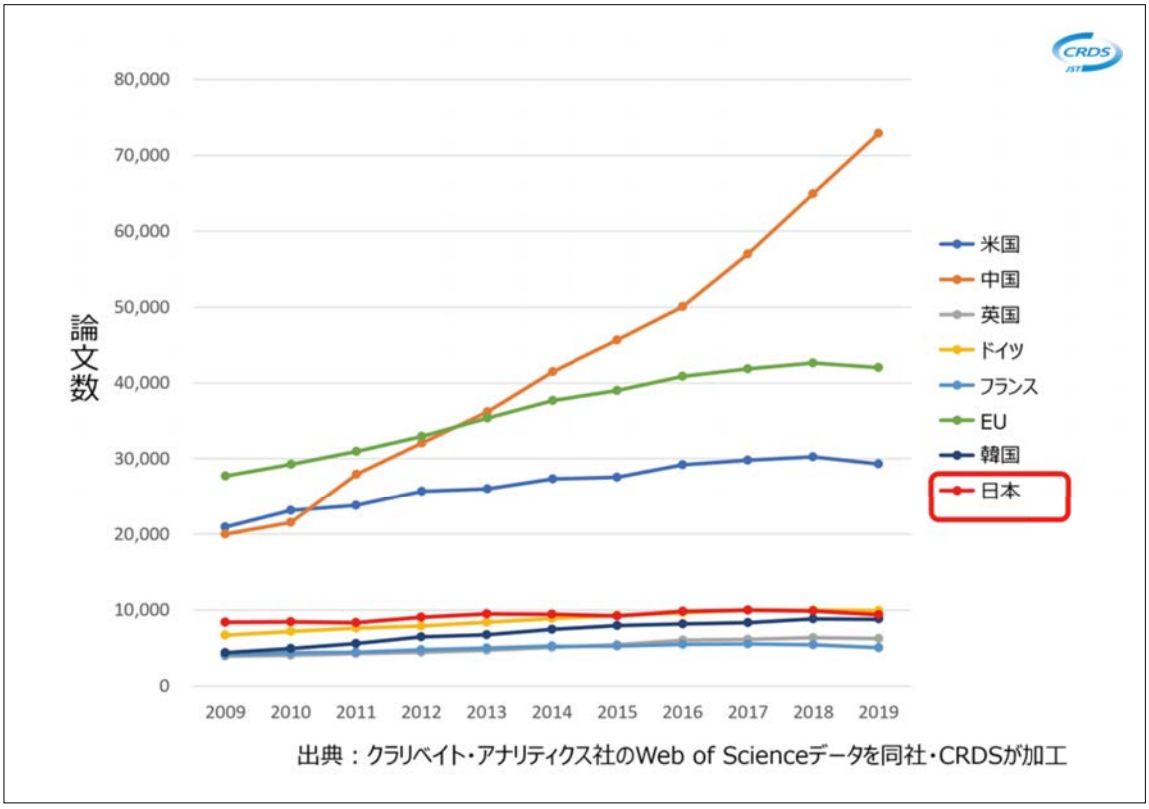


図1.2.5-4　　ナノテク・材料分野（全体）の論文数推移

②ナノテク・材料分野の被引用トップ10%論文数を図 1.2.5-5に示す。中国の勢いが特徴的であり、上述の論文数と同様に、中国、EU、米国の順になっており、EU、米国は減少傾向にある。日本は横ばいが続き、徐々に順位を下げている。

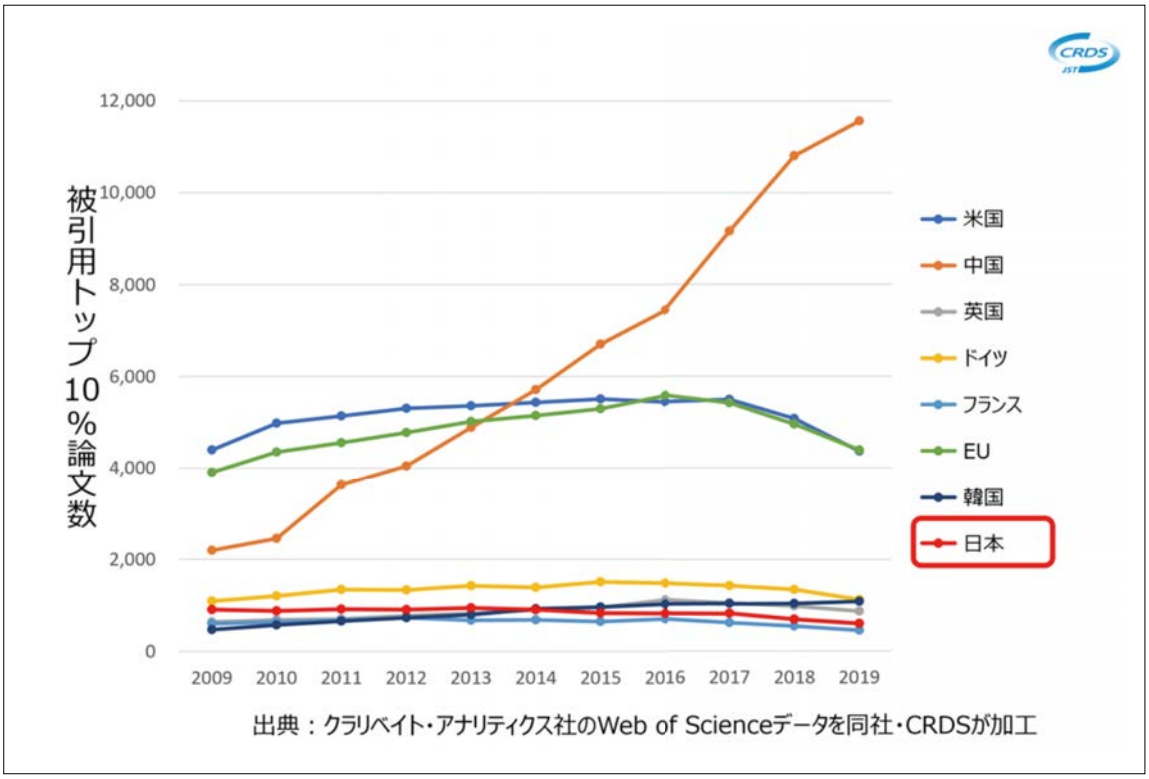


図1.2.5-5　　ナノテク・材料分野（全体）の被引用トップ10%論文数の推移

③ナノテク・材料分野の論文動向について、「環境・エネルギー」「ライフ・ヘルスケア」「ICT・エレクトロニクス」「社会インフラ」の4つの区分別にしたものを図 1.2.5-6～図1.2.5-9に示す。いずれの分野も中国の論文数および被引用トップ10%論文数の伸びが顕著である。この10年の論文数の世界的な増加傾向から判断すると、もっとも勢いがあるのは環境・エネルギー区分であり、特に中国の相当な注力がうかがえる。2019年のデータをみると、日本は論文数において、いずれの分野でも米・中に次ぐ3位～5位辺り（EU除く）に位置するが、被引用トップ10%論文数は6位もしくは7位であり、全体的に停滞気味であることがわかる。

• 環境・エネルギーに関するナノテクノロジー・材料

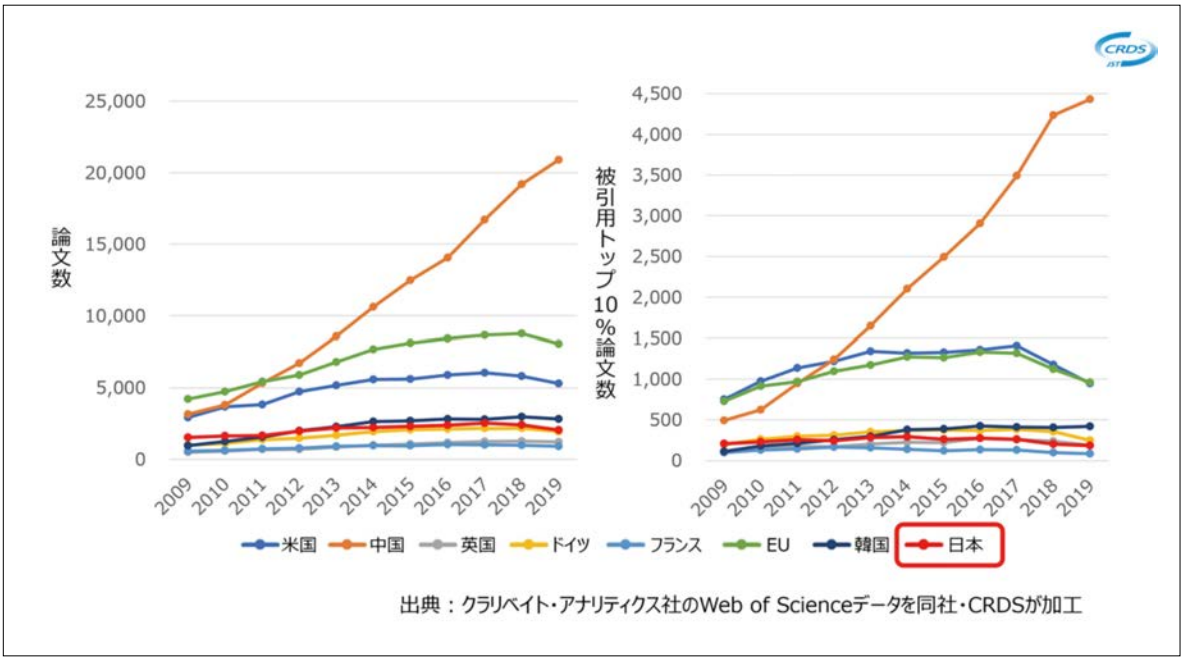


図1.2.5-6　　環境・エネルギーに関するナノテク・材料分野の論文動向

• ライフ・ヘルスケアに関するナノテクノロジー・材料

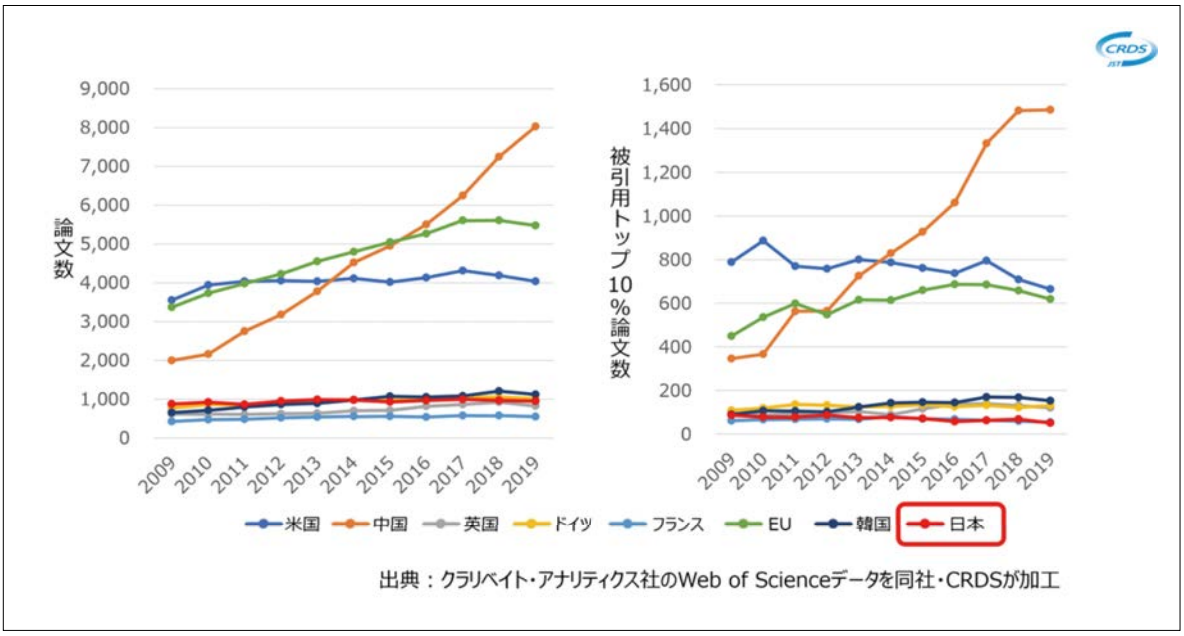


図1.2.5-7　　ライフ・ヘルスケアに関するナノテク・材料分野の論文動向

• ICT・エレクトロニクスに関するナノテクノロジー・材料

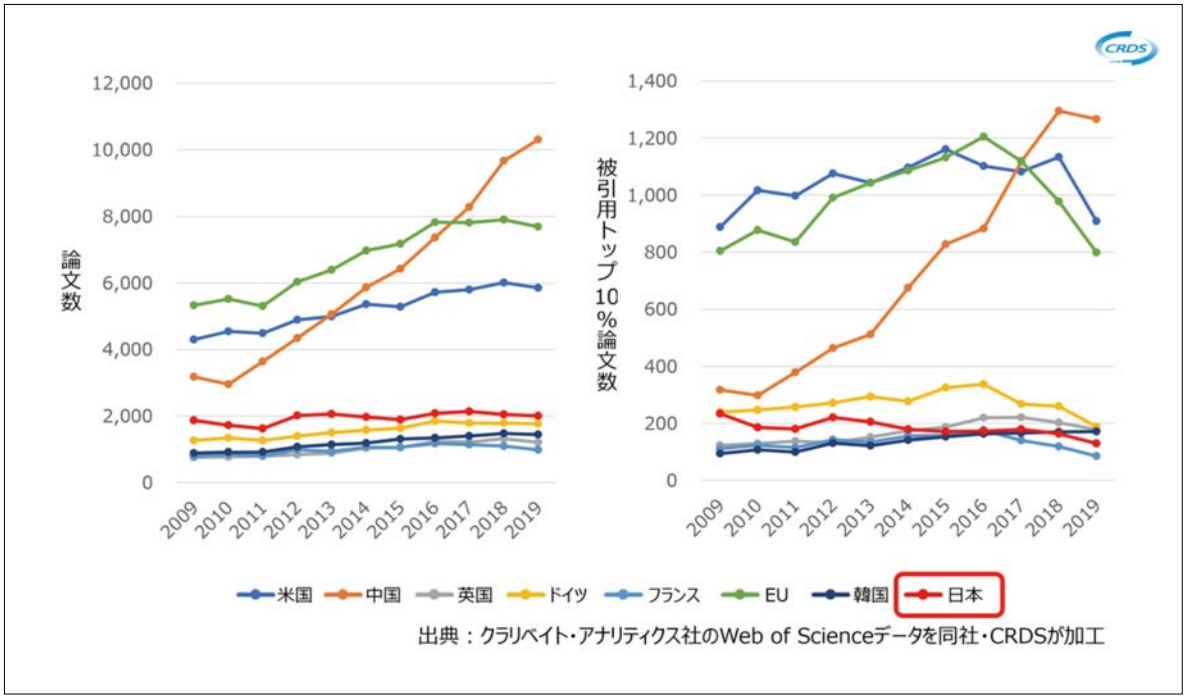


図1.2.5-8　　ICT・エレクトロニクスに関するナノテク・材料分野の論文数

• 社会インフラに関するナノテクノロジー・材料

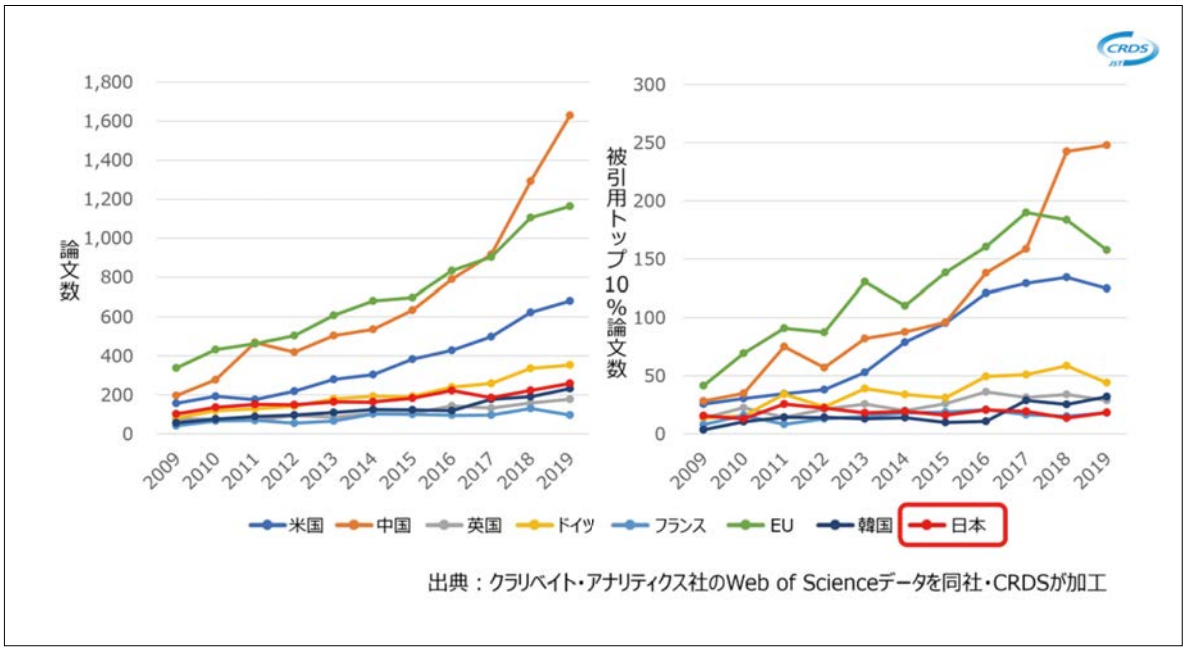


図1.2.5-9　　社会インフラに関するナノテク・材料分野の論文数

※図1.2.5-3～1.2.5-9は、クラリベイト・アナリティクス社のWeb of Scienceデータをもとに同社とCRDSが共同で加工したものである。

■特許動向の国際比較

1.2.1項で紹介したように、日本は特許について、ナノテク・材料関連分野である程度の国際競争力を有している一方で、特許1件あたりの価値が低下している傾向もみてとれる。ここでは、日本の特許国際競争力の動向や推移を、世界の主要国の動きとあわせて紹介する。

調査にあたっては、Ernstらの手法を利用した[11]。主に分析対象（分野）ごとの特許ファミリー数、個々の特許の価値（技術的影響力×市場的価値）、分析対象全体での特許の総資産価値（個々の特許の競争力の総計）に注目した。

• WIPO技術分類にみる特許総資産価値の推移

図1.2.5-10は世界知的所有権機関（WIPO）が設定する35の技術分野における主要国の特許総資産価値を表している（2020年11月時点）。円が大きいほど当該分野での特許総資産価値が高くなっており、円の色は2020年と2011年の資産価値を比較した際の増減率を表す。赤系色は増加、青系色は減少を示している。

日本は2020年時点で「電気機械器具、エネルギー」「AV機器」「半導体」「光学」「高分子化学、ポリマー」「表面技術、コーティング」「織物および抄紙機」「輸送」の7分野で世界1位の特許総資産価値を有しているが、35分野中23分野で2011年と比較して資産価値が減少していることは危惧すべき状況である（表1.2.5-1）。また、主要国の動向としては、中国があらゆる分野で急速に競争力を増していることがみてとれる。

表1.2.5-1　WIPO35分野での日本の特許総価値の変化（2020年と2011年の変化率）

80%以下	80～90%	90～100%	100～110%	110%超
コンピュータ技術	エンジン、ポンプ、タービン	材料、冶金	電気機械・エネルギー	輸送
環境技術		他の特殊機械	工作機械	医療技術
織物および抄紙機	消費財	家具、ゲーム	制御技術	マネジメントのためのIT手法
AV機器	化学工学	計測技術	機械構成部品	
デジタル通信	半導体	生体情報・計測	基本的な材料化学	
電気通信	食品化学	マイクロ構造・ナノテクノロジー	機械操作	
基本的な通信処理	光学		熱プロセス・器具	
		有機ファイン・ケミストリー	高分子化学、ポリマー	
			表面技術、コーティング	
		バイオテクノロジー		
		土木建築		
		医薬品		

11　H.Ernst, N. Omland, World Patent Information 33（2011）34–41（分析委託先Lexis Nexis Japan / Patent Sight Japan）。

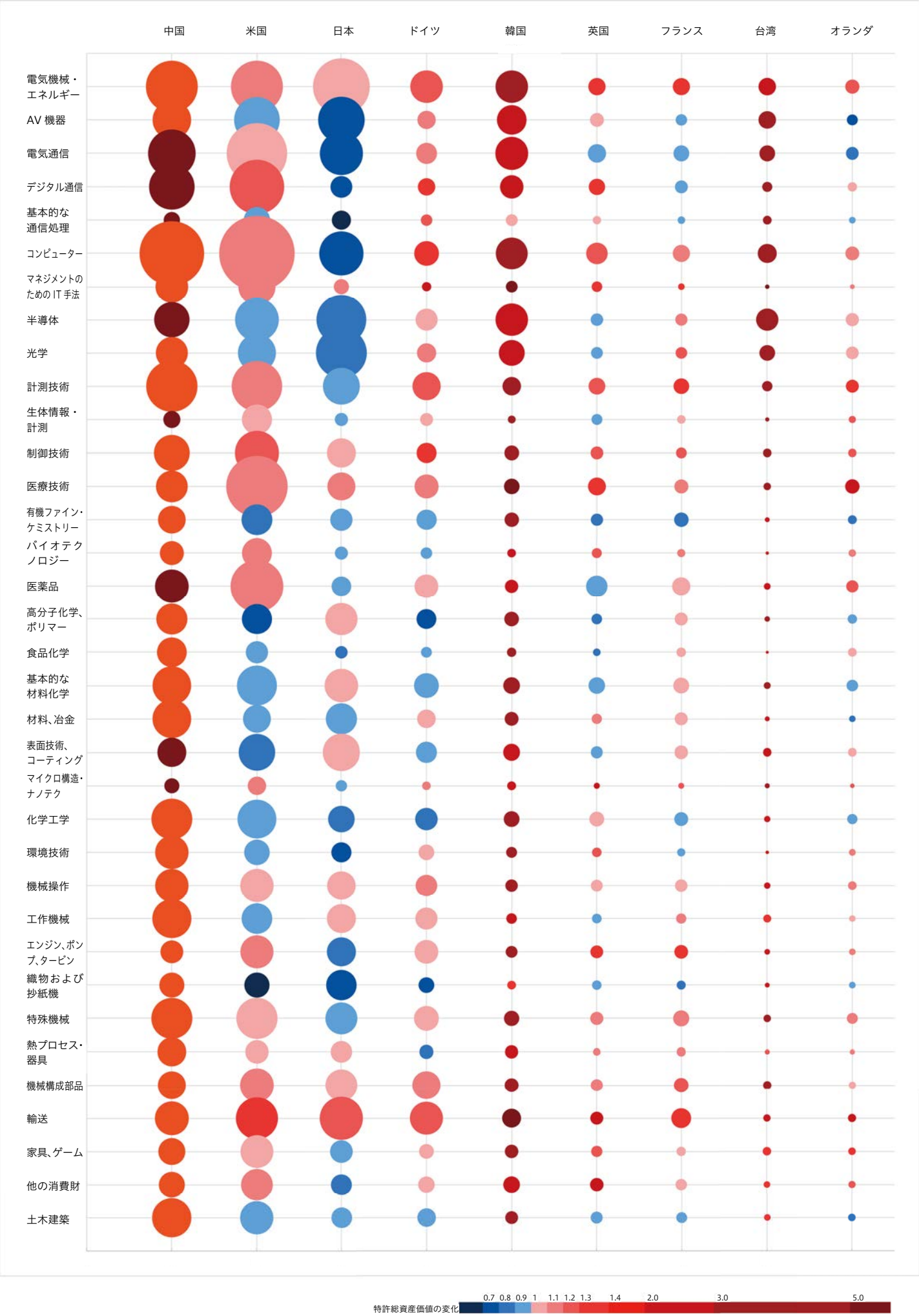


図1.2.5-10　WIPO35分類における主要国の特許総資産価値（バブルサイズ）と総資産価値の経時変化（2020年と2011年の変化をバブル色で視覚化）

• WIPO技術分野別の特許動向

以下では、WIPOが提供する35の技術分類にもとづいて、ナノテク・材料分野に関係深い技術分野、日本の特許総資産価値が高い技術分野について世界の主要国の特許動向を紹介する。図1.2.5-11は「半導体」、「基本的な材料化学」、「輸送」の技術分野における各国の特許動向の2011年から2020年までの推移を表している。縦軸が相対的な特許の強さ、横軸が特許ファミリー数、円の大きさが特許総資産価値を表している。また、色の濃淡で年次推移を表している。

例示した3分野はそれぞれ、次のような製品・技術群に相当する。

半導体：半導体集積回路、トランジスタ、ダイオード、太陽電池、LED、固体撮像素子（CCD、CMOS等）、熱電素子、圧電素子、半導体製造装置など

基本的な材料化学：染料・顔料・香料、油脂・インク、潤滑剤、液晶物質、農薬・肥料、ガス・ガソリン等炭素質燃料など

輸送：自動車の各部、ハイブリッド・電気自動車、自転車・自動二輪車、タイヤ、鉄道、航空機、ロケット、人工衛星、船舶など

日本や欧米諸国の多くの特許平均価値が減少もしくは停滞しているのに対し、中国は平均価値こそ1.0近くとあまり高くないものの特許ファミリー数の増大に伴い総資産価値が高まっている。また、韓国、台湾は平均

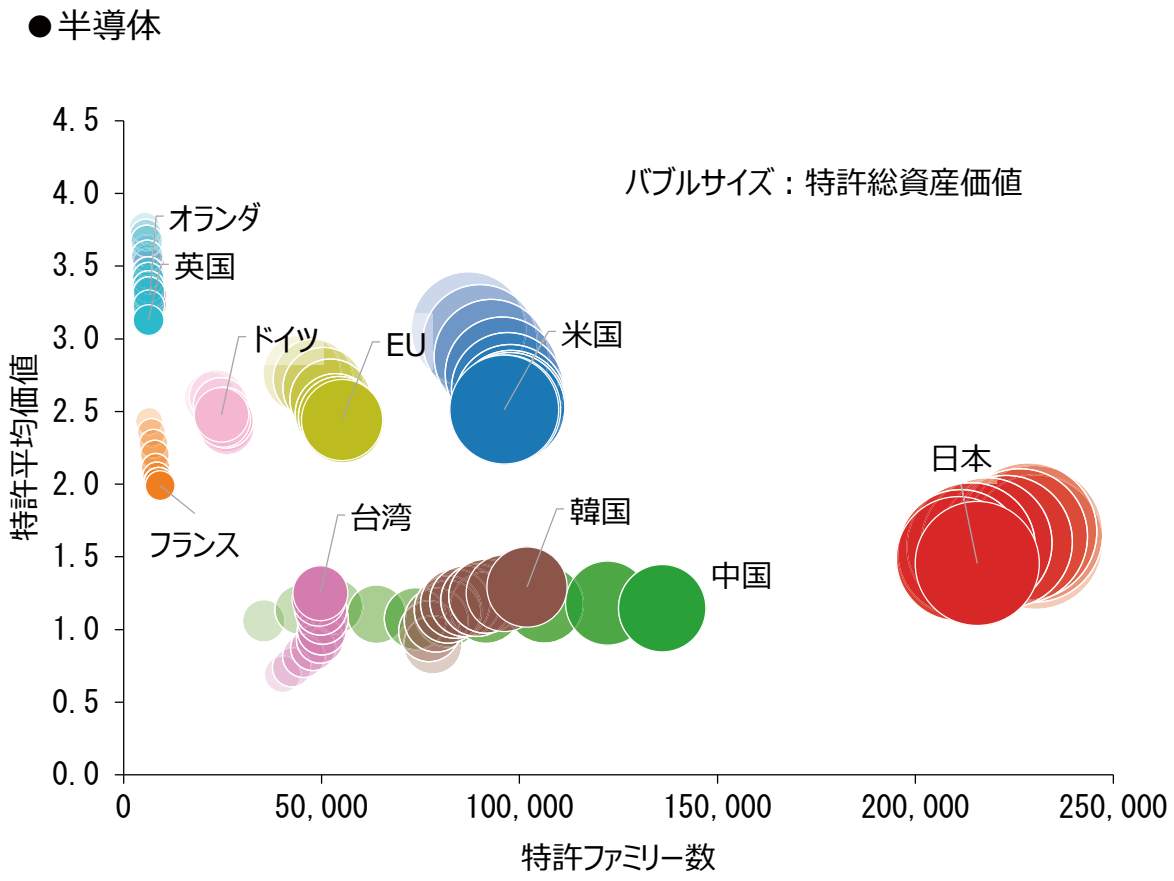
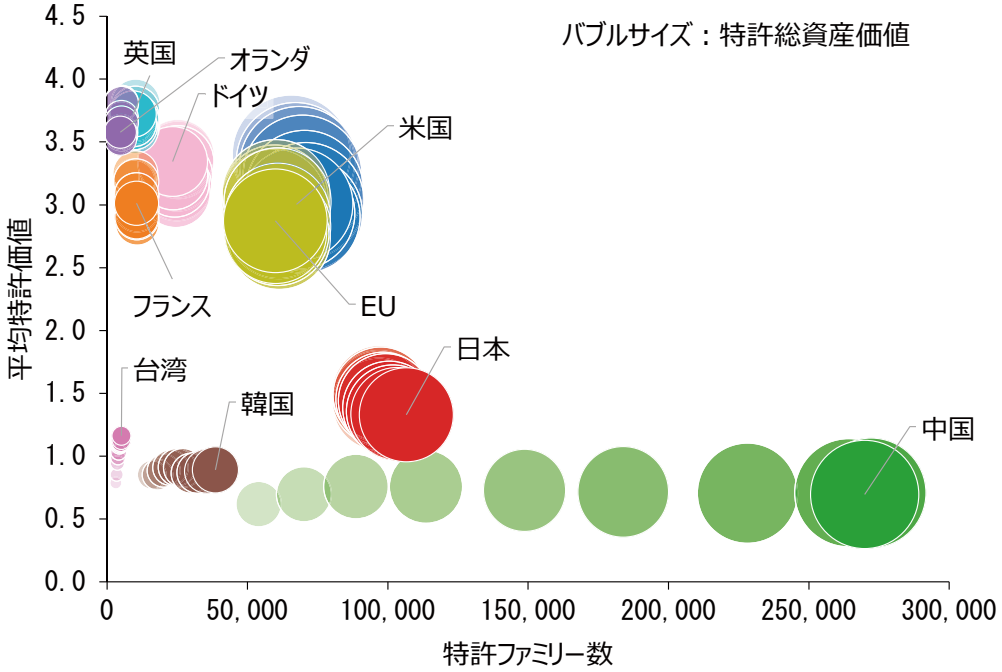


図1.2.5-11　半導体、基本的な材料化学、輸送分野における世界の特許動向

●基本的な材料化学



●輸送

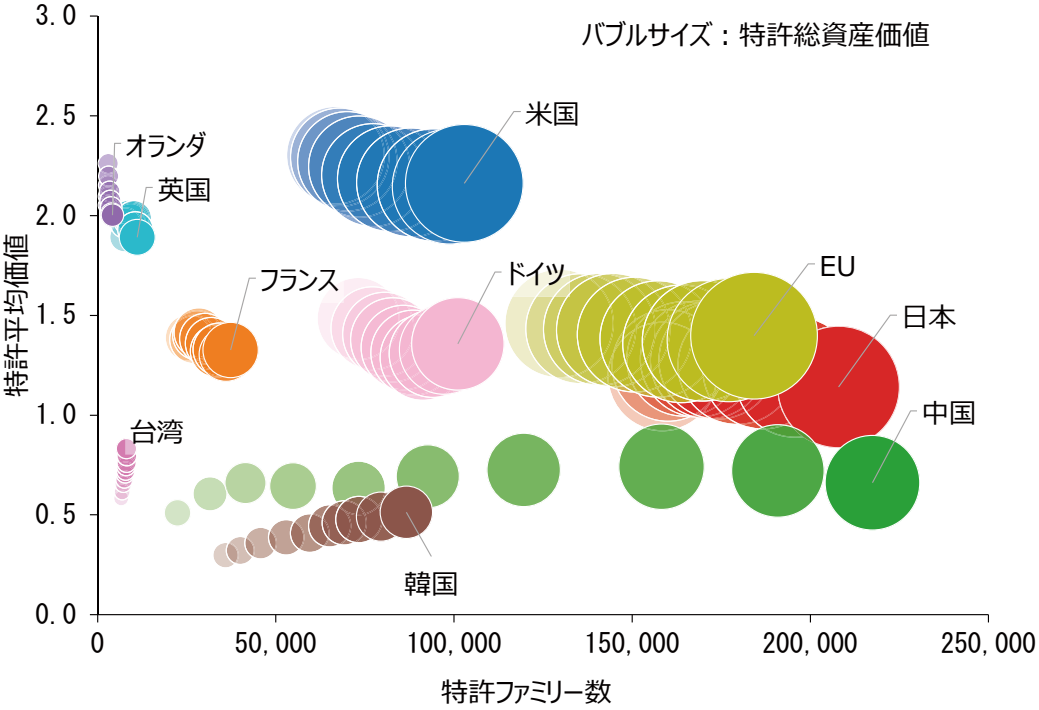


図1.2.5-11　半導体、基本的な材料化学、輸送分野における世界の特許動向（続き）

価値が上昇しているのが特徴的である。つまり、特許平均価値という観点では世界的に差が縮まっている傾向がみてとれる。その原因についてはさらなる分析が必要となるが、世界的な特許ファミリー数の増大、過去の強い特許の消滅に伴う特許価値の平坦化が一因と考えられる。

• 俯瞰研究領域の関連技術別の特許動向

本報告書で取りあげる俯瞰研究領域に関係深いトピックに関して、世界の主要国の特許動向を紹介する。具体的には、2.1.2「蓄電デバイス」に関連する二次電池、2.5.7「複雑系材料の設計・プロセス」に関連する材料プロセス技術、2.6.3「ナノ・オペランド計測技術」に関連する電子顕微鏡を代表例として、特許動向を図1.2.5-12に示す。いずれのテーマについても日本は、特許ファミリー数は増えてはいるものの、特許ファミリーあたりの特許平均価値は停滞ぎみ、もしくは減少傾向にある。これらの特許指標は技術力の1つの指標であるのは間違いなく、今後はビジネスモデル・価値創出プロセスまでも考慮した知財戦略の強化が求められる。

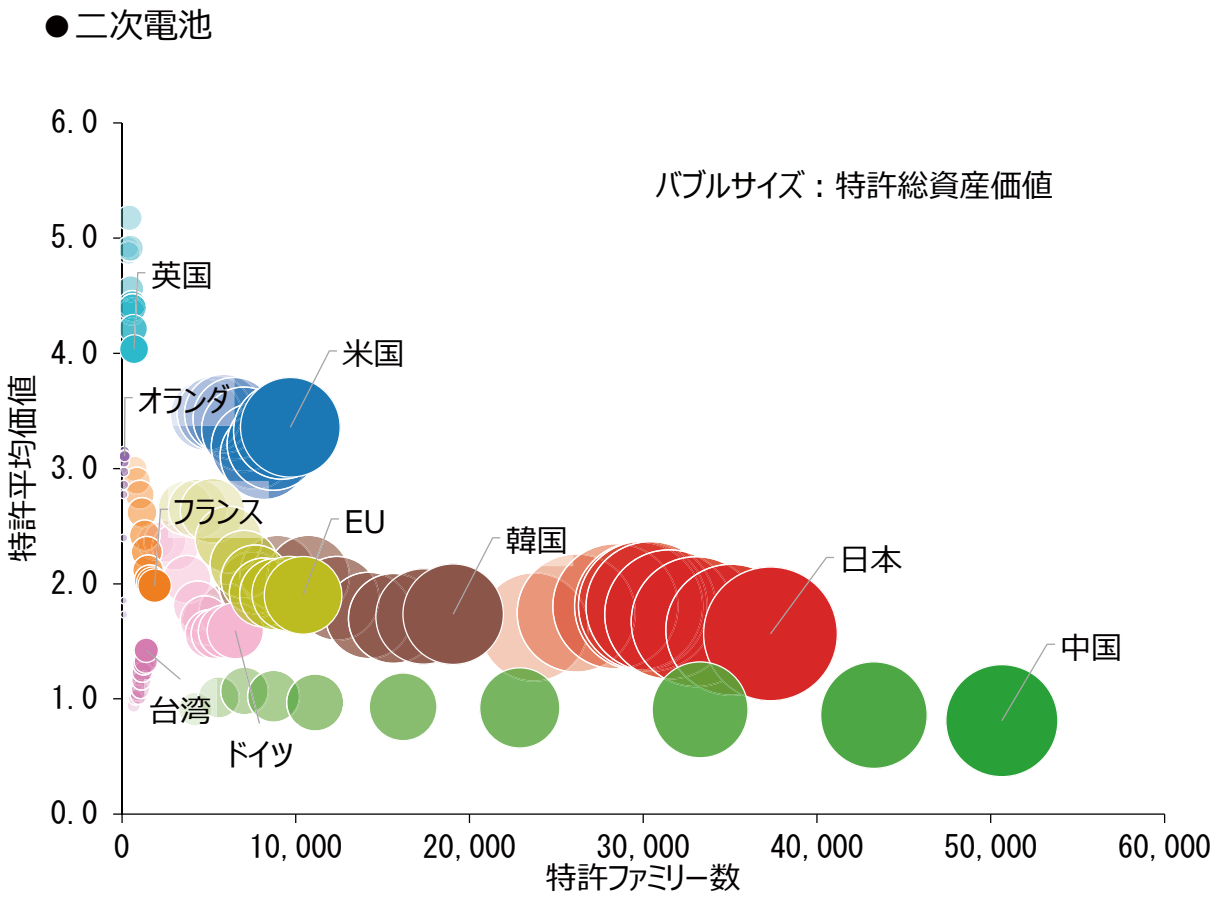
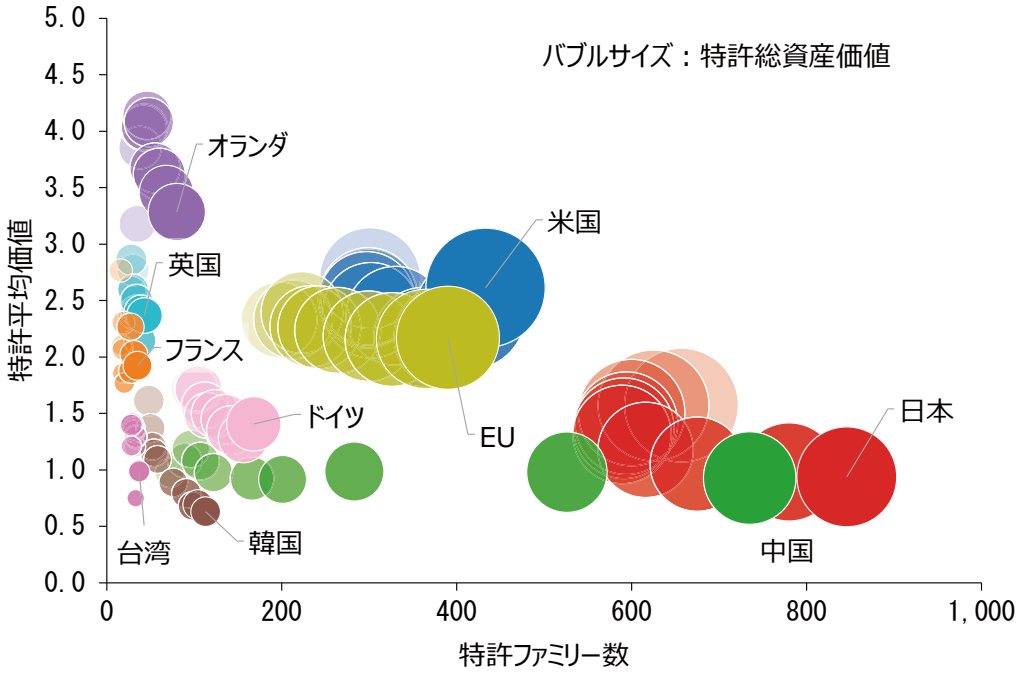


図1.2.5-12　二次電池、電子顕微鏡、材料プロセスに関する世界の特許動向

●電子顕微鏡



●材料プロセス（真空蒸着、スパッタリング、CVD等）

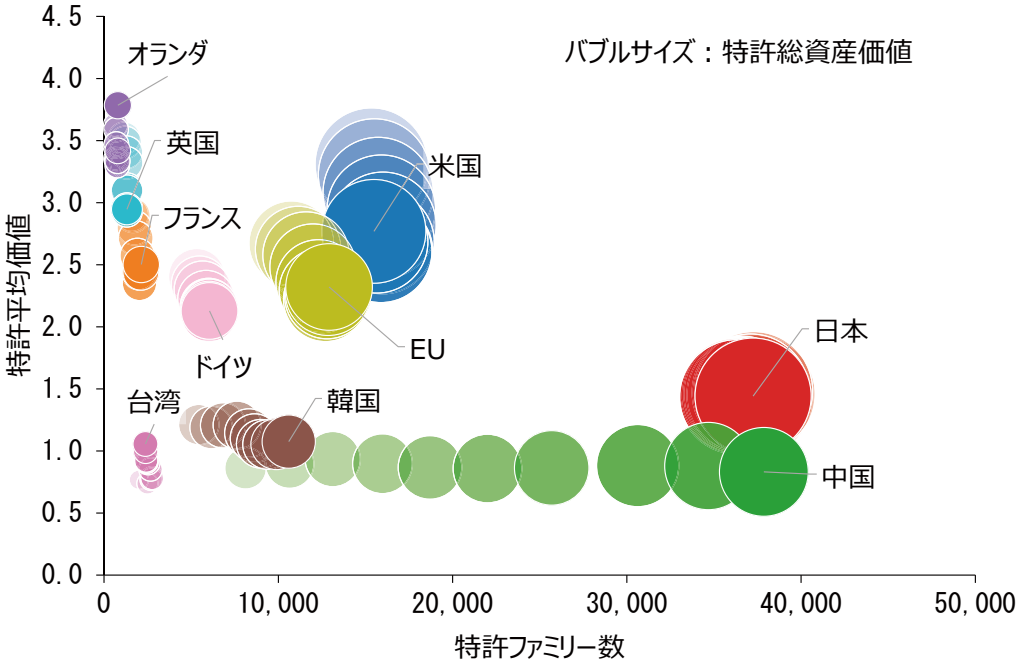


図1.2.5-12　二次電池、電子顕微鏡、材料プロセスに関する世界の特許動向（続き）

1.3 今後の展望・挑戦課題

1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

多くの分野・用途において、装置・システムの機能を根幹で支えているナノテク・材料分野に対しては多くの社会的期待が集まっている。以下では、現状の日本が抱える社会的課題の解決に向けて、ナノテク・材料技術がどのような役割を果たしていくのかについて、区分ごとにまとめて記述する。

■環境・エネルギー分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

日本は2020年の菅首相就任演説で2050年までに温室効果ガスの実質排出量ゼロをめざすことを明言し、脱炭素社会構築へ本気で取り組むことを世界に向けて表明した。また、サーキュラーエコノミーに代表される低環境負荷の資源循環型社会への移行も求められるなかで、環境・エネルギー分野のイノベーションを支えるナノテク・材料技術の研究開発の重要性はより高まっていくのは必至である。一方で、これらの環境対策はもはや待ったなしの状態であり、基礎研究、応用研究、社会実装までをいかにスピーディーに進めるか、世界と協調した戦略的な研究開発が求められる。

太陽光や風力などの再生可能エネルギーの大量導入は上述の目標を達成するうえで不可欠であり、世界的にも研究開発が活発になっている。太陽光発電に対しては、実用化されているシリコンや化合物半導体のさらなる高効率化と低価格化とともに、中長期的には有機薄膜太陽電池やペロブスカイト太陽電池などの革新的太陽電池の実用化が期待される。また、時間変動の大きな太陽光や風力の利用においては、電力を一時的に蓄えて平準化する大型の蓄電池・蓄電システム（グリッド電力貯蔵用途）の開発が重要になり、主流になっているリチウムイオン電池だけでなく、大型のシステムに最適な電池の開発も必要であろう。さらに、急速に拡大する電気自動車用途に向けた高エネルギー密度かつ低コストな蓄電デバイスへの期待は大きい。

太陽光の利用としては直接的に電気に変換するだけでなく、特殊な触媒を用いて貯蔵しやすい水素や炭化水素などの化学エネルギーに変換する技術（エネルギーキャリア）の実現も期待される。ただし、社会実装シナリオを明確にしたうえでの製造技術、利活用技術、輸送技術等の要素技術の開発が重要となる。

エネルギーの利用側面では、省エネルギーの技術開発、具体的には固体照明、低消費電力のエレクトロニクスシステム、高効率パワーエレクトロニクス製品、断熱材料、低摩擦材料、軽量・高強度の複合材料、さらには廃熱を電気エネルギーに回生する熱電素子などの開発が必要となってくる。特に、世界のエネルギー消費に占める電気エネルギーの比率は現在 25% であり年々増加傾向にあることから、電力の変換・制御に必要なパワー半導体の高効率化に関する期待は大きく、高耐圧化、低オン抵抗特性を可能とするワイドギャップ半導体パワーデバイスの進展が重要になる。

環境を守るという視点では、物質の分離技術も非常に重要となる。広く世界をみると、飲料に用いることのできる水は限られており、海水や廃水からの淡水生成、またシェールガス産出の際に大量に発生する放射性物質や有害物質を含んだ随伴水の浄化といった分離に関する技術開発は喫緊の課題であり、低コストで量産可能な吸着剤や浄化膜の開発は急務となっている。また、鉱物資源の少ない日本においては、回収されたエレクトロニクス機器からレアメタルなどの希少元素を効率的に分離する技術の開発も重要になってくる。 以上、ここにあげた環境やエネルギーにかかわる社会的あるいは技術的な課題は、ナノテク・材料分野だけで解決することはできず、異なる学術分野や技術分野との連携や、制度的な改革も必要になってくる。一方で、日本

は環境・エネルギー分野にかかわる材料技術・プロセス技術で国際的な競争力を有しており、新たな材料やデバイスの開発により、優れた特性や性能を実際に示していくなかで、その他の学術分野や産業界、他国を巻き込んでいくことが可能と考えられるが、そのためには、よりスピード感のある研究開発、体制構築が求められる。その意味で、日本にとって環境・エネルギー分野で世界を先導するためにナノテク・材料技術による産業競争力強化が一層重要になっている。

■ライフ・ヘルスケア分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

ヒトゲノムの解読、iPS 細胞の創出、ゲノム編集技術の登場にみられるように、近年のライフサイエンスの進展は著しく、ナノテク・材料技術との融合によって生まれるイノベーションへの期待は大きい。特に、世界に先駆けて超高齢社会に突入したわが国においては健康寿命の延伸が喫緊の課題であり、新しい健康・医療技術への期待が高まっている。

健康寿命の延伸による個々人のQOL（Quality of Life）向上と、高齢者人口の増加に伴って急増が見込まれる医療費の適正化のため、本格的な医療が必要になる前に病気の兆候を検知し、早期に予防的な措置を施すことが重要である。日常的な健康モニタリングの観点から、IoT技術を活用したウェアラブルデバイスに期待が集まっているが、現状のデバイスで得られるのは物理センサによって計測される活動量、歩数、脈拍等の情報に限られており、健康・疾病の状態に直結するバイオ・化学情報を計測することが可能なデバイスの開発が望まれる。特に、採取が容易な呼気などの検体を用いて、生体由来物質（バイオマーカ）に関するデータを連続的に取得可能な技術が求められる。また、身体異常・疾病の早期発見・早期診断のためには、血液や尿などの検体中にごくわずかに含まれるバイオマーカを簡便、迅速、高感度に検出するデバイスが必要である。夾雑物の中からターゲットを特異的に認識するセンサ材料や、ターゲットを分離・濃縮する機構の開発が求められる。さらに、新型コロナウイルス感染症の流行によって顕在化した課題として、環境中に存在するウイルスなどの病原体検出がある。水中や空気中に存在する病原体を高感度かつ簡便に検出可能な技術を開発し、環境中の状況を常時監視するシステムを構築することにより、感染症の流行を防止することが期待される。

創薬や新しい医療技術の開発においては、動物モデルを用いた前臨床試験によって有効性・安全性が確認されなければならない。しかしながら、動物実験ではヒトでの応答を正しく予測できない場合が多いことや、動物実験廃止に向かう欧州を中心とした動きから、ヒト体内における動態をin vitro（生体外）で正確に再現可能なモデルが求められている。近年、ES細胞やiPS細胞などの幹細胞技術の進展によって、幹細胞からさまざまな組織・臓器を構築する研究が進み、創薬のためのin vitroモデルや再生医療への応用に期待が高まっている。また、生体外で実際の生体組織に近い3次元の組織体を構築するバイオファブリケーションの技術と、マイクロ・ナノ加工やマイクロ・ナノ流体デバイスなどの技術の融合により、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現するOrgan-on-a-Chipの研究がさかんになっている。これらの技術を組み合わせることによって、複数の組織・臓器間における相互作用や、各組織・臓器の機能をより正確に再現することが可能になり、将来的には動物実験に替わるin vitro評価系を確立し、新しい健康・医療技術の実現に大きく貢献すると期待される。

精密に設計されたナノ粒子やナノ構造体をキャリアに用いて、薬物や診断用プローブを患部等へ選択的に送達するナノ薬物送達システム（ナノDDS）の研究も重要性を増している。近年、遺伝子編集を実現するCRISPR-Casをはじめ、医療に革新をもたらす可能性を秘めた多様な分子・材料が登場しているが、これらの医療応用には、ナノDDSの開発が欠かせない。また、新型コロナウイルス感染症に対するRNAワクチン

開発においても、抗原タンパク質を体内で発現させるためにRNAを送達する技術として、ナノDDSが重要な役割を担っている。さらに、イメージングプローブと治療薬をナノ粒子に同時に搭載したナノDDSは、診断と治療を一体化・複合化したナノセラノスティクスとして研究開発が進んでいる。量子ビーム、超音波、熱、磁場などの外部刺激に応答して病理組織そのものを改変する次世代型ナノDDSの研究開発も進み、革新的な医療技術の実現が期待される。

上述した新しい健康・医療技術の実現には、生体組織や生体を構成する成分と、それらに接して用いられる材料の間で生じる多様かつ複雑な現象を高度に制御する必要がある。材料側、生体側それぞれの因子による複雑な相互作用を体系的・統合的に理解し、材料に対する生体側の応答を精緻に予測・制御するための技術的・知的基盤の構築が求められる。

■ICT・エレクトロニクス分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

Society 5.0の実現に向けて第5世代通信（5G）通信、ポスト5Gインフラの導入が進み、人間が感知できないわずかな通信遅延で大量の情報をやり取りできる環境が今後整備されていくことになる。膨大な数のセンサ端末やデバイスがインターネットにつながるIoT（Internet of Things）技術が情報社会の中核となり、分散基地局に組み込まれた人工知能（AI）や、生活空間を共にするロボットで高度な情報処理が行われる。こうした未来社会の基盤となるのがナノエレクトロニクス技術であり、電荷の操作だけでなく、スピン自由度を使ったスピントロニクス、光子（フォトン）を使ったフォトニクスによる超低消費電力の情報処理技術の進展が期待される。さらに、量子情報処理が実用化されれば、古典力学系では不可能な桁違いの高速計算や、秘匿性が極めて高い安全な情報通信も実現可能となる。

IoT 時代のスマート社会を実現するうえで、ナノエレクトロニクスの果たす役割は大きく、素子の微細化極限を追求する「ナノの先鋭化」から、新材料導入による電子素子と光・スピン・バイオ・MEMSとの結合で多機能化を図る「ナノの融合化」、さらにはIoT/AI応用に適した新しい計算アーキテクチャの実現を含めた「ナノのシステム化」へと進化していくと予想される。

ロジックデバイスでは今後、Siナノシートをチャネルに用いた構造が導入され、さらにはナノシートが縦積みされた3次元構造の時代に突入すると予測されている。不揮発性メモリの代表格であるNAND型フラッシュメモリでは、すでに主力製品が3次元積層型にほぼ移行している。今後もナノエレクトロニクス技術はデバイスの3次元化の方向で進化を続けていくと考えられる。また、スピンMRAMなど電荷保持型以外の不揮発性メモリ技術の実用化が本格化し、ロジック埋め込み不揮発性メモリやインメモリコンピューティングなど、メモリを中心とする新しいアーキテクチャのシステムが発展していくとみられる。

システムレベルでは、脳神経回路などの動作にヒントを得た新しいアーキテクチャで、ビッグデータ処理の超高速・低消費電力化をめざす研究がますます活発化していくと予想される。組み合わせ回路にもとづく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現するさまざまなデバイスとアーキテクチャが現在検討されており、なかでも量子コンピューティングには、古典力学系では実現できない情報処理能力を実現するものとして多額の研究開発資金が投じられている。今後、量子ビットの精度向上とシステムとしてのスケーラビリティを実現するブレークスルーが起これば、ICT・エレクトロニクス分野は、これまでとは一線を画す全く新しい進化軸が生まれてくると期待される。

■社会インフラ分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

社会インフラの老朽化は昨今の大きな社会的課題の1つである。日本においては、高度経済成長期を中心

に作られた橋梁、トンネル、道路等のインフラの多くが老朽化している。欧米諸国でも同様の問題を抱えており、大型橋梁の崩落事故が国際的に報道されている。これら老朽化したインフラの効率的な点検・検査、および計画的な補修や更新によるインフラの長寿命化が不可欠になっている。このような社会課題に対しても、ナノテク・材料技術の視点で研究開発を行うことが重要になっている。

ここ数年来の動向として、理論計算や数値計算モデルを活用し材料工学と情報工学を融合させたマテリアルズインテグレーション（Materials Integration：MI）と呼ばれる新しい特性予測・組織設計の技術開発が進められている。国際的にホットな技術としてはハイエントロピー合金（ハイエントロピーアロイ）や 積層造形（Additive Manufacturing）があげられる。ハイエントロピー合金は、複数の元素で構成される固溶体を基本とする多元系合金で、原子半径比や化学ポテンシャルの差を巧みに活用して組織制御を行うもので、強度−靱性・延性バランスの高い材料などが開発され、その機構解明もさかんに行われている。基礎的な機構である固溶体強化の研究に加え、疲労などのマクロ特性を対象とする研究に展開している。積層造形は、ボトムアップ型の組織制御プロセスで、これまで主に外形制御が目的であったが、その精度が向上するに伴い金属材料が得意とする組織制御にターゲットが移行しつつある。

複合材料については、近年輸送機器への適用により炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）が注目を集めている。代表例は航空機で、例えばボーイング787の機体構造重量の約半分がCFRPである。また、持続性という観点から再生可能かつ生物由来の有機性資源であるバイオマス素材が注目されている。その1つとしてセルロースナノファイバー（Cellulose Nano Fiber：CNF）を強化繊維として用いる複合材料開発に向けた動きも活発化している。 CNFは、木材などの植物中から得られるパルプをナノレベルまで解きほぐしたものであり、鉄の5倍の強度で1/5の軽さ、熱膨張率は石英ガラス並という特性を持っているため、樹脂などと複合化することで軽量高強度複合材料や軽量で熱寸法安定性の高いプリント基板への利用が期待されている。ただし、親水性が極めて高く、疎水性の石油由来の樹脂と複合化するためには表面を化学処理する必要があるため、製造コストが高いという課題が残っている。

■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術の今後の方向性

第5期科学技術基本計画において、ナノテク・材料技術は「新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術」と位置づけられている。そのなかでも「分子技術」「元素戦略」「マテリアルズ・インフォマティクス」「フォノンエンジニアリング」「トポロジカル材料」「低次元材料」「複雑系材料の設計・プロセス」「ナノ力学制御技術」などの物質と機能の設計・制御にかかわる基本概念は、幅広い社会・産業ニーズに応える物質・材料開発にブレークスルーを起こし、破壊的イノベーションにもつながるドライビング・フォースともいえる。そのためには、化学、物理、材料科学、データ科学などの既存の学問領域が単独で取り組むのではなく、異分野の力を結集することが不可欠であり、学問領域の縦割りの風潮を取り払い、異分野融合・連携を強く促進する仕組みが必要である。近年、新学術領域や戦略的創造研究推進事業などの大型プロジェクト内では少しずつ融合・連携が進みつつある。しかし、産学連携についてはまだ不十分な状況であり、内閣府、文部科学省、経済産業省を中心にナノテク・材料分野全体の融合・連携を図ることが必要である。また、それに合わせて、将来世界的なリーダーとなるべきマルチディシプリナリーな人材を育成することも重要な課題である。

近年の情報技術の進展によりナノテク・材料技術に関する研究開発の方法が大きく変わりつつある。その背景には、デバイスの性能・信頼性追及のなかで、それを支える材料には、より一層の性能向上だけでなく、複数の機能の同時実現、時には相反する関係にある機能の同時実現すら求められ、複合化・多元素化の方向に材料開発は進んでいく。さらに地球環境の持続性との視点では、これら材料に要求される機能を自然界

に豊富に存在する元素の組み合わせで実現することが求められている。対象となる物質の組み合わせは膨大であり、従来の実験的あるいは理論的手法による材料探索、設計は困難になりつつある。一方で、ここ数年の間にコンピュータの飛躍的な能力と情報技術の進展により、大規模な材料データのなかから、材料の性能、機能に関する系統的な法則を発見し、材料の探索・設計を短時間で効率的に行うアプローチが世界中で精力的に行われるようになっている。マテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれるこのような取り組みは、日本の産業競争力の源泉である材料開発力の維持・強化のために必須であるとの考えから、2015 年に物質・材料研究機構（NIMS）内に情報統合型物質・材料研究拠点が設立されたことをきっかけに経産省やJST において関連する多数のプロジェクトで取り組まれている。また、近年は、材料の予測・設計に加えて、材料の合成プロセスの探索・最適化にデータ科学を活用するプロセス・インフォマティクスにも関心が集まっている。特に、複合化・多元素化による新材料は、既知のプロセスでは合成が難しいケースも多く、新たな合成プロセス開発技術として期待されている。これらの取り組みにより新材料の探索・設計や合成プロセス開発も含めた開発期間の短縮を実現することで、材料研究分野における日本の国際競争力の強化に大きく貢献することができると期待される。

1.3.2 日本の研究開発の現状と課題

上述した内容および2章の各研究開発領域からみえてくるわが国の研究開発力の現状としては、長年の技術蓄積から生まれる伝統的な強みとして、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術があげられる。また、それらを支える計測・分析・評価・加工技術に関してもわが国が強みを有する技術が多く存在する。さらに、IoT時代においては膨大なデータを効率的・効果的に処理することが求められるが、そのために必要なセンサ/アナログ機能やコンピューティング機能のヘテロ集積モジュール化技術に対して、特に基礎的な部分で、わが国は高いポテンシャルを有する。一方、技術の産業化や、研究結果の収益化の面では、諸外国、特に中韓などのアジア勢に対し劣勢となるケースも多いとの課題に加えて、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携、ナノ物質・新物質のELSI/EHS/RRI、ナノテク・材料分野の将来を担う人材の継続的な育成などのソフト面の整備といった課題もある。

以下では、第2章における全31研究開発領域の国際比較まとめ（図1.3.2-1）にもとづいて、各区分単位で日本の研究開発力の現状、諸外国に対する位置づけについて記述する。

■環境・エネルギー分野にかかわるナノテクノロジー・材料

この分野の研究開発領域（太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリア、分離技術）は、再生可能エネルギー利用、効率的なエネルギー蓄積・変換、CO_2 排出量削減および資源循環などと密接にかかわり、世界的にも関心が高く、活発に研究開発が実施されている。特に太陽電池や蓄電デバイス、分離技術は世界的に研究が強化される傾向にある。国別にみると、日本は全般的に基礎研究フェーズに強みを有し、特に太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリアに関しては国家プロジェクトも充実し、上昇傾向にある。一方、太陽電池、蓄電デバイスなどで素材シェアが下降している部門もある。また、パワー半導体の例で特徴的にみられるように、システム全体よりもキーとなるデバイスの性能向上に力を注ぐ傾向があるため、製品普及フェーズでの競争力で後れを取るケースがある。米国は蓄電デバイス、パワー半導体に強みがあり、基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズまで上昇傾向にある。政府系プログラムが多くの研究開発を支援している。欧州は太陽電池、パワー半導体、分子技術に強みがある。蓄電デバイスに関しても、

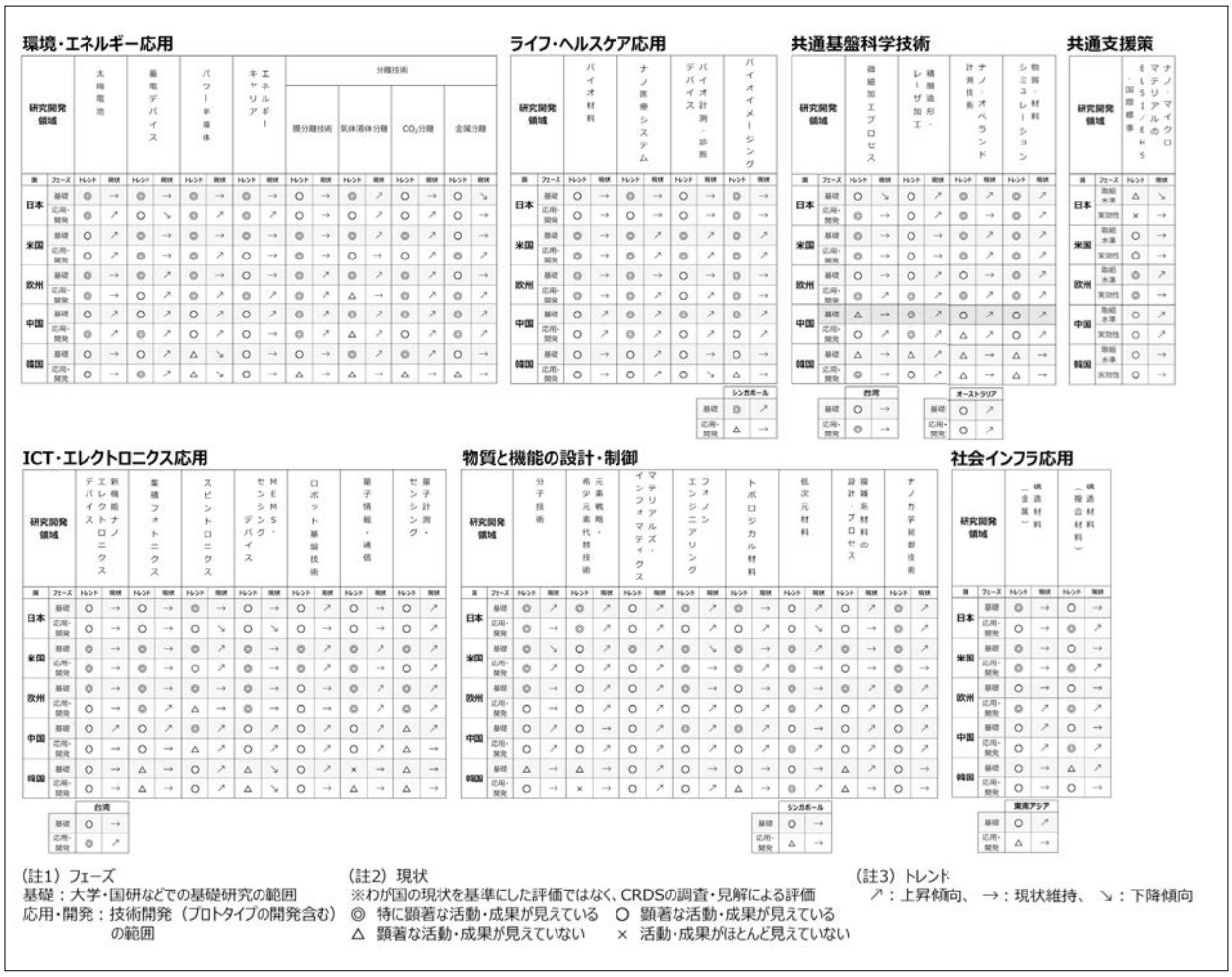


図 1.3.2-1　　国際比較表まとめ（第 2 章、31 領域）

自動車の電動化を背景に、基礎研究から応用研究・開発まで強化が進められている。 中国は全体的に上昇傾向にあり、豊富な人材や資金力をもとに論文の数や質が急成長している。特にシリコン系太陽電池では産業としての急速な発展とともに基礎研究としても最高効率の実証など、世界をリードする成果が生まれている。韓国は太陽電池、蓄電池が基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズにかけて上昇傾向にあるが、その他の領域では応用研究・開発フェーズでの活動が停滞気味である。

■ライフ・ヘルスケア分野にかかわるナノテクノロジー・材料

バイオ材料、ナノ DDS 等のナノ医療システム、バイオ計測・診断デバイス、バイオイメージングなど、いずれの領域においても日本はレベルの高い基礎研究を行っているものの、基礎研究の強みが産業化フェーズの競争力につながっていない。医工連携・異分野融合が不十分であることや、安全性評価・承認取得の難しさ、リスクを嫌う大企業の参入不足、ベンチャー企業を支える環境の不足などが、これらの領域共通の要因としてあげられる。ナノテク・材料分野の基礎研究と、ライフ・ヘルスケアにかかわる応用研究・開発をつなぐための支援体制構築も課題である。

米国は基礎研究から産業化のフェーズにいたるまで強い競争力を維持している。応用研究・開発フェーズ

において、ベンチャー企業を中心に多様なプレイヤーが存在し層が厚い。NIH、FDAによる支援体制も整備されており、基礎研究からライフ・ヘルスケア分野の産業化へのスピードが速い。

欧州は基礎研究で高いレベルを維持するとともに、応用研究・開発フェーズで異分野連携、産学連携を積極的に進めており、産業化フェーズでは米国に次ぐ競争力を維持している。

中国は、かつては欧米、日本のキャッチアップ研究が目立ったが、現在は世界トップレベルの研究が多くみられる。主要雑誌において論文数、被引用回数ともに米国を抜いて世界1位になっている。莫大な研究開発投資の下、自国内に大きな市場を持つことや、臨床研究の障壁が低いことを背景に産業化も加速している。

韓国は海外との連携に積極的に取り組んでおり、ナノDDS・ナノ医療で競争力を増している。

バイオイメージングに関しては、シンガポールに存在感がある。世界中から優秀な研究者を集め、世界最高レベルの基礎研究を推進している。

■ICT・エレクトロニクス分野にかかわるナノテクノロジー・材料

この分野の日本の技術トレンドは、新機能ナノエレクトロニクスデバイス、集積フォトニクス、スピントロニクス、MEMS・センシングデバイス、ロボット基盤技術、量子情報・通信で現状維持が多く、量子計測・センシングのみが基礎研究と応用研究ともに上昇トレンドにある。

新機能ナノエレクトロニクスデバイスに関しては、ロジック関連技術では急峻スロープ特性をめざしたデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの開発で学術的に深みのある研究が行われており、不揮発性メモリ関連でもフラッシュメモリ、スピンMRAMを中心に継続的な学会発表が行われるなど、基礎研究では世界で一定の存在感を示している。応用研究では、キオクシアがNAND型フラッシュメモリの3次元積層化を推進しており、また韓国SK-Hynixと共同でスピンMRAMの開発を進めるなど、不揮発メモリ技術で最先端を牽引している。日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、近年、その蓄積が急速に散逸し失われつつあるため、この傾向を食い止め、人材や設備等を有効活用する仕組みが必要である。

集積フォトニクスに関しては、ハイブリッド集積技術や、光パスゲートコンピューティングなどの光情報処理技術の研究が進んでおり、また産総研でシリコンフォトニクス・コンソーシアムのシャトルサービスが始まるなど応用研究のインフラ整備が進められている。

スピントロニクスに関しては、トポロジカルスピントロニクスなど新概念にもとづく研究開発が成果をあげるなど、基礎研究では強みを発揮し続けている。一方、実用化に向けた本格的な研究開発は減少しており、企業のより一層の寄与が期待される。

MEMS・センシングデバイス関連では、主要国際会議における大学からの論文数は多いが、産業技術から離れつつあり、企業からの基礎的な研究報告が減少している。日本のセンシングデバイス・モジュールメーカーの実力は高く車載センサなどで強みがあるが、製品化に向けた研究開発が低調になっている。

ロボット基盤技術に関しては、ソフトロボット関連の論文数が指数関数的に増大しており、新学術領域研究「ソフトロボット学の創成」の発足、複数の大学発ベンチャーの登場など、盛り上がりをみせている。ただし、手術支援ロボットについては、海外で実用化フェーズに入っているのに対してわが国の動きはやや弱い。

量子情報・通信に関しては、量子技術イノベーション戦略が策定され、基礎研究から実用化へとつなぐ戦略と体制が構築された。以前の停滞期に比べて上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると規模は大きくない。量子計測・センシングに関しては、Q-LEAP量子計測・センシング領域をはじめ複数のプロジェクトによって研究開発が進んでおり、特に日本初の光格子時計技術で世界をリードしている。一方、研究開発投資の増え方は海外と比べて十分とはいえない。

■社会インフラ分野にかかわるナノテクノロジー・材料

金属材料、複合材料ともに日本の研究レベルは高く、特に複合材料の主役である炭素繊維の生産については、日本は世界市場で圧倒的な強さを維持している。また、主に自動車向けにNEDO「革新的新構造材料等研究開発」（2014～2022年度）、航空機向けに内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」（2014～2018年度）において成形技術等の研究開発がなされている。 SIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）においては、上記SIP「革新的構造材料」で開発してきたマテリアルズインテグレーションの素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型MIシステムを世界に先駆けて開発している。今後も高い競争力を維持・向上させるためには、構造材料のさらなる性能向上は不可欠であり、今後の国力維持のための大きな柱の1つとして一層注力すべき領域である。

米国では、Materials Genome Initiative として実部材の製造をめざした展開が開始され、新材料の設計で進展がみられる。また、航空機用エンジン部品に使用されるセラミックス基複合材料（CMC）の広範な技術分野での研究開発を行っている。

欧州は自動車の電動（EV）化のトレンドが世界でもっとも進んでいる地域の1つで、これに関連する産学官連携が活発に行われている。特に研究が進展しているドイツでは、すでにCF/SiC CMCを軽量耐摩耗材料として自動車やオートバイのブレーキローターに使用している。また、自動車メーカーが主な実施者となって、自動車のマルチマテリアル化研究開発を国家プロジェクトとして進めており、マルチマテリアルによる軽量化で世界をリードしている。英国も航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。

一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。中国においては、複合材料や極限環境材料・計測技術はキャッチアップの段階を通過し、今後、航空宇宙を含め、基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも強化される可能性を秘めている。また、日本の自動車メーカーが電磁鋼板の一部を中国の鉄鋼メーカーから調達するなど、応用研究・開発の向上が著しい。韓国は2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化にいたっている。一方で大きな国家プロジェクトはなく、力点を置いたMg板材の開発では経済的に大きな成果をあげられず、方針転換を迫られている。

■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術

ナノテク・材料分野の核をなす分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、フォノンエンジニアリング、トポロジカル材料、低次元材料、複雑系材料の設計・プロセス、ナノ力学制御技術が含まれる研究領域である。

日本は新学術領域研究や戦略的創造研究推進事業などのファンディング制度を活用して、基礎研究フェーズで活発な研究が行われている。また、応用研究・開発フェーズにおいても上昇傾向のトレンドを示す研究開発領域が多いが、現状では欧米と比較するとやや劣勢にあるといえる。マテリアルズ・インフォマティクスおいては、米国の取り組みがリードしているが、日本もNIMS を研究開発拠点とするMI^{2}I を中心に精力的に研究が進められてきた。また、フォノンエンジニアリング、トポロジカル材料、低次元材料に関しては、米国と欧州の研究開発が活発であり、一部の分野では中国に顕著な活動・成果がみえている。日本では基礎研究を中心に応用研究へ向けた重点化が図られ始めている。

米国においては、DOE やNSF の支援により、現状では基礎研究フェーズで強みを発揮しているものの、工学的側面を重視した研究が多い。応用研究・開発フェーズにおいては、ベンチャー企業が充実している等の理由から他国と比較して優位性を保っている研究開発の領域が多い。

欧州においては、Horizon 2020 による支援を中心に英国、ドイツ、フランス、オランダなどで活発に研究

開発が展開され、基礎研究フェーズでは強みを有する研究開発領域が多い。応用研究・開発フェーズにおいても、ほとんどの研究開発領域で他国と比べ優位性を保っている。

中国においては、膨大な科学研究予算を投資し、欧米での留学経験のある若手研究者の登用や欧米の有力大学から有能な研究者を招聘すること等により、基礎研究フェーズおよび応用研究・開発フェーズともほぼ全ての研究開発領域で上昇トレンドにある。マテリアルズ・インフォマティクスにおいても中国版Materials Genome Initiative（MGI）の下、国家重点研究開発計画に指定されるなど、基礎研究フェーズで活発な動きがみられ、また関連特許の出願数も増加傾向にあり、今後の動向に注視が必要である。

韓国においては、二次元機能性原子薄膜の研究開発領域において、新プロセス、新デバイス等のフレキシブルエレクトロニクスに関する研究プロジェクトが推進されるとともに、KAISTや国立ソウル大学がグラフェン・二次元薄膜デバイス応用の研究拠点になるなど、特に応用研究・開発フェーズで世界をリードしている。

■ナノテクノロジー・材料の共通基盤科学技術

ナノテク・材料分野の基礎および応用を支える「共通基盤科学技術」区分には、「加工・プロセス」（微細加工プロセス、積層造形・レーザ加工）、「計測・分析」（ナノ・オペランド計測）、および「理論・計算科学」（物質・材料シミュレーション）が含まれる。

「加工・プロセス」のなかでも微細加工プロセスは、ナノメートルレベルの加工といった側面でナノテク・材料分野を支える重要な技術領域である。最初に発展した半導体デバイス分野にとどまらず、ナノメカニクス、スピントロニクス、バイオナノテクノロジーなどへの波及が進んでいる。日本はレジスト材料技術や欠陥評価技術などで産業的に優位性を維持している。一方で、10 nmノード以降の微細加工プロセスを有している半導体メーカーが米国、台湾、韓国などの海外企業に限られてきているなかで、どのようにして微細加工プロセス技術の開発を進めていくのか、難しい状況にある。海外のコンソーシアムとの差別化や連携も含め、研究開発の戦略を多面的視点から検討していく必要がある。原子層堆積（ALD）では、国内企業が高誘電率（High-k）ゲート絶縁膜などを含む金属材料の熱ALD技術で世界的なシェアを有する。原子層エッチング（ALE）でも、国内企業が異方性ALE（絶縁膜）の量産適用を世界に先駆けて実現するなど、当該分野をリードしている。

積層造形・レーザ加工では、樹脂や金属などを3次元的に積層して構造体を作製する積層造形（またはAdditive Manufacturing（付加製造）、3D プリンティング）と、高出力のレーザを用いた金属、セラミックス、ガラス、樹脂などの複雑な切断、穴開けなどの加工を高い精度で実施する技術を調査対象として取り上げている。いずれもデジタル・マニュファクチャリング技術であることから、IoTやAIとの整合性が極めて良く、次世代のものづくりにおける重要な加工技術の1つとなっている。米国、欧州、中国などでは、積層造形の研究開発が実用化段階を迎えている。日本では、TRAFAMやNEDO、SIPプロジェクトなどにより、溶融凝固現象の解析やシミュレーション技術の開発など、学理にもとづいた積層造形・レーザ加工条件に関する基礎研究が実施され、成果が現れ始めている。さらにサイバーフィジカルシステム（CPS）を取り入れたレーザ加工技術開発（SIP、Q-LEAPプロジェクト）、マテリアルズインテグレーション（MI）の3次元積層造形への展開（SIPプロジェクト）など、新しい技術開発への挑戦が進んでいる。

「計測・分析」では、材料やデバイスに対する実使用下での時間分解計測により測定対象のナノスケール構造と機能との相関を見出すことを目的としたナノ・オペランド計測を調査対象として取り上げる。主な計測技術としては、走査プローブ顕微鏡（SPM）、透過型電子顕微鏡（TEM）、放射光X線、中性子線、レーザなどが利用されている。応用分野の大きなトレンドとしては、二次電池（特にLiイオン電池）があげられるが、

それ以外にも、触媒分野、エネルギー変換デバイス（太陽電池、燃料電池など）、生命科学分野（生きた細胞、生体関連分子など）にまで測定対象が広がってきている。欧米はTEM、X線、中性子線の新たな利用技術やオペランド測定用の専用特殊ホルダーの開発などで先行している。日本も、SPMによるオペランド計測分野でリードし、また走査型TEMでの微分位相コントラスト（DPC）法の開発、放射光X線での高分解能タイコグラフィーXAFS、パルス中性子を用いたストロボスコピック計測法の開発など顕著な成果が出ている。蓄電池関連の国家プロジェクトには、電子顕微鏡や放射光、中性子など高度計測を担う研究チームが組織されており、その連携も活発になっている。

「理論・計算科学」の物質・材料シミュレーションは、物質・材料科学の基礎を支える重要な科学技術で、量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立をめざす研究領域である。欧米各国と並んで分野を牽引する日本は、個々の研究者のレベルが高く、研究の独自性やプログラムに実装した手法の多様性でも引けを取らない。ナノテク・材料分野におけるグローバルな研究開発競争が激化するなか、日本では大型プロジェクトが物質・材料シミュレーションの応用研究を牽引しており、計算、実験、計測、データ科学の合同プロジェクトによる出口を見据えた応用研究の取り組みが強化されている。世界的な開発競争が始まった量子コンピュータを利活用する量子化学計算でも、日本は先頭集団に位置している。

1.3.3 国として推進すべき重点テーマ

ここまで述べてきたことを踏まえ、今後国が推進していくべきナノテクノロジー・材料分野の研究開発テーマ（グランドチャレンジ）を、図1.1.3-1に示した俯瞰図の中の上部にある6つの社会ニーズごとに分類して述べる。1つのテーマが複数のニーズに応える場合には、もっとも関連の深い項のところで述べることにする。

図1.3.3-1は、6つの社会ニーズ（ピンク）と13のグランドチャレンジの関係を示したものである。見てわかるように、社会ニーズとグランドチャレンジはほとんどの場合、多対多の対応関係にある。社会ニーズはあるべき3つの社会像、「安全・安心で豊かなデジタル社会」、「健康で幸せな生活が可能な社会」、「低環境負荷で持続可能な社会」に各々2つの社会ニーズがカテゴライズされる。また、それらに加え、すべてに共通した基礎である「共通基盤技術」も1つのカテゴリーととらえることができる。以下、これらのカテゴリーごとに、それとつながりの深いグランドチャレンジを説明する。

【社会像Ⅰ．安全・安心で豊かなデジタル社会】

ニーズ①　コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス

デジタル社会においては、車や家などの生活空間、オフィス・工場や街中などの社会空間のあらゆる場所にさまざまなセンサがあまねく設置され、人々の暮らしを豊かにするために使われる多種大量のデータが集められてくる。それらのセンサ群に加え、ムーア則の終焉がみえてきた昨今では、集められた膨大な情報を少ないエネルギーで処理するために、コンピューティングの革新が必要になる。それを可能にするデバイスとしてIoT/AI/量子デバイスへの期待が高い。具体的には、情報収集のために小型高感度の光・物理/化学・バイオセンサや超高感度の量子センサ、安全で高速の情報伝達のために量子通信や超高速のモバイル/光通信デバイス、またその場での高速の情報処理のために超低消費電力デバイスによるエッジコンピューティング、飛躍的な情報処理能力の向上のために量子コンピューティングなどの研究開発が活発化している。

図 1.3.3-1　　6 つの社会ニーズと 13 のグランドチャレンジ

ニーズ②　安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信

人や物などの物理的実体を安全に送ること（リアル）、大容量の情報を遠隔地に送ること（サイバー）がインフラとしての輸送・通信の役割である。リアル・サイバーいずれの世界でも送達には、大量のエネルギーが必要となっており、低環境負荷の輸送・通信機器に対するニーズが高まっている。これらを実現するうえで、デジタル技術が重要になってくるが、それに伴い必要な材料・デバイスへの要求も拡大しており、安全で低環境負荷の輸送には、高強度軽量複合材料、排ガス浄化触媒材料、超小型パワーデバイス、蓄電池 / 燃料電池、高出力耐高温モータ、高感度ミリ波・近赤外レーダ、超高速・低消費電力の CPU が、低消費電力・大容量通信には、ミリ波・テラヘルツ波・光通信用デバイス、Si フォトニクス、ミリ波・テラヘルツ波領域での誘電率透磁率制御材料、アンテナ技術、メタマテリアル、などが要求される。

• 取り組むべきグランドチャレンジ

（1）量子状態の高度制御

電子、光子、スピン、フォノンなどの量子状態を自在に制御し、それらの相互作用がもたらす物理現象を使って、センシング、通信、コンピューティングなどに応用する。さらに電子の波動関数における位相のトポロジーといった新しい概念を導入することで、新しい量子状態を実現し、これまでにない量子物性の高度制

御を可能にする。これによってシリコンテクノロジーだけでは実現できない量子による新たな機能を創出・付加し、量子コンピュータやスピントロニクスなどへの応用展開を加速させる。

（2）ポスト5Gデバイス・材料基盤

現在の移動体通信では不可能な大容量通信を提供する6G通信網は、あらゆる場所に多くのIoTデバイスが配置される時代に求められる低消費電力で高速かつ高信頼な通信を与えてくれる待望の技術であるが、それ以前の世代で使われていた周波数よりも高いミリ波やテラヘルツ波の周波数帯を使う必要があるなど、使われる材料・デバイスなどに対してこれまでよりもはるかに厳しい性能が要求される。ここで使われるデバイスには、デバイスの構造・設計のみならず、誘電率・透磁率といった材料物性のレベルからの革新が求められる。

（3）IoTデバイス集積

様々な種類のセンサとデータ処理・通信を行う半導体チップ、エネルギーハーベスタなどの電源を組み合わせたモジュールにより、老朽化する社会インフラの異常検知、車の自動運転、人の健康状態の変化の察知などを行うことを可能にする。これを実現するためには、低消費電力・高処理能力のプロセッサ、通信用チップや、様々な物理・化学・生化学センサ、設置場所に適した発電を行うための様々なエネルギーハーベスタなどのデバイスと、それらを組み合わせて最適なモジュールにするための設計基盤が必要である。また、センサモジュールのハードウェアだけでなく、様々なセンサから得られる多用な情報を組み合わせ、単独のセンサでは得られない高付加価値の情報を導出するマルチモーダルセンサネットワークが機能するためのアーキテクチャの開発なども必要となる。

（4）ナノ力学制御によるスマート材料

航空機や自動車等におけるエネルギーロスの原因である摩擦や振動を大幅低減した機械装置や、社会インフラ材料の超長寿命化や修復などを可能にする先進材料といった持続可能社会に貢献する材料・デバイスを創製するために、ナノスケールにおける力学現象の理解から、マクロな力学特性を理解・解明し、「接着・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」といった力学特性を自在に設計・制御する技術開発が必要である。

【社会像 II．健康で幸せな生活が可能な社会】

ニーズ③　健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術

超高齢社会に突入したわが国では、健康寿命の延伸が喫緊の課題であり、疾患の超早期診断や、健康状態・生体情報のモニタリングを実現するウェアラブル（またはインプランタブル）デバイス、身体の機能低下を補ったり損傷部位を補修したりする材料やデバイスなどが求められている。また、細胞や微生物を活用したバイオ技術による食料生産（培養人工肉、他）なども、途上国の人口増大とそれに伴う食糧問題を解決するために必要とされている。これを実現するうえで必要な材料・デバイスとして、具体的には、高い選択性を持って分子認識が可能な材料・デバイス、脳機能センシングとAI解析、細胞・組織制御材料、遠隔医療・診断を可能にするセンサネットワーク、手術用ロボット、高精細ディスプレイなどの開発が必要である。

ニーズ④　人と共生するロボット

少子高齢化が進む今後の日本社会において、負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力

を補強・拡張するなど、人と共生するロボットの活用が望まれている。それを実現するために必要な材料・デバイスとして、具体的には、自律的行動を可能にするセンシング機能（3D画像センサ、軽量ジャイロ、匂い/炎/騒音センサ、五感センサ）および認識・判断・予知機能（高性能CPU、5G通信、AI）、動力源を構成する小型大変位高出力アクチュエータ、レオロジカル材料による人工筋肉、柔軟で軽量なソフト材料による筐体などの開発が必要である。

• 取り組むべきグランドチャレンジ

（5）ヘルスケアIoT

IoTを活用したヘルスケアを実現するうえで、真に必要なデータを取得するための技術を開発する。現状のウェアラブル機器によるヘルスケアサービスで活用されているのは物理センサによって得られる活動量、歩数、脈拍等の情報に限られ、健康・疾病の状態に直結するバイオ・化学情報の取得は難しい。未病の検知に必要な極微量の生体由来物質（バイオマーカ）の検出技術、モニタリング技術の開発が求められる。また、感染症の流行を未然に防ぐため、環境中に存在するウイルス・細菌などの病原体を検出・モニタリングする技術の開発も必要である。

（6）バイオインスパイアード材料・システム

生物が有する巧妙な構造や機能、生物が低エネルギーで実現する動作や低環境負荷の物質生産に学んだ、材料･デバイス、生産システムを人工的に再構築するバイオインスパイアード技術への期待が高い。3Dプリンティングなどを使った3次元組織体の形成、合成生物学の進展による人工肉などの新たなタンパク質の合成など、医療分野に留まらず、新たな物質生産の分野にまでバイオ技術の可能性が広がっている。

（7）バイオアダプティブ材料

生体環境に適合した材料の探索という従来の概念を超えて、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料を設計・創製する。生体との相互作用を積極的に活用することで初めて実現可能な機能を持つ材料、具体的には、生体現象を高度に制御する機能を持つ材料や、現状の網羅的探索の延長では達成不可能な極めて高い生体適合性を有する材料の創出基盤を構築することをめざす。これにより健康維持、疾患治癒、身体機能の補修代替などの医療・健康ニーズに応えていく。

（8）脳型AI・スマートロボット

工場のような閉じられた環境ではなく、常に変化する開かれた環境の中で、人間と一緒に連携して作業できる自律・共生型のスマートロボットを実現する。変化する環境をマルチモーダルなセンシング機能で的確に状況を把握して、一緒に作業する人間や他のロボットの行動を予測するとともに、次にとるべき行動を自律的に瞬時に判断し、人間と同じかそれ以上の速さで行動できることが求められる。これには、人間の脳の特徴である経験に即した高度な認識・判断を高いエネルギー効率で行う脳型AIチップと、人間の五感と同等な感度・精度を持つマルチモーダルセンサ、小型高出力の柔軟アクチュエータ、およびこれらを統合するソフトロボティクスが必要である。

【社会像 III．低環境負荷で持続可能な社会】

ニーズ⑤　水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料

今後予想される世界の人口増による著しい水不足や大気汚染、世界のハイテク産業を支える希少元素をはじめとする鉱物資源枯渇の危惧や偏在性から生ずる価格高騰のリスクを解消するため、水・大気・鉱物資源の循環を可能にするスマート材料が求められている。具体的には、汚染水/塩水分離・吸着膜材料、ガス分離・吸蔵材料、鉱物資源分離（環境汚染物質除去、希少物質回収）、水素循環基盤材料、社会インフラ材料などの開発が必要である。

ニーズ⑥　省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス

地球温暖化の影響による台風の大型化、山林火災の頻発など自然災害の深刻度は増大する一方である。このような環境のもと、脱化石燃料依存、温室効果ガス排出削減と、経済的発展を両立するためには、省/創/蓄エネルギーのための材料・デバイスの高機能化が必須となっている。具体的には、高性能蓄電池、燃料電池、太陽電池、高T_c超伝導材料、高ZT熱電材料、グリーン水素・燃料（人工光合成、水電解）、熱エネルギー制御材料（断熱、耐熱、蓄熱、冷熱）などの技術開発が求められている。

• 取り組むべきグランドチャレンジ

（9）サステナブル元素戦略

厳しい資源制約のあるわが国においては、材料・デバイスにおける新機能の追求と同時にそこで使用される元素・物質の循環をも考慮した材料創製が必要になってくる。そのためには、これまで材料研究開発の世界的な流れを先導してきた「元素戦略」をさらに進化させ、新機能の追求と同時に希少資源の極限的な回収や、プラスチック素材の再資源化など、限りなく「ゼロ・マテリアル・エミッション」に近づけることをめざす必要がある。材料の原料調達から、創製、リサイクル、廃棄までのライフサイクル全体を考慮した材料設計指針の確立が重要である。

（10）カーボンニュートラル基盤

化石燃料の利用を減らし、再生可能エネルギー利用割合を増やすために、各種デバイス（蓄電池、燃料電池、太陽電池）と、それに用いられる材料の開発を継続して行う。また、グリーン水素の利用技術や、熱エネルギーの有効利用のため高性能な各種熱エネルギー制御材料（耐熱、冷熱、蓄熱、高熱伝導）の探索・開発を行う。

【共通基盤技術】

• 取り組むべきグランドチャレンジ

（11）多機能・複雑系の材料設計

蓄電池や燃料電池の構成材料、超伝導材料、磁性材料、触媒材料などでは相反する機能や複数の機能を同時実現することが求められ、その高性能化には材料の多元素化や複合化が避けられない。このような複雑な材料システムでは多様な結晶構造が可能になり、要求に対し最適の特性を有する結晶構造（結晶の安定相）をどのように設計するか、どのようなプロセスで実現するかが材料開発の鍵を握っている。グローバルな開発競争が激化している現状においては、従来のような試行錯誤的な材料開発から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオペランド計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法を確立することで、ハイスループットな材料創製を実現する。また、これまでに積極的に用いられていなかった、あるい

はむしろ邪魔ものであった、材料中の欠陥を積極的に制御・利用する欠陥エンジニアリングや、近年、著しい発展を遂げている二次元材料の組み合わせ積層による新物質開発などを追求していく。

（12）材料合成プロセス設計基盤

材料やデバイスを合成・作製するプロセスについては、その多くが試行錯誤の末に見出されたもので、材料製造プロセスを理論的に組み上げていく方法論は存在しない。このため、機能の高い材料が理論的に予測されてもそれを有効に合成するプロセスが見つからず、現実的には活用できなかったり、プロセスフロー中のたった1つの特定のプロセスによって使用できる材料が大きく制限されるために材料の選択範囲が狭められたりするケースも多い。データ科学を用いて最適プロセスの発見を行うプロセス・インフォマティクスなどの設計基盤の構築が望まれる。

（13）次世代オペランド計測

反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象にオペランド計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法も駆使して高速・高効率なデータ解析を行うことが、今後の新物質・材料開発には欠かせない。解析結果をただちに合成プロセス条件やデバイスの動作条件にフィードバックすることで、それらの機構解明が進み、より高品質な物質・材料創製データ科学を活用しつつ、計測とプロセスを一体化したものづくり技術の開発が今後重要となる。

1.3.4 研究開発体制・システムのあり方

ナノテク・材料分野の研究開発の最先端においては、原子分子スケールの微小な領域の観測、評価、加工、制御を通じて、過去には想像もできなかったほど精緻で高度な材料・デバイス機能を引き出せるようになっている。これは、多くの専門分野にまたがる叡智の多年にわたる結集により可能になってきたことである。しかし、これをさらに進めていくために、すべての専門領域をカバーする研究者集団、高額な実験装置と、装置をフル活用できる技術専門家を個々の研究機関や企業で確保するのは、どの国にとっても困難である。

一方で、研究開発競争はグローバルなスケールで激化し、開発スピードへの要求は高まり続けているため、以下のようなメリットを享受できる拠点型のオープンイノベーションへの取り組みが世界的に実践されている。

・複数企業や複数研究機関によるコスト・リスクシェア（技術開発コスト削減、リスク低減）
・拠点化による多様な専門家集団の集結
・共用研究開発インフラ、基礎基盤技術開発への公的投資・支援
・知的財産の相互利用

ナノテク・材料分野の国家プロジェクトにおいては、イノベーションを加速的に促進する仕組みとして、先端・高額機器の効率的な利用や異分野融合、産学連携のための研究拠点や共用施設ネットワークの構築が、中長期的にみて極めて重要となると考えられている。イノベーションの実現に向け、研究開発の投資対効果を中長期的に高めるためには、研究開発にのみ投資するのではなく、バリューチェーン全体における戦略の構造化を行い、適切なタイミングで（場合によっては研究開発施策の計画と同時に）、先端機器・装置群の更新戦略、知財戦略、標準化戦略、新技術の社会コミュニケーションに取り組まなくてはならない。

■世界のナノエレクロトニクス大型研究拠点

ナノエレクトロニクスの研究開発拠点は、ベルギーのIMEC、フランスのMINATEC、米国のAlbany Nano Tech（ANT）など、限られた拠点に集中している（図 1.3.4-1）。これらの拠点には、デバイスメーカー、装置メーカー、材料メーカーなどが集まり次世代のデバイス、プロセス研究開発のエコシステムを構築し、先端半導体研究だけでなく、半導体を活用した研究、最先端の設備と研究開発プログラムを通した人材育成が行われている。

IMECは、今年創立35周年を迎えるナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関であり、2019年の収入は6.4億ユーロ（2018年の5.83億ユーロから約1割増収）である。約2割がベルギー・フランダース地方政府からの助成金だが、1984年の創業以来、収益は毎年伸びている。 IMECの伝統的なビジネスモデルは研究協業（受託研究）であるが、中小企業向けのファウンドリサービスも行っている。200mmもしくは300mmの試作ラインを活用して、CMOS、光デバイス、化合物パワー半導体、太陽電池、イメージセンサ、MEMSなどを提供している。さらに、IMECが複数の中小企業をまとめてTMSCのようなメガファウンドリへの製造委託も行っている。2016年9月に、フランダース地方政府における科学技術振興政策強化の一環として、同地方のデジタル技術研究機関でありインキュベーションセンターでもあったiMindsを吸収合併したことで、従来からの強みであったハードウェアとiMindsのソフトウェアを融合させ、広範囲のIoTアプリケーション開発（スマートヘルス、スマートモビリティ、スマートシティ、スマートインダストリ、スマートエネルギー）の研究を促進し始めている。その結果、研究協業先も半導体関連産業にとどまらず、健康、医療、自動車、エネルギーなどに広がりをみせている。2019年の組織の構成員は4,500名を超え、そのうちの500～600名が世界中の研究委託企業から派遣されている研究者（給与は派遣元の企業が負担）、同じく500～600名が博士号取得のための研究を行う大学から派遣されてきた学生である。また、試作製造だけではなく、デバイス設計の受託や、IMECでの研究成果で起業しようとするスタートアップの支援も行っている。日本からも東京エレクトロンやSCREENをはじめとする製造装置メーカーに加えて、住友化学、JSR、富士フイルム、カネカなどの材料メーカーも参加している。

MINATECは20万平方メートルの敷地に研究者3,000名、学生1,200名、産業界の技術移転専門家600名を集め、13,000平方メートルのクリーンルームを持つ、グルノーブルの産学独集積クラスターの中心である。

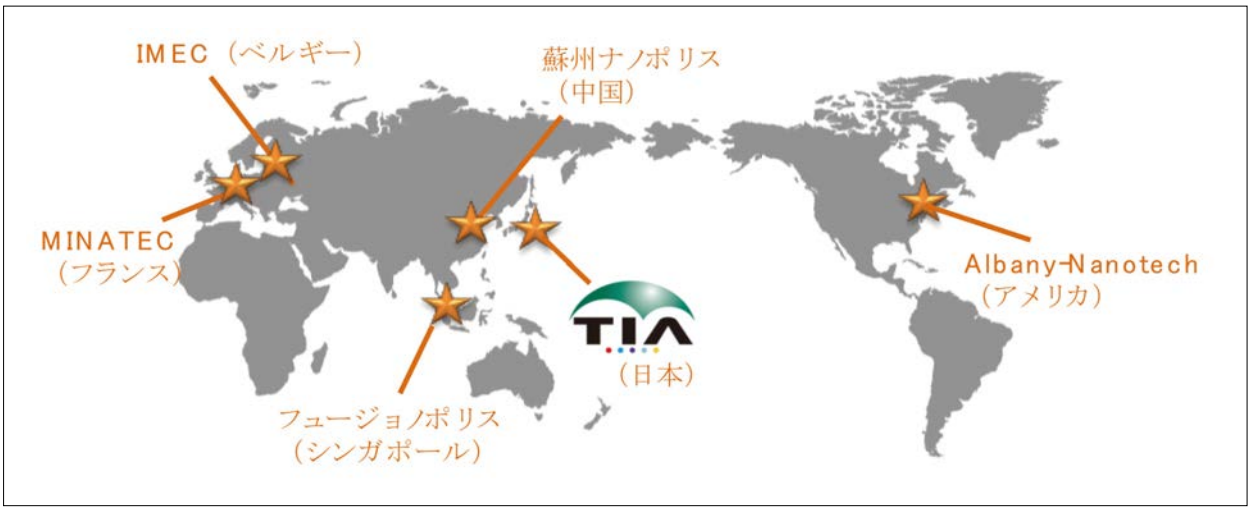


図 1.3.4-1　　世界のナノエレクロニクス大型研究拠点

ここには、基礎研究を行っている研究所（INAC、FMNT）に加え、応用研究を行う電子情報技術研究所（CEA Leti）がある。また、大きな国際研究施設（欧州シンクロトロン放射光研究所（ESRF）、ラウエ・ランジュヴァン研究所（ILL）、欧州分子生物研究所（EMBL））とも近接するという、有利な立地条件を有している。年間予算は約3億ユーロ（うち、5千万ユーロは設備投資費）。毎年約350件の特許が出願され、1,600件以上の研究論文が発表されている。また、多岐にわたる分野（オプティクス、バイオテクノロジー、部品・設計回路、センサなど）で多くのスタートアップを設立している。 MINATECでは自己評価の指標として、①国際的存在感、②エコシステム形成、③経済的インパクト、の3つを重視しており、これらを高めていくための運営に集中している。

ANTは、戦略的な提携関係にある企業や公的研究機関は200社近くにのぼる。その中で中心的研究機関の1つであるSEMATECHは2013年にニューヨーク州と5年間の研究協力契約を締結し、Phase 3のステージを行った。 ANTに勤務している企業人は約3,000名である。 ANTのあるSUNY-CNSE（State University of New York - College of Nanoscale Science and Engineering）は、2002年の建設開始以降、総額80億ドル以上を投資して現在にいたる。参画企業からの要請に応えるかたちで年々拡大した13,000m^{2}規模のクリーンルームを筆頭に、雇用者の人件費を含めた年間の維持費は毎年2億ドル規模とされる。 NY州政府が約半分を支出し、企業が半分を拠出している。コンソーシアムへの累積投資48億ドルは主に民間資金からであり、NY州政府も4億ドルを拠出している。 ANTでは、再生可能エネルギー技術研究開発にも力を入れており、2015年には1.9億ドルを投じた、ZEN（Zero Energy Nanotechnology ）棟が開所している。2019年には、中核テナントのIBMが、20億ドル以上を出資して、人工知能に特化したコンピューターチップの研究開発、プロトタイプ作成、テスト、シミュレーションを行う「AIハードウェアセンター」をニューヨーク州立工科大学に設けることを発表した。 CNSEの教員・アドミニストレーターは約150名、大学院生200名が所属する。4つの学科、ナノサイエンス、ナノエンジニアリング、ナノバイオ、ナノエコノミクスがある。なかでも特徴的なのはナノエコノミクス学科であり、ナノテク産業化の強化に関する教育・人材育成をメインミッションとしている。 CNSEでは博士号を取得でき、また、SUNYのメインキャンパスと共同してMBAを取得できるようにもしている。

アジアでは特に中国の存在感が増している。たとえば、蘇州においては1994年から中国とシンガポールの政府の合弁により蘇州工業園区（SIP）が、周到な都市計画のもとで作り上げられている。ここには、韓国のサムスン電子、ドイツのシーメンス、オランダのフィリップスなどの海外ハイテク企業が誘致されたほか、世界各国の多くの企業が、製品の生産輸出拠点として進出するようになっている。また、中国の3大IT企業である百度（バイドゥ）、アリババ集団、騰訊控股（テンセント）なども進出しており、技術開発のためのスマートシティのモデルともいわれている。蘇州工業園区の商品・サービス生産額は2016年の実績で334億ドルと前年比7.2%の増加となっている。アジアのシリコンバレーとも呼ばれる深センは、バッテリとEVメーカーのBYD、通信機器のファーウェイ、SNS大手テンセントなどの有力企業を輩出し、今も拡大を続けている。2020年にはデジタル人民元の実証実験の舞台としても選ばれ、中国のハイテク産業の中心となっている。また、シンガポールにはフュージョノポリスが国際拠点となっている。このように、韓国、中国、台湾に加え、南アジア、東南アジアではシンガポールを中心にハブ化が進みつつある。

日本での取組としては、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学、高エネルギー加速器研究機構が中核となり、日本経済団体連合会（経団連）とも連携して2010年にスタートした「つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点（TIA-nano）」がある。先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄とともに世界的に魅力あるナノテクノロジー研究拠点を造り上げようとしたものである。2015年には第2期として今後

5年間の行動体系を示した「TIA-nanoビジョン（2015～2019年度）」を打ち出し、オープンプラットフォームの構築に向けた活動を明確にしている。2016年度から新たに東京大学が加わり、ナノバイオやデータ駆動科学などの新たな取り組みも進めていくことから、名称をTIA-nanoからTIAに変更して活動を広げている。

TIAでは、3つのプラットフォーム（システム化プラットフォーム、先進材料プラットフォーム、共通基盤プラットフォーム）に分けて研究開発を推進している。システム化プラットフォームには、ナノエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、MEMSの研究領域、先進材料プラットフォームにはカーボンナノチューブ、ナノグリーンの研究領域が含まれ、それぞれ企業と連携して関連するプロジェクトを推進している。共通基盤プラットフォームには、光・量子計測、人材育成、共用施設ネットワークがあり、計測技術の高度化、研究者の能力向上・キャリアアップ、研究の支援などを行っている。また、2016年度より中核5機関の研究者が連携して将来のイノベーションにつながる新たな研究領域の探索を行うために、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」を開始している。バイオ・医療の研究領域は主にこの「かけはし」で支援されている。2018年度までの3年間の活動で、予想以上の興味深い新たな研究テーマが提案されており、それらの中には具体的な研究プロジェクトに移行したものもあり、今後は企業も含めた形でのさらなる展開が計画されている。 TIAが世界に注目される研究拠点になるには、TIA独自の強い研究領域を形成する必要があり、従来の国家プロジェクト中心の研究だけでなく、「かけはし」から新たな融合研究領域が生まれ、世界に注目される活動に育つことが渇望される。2020年には東北大学が参画することで中核6拠点体制に増強するとともに、「TIA VISION 2020-2024」を発表し、イノベーションシステムのさらなる深化拡充の計画を発表した。この計画では「半導体（IoT/AI プロセッサ・センサ等）」「物質・材料データプラットフォーム」「光・量子計測」等の研究開発テーマに重点的に取り組んでいく。研究開発の体制構築にあたっては、現行の TIA 中核機関にとどまらず連携体を拡充させ、社会や時代のニーズに柔軟に対応して産業化を実現するプラットフォームへと発展させていくとされている。

これまでTIA拠点を活用して内閣府のFIRST、SIP、ImPACTや文部科学省、経済産業省、NEDOなどさまざまな国のプロジェクトが進められ、多くの成果が創出されている（第1期［2010-2014年度］：33プロジェクト、第2期［2018年度まで］：45プロジェクト）。2018年度におけるTIA連携企業は171社、外部から640名の研究者が集まっていることからも、イノベーションハブとしての機能は徐々に高まっていることがわかる。オープンイノベーションを促進すべく、公的資金のみならず、企業会員からの資金も得ながら、持続・自律的な拠点経営を実践している例が出始めている。そのような例としてナノグリーン領域におけるNOIC（NIMS Open Innovation Center）や、パワエレ領域におけるつくばパワーエレクトロニクスコンステレーション（Tsukuba Power-Electronics Constellations: TPEC）があげられる。また、企業主体の新事業創出を促進するために、単層カーボンナノチューブや複合材料の提供や技術相談・共同研究を行う「CNTアライアンス・コンソーシアム」の活動も行われている。

一方で、IMEC、MINATECなどに比べて教育・人材育成の面が弱い、コア技術開発が日本企業だけで行われており、海外からのユーザー・ニーズが取り込めない、産業界に対する情報発信が弱い、28 nm世代以降の最先端の半導体製造設備が用意されておらず、先端デバイスの試作ができない、また、既存の設備も老朽化しているといった指摘もある。産業界へのPR活動の1つとしてつくばエリア見学会なども開催されるようになっているが、このような地道な勧誘活動を続けていくことや、企業にとって魅力的なコア技術を蓄積して、利用しやすい制度、他にない装置・設備の拡充などが期待される。

今後TIAが、世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ちうるのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、各責任機関の意志と行動にかかわる問題である。拠点は国際的に

開かれた組織とし、他国のネットワークとも接続し、アジア諸国や世界からの人材の誘引を試みる必要がある。

■世界のナノテクノロジー研究開発インフラ・プラットフォーム

米国、韓国、フランス、ドイツ等は戦略的に公的資金を投入（ナノテクノロジー国家投資額の5%～10数%を研究開発インフラ・プラットフォーム・拠点形成に配分）し、充実した先端研究インフラのプラットフォームを構築している。特に、米国のNational Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）やNetwork for Computational Nanotechnology（NCN, NSF）、韓国ナノ総合技術院の6つのセンターはオープンな研究開発インフラとして課金制や国際対応充実している。欧州や台湾も、国・地域単位でナノテクノロジー研究インフラのプラットフォームやネットワークが形成されている。

米国の充実した数十の拠点ネットワーク（NNCI/NSF：16拠点によるナノテクノロジーコーディネーション拠点ネットワーク、NCN/NSF:7つの計算機センターによるナノテクノロジーコンピュータネットワークなど）においては、長年の経験を活かし、平均すると連邦政府からの資金は全体運営費の3～4割ほどで運営が成立している。

日本は、過去、文部科学省のナノ支援（2002～2006年度）、ナノネット（2007～2011年度）の両プログラムを実施、この経験を踏まえ2012年度から10年間の計画で本格的にスタートしたナノテクノロジープラットフォームでは、課金制度や国際化対応を導入するなど、諸外国のナノテク研究共用インフラ事業との比較においても引けをとらない先進的なプラットフォームを構築した。先端装置類を地域単位で集中配備してオープンにすることで、ユーザーの研究開発投資の効率を上げるばかりではなく、そこに集まった異分野の人材が知識やアイデアを交換し合うことで連携・融合を進め、新しい科学技術やビジネスが生まれるきっかけを生み出すことが起きている。画期的な材料・デバイス開発に挑む産学官からの利用者に対して、プラットフォームでは3つの技術領域（微細構造解析、微細加工、分子・物質合成）を提供し、全国25法人、37実施機関が参画している。それぞれ共用を担う実施機関およびその代表となる代表機関が緊密に連携し合いながら、利用者に対して最適な場所で高度な技術サービスを提供する体制を構築している。また、プラットフォーム全体の支援機能の高度化や利用促進を図るために、センター機関（NIMS、JST（JSTは2017年度まで））を設置し、全国の若手研究者や地域の中小企業など潜在利用者と、プラットフォームとをつなぐ窓口・コーディネート機能を担っている。

現在は、プラットフォームの年間利用研究課題は約3,000件あり、利用研究者は延べ2万人を超える。文部科学省の事業予算とユーザーからの利用料収入、そしてプラットフォーム機能を提供する事業参画法人による自己負担とが合わさり、プラットフォーム全体が運営されている。そのなかで、産業界に対する具体的な研究開発支援や、大学研究者に対する高度設備の利用・技術支援、技術代行等により、専門技術者のスキルと知識・ノウハウへのアクセスを可能としている。利用者の持つ課題・目的に対してレバレッジを効かせた具体成果を上げるなど、研究開発の新しいエコシステムが育ちつつある。こうしたプラットフォームの構築により、ユーザーが課題を最初に持ち込んだ先の機関では対応できない課題も、プラットフォームを介して他の機関へと課題が移り、そこに持ち込むことで解決できるケースが生まれている。これは海外にはない日本の特徴的な仕組みである。設備、技術などのサービス提供のみならず、技術の知識、事例、解決策などの蓄積自体がプラットフォームの強みであり、価値創出の源泉たるストックとなっている。特にwebサイトを充実させて、利

用事例や、設備情報をデータベース化して公開することなどがポイントになっている[1]。本事業は、外部委員による中間評価で高く評価されているが、同時に、科学技術や産業を取り巻く状況の変化に即した対応技術領域の強化と、先端機器・技術専門人材の強化拡充、適切な利用課金体系の充実、国際化など、より持続的な運営形態をめざして発展・成長させていくべきとの総括がなされている。

このようなプラットフォームは、ナノテク・材料分野に限らず、他分野においても研究開発プロジェクトや産学連携を支え、融合や連携を促進する共鳴場として不可欠な研究インフラになってくると考えられる。一方で、研究開発に用いる先端機器の世代が進歩していくなか高額化が進んでいることから、陳腐化する既存設備の更新や、データの利活用基盤の構築、高度設備の性能を最大限に引き出してユーザーの研究開発成果を共に生み出す専門技術者の継続確保と育成が課題となっている。

上記の成果や課題を踏まえて文部科学省は、2021年の政府におけるマテリアル革新力強化戦略の策定に伴い提起された「マテリアルDXプラットフォーム構想」実現の一翼を担う新事業「マテリアル先端リサーチインフラ」を開始した（2021年3月）。ナノテクノロジープラットフォームの最終年度である2021年度末を待たずして開始した本事業は、全国各地に整備し蓄積してきたナノテクノロジープラットフォームの優良な研究基盤を引き継ぎ、新たに導入する最先端・ハイスループットの設備を活用することで、産学官の多様な利用者からの先端設備の共同利用を可能とする環境や、利用者に対する課題解決への最短アプローチの提供を図りつつ、高品質なマテリアルデータの創出が可能な共用基盤を整備する。わが国がデータ駆動型の研究開発をさらに加速すべく、高品質なマテリアルデータを産学官から効率的・継続的に創出・共用化するための仕組みの構築が計画されている。また、そのようなマテリアルデータを戦略的に収集・蓄積・流通・利活用できる仕組みを持つ、マテリアル研究インフラのプラットフォームとなることが謳われており、ナノテクノロジープラットフォームの基盤をベースに、マテリアルデータ利活用研究基盤へ発展させようとするものである。

本事業は、大学・国立研究開発法人等において、広範に充実した最先端設備群および技術・ノウハウを有する6つの「ハブ機関」と、一定の領域で特徴的な設備・技術を有する19の「スポーク機関」からなる全国25法人による体制「ハブ＆スポーク」で構成される。ハブ＆スポークの体制により、各機関が保有する設備・技術・ノウハウ・データを外部共用することで、わが国におけるマテリアル研究開発を先導し支える研究インフラ・プラットフォームをめざす。ナノテクノロジープラットフォームで端緒を開いた研究設備共用の文化を根付かせることや、ここから新たな研究文化を構築していこうとすることを、より一層確実なものとするべく臨むことが肝要となる事業であろう。

マテリアル先端リサーチインフラの各ハブ機関は、データを収集、蓄積するためのデータ管理システムを構築し、各ハブおよびスポーク機関の利用研究課題を通じて創出されるデータを集約するとともに、高品質で膨大なデータ群を利活用可能なデータセットに変換する。さらに、利用者に対するデータ利活用環境の構築、提供を図り、さらなるデータ活用型研究に供する。蓄積したデータのうち一部は、国立研究開発法人物質・材料研究機構が構築するデータベース（データ中核拠点）へ登録することにより、上述のマテリアルDXプラットフォーム構想下で、最先端のデータ基盤及びデータ利活用環境を構築する10年計画の事業である。

1 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム, 共用設備利用案内サイト, http://nanonet.mext.go.jp/yp/（2021年2月17日アクセス）

■ポストコロナの研究開発の変革

2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、世界中のほとんど全ての社会活動に大きな衝撃を与え、その影響は短中期的なダメージのみに留まらず、中長期的な社会構造の転換さえも引き起こしかねない状況となった。これまでに述べてきたように、ナノテク・材料分野が、人類の活動の多くの場面とかかわっている、まさにその特性のために、当分野の研究開発は新型コロナウイルス感染症そのものや、それにより引き起こされる社会の変化によって強い影響を受けると予想される。

CRDSでは、ポスト/withコロナ時代におけるこれからの研究開発の新しい姿へ向けた調査報告書[2]を発行した。その中では、研究開発活動の変革を指す語として「リサーチトランスフォーメーション（RX）」を提唱し、新型コロナウイルス感染症による研究開発環境の変化を、進化・高度化の機会としてとらえるべきであると述べている。人と人、人と物の距離が変わってくる新しい生活様式（ニューノーマル）のなかで、ナノテク・材料に関する研究、人材育成をどう変えていくべきかに関して、実験装置の自動化や遠隔化、遠隔会議やオンライン授業といった、以前から提唱されているDXの推進だけでなく、コロナ禍中で経験したことやそこで得た知見を活かして、研究開発のやり方を根本のレベルからリエンジニアリングしてみるチャンスでもあるととらえるべきである。2020年末の時点で、新型コロナウイルス感染症は収束の兆候をみせていないが、ワクチンの接種が各国で始まり、1～2年のうちには、以前のような生活が行えるようになるかもしれない。人々や社会に内在する「何かが変わることを拒む傾向」（Inertia）に鑑みると、以前と異なった状態を強制されているこの時点にこそ、研究開発手法を刷新する最大のチャンスが訪れているといえる。

2 JST CRDS調査報告書「リサーチトランスフォーメーション（RX）ポスト/withコロナ時代、これからの研究開発の姿へ向けて（CRDS-FY2020-RR-06）, https://www.jst.go.jp/crds/report04/CRDS-FY2020-RR-06.html

2 俯瞰区分と研究開発領域

2.1 環境・エネルギー応用

地球環境の有限性に鑑みて持続可能なエネルギー社会に向かうために、SDGsに代表されるエネルギー、環境、経済、安全の観点でのさまざまな取り組みが世界的に進んでいる。日本は2020年、菅首相がパリ協定にもとづく2050年までの温室効果ガス80%削減目標を超えた、実質排出量ゼロの脱炭素社会の実現を所信表明した。この目標の達成には、太陽光発電、風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギーの導入の拡大を図り化石燃料の消費を最大限抑えること、エネルギー変換や利用に伴うエネルギー損失を小さくすることが不可欠となる。

環境・エネルギーへのナノテクノロジー・材料分野の貢献としては、再生可能エネルギーの高効率利用、効率的なエネルギー貯蔵変換、CO_2排出量の削減を可能にする材料技術、デバイス技術、プロセス技術を提供することがあげられる。本節では重要な研究開発領域として、太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリア、分離技術を取りあげる。

太陽電池は、高効率、低コスト、高耐久性への要求が高まっており、新たな半導体材料、素子構造、モジュール化技術の探索および実装での研究競争が激化している。 また、利用領域のさらなる拡大に向けて用途に応じた機能（安全性、軽量性、フレキシブル性、易交換性）の追求が進んでいる。

蓄電デバイスは、エネルギー変換機構で各種の分類があるが、化学エネルギーとして蓄積する二次電池の進展が著しい。民生用途に加えEV用途、グリッド電力貯蔵用途の急成長が見込まれ、大容量、急速充電、高出力、長寿命の実現に加え、特に安全性の向上を目的とした電極活物質や電解質、電池構造の開発が進められている。

パワー半導体は、増大する電力部門でのエネルギー消費を抑制するための高効率電力変換を目的として、動作時の電力損失の低減や高耐久性、低コスト化を目標に新たなワイドバンドギャップ半導体材料の開発、素子構造の革新に向けた研究が進められている。また多様化する用途・ニーズに応えるための高周波対応技術、小型化技術などの周辺技術の重要性も高まっている。

エネルギーキャリアは、再生可能エネルギーの時間的・空間的偏在という課題を克服することを目的とし、水素・アンモニア等のキャリアの製造技術、利活用技術、輸送技術の研究が進められている。要素技術の挑戦性はもとより、社会システム全体の変革を伴う領域であることから法規制、社会的受容性を十分配慮した研究開発が求められる。

分離技術は、化学プロセスの効率化、高純度材料の生成、環境負荷物質の回収など、低炭素社会・資源循環社会を支える基盤技術である。分離過程を分子レベルで理解し、高効率分離を可能にする材料系の開発や混合物質の相状態を理解した高効率プロセス設計が進められている。さらに資源循環への要求の高まりから、リサイクルシステム全体としての効率性を高めるための研究開発も進められている。

2.1.1 次世代太陽電池材料

（1）研究開発領域の定義

太陽電池は、太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するデバイス/テクノロジーであり、長きにわたる研究開発の結果、広く社会実装が進んではいるが、パリ協定後のGHG削減のために、より一層の普及が求められている。普及に必要な、高効率化・低コスト化を実現するための技術的検討は、もっとも古くから実用化されたシリコンの単結晶/多結晶/薄膜系、高効率太陽電池の代表であるIII-V化合物系、低コスト高効率が特徴のCdTe、CIS系に加え、近年、研究開発人口が増え効率が急上昇してきたペロブスカイト系などに対してさかんに行われている。これらに加え将来の超高効率化に向けた次世代太陽電池についても注目する。

（2）キーワード

シリコン系太陽電池、PERC型セル、パッシベーティッドコンタクト、CdTe、薄膜太陽電池、CIS薄膜太陽電池、低コスト化、高効率化、有機系太陽電池、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明、ペロブスカイト太陽電池、タンデム化、車載太陽電池、モジュール、リサイクル

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

地球環境・温暖化問題は、今世紀に入りますます顕在化し、喫緊の対応が必要となっている。2018年7月に閣議決定された日本の第5次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーについて、確実な主力電源化への布石としての取組を早期に進めることが明記され、また、2020年に就任した菅首相は、その所信表明演説において、2050年に温室効果ガスをゼロとすることを宣言するなど、わが国の再生可能エネルギー導入の姿勢は、大きく前進し始めている。

再生可能エネルギーの一番手である太陽光発電の大量導入は、明らかに世界の潮流となっている。すでに海外においては、超大規模発電所として、太陽光発電設備の建設が急激に進んでおり、日射量が豊富で大規模なシステムを安価に構築可能な中東地域では、1.6 USセント/kWh以下の入札事例が出てくるなど、低炭素かつ安価な電源として実績を出し始めている。

日本国内でも太陽光発電の普及は進んでおり、わが国における導入量は、2030年のエネルギーミックスで示された目標64 GWに、2019年末時点でほぼ到達している。しかし、2050年に向けた再生可能エネルギーを中心とする脱炭素化エネルギーシステムの構築には、少なくとも150 GW以上、長期的には300 GW以上とさらなる大量導入が必要とされる。高効率・低コスト・長期信頼性といった従来型の評価指標における次世代太陽電池セル・モジュールの研究開発に加えて、太陽光発電の「利用領域の拡大」を通じて、導入量を増やしていくことが重要となる。そのためには、用途に応じて、軽量、フレキシブル、任意形状、設置容易性、交換可能といった求められる機能を持つとともに、意匠性にも優れた、さまざまなタイプの太陽電池を提供することや、ゲームチェンジング・テクノロジーとなりうる第三世代太陽電池を早期実現することが、非常に重要な研究ターゲットとなっている。

［研究開発の動向］

Si系太陽電池や化合物半導体系太陽電池では、極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面

欠陥の低減、表面・界面パッシベーション技術、光マネジメントの最適化などの研究がさかんに行われてきた。また、集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目され始めている。

変換効率を極限まで高めるためには、さまざまな要素技術の研究開発が必要となる。結晶Si太陽電池では、金属酸化物や窒化物、二次元物質、有機高分子などの異種材料により高いパッシベーション性能と高い伝導特性を両立するパッシベーティッドコンタクト技術、表面・界面での精緻な化学組成制御などによる高性能パッシベーション、基板の超薄型化や超薄型基板にも対応可能な表面ナノ構造形成技術を駆使した光マネジメントなどの高効率化技術が必要である。また、低コスト化に向けて高品質基板の低コスト製造技術に対して産業界からの根強い要請があり、擬単結晶などの高品質インゴット製造技術、基板の大型化・薄型化技術の開発が必要である。高効率結晶シリコン太陽電池の主流であるPERC（Passivated Emitter and Rear Cell）型およびその改良版のPERL（Passivated Emitter and Rear Locally Diffused）型の太陽電池では、光照射・温度上昇による劣化現象であるLeTID（Light and elevated Temperature Induced Degradation）が課題となっており、その発生メカニズムの解明と抑制手法の確立が重要となっている。また、ペロブスカイトや化合物半導体とのタンデム化による超高効率化、接合界面のデザインとデザインした界面を実現するプロセス技術の開発が必要である。化合物系の太陽電池に関しては、今後、さらなる効率向上と低コスト化のために、集光型太陽光発電関連技術が重要となる。

CIS太陽電池では企業が高い製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っている。実用化規模の大面積モジュールの高効率化および低コスト製造プロセスにおいて日本は世界最高水準の技術を有している。超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国の安価なシリコン太陽電池や米国のCdTe太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にある。近年、CIS太陽電池では、CIS光吸収層の改良（K、Cs、Rb添加など）、接合界面の改質（CIS表面層のIn酸化物の制御）、バルクのキャリア密度上昇による高効率化のブレイクスルーがあり、変換効率23.4%を達成している。

有機系太陽電池として期待されている有機薄膜太陽電池に関しては、ここ数年の急激な特性向上（変換効率及び耐久性）により、一時の停滞期から脱して再び世界的に研究開発がさかんになってきた。現在、この研究を牽引しているのは米国と中国である。最近の進展は、新素材である非フラーレン・アクセプター（NFA）と、素子構造の精密制御によるところが大きい。今後さらなる変換効率の向上には、新規熱活性化遅延蛍光（TADF）材料や新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究、一重項エキシトン解裂を用いた革新的有機太陽電池の研究、三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究に加え、エキシトン解離に必要なバンド構造（オフセット・エネルギー）の解明が求められる。

量子ドット太陽電池に関しては、量子ドット・ナノワイヤを利用したもの、異なるバンドギャップを有する量子ナノ円盤構造を利用したものなどが提案されている。最近では、新規ペロブスカイト化合物（$CsPbX_3$）にて構成された量子ドットが注目されはじめ、マルチエキシトン生成を示唆する結果が報告されている。変換効率も PbS 量子ドットの記録を破り、$Cs_{0.5}FA_{0.5}PbI_3$（FA：formamidinium）量子ドット太陽電池にて16.6% が報告されている（豪クイーンズランド大学）。

ペロブスカイト太陽電池においては、発明からわずか9年ほどで、25.2%の変換効率が達成されている（米NREL 認証）。今後は、より一層の高効率化をめざした新規ペロブスカイト化合物やホール輸送剤の開発と発電機構の解明、高耐久化をめざした劣化機構の解明、低毒性化を目標とした非鉛系ペロブスカイト化合物の開発が重要となる。これらの有機系太陽電池の研究開発では、新材料の創出に向け、マテリアルズ・イン

フォマティクス（MI）の活用が精力的に行われるようになってきている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

結晶Si太陽電池

太陽電池用Si基板のシェアは、単結晶が増加傾向にあり、2019年度に単結晶が約65%、多結晶が約35%と数年前より多結晶を逆転している。また、日本発の技術である機能性欠陥の活用や種結晶のアレンジを工夫することで高品質擬単結晶インゴットを製造する技術についての研究が世界的に広がり、中国・GCLは量産化に至っている。基板サイズは、156.75 mm角（M2規格）が世界市場の約70%を占めるが、将来的に166 mm角（M6規格）、182 mm角（M10規格）、210 mm角（M12規格）に置き換えられるとの予測がある。

高性能セルの研究開発においては、単結晶シリコンでは、表面に電極のないバックコンタクト構造とアモルファスSiをベースとするヘテロ接合を複合化したセル構造を採用したカネカ社が26.73%（産業技術総合研究所測定）の世界最高効率を保有している。ホモ接合における最高効率はドイツ・ハーメルン太陽エネルギー研究所が報告した26.1%であり、n型単結晶をベースとし、バックコンタクト構造、酸化膜によるパッシベーション（ピンホールもしくはトンネリングにより導電性を担保）、高ドープ多結晶薄膜による接合を複合化した構造を採用している。多結晶Si基板をベースとするセルでは、中国・Jinko Solarが23.3%を達成し、中国・Trina Solarの持つ23.2%を0.1%更新した。プロセスが煩雑なバックコンタクト型に対し、よりシンプルなプロセスで高効率を追求する新規セル構造として、ドイツのフラウンフォーファー研究所は、界面再結合速度の小さい酸化膜を介してトンネル効果により電流を収集する「トンネル酸化膜パッシベーティッドコンタクト構造（TOPCon）」を提案し、その後、量産化技術開発も含め研究が世界中に広がっている。また、ヘテロ接合型太陽電池で課題となっている接合材料中での寄生吸収の低減に向け、より大きなバンドギャップをもつ酸化チタン、酸化モリブデン、酸化ニッケル、窒化チタンなどの金属酸化物や窒化物、グラフェンやカルコゲン化合物などの二次元物質、有機ELや有機薄膜太陽電池のキャリア輸送層に利用されるPEDOT/PSSなどの導電性有機高分子をヘテロ接合形成に適用する試みが行われている。

結晶Si太陽電池モジュールの廃棄・リサイクルのための技術開発も進んでいる。株式会社NPCでは、使用済み太陽電池モジュールの部材の分離を行うための手法として、ホットナイフ分離法を開発し、実用化している。加熱した金属刃を太陽電池モジュールのカバーガラスと封止材の間に差し入れて掃引することで、両者を効率よく分離できる。装置化も完了し、国内リサイクル会社での運用が始まっている。

薄膜 Si 系太陽電池

変換効率での不利を改善すべく、透明導電膜へのテクスチャ形成、透明中間層、プラズモニクス、フォトニック構造など、光閉じ込め技術の進歩が近年著しい。市場では、バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され、苦しい状況が続いているが、今後のさらなる生産量増大が必須の太陽光発電市場において、材料の安定供給面での優位性を考えると、中長期的な研究開発の継続が重要な分野といえる。またその特徴からエナジーハーベストデバイスとしての活用も期待される。東京都市大ではIoT用エネルギーハーベストデバイス応用を目的に両面受光型薄膜 Si 5接合太陽電池を作製し、3000 luxのLED照射下で4V以上の開放電圧を報告している。非晶質 Si、微結晶 Si では産総研などにより近年世界最高効率が更新され、着実な技術の向上がみられる。薄膜結晶 Si では、2020 年に Helmholtz Zentrum Berlin（HZB）がラインレーザによる溶融・

結晶化により、14μm厚の Si 結晶薄膜を作製し、IBC-SHJ セルにて開放電圧 645 mV、変換効率 15.1%を達成した。

CIS 系太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産1 GWを有するとともに、小面積セルでの世界最高効率（23.4%）を誇るなど、日本が世界を牽引している。近年、CIS太陽電池の変換効率の向上が加速している背景にはアルカリ金属を発電層成長後に添加するPDT（post-deposition treatment）処理がある。 KF-PDT処理をはじめとして、最近ではRbF-PDT、CsF-PDT処理などの重アルカリ金属処理が注目され、これらの処理によって光吸収層の品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。 CIS系タンデム型太陽電池の実現に向けては、ワイドギャップの硫化物カルコパイライトであるCu（In,Ga）S_2が開発され16%の効率が確認されている。効率30%のタンデムセルを実現するには、ボトムセルに24%のCIS太陽電池を用いた場合を想定すると、トップセルであるCu（In,Ga）S_2には少なくとも18%以上が要求され、高効率化の研究が今後も求められる。

また、CISの代替をめざして、レアメタルフリーの材料も開発が進められている。その代表格は、CZTSSeであるが、その他のレアメタルフリー材料として、Cu_2SnS_3、$CuSbS_2$、SnS、Cu_2O、$BaSi_2$などの研究開発も活発化してきている。CZTSSeの公式最高効率は11.3%（1.1761 cm^2、韓国のDGIST）である。

集光型太陽光発電

ビル壁面や自動車屋根などの新しい設置方式では、太陽電池コストよりも工事費などの付帯費用がかさむので、限られた設置面積でいかに発電量を増大するかといった方向に関心が移りつつある。最高効率の太陽電池は集光型太陽電池であるので（効率47.1%）、高効率を求め、欧州を中心に、新しい集光型太陽電池の研究開発が再燃している。大型架台を用いて大型パネルを高精度で追尾するといった、これまでの手法ではなく、微細な光学系やセル、モジュール内蔵の薄型駆動機構を組み込んだマイクロCPV（Concentrator photovoltaic）の新技術が研究開発の主流である。また、従来型技術では直達日射光しか活用していなかったためにCPVは高直達日射が得られる乾燥地域向けの大規模発電プラント向け技術とされていたが、マイクロCPVでは、微小光学系、微小駆動機構を組み込んでおり、通常のソーラーパネルと同程度の厚さで、かつ、通常のパネルと同様に、定置設置が可能である。

ドイツではSi太陽電池の上に1 mm程度の集光型太陽電池を配置する手法で34.1%のモジュール効率を記録している（集光型太陽電池の透過光を活用するとともに、パネル背面からの光も活用）。 EUのプロジェクト（イタリア、スペイン）では、薄型モジュール内部に追尾機構を組み込み、35.4%のモジュール効率を達成した。米国では、マイクロCPVの衛星用ソーラーパネルへの応用が進められている。日本では、機構による追尾に一切頼らず、非結像光学系技術を駆使した全天からの太陽光の有効利用により、32.8%のモジュール効率を達成した。この方式は、また、曲面化が可能であることから、高い信頼性が要求される車載応用が期待されている。

有機薄膜型太陽電池

この数年で急激な特性改善がなされている。2020 年の Best Research-Cell Efficiencies（米NREL）に掲載されている世界最高変換効率は、上海交通大学-マサチューセッツ大学（SJTU-UMass）の非フラーレン・アクセプターを用いた低分子系太陽電池の17.4%である。また、高分子系太陽電池では、浙江大学の Chen らの研究グループは、2種類の非フラーレン・アクセプターを高分子ドナーに添加したセルにより

17.0% の変換効率を達成している。

また、耐久性に関しても非常に大きい進展があり、プリンストン大学のForrestらによって実用上問題がないことが証明された。以前砂漠での耐久性試験でセルの安定性を確認していたが、昨年実験室での加速試験で27,000年安定であることが証明されている。応用面では、非フラーレン・アクセプターを用いた有機薄膜太陽電池は、可視域の透過率を高めた半透明太陽電池としての応用研究が急速に進展している。今後の市場への投入に向け、特に製造工程を考えると、溶液を用いた各種塗布法で製造できる高分子系太陽電池のさらなる進展が望まれる。

一方、発電機構の面では、励起子を解離するために必要と考えられてきたドナー・アクセプター材料のエネルギーオフセットが0.1eV未満の系でも、効率良く電荷生成する系が報告されている。これにより、エネルギーギャップE_gと開放電圧V_{OC}との光エネルギー損失が0.5 eVを切る系が報告されるようになった。有機薄膜太陽電池のもっとも大きな損失過程が低減できる可能性があるため、今後のさらなる機構解明が求められる。現在の有機薄膜型のベンチャー企業としては、米国の NanoFlex Power Corporation やドイツの Heliatek があげられる。

色素増感型太陽電池

シャープが2012年に達成していた色素増感太陽電池の最高変換効率を、8年ぶりにEPFLが更新し、12.3%になった（米NREL認証）。他の有機系太陽電池に比較して、変換効率の観点からはほとんど飽和状態にある。一方、商品化に向けた取り組みには進展がみられ、最近の最大のニュースは、リコーが2020年、完全固体型色素増感太陽電池モジュールの販売を開始したことである。色素増感太陽電池で完全固体型は世界初となる。

色素増感太陽電池の世界の主要なベンチャー企業は、G24i から発展した G24 Power（英国）と3GSolar（イスラエル）がある。色素増感太陽電池は実用化段階に入っており、研究者数そのものは大幅に減少傾向にある。それに伴い、ペロブスカイト系太陽電池の研究人口が増加している。現在、色素増感太陽電池の世界の研究開発拠点として残っているのは、EPFLのGrätzel研とHagfeldt研である。その研究は、ドナー・アクセプター結合型の新規色素の開発が継続されている。さらに電解質では、Voc のロスがヨウ素系電解液よりも小さいCo系、Cu系電解液を用いた高効率化研究に集約されてきた。

ペロブスカイト太陽電池

現在の世界最高変換効率は高麗大学の25.2%である（米NREL認証）。シングルセルでの変換効率は上限に近づいてきており、それに合わせて商品化に向けた取り組みがさかんになってきた。わが国での最近のトピックとしては、パナソニックがNEDO事業「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」で、大面積モジュール（開口面積802 cm^2：縦30cm×横30cm）で世界最高変換効率16.09%を達成したことがあげられる。この製造工程では、低コスト化が可能なインクジェット法が用いられている。また、三菱マテリアルは本年、ペロブスカイト太陽電池の製品化をめざすエネコートテクノロジーズ（京大発スタートアップ）へ出資を行った。エネコートテクノロジーズはJSTおよびNEDOプロジェクトで得られた成果を活用している。また、欧米でも新たな取り組みが継続しており、ドイツ Fraunhofer 研究所による建材用途に大面積セルの作製、英国のベンチャー企業 Oxford Photovoltaics のペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発などの例があるほか、ベルギーでは、IMECがペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発を精力的に進めている。また、カナダ・サスカチュワン大学ではフレキシブル太陽電池実現の可能性が明らか

にされている。

上記のペロブスカイト太陽電池は鉛を用いているが、その毒性に対する懸念から、鉛フリー の研究もさかんであり、ハロゲン化 Bi 系金属化合物で 4 % 程度の効率が報告されている。また、もっとも研究が注力されているSn 系ペロブスカイト太陽電池の効率も上がってきており、再現性のある10%以上の変換効率が報告されている。

高効率化をめざした研究開発では、世界中で各種タンデムセルが精力的に検討されている。シリコンとのタンデムセルでは、世界最高の変換効率はドイツHZB Instituteの 29.1%である（米NREL認証値）。なお、先に述べたOxford Photovoltaicsは28%の変換効率を得ている。さらに、究極のセルであるペロブスカイト・ペロブスカイト・タンデムセルでは、スタンフォード大学とオックスフォード大学が共同で 20.3% を達成している。タンデム化においてはシングルセルで 25% 以上が達成されているため、26%以上の変換効率が求められ、それをめざした研究開発が世界中で精力的に実施されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

- 2020年度より、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」が開始された。このプロジェクトは、太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいなかった場所を利用可能にするための太陽光発電システム開発や、長期安定的な事業運営を可能にするために、現在顕在化している事業上の課題を解決する技術開発を行うものである。新市場創造技術開発、および、安全性・信頼性確保技術開発の課題に対して、産学連携体制で真正面からの取り組みが期待されている。
- NEDOでは、2020年度より「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」が開始された。この事業は、2030年以降に温室効果ガス排出量の大幅削減など、気候変動問題解決に資するクリーンエネルギーや環境分野における革新的技術の開発を目的として実施するものであり、太陽光発電の技術ポテンシャルへの期待も大きい。
- Si系太陽電池に関しては、2015～2020年にNEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発プロジェクト」が実施され、6大学（豊田工業大学、明治大学、名古屋大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学）コンソーシアム体制によるヘテロ接合太陽電池など次世代型セルのオープンイノベーションプラットホームが構築された。また、北陸先端科学技術大学院大学では、Cat-CVD によるドーピングやパッシベーション技術のヘテロ接合太陽電池への実装で進展があった。産業技術総合研究所では、次世代薄型結晶Siモジュールの研究開発や高性能キャリア選択性パッシベーティッドコンタクトの開発が進められた。 JST-CRESTでは、名古屋大学が、高品質シリコンインゴット創製に向け、実験、理論、シミュレーション、データ科学を融合させた新たな研究開発の方法論の構築に取り組んでおり、結晶欠陥に関連する特徴領域抽出、粒界の原子構造や物性を解明する新たな計算法、多結晶組織やその変化の新たな計測手法など、多様な材料に横展開可能な基盤技術の創出を進めている。
- CIS 太陽電池では、NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所と複数の大学からなるオールジャパン体制で CIS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究が実施され、ソーラーフロンティア社から世界最高効率である23.25%が報告された。
- JST の未来社会創造事業では、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の開発、超薄型シリコン系トリプル接合太陽電池の開発が進められている。地球規模課題である低炭素社会の実現に向けてボトルネックとなっている課題の新規募集も継続して行われている。

・集光型太陽光発電システムの研究開発としては、2015年7月より、超高効率・低コストIII-V族化合物太陽電池モジュールの研究開発がNEDOプロジェクトとして実施された。このプロジェクトでは非集光でも変換効率30%を超えるモジュールが開発されており、新しい用途が期待される。日本における一般的な自家用車の一日あたりの走行距離は30 km程度であり、この高効率モジュールを車載太陽電池として用いることにより、電気自動車における一日30 km分の電力を発電することが可能となる。
・有機系太陽電池では、ペロブスカイト太陽電池のプロジェクトに資源を集中して研究開発が進められている。具体的には、NEDO プロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」（2019年度終了）や、JST の未来社会創造事業があげられる。有機薄膜太陽電池においては新しいプロジェクト投資が減っており、以前実施された JST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、わが国の基礎研究開発を牽引している。

（5）科学技術的課題

短期～中期的な視点では、実用太陽電池の主流である結晶 Si 太陽電池において、変換効率を極限まで高める技術開発が必要である。またポスト PERC 型の高効率セル構造では、海外企業に遅れをとらないように、容易に追いつくことのできない技術の確立と早期の量産化を行うべきである。金属酸化物などの異種材料による接合形成や局所ドーピングを駆使することにより、半導体レーザや超高速トランジスタで用いられているような「バンドエンジニアリング」の概念を実用太陽電池でも具現化する必要がある。 Si をボトムセルとするタンデムセルによる超高効率化には、Si と整合性に優れたバンドギャップ 1.5 ～ 1.7 eV 程度の半導体材料の開発が必要である。金属と Si 化合物であるシリサイド半導体、シリコンをベースとするナノ構造、ペロブスカイトなどがその候補としてあげられる。

長期的な視点では、太陽電池が自立的に普及し始めるためには、現在の理論限界効率を突破するような、飛躍的な変換効率の向上が可能な新概念太陽電池が必要となる。ナノワイヤや量子ドットなどの量子構造を用いた太陽電池はその1つの候補である。また、蓄電や熱電といった機能を有する多機能太陽電池により、さらなる光電変換効率の向上やエネルギーの有効利用、利用用途の拡大などが可能となる。これらの新概念太陽電池は現在の太陽電池よりも非常に高い限界効率を有するものの、その多くは未だ基礎研究の段階である。

また、真の再生可能エネルギー源として普及させるには、単に太陽電池単体の開発だけでは不十分であり、モジュールとしての効率向上、長寿命化に加えて、用途別の太陽電池開発、システム技術の開発が不可欠である。需要地近接型では、建物壁面、工場の屋上など、軽量、可撓性、意匠性が求められるとともに、建材相当の長期安定性、信頼性が重要となる。

加えて、世界的な導入量拡大が始まってからすでに10数年が経過し、発電性能を維持するための維持管理技術、不具合等を屋外において検出する点検技術、設備更新や廃棄時のリサイクル技術等の重要性が高まっている。日本でも固定価格買取制度導入から20年経過以降、全量買取の対象であった多くの発電システムから、大量の太陽電池モジュールが排出されることが予想されている。設備を更新し、長期的に主力電源として太陽光発電を利用していくためにも、これらのモジュールの適切なリサイクル技術の開発が不可欠である。

CIS太陽電池については、日本の企業（1社）が世界一の製造技術を有するとともに変換効率の面でも世界トップレベルを維持している。この技術的優位性を維持するためにも、産官学の連携が必須である。特にCIS 太陽電池では光吸収層の準安定性による欠陥密度評価の難しさ、5元素以上にも及ぶ多元系化合物半導

体の電子構造評価の難しさを克服するためにも官学による評価・分析面に関する学術面のサポートが必要である。

超高効率III-V化合物太陽電池については、その圧倒的な高効率が魅力である。搭載可能面積の限られた車載太陽電池やモバイル型太陽電池は今後急速に発展すると考えられ、それらの新規用途をめざした研究開発が課題となる。また、III-V化合物太陽電池を用いた集光型太陽電池は高日照地域で特に高パフォーマンスを示す。集光型太陽電池の効率や実環境下での発電特性、さらには耐久性を向上させることにより、高日照地域で太陽発電由来の水素を生成することが可能となり、これまでの化石燃料に頼るエネルギー供給の在り方を変える開発課題となる。

有機薄膜太陽電池については、非フラーレン・アクセプターに代表される新材料の開発、3元ブレンドなどの新素子構造の提案により、急激な変換効率の向上がみられ、すでに17％以上の変換効率が達成されている。また、十分な耐久性を有することも実証された。この非フラーレン・アクセプターに代表される新規材料の開発では中国の勢いが目覚ましく、国家重点としての取り組みが成果をあげている。また、米国・欧州でも継続的に研究開発が実施されており、その成果にもとづいて例えば米国NanoFlex Power Corporationのようなスタートアップ企業が立ち上げられている。それに対して、最近のわが国における有機薄膜太陽電池への研究支援は大きく減少してきており、日本の国際競争力を維持するためには、長期的視点に立った研究支援を継続的に行う必要がある。実用化に向けた技術開発も吃緊の課題であるが、民間企業にとって投資リスクが大きいため、自立的な市場参入・拡大はあまり期待できない。そのため、国が主導的な役割を果たし、資金・人材面での支援を行い、技術開発の推進を後押しすることが求められる。

ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が順調に進んでおり、商品化に向けた取り組みも開始されている。今後の本格的な市場展開に向けては、さらなる高効率化、高耐久化、低毒性化等の多くの課題をクリアする必要がある。そのためには、国が主導した新材料開発、発電機構解明、劣化機構解明等の基礎研究を強力に推進するとともに、産官学連携による技術開発を効果的に進めていく必要がある。この新材料開発においては、各種の材料開発で有効性が示されてきたマテリアルズ・インフォマティクス（MI）の活用が望まれる。

（6）その他の課題

2030年、2050年といった長期的なエネルギー・環境政策の視点では、太陽光発電がわが国の主力電源として担う役割は大きく、太陽電池モジュールの自立的な導入を推し進めていく必要がある。今後は太陽電池モジュールの設置に適した土地が少なくなっていくことや、新しい応用先を探すなかで求められる太陽電池のスペックはますます高くなることが予想され、発電コスト以外の指標（kWh/m^2、W/g、曲げ性、意匠性、強度等）を重視したセル・モジュール開発が重要になると考えられる。このような出口・用途に応じた研究開発を行うためには、これまで行ってきたような材料種別の研究実施体制だけでなく、太陽電池を使う側（たとえば、ゼネコンやハウスメーカー、車メーカーといった出口ユーザー企業）から用途に応じたニーズを引き出し、国費の投入に資する技術目標と波及効果（エネルギー自給率やCO_2削減等のアウトカム）を明確にして研究開発を推進することが求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	高度な光とキャリアのマネジメントを具現化する多様な材料やプロセス技術が大学や研究機関で創出され、共用可能な高度なプロセス設備を含む試作ラインが構築された。 JST や NEDO のプロジェクトをはじめとした国の主導的な取り組みにより、京都大学発のペロブスカイト太陽電池ベンチャー企業が立ち上げられている。有機薄膜太陽電池は、JST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、継続して基礎研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↗	さまざまな種類の無機系太陽電池で、変換効率の世界最高記録（2020年4月現在）を保持するなど、高い技術力を保有している。一方で、大手太陽電池メーカーにおける国内の研究開発や生産体制は縮小傾向にあり、ソリューション・サービスへの転換が進む傾向にある。 有機系太陽電池の応用では、色素増感型が先行しており、リコー、シャープ、フジクラ等の各企業が発売に向けたセル開発を行なっている。 NEDOプロジェクトの成果にもとづき、2020年パナソニックがペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高のエネルギー変換効率16.09%を達成した。
米国	基礎研究	○	↗	MITではハイスループット実験、機械学習、シミュレーションを融合することで、太陽電池に適用可能な鉛フリーペロブスカイト化合物やその劣化を抑制するキャップ層材料の探索や太陽電池の耐久性向上のための材料探索を行っている。NREL、アリゾナ州立大学などでは、結晶Siをベースとするヘテロ接合太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトと結晶Siのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。ペロブスカイト太陽電池の商業化に向けては、NRELを中心とした研究開発コンソーシアムUS-MAPが設立された。 IBM 社は、CZTS 太陽電池で構成材料の最適化により小面積ながら12.6% の変換効率を報告している。 First Solar 社は CdTe 太陽電池で、セル効率 22.1% を報告した。新技術への取り組みは大学を中心に活発化している。有機系太陽電池では、ミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心、ペロブスカイト太陽電池では、コロラド大学、カリフォルニア大学バークレー校が研究を牽引している。
	応用研究・開発	○	↗	米中間貿易摩擦激化により、国内太陽電池モジュール生産能力が増加傾向にある。 SunPower社は、裏面接合型の結晶Si太陽電池モジュールで22.8%と高い効率を達成している。 Si基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、融液からの 直接成長やエピタキシャル基板など新しいアイデアが生まれている。 CdTe太陽電池市場には、新たな製造企業も参入している。有機系太陽電池ベンチャーの草分けとして、高分子系では Solarmer Energy、低分子系では NanoFlex Power Corporationが活躍中である。
欧州	基礎研究	◎	→	結晶 Si 系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を 維持している。ドイツFraunhofer研究所、ISFH、Konstanz大学、HZB、オランダTNO、ベルギーIMEC、仏INES、スイスEPFL、CSEMなど、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。 CIS太陽電池、CZTS 太陽電池ともに、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり取り組んでおり、研究水準は着実に上がっている。有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が依然としてさかんであるが、色素増感型ではなお、スイスEPFL（グレッツェル研）が研究の中心である。 EPFLはSi系薄膜においても世界の研究開発を牽引している。有機薄膜型では Imperial College やケンブリッジ大学が基礎研究を牽引している。ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学が世界の研究開発の中心となっている。さらに、ベルギーIMECでは有機系太陽電池の研究が精力的に実施されている。

	応用研究・開発	◎	→	結晶Si太陽電池では、太陽電池サプライチェーン再構築の動きが活発化しており、装置産業の復活に期待が高まっている。また、太陽電池製造コストの大幅削減につながる研究開発が産学連携体制で進められている。利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜Siではエリコンソーラー社により、小面積a-Siセルの安定化効率10%超が初めて達成されるなど、高い技術開発水準を有している。有機薄膜型では、Heliatek社 が 13% 以上の変換効率を達成しており、住宅向けにセルの販売を開始している。 集光型太陽電池・化合物太陽電池においても、高い技術開発水準を有している。研究機関で企業の研究所的な研究を展開しているので実用化は早い。
中国	基礎研究	○	↗	結晶Si系太陽電池は、産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。以前は、海外の研究機関等の追跡研究が主体であったが、研究水準は急激に上昇している。有機系太陽電池やペロブスカイト太陽電池においても留学時に培った人脈を活かし、国際共同で基礎研究を推進。潤沢な研究資金で猛烈な進歩を遂げている。
	応用研究・開発	◎	↗	原料からモジュールに至るまで中国国内での生産量は増加傾向にある。基板の大型化・多品種化、セル構造の高度化、ハーフカットセルを採用したモジュール生産が進められており、新しい技術の導入のために大規模な設備投資能力のある大手企業による寡占化傾向が強まる可能性が高い。数 GW～数十 GW/年の生産能力拡大計画が続々と発表されている。有機系太陽電池においては、多くのベンチャー企業が創立されている。
韓国	基礎研究	○	→	政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業を育成しようと研究開発を支援している。 Si系（結晶系、薄膜系）ではすでに出遅れており、ペロブスカイトおよび有機太陽電池を中心にして、材料、セルともに次世代技術開発に集中している。ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、高麗大学が世界最高変換効率 25.2 %（米国 NREL 認証）を達成している。
	応用研究・開発	○	→	政府による Renewable Energy 2030 戦略では、2030 年まで国内エネルギーの 20%を再生可能エネルギーでまかなうことを目標にしており、太陽光発電は 60%を占有する予定である。応用研究開発は高効率シリコン太陽電池発電システム開発に集中している。セルとモジュールの生産技術は世界レベルであり、R&D 水準は着実に上昇傾向にある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・太陽光発電（環境・エネ分野 2.1.4）

参考・引用文献

1) M. A. Green et al., “Solar cell efficiency tables (version 55)”, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28,

no. 1（2020）：3–15. doi：10.1002/pip.3228
2) NREL, “Best-Research Cell Efficiency Chart”, Photovoltaic Research, https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html（2020年12月20日アクセス）
3) K. Masuko et al., “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Het-erojunction Solar Cell”, *IEEE J. Photovoltaics* 4, no. 6（2014）：1433. doi：10.1109/JPHOTOV.2014.2352151
4) K. Yoshikawa et al., “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photocon-version efficiency over 26%", *Nature Energy* 2, no. 5（2017）：17032. doi：10.1038/nenergy.2017.32

2.1.2 蓄電デバイス

（1）研究開発領域の定義

電気エネルギーを入力して、それを一定期間保持したのちに、電気エネルギーとして出力するデバイスが蓄電デバイスである。エネルギーの保持のために、静電エネルギーとして蓄積するもの（キャパシタ）、電流（=静磁）エネルギーとして蓄積するもの（超伝導コイル）、運動エネルギーとして蓄積するもの（フライホイール）、重力（位置）エネルギーとして蓄積するもの（揚水発電）、化学エネルギーとして蓄積するもの（二次電池）などがある。ここでは、従来の携帯機器用電源から発展し、自動車等のモビリティのパワーソース、再生可能エネルギーをグリッドに適合させるためのバッファなどで、急速に用途が拡大し、価格も低下している二次電池を中心に取り上げる。先端リチウムイオン電池のほか、次世代電池候補の最右翼であるリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池を対象とする。

（2）キーワード

二次電池、蓄電池、リチウムイオン電池、次世代電池、ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池、リチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池、エネルギー密度、パワー密度、安全性、寿命、使用温度範囲、コスト

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

2019年ノーベル化学賞が「リチウムイオン電池の開発」による功績でJohn B. Goodenough、M. Stanley Whittingham、吉野彰の三氏に授与されたように、現代社会を支えるさまざまな電子・電気機器のエネルギー源としてのリチウムイオン電池は、欠かすことのできない基幹デバイスとなっている。リチウムイオン電池は1991年にソニー社が商品化して以来30年になるが、年間出荷量は電力量で約200 GWh、年間売上高は約5兆円に達し、金額ベースでは鉛蓄電池を抜いて最大の蓄電デバイスにまで成長した。また、環境調和社会に向けた環境保全・地球温暖化対策として自動車の電動化（EV化）が世界的に急速に進められており、2017年以降、民生用途（3C; Computer, Communication, Consumer electronics）を上回るほどまでに、EV用途の急成長が見込まれている。さらに、EVとともに地球温暖化対策としての太陽光や風力など気象により変動しやすい再生エネルギーの有効活用の観点から、グリッド電力貯蔵（Energy Storage System：ESS）用途も普及しつつあり、リチウムイオン電池が再生可能エネルギーを有効利用するための電力貯蔵用途として定置型でさらに大きな容量をもつ蓄電デバイス用途に期待されている。しかしながら、EVやESS用途などの中大型リチウムイオン電池の市場拡大には、さらなるエネルギー単価の低コスト化が必須である。

一方、リチウムイオン電池の性能向上の余地はまだ残されているものの、エネルギー密度向上の限界（350 Wh/kg）も見えてきており、リチウムイオン電池の性能を凌駕するいわゆる次世代電池（ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池などとも称される）の必要性が強調され、500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる二次電池を目標にした研究開発が全世界的になされている。その有力候補としてリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池などが注目を浴びている。

さらに、二次電池の、高エネルギー密度化・大容量化が進むほど充放電時の発熱が顕著となって放熱が難しくなるため、安全性の確保も喫緊の課題となっている。この要請を満たすために可燃性の電解質を不燃性の無機固体に替えた全固体電池もさかんに研究されている。

［研究開発の動向］

• リチウムイオン電池

二次電池に対する要求性能は、①高エネルギー密度、②高パワー（入出力）密度、③長寿命、④高安全性、⑤広使用温度領域などであるが、これらの間には互いにトレードオフの関係にあるものが含まれている。こうした要求に対して、材料、電極板、セルの各レベルでの研究開発がなされている。構成要素である①正極材、②負極材、③電解液、④セパレータ、⑤その他（導電材、バインダー、集電体、接着テープ、外装ケースなど）の材料開発は主に素材メーカーが担当し、それらを使用した電極板製造、セル組立の最適化開発を電池メーカーが担当している。

小型電池の最大の用途であるスマートフォン用パウチ型（ラミネート型）電池においては、従来からの黒鉛負極とコバルト酸リチウム（$LiCoO_2$: LCO）正極の組み合わせには変化はないが、スマートフォンの大型薄型化、高機能化に伴い、高エネルギー密度化、急速充電対応化およびそれに伴う高安全・信頼性化が継続的に要求されている。具体的には、①正極材：LCOの高電圧化と電極高密度化による比容量、容量密度の向上（満充電状態の正極電位：4.2 V vs. Li/Li^+、電流容量135 mAh/g → 満充電状態の正極電位：4.5 V vs. Li/Li^+、電流容量 200 mAh/g）、②負極材：人造黒鉛の低膨張化と電極高密度化による容量密度の向上、③電解液：低粘度カルボン酸エステル副溶媒による含侵性の改善と数種類の添加剤による寿命向上、④セパレータ：薄膜化とアルミナコートによる安全性の向上、⑤導電材：高価なカーボンナノチューブの極少量添加による活物質間の導電性確保などが採用されており、そのエネルギー密度は290 Wh/kg、720 Wh/lにまで向上している。

一方、EV用途には、角型あるいはパウチ型で、安全性重視の観点からマンガン酸リチウム（$LiMn_2O_4$：LMO）正極が初期に採用されたが、航続距離延長の要請からニッケルコバルトマンガン三元系酸化物（$LiNi_xCo_yMn_zO_2$：NCM）正極に移行しており、さらなる低コスト、高エネルギー密度化の要請から、Co削減 / フリー化、Niリッチ化の開発が推進されており（NCM333→NCM523→NCM622→NCM712→NCM811）、エネルギー密度も民生用途に近づいている。特筆すべき事柄としては、テスラ社はEV開発で最も安価なPC用円筒型18650電池（直径18 mm、長さ65 mm）を数千個使用するという奇抜なアイデアで創業した。現在では専用の2170電池（直径21 mm、長さ70 mm）を採用し、この電池を搭載したModel 3が約15%のEV新車市場を獲得し、ベストセラーEVとなっている。使用正極材はニッケルコバルトアルミ酸化物（$LiNi_xCo_yAl_zO_2$：NCA）正極であり、NCM系と同様にさらなるCo削減/フリー化、Niリッチ化を推進している（$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$→$LiNi_{0.9}Co_{0.05}Al_{0.05}O_2$）。さらに、バスやトラックなどの商用大型車には低コストで安全性の高いリン酸鉄リチウム（$LiFePO_4$：LFP）正極が使用されており、普及帯価格の中国内専用Model 3にもモジュールを介さない新たな設計手法であるCell-to-Pack技術を用いた蓄電池システムのセルとして、LFP正極が採用される予定である。

また、負極材に関しては、人造黒鉛系が主流であるが、安価な天然黒鉛の配合比の向上が課題となっている。容量向上のため、シリコン（Si）あるいは一酸化ケイ素（SiO）を担持した黒鉛の開発が推進されているが、充放電時の膨張収縮による劣化という本質的課題は解決されておらず、Si/SiO含有比率は10%未満で、物理的に膨張を抑制できる小型円筒型電池での採用にとどまっている。チタン酸リチウム（$Li_4Ti_5O_{12}$：LTO）負極も高パワー密度（高入出力）、高安全性、高耐久性など長所を活かして、マイルドハイブリッド車

への採用が進んでいる。

電解液に関しては、従来からの六フッ化リン酸リチウム（$LiPF_6$）を炭酸エステル（EC、PC、DMC、EMC、DEC）の混合溶媒に溶解した有機電解液が使用されているが、少量の添加で電池性能を向上させることができる添加剤の開発およびそれらの配合が主たる開発となっている。

セパレータに関しては、薄膜化が進行しているが、安全性確保の観点から従来の乾式法PP（ポリプロピレン）/PE（ポリエチレン）/PP3層膜から、湿式法PE微多孔膜にシフトする傾向にあり、アルミナやアラミドのコート品の比率が増加している。

上記のように、リチウムイオン電池は各材料系の特徴を活かした多様化が進みながらも、大量生産による低コスト化とともにその用途を拡大しつつある。この市場の拡大を受けて、高性能材料、新技術の研究開発も依然として継続されている。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極として使用するリチウム二次電池は、リチウムイオン電池が登場する直前に一時的に商品化されたことがある。しかし、リチウムデンドライト析出に起因する製品の発火事故の影響で、市場が大きく広まることはなく、代わりにリチウム金属を含まないリチウムイオン電池の方に開発の中心が移り、今日の普及にいたっている。

しかしながら、リチウム金属は最も負の電位（標準電極電位-3.04V）、高い比容量（3860 mAh/g）を有し、エネルギー密度的に究極の負極材となりうる材料であるので、その活用に再挑戦することは、ポストリチウムイオン電池候補の最有力と考えられている。正極材として、①リチウムイオン電池に使用されているものと同じ遷移金属酸化物を使用するリチウム遷移金属酸化物電池（Transition metal oxide：Li/TMO）、②もっと比容量の高い硫黄（1672 mAh/g）を使用するリチウム硫黄電池（Li/S）、③あるいは空気中の酸素（1675 mAh/g）を使用するリチウム空気電池（Li/O_2）の3種類の論文が2010年頃から増加している。いずれのリチウム金属電池系も有機電解液が使用されるが、各電池反応が異なるため、リチウムイオン電池とは異なった電解液材料が必要であり、高濃度電解液やイオン液体のような電解液系も検討されている。また、燃えやすい有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、固体電解質材料の研究開発も積極的に推進されている。各電池系に関する詳細を下記に示すが、多くは材料レベルの研究にとどまっており、実用電池レベルの評価にまではいたっていない。

• リチウム遷移金属酸化物電池

もともとリチウムイオン電池の登場直前まで開発されていた系であるとともに、材料構成はリチウムイオン電池の正極材探索時に使用するコイン型ハーフセルと同一である。リチウム金属は反応性が高いため有機電解液中での電気化学的溶解、析出のクーロン効率が低いためサイクル寿命が短い。また、リチウムデンドライトの成長によって短絡するので、安全性に劣るという本質的課題が存在する。その課題解決のための研究開発がさかんになっており、フッ素元素を多量に含む電解液でLiFを含む強健な固体電解質皮膜（Solid-Electrolyte Interphase：SEI）を形成する、あるいは、リチウム金属上に人工SEIを形成するなどの対策技術が開発されている。近年、米国スタートアップ会社を中心にNiリッチ正極、薄膜Li保護負極、高F含有電解液などを採用した実用的なパウチ型電池の開発が進んでいる。まだ、リチウムデンドライト抑制などのため、低レート（0.5C以下）の充電にしか耐えられないが、Sion Power社（米国）では480 Wh/kgのエネ

ルギー密度で、350サイクル以上の寿命を達成しており、EV用途のほかに、電気垂直離着陸車（electric Vertical Take-off and Landing Vehicle：eVTOL）や無人航空機（Unmanned Aerial Vehicles：UAV）などの特殊用途への適用に焦点を合わせている。

• リチウム硫黄電池

金属リチウムを含む二次電池としては古典的な系であり、1980年代に米国スタートアップを中心に開発されたが、その際に障害となった、硫黄の放電中間生成物であるポリスルフィドアニオンの電解液への溶出、そのレドックスシャトル効果による自己放電、サイクル寿命劣化という本質的課題に再挑戦している。2009年にメソーポーラスカーボンをホスト材として、その細孔内に硫黄を固定化することによって、その溶出を防止するという新技術が発表されてから研究開発が再燃し、さまざまな見地から研究されているもっとも論文件数の多いリチウム金属電池系である。活物質であるS_8およびその放電生成物であるLi_2Sは電子伝導性、Li^+伝導性がないので、正極内での電子およびLi^+移動を促進させるためには、大量（>30 wt%）の多孔質炭素を必要とする。また、作動電圧が約2 Vと低いため、高エネルギー密度化のためには、正極の面積比容量（mAh/cm^2）をより大きくする必要があるが、正極内の硫黄の充填量を多くするとその利用率が低下するだけでなく、正極の体積変化によるサイクル劣化が顕著になるという本質的課題が存在する。 Oxis Energy社（英国）では約400 Wh/kgのエネルギー密度で、数十サイクルの寿命を達成しており、EV、eVTOL、UAV 、自立型潜水艇（Autonomous Underwater Vehicle：AUV）などへの適用を検討している。

• リチウム空気電池

1996年にポリマー電解質中で$2\ Li + O_2 \leftrightarrows Li_2O_2$の充放電反応が起こることが発見された。酸素極は活性サイト表面上で、Li_2O_2を生成収納あるいは分解を触媒し、Li^+とO_2を輸送する細孔チャンネルが必要なので、電子伝導性が高く、表面積が大きく、密度の低い多孔質炭素が使用される。当初はリチウムイオン電池用の電解液を使用して検討されたが、系内で発生するスーパーオキサイドラジカルアニオンが電解液を分解し、上記の充放電反応ではなく、溶媒が分解することで電気が生成しているという事実が解明され、安定な溶媒系の探索の結果、グライム溶媒が比較的安定であることが確認された。しかしながら、スーパーオキサイドラジカルアニオン以上に活性の高い一重項酸素が発生することも確認され、これら活性酸素種に電解液および多孔質炭素が安定でないため、サイクル劣化が著しいという本質的課題が存在する。また、絶縁性の放電生成物Li_2O_2や副生物であるLi_2CO_3を分解する際の過電圧が高く、エネルギー効率が悪く、パワー密度も低いという課題も存在するが、レドックスメディエータによって、副反応を抑制することで性能が改善されている。まだ、実用的なセルで評価できる技術レベルにはいたっていないが、放電電圧は約2.7 V、約400 Wh/kgのエネルギー密度で2サイクル程度の実力である。ほとんどの試験は純酸素下で実施されており、空気から酸素を分離供給するシステムや空気中の水分、窒素、二酸化炭素などの影響といった基本的事項を検討できる段階にはないのが現状である。

• リチウム全固体電池

可燃性の有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、上記、3種類のいずれのリチウム金属電池系にも適用されている。しかしながら、もっとも注目を浴びているのはリチウム遷移金属酸化物電池に無機セラミック固体電解質を適用する研究開発である。その大きな理由は、①リチウムデンドライトによる短絡の抑制、②リチウ

ム金属の充放電効率の向上、③5 V級の高電圧正極の使用という有機電解液系で達成困難な課題を解決できる可能性を秘めているからである。

無機固体電解質は硫化物系と酸化物系に大別できるが、硫化物系固体電解質を用いた全固体電池の開発が先行している。硫化物系の特徴は、第一にリチウムイオン伝導度が酸化物系に比べて高いことであり、ものによっては有機電解液をも凌ぐ。これは硫化物イオンとリチウムイオンとの結合が酸化物イオンとの結合に比べて弱いため、リチウムイオンが動きやすいことに起因していると考えられる。また、同じく硫化物イオンとの結合が弱いことから硫化物系固体電解質は全般に柔らかい材料であり、圧粉成形だけで高密度かつ低抵抗なペレットが得られ、焼結過程なしでも電池を形成できる利点がある。硫化物系固体電解質では活物質との接合時に、特に酸化物である正極活物質との界面が高抵抗になる問題があるが、正極活物質と同じ酸化物でリチウムイオン伝導性があり電子伝導性のない緩衝層を挟むことで、抵抗が劇的に下がることがわかっているため、硫化物系の全固体電池では$LiNbO_3$等の酸化物を被覆した正極活物質粒子が用いられている。

一方の酸化物系固体電解質では、酸化物イオンがリチウムイオンを強く束縛していることからリチウムイオン伝導度が硫化物系に比べて1～2桁低い上に、硬くて扱いづらい材料ではあるものの、大気中でも安定なため製造上では大きな利点がある。これは、大気中のわずかな水分と反応して有毒な硫化水素を発生する硫化物系固体電解質とは対照的である。このように、安全性の観点からは酸化物系固体電解質を用いた全固体電池が理想的だが、低抵抗な酸化物系固体電解質ペレットを作るにしても酸化物は全般に高融点の材料であるため1000℃を超えるような高温の焼結過程が必要である。活物質との接合をこのような高温で行うと不要な界面反応が起き、活物質が活性を失ったり固体電解質が伝導性を失ったり、界面に高抵抗相が形成されるなどして電池動作しなくなるという大きな問題がある。現在は、微粒子化や助剤添加による焼結温度の低温化、低温焼結性や可塑性のある酸化物系固体電解質材料の開発、界面反応を抑制できる新奇な焼結プロセスの開発等により、低抵抗な界面を得る接合技術の開発が進められている。

多数のスタートアップ会社や研究機関がマスコミをにぎわせているが、室温で安定的に作動する高エネルギー密度電池の立証にはいたっていない。その理由として、固体電解質自身の電気伝導率や電気化学的・化学的安定性が不十分である場合も多いが、固体電解質と電極との接合における界面抵抗が大きいという本質的課題が存在する。一方で、大手電子部品各社（TDK、FDK、村田製作所、太陽誘電）が省電力化の進むIoT機器やウェアラブル機器用途に表面実装型（Surface Mount Device: SMD）の薄膜型全固体電池（酸化物系固体電解質）を開発中であり、一部量産化が始まっている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• リチウムイオン電池

寿命や安全性を担保しながら、正極材から高価なCoを削減する開発がEV用途で最大の課題であるが、CATL社（中国）、SKI社、LG Chem社（韓国）はNCM811（$LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$）を使用した電池を出荷し、NIO ES6、Kia Niro、Tesla Model 3などに採用され始めている。同様に、Envision AESC社（中国/日本）はSi/黒鉛複合負極、NCM811正極を使用して、エネルギー密度が292 Wh/kg、容量が75 Ahのパウチ型EVセルの開発に成功した。さらなる低コスト化のための脱Co化の技術開発が注目される。

マサチューセッツ工科大学発の米国ベンチャーである24M Technologies社が提供する半固体リチウムイオン電池技術を使用したクレイ型リチムイオン電池を京セラ社が住宅用ESS向けに開発した。あらかじめ電解液を練り込んだ粘土状の電極材料を厚塗する構造によって、高安全性、長寿命、低コストを実現した。同様

に、三洋化成社が出資するAPB社も全樹脂電池を開発中である。民生、EV用途のように体積エネルギー密度を重視しない定置用ESS用途に、電極の厚膜化による容量向上、製造法の簡素化による低コスト化からのアプローチであり、今後の進展が注目される。

• リチウム金属電池

米国立研究所Pacific Northwest National Laboratory（PNNL）は、電解液量が少ない条件下での故障原因はLiデンドライト形成による短絡ではなく、電解液の消費による液枯れによる抵抗増加であることを報告した。そして、加圧下ではあるが、エネルギー密度350 Wh/kgの2.5 Ahパウチ型セルで350サイクルの寿命を達成した。局所的Li^+配位構造の電解液を使用することでリチウム金属負極との反応性を抑制することに成功した。

リチウム金属電池に関する研究の多くが、実用的な電池設計を考慮せずに誇大性能を発表しているとの意見がある。特に、リチウム量や電解液量がエネルギー密度に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、大過剰のリチウム、電解液を使用して、リチウムイオン電池よりずっと低いエネルギー密度の条件下で実験しているケースがほとんどである。物質・材料研究機構（NIMS）は現行のリチウムイオン電池技術を転用した場合のパウチ型電池のエネルギー密度をシミュレーションし、新技術の適用なしには500 Wh/kgのエネルギー密度の達成は困難であることを立証した。それと同時に500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる電解液量では二次電池として機能しないとの報告も現れ始めた。

• 全固体電池

開発が先行する硫化物系固体電解質の全固体リチウムイオン電池は、有機系電解液を凌駕する高いリチウムイオン伝導度の実現と、正極-固体電解質との界面抵抗の問題の解決により、実用化に近づいている。耐久性や信頼性等、商品としての性能確認ができれば早期の市場投入が期待される。また、流動性のある電解液と異なり正極側と負極側で異なる固体電解質が使えることから活物質の選択肢が広がり、高電圧のために電解液が電気分解してしまう5V級のスピネルやオリビン酸正極材料等の実用による高エネルギー密度化の可能性もある。

一方、酸化物系固体電解質のリチウムイオン伝導度に大きな向上はないが、硫化物系固体電解質とは異なり酸化物同士となる正極と固体電解質の界面は潜在的には低抵抗となり、実際に薄膜型では数秒で充放電ができる内部抵抗の小さい酸化物固体電解質型全固体電池が作製できている。バルク型電池で低抵抗な接合を達成するための1つの方策として界面反応を抑制するための低温焼結化がある。単に材料を微粉化して焼結温度を下げることに加え、リチウムイオン伝導度は高いものの高温焼結が必要な酸化物固体電解質粒子（例えばガーネットの$Li_{7-x}La_3Zr_{2-x}M_xO_{12}$：M=Nb、Ta等）を、比較的低温で焼結できるがリチウムイオン伝導度はそれほど高くないLi_3BO_3やLi_2CO_3でコーティングしたコアシェル構造の粒子を用いた低温焼結化が試みられている。また、酸化物でありながら、硫化物ほどではないものの柔らかい固体電解質（例えばLi_3BO_3やLi_2SO_4等）を混ぜ込んで圧粉形成により低抵抗な界面を形成することも試行されている。

また、リチウムイオン電池においても有効な高エネルギー密度化の方策の1つとして、高容量かつ卑な負極材料として期待されているSiの実用化があげられる。しかしながら、Li挿入・脱離時の3倍にも及ぶ体積膨張・収縮によって、リチウムイオン電池では集電極から剥がれる問題があるため、現状では現行のグラファイト負極に少量を混ぜ込むことで高容量化をめざしている。一方、全固体電池では電解液中よりも大きな拘束圧がかけられるため、特に可塑性のある硫化物系固体電解質型全固体電池ではSi単体での使用も検討されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

2030年頃の実用化を目標に、EV次世代電池プロジェクトが世界中で国家プロジェクトとして進行中である。研究対象の電池系は各国ともほぼ同様であるが、以下に示すように、その重点の置き方は国ごとに異なる。

［日本］JSTのALCA-SPRING（Li硫黄、Li空気、Li全固体、Mg電池）、約150億円（2013～2022）。
NEDOのRISING2（フッ化物シャトル、亜鉛空気、コンバージョン、硫化物電池）、約150億円（2016～2020）。
NEDOのSOLiD-EV（全固体リチウムイオン電池）、約100億円（2018～2022）。

［米国］エネルギー省のBattery500（Li/TMO、Li硫黄、Li全固体）、50Mドル（2016～2020）。

［中国］国家重点研究開発計画「新エネルギー車」重点項目内（先端リチウムイオン電池、Li/TMO、Li硫黄、Li空気、Li全固体電池）、110M元（2016～2020）。

［欧州］Horizon 2020（2014～2020）内 次世代電池、90Mユーロ（2020）、Battery 2030+が継続。
ASTRABAT（Li全固体電池）、7.8Mユーロ（2020～2023）。
SOLiDIFY（Li全固体電池用材料）、7.8Mユーロ（2020～2023）。

［韓国］次世代リチウム金属二次電池核心源泉技術開発、24.3Bウォン（2018～2023）。

（5）科学技術的課題

• リチウムイオン電池

さらなるエネルギー密度の向上を目的とする正負極材の研究開発が必要である。具体的には、①インタカレーション反応の層状酸化物（Niリッチ、Liリッチ、カチオン無秩序岩塩構造）、高電圧スピネル酸化物、高電圧ポリアニオン錯体の高性能化、②遷移金属元素あたり多電子移動可能なコンバージョン反応の金属フッ化物、金属酸化物などの基礎探索、③Siを有効に利用するための材料開発と電極板設計、などがある。特に、後者2つはいずれも充放電に伴う体積変化が大きく、サイクル特性の良くない系であり、ナノテクノロジー（ナノカーボン材料の利用も含む）を利用して電極内の空間制御をする方法論の確立が必要である。

また、リチウムイオン電池の普及に伴う廃棄リチウムイオン電池のリサイクル、および資源再利用の研究開発も必要である。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極とする電池はリチウムイオン電池の発火事故の教訓から鑑みても、電池安全性に不安があり、それを払拭できるだけのリチウム金属負極制御技術の確立が必須である。また、無機セラミック固体電解質を利用したフレキシブルな無孔セパレータ膜が開発されれば、正負極間のクロスオーバー反応を防止することができるので、電解液系電池の寿命や安全性を飛躍的に改善できる可能性がある。

現時点では、リチウム遷移金属酸化物電池がエネルギー密度を含め全ての性能面で、リチウム硫黄およびリチウム空気電池を上回っている。後者2つの短所は、平均作動電圧がリチウム硫黄2.1 V、リチウム空気2.7 Vとリチウム遷移金属酸化物電池3.8 Vよりかなり低いことである。それを補うためには正極を厚膜化して、面積比容量を向上させることの可能な3D集電構造の技術確立が必須である。リチウム硫黄およびリチウム空気電池は、各国の国家プロジェクトの結果をみても、リチウムイオン電池の質量エネルギー密度を超えることは可能であるが、体積エネルギー密度はリチウムイオン電池より低くなる。したがって、EV用途への適用は現実的ではなく、軽量化を最重要視するeVTOL、UAV、AUVなどの用途をめざすべきである。

EV用途にはリチウム全固体電池が望ましいので、界面接合の本質的課題を重点的に研究開発する必要がある。

（6）その他の課題

大学が次世代電池を研究するには、現行のリチウムイオン電池の知識や技術が必須である。同様に、産業界もリチウムイオン電池の改良のためには、大学での新しい解析技術などが必須である。現行のリチウムイオン電池の延長上の研究は産業界で、公的資金は次世代電池のみという厳密な区分は国家全体の利益を考慮すると好ましなく、弾力的運用が必要である。電池材料と電池設計が電池研究の両輪であるが、どちらかを軽視している場合、科学的進歩にも実社会にも寄与しない中途半端な研究にとどまってしまうことになる。大学がブレーク技術を生み出すための基礎研究に、産業界がそれを実業利用に、国立研究所が大学と産業界を仲介する役割分担で、産官学連携できるような運営が好ましい。そのためには諸外国並みに本分野における人材の流動化が起こる環境を整備することが望まれる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ALCA-SPRING、RISING2などで、継続的に推進。特に、全固体電池の活動が顕著
	応用研究・開発	○	↘	・素材、電池、セットメーカーの市場シェア低下より、全固体電池以外は低調
米国	基礎研究	◎	→	・DOE、DODの資金で多数の大学、国研が参画。Li空気電池は低調。
	応用研究・開発	◎	→	・PNNL、Sion Power、SolidEnergyなどで、Li/TMO電池で顕著な性能向上 ・DOE資金でリサイクル研究
欧州	基礎研究	◎	↗	・Battery 2030+ initiativeで、大規模、長期の研究計画策定。2020年9月から7プロジェクトが開始
	応用研究・開発	○	↗	・韓国・中国系の生産拠点新設、その依存脱却を目指す欧州バッテリー同盟（EBA）、欧州バッテリー連合（EBU）などの活動が活発化
中国	基礎研究	○	↗	・全世界的なネットワークでほとんどの電池系で論文数がNo.1、指導的地位に
	応用研究・開発	◎	↗	・中国科学院が怀柔、溧陽、東莞に大研究センターを設立し、産官学が混然一体となって推進
韓国	基礎研究	○	↗	・リチウム金属負極に特化した国家プロジェクトが発足進行
	応用研究・開発	◎	↗	・LGC、SDI、SKIのEV市場シェア上昇により活況。コアシェル型Ni-rich正極の実用化

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用（電力貯蔵）（環境・エネ分野2.1.9）

参考・引用文献

1）Martin Winter, Brian Barnett and Kang Xu, “Before Li Ion Batteries”, *Chemical Reviews* 118, no. 23（2018）：11433-11456. doi：10.1021/acs.chemrev.8b00422

2）Matthew Li et al., “30 Years of Lithium-Ion Batteries”, *Advanced Materials* 30, no. 33（2018）：1800561. doi：10.1002/adma.201800561

3）Ghassan Zubi et al., “The lithium-ion battery：State of the art and future perspectives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89（2018）：292-308. doi：10.1016/j.rser.2018.03.002

4）Wontae Lee et al., “Advances in the Cathode Materials for Lithium Rechargeable Batteries”, *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 7（2020）：2578-2605. doi：10.1002/anie.201902359

5）Yingchun Lyu et al., “An Overview on Advances of $LiCoO_2$ Cathodes for Lithium-Ion Batteries”, *Advanced Energy Materials*（2020）. doi：10.1002/aenm.202000982

6）Richard Schmuch et al., “Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries”, *Nature Energy* 3（2018）：267-278. doi：10.1038/s41560-018-0107-2

7）Arno Kwade et al., “Current status and challenges for automotive battery production technologies”, *Nature Energy* 3（2018）：290-300. doi：10.1038/s41560-018-0130-3

8）Xiaoqiao Zeng et al., “Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles”, *Advanced Energy Materials* 9, no. 27（2019）：1900161. doi：10.1002/aenm.201900161

9）Wangda Li, Evan M. Erickson and Arumugam Manthiram,“High-nickel layerd oxide cathodes for lithium-based automotive batteries”, *Nature Energy* 5（2020）：26-34. doi：10.1038/s41560-019-0513-0

10）Gavin Harper et al., "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles", *Nature* 575, no. 7781（2019）：75-86. doi：10.1038/s41586-019-1682-5

11）Bin Liu, Ji-Guang Zhang and Wu Xu, "Advancing Lithium Metal Batteries",*Joule* 2, no. 5（2018）：833–845. doi：10.1016/j.joule.2018.03.008

12）Makoto Ue and Kohei Uosaki, “Recent progress in liquid electrolytes for lithium metal batteries”, *Current Opinion in Electrochemistry* 17（2019）：106-113. doi：10.1016/j.coelec.2019.05.001

13）Makoto Ue, Ken Sakaushi and Kohei Uosaki, “Basic knowledge in battery research bridging the gap between academia and industry”, *Materials Horizons* 7（2020）：1937-1954. doi：10.1039/d0mh00067a

14）Shuru Chen et al., "Critical Parameters for Evaluating Coin Cells and Pouch Cells of Rechargeable Li-Metal Batteries",*Joule* 3, no. 4（2019）：1094-1105. doi：10.1016/j.joule.2019.02.004

15）Chaojiang Niuet al., "Self-smoothing anode for achieving high-energy lithium metal batteries under realistic conditions", *Nature Nanotechnology* 14, no. 6（2019）：594-601. doi：10.1038/s41565-019-0427-9
16）Rudra Kumar et al., "Recent research trends in Li-S batteries", *Journal of Materials Chemistry A* 6, no. 25（2018）：11582-11605. doi：10.1039/c8ta01483c
17）Yin Hu et al., "Strategies toward High-Loading Lithium-Sulfur Battery", *Advanced Energy Materials* 10, no. 17（2020）：2000082. doi：10.1002/aenm.202000082
18）Won-Jin Kwak et al., "Lithium-Oxygen Batteries and Related Systems：Potential, Status, and Future", *Chemical Reviews* 120, no. 14（2020）：6626-6683. doi： 10.1021/acs.chemrev.9b00609
19）Shangqian Zhao et al., "Failure analysis of pouch-type Li-O_2 batteries with superior energy density", *Journal of Energy Chemistry* 45（2020）：74-82. doi：10.1016/j.jechem.2019.09.029
20）Shuixin Xia et al., "Practical Challenges and Future Perspectives of All-Solid-State Lithium-Metal Batteries", *Chem* 5, no. 4（2019）：753-785. doi：10.1016/j.chempr.2018.11.013

2.1.3 パワー半導体材料・デバイス

（1）研究開発領域の定義

高効率の電力変換を可能にする電力制御用半導体素子（パワーデバイス）を、その応用技術とともに研究開発する領域である。 SiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンドなど、原理的に高効率化に優れるワイドギャップ半導体の研究開発が進むなか、主流のSi（シリコン）パワーデバイスの性能向上も続けられている。ワイドギャップ半導体の結晶品質向上、ウェハの大口径化、物性制御、デバイス構造、作製プロセスなど、材料・デバイス技術に関する研究開発課題に加え、受動部品や制御技術、実装技術、応用技術など、システム化に関する研究開発課題がある。

（2）キーワード

パワーエレクトロニクス、電力変換、パワーモジュール、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、スーパージャンクション、高電子移動度トランジスタ、HEMT、SBD、PINダイオード、スケーリング、デジタルゲートドライブ、シリコン、Si、ワイドギャップ半導体、炭化ケイ素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga_2O_3、AlN、AlGaN、MOCVD、HVPE、アモノサーマル法、Naフラックス法、自立基板、転位

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

地球温暖化の抑制に向けて二酸化炭素（CO_2）排出量の削減が世界的に強く求められており、従来の化石燃料エネルギーから太陽光、風力、地熱、潮流など再生可能エネルギーへの転換を促進するとともに、エネルギー消費の大幅な削減が必要となっている。全世界の最終エネルギー消費に占める電力の割合は年々上昇し続けており、電力の役割が増している現代において、電力を高い効率で利用し融通するパワーエレクトロニクス技術の研究開発と普及が重要となる。パワーエレクトロニクス技術は、省エネルギー化だけでなく、再生可能エネルギーの直接利用を実現し、化石燃料エネルギーへの過度な依存からの脱却に貢献する。

パワーエレクトロニクスの研究開発領域は、①Si、SiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンドなどのパワー半導体材料・プロセス技術、②IGBT、MOSFET、HEMT、サイリスタ、ダイオードなどパワー半導体デバイスのチップ・モジュール技術、③インバータやコンバータなどパワー半導体デバイスを使用した電力変換システムとその応用、の3分野に大別できる。ここでは、ナノテクノロジー・材料分野と関係の深い①および②を中心にパワーエレクトロニクス分野を俯瞰する。

パワー半導体デバイスの開発の大きな目的は、電力密度を向上させ電力単価を低減させることである。そのためパワー半導体の動作特性として、導通時のオン抵抗低減およびスイッチング時の損失低減が研究開発目標となり、同時にオフ時の絶縁性能（オフ耐圧）を満たすことが要求される。今日のパワー半導体デバイスではSiが主として用いられているが、Siの材料定数の限界から来るデバイス性能の限界が指摘されており、高耐圧化と低損失化を両立できるワイドバンドギャップ半導体材料の研究開発が重要となる。 SiCおよびGaNはすでに実用化フェーズに進んでおり、システムの高効率化と、高周波動作による小型化が可能となった。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発も重要となっている。

パワー半導体デバイスの定格電圧は、IT産業に代表される低耐圧（100V以下）、民生・家電に代表される中耐圧（100V～600V）、産業ドライブ・運輸に代表される高耐圧（1200V）、鉄道・エネルギーグリッ

ドなどに代表される超高耐圧（1700V以上）と多岐にわたる。さらに、応用製品によって電流容量や周波数も大きく異なる。そのため、パワー半導体デバイスの研究開発動向は各耐圧領域に分けて議論することが適切といえる。また、整流・還流動作を目的としたダイオードと、スイッチング動作を目的としたサイリスタ・トランジスタ構造に分けての議論が必要である。パワー半導体デバイスは、一般にはパワーエレクトロニクス機器の中でダイオードとトランジスタを組み合わせたインバータ回路やコンバータ回路で用いられる。そのため、ダイオードおよびトランジスタの両者の性能向上が求められる。

［研究開発の動向］

世界のパワー半導体市場は2019年で約2.9兆円であり、このうち98%以上をSiパワー半導体が占める。2030年には4.3兆円に増大し、SiC、GaN、Ga_2O_3等のワイドバンドギャップ半導体の市場が著しく伸びる見通しであるが、Siパワー半導体市場も拡大し93%程度を維持すると予測されている。原理的に優れた特性を有するワイドバンドギャップ半導体の研究開発を進めるとともに、性能面とコスト面で着実に進歩を続けているSiパワー半導体デバイスの高い競争力を維持していくこともわが国にとって極めて重要である。以下、半導体材料ごとに研究開発動向を述べる。

• Si（シリコン）

低耐圧系（100V以下）では、現在普及しているSi-MOSFETのさらなる高性能化（低オン抵抗化）の開発が進んでいる。微細化・トレンチ構造などのMOSFETデバイス構造の改良とあわせて、Si基板の低抵抗化などによる性能向上が試みられている。後述する横型GaNデバイス（HEMT）は、低耐圧系でのSiの競合技術である。

中耐圧系（100V～600V）でもSi-MOSFETのさらなる高性能化が進んでいる。この耐圧領域ではスーパージャンクション（SJ）構造が用いられることが多く、トレンチ構造の最適化によるオン抵抗低減、プロセス技術の向上によるSJ構造の微細化・最適化が進んでいる。中耐圧系のうち600V付近ではSi-IGBTも普及している。今後、中耐圧領域の市場拡大は必然といわれており、この領域でも横型GaNデバイスが競合技術となる。

高耐圧系（1200V）ではSi-IGBTが主要パワーデバイスとして普及しており、フィールドストップ（FS）層導入、トレンチ構造の微細化、ウェハ薄膜化など、不連続技術の導入で性能向上を達成してきた。1200V系は、自動車等の電動化に伴って今後急激な需要の拡大が予想される。高耐圧系における競合技術はSiC-MOSFETである。

超高耐圧系（1700V以上）は、6.5kVまではSi-IGBT、それ以上ではSiサイリスタが主要なパワー半導体である。電力グリッド、電鉄などの超高パワー応用系に用いられることが多く、高耐圧とあわせて大電流容量が必須となる。超高パワー応用がゆえにパーセントレベルのわずかな損失も莫大な損失となるため、導通時のオン抵抗低減も必要である。再生可能エネルギーをはじめとする新電力エネルギーグリッドの拡大、世界規模での高速鉄道網など需要は大きく、この領域のSiパワー半導体技術開発は欧州・日本で競争となっている。超高耐圧系における競合技術もSiC-MOSFETである。

Siパワー半導体では、近年、大口径ウェハ量産技術開発により低コスト化が進んでいる。これまで200mm製造ラインが主流であったが、欧州のInfineonでは300mmラインでの製造が本格化している。米国ではLSI用の300mmラインをパワー向けに転用する動きがあり、中国では複数の300mmラインが建設中である。

• SiC（炭化シリコン）

1200V耐圧のSiC-MOSFETとショットキー・バリア・ダイオード（Schottky barrier diode：SBD）を使用したパワエレ機器・システムの研究が応用フェーズに移行している。同一電圧・電流定格のSi-IGBT/PNDモジュールと比較するとSiC-MOSFET/SBDモジュールの価格は4～8倍であるが、一部の太陽光発電用連系インバータや在来線鉄道車両などでSiC-MOSFET/SBDモジュールが実際に使用されている。産業機器や電鉄向け用途の1700～3300V耐圧素子、電気自動車や充電設備向けの650～900V耐圧素子も多くの企業から提供されている。2020年7月から営業運転を開始した新幹線電車N700SではSiCデバイスを使用したインバータが採用され、N700系のSi-IGBTインバータと比較して大幅な小型・軽量化を実現している。米国はコンピュータ断層撮影装置（CT）や核磁気共鳴画像装置（MRI）など医療用機器への応用で世界をリードしている。

製造コストを下げるため、デバイス製造ラインの主流は4インチから6インチへと移行した。高品質8インチウェハの市場投入も始まっている。ただし、デバイスを高い歩留まりで形成できる高品質大口径ウェハの供給量は十分ではなく、その確保が課題となっている。現在ほとんどのSiCウェハは昇華法により作製されており、長尺のインゴットを成長させることが難しい。成長速度の向上や長尺化、高品質化、さらなる大口径化をめざし、ガス法や溶液法による結晶成長技術の研究開発が進められている。

SiC-SBDは、技術的には高い完成度にあると考えられる。600V以上の耐圧系のパワーモジュールでは、従来のSiのpnダイオード（PND）に代わってSiC-SBDを採用したパワーモジュールが一般化してきている。 PNDと異なりSBDは蓄積キャリアが存在しないため、高速化・低損失化が可能となる。逆方向に高電圧が印加された際のショットキー障壁の電界を緩和してリーク電流を抑えるため、JBS（Junction Barrier Controlled Schottky）やMPS（Marged PIN Schottky）とよばれるp型層を配置したデバイス構造が主流となっている。

SiC-MOSFETは、従来からの課題である低いチャネル移動度が解決されたわけではないが、短チャネル化やトレンチゲート化などデバイス構造の工夫により、Siデバイスに対して十分な低オン抵抗を実現している。しきい値電圧変動の抑制も従来から残っている課題である。特に負ゲートバイアスを印加した際の変動が大きく、このため負バイアス印加が-5V程度に制限されているものが多い。 MOSFETにはpn接合のボディダイオードが内蔵されているため、インバータ回路ではこれを積極的に活用したい場面がある。ボディダイオードに通電すると、電子・正孔の再結合エネルギーにより基底面転位（basal plane dislocation：BPD）を起源として積層欠陥（stacking fault：SF）が拡張する、いわゆるバイポーラ劣化と呼ばれる現象が起こり、MOSFETのオン抵抗増大につながる。BPDを低減した基板の開発や、エピ成長初期にBPDを貫通刃状転位（threading edge dislocation：TED）に変換する技術が開発されている。どのような欠陥がバイポーラ劣化を引き起こすか、またはバイポーラ劣化を起こす再結合電流のしきい値などが研究されている。一方で、内蔵ダイオードの代わりにSBDをMOSFETに内蔵させる研究開発がさかんである。これまでは学会発表が主であったが、量産開始のアナウンスもされ始めた。用途によっては、今後の主流デバイス構造となる可能性がある。

10kVを超える超高耐圧SiCパワーデバイスについては、日本では電力系統応用をめざしたIGBTおよびPINダイオードの報告があり、米国ではDARPAの支援によりIGBT、GTO（Gate Turn-Off thyristor）などのバイポーラ型デバイスに加え、MOSFETも開発されている。

• GaN（窒化ガリウム）

Si基板上にヘテロエピタキシャル成長させたGaN層を用いた横型パワーデバイスの開発がさかんに行われ

ている。これは高周波トランジスタのGaN-HEMT技術を活用したもので、GaN-on-Si横型パワーデバイスとよばれている。このデバイス開発の最大の課題は熱膨張係数差によるウェハの割れであったが、GaNとSi基板の間にAlGaN/GaN超格子などを導入し、成長温度において熱膨張係数差を相殺する歪をGaNデバイス層に意図的に与える技術が進展し、製品化が可能となった。米国のEPC、International Rectifier（IR）、Transphormがまず製品化を行い、現在では、Panasonic、GaNsystem、On semiconductorなども製品化している。600V耐圧品を中心に製品の出荷が始まっており、ACアダプタ、サーバ用電源、LED用電源、太陽光発電システム用パワーコントローラなどの製品が開発されている。プラグインハイブリッド自動車のチャージャーの試作展示も行われ、自動車分野への採用も目前に迫っている。

一方、縦型のGaNデバイスも最近大きく進展している。レーザ用に開発されたハイドライド気相成長（hydride vapor phase epitaxy：HVPE）法によるGaN自立基板を用いた縦型GaNパワーデバイスの研究開発がこの7年間で大きく進展した。日米欧のプロジェクトにおいて、ウェハ、エピ技術、デバイスプロセス技術、デバイス構造などの検討、デバイス試作によるデモンストレーションが進んでいる。最終的に普及の鍵となるのはコストパフォーマンスであるが、HVPE法によるGaNバルク結晶の作製技術が洗練されてきていることに加え、三菱ケミカルで開発されているアモノサーマル法や、大阪大学で開発されているNaフラックス法など、高い量産性が期待される技術が立ち上がりつつある。

• Ga_2O_3（酸化ガリウム）

Ga_2O_3に関しては、近年研究者人口、学術論文出版数の大幅な増加が認められる。最安定結晶構造に相当するβ-Ga_2O_3のバルク単結晶の融液成長技術開発に関しては、これまでのチョクラルスキー、Edge-defined Film-fed Growth（EFG）に加えて、ブリッジマン技術に進展が認められる。Ga_2O_3ウェハメーカーの最大手であるノベルクリスタルテクノロジーは、EFG単結晶バルクから6インチ径ウェハの製造に成功した。市販品として4インチウェハが生産されている。信州大学からは、水平ブリッジマン法による2インチ径単結晶バルクの育成が最近報告された。薄膜エピタキシャル成長に関しては、分子線エピタキシー（molecular beam expitaxy：MBE）、ハライド気相成長法、有機金属気相成長法（metal organic CVD：MOCVD）などの開発競争が行われている。

日本や米国を中心にデバイス開発も活発化しており、トランジスタ、ダイオードの開発の成果がこの1～2年でさらに多く発表されるようになった。縦型構造に関してはトランジスタ、SBDともに着実な進展がみられるが、横型トランジスタについてはデバイス特性の小さな改善にとどまり大きな進展は認められない。

準安定構造に相当するα-Ga_2O_3の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。α-Ga_2O_3は、主にサファイア基板上のヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中ではもっとも研究が進んでいる。 FLOSFIA社はα-Ga_2O_3を用いたSBD、トランジスタの開発を進めている。その他、準安定構造であるε-Ga_2O_3の薄膜結晶成長研究も、国内外機関から報告されている。

• ダイヤモンド

高耐圧・超高耐圧領域の将来技術として、優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有するダイヤモンドについても半導体物性の理解とあわせて、ダイヤモンド基板の合成、ダイオード、トランジスタ原理実証などが試みられている。日本にはダイヤモンドのCVD合成の先導的な研究、リンによるn型ドーピング、ノーマリーオフ特性を持つMOSFETの動作実証など、当該分野での画期的な先行研究が行われている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

Siパワーデバイスでは、わが国発のIGBT新技術「IGBTスケーリング」の効果実証がなされ注目を集めている。これはIGBTのMOS駆動部の密度を上げずに微細化（スケーリング）することで、MOS駆動の性能を向上させつつキャリアの逆注入を抑え、キャリア注入レベルを向上させる技術である。1200V系でも3300V系でも従来IGBTと比較して約35%のターンオフ損失が実現されている。 IGBTスケーリングによりゲート駆動電圧を従来の15Vから5Vに低減できるため、ゲート駆動集積回路をデジタル化し、人工知能（AI）などの最先端情報技術を用いてパワーエレクトロニクス機器をインテリジェント化することができる。

SiCパワーデバイスに関しては、Tesla製の電気自動車にSTMicroelectronics製のSiC-MOSFETが採用され、大きな話題となった。 SiC-MOSFETチップにSBDを内蔵したモジュールの研究開発は完了し、量産のための技術開発に移行している。耐圧1700VまでのSiC-MOSFETチップではSBDを除去して製造コストを抑える実装技術が進展している。欧州の大学では域内の公的機関から、米国の大学はNSFなどからそれぞれ研究資金を獲得し、10kV耐圧のSiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したSST（Solid-State Transformer）の研究を実施している。現在のSiC-MOSFETはプレーナゲート構造が一般的であるが、RohmとInfineonがトレンチゲート構造を採用したSiC-MOSFETのモジュールを市場に投入している。

GaNパワーデバイスに関しては、GaN-on-Si横型パワーデバイスが移動体通信の基地局に使用され始め、また小型で持ち運びが容易なUSB高出力充電器として販売されるなど、産業として本格的に立ち上がった。 GaN-on-Siは高速スイッチング特性でSiに対し圧倒的な優位性があり、スイッチング周波数を1MHzまで引き上げることができる。高周波化によりトランスやコンデンサなどの受動部品を大幅に小型化できるため、システム全体の小型軽量化、コスト低減を実現できる。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発が必要となる。また、極めて困難と考えられていたMgイオン注入によるGaNのp型化技術にも近年進展がみられた。2019年に名古屋大学のグループがポーランドの高圧物理研究所（UNIPRESS）と共同でMgイオン注入後の超高圧窒素アニール（1万気圧）の研究を系統的に行い、低温から高温までホール効果測定が可能なp型化に成功した。再現性や均一性などの問題が完全にクリアされ、注入Mgの70～80%がアクセプタとして働いていることが確認されている。MOS界面に関しては、ノーマリーオフの反転チャネルMOSFETでチャネル移動度150cm^2/Vsを越えるものが報告されており、Mgイオン注入領域上への横型MOSFETの試作も報告されている。2020年には内閣府の戦略的イノベーション創造プロジェクト（SIP）の研究成果として、Mgイオン注入を用いた耐圧1200VのGaN-MOSFETの試作が富士電機より報告された。また、SiC基板上にGaN-HEMTを作製するGaN-on-SiCパワーデバイスも検討されている。SiCの熱伝導率はSiの3倍以上であり、放熱効果が格段に優れている。

Ga_2O_3 パワーデバイスに関しては、この2年間に縦型SBDに関する多くの開発報告がなされた。米コーネル大学はトレンチ構造を採用した優れた特性のSBDを報告している。縦型トランジスタ開発は、コーネル大と情報通信研究機構の2機関で行われている。コーネル大ではトレンチ構造を用いた縦型フィントランジスタ（FinFET）を開発した。情報通信研究機構において開発された縦型トランジスタでは低コストプロセスであるイオン注入ドーピングを用いている。Ga_2O_3 薄膜エピタキシャル成長に関しては、特にこの2年でMOCVD技術の進展が目覚ましく、米国の大学と企業による研究開発によってHVPE成長膜と同等程度以上の結晶品質が実現された。MOCVDは高品質（AlGa）$_2O_3$ 混晶薄膜を成長可能であることも大きな利点である。

ダイヤモンドパワーデバイスに関しては、産業技術総合研究所発のベンチャー企業であるEDPが、10mm×10mmの単結晶ダイヤモンドを量産しているほか、アダマンド並木精密宝石がマイクロニードル成長法を

複合させて大口径基板の安定製造を可能にするなど、ダイヤモンドウェハの大口径化が進展している。またSiウェハとの直接接合技術も進展している。欧州ではElement Sixがダイヤモンドウェハ開発を行っている。ダイヤモンドMOSFETの開発でも日本がリードしており、金沢大学や早稲田大学でノーマリーオフ特性を有するMOSFETの動作に成功している。非プラズマプロセスによるダイヤモンド基板の高速異方性エッチング技術が開発されるなど、加工プロセス技術の研究開発も進んでいる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

各国で進められてきた大型プロジェクトの多くが2020年頃までに終了を迎え、Si、SiC、GaNについては、企業における量産技術開発フェーズに移行しつつある。ただし、国内のTIAやTPEC、米国のFREEDMなど、産官学のコンソーシアムで様々な研究開発課題に取り組む体制が継続している。以下、国内外で進行中もしくは最近終了した注目プロジェクトを地域ごとにまとめる。

国内では、経済産業省の「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」でSi-IGBTの研究開発が2014年度から2019年度まで実施され、IGBTスケーリングの実証やデジタルゲートドライブなどの成果をあげた。同プロジェクト内で SiCの 応用技術開発も進められた。2014年度から2018年度まで内閣府が主導したSIPでは、SiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンドに関する包括的な研究開発が実施された。研究費のおよそ半分がSiC 関係に投入され、高耐圧デバイス用の多層膜ウェハやその伝導度制御、6.5kV 級の SJ-MOSFET および 20kV 級のバイポーラ（IGBT、PIN ダイオード）デバイス、小型・高温・高速動作が可能な次世代モジュール、SiC-MOSFET/SBDモジュールのパワーエレクトロニクス機器・システムへの応用研究が進められた。2018年11月からのSIP第2期では、ユニバーサルスマートパワーモジュール（USPM）への応用をめざしたα-Ga_2O_3パワートランジスタ開発が行われている。文部科学省、環境省でもGaN パワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016 年には文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、名古屋大学を中心に GaN デバイスの研究開発が精力的に進められている。

欧州では、EU内のエネルギー融通、CO_2削減などを主目的に、パワーエレクトロニクス機器・パワー半導体関連の技術革新のために、各種プロジェクトが展開されてきた。2017 年度から始まったR3-Powerupでは、STMicroelectronicsがコーディネータとなり、Si-300mmパイロットラインを活用し、個別半導体素子開発からロジック、アナログデバイスとパワーデバイスの統合によるシステムオンチップ、パワーIC開発を進めている。2019年からはInfineonがコーディネータを務めるPower2Powerがスタート、300mmウェハによる1700V Si-IGBT技術、200℃動作での電力密度20%向上、キャリアライフタイムの50%向上などを目標に掲げている。ドイツではGa_2O_3結晶成長および物性研究に関する大型研究プロジェクトGraFOxが2016年から実施された。GraFOxは最近終了したが、その後継に当たる新規プロジェクト（仮称：GraFOx 2）が計画されている。パワーエレクトロニクス機器・システム関連では、アーヘン工科大学がドイツ最大の電力・ガス供給会社エーオンからの研究資金を得て次世代直流電力供給ネットワークの研究プロジェクトを推進している。

米国では2016年のトランプ政権発足後、大学のパワーエレクトロニクス研究開発予算が削減されたが、エネルギー省（DOE）や国防総省（DOD）からの補助金による研究プロジェクトは継続している。 DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）では、CIRCUITS（Creating Innovative and Reliable Circuits Using Inventive Topologies and Semiconductors）や

BREAKERS（Building Reliable Electronics to Achieve Kilovolt Effective Ratings Safely）などのプログラムが実施され、SiやSiC、GaNパワーデバイスを用いた回路技術や実装技術が研究されている。また、米国でのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体（SiC、GaN）の大規模適用により省エネルギー化をめざすプロジェクトPowerAmericaが、2015年から5年間、DOE主導で実施された。2019年から米国の複数大学が研究チームを結成し、ARPA-Eの資金援助を受けて、中電圧・高電圧高速直流遮断器に関する最長5年の研究プロジェクトを推進している。これは現在の交流給電ネットワークの一部を直流送電・配電に置換、あるいは併用の実現をめざしたもので、その要の技術が高速直流遮断器である。Ga_2O_3結晶成長および物性研究にも、DODから大型研究ファンドが相次いで投入されている。2019年からは空軍研究所（AFRL）とコーネル大の共同研究としてUCoE（University Center of Excellence）が始まり、Ga_2O_3材料およびデバイスの研究開発が行われている。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから、豊富な研究資金が各研究機関に配分されていると考えられる。SiCの材料、デバイス、システムの垂直統合開発をthe National Key Research and Development Program of Chinaの一環で行っており、多くの人材と予算が投入されているといわれている。また多くの大学や研究所がこの1～2年でGa_2O_3の研究開発を始めており、急激な盛り上がりをみせている。韓国ではMOTIE/KEITと呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンドDevelopment of epitaxies and power devices technologiesが2017年より実施されている。

（5）科学技術的課題

Siパワー半導体デバイスは、すでに完成した技術と考えられることがあるが、わが国の強みを今後維持していくためには課題が山積している。特にSi-IGBTにはまだ性能向上の余地がある。その1つが高速化（損失低減）である。バイポーラデバイスであるIGBTは、ターンオフ時にキャリアがnベース層に残り、電流が完全にオフになるまで時間を要する。オフ電流の切れの悪さは、そのままターンオフ損失の増大につながる。そこで第2のゲートを設け、第1のメインゲートとタイミングをずらしてnベース内のキャリアの動きを制御する方法（デュアルゲートIGBT）が提案されている。Si-IGBTの定格電圧の上限は現状6500Vだが、さらに高い耐圧（13000V）が達成できれば電力送電への応用も可能になる。また、わが国が圧倒的に強いSiウェハ技術にも多くの課題が残されている。Siパワーデバイスは縦型デバイスであり基板全体を活用するため、大規模集積回路（LSI）よりもウェハに対する品質要求が厳しい。特に酸素・炭素などの軽元素濃度低減が課題となっている。現在、Siパワーデバイス用のウェハはフローティングゾーン（FZ）法を用いて製造されているが、FZウェハは大口径化に対応できない。そこで大口径化が容易な磁場印加チョクラルスキー（MCZ）法によるウェハの高品質化が重要な研究開発課題となる。

SiCパワー半導体については、SiC基板製造技術がボトルネックとなっており、大口径化・高品質化・低コスト化を満足する結晶成長技術を開発する必要がある。現状使われている昇華法は、結晶成長科学としても、結晶成長技術としても、いまだ不明な点が多く、基礎的な観点から再構築する必要がある。また、Si-IGBTの代替として期待されるSiC-MOSFETは、MOS界面とイオン注入技術に課題が残されている。MOSチャネル抵抗成分は小さくなってきているが、依然として多くの界面準位、酸化膜欠陥、固定電荷が存在する。また、MOSFETのボディダイオードはイオン注入で形成されるが、イオン注入で形成したPINダイオードの順方向電流特性はエピ成長で形成したものに比べてオン電圧が高い。今後、pチャネルMOSFETやCMOS-ICへの展開、超高耐圧領域用のIGBTやPINダイオードなどバイポーラ素子の開発に向けて、MOS界面とイオン注入の基礎的な学理を構築する必要がある。

GaN パワー半導体については、p型イオン注入活性化技術、MOSFET技術が整い、信頼性向上とGaN基板の大口径化・低コスト化が次なる課題である。特にMOSFETでは、MOSの信頼性と安定性の向上が極めて重要な課題となる。アバランシェ耐量を代表例として、GaNパワー半導体の破壊物理の検討も必要である。横型デバイスを念頭にした大口径ヘテロエピタキシャル基板作製技術、縦型デバイスを念頭にしたバルク基板作製技術、デバイス不良をもたらす貫通転位の特定と抑制など、いずれも結晶成長科学・欠陥物理などと合わせて、装置技術としての開発が必要である。

Ga_2O_3については、本質的な課題として十分なホール濃度のp型の実現が困難なことがある。このため、他のp型材料を組み合わせる方法の検討も重要である。もう1つの大きな課題としてGa_2O_3デバイスの放熱性の向上がある。 Ga_2O_3の熱伝導率はSi、SiC、GaN と比較して 1 桁程度小さく、大電力動作時の自己発熱が問題となる。高熱伝導率および電気伝導率を有する異種材料基板への直接接合技術なども検討する必要がある。

ダイヤモンドパワーデバイスは既存のデバイスの性能を大きく上回る可能性があるが、ウェハ価格、成膜や研磨、エッチングなどのプロセス開発など、実用化に向けて解決すべき課題が多く残っている。デバイスの実用化には2インチウェハが必要とされており、2インチウェハの実用化は2025年、デバイスの実用化は2030年と予測されている。

パワーエレクトロニクス機器・システムの実用化・製品化には最先端の高性能パワー半導体デバイスだけでなく、磁気部品（変圧器、リアクトル）やキャパシタ（コンデンサ）などの受動部品、各種センサ、デジタル信号処理技術（DSP、FAGA、A/D 変換器などを含む）、制御技術、実装技術、放熱・冷却技術なども重要である。実際の製品では、パワー半導体デバイスではなく、他の部品が機器・システム全体の性能・仕様を決定する、いわゆる「ボトルネック」が存在することが多い。このため、パワー半導体デバイスの特性を十分に引き出せるような受動部品や制御技術、実装技術などシステム化の研究開発にも取り組んでいく必要がある。

（6）その他の課題

ワイドギャップ半導体材料は日本が主導的役割を果たして育ててきた技術であるが、欧米や中国が多額の研究資金を投入して研究開発を加速しており、今後も日本が技術優位性、産業競争力を維持していけるかどうか予断を許さない状況にある。特に米国では、Ultrawide bandgap（UWBG）と呼ばれる、SiCやGaNよりもバンドギャップの大きな半導体材料（Ga_2O_3、ダイヤモンド、AlN、立方晶BNなど）に対する注目が高まっており、研究ファンドが拡大し研究者人口も増加している。 Siパワーデバイスも着実に日々進化しており、常に新しい物理、科学、技術の導入が求められる。国内の量産工場で基礎的な検討や新規パワーデバイスの開発を行うことは困難であり、大学や公的研究所を中心に材料・デバイスの研究開発拠点体制、共通プラットフォームを整備していくことが重要である。次世代の研究開発を担う若手人材が不足していることも深刻な課題である。特にパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発には幅広い知識が必要であり、人材教育に時間を要し、企業の求人に対して大学からの人材供給が追い付いていない。大学におけるパワー半導体、パワーエレクトロニクス関係の教育を充実させ、産学官連携のプロジェクトの中で若手の学生、研究者、技術者に高度な研究開発の機会を提供することが望まれる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	Siパワーデバイス技術のポテンシャルは依然として高い。Si-IGBTスケーリング則の実証で世界をリードしている。SiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンドすべての材料で世界トップレベルにある。SiC 、GaNでは基板の大口径化、欠陥密度低減、MOS 界面準位密度の低減、イオン注入技術、縦型トレンチ構造 FET の開発が進展している。SiC-MOSFET/SBD モジュール技術の基礎研究が企業や大学を中心に進められている。GaN縦型パワーデバイスに関して、国家プロジェクトの成果が多く出ており、システムの基礎研究を行っている大学も増えている、応用第2期SIPでも高速スイッチングGaN縦型MOSFETの開発が行われている。Ga_2O_3の材料研究、デバイス基盤技術開発が、大学、国研、企業で広がりつつあり、発表論文数、国際会議の発表件数が増加している。ダイヤモンドでは、伝導型の制御、MOSFETの試作などで優れた結果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTではデュアルゲート技術など新技術開発が進んでいる。欧米がSiパワー半導体のシステム化に移行しつつあるのに対し、日本の技術開発は総じて個別半導体デバイスにとどまる。一方SiCについては、SiC-MOSFET/SBD モジュールの応用研究・開発が企業を中心に活発に進展し、SiCインバータが新幹線車両N700Sに搭載されるなど、SiからSiCへと置き換えが進んでいる。GaN は低耐圧品を主として市場への投入が進んでいる。低価格を指向した GaN-on-Si 基板と、縦型デバイスを指向した GaN 自立基板の2つの方向で応用研究が進められている。GaN自立基板について、HVPE技術の洗練、Naフラックス技術、アモノサーマル技術などの開発が進んでいる。ベンチャー企業のノベルクリスタルテクノロジーが世界で唯一Ga_2O_3 バルクおよびエピ基板の製造販売をスタートしている。
米国	基礎研究	◎	→	Ultrawide bandgap 半導体への注目が高まっており、Ga_2O_3関連の研究者人口が急激に増加している。研究資金提供元としては、AFOSR、NSF、ONR、DOEなどがあげられる。Siでは目立った動きは少ないが、SiCについては企業と大学の共同研究やコンソーシアムにおける研究でトップレベルの報告が多い。GaNに関する基礎研究は縮小傾向にある。横型のGaN-HEMTを使用したシステムの基礎研究を行っている大学が増加している。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTに関して、On semiconductor社がその製造を目的としてGrobalFoundries社の300mmラインを買収した。SiCについてはCree/Wolfspeedをはじめとする多くの企業でウェハやデバイスの研究開発および生産が行われている。ファウンドリも活用されている。DOEのCIRCUITS、BREAKERSプロジェクトではSiCおよびGaNパワーデバイスの応用技術の研究開発が進められている。主に性能と小型・軽量化を優先した医療機器、損失低減を重視した大容量太陽光発電を対象としている。横型のGaN-HEMについては、一部の米国企業はGaN-HEMTを使用したサーバ用電源を製品化している。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】パワー半導体関係のプロジェクトの多くが終了し、大学や国立研が企業と連携してパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発に比重を移しつつある。直近の製品化を見据えているため、Si-IGBTモジュールの使用を前提とした基礎研究が多く、SiC-MOSFET/SBDモジュールの応用に関する基礎研究は足踏み状態である。GaNについてはGaN-on-Siで低コストな縦型デバイスを開発するプロジェクトが進められている。 【ドイツ】Ga_2O_3に関して、ベルリン地区で大学・国研が一体となって材料研究プロジェクトが進められている。

	応用研究・開発	◎	↗	【EU】産業競争力強化を念頭にして材料からデバイス、応用まで垂直統合的にカバーするプロジェクトが進められてきた。 GaN-on-Si 横型パワーデバイスに関してIMECやフラウンホーファー研究所などで産学連携のプロジェクトが進行している。 Ga_2O_3デバイス開発は基盤技術開発の段階にある。 【ドイツ】Infineon社が世界で唯一300mmラインでのSiパワーデバイスの製造を本格稼働させており、圧倒的な技術とコスト競争力をもつ。SiC、GaNのデバイス技術でも世界をリードしている。 【スイス】STMicroelectronics製のSiC-MOSFETがTesla製の電気自動車に採用され、大きな話題となった。
中国	基礎研究	○	↗	欧米日から帰国した研究者が研究をリードし、かつ重点大学制度を活用した若手育成を徹底している。その結果、パワー半導体・パワーエレクトロニクスの国際学会における発表件数が著しく増加している。ただし、シミュレーションのみの研究や後追い研究が多く、オリジナリティやインパクトは高くない。 SiCに関しては、日欧米から輸入した最新のSiC-MOSFET/SBDで小容量パワエレ機器・システムの基礎研究を行っているが、周辺部品がボトルネックとなっている。GaN に関しては、基幹研究大学にGaN-on-Si横型パワーデバイスに関して多額の研究費が投入されており、GaN-on-GaNの研究も増えている。 Ga_2O_3について多くの大学から報告されるようになり、科学的・技術的レベルは大きく上昇している。
	応用研究・開発	○	↗	国内製造技術の強化を図る「中国製造 2025」には直接パワー半導体は取り上げられていないが、新エネルギー自動車（NEV）や鉄道などで膨大なパワー半導体の内需があり、複数のSi-IGBT向け300mmラインが建設中との報道もある。量的には今後数年で中国の世界シェアが急増する可能性がある。 SiCについても、ウェハ、デバイス、モジュールから最終製品まで一気通貫で開発が行われており、非常に活発である。展示会等で多くのブースが出展されている。 GaN については、HVPE 法による GaN 基板を作るメーカーが誕生し、創業から数年であるにも関わらずある程度の品質を実現している。GaN デバイスの市場投入の動きはまだ見られない。
韓国	基礎研究	△	↘	最近、国際学会で発表が低迷しているだけでなく、参加者（聴講者）数も低迷している。SiC-MOSFET/SBDやGaN-HEMTは輸入に頼っており、パワーエレクトロニクス機器・システムに関する基礎研究は低迷している。
	応用研究・開発	△	↘	これまでの財閥系の新材料開発の勢いはなく、低迷している。 Siデバイスについては On semiconductorが富川市の工場で生産することを発表しており、今後の開発が加速する可能性がある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）（環境・エネ分野　2.1.8）

参考・引用文献

1) 富士経済グループ『2020年版 次世代パワーデバイス＆パワエレ関連機器市場の現状と将来展望』(東京：富士経済, 2020), http://www.fuji-keizai.co.jp/report/detail.html?code=141909826.
2) 津田建二「パワー半導体の王者Infineonは冬の時代に何を考えるのか？」マイナビニュース, https://news.mynavi.jp/article/car-electronics-132/（2021年1月27日アクセス）.
3) 服部毅「半導体不況どこ吹く風の中国パワー半導体市場 - 2019年も12%成長の予測」マイナビニュース, https://news.mynavi.jp/article/20190308-785604/（2021年1月27日アクセス）.
4) 平本俊郎, 大村一郎「スケーリングIGBTが拓くパワーエレクトロニクスの新しいパラダイム」『応用物理』86巻11号（2017）：956. https://kyutech.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_action_common_download&item_id=5271&item_no=1&attribute_id=17&file_no=1&page_id=13&block_id=21
5) T. Saraya, et al., “Demonstration of 1200V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage with Superiorly Low Switching Loss”, *International Electron Devices Meeting, IEDM* 8614491（2019）：8.4.1-8.4.4. doi：10.1109/IEDM.2018.8614491
6) T. Saraya et al., “3300V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage”, *2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*（*ISPSD*）（2019）： 43-46. doi：10.1109/ISPSD.2019.8757626
7) ECSEL Joint Undertaking, “R3-Powerup”, COMODO, https://www.ecsel.eu/projects/r3-powerup（2021年1月27日アクセス）.
8) Y. Takeuchi et al., “A Novel Hybrid Power Module with Dual Side-gate HiGT and SiC-SBD”, *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*（*ISPSD*）（2017）：57. https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/event/symposium/ispsd2017/index.html
9) H. Yano et al., “Fast 4H-SiC Bulk Growth by High-Temperature Gas Source Method”, *Mater. Sci. Forum* 1004（2020）：5-13. doi：10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.5
10) K. Puschkarsky et al., “Review on SiC MOSFETs High-Voltage Device Reliability Focusing on Threshold Voltage Instability”, *IEEE Trans. Electron Devices* 66, no. 11（2019）：4604-4616. doi：10.1109/TED.2019.2938262
11) Y. Ebiike, et al., “Reliability Investigation with Accelerated Body Diode Current Stress for 3.3 kV 4H-SiC MOSFETs with Various Buffer Epilayer Thickness”, *Proc. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*（*ISPSD*）（2018）：447-450. doi：10.1109/ISPSD.2018.8393699
12) H. Yano et al., “Towards Making SiC ICs Durable and Accessible for Use in the Most Extreme Environments（Including Venus）”, *Mater. Sci. Forum* 1004（2020）：1057-1065. doi：10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.1057
13) R. Tanaka et al., “Mg implantation dose dependence of MOS channel characteristics in GaN doubleimplanted MOSFETs”, *Applied Physics Express* 12, no. 5（2019）：054001 doi：10.7567/1882-0786/ab0c2c
14) J. L. Hudgins et al., “An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices”,

IEEE Tran. Power Electron. 18, no. 3（2003）：907-914. doi：10.1109/TPEL.2003.810840
15) M. Higashiwaki et al., “Gallium oxide（Ga_2O_3）metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β-Ga_2O_3（010）substrates”, *Appl. Phys. Lett.* 100, no. 1（2012）：013504. doi：10.1063/1.3674287
16) K. Hoshikawa et al., “50 mm diameter Sn-doped（0 0 1）β-Ga2O3 crystal growth using the vertical Bridgeman technique in ambient air”, *J. Cryst. Growth* 546（2020）：125778. doi：10.1016/j.jcrysgro.2020.125778
17) J. Y. Tsao et al., “Ultrawide-Bandgap Semiconductors：Research Opportunities and Challenges”, *Adv. Electron. Mater*. 4, no. 1（2018）：1600501. doi：10.1002/aelm.201600501
18) H. Akagi, “Multilevel Converters：Fundamenntal Circuits and Systems”, *Proceedings of the IEEE* 105, no. 11（2017）：2048-2065. doi：10.1109/JPROC.2017.2682105

2.1.4 エネルギーキャリア

（1）研究開発領域の定義

再生可能エネルギーの本質的課題である時間的・空間的偏在を克服するために必要とされる。再生可能エネルギーを電力以外のエネルギー物質として長距離輸送し、中長期かつ大規模に貯蔵する媒体、エネルギーキャリアに関する研究開発領域である。有望なエネルギーキャリアとして、水素・アンモニア・有機ハイドライドなどがあげられる。再生可能エネルギーによる水素製造と水素の貯蔵・輸送・利活用技術としての液化水素、アンモニア・有機ハイドライドの高効率製造・脱水素技術（触媒・分離膜）、アンモニア・有機ハイドライドの直接活用技術などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、液体水素、アンモニア、有機ハイドライド、水素化、脱水素、クラッキング、オートサーマル反応、燃料電池、固体酸化物形燃料電池、アルカリ形燃料電池、アニオン交換膜形燃料電池

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

地球温暖化を抑制するため、2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする目標が掲げられており、そのためには脱化石燃料や低炭素化技術を進め、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要とされる。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは生産地が一般には都市部など消費地の遠隔にあり、さらに時間や季節、天候によって得られるエネルギー量が大きく変動する。クリーンで、かつ量的な可能性を有する再生可能エネルギーを大規模に利用するためには、エネルギーの生産地で水素を多く含む化学物質（エネルギーキャリア）を製造し、これを消費地まで運搬して最適な形で水素やエネルギーに戻すようなシステムの構築が必要となる。水素、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニアなどがエネルギーキャリアとして注目され、普及、実用化に向けて検討が進んでいる。液化水素は純度が高く、水素ステーションなどでの利用に向いているが、沸点が低いために、液化に要するエネルギーや運搬貯蔵中のボイルオフの問題がある。 MCHは石油インフラがそのまま使える優位性があるが、この3者のなかでは水素貯蔵密度が低い。アンモニアは貯蔵密度が高いが有害性の問題があるなど、エネルギーキャリア候補はそれぞれ長所と短所を抱えており、またエネルギーキャリアとしての導入にいたる開発のステージも異なっている。MCH、液化水素については国際的な製造輸送の試みが始まろうとしている。

［研究開発の動向］

エネルギーキャリアに関するプロジェクトとして、古くはEuro Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project（EQHHPP、1986～1998年）にて液化水素、アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキサン系有機ケミカルハイドライドをエネルギーキャリアの候補とし、カナダの水力発電を用いて欧州に大規模水素輸送を行うプロジェクトが実施された。 EQHHPPではメチルシクロヘキサンから脱水素する触媒が開発できなかったことから、液化水素が現実的な選択とされた。これをうけ、日本のWorld Energy NETwork（WE-NET、1993～1998年）では、液化水素をエネルギーキャリアとして南米およびカナダの水力発電を基盤としたプロジェクトが実施された。その後、世界的に水素関係の研究開発は燃料電池に集中投資されていたが、近年、

世界的にも二酸化炭素排出量抑制のためには再生可能エネルギーを基盤とする必要があり、水素の重要性が再認識されている。

再生可能エネルギーによる電力の導入による電力網のアンバランス解消と電力をさまざまな用途で利用する技術としてのPower to Xのキー技術として、世界的に水電解による水素製造技術の重要性が増している。EU、ロシアや北米地域では天然ガスのパイプラインが発達しており、Hydrogen Europeや米国エネルギー省では、水素の輸送に関しては1）圧縮水素（ボンベやカードル）、2）液化水素、3）パイプライン、4）ハイタン（水素と天然ガスの混合）のパイプライン、水素の貯蔵に関しては1）圧縮水素（ボンベやカードル）、2）液化水素、3）材料への貯蔵（金属水素化物、有機ハイドライド、吸着）、4）地下貯蔵、5）ガス配管網などのオプションがあるとして整理されている。日本の場合、船舶輸送が前提となるため、船舶輸送に適した水素の輸送・貯蔵技術に注目する必要がある。また、水素はアンモニア製造に必要な重要な原料でもある。

アンモニアは、肥料原料や汎用化学品原料として大量に使用され、その製造方法はハーバー・ボッシュ法として確立されている。1972年には鉄（Fe）触媒よりも高活性なルテニウム（Ru）触媒が東京工業大学の秋鹿、尾崎らによって発見された。数MPaの水素圧でもアンモニア合成が可能であり、近年、環境負荷の低い触媒として再注目され、その担体を変えた種々のRu系触媒合成の研究が日本を中心に行われている。一方、ハーバー・ボッシュ法では反応圧力が20MPa以上とすでに高圧のためアンモニアの液化は容易であるが、Ru触媒では反応圧力が低いため液化技術が別途必要となるという問題点はある。また、再生可能エネルギーを使用して高効率にアンモニアを製造できる小規模分散型アンモニア合成プロセスの基礎研究、応用研究・開発も進められている。外部電場印加アンモニア合成触媒、マイクロ波照射アンモニア合成触媒、高周波照射アンモニア合成触媒、プラズマアンモニア合成触媒等の研究がある。電気や光エネルギーを利用せず水と窒素とモリブデン（Mo）触媒からのアンモニア合成も報告されている。

アンモニアは、沸点が–33°Cであり、水素に比べ容易に液化でき、その体積あたりの水素貯蔵量は水素吸蔵合金や高圧水素はもちろん、液化水素、メチルシクロヘキサンなど有機ハイドライドに比しても大きい。その利用法としては、直接燃料として燃焼、水素に分解して燃料電池で利用、アンモニアを直接燃料電池燃料として利用するなどの手法が考えられる。

燃料としてのアンモニアは、炭化水素よりも燃えにくく火炎伝播速度が遅いなどの特徴はあるが、炭化水素系燃料の代替燃料として、過去にはロケットやバスに利用された歴史がある。また最近では乗用車の燃料としての検討のほか、ガスタービン燃焼、工業炉への展開、石炭との混焼による環境負荷の低減など多くの試みがなされており、活発に国内外において検討されている。

アンモニアとして輸送後に、接触分解法により水素を生成させ、燃料電池燃料として利用するための技術も検討されている。アンモニア接触分解触媒としては貴金属系と非貴金属系触媒がいずれも検討されているが、貴金属触媒のうちRuを活性成分とするものが最もアンモニア分解活性が高く、低温で高い転化率を達成できることが知られている。

また、アンモニアを直接燃料とする燃料電池も検討されている。固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料適応性は他の燃料電池より優れており、アンモニア直接供給も可能である。燃料電池発電は発熱反応であり、運転温度領域が700～900°Cと、アンモニア接触分解反応温度に近く、両者を組み合わせることにより、高効率なアンモニア利用発電技術が構成できる。また、SIPアンモニア燃料電池プロジェクトでもアンモニアを利用した燃料電池システムの1つとして、接触分解反応器と低温で動作するアニオン交換膜形燃料電池（Anion Exchange Membrane Fuel Cell：AEMFC）を組み合わせた発電システムが検討されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

水電解による水素製造の効率を上げるために、熱エネルギーと電気エネルギーの両方を利用して水を分解する溶融塩リアクター、プロトン伝導性酸化物、酸素イオン伝導性酸化物を電解質とする水蒸気電解セル、高温水電解用ポリマー無機複合プロトン交換膜が開発されている。熱エネルギーと電気エネルギーの両方を使用して2ドル/kg以下のコストで水素ガスを生成できる可能性がある。

電気化学的アンモニア合成研究は中国、米国を中心にさかんに行われている。電極触媒（窒化クロム、窒化バナジウム、ニッケル/ナノポーラスカーボン、層状遷移金属の炭化物および窒化物、ヘマタイト、遷移金属窒化物ナノ粒子、ルテニウム-白金合金、窒素ドープナノポーラスカーボン等）や固体電解質（プロトン伝導性BCY電解質膜、$BaZrO_3$等）を利用した膜反応器が研究されている。

アンモニアはプロトン交換膜の阻害物質であるため、燃料電池用水素中のアンモニア許容濃度は0.1ppm以下（FCV用）と定められている。アンモニア接触分解ではこのような低濃度の達成は不可能であるため、Pressure Swing Absorption（PSA）などの分離技術を組み合わせる必要があるが、ゼオライトやNH_4HSO_4が新たにアンモニア吸収材として提案されており、長時間にわたって微量アンモニアを除去可能であったとされている。

アンモニア分解技術として、アンモニアと空気を触媒に併給し、サーモニュートラル近傍または発熱領域で運転するオートサーマル接触分解も検討されている。自己発熱による急速起動が容易であり、分解反応器構造がシンプルとなる。非貴金属触媒であるCo-Ce-Zr系複合酸化物触媒は入口から燃焼と分解が並行して進行するため温度プロファイルがより平坦となる。

有機ハイドライドに関しては、トルエンの電解水素化と水分解を同時に行う、固体高分子電解質（SPE）電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成が開発されている。製造あるいは利用の過程で上流や下流のプロセスとコンバインドした高効率システムである。

また、基礎研究ながら、ギ酸（HCOOH）もエネルギーキャリアとして注目され、水素発生、直接燃料電池などの利用技術を中心に研究されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

［日本］

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第1期として「エネルギーキャリア」（2014～19年）では、再生可能エネルギー等を起源とする電気および水素等により、クリーンかつ経済的でセキュリティレベルも高い新たなエネルギー社会を構築するため、（1）太陽熱を利用した水素製造 、（2）アンモニアの製造・利用技術、（3）有機ハイドライドの製造・利用技術、（4）液化水素の利用技術 、（5）エネルギーキャリアの安全性評価を実施した。

JST-CRESTおよび さきがけ「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」（2013～2020年）が実施された。

また、NEDO水素社会構築技術開発事業（2014～2022年）では液化水素およびトルエン-メチルシクロヘキサン系の有機ケミカルハイドライドについて実証研究を実施している。

［米国］

エネルギー庁（Department of Energy：DOE）が水素関連のプロジェクトをH2@ScaleとしてFuel Cell R&D、Hydrogen Fuel R&D、Hydrogen Infrastructure R&D、Technology Acceleration、

Safety, Codes and Standards、Systems Analysisなどの研究プログラムを進めている。金属窒化物触媒を使用したアンモニアの電気化学合成とプロトン交換膜での遷移金属窒化物ナノ粒子の電気化学的窒素還元反応電解槽などの研究も行われている。

2020年1月米国下院はアンモニアを低炭素燃料として定義する法案を発表した。また、米国にはアンモニアエネルギー協会が設立されており、持続可能なエネルギー経済におけるアンモニアの採用と使用を促進する活動をしている。アンモニア燃料会議は2017年から米国化学工学会の中で開催されている。

［EU］

Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertakeing（FCH-JU）は研究および革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画 Framework Programme（FP）の1つと位置付けられ、FCH-JUと欧州の産官学の共同体であるHydrogen EuropeでEUの資金配分をマネジメントして、主に大規模な実証プロジェクトを推進している。

ドイツでは2007年から省庁連合でNational Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technologyを推進しており、NOW GmbHがNIPの予算配分を担ってモビリティを中心に大規模プロジェクトを実施している。ドイツのなかでも水素関連の環境技術は研究開発投資が活発な領域である。

［国際エネルギー機関（IEA）］

IEAは、水素に関する世界的な政策をリードする理想的な立場にある。IEA Hydrogen Task 32“水素ベースのエネルギー貯蔵”は水素を利用したエネルギー貯蔵の研究を2013年から2018年まで行ってきた。 IEA Hydrogen Task 32は17カ国から来た50人以上の専門家が参加しており、7つのワーキンググループで構成されている。2019年1月1日から2021年12月31日までTask 40が実施されている。

（5）科学技術的課題

水電解に関しては、貴金属材料のような資源量の制約のある高価な材料を使用せず、変動性の再エネ電力に適合する安価で高性能な水電解システムを構築する必要がある。このため、アニオン交換膜などのアルカリ水電解の高性能な隔膜となる技術、アルカリ環境下で安価で高活性かつ起動停止を伴う運転条件で高耐久な電極触媒技術、高性能化のための電解槽内の物質移動の解析・促進技術を体系的に検討するプロジェクトを継続的に推進することが必要と思われる。

アンモニアをエネルギーキャリア、燃料として利用するためには、再生可能エネルギーを利用して高効率（低コスト）に合成する技術の開発が課題である。ハーバー・ボッシュ法の触媒改良、電気化学的合成、膜反応器を用いたアンモニア合成などが候補技術となっている。

アンモニアからの水素製造触媒やアンモニアを活性化する電極触媒についての研究も重要である。現在、材料設計指針が明らかにされつつあるが、新規材料の探索の段階が多く、コストを含めた実用性の評価という点では十分とはいえない。

上述のように、エネルギーキャリア技術に関して、液化水素、液化アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキサン系有機ハイドライドが候補として技術開発が進められているが、これらの利点、欠点の比較が規模や応用可能な範囲を含めて客観的に比較された例は公表されていない。リスクマネジメントを含めてそれぞれのキャリアの利点、欠点を明らかにしたうえで、個別技術の効率向上や低コスト化に資する技術について研究開発を推進する必要がある。

（6）その他の課題

エネルギーキャリアの社会実装には、高圧ガス保安法、消防法、毒劇法、労働安全衛生法、道路法、船舶安全法、航空法、港則法、化審法、消防法、水質汚濁防止法、大気汚染防止法などをクリアしたうえで、社会受容性があることが必要である。特にアンモニアは劇物として規定されており取り扱いにおける規制は厳しく、特に国内での規制は燃料としての広範な利用の場合には障害となる。

CO_2フリーアンモニアのバリューチェーンの構築をめざすグリーンアンモニアコンソーシアムが産業界を中心に2019年4月に設立されているが、高効率、低コストのアンモニア製造技術の実現のためには、従来の学協会を超えた分野連携、産学連携が必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	水電解はNEDOの先導事業等で実施しているが、燃料電池・二次電池ほどの広がりがない。エネルギーキャリアCREST/さきがけでアンモニア電解合成、アンモニア燃焼・触媒燃焼の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	経済産業省や環境省が中心の実証プロジェクトが増加している。水電解、エネルギーキャリアともにプロジェクトが進行中。2018年から福島再生可能エネルギー研究所で実証プラントが稼働。
米国	基礎研究	◎	→	DOEが中心となって非常に秩序だった基礎研究を推進。電気化学アンモニア合成用電極触媒など。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。
	応用研究・開発	○	→	実証研究、デモンストレーション等は州レベルやエネルギー企業中心で見えにくい。 APRA-E DOE プロジェクト車載用直接NH_3アニオン交換膜形燃料電池の開発など。
欧州	基礎研究	○	→	基礎研究は各国ごとの取り組みが主体。ドイツ、フランスを中心に基礎研究力は強力。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。電極触媒、光触媒や遷移金属錯体、固体酸化物電解槽セルの研究。
	応用研究・開発	◎	↗	多数の実証プロジェクトが進行中。 EU：FCH-JU（欧州燃料電池水素共同実施機構）で、電力・暖房・輸送・産業の各部門の低炭素化に向けEUの多年度研究プログラムの一環で実施。 英国：風力によるハーバー・ボッシュ法、アンモニア分解による水素ステーションの可能性調査。 オランダ：グリーンエネルギーによる水電解システム。 ノルウェー：グリーン水素によるアンモニア製造プラント（5万トン/年）。
中国	基礎研究	○	↗	オリジナル技術は限られているが、新技術をキャッチアップする体制は整っている。アンモニア製造の電極触媒、光触媒、高活性触媒やアンモニア燃料電池の基礎的研究が行われている。被引用件数上位の論文も増加。
	応用研究・開発	○	→	水電解槽が製品として出回り、実証・実用化研究が動いている。
韓国	基礎研究	○	→	水電解に関する中長期的なオリジナルな研究開発プロジェクトは実施されていない。 KAISTで電気化学的アンモニア合成の基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	水素ロードマップを策定して推進しようとしているが、水素タンク爆発事故などの影響もあり順調ではない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用（電力貯蔵）（環境・エネ分野　2.1.9）
・化学エネルギー利用（環境・エネ分野　2.1.12）

参考・引用文献

1) K. Aika, H. Hori and A. Ozaki, “Activation of nitrogen by alkali metal promoted transition metal I. ammonia synthesis over ruthenium promoted by alkali metal”, Journal of Catalysis 27, no. 3（1972）：424-431. doi：10.1016/0021-9517(72)90179-0
2) M. Kitano et al., “Ammonia synthesis using a stable electrode as an electron donor and reversible hydrogen store”, Nature Chemistry 4, no. 11（2012）：934-940. doi：10.1038/nchem.1476
3) K. Sato et al., “Surface dynamics for creating highly active Ru sites for ammonia synthesis：accumulation of a low-crystalline, oxygen-deficient nanofraction”, ACS Sustainable Chem. Eng. 8（2020）：2726-2734. doi：10.1021/acssuschemeng.9b06299
4) M. Hattori et al., “Solid solution for catalytic ammonia synthesis from nitrogen and hydrogen gases at 50° C”, Nature Communications 11, no. 1（2020）：2001-2008. doi：10.1038/s41467-020-15868-8
5) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018：NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association,　https://nh3fuelassociation.org/conference2018/（2020年12月27日アクセス）.
6) AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, “16th Annual Ammonia Energy Conference 2019 November 12–14, 2019, Orlando, FL（USA）”, AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, https://www.ammoniaenergy.org/event/ammonia-energy-conference-2019/#event-schedule（2020年12月27日アクセス）.
7) Y. Ashida et al., “Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water”, Nature 568, no. 7753（2019）：536-540. doi：10.1038/s41586-019-1134-2
8) 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア終了報告書」, https://www.jst.go.jp/sip/k04_result.html（2020年12月27日アクセス）.

9) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018： NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association, https://nh3fuelassociation.org/conference2018/（2020年12月27日アクセス）.
10) 新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）「成果報告書 2018年7月-NEDO 20180000000406, 平成26年度-平成29年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 高効率水素製造技術の研究 高温水蒸気電解システムの研究,2018/7/13」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201807/20180000000406.html（2020年12月27日アクセス）.
11) K. Leonard et al., “Efficient intermediate-temperature steam electrolysis with Y：SrZrO3-SrCeO3 and Y：BaZrO3-BaCeO3 proton conducting perovskites”, J. Mater. Chem. A 6, no. 39（2018）：19113-19124. doi：10.1039/C8TA04019B
12) H. Miyaoka et al., “Highly purified hydrogen production from ammonia for PEM fuel cell”, Int. J. Hydrogen Energy 43, no. 31（2018）：14486-14492. doi：10.1016/j.ijhydene.2018.06.065
13) T. Okanishi et. al, “Comparative Study of Ammonia - fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems”, Fuel Cells 17, no. 3（2017）：383-390. doi：10.1002/fuce.201600165
14) 光島重徳,長澤兼作「固体高分子電解質（SPE）電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成」『触媒』58巻6号（2016）：346–350. https://catsj.jp/jnl/top?volume=58&issue=6
15) H. Kawanami, M. Iguchi and Y. Himeda, “Ligand Design for Catalytic Dehydrogenation of Formic Acid to Produce High-pressure Hydrogen Gas under Base-free Conditions”, Inorg. Chem., 59, no. 7（2020）：4191-4199. doi：10.1021/acs.inorgchem.9b01624
16) K. Mori et al., “Phenylamine-functionalized mesoporous silica supported PdAg nanoparticles：A dual heterogeneous catalyst for formic acid/CO2-mediated chemical hydrogen delivery/storage”, Chem. Commun. 53, no. 34（2017）：4677-4680. doi：10.1039/c7cc00864c
17) M. Zainoodin et al., “Performance of a direct formic acid fuel cell fabricated by ultrasonic spraying”, Int. J. Hydrogen Energy 43, no. 12（2018）：6413-6420. doi：10.1016/j.ijhydene.2018.02.024
18) Hydrogen Program, “2020 Annual Merit Review：Progress Updates”, Department of Energy, https://www.hydrogen.energy.gov/annual_review20_proceedings.html（2020年12月27日アクセス）.
19) Fuel Cells and Hydrogen, Joint Undertaking, “FCG JU PROJECTS”, Fuel Cells and Hydrogen, https://www.fch.europa.eu/page/fch-ju-projects（2020年12月27日アクセス）.
20) Hydrogen Europe, “Hydrogen Europe：projects”, Hydrogen Europe, https://hydrogeneurope.eu/projects（2020年12月27日アクセス）.
21) Technology Collaboration Programme by IEA, “Task 40：Energy storage and conversion based on hydrogen”, Hydrogen TCP, https://www.ieahydrogen.org/task/task-40-energy-storage-and-conversion-based-on-hydrogen/（2020年12月27日アクセス）.

2.1.5 分離技術

（1）研究開発領域の定義

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を取り除く技術領域である。化学プロセスにおいて目的成分を低環境負荷・低エネルギーで取り出す技術、火力発電所や製鉄所から生じるCO_2の分離、高純度水素や炭化水素の分離、海水の淡水化や各種排水の浄化、医療（人工透析、酸素濃縮）、鉱物資源や都市鉱山からの目的金属の分離など幅広い産業の基盤となっている技術である。環境保全、資源循環型社会の実現のためにも重要な技術である。化学プロセスにおける気体・液体の分離技術、CO_2分離技術、鉱物資源からの金属分離技術、資源循環のための分離技術などに研究開発課題がある。

（2）キーワード

膜分離、吸着、蒸留、反応分離、物理吸収、化学吸収、深冷分離、逆浸透、ナノろ過、浸透気化、単体分離、メカノケミカル、センサ選別、アップサイクリング、イオン液体、深共晶溶媒、ナノ流体、磁性流体

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

分離技術は相の状態によって分類が可能であり、分離したい成分が別々の相の場合と、分子混合物として同一の相に存在する場合に大別される。分離したい成分が別々の相の場合は機械的単位操作が主に使用され、気相中の固体あるいは液体微粒子の除去や液相中の微粒子の除去、粒子混合物の粒子サイズによる分級などがあげられる。一方、気相および液相における分子混合物の分離は、平衡分離（蒸留、吸着、吸収、抽出、イオン交換、晶析など）と速度差分離（膜分離、電気泳動、遠心分離など）に分類され、ガス精製、海水淡水化、浄水等の工業分野、排水処理や排ガス処理などの環境保全、食品・医薬品製造など幅広い産業に用いられている基盤技術である。

また、多種多様な分離手法が存在していることが本領域の特徴である。それぞれの分離技術は互いに競合関係にあり、採用されるためには当該分離を可能とする唯一の技術であるか、優位性を示さねばならない。それぞれの分離技術の優劣をコスト、エネルギー、LCAなどさまざまな視点を含めて比較する手法の確立に関する研究も望まれる。

米国では全エネルギーの32%が産業用途であり、そのうち45～55%が分離プロセスに使用されている。すなわち米国の全消費エネルギーのうち約15%が分離プロセスということである。この分離プロセスのエネルギーのうち、49%が蒸留、20%が乾燥、11%が蒸発の熱源として使用されている。非熱駆動分離を増やすべきだという指摘があるが、現状ではわずか20%にすぎない。

既存の石油精製、石油化学システムでは既存技術での最適化が図られており、また、長期信頼性・安定性・安全性（耐久性や耐汚れ性など）やメンテナンスの容易さも重要であるため、新たな分離システムを導入するインセンティブは少ない状況にある。蒸留に使用される熱エネルギーの回収、再利用も一般的に行われている。非熱駆動型の分離プロセスには、膜分離や吸着などの新材料からのイノベーションが期待されている。

また、火力発電所や製鉄所、工場などから生じるCO_2分離技術の開発は喫緊の課題であり、実用化を指向した研究開発はもちろん、次世代に繋がる基盤的研究の裾野を広げていくことが大変重要である。CO_2分離技術には、物理吸収、化学吸収、分離膜、深冷分離や吸着、DAC（Direct Air Capture）などがあるが、単にCO_2を分離するだけではなく、分離した後のCO_2を有効利活用するCCUS（Carbon dioxide Capture,

Utilization & Storage）の観点から技術評価を進めていく必要がある。例えば、次世代の火力発電所として注目されている石炭ガス化複合発電（Integrated coal Gasification Combined Cycle：IGCC）における燃焼前ガスからのCO_2分離やシェールガスをはじめとする天然ガス井戸元におけるCO_2と炭化水素との分離なども重要な課題である。

一方、天然鉱山や都市鉱山からの有用物の分離技術も重要である。天然鉱山では、近年では低品位鉱石や、金属精製で発生する尾鉱、スラッジ、スラグ、ダストといった2次資源を対象とせざるを得なくなり、それらに対する技術開発が求められている。これらは、目的とする元素の品位が低く、鉱物相が十分に成長していないため、物理的な分離濃縮が困難であり、また不純物の濃度が高い。また、都市鉱山においても、利益の出やすい工程内リサイクルや経済価値の高い貴金属等のリサイクルから、サーキュラーエコノミーの概念を主軸とした廃棄物ゼロに近い概念にもとづいたリサイクルへと技術課題が変遷している。

［研究開発の動向］

• 膜分離技術

水処理膜が最大のマーケットであり、日本企業のシェアが高いが、精密ろ過や限外ろ過膜では韓国や中国の技術開発が進んできている。かつては日米の数社のみが製造可能といわれていた海水淡水化膜でも日本のシェア低下が起きている。

海水淡水化を志向した革新的膜として、多孔性ナノ粒子を添加したポリアミド膜やアクアポリンの利用があるが、このような革新的分離膜の提案が日本からはなされていない。

水処理で最近注目される研究課題は、オイル含有水の膜処理である。石油やオイルシェールの採掘により排出される排水量は、オイル製造量の数倍に達するといわれる。オイル回収、処理水の再利用、水の廃棄のためにも、オイル含有水の膜処理技術が必要不可欠である。高分子膜およびセラミック膜および新規分離膜の開発が行われている。

一方、有機水溶液の処理に膜分離の利用が拡大している。 NEDO先導プログラムでは、非水系の有機溶媒混合溶液の逆浸透分離が、蒸留や蒸発と比べて、分離エネルギーが1/100以下であることが明らかにされた。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

蒸留分離は熱エネルギー多消費型プロセスであるが、装置構造がシンプルであり、連続的運転が可能であることから,産業分野で広く利用されてきた。最近では、競争力強化の観点から高効率かつ省エネルギーな分離プロセスの開発が求められており、塔頂蒸気を圧縮して熱エネルギーとして再利用するヒートポンプ蒸留や、塔内に仕切板を設け多成分系分離を可能にした塔分割型蒸留塔などで、従来比30～50%の省エネルギー化を実現している。

一方、膜分離技術は、基幹化学品を分離するプロセスで実用化された例はまだないが、膜材料、膜モジュール、膜分離プロセスなどを対象に精力的な研究開発が行われている。具体的には、JST-CREST「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」において結晶性ミクロ細孔を有する材料を用いた新しい無機分離膜の研究開発が行われている。また、NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」では、光触媒を用いて水から水素を製造し、生成した水素を分離膜により分離・精製し、水素と二酸化炭素を原料として基幹化学品を製造する一連のプロセス開発が行われている。

吸着分離に関しては、NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的分離技術の導入による省エ

ネ型基幹化学品製造プロセス」において、オレフィン/パラフィン系の分離、水素・窒素を含む炭化水素系の分離などを対象に金属有機構造体（MOF）を用いた分離技術が検討されている。

• CO_2分離技術

CO_2分離回収を主な用途とするガス吸収液の開発が進められている。化学吸収法では、代表的なモノエタノールアミン水溶液に比べて、分離・回収エネルギーを大幅に低減するアミン吸収液の開発に成功している。物理吸収法も、代表的なポリエチレングリコールを主骨格に持つSelexol吸収液（dimethyle ether of polyethylene glycol）より高いCO_2吸収能を有するSelexol Maxが実用化されている。 Selexol Maxは、ライフサイクル全体のコストが最大で17%削減可能であり、置き換えが進みつつある。アミンをシリカ等の多孔質材料に担持した固体吸収材の開発も進められており、アミンを吸収液として利用する場合に比べ、所要顕熱が低減し、溶媒に起因する潜熱損失も伴わないため、大幅な消費エネルギーの削減が期待できる。RITEが開発した固体吸収材を用いて、川崎重工業との実用化研究開発が進められており、2017年までに10 m^3スケールで合成した固体吸収材を用い、1.5 GJ/ton-CO_2での低温スチーム再生性能（60℃）が実証されている。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

固体を対象とした分離濃縮技術は、選鉱から発展した物理分離プロセスと、製錬から発展した高温分離プロセス、湿式分離プロセスに大別される。

物理分離プロセスとしては、単体分離（異相境界面を選択的に破壊して、単体の状態にする）を促進するための技術開発と、相互分離（単体分離したものを相互に分離濃縮する）を高度化するための分離開発とに大別される。単体分離を促進するための技術開発では、機械的な作用力（圧縮、衝撃、せん断）を制御しながら単体分離を促進する研究開発のほかに、電気パルスやレーザ、マイクロウェーブ等を活用した異相境界選択破壊に関する研究開発や、粉砕中の発生エネルギーを利用して選択的な反応を進行させるメカノケミカル反応を利用した研究開発も実施されている。相互分離を高度化するための分離技術としては、磁性ナノ流体を用いた微粒子分離、レーザ誘起ブレークダウン分光法（LIBS）等を利用したセンサ開発や、分離を高精度にするための機械的あるいはロボットを活用した装置の開発が進められている。

高温分離プロセスでは、原料が天然鉱石から2次資源に変遷したことによって新たに混入しはじめた有機物や微量忌避元素の分離のための熱力学的データを取得しながら、それらの相互分離精製をめざす研究開発が見受けられる。

湿式分離プロセスの開発動向は、イオン液体、深共晶溶媒、有機王水などの新たな溶媒を用いて抽出選択性を高めた分離技術開発や、亜臨界や超臨界といった新たな反応場によって選択性を高めた分離技術開発が見受けられる。また、多孔質材料や有機材料、あるいはバイオを利用した吸着材あるいは吸着プロセスの開発もさかんに行われている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• 膜分離技術

有機溶媒系におけるろ過技術としては、中・高分子の溶質分離を目的とするナノろ過法がOSN（Organic Solvent Nanofiltration）やSRNF（Solvent Resistant NanoFiltration）と命名され、研究が活性化し

ている。有機溶媒系の逆浸透法については、キシレン分離がRO法で可能であることが報告されたのを契機に、OSRO（Organic Solvent Reverse Osmosis）として再び研究開発が活性化している。相変化を伴わない逆浸透法は、熱駆動型分離プロセスの蒸留や蒸発と比べて分離に要するエネルギーが1/100以下であるとされる。実際の蒸留法では熱の多重利用がなされており、過大評価している可能性もあるが膜分離法の省エネルギー性は有望である。

また、水蒸気をエネルギーおよび物資として回収する技術開発が注目されている。各種プロセスでの投入エネルギーは、水蒸気として高エンタルピーを有したまま環境に排出されるケースが多い。サブナノ細孔膜を用いた蒸気透過（Vapor Permeation：VP）法は、回収した水の品質が高く、また高温のまま回収できる点で優れている。高温でも高い水蒸気透過性と選択性を示すオルガノシリカなどの無機多孔性膜が注目される。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

基幹化学品製造においては、原油資源のみならず、原料多様性の観点から、シェールガス、バイオマスのような新たな資源に関する分離技術の開発が必要になってきている。

基幹化学品製造プロセスは、基本的に反応プロセスと分離プロセスの組み合わせから成り立っているが、例えば、二酸化炭素（もしくは一酸化炭素）と水素からメタンやメタノールを合成するプロセスでは、平衡条件から離れることが可能な膜反応器（反応分離）に代表されるような新規プロセス開発が注目されている。また、人工光合成のようなクリーン系のみならず、Crude to Chemicalsのような不純物の多い系にも利用可能な新たな反応分離プロセスの開発も必要になる。サウジアラビアのサウジアラムコは、フランスのアクセンス、テクニップFMC との間で、原油から直接化学品を生産するCrude to Chemicals技術の共同開発を実施し、2021年までの商業化をめざしている。

• CO_2分離技術

常圧・室温付近で化学吸収させるアルカノールアミン水溶液だけでなく、近年では高圧下でも駆動可能なアミン系ガス吸収液の開発が進んでいる。東芝エネルギーシステムズでは、大牟田市で大規模実証設備を建設中であり、IHIでは、オーストラリアLoy Yang A発電所から排出されるCO_2をアミン吸収液で分離回収するプラントを稼働させている。日揮と日本ガイシは、米国テキサス州の油田回収設備において、モノリス型DDRゼオライト膜を活用した原油随伴ガスからのCO_2分離回収技術の実証実験を開始している。

新規CO_2吸収剤技術としては、九州大学の星野らにより、アミン含有ゲルを用いて中低圧のガスからCO_2を分離・変換・利用するプロセスの開発が行われている。最近、ハニカム-炭素繊維担持アミン含有ナノゲル粒子を回転カラムに用いて燃焼後の排ガスからCO_2を回収可能な温度スイング吸着プロセスを提案している。

また、CO_2とメタンをはじめとする炭化水素の分離、CO_2/水素分離、CO_2/窒素分離、CO_2/硫化水素分離などを目的としたガス吸収液の開発と評価も進められている。なかでも、イオン液体や深共晶溶媒（deep eutectic solvents：DES）など新規物理吸収液やハイドレートを用いたCO_2分離法の開発が、国内外でさかんに実施されている。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

単体分離を促進するための技術として、機械的な破壊では達成できない選択的分離方法である電気パルス、レーザなどの研究開発が進められている。また、通常とは異なる選択性での融解や電析を達成しうる相互分離の手法として、イオン液体や深共晶溶媒を用いた金属やプラスチックの分離に対する研究開発が進められて

いる。

吸着剤としては、磁性ナノ流体が、磁性粒子の選択的な吸着特性と、ナノ流体の分離特性とを組み合わせて、レアアース等の分離に対する研究開発に使われている。また、金属有機構造体（MOF）では、金属と有機リガンドとの広範な相互作用が明らかにされつつあり、活性炭以外の有効な吸着剤が存在しない金属の選択的な相互分離に応用できる可能性が高く、注目されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

国家プロジェクトとしては,分離プロセスに特化したものはないが、下記のような様々なプロジェクトの重要な要素技術として研究開発が実施されている。

JST未来社会創造事業 探索加速型「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域、「持続可能な社会実現」領域

ALCA（先端的低炭素化技術開発）「炭素循環化学システムの高効率化」

NEDO「機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発」

NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」（人工光合成プロジェクト）

NEDOムーンショット「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

NEDO先導研究プログラム「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/新産業創出新技術先導研究プログラム/未踏チャレンジ」

JOGMEC「銅原料中の不純物低減技術開発事業/海底熱水鉱床関連事業」

一方、米国ではALTSEPというSustainable Separation Processesに関する取り組みが2015年から始まっており、膜や吸着に関する材料からそれを利用するプロセスまでを対象に産学連携体制での検討を開始している。2019年には、ACS、AIChE、NISTの連名で、A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separationsを発表し、分離プロセスバリューチェーンの階層ごとのワークショップを設置することで精緻な検討がなされている。

（5）科学技術的課題

• プロセス強化技術

単一の単位操作のみで分離を行うのではなく、複数の技術を組み合わせるプロセス強化技術が注目される。さらに反応と膜分離を組み合わせた膜型反応器は、平衡支配の反応系から特定成分を引き抜くことで平衡シフト、反応速度の向上が可能である。

• 分離プロセスのプラットフォームづくり

分離手法には、蒸留、吸収、抽出、膜分離、吸着など多くの分離手法があり、特徴ある分離が可能となる一方で、分離したい対象ごとにも種々の条件が異なり、種々の分離手法の優劣を評価する手法の確立が必要である。さらには、分離ユニットのみならず、最終製品までの全体を統合した上での最適化も必要になる。加えて、多成分系、不純物の分離に関する信頼度評価も必要になる。このようなエンジニアリングにもとづいた分離プロセスの評価技術のプラットフォームづくりが必要である。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）の科学的理解

対象が複雑であり、物理的、化学的な現象の複雑な組み合わせで達成されるものであるが、その物理現象を科学的に理解することが重要である。純粋系、単純系で得られている知見を体系化し、実験的な検討とマルチフィジックスシミュレーションとの組み合わせによって知見を集積することが必要である。

（6）その他の課題

日本においては分離プロセスに特化した国家プロジェクトは少ないが、さまざまなプロジェクトの一部として研究開発されているケースが多い。関連プロジェクトについて、情報を俯瞰的に把握できるような仕組みが望まれる。

また、分離技術は多岐にわたるにもかかわらず、当該技術分野の研究者数は限られており、それぞれが持つ固有の技術を相互に補完しながら研究を進めていく体制が必要と思われる。

（7）国際比較

膜分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	いくつかの国家プロジェクトで研究開発が進行中だが、膜分離はプロジェクトの一部の位置づけである。
	応用研究・開発	○	→	RITEのCO_2分離膜プロジェクトが進行中。ムーンショットには膜分離も要素技術として取り上げられる。
米国	基礎研究	◎	→	DOEは水素関連プロジェクトを2020年から開始。膜分離、CO_2回収プロジェクトも行われている。
	応用研究・開発	◎	→	Membrane Technology&Researchなど膜ベンチャーが成長し、実プロセスに採用され始めている。DOEプロジェクトも数多い。
欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020に分離膜を中心としたプロジェクトがあり、国際協力もうまく組織化されている。
	応用研究・開発	◎	↗	水処理膜以外の実用化が進んでいる。EVONIK：有機溶媒ろ過膜など。
中国	基礎研究	◎	↗	南京工業大学が無機分離膜、天津工業大学が高分子膜研究を牽引。論文数が増え、質も高い。
	応用研究・開発	◎	↗	大学発ベンチャー企業が多数。水素分離やゼオライト膜、膜反応器などで実用化が進んでいる。
韓国	基礎研究	○	→	Horizon 2020（NANOMEMC2）で欧州と共同研究を実施した。論文数が増加し、日本の論文数の1.5倍以上。
	応用研究・開発	△	→	かつてはKRICTなどで大型プロジェクトを行っていたが、最近はないと思われる。

化学プロセスの気体・液体の分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	早稲田大学、神戸大学、産総研、広島大学を中心に膜分離に関する国家プロジェクトを実施中。
	応用研究・開発	○	↗	JST、NEDOによる分離技術に関する大型プロジェクトが開始されている。
米国	基礎研究	◎	↗	ExxonMobil、Georgia Tech、Imperial Colleage Londonが、原油の直接分離。
	応用研究・開発	○	→	ALTSEPなど学会が中心となり産学連携体の構築が進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020にて、無機分離膜の開発並びに反応分離プロセスの研究がなされている。
	応用研究・開発	△	→	Horizon 2020にて、すべての膜材料を対象に大規模な研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	大連理工大学、天津工業大学などで分離膜の開発が加速している。
	応用研究・開発	△	↗	上記大学からスピンアウトしたベンチャー企業などが集積化されている。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学の研究所にて膜分離技術に関する研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	CO_2分離・回収に関するプロジェクト内で分離膜の開発が行われている。

CO_2分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	RITE、産総研、名古屋大学、京都大学、神戸大学、九州大学、日本大学などにおいて、ガス吸収液やゲル、分離膜の研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	CO_2分離回収の実証試験中。日本CCS調査によるCCS実証試験は、2019年11月でCO_2圧入量30万tを達成した。
米国	基礎研究	◎	↗	イオン液体によるCO_2ガス吸収液やハイドレートを利用したCO_2/CH_4などの研究がさかん。
	応用研究・開発	○	↗	ガス吸収液、プロセス開発が進められており、酸性ガスの高効率分離が可能。CO_2-EORの開発や固定化アミンによるTSAプラント実証中。
欧州	基礎研究	◎	↗	ポルトガルのアヴェイロ大学やノバ・デ・リスボン大学などにおいて、イオン液体や深共融溶媒を用いたガス分離の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	ガス吸収液とプロセスの開発・実証が進められている。固定化アミンによるTSAプラント実証中。
中国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	○	↗	Tianjinにて、GreenGenプロジェクトによる400 MWのIGCCとEOR目的のCCSを稼働中。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	△	→	KEPCOとArstromaは、Dangjin火力発電所にて、CO_2分離膜設備の稼働準備中。

固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	境界学問領域である上、研究開発を支える産業形成がなされておらず、研究者が少ない。
	応用研究・開発	○	→	NEDO、環境省などのプロジェクトで研究がなされているが、分野間の連携が十分ではなく、技術開発内容にはやや新規性が欠けている。
米国	基礎研究	○	→	中国に続く報告件数を維持している。
	応用研究・開発	◎	↗	CMI（Critical Materials Institute）でのプロジェクトが多数進行中であり、活発である。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ、フランスが牽引、英国、イタリアがそれに続く。新興国の台頭に押され気味である。
	応用研究・開発	◎	↗	Horizon 2020で難処理鉱石や都市鉱山を対象とした種々のプロジェクトが設置されているほか、EIT Raw materialsやMETGROW+ projectなど複数で活発に研究開発されている。
中国	基礎研究	◎	↗	基礎研究案件数を伸ばしており、論文数や学会での報告件数では他の国を圧倒している。
	応用研究・開発	◎	↗	国家主導でLiB分離濃縮技術開発センターを複数建設。迅速に開発拠点形成を進めている。
韓国	基礎研究	○	→	特に湿式分離プロセスでの伸びがみられるが、他の新興国に押されて低調。
	応用研究・開発	△	→	国をあげての大きなプロジェクトはないと思われる。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- 化学エネルギー利用（環境・エネ分野　2.1.12）
- 水循環（水資源・水防災）（環境・エネ分野　2.2.3）
- 水利用・水処理（環境・エネ分野　2.2.4）
- 除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）（環境・エネ分野　2.2.5）

参考・引用文献

1) David S. Sholl and Ryan P. Livery, “Seven Chemical separations to change the world”, Nature 532, no. 7600（2016）：435-437. doi：10.1038/532435a
2) B. -H. Jeong et al., “Interfacial polymerization of thin film nanocomposites：A new concept for reverse osmosis membranes”, Journal of Membrane Science 294, no. 1（2007）：1-7. doi：10.1016/j.memsci.2007.02.025
3) C. Y. Tang et al., “Desalination by biomimetic aquaporin membranes：Review of status and prospects”, Desalination 308（2013）：34-40. doi：10.1016/j.desal.2012.07.007
4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「平成30年度中間報告NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導プログラム/有機溶剤の超ろ過膜法開発による化学品製造プロセス革新」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201904/20190000000214.html（2020年12月30日アクセス）.
5) JST低炭素社会戦略センター「CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望-CO2 分離回収技術の評価と課題-」, https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-08.pdf（2020年12月30日アクセス）.
6) JST-CREST「精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製」, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/43/43_04.html（2020年12月30日アクセス）.
7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」, https://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html（2020年12月30日アクセス）.
8) JST低炭素社会戦略センター「低炭素社会の実現に向けた 技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201901/20180000000059.htm（2020年12月30日アクセス）.
9) D. -Y. Koh et al., “Reverse osmosis molecular differentiation of organic liquids using carbon molecular sieve membranes”, Science 353, no. 6301（2016）：804-807. doi：10.1126/science.aaf1343
10) Jubao Gao, Yu Hoshino and Gen Inoue, “Honeycomb-carbon-fiber-supported amine-containing nanogel particles for CO2 capture using a rotating column TVSA”, Chem. Eng. J. 383（2020）：123123. doi：10.1016/j.cej.2019.123123
11) Less Energy-Intensive Alternative Separations（AltSep）, ”Sustainable Separation Processes A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separations”, National Institute of Standards and Technology（NIST）, https://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/redesign/roundtables/altsep-report-2019.pdf（2020年12月30日アクセス）.
12) Kirstie A. Thompson et al., “N-Aryl-Linked Spirocyclic Polymers for Membrane Separations of Complex Hydrocarbon Mixtures”, Science 369, no. 6501（2020）：310-315. doi：10.1126/science.aba9806
13) 苫小牧におけるCCS大規模実証試験 30万トン圧入時点報告書（「総括報告書」）概要、https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/05/report202005_overview.pdf（2020年12月30日アクセス）.

2.2 ライフ・ヘルスケア応用

超高齢社会の到来とともに、ライフ・ヘルスケア分野におけるニーズは高度化・多様化が進み、ナノテクノロジー・材料技術を活用した新しい健康・医療技術の実現に期待が高まっている。疾病の兆候検知・早期診断、診断と治療の一体化、ピンポイント治療、身体の機能低下・損傷部位の修復・代替など、これらの健康・医療技術の実現は個々人のQOLを向上するうえで、また、高齢者人口の増加とともに急増が予想される医療費を適正化するうえで重要である。また、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的パンデミックにより浮かび上がった課題の1つに環境中に存在する病原体の監視がある。感染症の流行を防ぐため、水中や空気中に存在するウイルスなどの病原体を高感度かつ簡便に検出可能な技術が求められている。

本節では、ライフ・ヘルスケア分野の課題解決に向けて、ナノテクノロジー・材料技術が特に重要な役割を担う研究開発領域として、バイオ材料、ナノ医療システム、バイオ診断・計測デバイス、バイオイメージングを取り上げる。

バイオ材料は生体組織や細胞、種々のタンパク質などの生体を構成する成分に接して利用される材料であり、医療・健康ニーズの多様化や医療技術・機器の高度化に伴って、生体との間で生じる多様かつ複雑な現象をより高度に制御する機能が要求されている。金属材料、セラミックス、合成高分子、生体由来物質、それらを複合した材料などを対象に、生体の構造・機能やその成り立ちを理解し、その一部を人工材料により再現する研究や、組織・臓器を生体の内外で再生する再生医療材料の研究、生物由来の物質・材料と人工材料を融合した新機能材料の研究などが進んでいる。

ナノ医療システムは、ナノテクノロジーを活用することで、革新的な医療の実現をめざす研究開発領域である。薬剤、診断用プローブや生理活性物質を患部等に選択的に送達するナノ薬物送達システム（ナノDDS）を中心に、光や磁場に応答するナノ粒子や量子技術を活用した新規ナノ医療、診断と治療を一体化・複合化した高度な医療技術を目指すナノセラノスティクスなどの研究開発が進められている。

バイオ診断・計測デバイスは、生体由来物質（バイオ物質）を高感度に検出・分析する技術であり、バイオマーカ・ウイルス・病原菌・薬物などに適用して、計測・診断に用いるデバイスを創出することをめざしている。微量サンプルから特定のバイオ物質を迅速かつ簡便に抽出・分離・同定する技術、センシングデバイスの高速化・高感度化・高集積化、複数ターゲットのマルチセンシング、ウェアラブルデバイス、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現するOrgan-on-a-Chipなどの研究開発が進められている。

バイオイメージングは、生命現象の理解を目的として生体内の情報を可視化する技術である。生体の機能や生命現象の理解への貢献に加え、疾患や病変の発生原理の理解や治療法の探究にも不可欠な技術となっている。生体組織、細胞、細胞内のオルガネラ、生体分子、イオンなどの生体を構成する物質の形態・大きさ・数・分布、さらには生体内局所の温度やpHなど、多様な生体情報をターゲットにイメージング技術の研究開発が進められている。

2.2.1 バイオ材料

（1）研究開発領域の定義

生体組織や細胞、種々のタンパク質やDNA、RNA、細胞外小胞などの生体を構成する成分に接して利用される材料（バイオ材料）を対象とする研究開発領域である。近年の医療・健康ニーズの多様化や医療技術・機器の高度化に伴い、バイオ材料には生体との間で生じる多様かつ複雑な現象をより高度に制御する機能が要求されており、金属材料、セラミックス、合成高分子、生体由来物質、それらを複合した材料など幅広い材料を対象に研究開発が進められている。生体の構造・機能やその成り立ちを理解し、その一部を人工材料により再現する研究や、ヒトやその他の生物に由来する物質・材料と人工材料との融合による新機能材料の創製なども進んでいる。

（2）キーワード

再生医療材料、足場材料、細胞外マトリックス、脱細胞化マトリックス、人工臓器、DDS、ナノ粒子、細胞外小胞、エクソソーム、バイオファブリケーション、バイオプリンティング、生体適合性、生体吸収性、免疫制御、メカノバイオロジー、生体模倣、黒リンナノシート、コンビネーション製品

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

医学の進歩により、わが国の平均寿命と健康寿命はともに延長傾向にあるものの、両者の差は未だに大きく、男性は平均8年以上、女性は平均12年以上もの間、日常生活に制限を抱えた状況で晩年を過ごしている。超高齢社会に突入したわが国において、健康寿命の延伸は喫緊の課題である。この課題に対応するための先進的な健康・医療技術として、再生医療、細胞治療、精密医療（Precision Medicine）、薬物送達システム（Drug Delivery System：DDS）、遠隔医療、生体IoT（Internet of Things）などが提案されているが、その実現・普及には、生体やその構成成分との相互作用を適切に制御し、所望の機能を発揮するバイオ材料が不可欠である。バイオ材料は、疾患の予防・診断・治療や生体計測といった健康・医療技術を支えるキーマテリアルとして、国民の健康増進、生活の質（Quality of Life：QOL）の向上、健康寿命の延伸、介護・医療費の削減、医療機器・医薬品など関連産業の国際競争力強化などへ貢献することが期待されている。

［研究開発の動向］

バイオ材料とは、生体組織や細胞、タンパク質、体液などの生体を構成する成分に接して利用される材料の総称である。人工臓器など生体組織と長期間にわたり接触する材料から、診断のように短期間のみ生体成分と接触する材料まで、その使用環境は幅広い。特に生体内に埋入されるバイオ材料の場合には、短期的にも長期的にも生体への副作用（毒性、炎症性、発がん性など）が十分に低いこと、生体から異物認識されずに生体環境に調和する性質（生体適合性）が求められる。この要求を満たすバイオ材料として、これまでにチタン合金、コバルト-クロム合金などの金属材料、アルミナ、ジルコニアなどのセラミックス材料、コラーゲン、ポリエーテルエーテルケトン（PEEK）、ポリヒドロキシエチルメタクリレート（PHEMA）などの高分子材料が開発されてきた。わが国では1993年に補助人工心臓に用いられたセグメント化ポリウレタンウレアをはじめ、血液への適合性に優れた高分子材料が開発されており、メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン（MPC）ポリマー、2–メトキシエチルアクリレート（MEA）ポリマーが機械式補助人工心臓、人工股関

節、人工肺やカテーテルのコーティング材として実用化されている。また、最近では、医療技術・機器の高度化に伴い、生体適合性に加えてさまざまな機能がバイオ材料には求められている。医療デバイス、人工臓器、再生医療、DDS、その場診断を含む診断技術、生体IoTなど高度な医療を実現するために、多様な機能を持つバイオ材料の開発が進められている。

組織や臓器の再生には、細胞、足場材料、細胞成長因子の3つの要素が必須とされ、再生医療ではこれらの要素を組み合わせて、生体内あるいは生体外で組織・臓器を修復・再生させる。足場材料は細胞の周辺環境を整えて再生を誘導する材料であり、細胞の接着・増殖の促進、幹細胞の分化制御、適度な力学強度、多孔性などの機能や性質が求められる。また、生体内に埋植することを考えた場合、材料が長期にわたり残存することは望ましくないとの考え方から、十分な組織再生が起こった後に分解して消失することが必要になる。足場材料の原料には、ポリ乳酸やポリグリコール酸、ポリカプロラクトン、コラーゲン、ゼラチン、キトサン、ヒアルロン酸などの生体吸収性高分子に加え、炭酸カルシウムなど無機材料や、鉄系、マグネシウム系の合金も硬組織再生用材料として研究されている。また、足場材料の3次元構造や密度が細胞挙動に大きな影響を及ぼすことがわかっており、目的の組織構造の構築には、足場材料の構造制御、加工技術が重要になっている。さらに、近年ではメカノバイオロジーが注目され、材料からの物理的な刺激が細胞の接着や遊走、分化誘導に及ぼす影響について理解が進んでおり、足場材料を設計するうえでの重要な要素となっている。

足場材料として脱細胞化マトリックスを用いる研究が活発になっている。脱細胞化マトリックスは、ヒトや動物由来の組織や臓器、あるいは培養細胞から細胞成分を除去して細胞外マトリックス（extracellular matrix：ECM）を残したもので、細胞成長因子などの生理活性物質が豊富に存在することで組織再生の高い促進効果が期待される。特に、臓器を脱細胞化して得られたマトリックス材料は臓器固有のマトリックス成分や生理活性物質を含み、臓器固有の構造も保たれていることから、複雑な構造を有する臓器の再生に有効と考えられる。一方、培養細胞から調製した脱細胞化マトリックスは、組織・臓器を用いる手法に比べて品質管理と原料の調達しやすさにメリットがあり、iPS細胞などの幹細胞を用いると、目的の組織細胞に分化させてさまざまな組織由来の脱細胞マトリックスを調製することができる。幹細胞が段階的に分化する過程、あるいは組織発生の過程におけるマトリックスの変化を模倣した脱細胞マトリックスを作製することも可能になっている。

生体外で細胞から組織・臓器を構築する方法は、トップダウン法とボトムアップ法に大別され、トップダウン法では足場材料の内部で細胞を培養するのに対し、ボトムアップ法では足場材料を用いずに細胞のシートや凝集塊、積層構造を構築する。トップダウン法ではミリメートルからセンチメートルの比較的大きな組織体を作製可能であるが、足場材料内部に細胞を精密に配置することが困難であり、組織の構造はランダムになる。それに対して、ボトムアップ法では細胞の配置を精密に制御することができるが、細胞密度が高く、組織体内部の細胞への栄養や酸素の供給が不足するため、200μm以上のサイズの組織体を作製することが難しい。これらの問題を克服し、精密な構造を有するサイズの大きな組織体を構築することが可能な技術として期待されているのがバイオファブリケーションであり、特に、原料と細胞を望みの位置に配置するバイオプリンティングの研究が、近年、さかんになっている。形成される3次元組織構造は、動物の代替モデルとなりうることから、薬物スクリーニング、薬物代謝解析、生体反応解析、種々病原菌やウイルス感染に伴う組織応答や免疫応答解析、病態モデルとしての利用などへの展開が検討されている。

骨の再生、治療用の材料は、骨伝導性（生体骨と直接結合する特性）を有するガラスの登場を契機に研究がさかんになり、生体適合性と骨伝導性を併せ示すセラミックス（水酸アパタイト、β型リン酸三カルシウムなど）が開発されてきた。これらの骨伝導性セラミックスから、バルク内部への骨組織再生（bone

ingrowth）を促す多孔質骨補填材や、生体内で吸収され生体骨に置換される生体吸収性骨補填材、生体内で硬化する骨セメント・ペースト、高分子材料との複合化により柔軟性を持たせたスポンジ状や綿状の骨補填材などが次々に開発され、臨床応用されている。患部の画像データとCAD/CAM技術にもとづいて成型・焼結されるカスタムメイド型骨補填材も実用化され、主に頭蓋骨や顎骨などの修復に用いられている。2018年には、従来の焼結法によらず、3Dプリンティング（インクジェット方式）で調製されるカスタムメイド型のリン酸カルシウム骨補填材も国内承認された。セラミックス材料は技術向上によりバイオ材料としての機能・信頼性が飛躍的に高まっており、適用範囲の拡大が進んでいる。例えば、高強度・高靭性ジルコニアは、これまで人工関節の骨頭などに使用されてきたが、近年、天然歯に近い色調を有し金属アレルギーの心配のない歯科補綴物としての普及が進んでいる。また、各種セラミックスフィラーの組成・構造制御により歯科用コンポジットレジンの高機能化（機能性イオン徐放性、審美性など）や高強度化が達成され、新製品の投入が相次いでいる。 CAD/CAMで切削加工される歯科用コンポジットレジンの硬化体ブロックは、下顎と上顎の第一大臼歯に対してそれぞれ2018年と2020年に保険適用となり、ジルコニアやPEEKなどとともに、歯科補綴分野における脱金属の流れを加速している。

ナノスケールの計測・界面分析技術やプロテオーム解析技術など、周辺分野の進展に伴って、バイオ材料の研究開発に有効な評価・分析ツールが年々増加・高度化している。これらのツールを利用して、生体内における材料表面の反応を表面自由エネルギーや水分子・生体分子との相互作用の観点から理解し、バイオ材料の設計・構築に活かそうとする研究開発が進められている。また、体内での使用を想定した材料の開発においては、生体内における材料バルクおよび材料表面の反応・経時変化を非臨床で予測・評価する必要があり、in vitroでの評価手法の開発が重要になっている。わが国では擬似体液（ヒトの体液とほぼ等しい無機イオン濃度を有する無細胞・無血清の水溶液）を用いた骨伝導性の評価手法が考案され、2012年に国際標準規格ISO 23317：2012として登録された。この擬似体液は数多くのバイオ材料の研究開発に活かされており、例えばチタン合金などの金属材料に骨伝導性を付与するための化学処理技術が見出され、人工股関節の表面改質に応用することで、副作用の懸念のあるアクリル系骨セメントを用いないセメントレス固定が可能になっている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

生体模倣による骨・歯材料

評価・分析技術の進歩によってヒトの生体内反応・生体組織に関する新たな知見が得られるようになり、生体内反応・生体組織に倣った材料の研究開発が進展している。例えば、健全な骨組織の再生にはアパタイト結晶/コラーゲン線維の異方性配列（骨基質配向化）が重要であることが、微小領域X線回折法やラマン分光法などにより明らかになった。また2000年代初頭に、ヒト骨ミネラル（水酸アパタイト）の成長単元としてリン酸カルシウムナノクラスターの存在が初めて報告され、その後のクライオ電子顕微鏡による実験的検証の結果、リン酸カルシウムナノクラスターにもとづく新たな骨ミネラルの核形成・結晶成長モデルが普及・定着した。さらに2018年には、新しい骨形成の機構として、軟骨細胞が破裂して生じるスペースが骨形成の足場となり、破裂した細胞の膜断片が骨石灰化の開始点になるとの報告がなされた。このような生体内反応・生体組織に関する基礎的知見にもとづいて、より高機能なバイオ材料を創製しようとする試みが活発化している。例えば、天然骨の組成を模倣して設計された炭酸アパタイトは、水酸アパタイトを凌駕する骨伝導性と生体吸収性を示すことが明らかになり、歯科インプラント適用の認められた国内初の骨補填材として2018年に

上市されている。他にも、リン酸カルシウムナノクラスターの挙動制御を通じて人工エナメル質を合成したり歯質を再生・修復しようとする研究、配向性骨組織の積極誘導を志向した異方性骨補填材を開発しようとする研究などが進められている。

サポートバスプリンティング

材料、細胞、生理活性物質を任意の位置に配置させながら3次元的に積層して、実際の生体組織に近い組織体を構築するバイオプリンティング技術が急速に進展している。バイオプリンティングでは、組織構造を維持するために材料（バイオインク）として紫外線硬化性のゼラチンメタクリレート（GelMA）などを用いて架橋する必要があるが、紫外線による細胞毒性などの問題がある。そこで、チキソトロピー流体の中で3Dプリントするサポートバスプリント技術が注目されている。チキソトロピー流体は、剪断応力を受け続けると粘度が低下し液状になるが、応力緩和により粘度が上昇して固体状態になる性質を持つ。チキソトロピー流体の中でシリンジが動くことで剪断応力を受け、サポートバスが局所で液状化し、プリント造形が可能となる。プリント後、シリンジが離れることで応力から解放され、サポートバスが固体化し、プリント物の構造が維持される。チキソトロピー性は分散系で観察される性質であり、サポートバスの流体としては比較的低濃度で会合体を形成しやすいジェランガムやジャンタンガムを用いる場合と、ゼラチンやアルギン酸などの微粒子を作製し、高濃度の溶液で用いる場合がある。3Dプリント後に除去する必要があるため、熱や光などの刺激により液状化するサポートバスを用いる場合が多い。これまで、心臓弁や心臓そのものの構造を細胞と細胞外マトリックス（ECM）で造形した研究が報告されており、複雑な組織・臓器構造の再現が期待されている。

バイオ材料としての細胞外小胞

エクソソーム（exosomes）などの細胞外小胞（extracellular vesicles： EVs）は体内に存在する細胞が放出する直径100nm前後の小胞であり、細胞の持つさまざまな情報分子（タンパク質、脂質、DNA、メッセンジャーRNA、マイクロRNAなど）を有し、細胞-細胞間情報伝達を担っていることが知られている。近年、さまざまな疾患の病態形成にEVsが関わることが明らかになりつつあり、病因の解明や診断、治療に関する研究に加え、EVsが有する細胞間情報伝達機能を利用したDDSへの応用など、さまざまな応用が検討されつつある。バイオ材料としてのEVsの研究もさまざまなアプローチで展開され、人工EVsを脂質やタンパク質などの構成成分を組み合わせてボトムアップ的に組み上げる方法や、細胞を微細孔に通過させて調製する方法、ナノ粒子表面をEVsの脂質膜で被覆する方法、バイオ材料によるEVs表面の修飾などが検討されている。血液脳関門を通過できるなど、EVsはDDSキャリアに適した性質を持つため、疾患の治療目的でsiRNAやマイクロRNA、抗がん剤などの送達に用いることが検討されているが、臨床試験に進んだものが一部にあるものの現時点で承認にいたった例はなく、標準的で生産性の高いEVsの調製方法の確立や、再現性と安全性の十分な確保、効果的な治療薬物導入法の確立など、解決すべき課題は多い。また、間葉系幹細胞から産生されるEVsで機能化されたバイオ材料を組織再生に応用しようとする研究も展開されている。

高次機能性バイオ材料

バイオ材料の機能をさらに向上させるために、2種類以上のバイオ材料を複合化し、各材料が持つ特性を相乗的に引き出した材料が開発されている。生体機能にできるだけ近づけるために、有機・高分子化合物と無機化合物の複合化や、生体吸収性を持つ合成高分子と天然高分子および細胞外マトリックスの複合化などが行われている。また、組織・臓器の再生に加えて、それらの欠損や機能不全の原因となる疾患を同時に治

療するバイオ材料の開発も進んでいる。抗菌性のナノ粒子を多孔質材料やハイドロゲルに導入することで、抗菌性と組織再生の機能を兼ね備えた、皮膚や骨などの治療用バイオ材料が開発されている。化学治療の薬物と光熱変換のナノ粒子を同時に足場材料に導入し、化学療法・温熱療法・再生医療を一体化した複合足場材料も開発されている。さらに、最近では、黒リンおよびその複合材料のバイオ材料としての研究が進んでいる。ナノシート化した黒リンは、量子ドットとしての性質、高い電子移動度に加え、優れた生体適合性と生体吸収性を備えており、がん治療、抗菌および再生医療への応用が検討されている。

コンビネーション製品

バイオ材料からなる機械器具に薬物を複合化することで、医療機器としての機能を増強したり、新たな効能・効果を付加することができる。このように、薬物、機械器具、加工細胞等のうち、2種以上の要素を組み合わせた製品をコンビネーション製品と呼ぶ。各要素を分離できない状態で複合化した一体不可分型のコンビネーション製品は、分離型のコンビネーション製品に比べて技術的ハードルが高い反面、革新的な治療効果が期待できることから注目されている。一体不可分型のコンビネーション製品としては、抗菌剤を配合したアクリル系骨セメントや、再狭窄予防効果の期待される医薬品を担持した薬剤溶出ステント、銀添加水酸アパタイトの成膜により骨伝導性と抗菌性を両立させた人工股関節などがある。複合化される薬物は、これまで取り扱いの容易な抗菌剤や低分子化合物に限定されてきが、近年、より難易度の高い高分子量のタンパク質医薬品を複合化した一体不可分型コンビネーション製品として、塩基性線維芽細胞増殖因子を担持した水酸アパタイト成膜人工骨および骨折固定具が開発され、臨床研究に進んでいる。現状では、一体不可分型コンビネーション製品は分離型製品に比して圧倒的に少ないものの、最近、厚生労働省によりコンビネーション製品の承認の道筋が示されたことから、今後の研究開発の加速・進展が期待される。

免疫誘導・炎症応答の制御

バイオ材料の存在により免疫細胞が引き起こす異物反応、炎症応答のメカニズムに関する研究や、材料で積極的に免疫誘導を起こして治療や組織再生を行う研究がさかんになっている。正常細胞では細胞膜の構成要素であるリン脂質に異方性が存在し、細胞の外側にホスファチジルコリンが、内側にホスファチジルセリンが多く存在するが、アポトーシスを起こした細胞では、ホスファチジルセリンが細胞の内側から外側に出てきて、これをマクロファージが”eat me signal”として認識し、貪食する。この機構を模倣して、ホスファチジルセリンを有するリポソームや高分子材料を”eat me signal”模倣材料としてマクロファージの活性化や免疫誘導に利用する研究が展開されている。また、マクロファージには炎症を引き起こすM1細胞と炎症を抑制するM2細胞が存在する。これらを適切に誘導して炎症応答を制御することが組織再生やバイオ材料の埋植に伴う炎症の抑制の観点から重要であり、材料を用いたM2細胞の誘導、M1細胞とM2細胞の可視化などが研究されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国ではNSFがサポートするCenter for Engineering MechanoBiology（CEMB）がペンジルバニア大学に設置され、複数研究機関によるメカノバイオロジーとバイオ材料の研究が展開されている。特に、メカノセンシング、機械刺激等に対する細胞の応答挙動、マイクロチップなどを用いた組織のリモデリング、形態形成、発達を評価するための生体模倣環境の構築などに主眼が置かれ、生体の理解を深めるためのバイオ材料と生体との関わりも含め研究が展開されている。同じくNSFのCenter for Emergent Behaviors of

Integrated Cellular Systems（CEBICS）では、筋細胞の運動性を利用したソフトバイオ材料からなるバイオマシンや神経細胞によるセンシングを利用したセンサ材料などの構築、オルガノイド形成のためのミクロ環境を提供しうる新規なバイオ材料に関する研究などが展開されている。 NIHの National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering（NIBIB）では、バイオイメージング、バイオエンジニアリング、インフォマティクスに関するプログラムが実施されており、そのなかで人工ウイルスやエクソソーム、ナノ粒子を用いたDDS、ハイドロゲルを用いた治療システム設計、人工臓器、体内埋め込み型デバイスの構築などに関する研究が展開されている。また、NIBIBがサポートするセンターの中には、イメージングによる治療や診断技術を発展させるプロジェクト、バイオ材料や細胞等の相互作用を表面解析から明らかにするプロジェクトや、複雑系組織工学に関するプロジェクト等があり、基礎研究から臨床研究まで広範に支援する制度が展開されている。 NIHのNational Center for Advancing Translational Sciences（NCATS）では2014年に3次元組織のバイオプリンティングに関するプログラムを開始し、網膜（National Eye Institute（NEI）との共同プログラム）や皮膚、がんモデルの開発を進めている。

欧州では、Horizon 2020のプロジェクトのなかで、「Biomaterials for Health, A Strategic Roadmap for Research and Innovation, Horizon 2020」としてバイオ材料の重要性が指摘され、基礎研究から実用化に至る研究戦略が提示され、研究助成が行われている。さらに、再生医療の分野に対する研究助成のなかで、脱細胞化組織を用いた組織再生に関する研究に対する助成が行われている。2006年に設立されたThe European Technology Platform on Nanomedicine（ETPN）のなかで、ホワイトペーパー「Contribution of Nanomedicine to Horizon 2020」が発出され、ナノ材料、ナノ医療の基礎研究から産業化へのトランスレーションを通じ、治療、診断、再生医療に展開するフレームワークを議論するとともに、研究支援が行われている。また、EUは将来的に影響力がもっとも高いとみられる100の技術イノベーションを報告書にまとめ（100 Radical innovation breakthroughs for the future）、そのなかに「Bioprinting」が入っている。Horizon 2020の後継フレームワークプログラムとして議論中のHorizon Europe（2021～2027年）において、4Dプリンティングなどの枠組みが検討されている。

日本では、新学術領域研究「水圏機能材料」（2018～2023年度）などでバイオ材料に関する基礎研究が、AMED「戦略的イノベーション創出推進プログラム」（S-イノベ、2012～2021年度）などで応用研究が進められている。

中国では、2015年5月にMade in China 2025（中国製造2025）が産業基盤の改革策として発出され、このうち、重点分野としてバイオ医薬品/高性能医療機器があげられている。これに伴い、人材育成、産業化に向けて戦略が練られており、バイオ材料分野での研究が飛躍的に伸びている。

（5）科学技術的課題

血液適合性の高い材料としてわが国発のMPCポリマーやMEAポリマーが医療機器に応用されている。MPCのようなベタイン構造が血液適合性に与える影響を調べるために、カルボキシベタイン型やスルホベタイン型などのポリマーが開発、検討され、MPCポリマーと同様の特性を有することが明らかになり、これらの材料では自由水の多いことが生体適合性に関与していると論じられている。一方で、MEAポリマーは含水率が低く、ある程度運動性を束縛された中間水の存在が血液適合性に関与すると報告されており、材料に存在する水の性質が生体適合性に与える影響については、両ポリマーの間で統一された見解は出ていない。一口に生体適合性といっても、生体適合性は多方面から明らかにされる性質であるため、バイオ材料の一面的な性質だけで判断することはできない。バイオ材料の精密設計を通じ、材料特性を制御すること、さらに、生

体適合性や、生体との相互作用を多面的にかつ定量的に明らかにする手法を確立する必要がある。

材料側因子には、例えば構成元素と結晶構造だけをとっても膨大な組み合わせが存在する。また、バイオ材料が使用される生体内環境には、水分子、無機イオン、タンパク質、糖などの生体分子、細胞といった多種多様な因子が存在し、それらが互いに影響し合いながら材料表面と反応する。革新的なバイオ材料の設計・構築には、材料側・生体側因子の多様で複雑な相互作用をより体系的・統合的に理解し、バイオ材料に対する生体側の応答をより精緻に予測・制御するための技術的・知的基盤の構築・充実化が必要である。人工知能（AI）やマテリアルズ・インフォマティクス、Lab-on-a-Chip技術などの導入により、従来は個々の研究者の知識・経験・直観にもとづいていたトライアル・アンド・エラーの研究プロセスを効率化することも重要である。

バイオプリンティングの問題として、組織・臓器の構築に必要な複数の条件を備えた材料（バイオインク）の種類不足があげられる。生体組織はさまざまなECMで構成されており、それぞれが異なる機能を有している。しかし、生体適合性と細胞接着性、粘弾性などにおいて必要な条件を満たす材料は限られているため、今後の開発が望まれる。また、バイオプリンティング技術の発展に伴い課題となるのが表面改質技術である。生体の組織・臓器ではバルクと表面で性質が異なり、表面は上皮細胞で覆われバリア機能を有している場合が多い。また、表面に発現しているECMもバルクとは異なる。そこで、実際の組織体に近づけるためには、作製した組織体の表面を修飾する必要があるが、複雑な組織構造になればなるほど局所的な表面修飾は困難となる。表面組成とバルク組成を制御してプリントする技術やプリント後に複雑な形状の局所表面のみを修飾する技術の開発が求められる。

複雑な組織・臓器構築に向けて顕在化してきた課題に、培地開発がある。細胞にはそれぞれ適した培地があり、複数種類の細胞を混合して組織体を作製するには、いずれの細胞にも悪影響を与えない組成の培地を開発する必要がある。組織・臓器構造が複雑になればなるほど細胞の種類が増えるため難しい課題ではあるが、全ての細胞に共通の培地が開発されることが理想的である。また、構築した3次元組織体について、組織体内部の細胞の機能を経時的に計測・可視化し評価する技術が必要になっている。

将来的には、生体内に一定期間留置されるバイオ材料に通信機能や自家発電機能（バイオ燃料電池）、生体情報モニタリング機能（スマート医療機器）、遠隔制御機能、機械学習・自己修復機能などの機能を搭載し、IoT社会への適応を志向した機能開発や関連する情報技術との融合を図っていくことが期待される。

（6）その他の課題

世界のバイオ材料研究の動向をみると、単独の研究チームには依らず、異分野連携、国際連携が活発に推進されている。一方、わが国では異分野連携に関して、一部の研究チームでは活発に行われているものの、領域全体としてはなかなか浸透していない現実がある。バイオ材料の研究戦略には大別して2つの方向性があり、一方はバイオデザインの考え方により医療現場での課題、ニーズにもとづきそれを解決するための材料設計・開発を行うもので、異分野連携を比較的進めやすく、目的を達成すれば実用化までの道のりは明確となる。もう一方は研究者オリジナルのアイデアにもとづく材料設計であり、医療現場では自覚されていないニーズの解決につながる可能性があるが、実用化までの道のりには予算や人材、医療現場のニーズとのマッチングなど、多くのハードルが存在する。どちらの方向性も重要であり、2つの研究戦略を同時に推進可能な体制の構築が必要といえる。いずれの場合も、材料の設計・合成から始まり、物理化学的評価、細胞や擬似体液などを用いたin vitro評価、動物を用いたin vivo評価、さらにはヒトを対象とした臨床研究、そしてPMDAなどへの承認申請と、多分野にわたる多くの工程と長い研究開発期間、多額の資金を必要とするが、医工を中心と

した異分野連携は、この長い道のりを歩むうえで極めて重要になる。異分野の人材が共通の知的好奇心と問題意識を共有し、課題の適切な設定とその解決のための連携を実現できる体制の構築が求められる。

また、イノベーションに適した組織への構造改革、研究環境の改善・強化とともに、産学官の連携を強力に推進し、長期的な研究開発を連続的に支える体制の構築が求められる。バイオ材料の「死の谷」の中には、安全性評価や臨床研究プロトコル策定、知財確保・強化、国際標準化への対応など、重要でありながらすぐには論文成果につながらない課題も数多く存在する。これらの課題を含め、バイオ材料研究開発の各ステージを担う多様な人材が必要であり、長期的視点の下で戦略的に人材育成を進めていくことも求められる。また、国際連携の推進も課題である。米国や欧州では国際連携を積極的に推進することで、各分野の専門家により境界領域をカバーしており、日本も海外との連携を積極的に行うことで、研究の加速化が期待される。

日本国内で臨床研究（治験）を行いPMDAの承認を得るためには少なくとも数億円を要し、これはEU諸国の数十倍ともいわれている。そのために多くの医療機器メーカーでは、まず、比較的小規模な臨床研究のデータでCEマークを取得後EUに流通させ、次に米国で大規模な臨床研究を実施してFDAの承認を取得し、その後PMDAの承認申請を行うという流れが一般化している。臨床研究ならびにPMDAによる製造販売承認にかかる諸手続きの効率化・迅速化も課題といえる。

バイオ材料分野の教育は、各大学における個々の教員の考えにもとづいて必要な内容が講義されているが、基礎と応用のバランス、工学系の学生に対する医学・生物学分野の教育、産業や規制の問題をどこまで扱うかなど、包括的なバイオ材料の理解を進めるうえで現在の教育が適切かどうか検討すべき時期に差し掛かっている。また、バイオ材料の研究者を育成するための、教育の質の確保も重要である。例えば、米国のSociety for Biomaterialsでは1990年代から、バイオ材料の基礎、生物学と医学、バイオ材料の実用化に関する内容を包含した教科書を編纂しており、約8年に一度改訂を行って内容の充実化が図られている。バイオ材料研究とその実用化は、材料学、工学、理学、生物学、医学、歯学、薬学、法学、経済学などがかかわる極めて学際的な領域であり、学問レベルの標準化、大学生から社会人までの継続的な人材養成、異分野融合研究を推進する研究人材の育成が求められる。また、異分野間をつないで人的交流を築くための知識とコミュニケーション能力を持つ、この分野の道案内ができる人材の育成も求められている。こうした人材育成を戦略的におこなうための標準となる教科書の作成や、人材育成の方法論の確立が望まれる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	基礎研究のポテンシャルは世界のトップクラスを維持しているが、主要誌の発表論文数や編集委員構成などにおいて、以前ほどの存在感がなくなってきている。国際連携、異分野連携が活発とはいえず、研究予算や研究支援体制も十分とはいえない。
	応用研究・開発	○	→	高い技術力と大きな医療機器市場規模（米国に次いで世界第2位）を背景に、世界シェアトップを誇るバイオ材料や医療機器がある一方、産・学ともに新興分野への参入意欲が十分ではなく、一部の成熟分野において質的・量的な活動の鈍化が認められる。臨床橋渡し・技術移転の支援体制は整いつつあるが、ベンチャー人材・起業家の育成も起業支援体制も十分とはいえず、バイオベンチャー上場数ならびにベンチャー投資市場規模は欧米に比べ低迷している。ただし近年、再生医療等製品やコンビネーション製品の国内承認の道筋が明確化されたことで、今後これらの研究開発が加速されていくことが期待される。
米国	基礎研究	◎	→	研究者人口が多く、バイオ分野への応用展開（起業）を視野に天然材料から合成材料まで幅広い研究が展開されている。さまざまな研究支援が行われており、新しい概念を取り入れた分野融合的な研究がさかんに行われている。
	応用研究・開発	◎	→	世界最大の医療機器市場規模を持ち、応用研究・開発がさかんである。ベンチャー人材・起業家の育成、起業支援体制が充実しており、理系学生・若手研究者を含め起業意欲が高い。そのため、有力な製薬・医療機器メーカーに加えてバイオベンチャーが数多く台頭しており、産学連携による臨床橋渡し・実用化研究がスピード感をもって進められている。大手企業がバイオベンチャーを買収し、量産・販売する流れも定着している。新製品の承認のハードルが比較的低く、日本国内で開発されたバイオ材料がまず米国で実用化された事例もある。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州の各国において再生医療、および再生医療用足場材料の研究開発を行う大規模の研究センターが多く立ち上げられ、基礎から応用までの研究開発が進められている。材料の設計、合成及び加工まで、種々の分野の研究者が集合して基礎研究をさかんに行っている。マクロファージの機能分類とそのバイオ材料による機能制御技術に注力、それらの技術の応用、事業化を推進している。特に、イタリア、オランダ、スペイン、オーストリアなどは、その傾向が強い。
	応用研究・開発	◎	→	医工連携、産学連携が概ね上手く機能している。動物実験の敷居が比較的低く、医療機関による臨床試験の受け入れも活発に行われている。ドイツ、ベルギーなどでは研究開発に対する優遇税制が整備されているほか、薬事規制ハードルならびに治験・薬事・品質管理にかかるコストが日本に比べて格段に低いため、新材料の製品展開が速い。技術移転機関（TLO）の整備が米国同様に進んでおり、バイオベンチャーの上場数・投資市場規模は、米国には及ばないものの、日本を上回る水準となっている。研究データ・製品に対する信頼は厚く、米国・日本に並んで高いブランド力を持つ。
中国	基礎研究	○	↗	以前は実用研究を重視し、オリジナリティのある研究成果は少なかったが、現在は基礎研究が十分に推進されるようになり、世界トップレベルの研究が進められている。バイオ材料を活用した足場材料に従事する研究者が急激に増え、多方面から基礎研究を進めている。研究者の総数だけでなく、重要な国際的学術組織で重要な位置を占める人員の数、およびトップジャーナルへの掲載論文数も大幅に増加しており、本領域内での国際的なプレセンス向上が顕著である。

	応用研究・開発	○	↗	基礎研究の段階から、臨床での応用も検討した展開が進められている。インパクトの大きい成果を出す研究者に対し、予算的なサポートも充実している。バイオ材料に関するさまざまな政策が充実しつつあり、本分野への政府からの予算支出も多くなっている。現在は、まだ米国、欧州に比して研究規模は小さいが、自国での市場規模が大きいというスケールメリットが大きい。現状では、製品ブランド力において欧米・日本に劣るものの、医療機器の規制にかかる体制の強化も進んでおり（例えば2019年に医療機器固有識別子（UDI）システム規則公布）、着実に力を伸ばしてきている。
韓国	基礎研究	○	→	実用化を見据えた基礎研究が行われている。高分子とセラミック関連のバイオ材料に関して多くの成果がある。また、2024年にはWorld Biomaterials Congressの開催国となることが決定しており、中国のバイオ材料研究者との相互交流が活発に行われている。ナノメディシンや再生医療などにも焦点を当てて、基礎研究の充実化が進められている。
	応用研究・開発	○	→	医療機器市場の高い成長率と、国内製造業の堅調な成長、積極的な政策支援を背景に、民間資金の受入れ・産学連携が活発に行われ、スピード感のある応用研究・実用化研究が推進されている。再生医療については、製品化されているものも多い。大学・公的研究機関発のバイオベンチャーも増えてきている。研究データ・製品に対する信頼性は比較的高く、高度管理医療機器の生産額も増加している。製品ブランド力は今後さらに向上する余地がある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ナノ医療システム（ナノテク・材料分野　2.2.2）
・バイオ計測・診断デバイス（ナノテク・材料分野　2.2.3）
・バイオイメージング（ナノテク・材料分野　2.2.4）

参考・引用文献

1）A. Gilpin and Y. Yang, “Decellularization strategies for regenerative medicine：From processing techniques to applications”, *Biomed. Research International* 2017（2017）：9831534. doi：10.1155/2017/9831534

2）M. Matsusaki, C. P. Case and M. Akashi, “Three-dimensional cell culture technique and pathophysiology”, *Adv. Drug Deliv. Rev.* 74（2014）：95-103. doi：10.1016/j.addr.2014.01.003

3）I. Matai et al., “Progress in 3D Bioprinting Technology for Tissue/organ Regenerative Engineering”, *Biomaterials* 226（2020）：119536. doi：10.1016/j.biomaterials.2019.119536.

4）E. Saygili et al., “3D bioprinting：A powerful tool to leverage tissue engineering and microbial systems”, *Bioprinting* 18（2020）：e00071. doi：10.1016/j.bprint.2019.e00071
5）宮崎敏樹 他「生体関連セラミックスの新潮流」『セラミックス』54巻6号（2019）：417–421.
6）T. Kokubo and H. Takadama, “How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?”, *Biomaterials* 27, no. 15（2006）：2907–2915. doi：10.1016/j.biomaterials.2006.01.017
7）中野貴由 他「骨質指標としての骨基質配向性とその変化」『BIO Clinica』35巻7月号（2020）：61–67.
8）A. Dey et al., “The role of prenucleation clusters in surface-induced calcium phosphate crystallization”, *Nat. Mater*. 9（2010）：1010–1014. doi：10.1038/nmat2900
9）E. S. Hara et al., “Bioinspired mineralization using chondrocyte membrane nanofragments”, *ACS Biomater. Sci. Eng.* 4, no. 2（2018）：617–625. doi：10.1021/acsbiomaterials.7b00962
10）C. Shao et al., “Repair of tooth enamel by a biomimetic mineralization frontier ensuring epitaxial growth”, *Sci. Adv*. 5, no. 8（2019）：eaaw9569. doi：10.1126/sciadv.aaw9569
11）T. Bhattacharjee et al., “Writing in the granular gel medium”, *Sci. Adv*. 1, no. 8（2015）：e1500655. doi：10.1126/sciadv.1500655
12）T. J. Hinton et al., “Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels”, *Sci. Adv*. 1, no. 9（2015）：e1500758. doi：10.1126/sciadv.1500758
13）A. Lee et al., “3D bioprinting of collagen to rebuild components of the human heart”, *Science* 365, no. 6452（2019）：462-487. doi：10.1126/science.aav9051
14）J. P. K. Armstrong, M. N. Holme and M. M. Stevens, “Re-engineering extracellular vesicles as smart nanoscale therapeutics”, *ACS Nano*. 11, no. 1（2017）：69-83. doi：10.1021/acsnano.6b07607
15）P. Garcia-Manrique et al., “Therapeutic biomaterials based on extracellular vesicles：classification of bio-engineering and mimetic preparation routes”, *J. Extracellular Vesicles* 7（2018）：1422676. doi：10.1080/20013078.2017.1422676
16）M. Lu and Y. Huang, “Bioinspired Exosome-Like Therapeutics and Delivery Nano-platforms”, *Biomaterials* 242（2020）：119925. doi：10.1016/j.biomaterials.2020.119925
17）M. A. Brennan, P. Layrolle and D. J. Mooney, “Biomaterials functionalized with MSC secreted extracellular vesicles and soluble factors for tissue regeneration”, *Adv. Funct. Mater.* 30, no. 37（2020）：1909125. doi：10.1002/adfm.201909125
18）J. Chen et al., “Advances in Nanomaterials for Photodynamic Therapy Applications：Status and challenges”, *Biomaterials* 237（2020）：119827. doi：10.1016/j.biomaterials.2020.119827
19）B. Ferrigno et al., “Bioactive Polymeric Materials and Electrical Stimulation Strategies for Musculoskeletal Tissue Repair and Regeneration”, *Bioactive Materials* 5, no. 3（2020）：468-485. doi：10.1016/j.bioactmat.2020.03.010
20）Roel C Op 't Veld et al., “Design Considerations for Hydrogel Wound Dressings：Strategic and Molecular Advances”, *Tissue Engineering Part B：Reviews* 26, no. 3（2020）：230-248.

doi：10.1089/ten.TEB.2019.0281
21）Y. Yanagisawa et al., “Initial clinical trial of pins coated with fibroblast growth factor-2-apatite composite layer in external fixation of distal radius fractures”, *J. Orthop*. 16, no. 1（2019）：69–73. doi：10.1016/j.jor.2018.12.012
22）厚生労働省「薬食審査発1024第2号，薬食機参発1024第1号，薬食安発1024第9号，薬食監麻発1024第15号（2014年）：コンビネーション製品の承認申請における取扱いについて」
23）厚生労働省「薬生機審発0313第2号（2019年）：革新的医薬品・医療機器・再生医療等製品実用化促進事業の成果に基づき策定された試験方法の好評について（歯科・整形外科分野で用いられる医療機器たるコンビネーション製品（植え込み型の機械器具と、抗菌系薬物または組織系成形薬物）の評価指標）」
24）H. Quan et al., “Effects of phosphatidylserine-containing supported lipid bilayers on the polarization of macrophage”, *J. Biomed. Mater. Res. Part A* 106, no. 10（2018）：2625-2633. doi：10.1002/jbm.a.36454
25）Md. Z. Hosain et al., “Synergic modulation of the inflammatory state of macrophages utilizing anti-oxidant and phosphatidylserine-containing polymer-lipid hybrid nanoparticles”, *Med. Chem. Commun*. 8, no. 7（2017）：1514-1520. doi：10.1039/c7md00174f
26）K. Sato et al., “Controlled release of pioglitazone from biodegradable hydrogels to modify macrophages phenotype”, *Inflammation and Regeneration* 35, no. 2（2015）：86-96. doi：10.2492/inflammregen.35.086
27）R. Tanaka et al., “Preparation of fibrin hydrogels to promote the recruitment of anti-inflammatory macrophages”, *Acta Biomaterialia* 89（2019）：152-165. doi：10.1016/j.actbio.2019.03.011
28）米国医療機器・IVD工業会「医療機器提供コストの日欧比較調査」（2019）

2.2.2 ナノ医療システム

（1）研究開発領域の定義

ナノテクノロジーを活用することで、革新的な医療の実現をめざす研究開発領域である。薬剤、診断用プローブや生理活性物質を患部等に選択的に送達するナノ薬物送達システム（ナノDDS）を中心に、光や磁場に応答するナノ粒子や量子技術を活用した新規ナノ医療、診断と治療を一体化・複合化した高度な医療技術を目指すナノセラノスティクスなどの研究開発が進められている。

（2）キーワード

高分子ミセル、リポソーム、量子ドット、ナノ粒子、細胞外小胞、エクソソーム、核酸医薬、遺伝子編集、MRI、MPI、PET、ナノメディシン、EPR効果、コンパニオン診断、ハイパーサーミア、抗体-薬物コンジュゲート（ADC）、ナノワクチン、造影剤

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

近年、医療技術にイノベーションをもたらす可能性を秘めた多様な要素分子・材料が創出されている。例えば、あらゆる遺伝子の調節を可能にするオリゴ核酸分子、抗原デザイン性に優れるDNA/RNAワクチン、迅速かつ汎用性の高い遺伝子編集を実現するCRISPR-Cas、近赤外生体イメージング・光線力学療法を可能にするセラミックスナノ粒子、既存技術の10万倍の超高感度MRIを実現可能な超偏極プローブなどがあげられる。これらの要素分子・材料の医療応用を実現するには、標的となる生体内の臓器や組織、細胞への到達効率（バイオアベイラビリティ）の向上が課題であり、体内/細胞内動態を制御するナノDDSの開発が必要になっている。

ナノDDS（Drug Delivery System）の開発においては、動物実験で得られた成果が臨床試験での成績と対応しないことが問題として指摘されている。実験と臨床の間の解離を説明する主な理由として、（1）実験で用いた疾患動物モデルと臨床におけるヒト患者の病理組織が異なること、（2）固形がん等は患者によって、あるいは同じ患者でも腫瘍部位により病理組織が異なることがあげられる。このギャップを埋める方法論の1つが、診断用の造影剤が組み込まれたナノDDS、すなわちナノセラノスティクスである。分子標的薬や抗体医薬の治療前に行うコンパニオン診断と同様の考え方で、あらかじめナノセラノスティクスにより体内動態イメージングを行うことで有効性の高い患者を抽出し、ナノDDSの恩恵を最大化することができる。また、ナノセラノスティクスは治療と診断を同時に、あるいは組み合わせて行うとの概念であり、病巣の早期発見・早期治療を実現する新しい方法論の提案も期待される。

さらに、病理組織の違いを回避・克服する方法論として、量子ビーム、超音波、熱、磁場などの外部刺激に応答して病理組織そのものを改変する次世代型のナノDDSも開発されている。物理化学、生物学、および材料工学により創出された革新的な材料・技術を医療応用につなげるためのインターフェイスとして、これらナノ医療システムは不可欠になっている。

［研究開発の動向］

DDSとは薬物治療の最適化を目的に、必要な薬物を必要な量だけ、必要な時間に必要な部位で作用させるための技術のことである。特に、精密に設計されたナノ粒子やナノ構造体を用いて薬物送達をおこなうナノDDSは、ナノ医療システムの基盤であり、医薬品・医療技術開発におけるプラットフォームとして期待されて

いる。近年のナノDDSに関する多くの研究・開発は、1980年代後半に報告された10～100 nm径のナノ粒子が固形がんに集まりやすいとする性質、いわゆるEnhanced Permeability and Retention（EPR）効果に端を発し、EPR効果を介して固形がんを標的とする「受動的ターゲティング型ナノDDS」が主に検討されてきた。これまでに、リポソーム製剤（6種類）、ポリエチレングリコール被覆（PEG化）リポソーム製剤（2種類）、高分子ミセル製剤（2種類）、アルブミンナノ粒子製剤（1種類）が、がん治療用ナノDDSとして米国（FDA）、欧州（EMA）、中国（NMPA）、インド（DCGI）、韓国、あるいは日本で承認され、また1000件を超える臨床試験が進められている。また、治療目的だけでなく、がんの診断あるいはイメージガイド手術への適用をめざした近赤外蛍光分子内包高分子ミセル製剤も臨床第II相試験中である。一方、ナノDDSの実用化および臨床試験が進むにつれ、非臨床で実験的に得られた効果がヒト患者に対する臨床試験の成績と必ずしも一致しないという問題が指摘されるようになった。これは、マウス担がんモデルの画一性と、ヒト患者がん組織の異質性（heterogeneity）によるものと解釈される。つまり、ヒト患者のがん病理組織は非常に多様で、患者間での違いに加え、1人の患者においても部位などによって病理組織は異なるため、ナノDDSの作用やEPR効果にはばらつきが生じる。

上述の経緯を踏まえ、現在のナノDDS研究の主な潮流は、①がんの異質性の回避・克服に向けた取り組み、②抗がん活性自体を増強あるいは副作用を低下させる設計、③がん以外の部位の標的化によるDDS、④新しい材料にもとづくナノDDS開発、の4つのアプローチである。①をさらに細分化すると、（i）EPR効果を最大限に利用する方法論、（ii）EPR効果自体を増強する方法論、（iii）EPR効果だけに依存しない方法論、（iv）コンパニオン診断に向けたナノセラノスティクスの開発となる。

（i）の具体例の1つはナノDDSのサイズ調整（ダウンサイジング）で、ナノDDSのサイズをより小さくすることで腫瘍組織浸透性を高める試みである。例えば、約100 nm径のPEG化リポソームの場合、血管の豊富なマウス大腸がんモデルではがん細胞に到達できるが、血管に乏しい線維性のマウス膵臓がんモデルでは間質組織に阻まれ、がん細胞に到達できない。一方、約30 nmの高分子ミセルの場合、上記いずれのモデルにおいてもがん細胞に同レベルで到達できる。したがって、サイズを小さくすることで、がん病理組織の影響を受けにくいナノDDSを設計できる。また、もう1つの具体例に、がん間質組織を標的とするナノDDSの設計がある。線維性の膵臓がんモデルなどにおいて、PEG化リポソームなどの約100 nm径のナノDDSは、がん細胞には到達できないが間質組織に集積する。そこで、間質組織に特異的な生化学シグナル（pH、アンモニア、活性酸素、酵素など）に応答する化学結合を組み込み、間質組織内で抗がん剤を放出してがん細胞を攻撃するための設計が試みられている。

（ii）は、がん組織によってはEPR効果が十分ではないことから、生理活性物質や外部刺激を用いて病理組織を改変し、腫瘍組織浸透性を増強する試みである。生理活性物質を用いる具体例としてはアンジオテンシンII阻害剤であるロサルタンや一酸化窒素による血管の拡張、血管内皮増殖因子、受容体の阻害剤による血管の正常化（血管新生の抑制）、さらにはTGF-β阻害剤による壁細胞の脱離などがあげられる。また、外部刺激の具体例としては、放射線照射により活性化した腫瘍性マクロファージがナノDDSの腫瘍血管透過性を増加させるアプローチや、超音波刺激によりマイクロバブルから生じるキャビテーションを利用して腫瘍血管透過性を亢進するアプローチなどが報告されている。マイクロバブルを利用したアプローチは、がんの標的化だけでなく、血液-脳関門の突破に向けても展開されている。

（iii）の主流は「能動的ターゲティング型ナノDDS」であり、がん細胞表面に特異的に接着する分子をリガンドとして利用して、ナノDDSの標的指向性を高めるアプローチである。代表例は抗体-薬物コンジュゲート（ADC）で、抗体と薬物の組み合わせに関する研究や、薬物の結合様式（リンカー構造）および位

置と数を制御する研究が行われている。具体例として、HER2陽性乳がん細胞に高い特異性を示す抗体（トラスツズマブ）に8つの抗がん剤が結合したADCが日本発のHER2陽性乳がん治療薬（エンハーツ®）として2020年に承認されている。また、ADCはサイズが約10 nmであり、（i）に示したダウンサイジングの効果も期待される。一方、ADCは標的指向性が高い反面、適応可能ながんの種類が限定的であるため、がん細胞そのものではなく、腫瘍性の血管内皮細胞や間質組織を標的とするリガンドが注目されている。例えば、環状RGD（アルギニン-グリシン-アスパラギン酸）ペプチドで修飾されたナノDDSは、腫瘍性の血管内皮細胞に高発現している$\alpha_v\beta_3$/$\alpha_v\beta_5$インテグリンに結合し、血管内皮細胞内を通過してがん細胞に到達することが報告されている。この報告で重要なのは、ナノDDSのダウンサイジングだけでは到達できなかった脳腫瘍モデルに対しても有効性が認められたことで、細胞間隙を移動するルートでは到達できないがん細胞に、細胞内ルートによって到達できる可能性が示唆されている。

（iv）は、抗がん剤と造影剤を同時にナノDDSに搭載することによって、治療だけでなく、診断や動態評価を可能にするナノセラノスティクスを構築することであり、ナノDDS治療に高い感受性を示す患者をあらかじめ抽出することが可能になると期待される。

②のアプローチ、抗がん活性自体の増強あるいは副作用を低下させるためのナノDDSの設計に関しては、（v）2種類以上の抗がん剤のナノDDS封入による合剤化、（vi）がん免疫療法との併用療法、（vii）抗がん剤の放出挙動の制御、などに細分化される。（v）は、複数種類の薬物を単一のナノDDSに封入することで、体内動態の同期にもとづいてシナジー効果を得るアプローチである。例えば、耐性がんに対して、抗がん剤と共に耐性因子を阻害する薬物をデリバリーすることで、抗がん剤の薬効を高めることが可能になる。（vi）は、通常の抗がん剤治療の場合、副作用により免疫系が障害されるため、がん免疫療法（免疫チェックポイント阻害剤など）との併用療法は困難であるのに対して、ナノDDSを用いると抗がん剤の副作用を大きく低下させられることから、がん免疫療法との併用療法をめざすものである。（vii）は、腫瘍組織以外では抗がん剤を放出しないようにナノDDSを設計するもので、腫瘍組織あるいはがん細胞特異的な生化学シグナルに応答して切れる化学結合を介して薬物をナノDDSに封入する。

③のアプローチ、がん以外の部位の標的化は、核酸封入ナノDDSを用いた遺伝病治療やワクチン開発においてさかんに検討されている。なかでも、肝臓や脾臓を標的とするナノDDSが広く検討されており、これは、肝臓と脾臓の血管壁は不連続内皮と呼ばれる間隙の大きな構造を有しているため、ナノ粒子が相対的に集積しやすいことによる。特筆すべき具体例として、2018年（日本では2019年）に初のsiRNA医薬として承認された脂質ナノ粒子製剤（Patisiran）があげられる。この脂質ナノ粒子製剤は血流中でアポリポタンパクE（ApoE）と結合し、肝実質細胞表面のApoE受容体を介して細胞内に移行することが知られている。また、細胞内に移行した後、構成成分の1つであるイオン化脂質（MC3）がエンドソーム弱酸性環境でイオン化し、エンドソーム膜に融合することで効率の良い細胞質移行が達成される。この知見にもとづいて、より優れたイオン化脂質を見出すためのライブラリーが構築され、さらなる構造最適化・スクリーニングが国内外で行われている。脂質ナノ粒子は、siRNAだけでなくmRNAも高効率にデリバリーできることから、Casタンパク質をコードしたmRNAデリバリーによる遺伝子編集（CRISPR-Cas）への適用も注目されている。さらに、肝臓・脾臓以外で脂質ナノ粒子の標的として期待されているのが、コロナ禍で喫緊の課題となっているワクチン開発である。脂質ナノ粒子の筋肉内投与により、筋組織内でmRNAから抗原タンパク質を発現させ、効率的に獲得免疫を誘導するナノワクチンの開発が進められている。また、新たな投与経路の開拓にも期待が集まっており、その代表が鼻-脳経路である。経鼻投与された薬物は血液-脳関門（Blood-Barin Barrier：BBB）を回避して脳内に移行することが知られているが、近年、ナノDDSを用いることで経鼻投与後の脳内移行効

率を改善できることが報告されている。

④の新たなデリバリー材料としては、エクソソームに代表される細胞外微粒子、赤血球などの生体由来膜で被覆されたナノ粒子、金属-有機フレームワーク（MOF）を介して調製されたナノ粒子などがあげられる。

また、セラノスティクス（theranostics）は治療と診断評価を一体化するとの概念で、セラノスティクスを実現するためにナノテクノロジーを活用したものがナノセラノスティクスである。ナノDDSにおけるアプローチの（iv）に示した、抗がん剤と造影剤を同時に登載したナノDDSはその一例であり、ナノセラノスティクスは分子イメージングに代表される高精度な非侵襲的・生体イメージング技術、各種ナノ造影剤・プローブ技術の発展とともに進展している。金、ポリマー、量子ドット、磁気微粒子、カーボンあるいはそれらの複合材料からなるナノ粒子が開発され、光学イメージング、CT、X線、磁気共鳴イメージング（MRI）、磁気粒子イメージング（MPI）などに応用されている。特に磁気微粒子は、MRIやMPIで早期がんを検出した後に磁場を印加して行う、がん温熱療法（ハイパーサーミア）応用に適する点で注目されている。また、量子技術の活用が進み、ナノダイヤモンドやナノシリカ内部の格子欠損に窒素などを注入して蛍光センサとする技術、ナノダイヤモンドに含まれる^{13}Cを対象に、MRIの信号強度を数万倍まで引き上げる超偏極技術などが開発されている。ナノダイヤモンドは偏極寿命を延長させる効果を持つことから、放射性同位体を使わずに、高感度かつ高解像度で生体内を追跡できるプローブとして注目されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

核酸医薬の相次ぐ承認

2018年に初のsiRNA医薬「Patisiran」が承認され、2019年には第2のsiRNA医薬「Givosiran」が、2020年には国産のエクソン・スキップ核酸医薬「Viltolarsen」が承認された。2016年以降、毎年のように新たな核酸医薬が承認されており、今後の医薬品開発の柱になるものと予想される。これと並行して、核酸医薬のポテンシャルを最大限に引き出すために、肝臓以外の標的臓器・組織に核酸医薬をデリバリーする技術が強く求められている。特に、siRNAやmiRNAは、デリバリー技術なしで承認されているアンチセンス核酸などと比べ細胞内への移行効率が非常に低いことから、デリバリー技術の開発が特に重要になる。

ナノワクチン（RNAワクチン）・新型コロナウイルス感染症ワクチンの開発

コロナ禍の状況に後押しされ、これまでとは比べものにならない速さで、世界でワクチン開発が進んでいる。新型コロナウイルスに対するRNAワクチンは、すでに承認されて接種の始まった国もあり、今回の事例でRNAワクチンが優れた獲得免疫誘導能を示せた場合、今後のワクチン開発の主流となる可能性を秘めている。 mRNA単体の細胞内移行効率は非常に低いことから、RNAワクチンの獲得免疫誘導能、すなわちワクチンとしての成否はナノDDS技術にかかっていると考えられる。日本でも新型コロナウイルスに対するワクチンとして、高分子ミセルを用いた人工ベクターを用いたmRNAワクチンやナノゲルを用いたタンパク質抗原ワクチンの開発が進められている。

免疫ナノDDS療法

免疫チェックポイント阻害剤（抗体医薬）によりがん免疫療法が注目され、免疫を制御するためのナノDDS研究がここ数年活発化している。光感受性物質を付加した薬剤を導入した抗体を利用した光免疫治療（近赤外光線免疫療法）は、局所再発頭頸部がんに対して国際共同第3相臨床試験が進み、厚生労働省に

対して2020年3月に医薬品と医療機器の製造販売の承認申請が行われている。また、ワクチン免疫療法においては、抗原タンパク質、核酸、アジュバントを免疫担当細胞に送達するナノDDSの開発研究が世界的に活発化している。ナノゲルを用いたがん免疫ペプチドワクチンは臨床試験が開始され、また、肺炎球菌予防のための経鼻タンパク質ワクチンは、前臨床が終了して臨床に向けた研究が進んでいる。多糖であるシゾフィラン（SPG）に核酸医薬を複合体化させた抗原提示細胞選択的デリバリーシステム（Dectin-1選択的デリバリー技術）は、サルによる全身投与で標的細胞の標的核酸に効率よく作用することが確認され、現在核酸医薬の1つが臨床試験に入っている。

エクソソーム

細胞外小胞（Extracellular Vesicle：EVs）の1つであるエクソソームに関する研究が世界的にさかんになっている。エクソソームは細胞から分泌される直径50～150 nmの顆粒状の物質で、がんや、神経変性疾患に関係するという報告もある。内包する物質を安定的に輸送し、細胞間の情報を伝達する機能を持つことから、ナノDDSとしての利用に注目が集まっている。また、生物学的に放出されるエクソソームだけでなく、化学刺激や物理刺激により放出される細胞外小胞をナノDDSに利用する研究も活発になっている。エクソソーム膜で被覆したナノ微粒子、エクソソームとリポソームを融合したハイブリッドベシクル、さらに機能性膜タンパク質を組み込んだ人工エクソソームの開発も進んでいる。診断薬、治療薬、試薬、研究ツールなどのエクソソーム関連産業は、2025年にはおよそ260億円近くになると予想されている。

細胞膜コーティングナノ微粒子

細胞から細胞膜だけを取り出してナノ微粒子の表面にコートした細胞膜コーティングナノ微粒子の研究が世界で活発に進められている。米国UCSDのLiangfang Zhang教授による、赤血球や血小板の細胞膜をコートしたナノ微粒子の調製とナノDDSとしての有用性を示した研究が端緒となり、さまざまな疾患治療に応用されつつある。金属ナノ粒子、無機ナノ粒子、有機ナノ粒子などの様々なナノ粒子に細胞膜をコートする技術（細胞膜コーティングテクノロジー）として、ナノ医療の新しいプラットフォームとして大きく進展している。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国では過去15年以上にわたり、NCI（National Cancer Institute）のAlliance for Nanotechnology in Cancerなどさまざまな施策によってナノテクノロジーを活用した医療技術に関する研究開発が支援されている。また、National Institute of Standards and Technology（NIST）およびFood and Drug Administration（FDA）と共同でNCIに設立されたNanotechnology Characterization Laboratory（NCL）ではIND申請（米国における治験届け出）に必要なナノ材料の諸特性の解析をサポートしている。 NISTとの共同開発による評価技術の確立により、ナノDDSをはじめとするナノメディシンの安全性の評価技術の進歩に大きく貢献している。現在、NCLの特性評価プログラムでは、がんだけでなく、新型コロナウイルス感染症を対象にしたナノメディシンの評価も受け付けている。

欧州では、2014年から2020年までの科学技術イノベーション推進の枠組みであるHorizon 2020の下、ナノテクノロジーは萌芽未来技術（Future and Emerging Technologies：FET）の1つと位置付けられ、ナノDDSやナノセラノスティクスを含むナノメディシン研究をETPN（Nanomedicine European Technology Platform）が支援し、産業化へつなぐ体制になっている。また、EUは2019年に、将来的に影響力がもっとも高いとみられる100の技術イノベーションを報告書にまとめ（100 Radical innovation

breakthroughs for the future）、そのなかに「Drug delivery」が入っている。各国による取り組みも行われ、例えばポルトガルにはスペインと共同で設立されたInternational Iberian Nanotechnology Laboratoryがあり、世界中から研究者を募っている。ナノテクノロジーに関する広い分野をカバーし、ライフサイエンス分野ではナノDDSやセラノスティクスを含むナノメディシンのプロジェクトが走っている。

日本では、川崎市産業振興財団ナノ医療イノベーションセンター（iCONM）が平成27年4月に発足以来着実に成果をあげており、生体内診断、治療ナノマシンの開発、脳へのデリバリーシステム、核酸医薬DDSなどの研究が進展している。中心プロジェクトとして文部科学省・革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）「スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点」が進行中であり、多くの大学、研究機関、企業が参画している。また、iCONMは2020年4月1日より、新型コロナウイルス感染症に対するmRNAワクチン生産技術に関する研究開発を東京都医学総合研究所と共同で開始している。

日本医療研究開発機構（AMED）において、「創薬基盤推進研究事業（2020～2022年度）」「先端的バイオ創薬等基盤技術開発事業（2019～2023年度）」「次世代がん医療創生研究事業（2016～2021年度）」「遺伝子・細胞治療研究開発基盤事業（2018～2020年度）」などの事業でナノ医療に関連する研究開発が行われている。また、JSTではCREST「細胞外微粒子に起因する生命現象の解明とその制御に向けた基盤技術の創出」領域（2017～2025年度）において、ナノDDSやナノセラノスティクスの基盤となる研究が推進されている。

2018年に発足した量子科学技術研究開発機構（QST）において、量子生命科学領域ではダイヤモンド量子ナノセンサの開発、量子医学・医療部門の分子イメージング診断治療研究部ではPETやMRI、放射性同位元素などを用いたセラノスティクスに関する研究が進んでいる。

京都大学に2019年に設立された量子ナノ医療研究センターは、京都大学の物質-細胞統合システム拠点（iCeMS）とカリフォルニア・ナノシステム研究所（CNSI）およびカルフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）のDepartment of Microbiology, Immunology and Molecular Genetics（MIMG）による共同研究組織であり、量子ビームの研究とナノ材料の研究の統合によって生み出される新しいナノ医療を発展させることを目的としている。

NIHの呼びかけにより、2005年から日本ナノメディシン交流協会が設立され、2007年から協会主催の国際シンポジウムが日本国内で毎年開催されている。医学、薬学、化学、物理学など幅広い分野から、ナノテクノロジーと医療の融合をめざしたレベルの高い、新しい概念が紹介されている。この団体から派生した日中ナノメディシン国際シンポジウムが毎年、日本と中国で交互に開催され、ハイレベルな研究成果が発表されているが、2020年は新型コロナ感染症のため中止となった。

（5）科学技術的課題

ナノ材料の医療応用において、静脈から体内へ導入する場合には、血中での分散性が重要になる。粒子の1次粒径がナノサイズであっても、血中で凝集して血管を詰まらせる恐れがあり、また、in vitroとin vivoでは動態が異なる場合も多く、十分に確認する必要がある。界面活性剤には毒性の強いものが多いため、新しい分散剤の開発も求められる。すでに使用されている分散性の良い製剤に学んだ材料設計も重要といえる。また、血中での滞留性の制御も重要であり、クッパー細胞による貪食や、サイズによる臓器分布を考慮した設計・制御が必要である。

脳と血液の間の物質移動を制限する血液脳関門（BBB）の存在によって、脳腫瘍や脳神経系の疾患部位へ薬剤を到達させることは極めて困難になっている。いくつかの方法論が提案され、蛍光物質や、グルコーストランスポーターを利用した高分子によるBBB通過も報告されているが、より大きな分子を通過させるため

の技術が求められる。

MRIの造影剤としては、現在、リゾビストに代表される鉄酸化物やガドリニウム錯体が用いられているが、T1短縮効果が高いガドリニウム製剤は、近年、重度腎障害患者に発現する副作用が問題視され、これに変わるT1短縮効果を持つ造影剤の開発が急がれる。本来T2短縮効果を示す材料でもナノサイズ化することによって効果が変化する可能性もあることから、各国のナノ磁性に関する研究者が検討を始めている。造影剤開発はMRIに限らず、CT検査等に用いられるヨード造影剤の代替や、温熱療法の発熱媒体としての機能登載などの観点から重要であり、開発の加速が求められる。

ナノワクチンの開発はコロナ禍において喫緊の課題になっているが、世界中で大人数の患者に定期的に投与する必要があることから、mRNAおよびナノDDSを大量に合成・保存する技術、さらにmRNAの投与量を減らすためのナノDDS技術の開発が不可欠といえる。

（6）その他の課題

日本では医薬品の研究開発に10年以上を要し、研究開発費は年々増加傾向にある。また、新型コロナウイルス感染症の治療薬でも明らかになったように、他国で使用されている薬が日本で承認されて使えるようになるまでの期間も非常に長い。近年は、PMDAの審査スタッフが増員されたため、審査ラグは解消されてきているが、開発ラグを短縮してドラッグラグの解消をめざす必要がある。また、先行する欧米の臨床試験で安全性・有効性が示されている医薬品を日本で使用するには、日本人を対象としたデータを集める必要があるが、治験コーディネーター、データマネージャーなどの専門人材が不足している。今後、レギュラトリーサイエンスを専門とする人材の育成が重要といえる。

ナノDDS、ナノセラノスティクスなどのナノ医療の進展には、医学、薬学のみならず、物理学、化学、生物学、機械工学、電気工学などの研究分野間における連携が必須となっている。各分野での専門用語の違いや習慣の違いによる隔たりを、お互いの必要性を認識し、尊重しながら埋めていくことが重要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	リポソーム、高分子ミセル、ナノゲル、PLGA等のナノ粒子やエクソソーム、炭素材料、量子ドットなど多様な素材によるナノ基盤技術を持つ。ナノDDS製剤に関するパイオニア的研究も多く、日本DDS学会などの活動を通じて高い研究力が維持されている。また、核酸の化学修飾体やデリバリー研究においても優れた知見と技術力を有しており、日本核酸医薬学会（2015年～）や日本核酸化学会（2016年～）の設立に後押しされ、益々活性化している。一方、論文の発表数や、被引用回数に関しては、欧米中との差が開きつつある。
	応用研究・開発	○	→	ナノ医療の社会実装を後押しする研究プロジェクトとして、文科省COI STREAM「スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点」などがあり、アカデミア発のバイオベンチャーが複数設立され、AccuRnaによるsiRNA内包ナノDDSの臨床試験も始まっている。 AMED次世代がん医療創生研究事業では、「次世代がん医療創生研究における先進技術支援」として技術支援班が設置されており、そのなかのDDS支援班によって導出を加速させるアプローチが組み込まれている。産業的には、国産の核酸医薬（ビルトラルセン）や抗体-薬物コンジュゲート（エンハーツ）が承認されている。一方、コロナ禍でのワクチン開発あるいは診断技術の開発などでは欧米の遅れをとっており、研究開発における瞬発力に課題がある。

米国	基礎研究	◎	↗	ナノ医療に関する全ての分野で質の高い研究が報告されており、連携・共同研究体制もしっかりしている。研究の具体例として、MITのグループは世界に先駆けて脂質様分子ライブラリーによる核酸デリバリーに着手しており、PatisiranやRNAワクチンを含む、その後の脂質ナノ粒子製剤の開発に大きなインパクトを与えている。
	応用研究・開発	◎	↗	NIHをはじめとして、新規ナノ医療システムを実用化するための体制が、資金調達も含め充実している。ベンチャー企業の立ち上げ、投資体制が整っており、実用化に向けての裾野を広げている。日本発の技術も米国で臨床治験に入る例もみられる。 長年にわたりナノDDS製剤の実用化に取り組んでいる。実際にがん治療用薬として承認されたナノDDS（11件）のうち、6件が米国で開発が進められたものである。また、siRNA医薬として承認されているPatisiranとGivosiranは、共に米国バイオベンチャーAlnylam Pharmaceuticalsによって開発されたDDS製剤である。さらに、CRISPR-Casテクノロジーに関するアカデミア発ベンチャーも設立されている。加えて、mRNA医薬を開発するバイオベンチャーModeRNA Therapeuticsは、新型コロナウイルスに対するRNAワクチン開発で世界をリードしている。ワクチンは緊急使用承認により接種が開始されている。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツ、イギリスをはじめ、欧州はDDS研究をこれまで先導しており、以前ほどの勢いは感じられないものの、基礎的な研究基盤がしっかりしている。欧州全体でEuropean Technology Platform Nanomedicine（ETPN）を中心に、着実に研究が進展している。
	応用研究・開発	◎	↗	各国で得意分野に違いはあるが、欧州全体として研究費のサポート体制が充実し、基礎研究の成果を前臨床研究に着実に移行させている。ETPNが技術を産業化へ繋ぐ役割を果たしている。スペインのプロジェクト、ポルトガルのプロジェクトに勢いがあり、研究グループ間の協力体制も積極的で医工連携が効率よく機能している。ドイツのフィリップスやブルカーをはじめとするヨーロッパの大手メーカーがイメージングや治療に関する装置開発を進めている。
中国	基礎研究	◎	↗	中国科学院を始め優秀な研究者が多い。ナノメディシン分野に莫大な研究費を投入し、ナノDDSに関連する多くのプロジェクトが進められている。北京に中国科学院と中国教育省が共同で設置したNational Center for Nanoscience and Technology（NCNST）があり、ナノテクノロジーとナノメディシンに関するシンポジウムも多く開催されている。ナノメディシン分野の論文がNatureやScienceをはじめ、一流誌にも多数掲載されており、論文数も米国を抜いて世界第1位である。北京大学医学部のMedical Isotopes Research CenterでPET/SPECTによるがん治療をターゲットとしたイメージング研究が活発に行われている。中国科学院のナノテクセンターは蘇州（Suzhou）にもあり、ここでもイメージングとセラピーに関する研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	多数の大学・研究機関から応用研究が報告されている。豊富な資金と臨床研究へのハードルの低さからも開発が進んでいる。南京大学にはKey Laboratory for Biomaterials and Devicesがあり、製品化が進められている。
韓国	基礎研究	○	↗	KAIST、ソウル大学、POSTEH、延世大学などを中心に研究水準は高い。若い研究者が活躍し、高解像度でのin vivo 4次元イメージングも達成されている。基礎研究を世界トップクラスまで発展させる試みとしてIBS（Institute for Basic Science）プロジェクトが進められ、6億円/年の研究費で10年継続する計画になっている。その拠点の1つにCenter for Nanomedicineが設置され成果をあげている。コロナ禍において、ナノワクチンを早急に開発するプロジェクト（約1500万円/10カ月間）なども進められている。

	応用研究・開発	○	↗	海外の研究者を積極的に取り込み、その連携により応用研究を上手く進めている。 Samyang Biopharmaceuticalsは世界初の高分子ミセル型抗がん剤（Genexol-PM, 2006）を、Daehwa Pharmaceuticalはエマルション型経口投与抗がん剤（DHP107, 2016）を、自国にて実用化させた実績がある。また、OliX Pharmaceuticalsは、リガンドコンジュゲート型siRNA医薬（BMT101）を開発し、肥厚性瘢痕に対する臨床第２相試験を進めている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・バイオ材料（ナノテク・材料分野　2.2.1）
・バイオイメージング（ナノテク・材料分野　2.2.4）

参考・引用文献

1）J. Cheon et al., “Nanomedicine and Beyond”, *Acc. Chem. Res,* Special Issue 52（Wash-ington：ACS Publications, 2019）, 1245-2471.

2）丸山厚 編「in vivoイメージングとセラノスティクスの新展開」『Drug Delivery System』33巻3号（2018）

3）Y. Matsumura and H. Maeda, “A new concept for macromolecular therapeutics in cancer chemotherapy：mechanism of tumoritropic accumulation of proteins and the antitumor agent Smancs”, *Cancer Res.* 46, no. 12（1986）：6387-6392.

4）G. H. Petersen et al., “Meta-analysis of clinical and preclinical studies comparing the anticancer efficacy of liposomal versus conventional non-liposomal doxorubicin”, *J. Control. Release* 232（2016）：255-264. doi：10.1016/j.jconrel.2016.04.028

5）H. Lee et al., “^{64}Cu-MM-302 positron emission tomography quantifies variability of enhanced permeability and retention of nanoparticles in relation to treatment response in patients with metastatic breast cancer”, *Clin. Cancer Res.* 23, no. 15（2017）：4190-4202. doi：10.1158/1078-0432.CCR-16-3193

6）H. Cabral et al., “Accumulation of sub-100 nm polymeric micelles in poorly permeable tumours depends on size”, *Nat. Nanotechnol*. 6, no. 12（2011）：815-823. doi：10.1038/nnano.2011.166

7）H. S. Choi et al., “Renal clearance of quantum dots”, *Nat. Biotechnol.* 25, no. 10（2007）：1165-1170. doi：10.1038/nbt1340

8）D. Shigeoka et al., “Functionalization and Magnetic Relaxation of Ferrite Nanoparticles for Theranostics”, *IEEE Transactions on Magnetics* 54, no. 11（2018）：6100707. doi：10.1109/TMAG.2018.2845132
9）G. Chauhan et al., “Nanotechnology for COVID-19：Therapeutics and Vaccine Research”, *ACS Nano* 14, no. 7（2020）：7760-7782. doi：10.1021/acsnano.0c04006
10）NCI staff, “Targeted Photoimmunotherapy Approach for Cancer Moves Forward”, National Cancer Institute, https://www.cancer.gov/news-events/cancer-currents-blog/2016/photoimmunotherapy-cancer（2021年1月11日アクセス）.
11）M. S. Goldberg, “Improving cancer immunotherapy through nanotechnology”, *Nature Reviews Cancer* 19, no. 10（2019）：587-602. doi：10.1038/s41568-019-0186-9
12）原田直純 他「ナノゲル抗原DDSによる免疫療法抵抗性がんの克服に向けて」『Drug Delivery System』35巻1号（2020）：64-69. doi：10.2745/dds.35.64
13）K. Arima and A. Watanabe, “OLIGONUCLEOTIDE DELIVERY – Dectin-1 Recep-tor-Mediated Delivery of Oligonucleotide Drugs Complexed With Schizophyllan Dendritic Cells & Macrophages” *Drug Development & Delivery* Vol.20, No.1（2020）：64-67.
14）A. Hoshino et al., “Tumour exosome integrins determine organotropic metastasis”, *Nature* 527（2015）：329-335. doi：10.1038/nature15756
15）O. G. de Jong et al., “Drug Delivery with Extracellular Vesicles：From Imagination to Innovation”, *Acc. Chem. Res*. 52, no. 7（2019）：1761-1770. doi：10.1021/acs.accounts.9b00109
16）R. H. Fang et al., “Cell Membrane Coating Nanotechnology” *Advanced Materials* 30, no. 23（2018）：1706759. doi：10.1002/adma.201706759
17）T. Konno and K. Ishihara, “Solubilization and penetration enhancement of wa-ter-soluble and amphiphilic phospholipid polymer aggregate for poorly soluble drugs”, *Integr. Cancer Sci. Therap*. 5, no. 4（2018）：1-2. doi：10.15761/ICST.1000282
18）L. Li et al., “SPECT/CT Imaging of the Novel HER2-Targeted Peptide Probe ^{99m}Tc-HYNIC-H6F in Breast Cancer Mouse Models”, *Nucl. Med*. 58, no. 5（2017）：821-826. doi：10.2967/jnumed.116.183863

2.2.3 バイオ計測・診断デバイス

（1）研究開発領域の定義

生体由来物質（バイオ物質）の高感度検出・分析技術を開発し、バイオマーカ・ウイルス・病原菌・薬物などに適用して、計測・診断に用いるデバイスを創出することをめざす研究開発領域である。微量サンプルから特定のバイオ物質を迅速かつ簡便に抽出・分離・同定する技術、センシングデバイスの高速化・高感度化・高集積化、複数ターゲットのマルチセンシング、ウェアラブルデバイス、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現するOrgan-on-a-Chipなどの研究開発が進められている。

（2）キーワード

POCT（Point-of-Care-Testing）、ウェアラブルデバイス、バイオセンサ、非侵襲計測、μTAS、μPAD（Microfluidic Paper-based Analytical Device）、Organ（s）-on-a-Chip、バイオマーカ、生体ガス、気相バイオ計測、リキッドバイオプシー、次世代シーケンサー、BMI

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

バイオ計測・診断デバイスは、生命現象解明などの基礎研究や、医療応用・産業化、さらには感染症予防のためのキーテクノロジーとして、世界中で研究開発が競争的に展開されている。DNAの化学修飾（エピジェネティックス）、RNAの化学修飾（エピトランスクリプトーム）、ペプチドの化学修飾（翻訳後修飾）を解析するデバイスが開発され、医科学や創薬にインパクトを与えている。また、センサとマイクロ流路が1チップに集積されたアレイデバイスは、アレイ状に配置する化学種により、DNA、RNA、ペプチド、タンパク質の網羅解析を可能にし、革新的な診断デバイスを生み出している。さらに、超高齢社会に突入した日本では、生活習慣病の増大と重症化を抑制することが喫緊の課題であり、ウェアラブルデバイスを活用して日常生活のなかで検査・診断を行うことが期待されている。これらのデバイスは、大量の計測データを生み出す源泉でもあり、新たなデータマネジメントビジネスを創出する原動力になりうると期待される。

［研究開発の動向］

バイオ計測デバイスの研究開発を強力に牽引してきたのは次世代DNAシーケンサー（Next Generation Sequencer：NGS）であるが、これにCRISPRのゲノム編集技術が融合することで、RNAトランスクリプトームやプロテオミクスの開発が急激に進んでいる。特に、プロテオミクスでは、人工アプタマーを用いるSOMAmerアレイ技術、多分析プロファイリングを可能にするイムノアッセイ、超高感度ELISAシステムが開発されている。また、質量分析器とNMRの組み合わせによるメタボローム解析、質量分析器と液体クロマトグラフィーの組み合わせによるグライコミクス解析、NGSと質量分析器の融合によるマイクロビオミクス解析が新たな潮流になりつつある。これまでのバイオ計測デバイスが1つのターゲット分析を目的としていたのに対し、多項目分析が研究開発の大きな方向性になっている。

NGSやマイクロアレイの発展によって、研究対象がヒトから植物・動物へと拡大し、農産物、水産物、畜産物のゲノム解析が急速に進んでいる。これらのゲノム情報を基盤にしたゲノム編集技術により、シスジェニックな、あるいはイントラジェニックな遺伝子組替が可能になった。また、微生物の遺伝子解析も急速に進展し、微生物を利用して農産物の品質や生産性を向上させることが可能になっている。

マイクロ流路と3Dプリンタの融合により、Organ-on-a-Chipの研究開発が進展し、1チップ上で完全に機能する臓器の創出が期待されている。Organ-on-a-Chipは薬物評価のハイスループット化や精密な薬物評価系の構築、病態のモデル化を実現する技術として期待され、単一臓器機能を集積化したものだけでなく、多数の臓器機能を連結したMulti-Organ-on-a-Chipの開発も進められている。ユニークな試みとして、米国NIHの研究センターの1つNCATSは、ISS（国際宇宙ステーション）と連携してTissue Chips in Spaceプロジェクトを進めており、微小重力環境が人体に及ぼす影響について研究を行っている。

マイクロデバイスを利用した血中循環腫瘍細胞（Circulating Tumor Cells：CTC）の解析をきっかけに、生検の代わりに血液でがん診断を行うリキッドバイオプシーのコンセプトが2010年に提唱された。CTCのほかに血液中に含まれるがんなどの疾病情報を持つものとして、循環遊離DNA（Cell-Free DNA：cfDNA）、循環腫瘍DNA（Circulating Tumor DNA：ctDNA）、エクソソーム、循環遊離RNA（Cell-Free RNA：cfRNA）、マイクロRNA（mRNA）などがあり、近年は、それらを対象とした回収・解析デバイスの開発が進められている。なかでもエクソソームは含まれる情報量が多いため、血中からのエクソソーム回収・解析デバイス・システムの開発が世界中で行われている。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックにより、世界で新型コロナウイルス検出デバイスの開発が活発に行われている。PCR検査よりも簡便かつ短時間で、イムノクロマトよりも精度の高いPOCTデバイスが求められており、血糖値センサのように指先の穿刺により採血して試料とすることが可能なPOCTデバイスの研究開発がさかんになっている。また、紙を基材にしたMicrofluidic Paper-based Analytical Device（μPAD）とスマートフォンを組み合わせたシステムが多数報告されている。有効なデバイスフォーマットが構築されれば、現存あるいは今後新たに問題となるウイルスの検出にも適用可能になる。

ウェアラブルセンサの研究開発が世界中で行われ、産業化も進んでいる。例えば、糖尿病患者を中心に、血糖値計測は採血の必要なSMBG（血糖自己測定）からウェアラブルセンサへの移行が急速に進んでいる。研究段階のものでは、汗中のナトリウムイオン、カリウムイオン、塩化物イオン、グルコース、ATP、乳酸、pHなどの生体情報を同時かつ経時的にモニタリング可能なデバイスが論文等で多数報告されている。このような多成分の同時計測によって、近年急激に増加している熱中症のリスク管理などが可能になると考えられ、実用化が期待されている。また、長時間・長期間のモニタリングを可能にするためには、電源を含むセンサデバイスのウェアラブル化が重要であり、汗に含まれる乳酸やグルコースを利用したバイオ燃料電池の開発が活発に行われている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

細胞内分子の計測

国際的な共同研究であるHuman Cell Atrasプロジェクトに代表される細胞と細胞内の計測は、主に、性能拡張された次世代DNAシーケンサー（NGS）の開発、質量分析器とNMRの融合技術開発、NGSと質量分析器の融合技術の開発にもとづいて進められている。これらの新技術に共通するのは、大量の計測データの産生と、AIによるビッグデータ処理である。特に、プロテオミクスでは、人工アプタマーを用いたSOMAmerアレイ、多分析物プロファイリングを行うイムノアッセイアレイ、超高感度なELISAの開発にみられるように、AIと融合した多項目分析技術の開発が顕著である。

培養食品

ヒト以外の遺伝子解析、ゲノム編集技術と3Dプリンタ技術が融合することで、Organ-on-a-Chipがチップ上で食品を培養する技術へと急速に発展している。現在は、培養肉の技術開発に焦点が当てられており、豚から細胞を採取し、細胞株や培地で産生した後、肉の細胞・組織を成長させるという3工程で培養肉を製造し、そのまま出荷するサービスモデルが検討されている。この技術は従来の家畜や水産物の環境を変え、食肉のサプライチェーンを変革する大きなポテンシャルを持つとともに、食肉の栄養素の制御も可能にすると期待される。中国、英国、米国で開発が進んでいる。

ブレインマシンインターフェイス（BMI）

有機半導体デバイスを用いたフレキシブルデバイスによって、ウェアラブルな心電計や小型・軽量・高精度な脳波計が開発され、この数年間でBMIに関連するバイオ計測技術が大きく進展している。いくつかのBMI方式が提案されているが、モータ駆動する義手・義足の制御が主な研究開発課題であり、義手・義足を接続した筋肉から電気信号（EMG）を読み取る技術や、外科的に埋め込まれたチップを通して脳から直接電気信号を読み取る技術の研究が行われている。一方、脳波計測による疾病診断デバイスの開発も進められている。

DNAストレージ

IoTとAIの急速な社会浸透により、データ量が指数関数的に増加している。しかし、大量に生産されるデータのうち、日常的に使わるのは全体の約20%であり、約80%はほとんど使われないコールドデータになっている。セキュリティの観点から、コールドデータ保存技術の開発は重要な課題であり、電子的なストレージ手段を上回る潜在的な可能性があるとして、DNA鎖を用いた記憶素子の研究が始まっている。4種類の塩基分子からなるDNAは非常に情報密度が高く、5.5ペタビットのエンコードデータを1mm^{3}に格納でき、1kgのDNAで世界中の現存データを全て仮想的に保存できると推定されている。さらに、DNAは化学的に安定であり、何千年も経ってからでも読むことができるため、最終的に磁気テープに代わる長期保存技術になると期待されている。

スマートトイレ

疾病の予防・予測・早期発見のため、個人の生体情報を経時的にモニタリングできる技術が求められている。重要なのは、「低コスト」、「非侵襲」、「無意識（知らない間に）」であり、このような測定が可能なシステムとして、以前からトイレが注目されている。国内ではLIXILが大便の形状や排便管理をAIによって一元管理するトイレシステムを開発している。また、TOTOとパナソニックは、尿と大便の成分分析、簡単な生化学情報などが計測できるトイレを開発している。中国の幾何科技公司は、心疾患のモニタリングなどが可能なトイレを開発している。さらに、最近スタンフォード大学のグループは、圧力/モーションセンサ、尿の流れやその成分分析をする分析試験紙とビデオカメラ、大便の形状や流動性を測定するコンピュータビジョンと機械学習アルゴリズム、個人識別のための指紋スキャナが搭載されたトイレシステムを開発した。このシステムでは大規模な生体情報データを習得できるため、今後AIや機械学習と組み合わせることで、より高度な生体情報を取得可能な診断システムとなる可能性が高い。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国NIHでは、2003年に始まったENCODE（Encyclopedia of DNA Element）プロジェクトの継続プロジェクトとして、ENCODE4プロジェクトを2017年に開始した。ヒトとマウスのゲノムの全ての機能要素を特定しようとするもので、ENCODEでは用いられなかった新しいアッセイを採用し、疾患に関連するものを含む幅広い多様なサンプルを対象にしている。新しく取得された全てのヒト生体サンプルについて、データが無制限に共有されることとなっている。

米国NSFでは、2018年に開始したSmart and Connected Healthプログラムにおいて、情報科学やデバイス工学などの学際研究により、健康と医療に関する課題解決に向けたハイリスク、ハイリターンな研究開発を進め、人とデータ、システムの一体化をめざしている。また、2020年に開始したBiosensingプログラムでは、環境モニタリングや新規病原体の監視を行うセンシング技術、新しい病原体を検出可能なセンサを診療所や幅広い地域に迅速に展開可能にするプラットフォーム技術、次のパンデミックを防ぐ複合センシング技術などをめざし、工学、ライフサイエンス、ITの境界領域から生まれるイノベーションによって、生体物質や環境のセンシング、モニタリングを行う研究を支援するとしている。

米国DARPAでは、脳・神経計測に関連する複数のプログラムが実施されている。 ElectRx（Electrical Prescriptions）プログラムにおいて、末梢神経系の異常シグナルをモニタリング・調整する低侵襲のバイオインターフェイスを開発し、自己免疫疾患などの治療やメンタルヘルス向けの医療デバイス・システムの構築をめざしている。 RAM（Restoring Active Memory）プログラムでは、外傷性脳障害により記憶を喪失した患者の回復を主な目的に、インプラント式のワイヤレスインターフェースの開発を目指しており、埋込デバイスの動物実験を進めている。 N^3（Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology）プログラム では、健常者向けの高性能な双方向の脳マシンインターフェイスの開発を目的に、外科的移植を必要としない非侵襲の統合デバイスの開発を目指している。N^3プログラムは世界のBMI研究を牽引している。

EUではHorizon 2020の枠組みの中で、さまざまなプロジェクトが実施されている。 Lab-in-a-patch for PKU self-assessmentプロジェクト（スペイン）では、フェニルケトン尿症患者向けに、汗中のフェニルアラニン計測用パッチ型センサの開発を行っている。 Bio Ring Diagnosticsプロジェクト（オランダ）では、低コストに結核診断を行うためのフォトニック集積回路の研究開発を進めている。 MOLOKO（Multiplex phOtonic sensor for pLasmonic-based Online detection of contaminants in milK）プロジェクト（イタリア、スイス、ドイツ、フィンランド、ベルギー、オランダ、ハンガリー）では、牛乳に含まれる抗生物質や微生物毒素など10の成分をマルチセンシングするオプトプラズモニック-マイクロ流路センサを開発している。GREENSENSEプロジェクト（スペイン、オーストリア、イスラエル、スウェーデン、ヨルダン、ドイツ、ベルギー、スイス）では、ナノセルロースからなる薬物検知用のPOCTデバイスの開発を進めている。

オーストラリアのニューサウスウェールズ州Health Pathology Point of Care Testingプログラムでは、POCTデバイスの心疾患、糖尿病、感染症の他、コロナウイルス診断への活用を目的に、180以上の都市部、地域、地方の病院に600以上のPOCT機器を設置して世界最大規模の評価実験を実施している。

日本では、JST未来社会創造事業「食・運動・睡眠等日常行動の作用機序解明に基づくセルフマネジメント」において、日常行動の生体における作用機序を解明し、健康維持のためのセルフマネジメントを広く普及させることをめざして研究開発が進められている。効果的行動のための科学的エビデンス形成に向けて、バイオ計測に関連する研究テーマに支援が行われている。NEDO「IoT社会実現のための革新的センシング技術開発」においては、既存技術では実現困難な超微小量の検出や過酷環境下での動作、非接触・非破壊での測定等を可能にする革新的センシングデバイスの開発が進められており、複数のバイオ計測に関するテーマを支援し

ている。 AMEDの医療分野研究成果展開事業（先端計測分析技術・機器開発プログラム）では、新しい予防、計測、診断、治療を可能にする革新的医療機器の実用化への導出をめざし、将来の医療につながる新しい原理や革新的技術にもとづいた技術・機器・システムや、新たな診断・治療技術を創出するためのターゲット（マーカや症状）の探索解明を目的とした計測分析技術の開発を支援している。さらに、内閣府が主導するムーンショット型研究開発事業では7つの目標が設定されているが、そのうち「目標2：超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」と「目標7：主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステイナブルな医療・介護システムを実現」の2つがバイオ計測・診断デバイスに深く関連している。

（5）科学技術的課題

次世代DNAシーケンサー（NGS）の開発によってDNAとRNAの計測法は進展しているが、それ以外の生体分子の計測技術には、さらなる高感度化に向けて大きな障壁が存在している。タンパク質、代謝産物、脂質などは、DNAやRNAのように増幅して検出することができず、違いの検出が極めて困難である。また、タンパク質のもつ不均一性と、構成するアミノ酸の数の多さから、タンパク質は核酸を構成するヌクレオチドに比較して複雑であり、これがプロテオミクスをヌクレオチドベースのオミクスよりも本質的に難しくしている。従来のプロテオミクスは質量分析にもとづく計測法が用いられているが、定量性や感度などに課題があり、その解決法の1つとして1分子計測技術が期待されている。1分子プロテオミクスに向けた研究開発が新しい潮流になりつつある。

血液中のバイオマーカを検出するためには血球分離操作が必要であり、真に有用なPOCTデバイスの実現に向けて、血球分離および血漿の定容機構が組み込まれたデバイスの開発が求められている。すでに開発されたデバイスのうち、一部は実用化されているが、精度・信頼性・汎用性の高い機構の開発が望まれる。

健康維持・疾病予防のために日常生活の中で検査・診断を行うには、非観血的な計測技術が不可欠であり、光学技術などを用いた非侵襲計測や、生体ガスや涙液、唾液などの非侵襲サンプルでの計測が可能なセンシング技術の開発が必要である。また、健康診断未受診者は死亡リスクが高まることから、医療機関以外で簡便に検査・診断を行い、疾患を早期発見できる小型・高性能なデバイスの開発が求められている。計測機器の日常利用においてはバッテリー寿命が大きな課題であり、高性能な二次電池に加え、エネルギーハーベスティング技術の研究開発が期待される。さらに、新型コロナウイルス感染症によってクローズアップされた課題として、ヒト体内にあるウイルスなどの病原体のみならず、空気中のウイルスの検知・モニタリングを行う気相バイオ計測の研究開発が重要になっている。

圧力センサや温度センサなどの物理センサが内蔵された腕時計型のウェアラブルセンサは以前から市販されており、心拍、血圧、体温などのバイタル信号測定が健康管理やスポーツ分野で利用されるようになっている。一方、汗に含まれる化学物質の測定が可能なウェアラブルセンサは実用化にいたっていない。これは汗（液体）をセンサ測定部に導入する機構やそのインターフェースの完成度に問題があるためと考えられ、それらの開発が求められる。

ブレインマシンインターフェイス（BMI）には基礎研究段階のものから実用間近のものまであり、解決すべき問題も多い。例えば、非侵襲的な手法では、多くのアプリケーションで求められるニューロンスケールの解像度がまだ達成できていない。一方、高解像度の読み取りが可能な埋め込み型デバイスについては、デバイスの侵襲性が研究開発を妨げている。数百ニューロン未満の解像度で神経脳活動を記録できる技術では、頭蓋骨にデバイスを埋め込む必要があり、ヒトを対象とする研究開発に対して倫理的な問題を提起すると同時に、

埋め込みに伴う外科的処置から生じる感染や合併症という深刻なリスクを抱えている。

（6）その他の課題

高スループット・低コストで大量のゲノム情報を産生する次世代DNAシーケンサー（NGS）の開発や、多くの人がビッグデータにアクセスして利用することを可能にしたAIの発展は、さらなる計測・診断デバイスの研究開発、新産業を生み出す源泉となっているが、一方で、ヒトのゲノム情報やオミックス情報を取り扱う上での倫理的な問題が顕在化しつつある。また、培養肉の研究開発が加速しているが、その安全性を担保する必要が生じている。さらに、ウェアラブル計測において、利用者は個人情報漏えい・プライバシー侵害に対する不安に晒される恐れがある。これらの問題に対して、技術面に加え、法規制を含む検討を行い、社会の理解を得ることが重要といえる。

バイオ計測・診断デバイスの開発には医工連携が必須であるが、わが国は医工の連携・協力を促進するための環境が十分に整っておらず、米国・欧州・アジア諸国に比べて医工連携のハードルが高くなっている。また、医学界と産業界の連携が国内には少なく、共同研究の枠組みも十分でない。医工連携を促進するための仕組み、企業の積極的な参画を可能にするシステムや施策の検討が求められる。

BMIは、義手・義足の制御に加えて、アルツハイマー病等の患者の生活をサポートする技術への展開が期待されるが、一方で、このような技術は軍事技術にも発展する可能性がある。実際に、2018年に米国DARPAが開始したN^3プロジェクトは、戦場での脳間通信や、神経接続を介した機器の制御などを含んでいる。デュアルユースな研究開発が挑戦的な研究課題を促進する事例は多く、わが国でも研究開発体制の検討が必要と考えられる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・マイクロデバイス分野の重要な国際会議であるμTASやMEMSにおける発表採択件数は、依然としてトップレベルを維持しているが、査読付き論文数は米国と中国に大きく水をあけられている。研究開発能力（研究費・人材）の面で、米国や中国との差が開いている。 ・大学・公的研究期間を中心に、医療計測を目的としたデバイス・材料・計測技術の研究開発が進められている。ただし、AI等の情報技術との融合が立ち後れており、総合的なシステム化についても十分とは言えない。
	応用研究・開発	○	→	・JSTのA-STEPやAMEDにより医療機器開発に関連するプロジェクトが進められている。医療ニーズを明確にした循環器系、代謝系、神経系等の計測技術の開発が増加する傾向にある。 ・医療機器企業や電気関連企業を中心に、POCTデバイスやウェアラブルセンサの開発が行われている。 ・化学系企業が自社のシーズを利用したバイオ計測・診断デバイスの開発に取り組んでいる。
米国	基礎研究	◎	↗	・政府系（NIH、NSF、DARPA、DOEなど）だけでなく、民間の財団（ハワード・ヒューズ医学研究所、ビル＆メリンダゲイツ財団やチャン＆ザッカーバーグ財団など）が豊富な研究資金を投入し、大学の研究を加速している。 ・National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が全米の16拠点に微細加工装置群を整備・提供しているため、大学ランキングの上位大学だけでなく、多くの大学でレベルの高い研究が行われている。

	応用研究・開発	◎	↗	・大学や研究機関における応用研究を基盤に多くのベンチャー企業が創業し、バイオ計測・診断デバイスの実用化を進めている。 ・医工連携の環境が整備され、研究開発のスピードが速い。実用化されたデバイス・技術が多数ある。積極的に製品化が進められている。 ・大手医療機器企業（ジョンソン・エンド・ジョンソン、アボット、GEヘルスケア、ベネディクト・ディッキンソンなど）では研究開発がさかんであり、ベンチャー企業のM&Aも積極的に行われている。
欧州	基礎研究	○	→	・オランダ、ドイツ、英国、スイス、フランス、スウェーデンなどを中心にレベルの高い研究が行われている。近年、スペインもバイオ計測・診断デバイスの研究に力を入れている。 ・欧州として重点研究機関（大学・研究所）へ研究費を集中することで、高い研究レベルを維持している。各国間の共同研究を支援するシステムが構築されており、活発に交流が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・フィリップスやシーメンスヘルスケアなどの大手医療機器企業では研究開発がさかんであり、ベンチャー企業のM&Aも積極的に行われている。 ・製薬企業がOrgan-on-a-Chip研究に着手し、実用化をめざした研究開発が行われている。 ・バイオメディカル分野に多くのベンチャー企業があり、診断デバイスの産業化をめざした研究開発が活発である。
中国	基礎研究	◎	↗	・ほぼ米国に匹敵する研究開発費を投入し、研究開発能力が飛躍的に向上している。バイオ計測・診断デバイス分野の論文数も大幅に増加しており、量・質ともにレベルが上がっている。 ・中国科学院、精華大学、北京大学、上海交通大などの有力大学に加え、厦門大学、復旦大学、武漢大学なども高いレベルの研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	・国の政策として、生理状態や活動量をモニタリングするセンサ技術に投資している。 ・臨床試験のハードルが低いこと、市場が大きいことから、バイオメディカル分野の研究が増加している。各国の計測機器メーカーが進出し、中国の大学との共同研究開発をさかんに行っている。 ・多くの企業では独自性は低く、他社製品の類似品が多いが、市場投入のスピードは速い。
韓国	基礎研究	○	→	・ソウル大学、KAISTなどの大学、研究所において、POCTデバイス開発がさかんである。 ・政府が作成した第3次National Nanotechnology Map（2018-2027）において、センサ、バイオチップ、IoTなどの将来のコア技術への研究開発投資を強化するとしている。
	応用研究・開発	○	↘	・バイオ計測・診断デバイス開発をリードしてきたサムソンが、創薬研究にシフトしている。中堅企業・ベンチャー企業の開発はさかんである。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・バイオ材料（ナノテク・材料分野　2.2.1）
・ヘルスケアIoT（ウェアラブル・生体埋め込み計測）（ライフ・臨床医学分野　2.1.9）

参考・引用文献

1）C. C. Campa et al., "Multiplexed Genome Engineering by Cas12a and CRISPR Arrays Encoded on Single Transcripts", *Nature Methods* 16, no. 9（2019）：887-893. doi：10.1038/s41592-019-0508-6
2）Y. Eshed and Z. B. Lippman, "Revolutions in Agriculture Chart a Course for Targeted Breeding of Old and New Crops", *Science* 366, no. 6466（2019）：705. doi：10.1126/science.aax0025
3）A. J. Capel et al., "3D Printing for Chemical, Pharmaceutical and Biological Applications", *Nature Reviews Chemistry* 2, no. 12（2018）：422-36. doi：10.1038/s41570-018-0058-y
4）S. Nagrath et al., “Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology”, *Nature* 450（2007）：1235-1239. doi：10.1038/nature06385
5）Klaus Pantel and Catherine Alix-Panabières, “Circulating tumor cells in cancer patients：challenges and perspectives”, *Trends in Molecular Medicine* 16（2010）：398-406. doi：10.1016/j.molmed.2010.07.001
6）Y. Liu, M. Pharr and G. A. Salvatore, “Lab-on-Skin：A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring”, *ACS Nano* 11（2017）：9614–9635. doi：10.1021/acsnano.7b04898
7）R. M. Torrente-Rodriguez et al., “Investigation of Cortisol Dynamics in Human Sweat Using a Graphene-Based Wireless mHealth System”, *Matter* 2, no. 4（2020）：921–937. doi：10.1016/j.matt.2020.01.021
8）Ha Uk Chung et al., “Skin-interfaced biosensors for advanced wireless physiological monitoring in neonatal and pediatric intensive-care units”, *Nature Medicine* 26（2020）：418–429. doi：10.1038/s41591-020-0792-9
9）M. S. Arshad et al., "Tissue Engineering Approaches to Develop Cultured Meat from Cells：A Mini Review", *Cogent Food & Agriculture* 3, no. 1（2017）：1320814. doi：10.1080/23311932.2017.1320814
10）M. A. Lebedev and M. A. L. Nicolelis, "Brain-Machine Interfaces：From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation", *Physiological Reviews* 97, no. 2（2017）：767-837. doi：10.1152/physrev.00027.2016
11）A. Extance, "How DNA could store all the world’s data", *Nature* 537, no. 7618（2016）：22-24. doi：10.1038/537022a
12）C. N. Takahashi et al., "Demonstration of End-to-End Automation of DNA Data Storage", *Scientific Reports* 9（2019）：4998. doi：10.1038/s41598-019-41228-8
13）Seung-min Park et al., “A mountable toilet system for personalized health monitoring via

the analysis of excreta”, *Nature Biomedical Engineering* 4, no. 6（2020）：624-635. doi：10.1038/s41551-020-0534-9

2.2.4 バイオイメージング

（1）研究開発領域の定義

バイオイメージングとは、生命現象の理解を目的として生体内の情報を可視化することである。可視化の対象は、生体を構成する物質（生体組織、細胞、細胞内のオルガネラ、核酸・タンパク質・糖・脂質などの生体分子、イオン等）の形態や大きさ、数、分布、さらには生体内局所の温度やpHなど、空間と時間にまたがる多次元の情報に及ぶ。種々のイメージング手法、プローブ材料、観察装置、画像処理、機械学習によるデータ解析などを包括する研究開発領域であり、生命科学系に加え、材料、機械、計算科学など広い分野の連携が求められる。

（2）キーワード

蛍光、化学発光、ラマン散乱、近赤外光、量子ドット、透明化技術、ライトシート顕微鏡、超解像、生体深部イメージング、無標識イメージング、マルチモーダルイメージング、トランススケールイメージング、オプトジェネティクス、画像処理

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

生体は、数多くの種類の分子をはじめ、さまざまな物質により構成され、それらの物理的・化学的な相互作用を介して生命活動を行っている。生体を構成する物質について、生体内での空間分布とその時間変化、物質間の相互作用などを観察するバイオイメージングは、生体の機能や生命現象の理解に貢献するだけでなく、疾患や病変の発生原理の理解や治療法の探究にも不可欠な技術となっている。ただし、現状のバイオイメージング技術は、分子などの生体構成物を観察するうえで十分な時間分解能、空間分解能、視野が達成されているとはいえず、また、これらの物質を生体内で全て識別することはできない。対象の複雑さを十分な情報量をもって撮像する技術も存在していない。生体を扱うという物理的な制約のなかで、目的に応じて機能の向上や技術の統合が行われている状況にあり、技術的ブレークスルーが望まれている。

本研究開発領域は、生体試料の調製、可視化に必要なプローブ、プローブからの信号を検出するハードウェア、検出された信号を生体の構造・機能と結びつけて分析し表示するためのソフトウェアなど多くの材料、技術、方法論が必要な融合領域である。また、プローブの送達と特異的相互作用が鍵を握るMRIや、蛍光イメージングなど、ナノテク・材料技術の貢献によって、さらなる発展の期待される領域といえる。

［研究開発の動向］

タンパク質、核酸、低分子といった物質や、それらの複合体の動態、相互作用、濃度変化、機能変化などのバイオイメージングでは、試料を色素や蛍光タンパク質等のプローブで標識することが一般的である。蛍光イメージングでは、蛍光プローブからのシグナルを検出し画像化する際に、光の波動性に起因した空間分解能の限界（回折限界）が技術的なボトルネックとなるが、回折限界を超えた空間分解能を達成するための原理が1990年代中頃から2000年代中頃にかけて提案・実証され、2010年頃には40～100 nmの空間分解能を有する超解像顕微鏡が市販された。STED（STimulated Emission Depletion）やPALM（PhotoActiavation Localization Microscopy）などの超解像計測法と、PALMの元になった1分子計測法（ローカリゼーション法）は2014年度にノーベル化学賞が授賞されている。現在はこれらの手法以外に

も超解像計測を行うさまざまな方法が提案されている。近年では、超解像広視野観察、フォトニック結晶チップによる構造化照明、生体内の3次元超解像計測、高次アンチストークスラマン散乱による超解像計測、高空間分解能化（1～5 nm）、時間分解能の向上などの研究開発が行われている。超解像顕微鏡の大きな利点の1つは、試料を固定する必要がある電子顕微鏡と異なり、生きたまま回折限界を超えた計測が可能なことであるが、従来の超解像計測では非常に強い照明光が必要であり、生きた細胞・組織・生体に対して光毒性となることが問題になっていた。この問題を解決する生体適合性の高い超解像イメージング技術の開発も進められている。

蛍光色素や蛍光タンパク質等のプローブは光照射によって容易に褪色してしまい、生体の動的変化を連続的に観察する際に問題となる。近年、蛍光褪色が起こりにくい量子ドットがプローブとして用いられるようになってきたが、量子ドットを構成するカドミウムやセレンなどの毒性を抑えるため、また化学修飾を容易にするためにコーティングが施されており、量子ドットのプローブは蛍光色素などに比べサイズが1桁以上も大きくなってしまい、標識対象への立体障害などの影響が懸念される。量子ドットのコア自体はnmオーダーで十分小さいため、コーティング層を薄くするなど、サイズを抑えるための工夫が望まれる。また、グラフェンナノ構造を利用した低毒性で生体適合性の高い炭素量子ドットも蛍光量子収率の向上が図られ、生細胞や個体内でのイメージングに応用されており、今後のさらなる改善が期待される。最近ではNitrogen-Vacancy（N-V）ダイヤモンドがプローブとして用いられるようになり、蛍光褪色が無いことから注目されているが、大きさや供給、試料への導入などに課題があり、今後の改良が望まれる。

長時間計測における蛍光プローブの褪色の問題を解決する別の手法として、近年DNA-PAINTが普及してきている。これは、2本鎖形成の親和性が調節された一本鎖DNAで標識した抗体と蛍光標識した相補的DNAを用いて1分子局在顕微鏡法で超解像イメージングを行う手法である。この手法では、試料内のターゲットに結合した蛍光プローブが褪色しても、未褪色の蛍光プローブと随時入れ替わっているため、継続して超解像観察を行うことができる。また近年、UnaGやmiRFP、iLove等、ビリルビンやビリベルジン、フラビンなどの生体内低分子を発色団として利用する蛍光タンパク質が報告されている。これらのタンパク質は発色団が褪色によって損なわれた場合でも、逐次新たな生体内低分子が供給されることで発色団が更新されるため、蛍光強度を維持することができる。また、発色団の褪色と更新による蛍光の明滅を積極的に利用することで、超解像観察への応用も試みられている。

空間分解能の向上、時間分解能の向上、3次元観察、分光分析といった光学顕微鏡分野の基本的な観察能力を向上させるという流れから、目的に応じてこれらを統合させ、新しい応用分野を開拓していく方向性も生まれている。例えば、時間分解能の向上はフローサイトメトリーにおけるハイスループットスクリーニングと統合され、従来法では検出できなかった希少かつ重要な細胞を検出することを可能にしている。また、分光分析とも組み合わせることで、従来法では識別できなかった細胞内の分子構成を数値化し、それを利用して有益な機能をもつ細胞のスクリーニングが行われている。他のイメージング技術と統合することで、より情報量を高める手法というのも潮流の1つになっており、その代表的な例が電子顕微鏡と光学顕微鏡（特に超解像顕微鏡）とを統合させた光-電子相関顕微法（Correlative Light-Electron Microscopy：CLEM）の開発である。複数の光学効果を組み合わせて撮像する、マルチモーダルイメージングについても基礎研究、応用研究・開発ともに活発である。

従来技術では可視化が不可能であった分子や現象を可視化する試みも増加している。特に、ラマン散乱顕微鏡の登場以降、同技術に利用できる分子標識技術としてラマンタグが提案され、それを活用した小分子イメージング、代謝イメージング、超多重イメージングなどの新しいイメージング技術が登場している。また、

試料をプローブ標識することなく様々な生体試料の情報を得る無標識イメージングについて、新しい手法が提案されており、赤外吸収を使った分子分析イメージング法、ブリルアン散乱を使った細胞の弾性分布のイメージングといった技術が登場し、それらの応用研究も徐々に報告されている。さらに、バイオイメージングによってコントラストとして得られる情報が、濃度などの示量変数から、分子の反応、温度、力などの示強変数へと広がりをみせており、バイオイメージングはより直接的に生体の状態、活性、機能を可視化していく方向にある。

バイオイメージングは日本人の得意とする精細な作り込み技術が活きる分野であり、日本が世界的に大きなシェアを持つ技術に内視鏡、顕微鏡がある。一方、蛍光プローブの開発においては、日本発の研究成果が多くみられるにもかかわらず、産業化は遅れている。海外をみると、米国では比較的速い市場展開を見込んで研究開発投資が行われるのに対し、欧州、特にドイツでは、息の長い技術開発によってニッチな技術を発展させ、独自性の高いイメージング技術を市場化していく傾向にある。アジア諸国は欧米に比べると多くの国で立ち遅れているが、中国は欧米で研究成果を上げた研究開発者の本国への呼び戻しにより急速により技術レベルを上げつつある。中国製のイメージング装置は今のところわが国では普及が進んでいないが、安価なデバイスである点が特徴的であり、今後の動向に注目する必要がある。また、シンガポールは独自の投資体制により近年急速にハイレベルなイメージングの研究成果を報告しており、ビジネス展開への意欲も高い。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

超広視野顕微鏡、トランススケールイメージング

英国のMesolens、中国のRUSH、日本のAMATERASなど、高空間分解能と広視野を同時に実現し、分子レベルから個体レベルまでシームレスなイメージング・計測を行う顕微鏡が登場している。英国のMesolensはストラスクライド大学において、Medical Research Council が行ったNext Generation Optical Microscopy Initiative等の研究助成によって開発されている。日本では新学術領域「シンギュラリティ生物学」において、超解像顕微鏡技術と超広視野顕微鏡を融合することで、1台の光学顕微鏡システムで分子スケールから個体スケールまでシームレスに、超解像分解能でのイメージングが可能なトランススケールイメージング技術の開発が進められている。最近、1億画素を超えるイメージセンサを搭載したトランススケールスコープ（AMATERAS）が開発され、数μmの空間分解能で広視野に画像撮影を行うことで、数百万個の細胞からなる組織に対して、構成する個々の細胞領域を自在に拡大し解析することが可能になった。一方、個体に対しては生体深部での計測技術も必要であり、今後は既存のライトシート顕微鏡や2光子計測技術、さらには光音響イメージングといった手法と組み合わせることで、より高解像度・高時間分解能での観察が可能な装置の開発が期待される。さらに、膨大な量のデータを処理する必要があるため、ハード・ソフト両面での技術開発も必要となる。

透明化、全組織イメージング

生体内部の3次元イメージングを可能にする方法としてSca/eSや CUBIC に代表される組織透明化法の開発が進んでいる。ここ10年間で蛍光タンパク質の消光を起こさない透明化法の開発が進み、3次元イメージングを可能にするライトシート顕微鏡の実用化とともに、神経科学や発生学を中心に研究報告例が増加している。

一方、透明化を行わない通常の固定化組織を用いて、イメージングと試料の切断を繰り返すことにより、全組織を観察する連続切断顕微鏡イメージング技術も開発されている。連続切断法は撮影時間が長いものの、高精細な画像が得られるという利点があり、レンズの回折限界レベルの解像度での観察が可能である。組織

の前処理は一般的な固定化だけで済むことが多く、解剖学的な構造が良く保たれる点でも優れている。また、最近、透明化組織をライトシート顕微鏡で観察する場合と同程度に高速に撮影可能で、しかも空間分解能に優れた連続切断法FAST（block-face serial microscopy tomography）が日本で開発され、成体マーモセットの全脳やヒト死後脳組織の高精細イメージングを行い、透明化法では達成できない高いスケール拡張性が示されている。 FASTにおいても前述のトランススケールイメージングを用いることで、1cm四方の全脳断面画像を一括で撮影した後、構成する各細胞の蛍光を区別して高精度に観察することに成功している。

近赤外光イメージング

蛍光イメージングでは一般的に可視光（400～700 nm）が用いられるが、可視光は生体による吸収や散乱の影響を強く受けるため、深部を観察することが難しい。そこで近年、生体組織透過性の高い波長700nm以上の近赤外（NIR）光を利用した蛍光イメージング法が開発されている。さらに、生体組織内の光吸収・散乱がもっとも小さくなる1000nmを超える近赤外（Over-Thousand Nanometer-Near InfraRed：OTN-NIR）光を用いた生体内深部のイメージングが注目されている。波長700～900 nm付近の「第1の生体の窓」（NIR-I）を用いるNIR蛍光イメージングに対して、OTN-NIR波長域においては1100～1350 nmの波長域を「第2の生体の窓」（NIR-II）、1550 - 1800 nmの波長域を「第3の生体の窓」（NIR-III）」と区別し、2010年頃より日本および米国の研究者を中心に希土類含有セラミックスナノ粒子、単層カーボンナノチューブ、量子ドットなどさまざまな蛍光プローブの開発と生体適合性の向上、イメージング応用が進められてきた。最近では、中国の研究グループから、有機色素プローブを中心に多数の研究が報告されている。また、ソニーが400～1700nmにわたる広帯域カメラの発売を予定するなど、撮像機器の入手が年々容易になってきており、これに対応した種々のプローブマテリアルの提供がナノテク・材料分野の課題となっている。

示強変数イメージング

生体内局所の温度やpHなど示強変数の計測が、バイオイメージング研究のトレンドになっている。例えば、温度は生命現象を支配するもっとも重要な物理量の1つであり、細胞内など生体の微小領域の温度分布の計測は、さまざまな生命現象の解明や、次世代の診断・治療技術につながる可能性があることから、蛍光プローブの蛍光強度や蛍光ピーク波長、蛍光寿命の温度依存的な変化を利用した蛍光ナノ温度イメージングの研究がさかんになっている。また、pHは生体内の正常組織と病変部位とで異なることが知られ、骨代謝やがん細胞の浸潤などさまざまな生命現象に関与していることから、pHの変化に応答して蛍光特性が変化するプローブの開発とイメージング応用が進められている。なお、生体内では蛍光プローブの拡散が起こることから、一定のプローブ濃度で蛍光観察をすることが困難であり、これを解決するためにレシオ型蛍光プローブや、タイムゲート型蛍光寿命測定プローブなどが開発されている。

メカノバイオロジーと力のイメージング

医療におけるメカノセラピー、生命科学におけるメカノバイオロジーは、ともに生体内分子、オルガネラ、細胞、組織に関わる「力」の作用を扱う学問分野として注目を浴びており、そのための「力」を可視化するイメージング技術の研究も積極的に進められている。この分野では、巨視的な力を蛍光でイメージングする高分子材料の開発が行われているほか、特に米国の研究者がリードしているFörster共鳴エネルギー移動（FRET）プローブを用いて細胞と足場の間に発生する力の様子を観察する手法が急速に発達してきている。

生物（化学）発光

生物（化学）発光を利用したイメージングは、励起光を必要としないことから、光毒性や自家発光の影響を受けず、観察対象へのダメージが少ない。これまで発光強度の低さが課題であったが、2012年頃から開発されている生物（化学）発光タンパク質と蛍光タンパク質との融合タンパク質を利用することにより、従来の10～100倍まで発光強度が上昇している。生体組織の透過性に優れた600 nmを超える波長を呈する生物（化学）発光タンパク質の開発も急進している。

化学発光は基質を必要とし、基質は時間とともに代謝されるため、長時間のイメージングには持続的な基質の投与を必要とする。自ら発光基質を作り出す発光生物の発光基質生合成経路を解明し、観察対象の細胞や生体中において再構築することができれば、外部からの基質投与なしに自発的に発光させることが可能になると期待される。これまでに、発光バクテリアの基質合成経路が解明され、これを応用した発光動物培養細胞や発光植物が開発されたが、その発光強度は顕微鏡観察できるほどには高くないため、バクテリア発光システムの高輝度化が求められている。また、発光キノコの基質合成経路についてロシアのグループを中心に解明が進み、コーヒー酸を出発点とした基質生合成に必要な遺伝子群が同定され、これらをゲノムへ導入した自発光植物を同グループと米研究グループがほぼ同時に報告している。このキノコの自発光植物は、通常の顕微鏡イメージングで使用される高感度カメラなどを必要とせず、市販のデジタル一眼レフカメラでも長時間の撮影が可能である。今後は時間・空間分解能を向上させるために発光タンパク質の高輝度化や多色化が進むと予想される。

オプトジェネティクスと生物（化学）発光

光によってタンパク質機能を制御することが可能なオプトジェネティクスは、生体内の生理機能を低侵襲的に操作することができる技術として、特に脳科学の分野で積極的に利用されている。さまざまなオプトジェネティクスツールが開発され、刺激に用いられる光の波長域も青色から近赤外まで幅広い。光刺激によって引き起こされる細胞内環境変化は、個体の行動変化や、細胞内セカンドメッセンジャー濃度変化として観察することができるが、後者の場合、セカンドメッセンジャーを観察するための指示薬の多くは蛍光性であるため励起光を必要とし、オプトジェネティクスツールが励起光によって活性化され細胞内環境が乱れるという問題が生じる。そこで、光励起を必要とせず、基質との化学反応により光を発することが可能な生物（化学）発光プローブがオプトジェネティクスツールと併用されている。特に、最近は非常に明るい生物（化学）発光プローブが開発されてきており、蛍光観察と遜色ない観察が可能である。また、生物（化学）発光タンパク質から発せられる光をオプトジェネティクスの刺激光として応用する分野が進展している。この手法では生物（化学）発光タンパク質近傍のオプトジェネティクス分子だけを直接光刺激し、活性化することが可能であり、1細胞、1分子特異的なオプトジェネティクスが実現される。また、外部からの光の到達が難しい生体深部での光制御を行うために、オプトジェネティクスツールと生物（化学）発光タンパク質を融合させたluminopsinも開発されている。このように、生物（化学）発光はレポータやマーカとしてだけでなく、機能ツールとしての可能性が広がりつつある。

ラマンイメージング

生体分子固有のラマン散乱スペクトルは多様な生理的な現象を反映して変化することが明らかになり、これを分析することにより無標識で、例えば胚性幹細胞（ES 細胞）の分化に伴う細胞状態遷移を捉えられることが報告されている。ラマン散乱のスペクトルを活用した無標識イメージングにより、物質の細胞内取り込みや

排出過程のライブイメージング、生体試料内における分子間相互作用や、分子・材料の生分解の可視化が期待されている。

また、特異なラマン散乱を示すラマンタグを結合させ、ラマン散乱顕微鏡によりイメージングする方法が進展している。ラマンタグは蛍光観察に用いられるプローブに比べて小さく、塩基や脂質、薬剤の機能を大きく変化させること無く、これらを標識し可視化することができる。生体内での分子の代謝を可視化することも可能であり、例えばアミノ酸や水の水素を重水素に置換し、それを生体内に取り込ませることで、新たに生産される分子を特異的なラマン散乱によって観察し代謝活性の高い部分を可視化することができる。また、ラマンタグの発光スペクトルは蛍光発光に比べて数十分の1の幅しか無いため、数十のタグを同時に用いて、分光計測により簡単に識別できる。この超多重観察により、従来（5種程度）よりも多くの生体分子の同時観察が可能になることから、より複雑な生命現象の理解が進むと期待される。ラマンタグは検出感度の低さが課題であったが、表面増強ラマン散乱との組み合わせによる高感度化により、ラット脳組織内に導入した薬剤の検出にも成功している。

コンピューテーショナルイメージング

計算機科学の発展により、光学システムで計測されたデータを計算機処理することを前提としたイメージング法が多く登場している。用途も多岐にわたり、簡易3次元観察、微弱光観察、明視野像によるオルガネラ認識、超解像画像の構築などがある。これらはディープラーニングを基本とした手法が多く、物理的には計測ができない情報であっても周辺情報から判断を行い、計測画像として可視化する。多くの研究論文が発表されているが、これが一過性のものなのか、また計測技術として信頼に足る技術であるかは、用途別に慎重に見極める必要がある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国では、NIHのNational Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering（NIBIB）の下にバイオイメージング分野の研究促進事業を行っているDivision of Applied Science & Technology（Bioimaging）が設置されているほか、Howard Hughes Medical InstituteのJanelia Research Campus等の研究所でバイオイメージングの最先端研究を行っている。また、NSFの支援の下、Next Generation Network for Neuroscience Program（NeuroNex）が発足し、バイオイメージング技術開発を行う研究プロジェクトを含むNeuroNex Technology Hubの研究事業が実施されている。 DOEもバイオエネルギー研究の進展を目的に、バイオイメージングの研究開発に対して2019年より総額1350万ドルの研究助成事業を行っている。カリフォルニア大学バークレー校に2020年春に、バイオイメージング技術の基礎研究から実用化まで取り組むAdvanced Bioimaging Centerが設置され、新しいバイオイメージング技術の開発と応用研究にかかわる物理学者、化学者、生物学者が集まり融合的な研究を進めている。さらに、米国のChan Zuckerberg Initiativeはバイオイメージング施設で働く“Imaging Scientists”をサポートするための助成金支援事業を全世界の研究者を対象に行っている。

EU圏では、バイオイメージングを用いた生物学および生物医学研究のための画期的な研究基盤としてEuro-BioImaging（EuBI）がHorizon2020の資金援助により発足し、2016年5月に事業を暫定開始した。2019年10月にEuropean Research Infrastructure Consortium（ERIC）の正規事業として承認されたことにより、2019年12月からは完全な形で稼働している。EU内の8カ国21カ所のイメージング施設の利用公開、イメージング技術トレーニング、イメージングデータの相互利用と解析ツール提供を実施し、各地

のバイオイメージング施設との連携を図るとともに、EU内の研究者に各種バイオイメージング技術の提供を行っている。また、Horizon 2020プログラムにおいては数十万～数百万ユーロ規模のバイオイメージングの研究プロジェクトが多数発足している。また、EUでは脳のイメージングに特化したプロジェクト（IMAGEN Project）が長期にわたり進められている。

英国では、大規模な生物医学研究機関であるFrancis Crick Instituteがロンドンに2015年に発足した。この研究所では、医学生命科学と物理学、化学、数学、工学などの異分野融合の推進により、最先端バイオイメージングや数理モデリングを中心として、生物物理学的な側面を強調した新たな生命科学研究の開拓が中心的な目標とされている。さらに英国では近年、MRC（Medical Research Council）、BBSRC（Biotechnology and Biological Sciences Research Council）、Wellcome Trust、EPSRC（Engineering and Physical Sciences Research Council）がバイオイメージング分野への研究資金提供を強化しており、各大学のバイオイメージング施設の充実化、バイオイメージング研究の振興を図っている。

日本では平成30年度に新学術領域「シンギュラリティ生物学」（2018～2022年度）が発足し、トランススケールスコープの開発などが行われている。「シンギュラリティ生物学」は、極めて稀にしか起こらない少数要素のイベントが核となり、多要素システム全体の働きに不可逆で不連続な変化をもたらす生命現象について解明する新しい研究分野であり、稀なイベントを見逃さない、超広視野と高解像度、高速と長時間撮影を両立するイメージングプラットフォームと、それに対応する情報解析手法の構築を進めている。

（5）科学技術的課題

これまでに開発された超解像顕微鏡では、光学顕微鏡による高解像度の観察が必要不可欠であったという新規の科学的発見は少なく、電子顕微鏡で見えていたものを光学顕微鏡で観察にしたに過ぎない報告例が多い。今後、生体物質の動態、細胞の生理機能、情報伝達等を積極的に捉える研究の取り組みが求められる。

超解像イメージング法のうち、構造化照明超解像顕微鏡、Super-resolution optical fluctuation imaging（SOFI）、SPoD-OnSPANなどでは、計測した画像データから画像再構成計算を経て超解像画像を得るが、画像再構成計算は計算量が多く、そのハイスループット化がしばしば課題になっている。画像再構成計算に深層学習を用いることで、構造化照明超解像顕微鏡では画像データ数を激減させることができ、SPoD-OnSPAN法では計算時間の飛躍的な短縮を実現した（SPoD-Net法）。今後、さまざまな超解像計測手法において、深層学習等の手法を応用することにより、画像再構成計算のさらなるハイスループット化が求められる。

超解像顕微鏡による広視野観察については、サブミリメータースケールまでの超解像計測が報告されているが、この視野サイズは生体内の組織のごく一部分に過ぎない。分子レベルの計測データから組織・個体レベルの生命現象を解明するには、分子スケールの超解像計測データを組織全体や生物個体の範囲で収集する超解像トランススケールイメージング技術と、そこで得られるビッグデータを処理し解析する情報処理手法の開発が必要である。

超広視野顕微鏡技術は、今後の光学技術、エレクトロニクス技術の発展とともに、大きな進展が期待される。高解像度かつ高感度のカメラの開発も進み、これを活用した新技術が登場すると予想されるが、一方で、これらのカメラを十分に活用するレンズ、フィルタ等の光学素子については技術開発が進んでいない。トランススケールスコープは共通の技術基盤となりうる装置であり、十分な研究開発投資の下、世界に先駆けて高性能、高機能なシステムを構築することが望まれる。

バイオイメージングと分析技術、操作技術との融合が求められている。これまでのバイオイメージングでは、

物質の分布やその時間変化を捉えることに主眼が置かれていたが、ハイスループットスクリーニングの利用の増加にもみられるように、計測と同時に分析を行い、必要な対象を分別し、採取することが求められている。多量の試料をいかに高速に統合的に処理できるかが重要であり、分光分析や試料操作、試料チャンバー等におけるボトルネックを解消する技術の開発が求められている。大量のデータを取得分析するためのインフラの整備、ICT、IoT、AIを手軽に活用できる環境整備も重要である。

オルガノイドなどの3次元組織体を生体外で構築する技術が進展しており、その内部を観察可能な3次元イメージング技術が求められている。3次元組織体は主に薬効評価を目的として開発されているが、従来の2次元的な培養細胞を用いた評価系に対する優位性について、実際の生体に近いという漠然とした理由でなく、細胞接着の様式など詳細な解析から示していく必要がある。また、3次元組織体内部の細胞の生死や機能を確認することも必要である。

イメージング技術とAI・ビッグデータ解析などの情報科学技術との融合が重要になっている。最近では、高速で流れる大量の細胞をイメージングしてその特徴量をAIに深層学習させ、細胞の形状から高い精度で特定の細胞を自動的に分離する技術などが報告されている。しかしながら、解析結果を計測系にフィードバックし、計測自体を最適化・迅速化するといった、計測と情報の双方向的な高度融合型の研究は実現されていない。機械が自律的に、特徴量集合の中から人間が設定した機能を表現する特徴量の組み合わせを選択し、必要に応じて計測する部位・領域を変更するというような、計測技術とAIの高度融合が期待される。また、イメージングの解像度が上がれば上がるほどデータ量は膨大になる。遺伝子発現データなどの異種データをどのように紐付けして統合的に管理し、迅速かつ容易に解析するか、また、データを圧縮したまま論理演算するといった情報解析技術も重要である。

（6）その他の課題

バイオイメージングデータ、特に超解像データは膨大な量のビッグデータを含むため、研究室内のリソースはたちまち枯渇する。また、データ量がテラバイトを越えるうえに、イメージングデータ、遺伝子発現解析データなど異なる特徴を持つデータが蓄積してくる。そのため、それらの異なるデータを統合的に管理し、迅速かつ容易に可視化、解析できるシステムが重要となってくる。学術情報ネットワークSINET5は全国の研究機関を100Gbpsの高速ネットワークで有機的につないでいるが、各研究機関内の情報転送速度は今もって1Gbps程度である。SINET5を有効に利用するには各研究機関内における高速ネットワーク化が必須である。また、近未来の需要増に備え、現在、東京-大阪間にのみ敷設されている500Gbpsネットワークを全国に拡張することも今の段階から想定しておく必要があるといえる。

プローブ等を開発するナノテクノロジー・材料分野の研究者とイメージング技術のユーザーである生命科学者や医学者、さらに撮像装置や画像処理の開発者までが一体となった技術開発体制の構築が、国際競争に打ち勝つうえでも本領域では重要といえる。欧州にみられるような10年スパンの長期の組織体制が日本では整っていないが、安定した予算と人材、設備に支えられた研究体制の樹立が、競争力のある技術創出に向けて求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	超解像顕微鏡や各種プローブ、透明化試薬などの研究がさかんに行われている。また、新学術領域やAMED、CREST、さきがけなどで、バイオイメージング関連の領域が複数発足するなど、研究は活発に進められている。イメージングの対象も、細胞レベルから生体組織まで、幅広く展開されている。
	応用研究・開発	◎	→	各種顕微鏡や小動物イメージング装置など、大学・研究機関で開発された技術をベースに市販化されたものも多く、実用に結び付いている。蛍光プローブや透明化試薬についても、大手試薬メーカーから市販化されるケースが複数ある。
米国	基礎研究	◎	↗	NIHなどを中心に、多くの研究機関が潤沢な予算のもと、バイオイメージング研究を強力に推進している。超解像技術、光-電子相関顕微法、誘導ラマン散乱顕微法、ブリルアン散乱顕微法などの基礎技術の開発と、各種蛍光プローブ、ラマンタグなどの技術開発で世界に先行している。近年、スタンフォード大学が近赤外光イメージングで目覚ましい研究成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	HHMI のJanelia Research Campus、UC BerkeleyのABC等をはじめとする研究機関が組織的にバイオイメージングの応用研究をサポートしており、上手く機能している。特に、工学系研究者、各種プローブの開発者、生物学者を1カ所の研究施設に集め、基礎研究から応用研究までを非常に速いスピードで実施している。また、アカデミアの研究成果の実用化が、非常に速いスピードで推し進められている。米国だけでなく全世界のバイオイメージング研究者をサポートする助成金制度がある。
欧州	基礎研究	◎	→	光学顕微鏡技術はもとより、STEDのような超解像顕微鏡の発祥の地であり、ドイツ、英国、フランスを中心に依然として基礎研究がさかんに行われている。学会等での発表件数も多い。超解像顕微鏡、ラマン顕微鏡などの新技術開発を広く手がける。スペインのマドリード自治大学が、蛍光温度イメージングの研究を世界に先駆けて強力に推し進めている。脳のイメージングの共同プロジェクトをEU全体で10年以上にわたり進めている。
	応用研究・開発	◎	→	歴史的にもCarl ZeissやLeicaなどの大手メーカーが存在し、現在も世界をリードする存在である。ドイツJenaのLeibniz-Institut für Photonische Technologien（IPHT）は術中診断用の非線形光学顕微鏡の実用化研究が進むなど成果が際立っている。
中国	基礎研究	◎	↗	各種光学イメージング技術について多くの成果がみられる。技術力が向上しており、著名な国際誌への掲載も多い。
	応用研究・開発	○	↗	ライトシート顕微鏡やイメージングセルソーターなどの製品も登場しており、従来から定評のあった光学素子に加え、先端光学機器への産業展開がみられる。今後急速な発展があると予想される。
韓国	基礎研究	○	→	計算機科学と光学撮像とを組み合わせたコンピューテーショナルイメージングにおいて先進的な研究成果が見られる。研究者人口は多くはなく、国としての競争力は低い。
	応用研究・開発	△	→	特に目立った動きは見られない。

シンガポール	基礎研究	◎	↗	シンガポール科学技術研究庁（A*STAR）とシンガポール国立大学（NUS）を中心に、世界中から研究者を集め、Nature、Scienceなどの有力科学誌に多くの研究成果を発表している。バイオポリスやSingapore Bioimaging Consortium（SBIC）、NUSのMechanobiology Instituteなど、バイオイメージングを含むバイオ研究の環境としては世界最高レベルにある。特に、近年のバイオ研究で重要視されているメカノバイオロジーに関して、世界最大級の研究所を設立するなど、注力する研究分野の先見性も優れている。
	応用研究・開発	△	→	2000年以降、世界中の製薬会社やバイオ関連企業がR&D拠点をシンガポールに設立してきたが、近年は合理化を進め次々と撤退しているため、産業化という面では、バイオイメージングを含むバイオ研究は順風満帆という状況ではない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・バイオ材料（ナノテク・材料分野　2.2.1）
・光学イメージング（ライフ・臨床医学分野　2.5.2）
・トランススケールイメージング（ライフ・臨床医学分野　2.5.3）

参考・引用文献

1）D. Mahecic et al., “Homogeneous multifocal excitation for high-throughput super-resolution imaging”, *Nat. Methods* 17, no. 7（2020）：726-733. doi：10.1038/s41592-020-0859-z

2）K. C. Gwosch et al., “MINFLUX nanoscopy delivers 3D multicolor nanometer resolution in cells”, *Nat. Methods* 17（2020）：217–224. doi：10.1038/s41592-019-0688-0

3）T. Wazawa, T. Washio and T. Nagai, “Highly biocompatible super-resolution imaging：SPoD-OnSPAN”, in Single Molecule Microscopy in Neurobiology（New York：Humana, 2020）, 229-244, doi：10.1007/978-1-0716-0532-5_11.

4）R. Zhang and Z. Ding, “Recent Advances in Graphene Quantum Dots as Bioimaging Probes”, *J. Anal. Test*. 2（2018）：45–60. doi：10.1007/s41664-018-0047-7

5）J. Schnitzbauer et al., “Super-resolution microscopy with DNA-PAINT”, *Nat. Protoc*. 12（2017）：1198–1228. doi：10.1038/nprot.2017.024

6）K. D. Piatkevich et al., “A robotic multidimensional directed evolution approach applied to fluorescent voltage reporters”, *Nat. Chem*. Biol. 14, no. 4（2018）：352-360. doi：10.1038/s41589-018-0004-9

7）J. Kwon et al., “Bright ligand-activatable fluorescent protein for high-quality multicolor live-cell super-resolution microscopy”, *Nat. Commun*. 11, no. 1（2020）：273. doi：10.1038/s41467-019-14067-4
8）Y. Suzuki et al., “Label-free chemical imaging flow cytometry by high-speed multicolor stimulated Raman scattering”, *PNAS* 116, no. 32（2019）：15842-15848. doi：10.1073/pnas.1902322116
9）D. P. Hoffman et al., “Correlative three-dimensional super-resolution and block-face electron microscopy of whole vitreously frozen cells”, *Science* 367, no. 6475（2020）：eaaz5357. doi：10.1126/science.aaz5357
10）H. Yamakoshi et al., “A sensitive and specific Raman probe based on bisarylbutadiyne for live cell imaging of mitochondria”, *Bioorg. Med. Chem. Lett*. 25, no. 3（2015）：664-667. doi：10.1016/j.bmcl.2014.11.080
11）L. Zhang et al., “Spectral tracing of deuterium for imaging glucose metabolism”, Nat. Biomed. Eng. 3（2019）：402-413. doi：10.1038/s41551-019-0393-4
12）L. Wei et al., “Super-multiplex vibrational imaging”, *Nature* 544（2017）：465-470. doi：10.1038/nature22051
13）M. Tamamitsu et al., “Label-free biochemical quantitative phase imaging with mid-infrared photothermal effect”, *Optica* 7, no. 4（2020）：359-366. doi：10.1364/OPTICA.390186
14）R. Prevedel et al., “Brillouin microscopy：an emerging tool for mechanobiology”, *Nat. Methods* 16（2019）：969-977. doi：10.1038/s41592-019-0543-3
15）J. Fan et al., “Video-rate imaging of biological dynamics at centimetre scale and micrometre resolution”, *Nat. Photon*. 13（2019）：809-816. doi：10.1038/s41566-019-0474-7
16）T. Ichimura et al., “Trans-scale-scope to find rare cellular activity in sub-million cells”, *bioRxiv*（2020）：179044. doi：10.1101/2020.06.29.179044
17）T. Kakizuka et al., “Cellular logics bringing the symmetry breaking in spiral nucleation revealed by trans-scale imaging”, *bioRxiv*（2020）：176891. doi：10.1101/2020.06.29.176891
18）K. Matsumoto et al., “Advanced CUBIC tissue clearing for whole-organ cell profiling”, *Nat. Protoc.* 14, no. 12（2019）：3506-3537. doi：10.1038/s41596-019-0240-9
19）M. Umezawa et al., “Rapid increase in transparency of biological organs by matching refractive index of medium to cell membrane using phosphoric acid”, *RSC Advances* 9, no. 27（2019）：15269-15276. doi：10.1039/c9ra01445d
20）K. Seiriki et al., “High-speed and scalable whole-brain imaging in rodents and primates”, *Neuron* 94, no. 6（2017）：1085-1100. doi：10.1016/j.neuron.2017.05.017
21）T. Chihara et al., “Biological Deep Temperature Imaging with Fluorescence Lifetime of Rare-Earth-Doped Ceramics Particles in the Second NIR Biological Window”, *Scientific Reports* 9, no. 1（2019）：12806. doi：10.1038/s41598-019-49291-x
22）S. Sekiyama et al., “Temperature Sensing of Deep Abdominal Region in Mice by Using Over-1000 nm Near-Infrared Luminescence of Rare-Earth-Doped $NaYF_4$ Nanothermometer”, *Scientific Reports* 8, no. 1（2018）：16979. doi：10.1038/s41598-018-35354-y

23）G. Yeroslavsky et al., “Energy Transfer Between Rare Earth-doped Ceramic Nanoparticles for Gauging Strain and Temperature in Elastic Polymers”, *Journal of Photopolymer Science and Technology* 33, no. 1（2020）：129-137. doi：10.2494/photopolymer.33.129
24）J. M. Brockman et al., “Mapping the 3D orientation of piconewton integrin traction forces”, *Nat. Methods* 15, no. 2（2018）：115-118. doi：10.1038/nmeth.4536
25）S. Inagaki et al., “Genetically encoded bioluminescent voltage indicator for multi-purpose use in wide range of bioimaging”, *Scientific Reports* 7（2017）：42398. doi：10.1038/srep42398
26）T. Xu et al., “Expression of a humanized viral 2A-Mediated lux operon efficiently generates autonomous bioluminescence in human cells”, *PLoS One* 9（2014）. doi：10.1371/journal.pone.0096347
27）T. Mitiouchkina et al., “Plants with genetically encoded autoluminescence”, *Nat. Biotechnol.* 38（2020）：944-946. doi：10.1038/s41587-020-0500-9
28）J. Deubner, P. Coulon and I. Diester, “Optogenetic approaches to study the mammalian brain”, *Curr. Opin. Struct. Biol.* 57（2019）：157-163. doi：10.1016/j.sbi.2019.04.003
29）K. Suzuki et al., “Five colour variants of bright luminescent protein for real-time multicolour bioimaging”, *Nat. Commun*. 7（2016）：13718. doi：10.1038/ncomms13718
30）K. Berglund and R. E. Gross, “Opto-chemogenetics with luminopsins：A novel avenue for targeted control of neuronal activity” *J. Neurosci. Res*. 98, no. 3（2020）：407-409. doi：10.1002/jnr.24473
31）M. Tanuma et al., “Direct visualization of an antidepressant analog using surface-enhanced Raman scattering in the brain”, *JCI Insight* 5（2020）：133348. doi：10.1172/jci.insight.133348
32）Y. Wu et al., “Three-dimensional virtual refocusing of fluorescence microscopy images using deep learning”, *Nat. Methods* 16（2019）：1323-1331. doi：10.1038/s41592-019-0622-5
33）M. Weigert et al., “Content-aware image restoration：pushing the limits of fluorescence microscopy”, *Nat. Methods* 15（2018）：1090-1097. doi：10.1038/s41592-018-0216-7
34）C. Ounkomol et al., “Label-free prediction of three-dimensional fluorescence images from transmitted-light microscopy”, *Nat. Methods* 15（2018）：917-920. doi：10.1038/s41592-018-0111-2
35）H. Wang et al., “Deep learning enables cross-modality super-resolution in fluorescence microscopy”, *Nat. Methods* 16（2019）：103-110. doi：10.1038/s41592-018-0239-0
36）L. Jin et al., “Deep learning enables structured illumination microscopy with low light levels and enhanced speed”, *Nat. Commun*. 11, no. 1（2020）：1934. doi：10.1038/s41467-020-15784-x
37）S. Hara et al., “SPoD-Net：Fast Recovery of Microscopic Images Using Learned ISTA”, *PMLR* 101（2019）：694-709.
38）H. Mikami et al., “Virtual-freezing fluorescence imaging flow cytometry”, *Nat. Commun*. 11（2020）：1162. doi：10.1038/s41467-020-14929-2

2.3 ICT・エレクトロニクス応用

ナノテクノロジー・材料を基盤とした情報通信・ナノエレクトロニクス技術は、IoT（Internet of Things）、人工知能（AI）時代に代表される今後のスマート情報社会、革新的環境エネルギー社会、世界最高水準の医療・福祉社会を支える共通基盤技術と位置づけられる。これまでは、比例縮小（スケーリング）則によるSi-CMOSデバイスの高集積化と高性能化によってけん引されてきたが、デバイスの微細化が物理的限界に近づいており、この限界を突破すべく様々な新しい潮流が生まれている。

その1つがデバイスの3次元化である。 NAND型フラッシュメモリの3次元積層技術をはじめ、TSV（貫通シリコンビア）や近接場磁界結合の技術を使った3次元ヘテロ集積化技術がすでに実用化されている。メモリとプロセッサの積層集積化に加え、フォトニックデバイス、MEMS/NEMS、センサなど、異種機能のデバイスを集積化する技術の進展が著しい。ロジック演算用のトランジスタ素子自体も、16nm世代から導入されたFin型MOSFETで立体構造に変化した。3nmより先の世代では、SiナノシートやSiナノワイヤを用いた横型Gate All Around構造が導入されるとみられ、2030年代以降はナノシートがさらに縦積みされた本格的な3次元構造の時代に突入するとみられている。

従来の材料にはない、新しい機能の活用を視野に入れた新規デバイス・材料開発も大きな潮流をなしている。例えば既存の3次元的バルク材料とは異なる物性の表面・界面を有するグラフェン、MoS_2をはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイド、トポロジカル絶縁体のような機能性原子薄膜などの新材料の特性を活用し、飛躍的な消費電力削減と超高速化を可能にするイノベーティブなデバイス創製などをめざす流れである。特にMoS_2など2次元半導体について、上記のSiナノシートを置換する候補材料として、近年活発に研究が行われている。電子が持つスピン自由度を利用できる物質を用いたスピントロニクスの研究開発も活発であり、スピンMRAMなど量産段階にいたっている技術もある。

また、組み合わせ回路に基づく従来法と全く異なる、新しい計算パラダイムを実現する新アーキテクチャの検討も本格化している。非デジタル、すなわちアナログ信号を使った計算パラダイムとして、クロスバースイッチやメモリアレイを使ったアーキテクチャ、脳神経回路などの動作にヒントを得たスパイキング・ニューラルネットワーク（SNN）などのニューロモルフィック・コンピューティング、非線形ダイナミカルシステムを使ったコンピューティングなどで、AIの情報処理に適したハードウェアの実現をめざす研究が行われている。なかでも量子コンピューティングは、古典力学系では実現できない情報処理機能を実現するものとして、近年、特に注目を集めている。量子系は計算だけでなく、通信の秘匿性についても従来の古典情報処理では実現できない安全性を担保するため、量子暗号や、量子中継、量子ネットワークへ応用する研究が進んでいる。

情報処理デバイスや通信技術と並んで今後のスマート情報社会の主要な構成要素となるのがセンシングデバイスである。センサは人工知能や制御システムの入力となり、その応用はIT機器、オーディオ機器、ロボット、ドローン、VR・ARシステム、自動運転車、医療機器など、今後のイノベーションのキーとなるほとんどのシステムに広がっている。これらの応用のためのセンサとして、画像・映像を取得するイメージセンサや、加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能なMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサがもっとも重要である。また、健康・医療などの応用分野で安定して使いやすい化学センサの開発も期待され、各種の物理センサや化学センサと集積回路やプリンテッドエレクトロニクスとの組み合わせも重要になる。電子や光子などが持つ性質（量子性）を積極的に活用して、より高感度な計測・センシング技術を開発しようとする取り組みも進んでいる。

今後のICT・ナノエレクトロニクスの研究開発には、素子単独の性能向上にとどまらず、システムや応用まで、複数の技術レイヤーにわたる幅広い視野がますます求められる。特に近年、Deep Learning をはじめとするAI技術のロボット自律制御への利用が大きなトレンドをなしており、柔軟な動作が可能なソフトロボティクス、小型・計量・高出力のアクチュエータの開発との融合研究が活発化している。今後は、ソフトとハードの融合によりデバイス開発を加速させるとともに、長期的視野に立った俯瞰的な研究開発が求められる。

2.3.1 新機能ナノエレクトロニクスデバイス

（1）研究開発領域の定義

IoTやエッジAIコンピューティングなど将来のさまざまな応用に向けて、現在のナノエレクトロニクスデバイスのさらなる高性能化と低消費電力化を進めつつ、従来のCMOSを超える新動作原理のデバイスを開発し、ビッグデータを超高速・超低消費電力で処理する集積システムの実現をめざす研究開発領域である。新材料の特性を理論的・実験的に確認し、デバイス試作で超低消費電力動作、超高速動作、大容量、超長期記録などの優位性を確認することが研究開発の課題である。組み合わせ回路に基づく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現する新アーキテクチャも検討されており、研究開発課題はデバイスレベルからシステムレベルまで多階層に及んでいる。

（2）キーワード

低消費電力、集積回路、More Moore、Beyond CMOS、IRDS、不揮発性メモリ、NANDフラッシュ、抵抗変化型メモリ、ReRAM、相変化メモリ、PCM、スピンMRAM、ロジック埋め込み不揮発性メモリ、インメモリコンピューティング、SCM、急峻スロープトランジスタ、FeFET、ナノシート、ナノワイヤ、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド（TDMC）、MoS_2、トポロジカル絶縁体、スピントロニクス、脳型コンピュータ、深層ニューラルネットワーク、DNN、スパイキング・ニューラルネットワーク、SNN、ニューロモルフィック、IoT、エッジAIコンピューティング

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

2010年代、第4世代通信（4G）で構築されたクライアントサーバシステムを介して、スマートフォンとデータセンターを繋いだクラウドコンピューティングが実現された。2020年代はSociety 5.0の実現に向けた社会インフラとして5Gインフラが導入され、さらに2030年頃にポスト5Gインフラの導入が予測されている。これにより、人間が感知できない通信遅延で端末とサーバの間でデータ演算情報がやり取りできるリアルタイムコンピューティングの環境が提供される。例えば多数のセンサ端末からの入力に基づき、分散基地局で発生するAIからの出力情報が、無意識のうちに生活空間に降り注ぐことになる。このようなリアルタイムコンピューティングの空間を国内一律に提供するには、現在の4Gインフラの数十倍の電力が必要と予測されている。今後の持続的な社会実現には地球環境の保全とエネルギー問題を両立させる必要があり、情報通信機器の超低消費電力化を進め、世界の電力消費エネルギーを削減する努力が必要不可欠である。

情報通信機器の心臓部にあたるのがロジック用デバイス、メモリ、高周波回路などのシリコン集積回路であり、これらは市場の要求から高性能化、高機能化、高集積化が進められている。2010年代、高集積化が限界に達するとの見解が数多くあったが、チップ面積を決める多層配線ピッチのスケーリングはロードマップどおり継続的に進み、2020年の7nm世代先端ロジック集積回路でトランジスタの集積数は約100億個となった。今後も微細化と高集積化は2028年頃の2.x nm世代ロジックまで継続されると予想され、1チップ上のトランジスタ数は約1兆個に達すると予測されている。リアルタイムコンピューティング空間の実現には1兆トランジスタ世代のナノエレクトロニクスデバイスが必要と考えられ、現在のトランジスタ（MOSFET）の材料や構造、基本的な論理回路、メモリ回路などに対して革新的な技術を開発し、積極的に導入していく必要がある。例えば、電力の供給を切っても記憶した情報が消えない不揮発性メモリや不揮発性ロジック、使ってい

ない回路ブロックのきめ細やかな電力供給制御、動作電圧の低い新原理のトランジスタ、人間の脳の動作に近い（エネルギー消費の少ない）新規デバイスや新規アーキテクチャの検討が必要である。

［研究開発の動向］

ナノエレクトロニクスデバイス関連の研究開発の動向はInternational Roadmap for Devices and Systems（IRDS）の報告書に詳しくまとめられている。 IRDSは、2015年度版報告書の公開で活動を終えた国際半導体技術ロードマップ（ITRS）の資産を引き継ぎ、IEEEと応用物理学会を中核としてスタートした。デバイス関連の動向に関しては、最新版の2020年度版ではMore Moore（MM）チャプターとBeyond CMOS（BC）チャプターにまとめられている。想定されるアプリケーションは、ビッグデータ、IoTエッジセンサ、深層学習とAI、エクサスケールコンピューティング、ロボティクス・自律システムであり、デバイス技術だけでなく、その上位の回路、アーキテクチャ、アプリケーション関連技術との協調的な研究開発の重要性がうたわれている。

• ロジック用デバイス

16 nm世代から導入された立体構造のFin型MOSFET（FinFET）は、3 nm世代対応のゲート長18 nmにおいても、短チャネル効果を十分抑制できることが報告されている。2.x nm世代以降は、Siナノシートや Siナノワイヤを用いた横型GAA（Gate All Around）構造が導入されるとみられているが、しきい値電圧調整の限界、配線抵抗の増大および配線間絶縁信頼性の劣化、寄生容量・抵抗の増大などにより、Siデバイスの面内方向の微細化は終焉を迎えると予想されている。

その後は、Siナノシートに代わり2D物質、例えば硫化モリブデン（MoS_2）等が導入される可能性がある。現在、p型2D材料、n型2D材料のスクリーニングおよび300 mm材料成長装置の研究開発が精力的に進められている。2030年代以降は、Siナノシートあるいは2D物質が縦積みされた3D化世代へ突入すると考えられる。将来の1.x nm世代に向けて、n型Siナノシートトランジスタ上にp型ナノシートトランジスタを積層させたCFET（Complementary FET）構造の研究開発が進められている。

2D物質のなかでも特に注目を集めてきた材料が、極めて高い移動度を有するグラフェンである。ただし単層のグラフェンにはバンドギャップがなく、バンドギャップを有する2層グラフェンでもデジタル情報処理に必要なオン・オフ電流比を実現できない。そこで幅を狭くしたグラフェンナノリボン（GNR）でバンドギャップを持たせる研究が行われている。そのためにはアームチェア型のエッジ形状にする必要があり、原子レベルの精度でGNRを形成する技術が要求される。近年は、元来バンドギャップを有する2D材料である遷移金属ダイカルコゲナイド（Transition metal dichalcogenide：TMDC）をチャネルに用いたトランジスタの研究開発がさかんになっている。特にMoS_2については、CVDやMOCVD、スパッタリングなど、量産化をめざした成膜技術の研究開発が進められている。

電源電圧を大幅に削減できる急峻なサブスレッショルドスロープ特性を実現するトンネルFETや負性キャパシタンスゲートFETなどの研究開発もさかんである。さらに、NEMSスイッチ、MottFET、トポロジカル絶縁体デバイスなど、新原理の超低消費電力ロジックデバイスの可能性も検討されている。

• 不揮発性メモリ

不揮発性メモリ技術は、電荷保持型のフラッシュメモリとそれ以外の方式に大別できる。 NAND型フラッシュメモリは世界半導体市場（約45兆円）の10 %を占める。これまでの平面縮小技術に代わり、3D積

層構造形成技術、すなわち高積層成膜技術、高アスペクト比エッチング、原子層堆積（Atoimic Layer Deposition：ALD）などによる大面積均一成膜技術が大容量化をけん引し、主要製品は3D積層型にほぼ移行した。

電荷保持型以外の不揮発性メモリには、抵抗変化型メモリ（ReRAM）、相変化メモリ（Phase Change Memory：PCM）、スピンMRAM（STT-MRAM、SOT-MRAM）などがある。超低消費電力化のため、VCM（Voltage Controlled MRAM）など、電圧駆動方式の不揮発性メモリの研究開発も進められている。FTJ（Ferroelectric Tunnel Junction）や FeFET、強誘電体 Hf 酸化物を用いたメモリ等も注目を集めている。また、SRAM が多用されてきた L2 キャッシュ、L3 キャッシュへの STT-MRAM 適用など、これまで揮発性メモリが使われてきたメモリ階層への不揮発性メモリの進出も期待されている。 DRAM と NANDフラッシュメモリの処理遅延時間（latency）のギャップは 100 倍以上に及び、ギャップを埋めるバッファメモリとして、各種不揮発性メモリを用いた SCM（ストレージクラスメモリ）の開発が必要である。ロジック回路と混載できるロジック埋め込み不揮発性メモリの研究開発も活発である。これまでロジック埋め込みメモリとしてフラッシュメモリが使われてきたが、CMOSロジック回路の微細化に追随できなくなり、ReRAMやMRAM、PCMに置き換える研究が進められている。近年、これまでHDDに格納していたデータを全てメモリ上に保持して処理を格段に高速化するインメモリコンピューティングへの応用もさかんに研究されている。

また、ビッグデータの利活用を推進するため、デジタルデータを100年、1000年単位で安全に保存できる、超長期保存メモリデバイスも求められている。超長期信頼性を実現するメモリの候補として、MONOS、ReRAM、CNT を使った RAM、現在のフラッシュメモリの改造などが候補にあがっている。新規不揮発性メモリの普及には、製造工程および実使用下における信頼性の確保が重要な課題であり、特性劣化のメカニズム解明、劣化予想のモデル構築、劣化させない使い方の提案など、総合的なアプローチが求められる。

• 非ノイマン・脳型演算デバイス

脳神経回路などの動作にヒントを得た新しいアーキテクチャで超高速・低消費電力ビッグデータ処理をめざす研究が活発化している。組み合わせ回路に基づく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現するデバイスとアーキテクチャが検討されている。非デジタル、すなわちアナログ信号を使った計算パラダイムとして、クロスバースイッチやメモリアレイを使ったアーキテクチャ、スパイキング・ニューラルネットワーク（SNN）などのニューロモルフィック・コンピューティング、非線形ダイナミカルシステムを使ったコンピューティングなどが研究されている。確率的デジタルコンピューティング、イジングマシン、量子コンピューティング（2.3.6節参照）も新しい計算パラダイムをめざす動きとして注目されている。

現在のAIの主流は深層学習であり、その結合加重を表現するためのシナプス動作素子の研究開発が進められている。 ReRAMやPCM、スピンMRAMなど、ほぼ全ての不揮発性メモリが研究対象となり、材料探索も幅広く行われてきた。単体素子の研究開発は現在でも大学を中心に行われているが、研究開発の最先端ではシステム化や実装に関する研究に重心が移ってきている。深層学習応用に代わる脳型情報処理応用をめざした素子開発では、①高度な脳の機能・動作の模倣をめざした研究、②センサ機能を有する脳型素子の研究、および③リザバー計算応用をめざした研究がさかんになりつつある。

①高度な脳機能・動作では、スパイクタイミング依存可塑性を単体素子の機能だけで実現する試みに加えて、興奮性シナプスや抑圧性シナプスなどの動作実証も試されている。これらの機能を脳型情報処理に用いるにはアーキテクチャの開発を含むシステム化の研究が必要となる。

②センサ機能を有する脳型素子研究では、光応答性と学習機能を備えた素子開発などがさかんになってき

ている。視覚情報を中央演算システムに送らず、情報の入力から学習、簡単な判断までをエッジで処理させる試みであり、将来的にはAIロボットへの搭載などが期待される。現在主流の視覚センサに加え、力検出などさまざまなセンサと組み合わせた素子の研究開発も今後進むと期待される。

③リザバー計算は、整然とした階層型ニューラルネットワークを用いる深層学習と異なり、入力と出力の中間の層（リザバー）は非線形な入出力特性さえ示せばブラックボックスでよく、さまざまな物理・化学システムがリザバーとして動作する。従来の半導体デバイス研究とはアプローチが全く異なっており、幅広い研究分野からの参入が相次いでいる。材料・ナノ構造ドリブンの多体系を積極利用するアプローチや、光を用いたよく規定された系を用いるアプローチがある。近年、FeFETをリザバーコンピューティング素子として使う提案がなされ、現在のCMOSプラットフォーム上でのリザバー計算の可能性を示すものとして注目されている。

• その他

IoTエッジ（IoTe）デバイスはセンシング、無線通信、情報処理、データストレージなどの機能を有するデバイスであり、将来のスマートシティ、スマートビルディング、医療、ヘルスケア、生産現場や物流、農業などへの応用が期待されている。電源供給ラインから独立して動作できるよう、環境発電デバイスと蓄電デバイスの集積化技術の開発に期待が寄せられている。環境発電では、振動、熱、光、環境電波、集積回路中の電荷や熱の再利用など、複数のエネルギー源の活用が想定される。蓄電デバイスでは、蓄えられるエネルギー体積密度を大きくできる全固体電池などに注目が集まっている。センサなど各コンポーネントの超低消費電力化も重要であり、上述の脳型演算デバイスもIoTエッジデバイスへの応用が期待されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• ロジック用デバイス

2019年にTSMCとSamsungが極端紫外線（Extreme Ultraviolet： EUV）リソグラフィの量産技術適用を開始した。2020年にはTSMCが5 nm世代プロセスを用いた量産を本格的に開始し、このプロセスで製造されたチップを搭載した最新端末がAppleより販売された。 TSMCは2022年には4 nm世代プロセスの量産を始める計画を発表している。2.x nm世代以降のトランジスタの研究開発はベルギーのIMEC、米IBMのAlbany Nanotech Complexなどのプラットフォームがけん引している。

• 不揮発性メモリ

NAND型フラッシュメモリでは高積層構造形成プロセスによる大容量化の競争が繰り広げられている。2020年11月にはMicron Technologyが176層のNAND型フラッシュメモリの出荷を開始した。さらなる高積層化に向けて、高アスペクト比の微細ホール加工技術、異なる薄膜の連続成膜技術、大表面積の均一成膜および高選択比の等方エッチング技術の研究開発が推進されている。

ReRAMについては、大容量SCMへの応用をめざす取り組みがさかんだったが、近年はロジック混載メモリとインメモリコンピューティング応用へとシフトしている。 ReRAMはスイッチング原理の違いにより、CBRAM（Conductive Bridge RAM）とOxRAM（Oxide-based RAM）とに分かれ、現在はHfO_2を用いたOxRAMが主流となっている。近年、IntelやTSMCにより、先端CMOS LSIへReRAMの適用可能性が示されている。インメモリコンピューティング応用についてもISSCC、IEDM、VLSIシンポジウム等の主要な国際学会において、毎年新しいAIアーキテクチャへの適用実証が多数発表されている。

IntelとMicron Technologyが2016年に発表した3D XPoint™（3DXP）メモリを機に、PCMの研究開発も一層活発化している。3DXPメモリは、DRAMとNANDの中間性能を持つSCMの有用性を実証した。製品開発は米国が先行しており、これを韓国が追随している。日本では界面相変化メモリiPCM（interfacial PCM）、新規カルコゲナイド系材料の開発などの基礎研究が行われている。

スピンMRAMの研究開発は2000年代から日本、米国を中心に行われ、STT-MRAMについては基礎研究フェーズが完了した。近年は、SOT書き込み方式、電圧制御書き込み方式など新方式の研究開発に移行している。現在、STT-MRAMの応用開発、実用化研究が企業で推進されており、Samsungが混載型STT-MRAM製品の量産を開始している。微細大容量MRAMではキオクシアとSK-hynixが先行している。 AIなどへの応用も米国、ベルギー、日本から提案されている。

• 非ノイマン・脳型演算デバイス

従来の深層ニューラルネットワーク（DNN）と比べ、より脳に近い動作をするスパイキング・ニューラルネットワーク（SNN）が注目されている。学習アルゴリズムの改良によりDNNに匹敵する高い学習性能が得られるようになり、消費電力が低く雑音にも強いSNNの特長が活かせるようになった。2014年にIBMが発表したSNNのIC「TrueNorth」では、ニューロン1個に対するシナプス数が256個にとどまり、カエルの脳程度の規模しか実現できなかったが、2020年3月にIntelからネズミの大脳並みの数のニューロンとシナプスを持つSNN演算システム「Pohoiki Springs」が発表され、話題となった。これは同社が2017年に発表したSNNチップLoihiを768枚結合させたシステムで、ニューロン1個に対するシナプス数が約1000個に増えている。

TrueNorthを発表したIBMは、その後もPCMを用いたSNNの研究開発を継続的に行っている。ReRAMでは、ヒューレットパッカード出身の研究者らによって、深層学習のデモンストレーションや高度な脳機能の模倣などが試されている。米国ではこのほか、ミシガン大学、アリゾナ州立大学などの大学発ベンチャー企業による研究開発も進んでいる。米国における当該分野の主要な研究者には中国出身者が多く、中国に設立されたChua Memristor Instituteのメンバーとしても活躍している。

欧州では、フランスCEA-LetiやベルギーIMECなどで、集積化まで含めた脳型素子開発が進められている。大学では、英サザンプトン大学、独アーヘン工科大学、伊ミラノ工科大学において抵抗変化素子を用いた研究が行われ、仏CNRSなどで強誘電体を用いた研究が行われている。欧州では基礎研究に重心が置かれ、いずれもが世界をけん引している。一方、実用化研究については米国や中国ほどの勢いは感じられない。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

国内では、2020年度にJST CREST領域「情報担体を活用した集積デバイス・システム」および対応するさきがけ領域が発足した。従来の概念にとらわれない新しいデバイス・システムの研究開発が志向されている。また、ポスト5G情報通信システムで用いられる先端半導体の国内製造技術を確保するため、令和元（2019）年度補正予算「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」において先端半導体製造技術の開発に関する公募が行われている。エッジAIコンピューティングについては、総務省、文部科学省、経済産業省の3省連携で2016年に創設された人工知能戦略会議の下、戦略的に研究開発が推進されている。 NEDO「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発」事業が2016年からスタートし、10年計画で推進されている。また、2017年に開始したNEDO「IoT推進のための横断技術開発プロジェクト」で、脳型素子を用いたAIシステムの研究開発が行われている。

米国では、2020年6月に超党派による法案「CHIPS（Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors）for America Act」が提出され、米国内の半導体製造の復活と技術サプライチェーンの確保する方針を打ち出した。さらに続いて提出された「American Foundries Act of 2020（AFA）」では、米国の各州に対し、商業的な半導体製造施設の拡大を促す助成の提案がなされている。2020年5月には、米国から要請を受けたTSMCがアリゾナ州での半導体工場建設を発表した。2021年から120億ドルを投じて、5 nm世代プロセスの半導体工場を建設する計画である。ニューロモルフィック・コンピューティングに関しては、IntelがLoihiを基にしたIntel Neuromorphic Research Community（INRC）を2018年に発足させ、現在多くの大学や研究機関、企業が参加している。

欧州では、2013年から始まった10年計画のHuman Brain Projectのなかでニューロモルフィック・コンピューティングの研究開発が推進されている。2020年2月には、AIなどを対象に今後10年間、およびさらにその先を見据えた画期的なデジタル戦略が欧州委員会から発表された。 EU圏の企業が産業データを共有できる制度を構築することで、AI開発での産業データ活用を進める。

中国においても脳型情報処理システムおよびデバイス開発に多額の資金が投入されている。脳型デバイスの総称として広く認知されるようになったメムリスタ（Memristor）の提唱者であるL. Chuaの名を冠した研究所「Wuhan National Laboratory for Optoelectronics Chua Memristor Institute」が設立され、また北京大Institute for Artificial IntelligenceにCenter for Brain Inspired Chipsが開設されるなど、組織、人員が急速に充実してきている。中国政府と欧米から戻った著名研究者らを中心に多くの著名な国際会議（Nature ConferenceやIEEE）を開催していることも近年の特徴であり、中国は当該分野の世界的リーダーになりつつある。

（5）科学技術的課題

デバイスの微細化とともに、デバイス間を接続する配線の幅も微細化される。近年、金属中の電子の平均自由行程と配線幅とが近づき、配線界面や粒界における電子の反射散乱の影響による比抵抗上昇が顕在化してきた。そこで、現在の配線材であるCuに変わる金属材料の探索が活発化してきている。5 nm世代ではCu配線を使える見込みであるが、3 nm世代以細では結論が出ていない。代替金属としてはRuあるいはCoが最有力である。配線抵抗の増大はロジックデバイスだけでなく、PCMを用いた3DPXのように抵抗変化のための動作電流が大きい不揮発性メモリのスケーリングにも影響する。また、トランジスタの3D化により、NANDやSRAMといったプリミティブセルの単位面積あたりの集積度が一段と向上すると予想され、電力密度の増大による発熱の問題を解決する必要がある。放熱性を考慮したデバイス設計、電子とフォノンとの相互作用を考慮したデバイス構造、高速スイッチング動作がチップ内の特定領域で集中的に発生しないような並列演算アルゴリズムなどの開発が必要である。

今後のナノエレクトロニクスのめざすべき方向は、従来の考え方の延長・延命ではなく、システムレベルから新たな枠組み・方式を構築することにあると考えられ、日本でもレイヤー（アーキテクチャ、回路、デバイス、材料）間の垣根を取り払った研究プロジェクトの実現は必須である。特に、新型メモリと新型トランジスタの両方を3次元的に混載し、両者の特徴を活かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システムの専門家とデバイスの専門家の協調が不可欠である。

例えば、産業界による大規模メモリの実現と長期信頼性試験、大学（公的研究機関）によるメモリ機構の研究と長期信頼性モデルの構築、産業界と大学（公的研究機関）の共同開発による新材料探索などが必要になる。ロジックについても同様な枠組みでの研究が必要である。また、可能な限り早い段階から産学連携

の体制を構築し、小規模集積回路レベルで萌芽研究から推進することで、研究開発の正しい方向の選択、実用化への効率的な技術移転をめざしていくことが望ましい。

デバイス試作にはファウンドリ機能を基軸にした産学連携の仕組みも強化していく必要がある。また、デバイス作製に関する共用設備では新規な材料やデバイスの作製が容易にできるような体制・仕組みづくりが重要である。特にナノデバイス研究の場合、微細加工プロセスのためのクリーンルームの維持や高度な装置の運転・保守が重要であり、高度な能力と経験を持った技術者の存在が必要不可欠である。

（6）その他の課題

半導体エレクトロニクス分野において日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、その蓄積は急速に散逸し失われつつあるため、これを回避し人材や設備等を有効活用する仕組みが必要である。つくばのTIAの研究環境はその先導事例として期待されるが、個別ファンディングの縦割り的な運用にならないよう注意する必要がある。また、このような産業界の人材が集まっている中で、大学の学生が加わることは人材育成の視点から大変重要であり、大学からの学生の長期派遣の仕組みづくりを行う必要がある。

まだ萌芽的段階にあるAIや脳型コンピュータ技術の開発には、産学官で研究交流・人材交流を密に行い協同していくことが重要である。大学では特に基本原理実証や基礎物理の追究を行うとともに、若い人材を育て研究分野に供給すること、国の研究機関ではじっくり腰を据えてより発展的な研究ができる環境を研究者に提供すること、産業界ではこれまでに蓄積されてきた技術的ノウハウを新たな研究に有用に活かすことが期待される。また、長期的な視点を持って短中期の目標を説得力のある形で作成し、確実に研究を発展させていくようなプロジェクトの提案を行うとともに、優秀な研究者の国際的な循環に食い込めるような研究拠点を国内にも確立することが期待される。

さらに、最近のIoTデバイス技術やエッジAIコンピューティングに必要と考えられるのは、応用ごとに異なる境界条件（コストも含む）と必要条件の高度なすり合わせであり、ファウンドリ企業を巻き込んで実現するソリューションビジネスと類似していると理解できる。これは正に日本企業が得意とするところであり、今後のIoT/エッジAIコンピューティング技術を牽引することができる好機である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ロジック関係では急峻スロープ特性をめざしたデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの研究開発など、深い学術的理解に基づく研究開発が行われている。 ・不揮発性メモリではフラッシュメモリ、スピンMRAMを中心に継続的な学会発表が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・キオクシア（旧東芝メモリ）がNAND型フラッシュメモリの3次元積層化を推進している。同社は韓国 SK-Hynixと共同でスピンMRAM開発も進めている。パナソニックおよび富士通セミコンダクターから、小容量ReRAMが製品化されている。 ・イジングモデルの基底状態探索を高速処理するアクセラレータが富士通、東芝などから発表された。
米国	基礎研究	◎	→	・新材料・新原理のロジックデバイスの研究開発が強力に推進されている。 ・スタンフォード大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用に関する学会発表を継続的に行っている。 ・IBMが機械学習分野への展開を継続的に学会で発表している。

	応用研究・開発	◎	→	・米国内の半導体製造の復活を目指すCHIPS for America、AFA2020法案が提出された。 ・Micronが176層のNAND型フラッシュメモリの出荷を2020年11月に開始。Everspin Technologiesが1GbのSTT-MRAMのサンプル出荷を開始。 ・IntelがSNNの研究コンソーシアムINRCを発足した。
欧州	基礎研究	◎	→	・IMECがGAAナノワイヤ、ナノシートFETの開発、埋め込み電源配線など、3 nm世代以降の先端ロジックデバイスの開発を推進中。不揮発性メモリでもIMEC、CEA-Letiから継続的に学会発表が行われている。 ・Human Brain Projectでニューロモルフィック・コンピューティングの研究開発が推進されている。
	応用研究・開発	○	→	・STMicroelectronicsがロジック埋め込み型PCMを内蔵した車載用マイコンを上市。
中国	基礎研究	○	↗	・清華大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用を継続的に発表するなど、大学の学会発表が増加している。 ・Chua Memristor Instituteをはじめ脳型情報処理システムおよびデバイス開発の拠点が相次いで開設されている。
	応用研究・開発	○	→	・応用研究の公開情報が少なく全容は不明。 ・YMTC（長江存儲科技有限責任公司）が128層のNAND型フラッシュメモリを開発。
韓国	基礎研究	○	→	・大学・研究機関による基礎研究結果の学会発表は継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	・SamsungがEUVリソグラフィの量産技術適用を開始した。 ・Samsung、SK-Hynixが128層NAND型フラッシュメモリを開発済み。SK-Hynixhは3DXPの追試結果も発表している。
台湾	基礎研究	○	→	・国立清華大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用を継続的に学会で発表している。
	応用研究・開発	◎	↗	・Macronix社がIBMと共同で3DXPを開発中。 ・TSMCがEUVリソグラフィを用いた5 nm世代プロセスによる量産を本格的に開始した。同社はロジック混載MRAMの開発で継続的に学会発表を行っている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・計算脳科学（システム・情報分野　2.1.7）
・プロセッサーアーキテクチャー（システム・情報分野　2.4.1）
・スピントロニクス（ナノテク・材料分野　2.3.3）
・微細加工プロセス（ナノテク・材料分野　2.6.1）

参考・引用文献

1）IRDS, “International Roadmap for Devices and Systems（IRDS™）2020 Edition”, IEEE, https://irds.ieee.org/editions/2020（2021年1月26日アクセス）.
2）S. Subramanian et al., “First Monolithic Integration of 3D Complementary FET（CFET）on 300mm Wafers”, *2020 IEEE Symposium on VLSI Technology*（2020）：1-2. doi：10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265073
3）S. Sato, “Graphene for nanoelectronics”, *Japanese Journal of Applied Physics* 54（2015）：040102. doi：10.7567/JJAP.54.040102
4）M. Y. Han et al., “Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons”, *Physical Review Letters* 98（2007）：206805. doi：10.1103/PhysRevLett.98.206805
5）B. Radisavljevic et al., “Single-layer MoS_2 transistors”, *Nature Nanotechnology* 6（2011）：147-150. doi：10.1038/nnano.2010.279
6）K. Kang et al., “High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity”, *Nature* 520（2015）：656-660. doi：10.1038/nature14417
7）島 久「IoT向け不揮発メモリ技術」『応用物理』89巻11号（2020）：667-670. doi：10.11470/oubutsu.89.11_667
8）與田 博明 他「スピントロニクスメモリ最新動向」『応用物理』88巻6号（2019）：394-398. doi：10.11470/oubutsu.88.6_394
9）S. Mueller, "Ferroelectric HfO_2 and Its Impact on the Memory Landscape", *2018 IEEE International Memory Workshop（IMW）*（2018）：1-4. doi：10.1109/imw.2018.8388831
10）G. Jan et al., "Demonstration of Ultra-Low Voltage and Ultra Low Power STT- MRAM Designed for Compatibility with 0x Node Embedded LLC Applications", *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*（2018）：65-66. doi：10.1109/vlsit.2018.8510672
11）J. Pak et al., "40nm & 22nm Embedded Charge Trap Flash for Automotive Applications", *2018 IEEE International Memory Workshop（IMW）*（2018）：17861147. doi：10.1109/IMW.2018.8388778
12）C. F. Yang et al., “Industrially Applicable Read Disturb Model and Performance on Mega-Bit 28nm Embedded RRAM”, *2020 Symposium on VLSI Technology*（2020）：1-2. doi：10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265060
13）S. Yamazaki et al., "Reliability Enhancement of 1Xnm TLC for Cold Flash and Millennium Memories", *2015 Symposium on VLSI Technology*（2015）：T112-T113. doi：10.1109/vlsit.2015.7223642

14）森江 隆「ニューロモルフィックシステムと物理デバイス」『応用物理』88巻7号（2019）：481-485. doi：10.11470/oubutsu.88.7_481
15）堀尾 喜彦「ブレインモルフィックコンピューティングと物理デバイスへの期待」『応用物理』88巻9号（2019）：619-623. doi：10.11470/oubutsu.88.9_619
16）秋永 広幸, 浅井 哲也「アナログ抵抗変化素子を用いた脳型回路」『応用物理』89巻1号（2020）：41-45. doi：10.11470/oubutsu.89.1_41
17）D. Ielmini and R. Waser（eds.）, *Resistive Switching：From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications*（Hoboken, New Jersey：Wiley-VCH, 2020）, https://www.abebooks.com/servlet/BookDetailsPL?bi=30565403398&searchurl=isbn%3D9783527334179%26sortby%3D17&cm_sp=snippet-_-srp1-_-title1.
18）W. Wang et al., “Computing of temporal information in spiking neural networks with ReRAM synapses”, *Faraday Discussions* 213（2019）：453-469. doi：10.1039/C8FD00097
19）S. Seo et al., “Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition”, *Nature Communications* 9（2018）：5106. doi：10.1038/s41467-018-07572-5
20）E. Nako et al., “Proposal and Experimental Demonstration of Reservoir Computing Using $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$/Si FeFETs for Neuromorphic Applications”, *2020 Symposium on VLSI Technology*（2020）：1-2. doi：10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265110
21）176-Layer NAND, “176-Layers of Innovation”, Micron, https://www.micron.com/products/nand-flash/176-layer-nand（2021年1月26日アクセス）.
22）P. Jain et al., “A 3.6Mb 10.1Mb/mm2 Embedded Non-Volatile ReRAM Macro in 22nm FinFET Technology with Adaptive Forming/Set/Reset Schemes Yielding Down to 0.5V with Sensing Time of 5ns at 0.7V”, *2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference（ISSCC）*（2019）：212-214. doi：10.1109/ISSCC.2019.8662393
23）C. F. Yang et al., “Industrially Applicable Read Disturb Model and Performance on Mega-Bit 28nm Embedded RRAM”, *2020 Symposium on VLSI Technology*（2020）：1-2. doi：10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265060
24）Intel Optane™ Persistent Memory 200 Series Brief, “Intel® Optane™ persistent memory 200 series delivers on average 25% more bandwidth1 with up to 4.5 TB total memory per socket”, Intel., https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/docs/memory-storage/optane-persistent-memory/optane-persistent-memory-200-series-brief.html（2021年1月26日アクセス）.
25）野澤 哲生「これぞ「脳」の実力の片鱗？AIの主役はDNNからSNNへ」『日経エレクトロニクス』2020年7月号：55. https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00007/00114/

2.3.2 集積フォトニクス

（1）研究開発領域の定義

光の持つ多様な機能を利用して、高性能/高機能な光デバイスやそれらを集積化したモジュール・装置・システムを実現することにより、光の持つ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざす研究開発領域である。光の技術は情報通信、医療・バイオ、加工、分析・計測、映像、照明、発電などの幅広い応用分野への適用が期待されており、用いる材料の高品質化、デバイスの高性能化・小型化・低消費電力化・高信頼化、多様なデバイスの集積による高機能化・多機能化、多様な材料・デバイスの集積化技術などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

光配線、光電子融合、光集積回路、ハイブリッド集積、シリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、量子フォトニクス、プラズモニクス、フォトニック結晶、メタマテリアル、微小共振器、トポロジカルフォトニクス、光ニューラルネット、光コンピューティング、フォトニックアクセラレータ、オンチップ光コム、光スキャニング、光相変化材料、薄膜強誘電体、ナノカーボン、二次元材料

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

光・フォトニクス技術は、光通信、照明や表示機器のほか太陽光発電など日々の生活で広く利用されているだけでなく、加工技術や測量技術を活用した製造業、農業、漁業の分野、光コヒーレンストモグラフィー（OCT）や内視鏡など医療の現場などにも浸透している。また、最近では高度なサイバーフィジカルシステム（CPS）によるSociety 5.0の実現に向けて、現実世界の様々なものの形や位置情報などのセンシング・イメージングデータの取得、ビッグデータの高速・低消費電力な高度情報処理といったIoT/AI分野への光・フォトニクス技術の期待も高まりつつある。このように、光・フォトニクス技術は、現在および将来における安全・健康・快適な生活を実現するうえで欠くことのできない基幹技術の１つである。集積フォトニクス技術はこの光・フォトニクス技術の一領域であり、各種光デバイスを高度に集積化することにより、光のもつ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざすものである。ここでは、主に光通信・光配線、光コンピューティング、光センシングなどの光デバイスの高度な集積化が必須になる応用領域と、その基盤となるシリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、ナノ材料、ハイブリッド集積技術などについて記載する。

近年のIoTやビッグデータ解析等の普及により、通信の主体は従来の人と人の間から機械と機械の間に移っており、さらにAIの普及により機械学習・深層学習による膨大な学習データを処理する必要から、データセンター等のシステムで処理される情報量のニーズは今後も爆発的に増大すると予測される。これらの莫大なデータを解析して新たな価値を創出するためには、これまで以上に高速かつエネルギー効率の高い情報処理技術が不可欠である。また、自動運転など実時間性が重要な応用では、低遅延な情報伝送・処理が必須である。これらの要求を満たすために重要な役割を担うのが、光配線や光の特性を活かした新たなコンピューティング技術であり、それらを実現するシリコンフォトニクスやナノフォトニクスなど集積フォトニクスへの期待が高まっている。また、量子情報分野においては、量子情報の媒体である光子に対する量子演算をスケーラブルで安定して実現するプラットフォームとして、集積量子フォトニクスの発展が期待されており、計測や分

光技術においても、システムの小型化・安定化などを可能にする集積フォトニクス技術が注目されている。そのなかでも、シリコンフォトニクスは、設計・製造・組み立て・検査等の全ての段階で、既存のシリコン電子デバイスとの互換性を図ることにより、既存のシリコン・エレクトロニクスの膨大なリソースを活用することが可能になり、チップ間やチップ内光配線に適用できるほど小型化・低コスト化ができる技術として期待されている。

［研究開発の動向］

集積フォトニクスの主要ターゲットの１つが、光配線・光インターコネクトであり、将来的にはチップ内への導入も期待されている。この光配線の実現に向けた研究開発は国内外で継続的に進められており、シリコンフォトニクス技術を用いた多チャンネル光送受信機や光モジュールなど、各国で多くの取り組みが進んでいる。また、最近の動向として、ニューラルネットワークやニューロモルフィックコンピューティングなどの新たなコンピューティング技術への応用をめざした研究が進められている。集積フォトニクス技術で実現されたこれらの専用プロセッサ（フォトニックアクセラレータ）に関連する研究が欧米を中心に盛り上がっている。国内でもJST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」で光パスゲートコンピューティングなどの研究が進んでいる。量子情報の分野でも集積フォトニクスの活用が進んでいる。シリコン光回路を用いた光量子状態の生成や量子テレポーテーションの実現など多くの進展がみられ、化合物半導体量子ドットやダイヤモンド色中心を用いた高性能単一光子源や超伝導体単一光子検出器をシリコン/SiNの光回路に集積して量子集積光回路を実現しようとする試みがある。

集積フォトニクスは情報処理分野以外への応用も広がりをみせている。自動運転における測距・センサ技術として重要なLiDAR（Light Detection and Ranging、Laser Imaging Detection and Ranging）については、大規模光集積回路の実現が可能なシリコンフォトニクスを活用した非機械式ビームスキャニングによる高精度・小型化・低コスト化の実現が期待されている。ここでは、比較的高パワーなレーザダイオードが必要であるが、人間の目に損傷を与えないアイセーフの観点から、従来の通信波長帯で使用されていた近赤外あるいは中赤外領域の光が適している。集積フォトニクスを活用したオンチップ光コムも注目を集めつつあり、計測や分光のほかマイクロ波フォトニクスへの応用に関する研究が多く報告されている。さらに、オンチップ加速器やオンチップ光ジャイロスコープ、光集積回路を用いた超解像イメージングなど、欧米を中心に集積フォトニクスの新たな応用研究も進んでいる。

超小型化と低消費エネルギー化をめざして、さまざまなナノフォトニクス技術がデバイスに応用され始めている。発光デバイスとしては、ミクロンスケールまたはそれ以下の超小型のレーザがさまざまなシステムで実現されている。フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザでは、極低しきい値での室温連続電流注入発振が達成されている。受光器としては、フォトニック結晶をベースとしたさまざまな超小型受光器が研究されており、プラズモニクスによる光アンテナ効果を利用した小型化も図られている。光変調器、スイッチ関連では、シリコンフォトニクスを中心にさまざまな電気光学変調器が開発されているが、近年プラズモニクス構造をベースとして非線形ポリマーを組み合わせた素子が開発され、性能が飛躍的に向上しつつある。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザ型が欧州で研究され、日本ではフォトニック結晶ナノ共振器を用いた光非線形双安定スイッチ型が研究されている。

シリコンフォトニクスを中心に発展してきた集積フォトニクスの更なる高機能化・高性能化を実現するため、各種光素子をそれぞれに適した材料で実現し集積化する異種材料集積（ハイブリッド集積）技術への注目・期待がこれまで以上に高まっている。基板貼り合わせ技術や転写プリント法などの新たな集積化技術、シリコ

ン基板上への直接成長技術など、1つのチップ上へのハイブリット集積技術が大きく進展している。また、個々のチップを集積化する実装技術においても光ワイヤリングと呼ばれる手法などで進展がみられる。さらに、強誘電体を含むさまざまな材料のシリコン基板へのハイブリッド集積とその光機能実証が報告されるなど、集積フォトニクスの可能性が広がりつつある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

○光配線・光電子融合

光配線では伝送容量の増加をめざしたシリコンフォトニクス光集積回路の多チャンネル化に関する研究が各国で進んでいる。国内ではPETRA（技術研究組合光電子融合基盤技術研究所）が25 mm^2に12チャンネルが集積された300 Gbps光送受信機を実現しており、2020年にはインテルから総バンド幅1.6 Tbpsのシリコンフォトニクス光集積回路が報告されている。また、波長多重技術による大容量化の検討も進んでおり、PETRAは小型16波長多重光回路を実現し、世界に先駆けて1波長あたり32 Gbpsの高速信号伝送に成功している。光電子融合技術については、MITを中心とした米国のグループがポリシリコン層を光学層に用いてバルクCMOSやFinFETとの一括集積が可能なプラットフォームを開発し、CMOS集積WDM光チップの作製と動作実証を報告するなどの進展がみられる。

○光演算技術、不揮発光メモリ

光を用いたアナログ演算、特にニューラルネット演算の研究開発が急速に活発化している。ニューラルネット演算においてもっとも負荷が大きい演算はベクトル行列積演算（積和演算）であるが、光を用いると積和演算を高速、低消費電力に実行できる点がもっとも注目されている。Mach-Zehnder干渉器（MZI）をマトリックス状に集積した回路で任意のユニタリ行列演算ができることが従来から知られていたが、MITのグループは特異値分解を用いてこの回路で任意の行列演算ができることを利用したニューラルネット演算器を提案し、シリコンフォトニクスを用いて作製した集積回路で5入力信号について原理実証している。彼らはこの方式を、Recurrent neural network（RNN）やConvolutional neural network（CNN）に用いることを提案している。 Stanford大学のグループは、逆発展による学習も光で行う回路を提案している。この方式では、上述のMZIによるマトリックス回路において各MZIに受光器を配置し、この測定データを用いて光を伝搬させながら学習を行う。

オンチップ光メモリとして最近注目を集めているのが、相変化材料を用いた不揮発性光メモリである。これはGe_2Sb_2Te（GST）を導波路上に装荷した構造で、GSTが結晶相とアモルファス相で大きく異なる光学特性を示すことを利用したものである。2019年には、この構造を活かしたニューロモルフィックコンピューティングの光アクセラレータが報告された。これは、SiN光導波路およびリング共振器からなる光回路であるが、一部にGSTが装荷されており光強度に応じて応答が変化するように工夫されており、4ニューロンの光回路で文字認識などに成功している。

○LiDARとオンチップ光コム

LiDAR応用では、光フェーズドアレイアンテナ方式と日本発のスローライト方式の検討が進んでいる。前者については、3次元集積技術を用いた光フェーズドアレイと駆動CMOSの単一チップ集積と、それを用いたコヒーレントLiDARのデモンストレーションなどの進展がみられる。また、スローライト方式はJST-ACCELプ

ロジェクトで研究開発が進んでおり、フォトニック結晶スローライト導波路を用いて高い解像度で広角なビームスキャンニングが報告されるなど進展をみせている。オンチップ光コムはSiNマイクロリング共振器などにおける非線形光学効果を利用した光コム発生技術である。化合物半導体光増幅器とSiNチップに形成されたループミラーで構成された励起用レーザと、同じSiNチップ上に形成された高Q値リング共振器を用いた乾電池駆動のオンチップ光コムなども報告されており、実応用が近づきつつある。

○シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスによる光トランシーバの開発ターゲットは800 Gbpsに移っている。100 Gbpsをアナログ2値振幅変調で行うことは駆動電子回路の高速化の観点で困難だと予想され、多値変調、波長多重、マルチコアファイバを用いた空間多重、フューモードファイバを用いたモード多重など、いずれかと組み合わせて実現されるものと予想される。また、LSIからの電気信号インターフェースとしてQSFP（quad small formfactor pluggable）やon-board opticsを用いる標準化も進められてきており、高速コンピューティングにおける光インターコネクトの重要性が益々重要となってきている。

シリコンフォトニクスにおいて重要課題の1つであるレーザ光源の実装技術に関しては、PETRAが行っているフリップチップ実装が主流となりつつあるが、従来の化合物半導体レーザの貼り合せ技術に代わって、量子ドットをSi上に直接成長する技術が目覚ましく進歩してきており、実用レベルの光出力と閾値が達成されている。また、最近では所定位置にレーザ素子を貼り合わせるトランスファー・プリンティング技術も完成度を増しており、光集積回路への機能デバイスの表面実装技術も今後注目される。

光スイッチの研究開発が活発化している。これは、現在データセンターなどで用いられている電気のパケットスイッチが帯域・遅延時間・消費電力などの観点でシステム全体のボトルネックになりつつあり、その解決手段として光サーキットスイッチに対する期待が高まっているためである。2次元MEMSとシリコン導波路を組み合わせた構成で、従来に比べて約1桁低損失な光スイッチが報告されており、小型・低価格・大規模化を同時に実現できる方式として注目されている。

○量子集積フォトニクス

シリコンフォトニクスを利用した量子光回路が進展している。シリコンモノリシック光集積回路では、オンデマンドで決定論的に単一光子の生成が可能な単一光子源の集積化が困難なため、ハイブリッド集積技術を用いた量子光回路の実現を目指す研究が加速している。化合物半導体量子ドットからなる量子光源を用いたハイブリッド集積量子光回路の研究が欧米を中心に進んでいる。国内では転写プリント法（後述）を用いて量子ドット単一光子源をCMOSファウンドリで作製した光回路に集積する研究などがある。最近の成果として注目されるのは、MITのグループによるAlN光回路にダイヤモンド色中心を用いた単一光子源128チャンネルを集積した量子光回路の報告である。この報告は量子光源の集積にとどまるものであるが、今後量子中継器や量子演算チップへの展開が期待されている。ダイヤモンドを用いた量子情報技術はさまざまな形で進展しており、日本はダイヤモンドに関する高い材料技術を有するものの、その集積化をめざした取り組みでは海外グループが大きくリードしている。

○ナノフォトニクス

メタマテリアルの一種であるメタサーフェスと呼ばれる構造が実用化に向けて研究が加速している。2011年にHarvard大学のCapassoらがサブ波長の光アンテナアレイを用いて、数十 nm程度の薄膜を光が通過ま

たは反射する際に任意の波面制御が可能となることを示したのが研究の出発点になり、高効率化、低損失化、多機能化の研究が進んできたが、近年は薄膜レンズとしての研究が活発化している。スマートフォン等の小型携帯機器への適用をめざして、波長収差が補正され広帯域な白色光に対して像を結ぶアクロマティックレンズが開発されつつある。

プラズモニクスによるナノスケールの閉じ込めサイズを持つ導波路にさまざまな機能材料を組み合わせて、電気光学変調器や受光器を実現する研究が加速しており、光電変換器の小型化、超高速化が進展している。変調器としては、スイス連邦工科大学（ETH）のLeutholdの研究グループでは、MIM（金属・絶縁体・金属）構造の導波路の100 nm程度のギャップに電気光学ポリマーを埋め込み、短尺で超高速のMach-Zehnder型電気光学変調器を実現している。その性能は年々向上し、近年は100 GHzを超える周波数で動作しており、またリング共振器と組み合わせることによって、低ロス化（挿入損失2.5 dB）にも成功している。ナノフォトニクス変調器の材料は近年さまざまなものが用いられるようになってきている。薄膜$LiNbO_3$を用いたメンブレン型の電気光学変調器は、非常に低い電圧で超高速動作を達成している。また、プラズモニクスにITOを組み合わせた構成で超小型の電気光学変調器も報告されている。モード体積が立方ナノメートルを下回るピコ共振器が注目されている。金ナノ粒子と金基板の間に形成されるプラズモニック共振器で実現され、室温で単一分子との強結合を実現するなどこれまで難しいと考えられてきた条件下での量子電気力学効果の活用に道を拓いた。最近では遷移金属ダイカルコゲナイドとの組み合わせも報告されるなど展開を見せている。

○トポロジカルフォトニクス、非エルミート光学

「物質におけるトポロジカル理論」（2016年のノーベル物理学賞）の概念が光学の分野に導入され、トポロジカルフォトニクスと呼ばれる研究が活発化している。フォトニック結晶やメタマテリアルなどの人工ナノ構造を用いて、さまざまな興味深いトポロジー的な性質が見つかり、活発な研究が世界中で行われている。当初は理論研究やマイクロ波領域での原理検証実験が主であったが、近年、光学領域における実験実証が急速に進みつつあり、光トポロジカル絶縁体の作製や、光トポロジカル絶縁体のエッジモードによるレーザ発振などが報告されている。また、フォトニック結晶のバンド構造によって生じるトポロジカル特異点が近年注目を集めており、トポロジカル特異点の重ね合わせにより超高Q状態を実現する手法や、一方向性の束縛状態の形成等が報告されている。これらの分野では特に中国の研究者の動きが活発である。

トポロジカルフォトニクスと並行して近年活発化しているのは、非エルミート光学と呼ばれる分野である。これは元々、利得と損失があるPT対称性と呼ばれる対称性をもって配置される場合に、例外点（Exceptional Point：EP）と呼ばれる状態を境にして、光が複素固有値状態から実固有値状態に転移する現象に興味が持たれて研究が始まったものである。その後、このEP付近でさまざまな興味深い現象が発現することがわかり、幅広い研究に展開しつつある。まだ、基礎研究の段階であるが、EP付近でのセンサの感度向上、非対称性なモード変換器、光の軌道角運動量を持ったレーザ発振、屈折率虚部を用いたレーザビームのステアリング技術などの興味深いデバイスが実現されており、今後の研究の進展が期待されている。

○ナノマテリアル

近年グラフェンを中心に、h-BN、$MoSe_2$、MoS_2、WSe_2等の単原子層二次元物質やカーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤなどさまざまな新しい性質を持つナノスケール材料をナノフォトニクスと組み合わせデバイス動作させる試みが引き続き増加している。グラフェンに関しては、特に受光器、変調器の研究が進展している。 MIM型のプラズモニック導波路にグラフェンを結合させた構造において、photo-bolometric効果を用

いて110 GHzの帯域で0.5 A/Wという高い受信感度が報告されている。また、グラフェンの上に絶縁体を挟んで分離電極を設けることにより、プラズモニックな増強効果と同時にPIN接合を形成する構造で、photo-thermoelectric効果を利用して12.2 V/Wという高い外部変換効率も報告されている。電気光学変調器に加えて、最近は位相変調器としての動作も報告されている。また、グラフェンは光非線形材料としても高いポテンシャルを持っており、MIM型導波路にグラフェンを装荷したデバイスにより、光非線形性を利用した全光スイッチが報告されており、超高速（260 fs）かつ低消費エネルギー（35 fJ）での動作が達成されている。

$MoSe_2$などの遷移金属カルコゲナイドは、大きな光非線形性や励起子効果、強い発光などグラフェンにはない顕著な光学的性質を持つため、デバイス応用をめざした研究が進行している。例えば、Columbia大学のグループによりWS_2を装荷したSiNマイクロリング共振器を用いた電気光学変調器の実現が報告されている。またこれらの物質はVan der Waals結合により多彩な材料を多層化してヘテロ接合を作ることができるため、新しい物性制御の可能性を持つ材料としても注目されている。 $MoTe_2$とグラフェンのヘテロ構造をSi細線導波路上に装荷した光通信波長の受光器が最近実現されており、50 GHzの動作帯域、0.2 A/Wの感度が報告されている。

○強誘電体材料の集積フォトニクス応用

電気光学効果が大きいニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$：LN）の薄膜化技術がここ数年で大きく発展し、集積フォトニクスに応用しようとする試みが進んでいる。光通信の高速光変調器として利用されてきたLNを利用することで、集積フォトニクスにおける変調速度の更なる向上が期待できる。 Harvard大学のグループは、CMOSで駆動できる1.4 Vの動作電圧で3 dB帯域45 Gbpsを超える薄膜LN変調器を実現し、CMOS直接駆動による75 Gbpsの信号変調などを実証している。また、中国の研究グループからはシリコン導波路とのハイブリッド集積を実現し、100 Gbpsを超える変調も報告されている。 LNのナノ加工技術の発展により高品質なオプトメカニクス結晶の実現も可能になっており、量子情報分野におけるトランスデューサへの展開も期待されている。優れた電気光学特性を有するチタン酸バリウム（$BaTiO_3$：BTO）薄膜の作製と集積フォトニクス応用に関する研究も欧州で進んでおり、シリコン光導波路をハイブリッド集積した変調器が報告されている。さらに、シリコン基板上に集積されたBTO光変調器において、半導体光変調器では実現が難しい極低温（4 K）高速変調（20 Gbps）動作も報告されており、量子集積フォトニクスへの応用も期待されている。

○ハイブリッド集積技術

ハイブリッド実装およびハイブリッド集積に関する研究はこれまでもその重要性は認識されてきたが、モノリシック集積の限界を打破し集積フォトニクスの可能性をさらに広げるため、その重要性がますます高まっている。フリップチップ実装など個々のチップを集積・実装する技術はすでに広く利用されていているが、最近の話題として光硬化で形成したポリマー導波路を用いたチップ間の光接合技術（光ワイヤリング）の進展があげられる。隣接して配置された半導体レーザアレイとシリコン導波路チップの接続、シリコン導波路から光ファイバへの接続が0.4～0.7 dB程度の損失で実現されている。

基板貼り合わせ技術は、シリコン基板上に大面積一括で化合物半導体薄膜などの異種材料を接合できる技術であり、広く利用されている。国内では東京工業大学のグループなどで光集積をめざした貼り合わせ技術の研究が進んでいる。また、NTTグループは、InP系薄膜の貼り合わせと再成長技術を用いてメンブレンレーザの研究を進めている。最近ではエバネッセント結合によりレーザ出力のシリコン導波路への結合にも成功し、集積フォトニクスの光源技術の1つとして注目されている。さらに、この技術を適用できる材料系が拡大して

おり、高速光変調器への応用が可能な強誘電体や、オンチップ光非線形素子への応用をめざしたGaPのシリコン基板上への貼り合わせなどが報告されている。

転写プリント法は、デバイス加工を施した後に光回路上に集積することができる技術である。集積化したい光素子にゴムを押しつけ急速に引き剥がすことで素子をピックアップする。その後、光回路上の所望の場所に配置し、ゆっくりとゴムを引き剥がすことで光素子が光回路上に集積される。一連の作業は光学顕微鏡下で行われるが、研究室レベルではかなり高精度（位置合わせ誤差100 nm以下）が実現されており、本手法を用いたシリコン光回路への化合物半導体光素子や量子光源の集積が報告されている。個々のデバイスを集積する技術としてマイクロプローブを用いた手法も知られており、ダイヤモンド量子光回路をはじめ量子フォトニクスの分野を中心に利用されている。これらの手法は、スループット向上の課題があるが、材料を選ばない集積技術であるとともに、良質なデバイスを選別し導入することができるのが魅力である。

シリコン基板上への化合物半導体の直接成長に関する研究の歴史は長い。シリコンでは実現が困難な高効率光源をシリコン基板上に直接形成できる魅力は大きい。近年、応用上重要な温度安定性や反射光耐性に優れた量子ドットレーザをシリコン基板上に直接形成する技術が大きく進展しており、米国、欧州、中国、国内では東京大学のグループからシリコン上直接成長による量子ドットレーザの発振が報告されている。 UCSBのグループからは、Si基板上への直接成長で形成した受動モードロック量子ドットレーザとそれを用いたテラビット超の伝送容量実験などが報告されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国では、集積フォトニクスに関して2015年に始まったAIM Photonics（American Institute for Manufacturing Integrated Photonics）での取り組みに加え、2017年からはデータセンターのエネルギー効率化をめざすENLITENED（ENergy-efficient Light-wave Integrated Technology Enabling Networks that Enhance Dataprocessing）プログラムがスタートしている。また DARPAのもとで2019年からパッケージ総バンド幅100Tbps、エネルギーコスト1 pJ/bitをめざすPIPES（Photonics in the Package for Extreme Scalability）、2020年からLUMOS（Lasers for Universal Microscale Optical Systems）などの大型プロジェクトが続々と立ち上がっている。LUMOSはシリコンなどの光集積回路に光利得を有する化合物半導体を集積するハイブリッド集積をめざすもので、集積ハイパワーレーザや可視域への応用も視野に計画されている。量子集積フォトニクスやダイヤモンド量子フォトニクスについてはNSF、EFRI、ACQUIREプログラムやMITRE Quantum Moonshotプログラムなどの支援の下で活発な研究活動が行われており、世界をリードしている。

欧州ではHorizon 2020のなかで、集積フォトニクスに関するプロジェクトが多く進行している。シリコンフォトニクスを含む光エレクトロニクス関連のプロジェクトは、2015～2020年の間で42.4 Mユーロで12プロジェクトが登録されており、STMicroelectronicsをファブとして利用して、伝送容量2 Tbps、消費電力2 mW/Gbps、コスト0.2 ユーロ/Gbpsが目標値となっている。ハイブリッド集積に関係するプロジェクトとして、Southampton大学などを中心にIII - V半導体のSOI基板への集積や量子ドットレーザの直接成長技術を対象としたPICTURE（Photonic Integrated Circuits using a Thin and UnifoRm Bonding LayEr）プロジェクトが2020年末まで予定されている。また、2019年には、転写プリント法を用いた異種材料集積・光電集積により高速光トランシーバの実現をめざすCALADANプロジェクトがIMECやGent大学（ともにベルギー）などが参加してスタートした。このプロジェクトではコスト目標 0.1 ユーロ/Gbpsが掲げられている。その他、S2QUIP（Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics）など、量子集積フォトニクス

に関するプロジェクトも進行中である。

日本においては、2022年3月まで技術組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）をベースに、総バンド幅10 Tbpsを目標としたNEDOプロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス」が進行中である。2017年には同技術をベースにして光トランシーバの製造、販売を司る会社（アイオーコアー）が設立されている。また、2019年度からNEDO先導研究プログラムで「異種材料集積による10テラビット級低消費電力光伝送デバイス技術開発」が開始されている。さらに、2020年度にはJST未来社会創造事業大規模プロジェクト型「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」の公募が行われて「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」が採択され、新たな展開が開始されると期待される。

（5）科学技術的課題

当面、シリコンフォトニクスにとってもっとも重要な適用領域は光インターコネクトであり、この領域で重要な主な指標は、高帯域密度（単位例：Tbps/cm^2、Tbps/cm）、低消費電力（単位例：mW/Gbps、pJ/bit）、低コスト（単位例：ドル/Gbps）の3つである。高帯域密度化のためには、高速化と高密度化が必要であり、前者は前記の400 Gbps実現に向けた取り組みが行われているが、後者は特に光トランシーバに接続する光ファイバのピッチによって制限されていることが多く、この部分の研究開発を加速する必要がある。消費電力は主にLSIと光変調器/受光器間の電気配線の静電容量と電圧振幅で決まるため、低消費電力化の鍵は、この電気配線を短縮する実装構造・方法を電子デバイスの実装構造・方法と整合させることにある。低コスト化のためには、シリコンフォトニクス製品のエコシステムを既存のエレクトロニクスのエコシステムに整合させる必要がある。前述の米国のAIM Photonicsは、これをめざした動きである。

ナノフォトニクス分野全体でみると、引き続き新奇な現象や従来の常識を打ち破るような特性が達成され続けており、アカデミックな成果は出続けていくものと思われる。一方、ナノフォトニクスの根幹を支えるナノ加工技術に関しては、依然、研究室レベルの技術に頼るところが多い。今後は大規模集積化と大量生産が可能なナノフォトニクス作製技術の開発が重要なポイントになる。シリコンフォトニクスのなかにどれほどナノフォトニクスに関連した作製技術を導入できるか、または、既存のシリコンフォトニクス技術で作製可能なナノフォトニクス構造の範囲を広げていくかが鍵となると思われる。

集積フォトニクスでは、高性能光素子を実現する物理と高度な加工・プロセス技術、それらの特性を劣化させることなく大規模集積化する技術が必要である。単体素子で高性能な素子も集積化には適さないことも少なくない。デバイス開発においても性能の追求とともに集積化を意識した研究開発が今後重要になってくる。集積化技術においては、プロセス整合性やスループット、更には歩留まりやコストも考慮して、個々のデバイス性能を最大限に引き出す技術の開発が求められる。特に光子1つひとつを扱う量子集積光回路では、個々のデバイスに極限的性能が求められるため、古典光を用いる集積フォトニクス以上に高度な技術開発や新たな発想が求められることが予想される。また、一般に集積化技術は既存デバイスに対応して技術開発が行われるが、集積フォトニクスのパラダイムシフトをもたらしうるデバイスや材料の革新に対して柔軟に対応できる手法の開発も期待される。その観点から、研究開発が活発となっているハイブリッド集積技術の更なる高度化に対する期待は大きい。一方、量子応用を含む集積光回路の一層の高機能化・高性能化をめざし、今後はナノフォトニクスデバイスの導入も進むことが予想される。そのため、シリコンフォトニクス作製技術を含め加工技術の一層の微細化・高精度化も重要になると考えられる。

（6）その他の課題

シリコンフォトニクスの試作に関して、EUにはEuropractice（IMEC, Leti, IHP）やSTMicroelectronics、米国にはAIM Photonicsのファウンドリ（シャトル）サービスがある。また、シンガポールの科学技術庁がIME（Institute of microelectoronics）のシリコンフォトニクス部門を法人化することを決定し、少量・多品種生産ができるアドバンスト・マイクロ・ファウンドリ（AMF）が発足した。日本では産総研を主体としたシリコンフォトニクス・コンソーシアムがシャトルサービスを開始し、産総研のスーパークリーンルームでウェハ・プロセスが行える体制が構築されている。独自ファブを持たない日本の大学・企業は個別にシンガポールのIMEを利用することが多かったが、研究開発としては産総研のシリコンフォトニクス・コンソーシアムのシャトルサービスを利用する動きや、また商用としてはジャパンセミコンダクター（JSC）を生産ファブとして利用する動きも出てきている。このようなファブは世界中の人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能を持つため、ファブを国内に持つことは、シリコンフォトニクスに限らず、ナノフォトニクス、さらにはナノテク全般で国の競争力を強化するために重要になると考えられる。このような共同利用の仕組みを構築し、持続可能な形で運営していくには、少なくともファブの維持費をまかなえる程度の多数の参加者を国内外の多様な分野から集める必要があり、そのためには継続的な国・学会・業界等のリーダーシップが求められる。

集積フォトニクスやナノフォトニクスの研究には高度な技術が要求されるため、研究者や企業にとって新たに参入することは必ずしも容易ではない。産総研でのMWP（Multi Project Wafer）試作が利用できるようになったことは、今後の国内関係研究の活性化に大きく貢献すると期待できる。一方、今後重要となる化合物半導体の加工・集積についても同様な取り組みが実施されることが望まれる。企業が請け負うことも考えられるが、設備投資や運転経費などを考えると、国の施策としての検討も必要と考えられる。集積フォトニクスはさまざまな技術が必要とされる領域融合研究であり、異なった分野を専門とする研究者間の共同研究が本質的に重要である。異分野の研究者間の連携・融合をより強力に推し進めるための、大型プロジェクトやその他の枠組みの積極的な活用が望まれる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・東大、東工大、NTTなどでハイブリッド集積技術の研究が進んでいる。また、JST-CRESTではNTTの光パスゲートコンピューティングなど、フォトニクスを活用した新たな光情報処理技術の研究が複数進行している。 ・オンチップ光コムの研究は国内では慶大が孤軍奮闘状態。 ・ダイヤモンドを用いた量子情報技術、量子センサ技術に関する研究は、東工大、横国大、慶大、京大、阪大などで進んでいるが、その集積化研究は未着手。
	応用研究・開発	○	→	・NEDOプロジェクトで開発された「光I/Oコア」を用いたオンボード光モジュールやAOCなどが開発されている。また、産総研でもMPWサービスが始まり国内研究機関や企業で活用され始めている。 ・複数企業が参加するNEDO先導研究プログラムにおいて、ハイブリッド集積技術の開発とその低消費電力高速光伝送デバイス技術への応用をめざした取り組みが開始されている。 ・JST-ACCELではスローライトを利用したオンチップLiDARの研究開発も進んでいる。

米国	基礎研究	◎	→	・シリコンフォトニクスでは、MIT、UCSB等の大学を中心に幅広い研究が行われており、世界をリードしている。 ・ナノフォトニクスの基礎研究に関しては、MIT、Stanford大などに各分野において世界をリードする研究者がおり、活発な研究を行っている。 ・多くの大学、研究機関で集積フォトニクス関連の研究が活発に行われている。大規模光回路関連ではMITが強力。 UCSBは量子ドットレーザ直接成長技術で顕著な業績を挙げている。 ・量子集積フォトニクスでは、MIT、Harvard大、Maryland大、NISTなどが中心となっている。
	応用研究・開発	◎	→	・AIM Photonicsの設立に続いて、多くの関連プロジェクトが始動している。 ・2020年に入ってからもIntelやIBMから最新の成果が発表されるなど、企業の研究が堅調。 ・Harvard大の薄膜LN技術を基礎にスタートアップ会社が設立された。 ・集積フォトニクスを利用したニューラルネットワークに関するスタートアップ会社からは光AIチップのプロトタイプが発表されている。
欧州	基礎研究	◎	→	・フォトニクス全般で基礎研究が着実に進められている。 ・集積フォトニクスでは、Southampton大、Bristol大（英）、Gent大、IMEC（ベルギー）、KIT（独）、Leti（仏）などが、量子集積フォトニクスについては、Bristol大（英）、KTH（スウェーデン）、Copenhagen大（デンマーク）、CNRS（仏）、Würzburg大（独）などが中心。 ・オンチップ光コムの分野ではEPFL（スイス）が世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	・集積フォトニクスに関係する多くの研究プロジェクトが走っており活発である。 ・IMECは欧州のナノフォトニクスを支えるファウンドリとして重要な役割を果たしている。 ・ごく最近IMECと英国・CST globalの連携が発表されるなど、特にハイブリッド光集積分野での応用研究・開発が進んでいる。 ・IBMチューリッヒでも光メモリを用いたインメモリコンピューティングなどの研究が進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	・ナノフォトニクスなどの分野では、欧米からの帰国組を中心に多くの発表があり、存在感を高めている。 ・薄膜LN技術などの注目に値する成果もある一方、集積化技術、集積フォトニクスという点では目立った成果は多くはない。 ・量子情報技術・量子集積フォトニクスについては、中国科学技術大学や北京大学などのグループが世界レベルで活躍している。 ・拠点大学には最先端の加工技術装置が導入されており、作製技術も急速に立ち上がりつつある。 ・近年、遷移金属カルコゲナイドを用いたナノフォトニクスや、トポロジカルフォトニクスなどの新しい分野に、優秀な研究者が多数参入し、国から潤沢な資金を受けて顕著な研究成果を上げつつあり、成長が著しい。
	応用研究・開発	○	→	・HuaweiやHiSiliconなどでシリコンフォトニクスチップの研究開発が行われており、今後大きく進展する可能性がある。 ・HiSiliconからはシリコンフォトニクスチップを用いた量子鍵配送に関する発表もあり、量子技術への進出も予想される。 ・SMICにシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築中。

韓国	基礎研究	△	→	・ソウル大学、KAIST、KISTや延世大学などでナノフォトニクス、シリコンフォトニクスやトポロジカルフォトニクスの基礎研究が行われているが、集積化技術、集積フォトニクスという点での顕著な動向は見られない。
	応用研究・開発	△	→	・Samsungでシリコンフォトニクスやハイブリッド集積の研究活動が進んでいるが、学会や論文での発表は少ない。一方、集積光回路や光送受信機など関連技術に関する特許は積極的に申請されている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1）K. Kitayama et al., “Novel frontier of photonics for data processing-Photonic accelerator”, *APL Photon*. 4, no. 9（2019）：090901. doi：10.1063/1.5108912

2）A. W. Elshaari et al., “Hybrid integrated quantum photonic circuits”, *Nat. Photonics* 14, no.5（2020）：285-298. doi：https://doi.org/10/1038/s41566-020-0609-x

3）A. L. Gaeta, M. Lipson and T. J. Kippenberg, “Photonic-chip-based frequency combs”, *Nat. Photon*. 13, no. 3（2019）：158-169 . doi：10.1126/science.aad4811

4）P. P. Khial, A. D. White and A. Hajimiri., “A Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement”, *Nat. Photonics* 12, no. 11（2018）：671-675. doi：https://doi.org/10.1038/s41566-018-0266-5

5）S. Fathololoum et al., “1.6Tbps Silicon Photonics Integrated Circuit for Co-Packaged Optical-IO Switch Applications”, *Optical Fiber Communication Conference（OFC）2020*（2020）：T3H.1. doi：https://doi.org/10.1364/OFC.2020.T3H.1

6）S. -H. Jeong et al., “Polarization Diversified 16 λ Demultiplexer Based on Silicon Wire Delayed Interferometers and Arrayed Waveguide Gratings”,*J. Light. Technol.* 38, no. 9（2020）：2680-2687. doi：10.1109/JLT.2020.2969240

7）P. Bhargave et al., “Fully Integrated Coherent LiDAR in 3D-Integrated Silicon Photonics/65nm CMOS”, *2019 Symposium on VLSI Circuits*（2019）：C21-5. doi：10.23919/VLSIC.2019.8778154

8）M. Blaiche et al., “Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography”, *Light Sci. Appl*. 9, no. 1（2020）：71-81. doi：10.1038/s41377-020-0272-5

9）S. Liu et al., “High-channel-count 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 4.1 Tbit/s transmission capacity”, *Optica* 6, no. 2：128-134. doi：https://

doi.org/10.1364/OPTICA.6.000128
10）C. Wang et al., “Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages”, *Nature* 562, no. 7725（2018）：101-104. doi：10.1038/s41586-018-0551-y
11）K. Takeda et al., “Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers”, *Nature Photonics* 7, no. 7（2013）：569-575. doi：10.1038/nphoton.2013.110
12）M. W. Knight et al., “Photodetection with Active Optical Antennas”, *Science* 332, no. 6030（2012）：702-704. doi：10.1126/science.1203056
13）A. Melikyan et al., “High-speed plasmonic phase modulators”, *Nature Photonics* 8, no. 3（2014）：229-233. doi：https://hdl.handle.net/1854/LU-4367368
14）E. Kuramochi et al., “Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip”, *Nature Photonics* 8, no. 6（2014）：474-481. doi：10.1038/nphoton.2014.93
15）Y. Shen et al., “Deep learning with coherent nanophotonics circuits”, *Nature Photonics* 11, no. 93（2017）：441-446. doi：10.1038/nphoton.2017.93
16）T. W. Hughes et al., “Training of photonic neural networks through in-situ backward propagation and gradient measurement”, *Optica* 5, no. 7（2018）：864-871. doi：https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000864
17）M. Takenaka et al., “High-efficiency, low-loss optical phase modulator based on III-V/Si hybrid MOS capacitor”, *Optical Fiber Communication Conference（OFC2018）*,（2018）：Tu3K.3. doi：https://doi.org/10.1364/OFC.2018.Tu3K.3
18）Shuming Wang et al., “Broadband achromatic optical metasurface devices”, *Nature Communications* 8, no. 1（2017）：187. doi：10.1038/s41467-017-00166-7
19）C. Haffner et al., “Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator”, *Nature* 556, no. 7702（2018）：483-486. doi：10.1038/s41586-018-0031-4
20）S. Barik et al., “A topological quantum optics interface”, *Science* 359, no. 6376（2018）：666-668. doi：10.1126/science.aaq0327
21）S. K. Ozdemir et al., “Parity–time symmetry and exceptional points in photonics”, *Nature Materials* 18, no. 8（2019）：783-798. doi：10.1038/s41563-019-0304-9
22）M. Ono et al., "Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides", *Nature Photonics* 14, no. 1（2020）：37-43. doi：10.1038/s41566-019-0547-7
23）I. Datta et al., ”Low-loss composite photonic platform based on 2D semiconductor monolayers”, *Nature Photonics* 14, no. 4（2020）：256-262. doi：10.1038/s41566-020-0590-4

2.3.3 スピントロニクス

（1）研究開発領域の定義

固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に応用する分野であり、電荷の自由度のみに基づく従来のエレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイス実現をめざす研究開発領域である。ハードディスクの大容量化や省電力化、不揮発性メモリの実現など、私たちの生活の中ですでに使われている技術もあるなか、デバイスの高機能化・省電力化に向けた研究開発が進められている。最近では、熱スピン流に基づいた熱電変換をめざすスピンカロリトロニクスや物質のトポロジカルな性質に着目したスピン流の制御、スピントロニクスで発展した技術の量子状態制御への応用、さらにはスピンを用いた人工知能デバイス研究など新しい展開をみせている。

（2）キーワード

スピン流、スピントルク、スピン軌道相互作用、スピンホール効果、スピンゼーベック効果、不揮発性メモリ、電圧トルク、トポロジカル物質、量子状態制御、スピンカロリトロニクス、スピンメカニクス

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

電子は電荷とスピンの2つの自由度を持つことがよく知られている。従来、研究分野として電荷を主に扱う「電子工学」とスピンを主に扱う「磁気工学」の2つに分かれて発展してきたが、1990年代以降のナノテクノロジーの発展により、電子の電荷とスピンを効果的に結びつけて利用する学理体系の構築が始まり、スピントロニクスと呼ばれる研究領域の誕生へとつながった。なかでも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野がもっとも応用研究が進展しており、すでにハードディスクの磁気ヘッドとして広く普及し、記録密度の大容量化に貢献している。さらに、スピン流を用いることで、従来の電子素子が抱えていたジュール熱によるエネルギー損失の問題の解決にもつながり、電子機器類の小型化・高性能化、画期的な省エネデバイス開発や量子効果の制御への寄与等が期待できる。

［研究開発の動向］

スピントロニクスの歴史は、1857年のW. Thomsonの磁気抵抗効果の発見にさかのぼる。当時は磁気抵抗効果の大きさを表すMR比が低く、実用化にはほど遠い状況であった。1988年のA. FertおよびP. Grünbergらによる巨大磁気抵抗（Giant Magneto Resistance：GMR）効果の発見をきっかけに、GMR効果を利用したデバイス開発が世界中で進められ、1997年にGMRヘッドとして実用化された。その間、1995年に宮崎照宣とJ. S. Mooderaがそれぞれ室温における大きなトンネル磁気抵抗（Tunnel Magneto Resistance：TMR）効果を報告した。TMR効果は電子がトンネルできる程度の薄い絶縁体層を強磁性層で挟んだときに、2つの強磁性層の磁化の相対的な方向によってトンネル抵抗が変化する効果である。 TMR効果についてはGMR効果発見以前から研究が行われていたが、室温における高いMR比は報告されていなかった。GMR効果のMR比が5～15％程度であることに対して、TMR効果は20～70％と格段に高いことから、2004年に超高記録密度用TMRヘッドとして実用化された。さらに、S. S. P. Parkinと湯浅新治が開発したMgOを絶縁層とするTMR素子では100％を超えるMR比が得られ不揮発性固体メモリ（Magnetoresistive Random Access Memory：MRAM）の実現にもつながっている。

1990年代には、磁化が電気伝導に与える影響が研究の中心で、かつ金属系と半導体系の2つの流れがあったが、2000年頃からは電気伝導が磁化に与える影響に興味が持たれるようになり、スピン注入磁化反転や電流による磁壁駆動、スピンホール効果などの研究が精力的に行われるようになった。さらに、TMRやスピン注入、スピンホール効果などが、既存の材料の分類である金属・半導体・絶縁体の枠を超えて観測されており、スピン流の概念で解釈されている。スピン流とは、電子のスピン角運動量の流れであり、実験的に電流と分離して生成・検出することが可能である。スピン流は、電気的には絶縁性を示す物質であってもスピン波（マグノン）として生じるもので、スピントロニクスにおける基本的な概念の1つである。また、磁気と電気の変換（スピンホール効果、逆スピンホール効果）、磁気と熱の変換（スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果）など、磁気とほかの物理量との変換の基礎にもなっている。さらに、近年では音や振動といった機械運動とスピン流との変換も発見されている。熱にかかわる分野をスピンカロリトロニクス、力学的運動にかかわる分野をスピンメカニクスと呼ぶこともある。これらの変換にはスピン軌道相互作用が大きな役割を果たしているが、界面における結晶対称性の破れがその根底にある。スピン軌道トルク（Spin Orbit Torque：SOT）による磁化反転はその例である。

2000年代初頭に発見されたトポロジカル物質と呼ばれる、物質が持つトポロジーによって特徴づけられる新しい物質群においてもスピン軌道相互作用が大きく影響しており、ごく最近ではトポロジカル物質であるワイル磁性体やトポロジカル絶縁体をスピントロニクスへ応用するトポロジカルスピントロニクスと呼ばれる分野も形成されつつある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• スピン軌道トルクMRAM

スピンホール効果あるいはスピン軌道相互作用によるラシュバトルクを用いることで、現在実用化が進むSTT-MRAMに比べて高効率のMRAMが作れることが期待されている。原理的に3端子であるため書き込みラインと読み出しラインを分離できるという回路上の利点もある一方で、素子サイズが大きくなるという問題も抱えている。近年、その高速性、高信頼性を生かしたSRAM置き換えの研究開発が進んでいる。 MRAMによりキャッシュを不揮発にすることで携帯端末などの省エネルギー化も期待されている。

• 電圧駆動MRAM

現在、実用化が進んでいるSTT-MRAMやスピン軌道トルクを用いるSOT-MRAMは電流が作る磁界を書き込みに使う場合に比べて非常に低消費電力となるものの、電流を用いてスピン流を発生するためにジュール熱によるエネルギー散逸を伴う。一方、電圧電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧駆動MRAM」は、電流をほとんど流さずに電圧のみで書き込むため、理論的にはさらに2桁程度小さなエネルギーでの書き込みが可能となる。近年、電圧パルスによる高速双方向磁気書き込みが実験的に示されたこと、10^{-7}台のエラーレートが実証されたことで、実用化の可能性が高まっている。その他にも電圧による磁気異方性変化自体を大きくする必要があるが、最近、FeIr系などで従来の10倍以上の電圧効果が見出され実用化に着実に近づいている。

• 電圧駆動スピントロニクスメモリ（Voltage Control Spintronics Memory：VoCSM）

2016年に提案されたスピン軌道トルクと電圧による磁気異方性変化を同時に利用することにより低電力化と高集積度を同時に満たすことをめざしたMRAMの新しいアーキテクチャである。1つの重金属ワイヤの上に複数の磁気トンネル接合を作ることが特徴で、このうち電圧をかけたもののみを低消費電力で書き換えるこ

とが可能になる。

• 高感度磁場センサ

トンネル磁気抵抗素子およびマグネットインピーダンスセンサ（MIセンサ）を用いた心磁計、脳磁計の研究が進んでいる。すでに、心磁・脳磁の信号測定に成功しており今後の実用化が期待される。

• スピンMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor）

スピンMOSFETは、電力増幅作用を持ち、出力電流やトランスコンダクタンスを磁化状態によって操作でき、不揮発で、既存のSi集積回路で蓄積された微細加工技術や回路設計技術などの資産を使うことができるという特徴を持つ。原理的にはCMOS回路構成も可能である。スピンMOSFETからなる論理回路は、素子数の少なさと不揮発性により低消費電力動作が期待できる。まだ理想的な出力特性を得るにはいたっていないものの、これまでいくつかの試作と原理的な動作実証の研究が行われている。このような再構成可能な論理回路や不揮発性論理回路の実現は、今後のスピントロニクスにおける重要な目標になると考えられている。

• Siへのスピン注入、輸送、検出とスピンMOSFETの試作

大阪大学-TDKグループは、スピンMOSFETの作製とその動作実証を試み室温でスピン MOSFETを動作させたと報告した。ゲート電圧によるドレイン電流の変調はある程度できているが、スピン注入と検出による磁気抵抗比は0.01～0.04 %程度と非常に小さいものであった。最近、東京大学グループは、GaMnAs/GaAs/GaMnAsからなる強磁性半導体ヘテロ接合を用いた縦型FETにサイドゲートを付けた独特のトランジスタ構造を作製し、低温ではあるがスピンMOSFETの動作と大きな磁気抵抗比60 %の達成に成功した。また、東工大-NIMS-東大グループは、既存のTMR素子とMOSFETを組み合わせるという手法により、擬似スピンMOSFETの作製と良好な特性の室温動作を示した。

• マグノニクスと脳型コンピューティング

スピン波やマグノンをキャリアとするデバイスの実現をめざす、マグノニクスと呼ばれる研究領域も誕生しており、ドイツや日本を中心に進展している。例えば、スピン波スピン流を用いた論理ゲートが提案され、動作実証が報告されている。スピン波は室温でも十分に干渉効果を得ることが可能であるため、これを利用することでデバイス構造を簡易化可能であることが指摘されている。また、スピン波やスピントルク発振の非線形性を利用して脳型コンピューティングを行おうという動きもある。スピントルク発振器とディレーラインを用いてリザバーコンピューティングの実証が行われ注目を集めている。また、スピントルク発振器はHDDのさらなる記録密度向上のためのマイクロ波アシスト磁気記録（Microwave Assisted Magnetic Recording：MAMR）用の発振器としても期待されている。この他、磁性ドット間の双極子相互作用を利用した脳型計算のシミュレーションが発表されるなど近年急激に研究開発が活発になっている。

• トポロジカルスピントロニクス

トポロジカル絶縁体表面のスピン流やトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などのトポロジーに起因する特性を利用することにより、素子の高密度化や高速動作、高効率なスピン流・電流変換もしくは熱電変換の実現など、新材料・新デバイス開発をめざした新しいスピントロニクス技術として期待されている。特に近年、ワイル反強磁性体であるMn_3SnやMn_3Geなどにおいて、反強磁性体では発現しないと考えられてきた異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学効果などが、電子構造のトポロジーを起源として出現することが東大物性研グループにより報告され、反強磁性体を用いたスピントロニクスに新しい方向性を切り拓きつつある。また、実空間でトポロジーに保護された磁気構造であるスキルミオンに関しても、レーストラックメモリ活用に向けた研究が進められている。

• スピンゼーベック・異常ネルンスト効果を含む垂直熱発電

従来型の熱電変換は熱流と電流が平行であったため、性能に限界があった。これに対しスピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果は熱流と電流が垂直方向であるため、非常にシンプルな構造で高い変換効率が期待される。理論上の上限であるカルノー効率に達することが原理的には可能であると示された。最近の垂直熱発電の出力密度は200μW/cm^{2}に達しており、あと1桁向上すればBiTe系の従来型熱電素子を超えるところまで達している。

• 超伝導トポロジカル量子整流

第二種超伝導体MoGeを、磁性絶縁体$Y_3Fe_5O_{12}$基板に成膜した試料において、試料の温度を一定に保ちながらこの薄膜試料の面内方向にある特定の強度の磁場を印加すると、外部からの入力が全くないにもかかわらずMoGeの面内方向に直流電圧が発生した。この直流電圧は、電磁ノイズのある測定環境では一日中安定して観測され続けた。この直流電圧はMoGeがいわゆる渦糸液体相にあるときに生じており、磁性体界面と開放側界面における渦糸のアンバランスが整流機能を生じたと考えられる。温度差ではなく環境のゆらぎを検出しており、低温動作ながらも非常に感度の高い整流素子であり、ノイズ評価や微弱信号の検出に利用できる可能性がある。

• フレキシブルスピントロニクス

磁気抵抗素子をフレキシブル基板上に製膜することにより磁歪効果を用いたベクトル型のひずみセンサとなることが示された。今後、ゼロエネルギー消費のデータロガー付きセンサとなる可能性があり注目されている。

• 量産化へ向けた動き

米GlobalFoundries、米Everspin Technologies、米Intel、韓国Samsung Electronics、台湾TSMCなどの大手ファウンドリや半導体メーカーが軒並み、混載用MRAM（eMRAM）やSTT-MRAMの個別部品を300mmウェハで量産済み、もしくは量産準備が整ったとしている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

スピントロニクスは基礎研究から応用研究まで多くの先駆的研究が日本から生まれてきた研究領域である。わが国においては、JSPS科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」（領域代表者：高梨弘毅、2007～2010年度）やJST戦略的創造研究推進事業（さきがけ）「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス（略称：次世代デバイス）」領域（研究総括：佐藤勝昭、2007～2013年度）において、スピン流物理に関する基盤が構築された。特に特定領域「スピン流の創出と制御」からは、巨大スピンホール効果やスピンゼーベック効果の発見、スピン起電力の実証等、スピン流の学術的基盤に関して非常に高水準な研究成果が多数報告されたことが高く評価されている。また、さきがけ「次世代デバイス」においても、磁性誘電体中のスピン流を利用した電気信号の伝達、グラフェンを介したスピン流の制御など、スピントロニクスの発展に寄与する多くの成果が生まれている。その後、スピンの角運動量変換を介して固体中の巨視的物理量が別の物理量に変換されるスピン変換物性の学理追求、物質界面のナノスケール制御による磁気的、電気的、光学的、熱的、機械力学的なスピン変換機能の開拓をめざすJSPS科研費新学術領域「ナノスピン変換科学」（領域代表者：大谷義近、2014～2018年度）が発足した。また、内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」（PM：佐橋政司、2014～2018年度）では、AI/IoT時代における低消費電力化への要請に応えるため、電圧で磁気メモリに情報記録する究極の不揮発性メモリや省電力スピントロニクス論理集積回路などのコンピュータにおける各メモリ/ストレージ階層の省電力を極めることに挑戦した。また、JST戦略的創造研究推進事業におけるCREST「トポロジカル材料科学に基づ

く革新的機能を有する材料・デバイスの創出」（研究総括：上田正仁、2018～2025年度）およびさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」（研究総括：村上修一、2018～2023年度）においても、ワイル磁性体やスキルミオンなどのトポロジカル物質をスピントロニクスに応用したトポロジカルスピントロニクスに関する研究が推進されている。さらに、2020年から開始となったCREST「情報担体を活用した集積デバイス・システム」（研究総括：平本俊郎、2020～2027年度）およびさきがけ「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」（研究総括：若林整、2020～2025年度）においてもスピントロニクスは重要な分野の1つとして取り上げられている。加えて、JST未来社会創造事業大規模プロジェクト型・技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術」においては、「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」（研究開発代表者：中辻知、2020年度～）が採択され、スピントロニクスとフォトニクスを融合した革新的情報処理ハードウェア技術開発が推進されている。

また、日本学術会議「マスタープラン2014」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2014」においてスピントロニクスが重点課題の1つとして取り上げられた。これを受けて「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」拠点の整備が始まりスピントロニクス学術連携研究教育センターを拠点大学（東京大学、東北大学、大阪大学、慶應義塾大学）に設置し、主要大学、国研、関連企業をはじめとする国内有力研究機関を結ぶネットワークを形成している。スピントロニクスは日本学術会議「マスタープラン2020」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2020」にも採択され、新しく京都大学を拠点に加えた整備を開始する。しかし、上記のマスタープラン・ロードマップは直接の予算措置を伴うものではなく、将来的には予算措置を含む国の施策が求められる。

米国においては、NSF、DOE、DODなどの支援の下、スピントロニクス関連の研究プロジェクトが多数存在し、基礎研究から応用研究まで幅広く実施されている。なかでも、DOEのエネルギーフロンティア研究センター（Energy Frontier Research Centers：EFRCs）の1つであるSpins and Heat in Nanoscale Electronic Systems（SHINE、2014～2020年）では、伝導電子スピン流とマグノン流を制御するナノ電子システムを構築することを目的とし、カリフォルニア大学リバーサイド校を中核に米国におけるスピントロニクスに関係する機関（ほかにはジョンズ・ホプキンス大学、カリフォルニア大学ロサンゼルス校、テキサス大学オースチン校）が参画している。また、同じくEFRCの1つであるInstitute for Quantum Matter（IQM、2018～2022年）においては、量子もつれやコヒーレンスなどの量子効果が巨視的に発現する新しい量子物質や物性を開拓することを目的としている。ジョンズ・ホプキンス大学を中核機関とし、コーネル大学、ペンシルバニア州立大学、プリンストン大学、ラトガース大学が参加している。

欧州では、Horizon 2020の枠組や各国の研究資金で基礎研究を中心に実施されている。 Horizon 2020においては、反強磁性スピントロニクスの実現をめざしたAntiferromaginetic Spintronics（ASPIN、2017～2021年）プロジェクトや新規トポロジカル物質・トポロジカル物性の開拓をめざすTopological materials：New Fermions, Realization of Single Crystals and their Physical Properties（TOPMAT、2017～2022年）がある。また、ドイツにおいてはDFG支援の下、スピンカロリトロニクスに関する新しい研究分野開拓をめざしたSpin Caloric Transport（SpinCAT、2011年～）、スキルミオンを含む実空間でのトポロジカルスピンソリトンを用いたデバイスとアプリケーション開発に向けた基礎研究を行うSkyrmions：Topological Spin Phenomena in Real-Space for Applications（2018年～）などがある。特にSpinCATに関しては、2008年に慶應大グループによって発見されたスピンゼーベック効果に注目した大型プロジェクトである。

（5）科学技術的課題

磁性半導体をはじめとする半導体スピントロニクス材料開発に関しては、高いキュリー温度を得るための指針を確立するため、結晶成長機構の解明、欠陥やキャリア濃度の制御方法の開発、バンド構造と強磁性発現機構の理解、さらにはそれらの理解に基づくマテリアルデザイン方法の確立が求められる。また、スピンMOSFETなどスピンデバイスの研究については、着実に進歩しているものの、室温動作、満足すべきトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる十分大きな磁気抵抗比（磁気電流比）など、すべての要件を満足するデバイス作製が今後の重要な課題である。

近年、スピン軌道相互作用にかかわる物理が大きな発展をみせているものの、一般的にスピン軌道相互作用の大きな元素はレアアースが多く元素戦略的な観点が必要となる。また、スピンカロリトロニクスやスピンメカニクスにおいては、応用のためには熱/力学的運動⇔スピン流⇔電流の変換効率の桁違いの向上が必要であり、新物質の開発と原子レベルでの界面制御技術が必要になる。さらに、スピン流やトポロジカル物質を用いたスピントロニクスに関しては、まだ基礎研究フェーズであるといえるものの、実験室レベルの基本動作実証からプロトタイプの作製、デバイスの安定性や信頼性を検証するレベルまでステージアップさせることが必要である。

（6）その他の課題

スピントロニクスはもともと磁性薄膜の成長と物性を得意とする研究グループに牽引されてきた経緯があり、個々の研究者が前述の分野全体にわたる広い知識を必ずしも有しているわけではない。そこで、この分野では、物理・数学・物性・結晶工学・磁気工学・半導体工学・微細加工技術・計測工学の諸分野の研究者、さらにシステム（回路）・デバイスの専門家や産業界をいかに結集し学際的かつ産学連携を誘発する土壌を豊かにしていくかが重要な課題といえる。本研究開発領域は日本が強みを有する領域であり、今後も競争力を維持していくためには若手人材の育成と確保も最重要課題の１つである。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・JST戦略的創造研究推進事業などを中心に基礎研究が継続的に行われている。 ・トポロジカルスピントロニクスなどの新しい概念に基づく研究開発が成果をあげ始めている。
	応用研究・開発	○	↘	・実用化へ向けた本格的な研究開発は少なくなりつつある。企業のより一層の寄与が必要である。
米国	基礎研究	◎	↗	・NSF、DOE、DOE傘下のNERSC、ONRからの手厚い支援のもと、良質な基礎研究成果を出し続けている。
	応用研究・開発	○	↗	・キャッチアップが早く、電圧トルクなど多くの応用研究が始まっている。Everspin、Global-Foundries、IntelがMRAMの量産体制を準備しつつある。

欧州	基礎研究	◎	→	・英国ではEPSRCとJSPSとの共同プロジェクトとして、有機スピントロニクス等の研究が行われている。 ・フランスではフランス国立研究機構ANRにより、かなり広範囲にわたってスピントロニクス関連の支援が行われている。 ・ドイツではDFGの支援のもと、スピン流-熱流変換現象を扱う大型プロジェクトSpinCaT が2010年に立ち上がり、多くの研究グループが参画している。 ・トポロジカル現象を用いた新しいスピントロニクス研究も積極的に行われている。
	応用研究・開発	△	→	・IMECなどが応用研究を再開したがそれほど目立った進展はない。
中国	基礎研究	◎	↗	・量子異常ホール効果の実証など、質の高い研究が行われるようになっている。 ・潤沢な研究資金と豊富な人材を活用し、欧米を凌ぐ勢いで研究が行われ、高いポテンシャルを有する。
	応用研究・開発	△	↗	・応用研究に関する情報はそれほどないが、基礎研究の質が高くなっているなか、今後国家的事業として重厚な支援がなされる可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↗	・これまで理論中心だったが、界面DMIの研究などの実験においても良質な研究がみられるようになっている。 ・個別研究レベルでは秀逸な研究が存在する。
	応用研究・開発	○	↗	・SamsungがMRAMの量産体制を準備している。 ・財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う可能性がある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・新機能ナノエレクトロニクスデバイス（ナノテク・材料分野　2.3.1）
・トポロジカル材料（ナノテク・材料分野　2.5.5）

参考文献

1）齊藤英治, 村上修一『スピン流とトポロジカル絶縁体―量子物性とスピントロニクスの発展―』（共立出版, 2014）.

2）G. Binasch et al., "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange", *Physical Review B* 39, no. 7（1989）：4828. doi：10.1103/physrevb.39.4828

3）M. N. Baibich et al., "Giant Magnetoresistance of（001）Fe/（001）Cr Magnetic

Superlattices", *Physical Review Letters* 61, no. 21（1988）：2472. doi：10.1103/physrevlett.61.2472
4）T. Miyazaki and N. Tezuka, "Giant Magnetic Tunneling Effect in Fe/Al2O3/Fe Junction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 139, no. 3（1995）. doi：10.1016/0304-8853（95）90001-2
5）J. S. Moodera et al., "Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions", *Physical Review Letters* 74, no. 16（1995）：3273. doi：10.1103/physrevlett.74.3273
6）Satoru Nakatsuji, Naoki Kiyohara and Tomoya Higo, "Large Anomalous Hall Effect in a Non-collinear Antiferromagnet at Room Temperature", *Nature* 527, no. 7577（2015）：212-15. doi：10.1038/nature15723
7）科学技術振興機構 CREST研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」，
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-3.html（2021年2月17日アクセス）
8）科学技術振興機構 さきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」，
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah30-3.html（2021年2月17日アクセス）
9）科学技術振興機構 CREST研究領域「情報担体を活用した集積デバイス」，
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-3.html（2021年2月17日アクセス）
10）科学技術振興機構 さきがけ研究領域「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」，
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2020-4.html
（2021年2月17日アクセス）
11）科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」，
https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme08.html
（2021年2月17日アクセス）
12）日本学術会議　第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020），
http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t286-1.html（2021年2月17日アクセス）
13）文部科学省　学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想　ロードマップの策定　-ロードマップ2020-,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1388523_00001.htm
（2021年2月17日アクセス）

2.3.4 MEMS・センシングデバイス

（1）研究開発領域の定義

健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の実現にはInternet of Things（IoT）が重要であり、その主要な構成要素としてMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサを代表とするセンシングデバイスの技術開発を目的とする。MEMSセンサや化学センサなどセンシングデバイスの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化、低コスト化、MEMSプロセス技術の高度化、複数のセンサの融合、プリンテッドエレクトロニクス技術などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）、弾性波デバイス、慣性センサ、マイクロフォン、LiDAR、圧電デバイス、化学センサ、バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサ、電気化学デバイス、グラフェンFET、アプタマー、集積化、アレイ化、5G、セキュリティ、ストレス

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

Society 5.0やIoTに代表されるスマート社会を築くために、人工知能や通信（ネットワーク）と並んで主要な構成要素がセンサ（センシングデバイス）である。センサは人工知能や制御システムの入力となり、その応用はIT機器、オーディオ機器、ロボット、ドローン、VR・ARシステム、自動運転車、医療機器など、今後のイノベーションのキーとなるほとんどのシステムに広がっている。これらの応用のためのセンサとしては、画像・映像を取得するイメージセンサや、加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能なMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサがもっとも重要であるが、今後はこれらに加えて健康・医療などの応用分野で安定して使い易い化学センサ（バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサなど）の開発も期待され、各種の物理センサや化学センサと集積回路（IC）やプリンテッドエレクトロニクス（Printed Electronics）との組み合わせも重要になる。イメージセンサはすでに企業主体の開発フェーズにあるため、本領域ではMEMS技術、MEMSセンサおよび化学センサを中心に取り扱う。

MEMSセンサに代表される物理センサは、アカデミアから企業まで高性能化、小型化、低価格化などに対する研究開発がダイナミックに進展している。一方、有害物質のモニタリング、病気診断、健康管理などで用いられる化学センサの研究開発は大きく遅れている。多くの化学センサでは、センサ部位が外界と接触しなくてはならず、集積化エレクトロニクスで培われてきたパッシベーション技術（デバイスの堅牢性を担保する表面保護技術）を適用することが本質的に困難であり、安定性や再現性を確保するために使用のたびに表面清浄化やキャリブレーションなどが必要な状況にある。今後は個々のセンサの性能向上だけでなく、この問題点を克服する必要がある。また、各種の物理センサや化学センサをアレイ化・集積化することでさまざまなデータ・情報を併せて取得することを可能にし、新しい価値の創造や産業展開を期待したい。

スマート社会に関連する産業では、欧米中のサービスプラットフォーマが覇権を握り、高い利益率を確保しているが、それ以上に高い利益率を確保しているのがデバイス・モジュールメーカーである。実際、DRAMの利益率は変化が激しいものの平均的には高い水準にあり、また、弾性波フィルタとそれを含む無線フロントエンドモジュールの利益率も高い水準にある。日本の企業がサービスプラットフォーマに食い込むことは容易ではないが、デバイス・モジュールに強い企業が多く、また、この図式は自動運転やカーシェアリングが急速

に進む自動車産業にも広がる可能性があり、日本にとって本研究開発領域の重要性は極めて高い。

［研究開発の動向］

（a）MEMS技術・センサ

MEMS技術によるセンサとしては、スマートフォンを例にとると、マイクロフォン、加速度センサ、ジャイロスコープ、および圧力センサ（気圧センサ）などが使われている。また、クロック発振器の一部もMEMSである。これらのセンサの技術は継続的に革新され、その結果、低コスト化・小形化と高性能化が進んでいる。小形化について、例えば、加速度センサの大きさは、最近5年でチップ面積にして約1/10になっているが、これはウェハレベルパッケージングやTSV（Through Silicon Via）といった技術の高度化によるところが大きい。

高性能化については、自動運転やロボット制御などに用いられるジャイロセンサとLiDAR（Light Detection and Ranging）、音声認識のためのマイクロフォン、資源探索等のための重力センサ（高感度加速度センサ）などの研究開発が進んでいる。現在、自動運転に用いられているジャイロセンサは、100万円台以上と高価な光学式であり、MEMSジャイロセンサを高性能化することによってこれを置き換えることが期待されている。ほぼ同じことがLiDARにもいえる。音声認識率はマイクロフォンの性能によるところが大きいが、2018年から2年の間に新方式のMEMSマイクロフォンがInfineonによって実用化され、最新のTWS（True Wireless Stereo）イヤホンに使われている。高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO_2をフォトアコースティック法で検出するガスセンサも登場している。

まだ実用化されていないが、研究開発が行われているものとしては、イメージセンサと組み合わせて用いるMEMS方式の手ぶれ防止アクチュエータと可変レンズがある。現在、手ぶれ防止はボイスコイルモータでレンズを並進させることで実現されているが、CMOSイメージャをMEMSで並進だけでなく回転させれば、回転方向の手ぶれも補正可能になる。その他、ロボットの機械学習に用いる触覚センサ、環境認識や医療などに用いられるハイパースペクトラムイメージャ、ボタンレスタッチセンサなども研究開発されている。

（b）MEMS技術による弾性波フィルタ

MEMS技術の主要な用途はセンシングであるが、通信分野でもその重要性が高まっている。無線通信フロントエンドモジュールにおいて周波数選別を担うのがMEMS技術によるBAW（Bulk Acoustic Wave）フィルタやSAW（Surface Acoustic Wave）フィルタといった弾性波フィルタであり、第5世代通信規格（5G）の普及やポスト5Gに向けて、性能向上が求められている。5Gでは、3.5 GHz帯と4～5 GHz帯、およびミリ波帯の28 GHz帯が新たに使えるようになる。長距離の無線通信に適した周波数は数百MHzから6 GHzの領域であり、従来から用いられている900 MHz～2.5 GHz帯は非常に混雑しており、キャリアアグリゲーションに代表される高度な利用法が進み、弾性波フィルタへの技術的要求（挿入損失、温度安定性、カットオフ特性、線形性、パワーハンドリングなど）はますます高くなっている。また、5G用に新たに割り当てられた高い周波数領域（3.5 GHz帯、4～5 GHz帯）に対応するため、弾性波フィルタには今までにない技術が求められる。現状、この周波数帯では弾性波フィルタは用いられていないが、遠くない未来に効率的利用のため弾性波フィルタが必要になる。ポスト5Gでは、さらに高い周波数でも弾性波フィルタが用いられることが予想されており、そのための研究開発が始められている。

（c）化学センサ

化学センサにはガスセンサのように空気中で特定の分子をモニタリングするものや、血液中のバイオマーカ

の検出のように溶液中で特定の化学物質を検出するものなどがあるが、基本的な検出方法はほぼ共通している。それぞれの目的に沿って検出する分子・物質と特異的に相互作用する認識分子（核酸、ペプチド、タンパク質、低分子化合物など）を電気化学デバイス（トランジスタ）や光素子のトランスデューサ上に付着しておき、分子・物質と認識分子との相互作用による電気信号や光信号の変化を検出している。一般的に検出する分子・物質の量は少ないので、化学センサの高感度化は重要な課題となっている。また、先に述べた安定性や再現性の問題についても克服する必要がある。さらに、測定する空気中や溶液中には目的とする分子・物質以外にもさまざまな夾雑物が混じっているため、高選択性を得る手法や、低選択性の認識分子の場合にも異なる種類の測定から目的の分子・物質の濃度を導き出す手法を見つけることが重要である。

化学センサの研究開発では、ガスセンサや抗原抗体センサのように、既知の限られた特定の分子種を計測する従来タイプのものと、空気中や溶液中に存在する多種多様な分子群を網羅的にセンシングして、個々の分子に対する選択性は高くなくとも複数のセンサで得られたデータから望みの分子の量を求めるような新しいタイプのものに大別することができる。従来タイプのセンサ研究開発では、例えば、すでに実用化されているガス検知器のような消費電力、デバイスサイズ、安定性等の素子スペックの要請が厳しくない分野に応用展開が図られてきた。一方、IoTには低消費電力、制御性、分子選択性、堅牢・安定性等が要求されるため、これら従来タイプのセンサ研究開発で培われた技術をそのままIoTに適用することが困難である。このため、IoTに適した新たな化学センサの技術や、複数のセンサをアレイ化・集積化した新しいタイプの研究開発が強く求められるようになってきている。

これらの新たな要求に対して、カーボンナノチューブ（CNT）やグラフェン、ナノ構造金属酸化物などのナノ構造体を用いた化学センサ、センサアレイの研究開発が活発化している。ナノ構造体は高い表面対体積比と表面自由エネルギーを有していることや、量子効果の発現やバルクとは異なる特異なバンド構造のために高い移動度を有するなど、センサの高感度化と低消費電力化につながる可能性があり、期待が高い。

複数の分子・物質の同時検出、化学反応の可視化のために、集積回路技術と化学センサの融合によるアレイ化技術が注目されている。多くの生体反応は単一の化学物質を見ているだけでは判断できず、多項目の組み合わせの理解が重要と考えられ、機械学習の活用により、これが可能になりつつある。その代表的なものが匂いのセンシング技術分野であり、複数の匂い検出膜を用いて同時に検出し、機械学習により匂いの物質と量を推定することがなされている。このような複数の分子・物質の情報の可視化（デジタル化）は医療・健康分野だけでなく、環境など他の分野への展開が期待されている。

化学センサの応用としては、先に述べた健康・医療分野だけでなく、環境、安心、豊かな暮らしなどへの展開が期待されている。身体の状態だけでなく、ストレスや心の状態を知るために、血液中に分泌されるホルモンなどを検出するセンサ（ストレスセンサ）の研究開発も進められている。また、農業分野の応用をめざして、土壌のセンシング、植物体の活動センシングなどの研究も活発になってきている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

（a）MEMS技術・センサ

MEMSはこれまで広くセンサに用いられ、産業的にも成功を収めているが、アクチュエータに用いられて成功した例は限られており、インクジェットプリンタヘッドが唯一の産業的成功例である。しかし、最近、圧電材料をはじめとする技術の進歩によって、新しいMEMSアクチュエータが実用化されつつある。具体的には、LiDAR、ARヘッドセット内の画像投影、配向制御などに用いられる走査型マイクロミラーデバイス、カメラ

の手ぶれ防止アクチュエータ、可変ミラー、MEMSスピーカなどである。これらの技術の多くは、大学や公的研究機関の技術をシーズにしてベンチャー企業で開発されており、本研究開発領域でもシーズ技術がベンチャー企業によってスピード感を持って実用化される動きがますます顕著になっている。これらのうちでも、最近、特にLiDARの研究開発競争が熾烈であり、大手企業とベンチャー企業が入り乱れている。 LiDARを研究開発している企業は50社を下らないと思われ、各国で公的資金も投入されている。 LiDARには、従来からある機械走査型、走査型マイクロミラーデバイスを用いたMEMS型、およびソリッドステート型がある。機械走査型は高性能であるが、値段と大きさが問題であるため、MEMS型とソリッドステート型がさかんに研究開発されている。

SAWフィルタは無線通信に欠かせないデバイスであるが、10年以上前にはおおよそ技術的に成熟し、その後、非連続な進歩から遠ざかっていた。その間、競合するBAWフィルタは日本発の新圧電材料ScAlNの導入などもあり、欧米企業によって技術的にも事業としても大きく発展した。しかし、最近、厚さ1μm程度以下と薄い単結晶圧電材料をシリコンや水晶の基板で支持した構造が利用可能になり、新しいSAWデバイスや派生デバイスが登場し、実用化が進むとともに研究開発が活発化している。この技術では、日本が先行し、欧米が追っている。中国では、無線通信システムの基幹部品である無線フロントエンドモジュールを国産化するための投資が活発になっている。現在、SAWフィルタとBAWフィルタの研究開発に取り組む中国企業は、それぞれ10社を下らず、そのなかには既存企業もベンチャー企業も含まれる。

（b）分子センサ技術

さまざまな応用に向けて、新たな材料、検出原理、作製プロセスによる超高感度の化学センサの研究開発が活発になっている。例えば、グラフェンFETによる化学センサにおいて、単層グラフェンを活用することで、緩衝液およびヒト血清サンプルで、それぞれ600 zmol/Lおよび20 amol/Lまでの超高感度検出が可能との報告がある。また、a-IGZO FETを活用したさまざまなイオンセンサが実現しており、0.001 pHの分解能が得られた報告もある。

酵素/抗体フリーおよびラベルフリーのバイオセンシングのために、MIP（分子インプリンティング）技術が活発化している。 MIPはCMOS型/FET型のゲートに修飾することができ、生体-電気インターフェースに適している。ゲートにMIPコーティングされたFETセンサは、標識された材料を使用せずに、グルコース、ドーパミン、シアル酸、オリゴ糖などのさまざまな小さな生体分子を選択的に検出できる。

通常FETバイオセンサは中性の分子を捕獲しても信号を得ることはできない。一方、アプタマーのような核酸分子は、ターゲット分子を捕獲して二次構造が変化することが報告されており、例えば核酸を構成するリン酸基は負電荷を持っているため二次構造変化は電荷分布の変化をもたらし、検出可能となる。これまではターゲット分子が引き起こす化学反応を利用して、pHの変化などにより間接的に検出する方法が知られていたが、一本鎖のDNAアプタマーを固定化したFETバイオセンサにより、中性のストレスホルモンであるコルチゾールを高い感度で検出することが確認されている。

印刷技術で作製して体に装着できる化学センサにより、汗からの様々なイオンやバイオマーカをセンシングした報告が増えている。通常のイオンFETと同様に、バックゲート側に酵素、抗体、イオノフォア（ionophore）等を固定化することで実現しており、PEDOT：PSSを基板材料とした有機トランジスタやIGZO、グラフェンなどを用いたものがある。

化学センサをアレイ化することで、多項目のバイオ物質や化学物質の2次元分布を可視化する検討が進んでいる。イリノイ大学とTSMCのグループは複数種類の生理活性物質を同時に検出するための計測モジュー

ルを含んだCMOS型の100万画素のオープンイノベーション・プラットフォームを実現している。また、英国のインペリアルカレッジやグラスゴー大学のグループは、ドリフト補正回路やデジタル出力回路などが内蔵されている様々なタイプのCMOSベースのISFETセンサアレイを報告している。このような集積化・アレイ化されたセンサは、単独のセンサとは異なり要求される性能や仕様が集積化エレクトロニクスレベルになるため、研究開発のパラダイムシフトが求められる。例えば、分子識別センサにおいては、分子センサ部位のチャネル材料探索（堅牢な分子選択性）、電極材料（堅牢な電気的接合）等においてもエレクトロニクス素子としての消費電力、制御性、分子選択性・堅牢・安定性等の性能を満足する新しい材料・デバイス・回路設計技術の開発が求められている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

（a）MEMS技術・センサ

米国では、DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）が約30年にわたりMEMS技術を強力に支援している。 DARPAはMEMS技術を管轄するMicrosystems Technology Office（MTO）を設置し、継続的に研究開発プログラムを推進している。 DARPAが特に重要視しているのは、兵器の定位やナビゲーションに必須の慣性センシング技術とクロック技術を含むPNT（Positioning, Navigation and Timing）技術である。このカテゴリの下、高性能ジャイロスコープ、量子センサ、量子クロックなどのプログラムが行われている。また、超省消費電力（ゼロ待機電力）センサのプログラムも引き続き行われている。

欧州では、フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構（特にISIT、IPMS、ENASの各研究所）、フィンランドのVTT、スイスのCSMCなどの大型研究拠点がMEMS・マイクロシステムの研究を主導し、それらを中心に大学がネットワーキングされている。ドイツでは、The Research Fab Microelectronics Germany（FMD）というプログラムが推進され、7つのフラウンホーファー研究所と2つのライプニッツ研究所がこれに参加し、Federal Ministry of Education and Research（BMBF）によって2020年までに3.5億ユーロの資金が投じられる。2019年は7千万ユーロの研究開発プロジェクトが行われ、多くの装置が最新型に更新された。産業界に近い研究開発が行われていることが特徴である。

中国では、IT機器や無線通信機器のキーデバイスであるMEMSの国産化を進めるため、中央政府と地方政府が主導し大きな投資が行われている。これらの投資は網羅的であり、半導体デバイスやMEMSについて、欧米とデカップリングしても困らないように、サプライチェーンの全てを中国内で完結させる方針がみえる。MEMS技術に関連して、ここ10年で多くの新興企業が登場し、これらの企業と政府機関や政府系研究所が一体となって、蘇州、上海、重慶、厦門、淄博、南昌、煙台など、各地で競うように巨額投資が行われ、研究開発と産業の集積地が建設されている。例えば、苏州纳米城（蘇州ナノシティ）、上海インテリジェントセンサ工業団地、淄博高新区MEMS产业基地（淄博ハイテクゾーン）、常州スマートセンシングタウン、郑州智能传感谷（鄭州インテリジェントセンシングバレー）などである。中国最大のMEMSの研究機関は、中国科学院上海微系统与信息技术研究所（SIMIT）であり、傘下に複数の研究所や企業を有し、学位も授与する巨大な組織である。上海に8インチラインを有する研究拠点SITRI（Shanghai Industrial μTechnology Research Institute）もSIMIT傘下にある。また、この分野の主要な国際会議で、中国の大学からの研究論文が急増しており、その水準が高くなっていることから、これらの大学は巨額投資の恩恵を受け、人材供給元として機能していると思われる。

（b）分子センサ技術

多種類の分子群を連続的に計測することを可能にするIoTセンサデバイスの開発を押し進めるプロジェクトが世界的に進められている。米国では、UC BerkeleyのBERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERで、シリコンデバイスを基軸とした集積化分子識別センサを提案するなど、分子識別センサに関する研究が精力的に進められている。また、Intel社とコーネル大学の共同研究チームはIntelのニューロモルフィックチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成している。この研究は直接的なセンサデバイスの研究ではないが、入力データとして72個の化学センサのデータセットを用いており、多数のセンサを集積化することで分子群の識別が可能であることを示す重要な研究となっている。

欧州では、Horizon 2020のなか、大掛かりな研究開発が進められており、取得されるビッグデータとそこから得られる解釈を用いた新たなサイエンスと新しい産業のイニシアティブを取ることをめざしている。例えば、イタリアでは、金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製に取り組んでおり、Brescia大学では、酸化物ナノ材料を基軸として分子識別センサを初めて提唱し、さまざまな分子種を網羅的に検知するとともに、それらの実績に基づいたナノセンサに関するベンチャー（Nano Sensor Systems）を設立している。スイスのETH Zurichでは、ナノ粒子を用いたアレイ型センサ（3種の酸化物センサで湿度と CO_2 を測定）による呼気疾病診断（糖尿病等）のデバイス開発を行っており、Sensirion社 は金属酸化物アレイセンサ（4種）を商用化している。ドイツでも、JLM Innovation社とHaickグループと共同で呼気からがんを検知するSniffphone（20種のセンサアレイを利用）を開発している。

中国では、IoTセンサに関するセンターが2016年に立ち上がっており、産官学を巻き込んだ大きな研究開発の流れとなっている。北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っており、分子だけでなく呼気中のウィルス等の検出にも成功している。

韓国では、KAISTがCenter for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&Dを精力的に推し進めており、動物由来タンパク質触媒を利用したナノセンサ（16種）を用いて、呼気による疾病診断・個人認証が可能な小型デバイスを開発している。

インドでは、MEMS技術を用いて、SO_2、CO_2、H_2、CO等を検出する集積化金属酸化物ガスセンサの作製と実証が行われており、Nanosniff社では4種のMEMS センサアレイからなる温度特性解析技術を利用して10 ngレベルで爆発物の分子識別が可能な爆発物センサを開発している。

日本では、「MSSフォーラム」において物質・材料研究機構が開発したMSSセンサ（膜型表面応力センサ）を基盤にして、40社以上が有効なユースケースや計測方法の研究開発を連携して行っている。また、産業界では、第一精工（強誘電体膜＋感応膜の匂いセンサ）、太陽誘電（MEMS+感応膜の匂いセンサ）、パナソニック（多チャネル＋感応膜の集積化分子センサ）、アロマビット（センサ＋感応膜）、コニカミノルタ（複数の金属酸化物センサの組み合わせ）などのIoT分子識別センサデバイスが開発されている。このように産学連携や個別での研究開発が進められているが、新たな化学センサの研究開発を目的にした大型のプロジェクトは実施されていない。

（5）科学技術的課題

センサ・MEMS分野の中心的な技術的課題は、チップ面積や消費電力を大きくせずにS/N比を上げること、強力なアクチュエータを実現すること、現実的な方法で異なる要素を集積化することなどである。高い性能を出すためには、高度な微細加工・集積化技術が必要であり、中途半端な研究施設では競争力のある研究開発は行いにくくなっている。この分野では、着実な研究開発によって産業的価値のある基盤技術を維持・進歩

させつつ、研究施設を動かし、そのうえで新規アイデアを小投資で試みるような研究体制が適している。

半導体集積回路の研究開発では、LSIファウンドリが提供する様々なプロセスプラットフォームの上で設計がなされる。 MEMSについては設計とプロセスとが切り離せず、そのことを言い表した“One Device, One Process, One Package”という言葉がある程である。しかし、デバイスごとに製造プロセスを開発していたのでは実用化に時間とコストがかかり過ぎるため、複数のデバイスに対応する有力なプロセスプラットフォームがいくつか登場し、それらによる欧米発のデバイスがシェアを占めるようになった。メインストリームで勝負するには、プロセスプラットフォームの改良・革新が欠かせない。

バイオマーカの検出、呼気の分析、空気中汚染物質の濃度測定などを低コストで行うためには、ソリッドステート化学センサが必要である。実用的なソリッドステート化学センサとしては、ISFET（Ion Sensitive FET）、触媒燃焼型ガスセンサなどがある。必要な性能を発揮するにあたっては、前者は使用前のキャリブレーションを必要とするため連続使用には向かず、後者はセンサを高温にし、表面を清浄かつ活性に保たなくてはならないので、省消費電力化できない。このような化学センサは、明らかにIoT用途に向かない。一方、論文では、数え切れない程の「高感度」、あるいは「省消費電力」化学センサが報告されている。しかし、残念ながら、ほとんどのものがドリフト、戻りの応答、繰返し性能、あるいは信頼性に問題をかかえている。多くの場合、化学物質に対する結合力や吸着面積を上げれば高感度になるが、同時に前述の問題が発生する。 IoT用途に長期間安定して使えるソリッドステート化学センサの新しいアイデアが待たれる。最近、集積回路技術を活用してキャリブレーションをチップ内で行う報告があり、このような技術を含む、堅牢なセンシング技術の創製、センサデバイス構造設計、センサ材料設計、センサ回路設計技術の開発、統合的研究開発の発展を期待したい。

（6）その他の課題

日本では、大型プログラムによって順調に立ち上がったものの、その後の基盤的支援が行われずに縮小されるMEMSの研究拠点もある。特に、産業に直結した研究開発を行うべき研究拠点に対しては、従来の競争的資金による研究がそぐわないことから、基盤部分（全体の3割程度）を公的資金によって支えるといった議論も必要であろう。この方式では、政府投資総額を増やすことを必要とせず、民間資金によるレバレージによって研究の速度と成功確率を格段に上げられる。フラウンホーファー研究機構では、民間からの研究資金の額に応じて、基礎的部分の支援額が決まる仕組みがあるが、このようなインセンティブと競争性（従来の競争的資金とは異なる競争性）について、わが国の公的研究所や大学に対しても考えていくことが必要になってきている。

集積化IoTセンサデバイス開発では、センサ材料、集積化デバイス構造、センサ回路設計技術の研究開発を包括的にかつ同時並行で行う研究体制でないと、世界的に競争力のあるデバイス開発は難しい。例えば、BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERではまさに多様なメンバー構成（ナノ材料化学・有機化学・機械工学MEMS・回路設計研究・人工知能等）で新しいアイデアのサイエンスとデバイスを生み出そうとしている。米国・欧州のセンシングデバイスの研究開発例と比較し、日本はダイナミックな時代の変化に対応しうる研究グループの構造・体制になっていない。アカデミックの研究室単独で達成可能な技術には限界があり、センサ材料（材料化学）・デバイス構造（半導体工学）・センサ回路（電気工学）が一体となってシナジーを生む研究体制の構築が強く求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・MEMS関係の主要国際会議での論文数は多いが、多くの大学研究者の興味がメインストリームや産業技術から離れつつある。若手研究者の層は比較的厚いが、彼らがメインストリームや産業技術を習得できる機会は少ない。また、企業からの基礎的な研究報告が少なくなっている。 ・集積センサ技術開発で、NIMS（MEMS+感応膜）、豊橋技科大学（CMOS+感応膜）、東京大学（シリコンデバイス+金属ナノ構造、堅牢な分子識別界面+集積化センサ）、慶應義塾大学（堅牢なセンサ回路設計）などの活動が活発になっている。
	応用研究・開発	○	↘	・日本のデバイス・モジュールメーカーの実力は高く、弾性波フィルタ、自動車用慣性センサなどに強みがあるが、デバイス化・製品化に向けた研究開発が低調になっている。 ・従来の日本式の研究開発では、世界の速度に付いていけないため、M&Aで補っている。ベンチャー起業は低調である。 ・第一精工、パナソニック、NTT、コニカミノルタ、富士通、太陽誘電などで、集積センサ、匂いセンサなどの研究開発を進めている。
米国	基礎研究	◎	→	・研究者の層が厚く、研究開発のスペクトルは広く、新しい発想は米国から出てくることが多い。実力のある有名大学、Stanford大学、UC Berkeley/Davis/Irvine、ミシガン大学、Georgia Techなどは、メインストリームやベンチャー起業でも高い実力を見せている。 ・BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERなど、多くの大学で応用を意識した基礎研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	→	・InvenSense、SiTimeなどに続く成功しそうなベンチャー企業が次々と現れている。シリコンバレーでは、この分野への投資熱も高い。 ・BAWフィルタの大手企業は全て米国企業であり、BroadcomはRobert Boschを抜いて世界最大のMEMS企業となった。 ・バイオセンサを社会に実装するようなスタートアップ企業が活発。 C2 sense社の食品の匂いモニタリングセンサデバイス開発など。 ・Intel社とコーネル大学の共同研究チームが、Intelのニューロモルフィックチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成。
欧州	基礎研究	◎	→	・欧州では応用研究志向が強く、基礎研究と応用研究は一体的に進められている。特に実力のある研究拠点は、論文発表にプライオリティを置いておらず、論文からだけでは実力を測れない。 ・大型研究拠点が産業に直結した研究開発で強さを見せる一方、大学の存在感は薄くなっている。 ・化学センサの基本的な検討だけでなく、集積回路との一体化の検討に関しては米国以上に活発になっている。イタリアの金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製、スイスETH Zurichのナノ粒子を用いたアレイ型センサによる呼気疾病診断（糖尿病等）のデバイス開発など。
	応用研究・開発	◎	→	・Robert BoschのMEMSセンサでの地位はゆるぎない。同社は社内で活発な研究開発を行いつつ、シリコンバレーやフラウンホーファー研究機構とも共同研究を積極的に行っている。 ・STMicroelectronicsはビジネスで一時の勢いはないものの、MEMSについて全方位の研究開発を実施している。 ・フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構などは、世界的に強力な研究機関であり、ベンチャー起業も比較的さかんである。 ・集積化学センサ関係では、Sensirion社（スイス）が金属酸化物アレイセンサを商用化し、JLM Innovation社（ドイツ）がTechnion（イスラエル）と共同で呼気からがんを検知するSniffphone（20種のセンサアレイ利用）を開発している。

中国	基礎研究	○	↗	・主要国際会議で中国の占める論文シェアがもっとも高く、1/3程度に達することもあり、最近、研究の質、量ともに急伸している。 ・大学は拡大する産業界への人材供給元であるため、それに見合った量の研究開発プロジェクトが大学でも行われている。 ・集積化学センサでは、北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っている。分子だけでなく、呼気中のウイルス等の検出にも成功している。
	応用研究・開発	○	↗	・MEMSやセンサの国産化の政府方針のもと、巨額投資が行われている。 ・多くの新興企業が登場し、科創板（中国版NASDAQ）に上場する企業も現れている。 ・現時点では、中国企業は技術とシェアで欧米企業に及ばないが、マイクロフォンと赤外線センサでは存在感を高めている。 ・IoTセンサに関する研究開発センターが作られている。
韓国	基礎研究	△	↘	・かつてセンサ・MEMSの研究で上位に位置していたが、実用化の成功例に乏しいため、産業界や政府からの投資熱が冷めている。 ・その結果、分野に研究資金が行き渡らず、研究者層が薄くなっている。 ・KAIST：Center for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&Dを精力的に進めている。
	応用研究・開発	△	↘	・財閥系IT企業は、スマートフォン等に搭載するセンサ・MEMSをグループ内で調達するべく、研究開発を行ってきたが、技術的蓄積と高度人材が不足しており、成功例に乏しい。 ・KAISTチームによるスタートアップ企業が立ち上がっている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・IoTアーキテクチャー（システム・情報分野　2.5.5）
・ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野　2.3.5）

参考・引用文献

1）H. Beitollahi et al., “A review on the effect of introducing CNTs in the modification process of electrochemical sensors”, *Electroanalysis* 31, no. 7（2019）：1195-1203. doi：https://doi.org/10.1002/elan.201800370

2）S. K. Krishnan et al., “A review on graphene-based nanocomposites for electrochemical and fluorescent biosensors”, *RSC Advances* 9, no. 16（2019）：8778. doi：10.1039/C8RA09577A

3）Y.Hahn, R. Ahmad and N. Tripathy, "Chemical and biological sensors based on metal oxide nanostructures”, *Chem. Commun*. 48, no. 84（2012）：10369–10385. doi：10.1039/c2cc34706g

4）Michael Taeyoung Hwang et al., “Ultrasensitive detection of nucleic acids using deformed graphene channel field effect biosensors”, *Nature Communications* 11, no. 1（2020）：1543. doi：10.1038/s41467-020-15330-9
5）K. Takechi and S. Iwamatsu, “Sensor applications of InGaZnO thin-film transistors”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, no. 9（2019）：090504. doi：https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fc0
6）Kuniaki Nagamine et al., “Printed Organic Transistor-based Biosensors for Non-invasive Sweat Analysis”, *ANALYTICAL SCIENCES* 36, no. 3（2020）：291-302. doi：https://doi.org/10.2116/analsci.19R007
7）T. Sakata, S. Nishitani and T. Kajisa, “Molecularly imprinted polymer-based bioelectrical interfaces with intrinsic molecular charges”, *RSC Adv*. 10（2020）：16999–17013. doi：10.1039/d0ra02793f
8）黒岩 繁樹, 大橋 啓之, 逢坂 哲彌, 電界効果トランジスタを用いたバイオセンサの展開,「電気化学」,2020年 88巻 4号 p. 317-325.doi：https://doi.org/10.5796/denkikagaku.20-FE0030
9）K. Ishida et al., "Microsensor Device for Simultaneously Measuring Moisture & Nutrient Substance Dynamics in Plants", *2019 IEEE SENSORS*（2019）：1-4. doi：10.1109/SENSORS43011.2019.8956827
10）Carlos Duarte-Guevara et al., “Characterization of a 1024 × 1024 DG-BioFET platform”, *Sensors and Actuators B* 250（2017）：100–110. doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.107
11）N. Moser et al., "ISFET Arrays for Lab-on-Chip Technology：A Review", *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems（ICECS）*（2019）：57-60. doi：10.1109/ICECS46596.2019.8965034
12）N. Moser et al., "A Scalable ISFET Sensing and Memory Array With Sensor Auto-Calibration for On-Chip Real-Time DNA Detection", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* 12, no. 2（2018）：390-401. doi：10.1109/TBCAS.2017.2789161
13）N. Imam and T. A. Cleland, “Rapid online learning and robust recall in a neuromorphic olfactory circuit”, *Nature Machine Intelligence* 2（2020）：181-191. doi：10.1038/s42256-020-0159-4

2.3.5 ロボット基盤技術

（1）研究開発領域の定義

人間が苦手な作業の代行や人間の能力を強化するように、人に寄り添いスマートな（賢い）ロボットを実現するための革新的な要素技術・基盤技術を開発する領域である。小型・軽量・高出力のアクチュエータ、小型・軽量・低価格のセンサ、自律・協調動作を可能とする人工知能、柔軟な動作が可能なソフトロボティクス、不測の事態に対応できる新たな制御技術、基盤技術を統合したモジュール開発、などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

サービスロボット、手術支援ロボット、Surgery 4.0、遠隔操作、ソフトアクチュエータ、人工筋肉、センサ、ソフトロボット、ソフトロボティクス、協調制御、自律制御、人工知能（AI）、機械学習、自己修復、フレキシブルエレクトロニクス、エレクトロハイドロダイナミクス、誘電エラストマー、デジタルファブリケーション

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

世界的な高齢化、医師を含む医療従事者の不足などから、診断や治療を支援するロボットシステムや介護リハビリを支援する機器の需要は今後ますます増加することが予想されている。また、最近の新型コロナウイルス感染症の広がりから、感染症対策として遠隔操作ロボットなどの活用も求められるようになってきている。このように少子高齢化・労働力不足が進むなかで、ロボット技術は従来のものづくり分野だけでなく、サービス分野、医療・介護、農林水産業、社会インフラ保守管理、災害救助などへの活用が期待される。これまで産業用ロボットで世界をリードしてきた日本にとっても、新たな応用分野に向けたロボット技術開発は非常に重要である。これらサービス分野も含めたロボット産業全体の市場規模は2035年には10兆円となり、例えば、手術支援ロボットだけでも2021年には2.5兆円に達すると予想されている。今後のサービス分野などの新たな応用分野では人間とより密接に関わることから、人に危害を与えない安全性とともに、人とのコミュニケーションなどロボットには高度な機能が要求されるようになる。これまでも、さまざまな応用分野へのロボット技術の導入をめざして国家プロジェクトが推進されているが、これらの活動を要素技術・基盤技術の立場から後押しし、今後発展が期待される分野で要求される性能・機能を満足する材料・デバイス、部品、モジュールを世界に先駆けて研究開発することは、ロボット技術で引き続き日本がリードしていくためにも重要である。このような要求への対応には、ロボットの主要分野であるメカニクスと、AIなどの情報科学（IT）やナノテクノロジー・材料など異分野間の技術の融合・統合による新たな要素技術・基盤技術の開発が不可欠である。

この研究開発領域では、医療分野でのロボットや、人間との共同作業や人間の支援を行うときに重要になるサービスロボット、ソフトロボットを例に、それらの実現に向けたロボットの要素技術・基盤技術として、駆動技術（アクチュエータ）、制御技術、センシング技術（センサ）、材料技術などがあるが、ここでは主にアクチュエータ、自律制御技術、材料技術について記載する。なお、ロボットにおいてはセンシング技術も非常に重要であるが、多種多様なことからここでは取り扱わないので、センシング技術の詳細については研究開発領域「MEMS・センシングデバイス」を参照されたい。

［研究開発の動向］

2次産業で利用されてきたロボット技術を医療分野やサービス産業へ展開するためには、複雑な動作ができる多関節アームなどに加え、ソフトロボット技術や人工知能（AI）技術など、ハードウェアからソフトウェアにまたがる様々な新しい技術が必要とされる。特に、人工筋肉のような新たなアクチュエータの開発、柔軟な体の位置や変形の検出、外部との接触の検知技術、柔らかい体や腕を精度良く制御するための制御技術、自立制御技術などの研究が活発になっている。ソフトロボットに関する厳密な定義はないが、柔らかい素材を用いた柔軟なメカニズムに関する研究から始まり、最近では柔らかさの概念拡張と分野横断型研究によって様々なタイプのソフトロボットが世界中で開発されている。これまでロボティクスでは、メカトロニクスや制御工学を基礎とした研究者らによって推進されてきたが、ソフトロボット研究では、材料工学、化学、物理学、生物学などの研究者らも含めた非常に広範な研究分野の研究者が関与して、分野融合・統合的な研究として発展させている。最近ではソフトロボティクスに関する独自の国際会議の開催、学術雑誌の創刊もされており、極めて注目度の高い学術領域となっている。2013年には、Soft Robotics Journalが刊行されており（2019年のIF=6.16）、2018年からIEEE International Conference on Soft Robotics（RoboSoft）が開催され、IEEEでの地位を確立しつつある。この会議では、材料やセンサ、アクチュエータなどの基礎技術について多くの発表があり、それを用いたモデル化や学習、制御、生物規範ロボティクスなども報告されていた。また、ウェアラブルや脚ロボット、グリッパなどの応用例もあり、「柔らかい」という接頭語がついてはいるがロボティクス全般に研究がいきわたっている。 EuroEAPと呼ばれるヨーロッパで主に開催される電気駆動型高分子材料やセンサ、アクチュエータを扱う学会も2011年に発足し、その後活発に活動している。

医療用のロボットにおいても、ソフトロボット技術の利用が進んできている。例えば、米国Intuitive 社は事前にCT画像から3次元の気管支内の挿入経路を計画するシステムを用いて、2019年に肺の気管支内の生検を実現する直径3.5 mmの柔軟構造体を用いた手術支援ロボットIonを発表している。また、欧州ではオランダのアイントホーフェン大学発のベンチャー企業が形成外科における血管縫合などのマイクロ手術を支援するマスタスレーブ型のロボットを開発し、CEマークを取得して2020年に初の患者での治療を実施している。

機械系のソフトアクチュエータとしては、古くから空気圧アクチュエータや流体アクチュエータがあり、1980年代には東工大の鈴森らによるゴムを用いたマッキベン型人工筋が開発され、最近の世界的なソフトロボットブームによってマッキベン型人工筋や空気圧で駆動する人工筋肉の研究開発が活発になっている。また、柔らかい素材の特性を活かしたソフトアクチュエータとして、高分子アクチュエータ（Ionic Polymer–Metal Composites（IPMC）アクチュエータ、電場応答性ゲルアクチュエータなど）や誘電エラストマーアクチュエータ（Dielectric Elastomer Actuator：DEA）も古くから知られている。高分子アクチュエータは電場に応答してイオンが動いて高分子膜やゲル膜が屈曲運動を生成するため、低電圧（数V）で駆動するが、湿潤な条件が必須となっている。一方、DEAは伸縮可能な電極によって誘電ゴムが挟まれたキャパシタ構造で静電力によって駆動するものである。この動作には一般に1 kV以上の高電圧が必要であるが、電流値は極めて小さく完全にドライな環境で駆動し、誘電ゴムにあらかじめ歪みを加えることで極めて大きな変形を実現することができる。そのため、デバイス系の研究者やロボットへ応用しやすいメリットがあり、多くの研究者がDEAの研究を進めている。なお、ソフトアクチュエータとは異なるが、国内ロボットメーカーでは、関節を柔らかく制御することによって柔らかい運動を実現し、人間と共存できるようなコ・ロボットの開発が進められており、そのためのトルク制御などの制御技術などに進展がみられる。

ここ数年のロボット自律制御の大きなトレンドとしては、「Deep Learningのロボット自律制御への積極的な利用」と「ロボットと人の協調制御の発展」がある。これまでも強化学習などの機械学習手法がロボット自

律制御に積極的に取り入れられてきたが、2018年以降、IEEE Robotics and Automation Society（RAS）のInternational Conference on Robotics and Automation（ICRA）でDeep Learningを利用したロボット自律制御手法がさかんに提案されるようになった。 Deep Learningのロボット制御への応用の初期段階では、ドローンの姿勢制御やセンサ値の解析、細胞のマイクロマニピュレーション、脳内血管を回避しながらの脳内への管子挿入制御など、さまざまな角度からの利用が試みられた。このような数年間の多岐にわたるトライアルを経て、Deep Learningに代表される機械学習がロボット自律制御に適用できる場面が明確になりつつある。機械学習が自律制御に活きるのはロボットの運動制御そのものではなく、比較的安定で変化の少ない周囲の環境下で状況を判断して動く方向や条件を自律的に決定する、という使い方である。一方、模倣学習や姿勢・運動制御のようにリアルタイム性が求められる対象に対しては、Deep Learningや強化学習に限らず、機械学習を用いたアプローチはいまだ研究段階である。その最大の理由は、周囲環境の不確実性への対処が根底にあり、いわゆる「開かれた環境」への対処は機械学習でもいまだ乗り越えられていない大きな問題として残っている。

もう一方のトレンドである「人とロボットの協調制御」では、高齢者や障がい者の運動補助ロボットやリハビリテーションロボットの発展がみられる。 EUでCYBATHLONと名付けられた障がい者補助ロボットを用いたスポーツ大会が開かれるなど、その活動が世界的な中心となりつつあり、義手・義足、外骨格ロボットなどを利用して対象者・病院・研究機関・企業が一体となった取り組みが積極的に進められている。このように人とロボットが協調して動作する部分自律（Partial Autonomy）がよりさかんになってきている。また特筆すべき点として、ロボットの部分自律制御をより最適に行うために人の運動制御原理を理解するという研究が工学・ロボット制御の視点からさかんに進められている。 RASのTechnical Committee（TC）on Human Movement Understandingなどの活動もあり、人の運動制御の理解が深まることで、人の動きと親和的にロボットを制御する技術は一層進展することが期待される。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

ソフトロボティクスに関する新技術分野の1つとして、3Dプリンタ（付加製造法）、レーザカッター等を含むデジタルファブリケーションがあげられる。例えば、複数の材料を3次元造形可能なマルチマテリアル3Dプリンティング技術が2019年にNature誌に掲載され、硬さの異なる部品を3Dプリンタで設計して、アクチュエータとボディを一体化した構造を作製し、移動できるソフトロボットのデモンストレーションに成功している。これらの技術によって、センサ、アクチュエータ、配線を埋め込んだデバイスの設計が可能になる。プリントできる素材などの改良も進み、従来の付加製造法では問題であった材料の強度も徐々に改善され、構造部材なども付加製造によって作り出すことができるようになった。一方、付加製造特有の精度確保や機構設計法、あるいは材料的な考察は続いており、付加製造のためのマニュファクチャリング工学の確立がまたれる。特に、ソフトロボティクスとしては高分子材料などの柔らかい素材をどのように安定に活用できるかが重要である。

ソフトアクチュエータに関しても新たな技術が出てきている。 DEAについては、精密作製プロセスとエラストマーの薄膜化技術の統合によって低電圧化に成功し、自律駆動できるセンチメートルサイズの移動ロボットが報告されている。柔軟な機構の概念をさらに拡張するために、化学や物理学を背景とした仕組みが研究されている。例えば、Jamming転移（砂のような粉体が固体や流体のように振舞う性質）を利用し、どのような形状にもフィットできるJamming Gripperが研究されている。空気圧を用いた人工筋肉の研究がデジタルファブリケーション技術と融合してさかんに行われているが、空気圧を生成するポンプは大きくて

重いためシステムが肥大化し、騒音が大きいため用途が限定されている。これに対し、最近、電気流体力学（ElectroHydroDynamics：EHD）と呼ばれる物理化学的な現象を用いたソフトポンプが報告された。このソフトポンプは伸縮可能な電極とエラストマーで構成され、ポンプ内には誘電性液体が満たされている。電極近傍で生成するイオンが電界によって加速され、結果として誘電液体が運動する。このポンプとアクチュエータが一体化した構造を設計し、完全に電気駆動できる流体駆動型の人工筋肉をデモンストレーションし、ウェアラブルデバイスへの応用展開も示されている。このように物理化学的な変化を活用することで、これまでのメカトロニクスを基礎としたロボティクスになかった新しい展開が起こりつつある。

AI技術とソフトセンサ、アクチュエータに関する融合研究も報告されつつある。例えば、空気圧人工筋に導電性材料を組み込むことで、センサ機能を付与した人工筋をブリヂストンと東京大学の研究グループが開発している。人工筋を構成するゴムにヒステリシスや非線形性とリカレント型ニューラルネットワークの学習法の一種であるリザバーコンピューティング（Reservoir Computing）を組み合わせることで、極めて精度良くリアルタイムに変位を推定することに成功している。外部に変位センサを取り付けることなくデバイスを設計できることが期待される。

IEEE Soft Robotics学会では、無限次元を持つ柔らかいロボットをどのようにモデル化し、制御するか、について多くの発表がある。特に、近年は進展が著しい学習法をソフトロボットのモデル化や制御に使おうという動きが活発化している。また、ロボット自律制御の観点では、ソフトロボティクスの制御原理確立の議論が注目される。従来の一般的なロボット制御ではモデルベース制御がその基本であったが、モデル化が難しいソフトロボットの制御では新しい制御概念の構築が必要である。これまでは、Deep Learningなどの機械学習を用いてそれぞれのデバイス・環境に合わせた手法で制御器を開発することが多かった。しかし、統一された制御概念確立の必要性がRASのTechnical Activity Board Meetingでも指摘されるなど、ソフトロボットの普及には必須であり、さまざまな方面からその確立に向けた議論が進められている。

手術支援ロボットについては、徐々にではあるが実用化されつつある。国内では2019年5月に、通常の鉗子を挿入して現状の低侵襲な外科手術を遠隔に実施できるマスタスレーブ型ロボット「The Senhance Surgical System」（TransEnterix）が国内で薬事承認を得て、埼玉医科大学に導入されている。また、2019年6月に人工股関節全置換術を支援し、海外ではすでに多くが導入されているロボットMAKOが日本で保険適用となり、今後の国内での普及が注目される。海外の事例としては、2019年10月に英国CMR surgical 社のコンパクトな手術支援ロボットVerisusのインドの病院への導入、2019年6月にオランダPreceyes社が眼科手術支援用のマスタスレーブ型ロボットのCEマーク取得、機能性脳疾患の手術（定位脳手術）を補助する医療ロボットKYMERO（2016年にKoh Young Technologyと延世セブランス病院が共同開発）が2年間の臨床試験終えて2020年8月から臨床の現場に導入、2020年3月に韓国国内で承認を受けた人工関節手術ロボットCUVIS-jointを韓国CUREXO社がインド最大のインプラント企業Meril Healthcare社に最小で53台を輸出する契約締結、などがある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国では、2018年にNSFがContinuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering（C3 SoRo）という領域を設定し、総額2千万ドルで10個の学際融合チームに実質2019年から4年間付与される。2020年のIEEE RoboSoftの実行委員長がC3 SoRoの研究代表者であり、開催地が米国であるということも関係しているが、この会議では口頭発表60件のうち半数以上の31件が米国からの発表であり、このプロジェクトが米国におけるソフトロボティクスの推進に大きく貢献している。

EUでは、Horizon 2020により多くのロボット研究が支援されている。ソフトロボット関係では、SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation（2015年～）、Self-Healing Soft Robotics（Future and Emerging Technologies（FET）プログラム、2019年～）などがある。手術ロボット関係では、EDEN2020（低侵襲脳神経手術ための統合技術プラットフォーム、2016～2020年）、SMARTsurg（手術支援ロボットプラットフォーム、2017年～）、SARAS（AIによるロボット手術支援、2018～2020年）などがある。義肢・外骨格ロボット関係では、SoftPro（義手・リハビリテーションのためのシナジーベースのオープンソース基盤・技術、2016～2020年）、CYBERLEGs++（ロボット義足・外骨格、2017～2020年）、MyLeg（埋め込み型の筋電ロボット義足、2018～2021年）、Xosoft（ソフトな生体模倣外骨格、2018年～）などがある。また、さまざまな外骨格ロボットや義肢を共通の環境で評価するための試験場を作り、そこで実験を行うことで世界標準規格の作成をめざしているEuro Bench プロジェクトのように、新規技術のベンチマークや標準作成そのものがプロジェクトになっているものもある。さらに、脳活動のロボットへの応用として、EUのHuman Brain Projectが脳科学の成果をロボットへ積極的に転用する動きが進んでいる。

中国では2011年の12回目の5年計画においてロボットを重点分野と位置付けて以来、活発に研究開発が行われており、「ロボット産業発展計画（2016～2020年）」の象徴的な10製品のなかに、手術支援ロボットが明記されている。これらにより、Beijing Medical Robotics Industry Innovation Center（IMC）などの政府主導によるR&Dセンターが設置されている。

韓国は今後5年間で総額1.2兆ウォンの予算を投入する大型医療機器開発プロジェクト「凡部處全周期医療機器研究開発事業」が行われる。手術ロボットだけではないが、手術支援用ロボットには人工知能融合という条件付きのものが多い。

日本では、ロボット技術の研究開発と社会展開に向けた各府省のさまざまなプロジェクトが立ち上がっている。要素技術開発を目的としたものとしては経産省の「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」（2015～2022年度）がある。ソフトロボット関係では、異分野の若手研究者がソフトロボット学を構築する試みとして、科研費新学術領域「ソフトロボット学の創成：機電・物質・生体情報の有機的融合（代表：鈴森康一）」（2018～2022年度）が推進されている。身体拡張に関するものでは、JSTのERATO「稲見自在化身体プロジェクト」（2017～2022年度）があり、ウェアラブルロボットを利用した身体拡張の研究が進められている。手術ロボット関係では、AMEDの「高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業」（2020年～）が開始され、遠隔での手術支援ロボットの実証研究とガイドラインの策定などを行っていく。また、内閣府のムーンショット型研究開発制度により、「ムーンショット目標3：2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」が設定され、自律制御技術などの革新的な技術開発により人と共生するロボットの実現をめざして2020年度から開始される。

（5）科学技術的課題

ソフトロボット研究において検討すべき課題の1つとして、束縛されていないソフトロボット（Untethered soft robots）の構築があげられる。これは、ソフトアクチュエータを駆動させる技術の多くが空気圧などの流体アクチュエータとポンプを基礎としているためであり、Nature Electronics誌においてレビュー論文が書かれ、その重要性が議論されている。完全に電気駆動型のDEAやEHD等のソフトアクチュエータ技術をさらに発展させつつ、積極的に物理化学現象を活用し新技術を探索することも重要である。

自己修復可能な材料などを含むソフトロボット研究に適した材料開発も必要である。ロボットに適用することを考えると、材料の機械的特性に着目されがちであるが、自己修復能力を含めた化学的特性、センサとして

用いるための電気的特性など複数の面から材料の特性を評価し、目的に合った材料を新たに開発することがソフトロボティクスの技術シーズとして求められる。また、新たな材料を用いた構造設計も重要であり、特にここ数年進歩の速い3次元プリンティングなどの付加製造法を用いることなども考えておく必要がある。柔らかさの設計法として、自然界でうまくいっている形態を模倣する生物模倣型設計も重要であり、目的とする機能を実現するために生物がどのような形態を利用しているか、それをどのように模倣するかなど考える必要がある。

環境に煩雑さの残る開かれた環境での自律制御は依然として重要な未解決な問題として残っている。 Deep Learningといった機械学習によるBig Dataをもとにした最適化では、時々刻々と変化するような環境の煩雑さには対応できないことも明確になってきた。この糸口としては人の運動制御原理の理解が役に立つ可能性があり、今後ロボティクスの視点から運動制御原理の解明が進むことが期待される。また、部分自律における課題としては「主体感」の問題がある。人とロボットが協調する際、人が「ロボットに動かされている」、「ロボットに合わせている」という感覚が強くなってしまうとロボットと協調することが人にとって大きなストレスになりかねない。このため、人とロボットの協調では、自分で動いているという主体感を強く持てるようなシステムにしていく必要があり、工学的な技術だけでなく医学的・心理学的なアプローチと融合しながら技術を確立していく必要がある。

（6）その他の課題

日本国内では先駆的にソフトロボットが研究されていたが、現在は欧米や中国が研究の中心となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米ではDARPAやNSF、ヨーロッパではEUなどから継続的な大型研究費の支援がなされていることが背景となっている。わが国においても、ソフトロボティクスのような萌芽的分野への先行的な投資を促す施策や、若手研究者らの独立した研究環境を提供することなど、継続的な研究支援が望まれる。

今後、ロボティクスは遠隔診療や再生医療などの医学分野、テレワークなどを利用した分散社会の実現やインフラの整備点検といった新しい街づくり、自動運転や自動仕分けなどを用いた流通分野、など多岐にわたる分野での活躍が期待される。そのため、研究の段階から分野をまたいだ議論を行い、ロボット自律制御に求められる機能など、新たな基盤技術として求められるものをあぶりだす必要がある。また、その中で各技術分野のバックグラウンドを持ちつつ、異分野の知識を吸収しその可能性と限界を見据え、それらの活用を考えられるような若手の育成が必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・ソフトロボット開発や人の運動制御原理の理解にもとづく部分自律などの概念が作られている。 ・ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大している。 ・2020 IEEE Soft Roboticsでは口頭発表の10/60を占めた。 ・新学術領域ソフトロボット学が立ち上がっている。 ・遠隔操作への期待が高まっており、AMED 高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業が開始された。

	応用研究・開発	○	→	・S-muscle社、SoLARIS社、株式会社イノフィス等の大学発ベンチャーが登場している。 ・各ロボットメーカーより、さまざまな協働ロボット（コ・ロボット）が発表されている（2019国際ロボット展）。 ・医療応用やHuman Augmentationの分野での応用利用が期待される。 ・海外ではさまざまな手術支援ロボットが実用化あるいは実用段階に入っているなかで、わが国の動きはやや弱い。
米国	基礎研究	◎	↗	・ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大し、質の高い論文も多い。 ・NSF C3 SoRo Projectが推進され、IEEE Soft Roboticsでは口頭発表の半数（31/60）が米国からである。 ・Harvard大学では多数の異分野融合プロジェクトが立ち上がっている。 ・Lewisらのファブリケーションに関する研究が目立つ。 ・マイクロ・ナノロボット、ソフトロボットの開発が活発。医療ロボットやAIなどもこれまで通り多数の研究発表がある。
	応用研究・開発	◎	↗	・Harvard大学の研究グループのメンバーらがSoft Robotics Inc.を設立し、物流分野に参入。 ・Soft Robotics Inc.はソフトグリッパとAIによって様々な形状の物体をピッキングすることをコア技術とし日本へも展開している。 ・自律制御に関しては、基礎的なものよりも応用とリンクした研究がさかんである。 ・アカデミックな分野にはあまり出てこないが、軍事応用はかなり進んでいるようである。 ・米国Intuitive surgical 社が、肺の気管支内の生検を実現する柔軟で細径なロボットIonを開発した。
欧州	基礎研究	○	→	・Horizon 2020における様々なプロジェクトにみられるように、ロボットに関する基礎研究が継続して行われている。 ・英国、イタリア、ドイツ、スイスの順で学術論文が多く出版されており、質の高い研究を展開しつつある。 ・SHEROプロジェクトなどが推進されている。 ・英ブリストル大学ソフトロボティクスセンターで研究が進んでいる。 ・基礎的な研究成果の応用への展開が早い。
	応用研究・開発	○	→	・応用技術を世界標準にしていく動きが強く、応用プロジェクトと標準化プロジェクトが同時に走っている。 ・英国CMRのロボットVerisusの開発が進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	・ソフトロボットに関する基礎研究の学術論文が約70%占め、学術論文は指数的に増大している。 ・目立った動きはないが、Soft Robotics Journalに中国発の論文が増加している。 ・動物実験に対する倫理規定の低さから、脳神経系の活動に関する基礎的な実験も多い。 ・医療ロボット関連の論文数の増加が示すように、5Gを用いた遠隔操作やAIを活用したものなど活発に研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・コ・ロボットに関しては、DLRなどで研究が進んでいる。 ・5Gなどの通信や画像処理といったソフトウェア分野での応用は積極的であるが、自律制御に関しては応用分野では目を見張る成果はあまりない。 ・手術支援ロボット関連のベンチャーだけでも多数存在している。整形外科や低侵襲外科領域でのロボットの開発がさかんである。

韓国	基礎研究	○	↗	・ソフトロボット開発などの基礎研究は進んでいる。またICRA開催に立候補するなど、基礎研究拡大に積極的である。 ・ソウル大学ではKyu-Jin ChoらがHuman-Centered SoFT（Soft robotic Future Technology）Centerを設立している。 ・DGIST-ETH Microrobotics Research Centerにおいて、マイクロロボットの研究が行われ着実に成果をあげている。
	応用研究・開発	○	→	・ソウル国立大学ロボティクスセンターでは、ウェアラブルロボットに関する研究が進んでいる。 ・人工関節手術ロボットCUVIS-jointが韓国内で実用化され、インドでの販売展開など着実に成果をあげている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ソフトロボティクス（システム・情報分野　2.2.1）
・生物規範型ロボティクス（システム・情報分野　2.2.2）
・生活支援ロボット（システム・情報分野　2.2.7）
・MEMS・センシングデバイス（ナノテク・材料分野　2.3.4）

参考・引用文献

1) K. Suzumori, S. Iikura and H. Tanaka, “Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms”, *Proceedings, 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*（1991）：1622–27. doi：10.1109/ROBOT.1991.131850
2) Y. Osada, H. Okuzaki and H. Hori, “A polymer gel with electrically driven motility”, *Nature* 355, no. 6357（1992）：242-244. doi：10.1038/355242a0
3) R. Pelrine et al., “High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%”, *Science* 287, no. 5454（2000）：836–839. doi：10.1126/science.287.5454.836
4) M. A. Skylar-Scott et al., “Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing”, *Nature* 575, no. 7782（2019）：330-335. doi：10.1038/s41586-019-1736-8
5) X. Ji et al., “An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators”, *Sciences Robotics* 4, no. 37（2019）：eaaz6451. doi：10.1126/scirobotics.aaz6451
6) E. Brown et al., “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 44（2010）：18809-18814. doi：

10.1073/pnas.1003250107
7) V. Cacucciolo et al., “Stretchable pumps for soft machines”, *Nature* 572, no. 7770（2019）：516-519. doi：10.1038/s41586-019-1479-6
8) R. Sakurai et al., “Emulating a sensor using soft material dynamics：A reservoir computing approach to pneumatic artificial muscle”, *Proceedings of 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics（RoboSoft）*,（2020）：710-717. doi：10.1109/RoboSoft48309.2020.9115974
9) S. I. Rich, R. J. Wood and C. Majidi, “Untethered soft robotics”, *Nature Electronics* 1, no. 2（2018）：102-112. doi：10.1038/s41928-018-0024-1
10) N. Mohajerin, M. Mozifian and S. Waslander, “Deep Learning a Quadrotor Dynamic Model for Multi-Step Prediction”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*（2018）, http://ncfrn.mcgill.ca/members/pubs/2017_ICRA_Grey_Box_model.pdf（2020年12月8日アクセス）
11) A. Segato et al., ”GA3C Reinforcement Learning for Surgical Steerable Catheter Path Planning”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*（2020）. doi：10.1109/ICRA40945.2020.9196954
12) N. Sünderhauf et al., “The limits and potentials of deep learning for robotics”, *International Journal of Robotics Research* 37, no. 4-5（2018）：405–420. doi：https://doi.org/10.1177/0278364918770733
13) J.M. Tom et al., “First-in-human robotic supermicrosurgery using a dedicated microsurgical robot for treating breast cancer-related lymphedema：a randomized pilot trial”, *Nature communications* 11, no. 1（2020）：757. doi：10.1038/s41467-019-14188-w
14) 下田他「人に主体感を持たせるロボットによる運動補助」『日本AEM学会誌』27巻4号（2019）：412-418. doi：https://doi.org/10.14243/jsaem.27.412

2.3.6 量子情報・通信

（1）研究開発領域の定義

量子力学が記述する電子や光子などが持つ性質（量子性）を積極的に活用して、古典系では実現できない情報処理機能・性能を実現するための研究開発領域である。超伝導量子ビットを筆頭にイオンなどさまざまな物理系で研究開発が進められている量子コンピュータ、冷却原子系やイオン系での開発が進む量子シミュレータ、実装に向けた開発が急速に進んでいる量子暗号、将来に向けた基礎研究の段階にある量子中継・量子ネットワークなどが含まれる。

（2）キーワード

量子情報科学・技術、量子コンピュータ、Noisy Intermediate-Scale Quantum（NISQ）computing、量子誤り訂正、量子シミュレータ、量子アルゴリズム、量子アニーリング、量子通信、量子暗号鍵配送、量子中継、量子ネットワーク、超伝導量子ビット、冷却原子、イオントラップ、半導体量子ビット、光量子ビット、スピン量子ビット、トポロジカル量子計算、量子乱数生成、量子メモリ

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

量子力学は、20世紀において半導体、NMR、レーザなどの基礎となり、私たちの生活を陰ながら支えてきた。21世紀に入り個々の量子系を精密に制御する技術が発展・成熟してきたため、その量子性を積極的に利用することによって初めて可能となる応用をめざした研究が進められている。その代表例は、従来の古典的な論理演算に基づいた情報処理の原理を量子力学へと拡張する、量子情報処理である。ムーア則に基づく情報処理能力向上への減速感から新たな概念の情報処理技術への社会的なニーズも高く、量子情報処理は学術的な価値だけでなく社会課題の解決に直接貢献できる技術としての役割が期待される。2019年に、従来型コンピュータのパフォーマンスを量子コンピュータが超える「量子優位性」を証明した、と主張する実証実験の報告がなされ、量子情報処理の実用性にエビデンスを与える流れがみえてきた。計算原理として量子力学を利用する量子コンピュータや、実際の物質系と同じ模型を人工的に作り出す量子シミュレータは、従来の古典コンピュータで解くには効率が悪い問題を高速で解くことができると期待されている。

また、量子性は計算速度だけではなく、通信におけるプライバシーについても従来の古典情報処理では実現できない安全性を担保することができる。近年、軍事・外交機密を筆頭に、ゲノムデータや製薬情報など、長期間秘匿性を担保する必要のある情報が電子的に伝送、保管、処理されるようになっているが、実用的な量子コンピュータが実現されると、現代の暗号方式で守られていたデータが全て解読される事態が懸念される。この懸念を解決するには、将来的な通信の秘匿性・安全性確保に有用な量子暗号技術や、グローバルなセキュアサイバー空間を実現するための、衛星光通信技術やネットワーク構築技術を含む量子中継・量子ネットワーク技術が必要となる。また量子暗号技術は、フィジカル空間とサイバー空間が融合したSociety 5.0の可用性と安全性を高めるために重要である。一方で、量子中継技術は異なる情報担体（例えば光子と超伝導量子ビット）の間のインターフェースともなりうるので、分散型量子コンピューティングの実現にも重要である。

真に有用な量子コンピュータの実現には、新たな材料系や集積デバイス、実装、システム技術などの基盤技術の総合的な高度化が必須であり、量子コンピュータは広く科学技術領域の研究開発にかかわるフラッグシップハードウェアとしての役割を果たしうる。また、量子情報科学は、これまで考えられてきた問題に新た

な基礎的視点を与える。量子情報を経由することによって、例えば、従来の情報科学の定理が簡単に証明される、新たな古典アルゴリズムの発見に貢献するなど、従来の情報科学へのフィードバックが期待される。また、新奇な物性をもつ物質の発見や、ブラックホールなどの基礎物理への多大な貢献につながりつつある。量子情報科学は、未来のテクノロジーや基礎学理に大きく影響を与える研究開発領域であり、私たちの日常生活を根底から変えうる可能性を秘めている。

［研究開発の動向］

• 量子コンピュータ・量子シミュレータ

2020年代を迎えても量子コンピュータの研究開発は加速的な拡大傾向が続いている。その流れは世界中に及び、各国がそれぞれの国家戦略を構築しそれに基づいた新たな国家プロジェクトが進んでいる。特に米国、EU、中国は巨額の投資の下で活動しており、今後にわたりその動きが注目される。日本でも内閣府により量子技術イノベーション戦略が2020年に策定され、理化学研究所を中心とした国内産学連携体制が整いつつある。産業界としては米国GoogleやIBM、インテル、マイクロソフトなどの大企業に加えて、米国、カナダ、欧州ではベンチャー企業も参入し存在感を高めている。日本の産業界でもNEC、富士通などハイパフォーマンスコンピューティングに強い企業の参入が始まった。

研究開発において現在先行している超伝導量子コンピュータでは、Google、IBMなどのトッププレーヤーは50～70量子ビットのレベルでの高精度な量子ビット制御に取り組んでいる。Googleは2019年に53量子ビットの量子コンピュータで量子優位性を実証したと発表し、世界中で大きな話題となった。量子優位性を実証するために設計されたタスクに対してではあるが、用いられた量子コンピュータがハードウェア技術として古典コンピュータを凌駕するレベルにいたったことが実証された。超伝導量子コンピュータではマイクロ波を用いた量子ビット制御が行われるが、これに必要な高密度（多ビット）の高周波生成・制御システムの開発、パッケージ技術、それを格納できる冷凍機の大型化に成功したことを意味しており、ハードウェア技術として100量子ビット以上のスケーラブルな量子ビットの精密制御が可能なレベルに到達しつつあるといえる。また、今後数年間で1000量子ビットが達成されると期待されている。一方で、量子ビットの数が増えるだけでは性能を発揮することができないので、量子ビット操作に伴う演算精度にも注目していく必要がある。量子ビットの方式からハードウェア構成にいたるまで、精度とスケーラビリティをどのように両立し、実現するかが今後の競争軸となるだろう。

超伝導量子ビット以外の方式ではイオントラップ方式で集積化が進んでいる。研究開発で先行し、クラウド経由でプロセッサの提供を行っているIonQに加えて、Honeywellも2020年に開発を始めたことが発表された。光を量子ビットに用いる方式でも、スケーラビリティを確保しうる手法や、シリコンフォトニクス等を活用する小型集積化への試みがなされている。シリコン量子ビット方式では、2ビットレベルの高精度（99％超）の量子状態制御に成功した。

現状の量子コンピュータは、1つひとつの量子ビットに生じる誤りはわずかであっても、計算を長く続けるとそれが積み重なって間違った計算結果を生んでしまう。したがって、大規模な量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正を実装した、ノイズ耐性のある量子コンピュータの実現が必須である。誤り訂正に必要となる量子ビットの数は100万とも1億ともいわれており、そのような大規模集積化の実現には20年以上が必要とされている。量子誤り訂正付きの量子コンピュータ実現はさらに先とみられてきたが、「量子優位性」というマイルストーン的な成果が出た流れのなかで、量子誤り訂正の実現へ向けた基礎研究が本格化するものと推測される。その一方で、演算精度がさほど高くなく、量子ビット数も数十から数百程度といった近未来に実現

可能な量子コンピュータでもスーパーコンピュータを上回る潜在能力を持っているため、それを有効活用しようという動きが出てきている。この新たな方向性はNoisy Intermediate-Scale Quantum（NISQ）技術と呼ばれ、世界的に活発な探索が行われている。特に、量子コンピュータを用いた変分量子アルゴリズムの量子化学計算や機械学習への応用がさかんに研究されている。それに加え、エラーによる影響を統計処理によって補償するノイズ補償技術の開発も進められている。

ここまで説明したのはゲート型量子コンピュータ（万能量子コンピュータ）と呼ばれる。その高速性の保証されたゲート型量子コンピュータ以外にも、超伝導量子ビットを用いてイジング問題の最適化に特化した専用量子マシン、いわゆる量子アニーラの研究開発がカナダのベンチャー企業 D-WaveやNECを中心に着実に進められている。超伝導量子アニール方式をとるカナダのD-Wave社は5000量子ビット超の商用ハードウェアシステムを発表するなど集積化を進めており、関係のユーザー企業やミドルウェア企業とのエコシステム構築が進んでいる。冷却原子による量子シミュレーション技術においても、シミュレーションの自由度を向上させるリュードベリ軌道電子の高速生成と制御に成功するなど実用性拡大へ向けた活動が進んでいる。

• 量子通信（量子暗号、量子中継・量子ネットワーク）

量子暗号鍵配送（QKD）は1984年のBB84プロトコルの提案に始まり、一般的な攻撃に対する安全性証明やQKDをサブプロトコルとして用いることを保証する組み立て可能性（Composability）の証明が進み、2010年ごろまでには理論的基礎が確立した。その後、装置の不完全性があっても成立する安全性理論の開拓が始まり、2010年ごろからは実験家と共同で、実装されたデバイスの特性にまで踏み込んだ解析と対策が進められている。この実装安全性の研究は、欧州電気通信標準化機構（ETSI）や国際標準化機構（ISO）におけるQKD装置の安全性保証の標準化の動きに強い影響を与えている。同時に実装の不備を突く古典的デバイスによる攻撃法（サイドチャネル攻撃）の研究も一時脚光を浴びた。現在は攻撃方法とその対策を整理することで安全性保証の標準に組み込まれようとしている。

QKDの弱点とされていた伝送距離と速度の問題を解決すべく研究開発が進められ、2015年ごろまでにはデコイBB84プロトコルを実装したクロック周波数1GHz台の実用的な装置が、東芝とNECによって完成された。近年、さらなるクロック周波数向上に向けた研究開発がスイス、中国、日本などで始まっている。

連続量（CV）QKDは従来型のコヒーレント光通信の部品のみで構成できるため、既存技術との親和性が高く、低価格のQKD装置となりうる。2019年にホモダイン検出の周波数弁別特性を活かして光通信とのファイバコア共有が実証され、近距離での実用化が期待される。その一方で、実装安全性を含めた無条件安全性の証明が未だになされておらず、デコイBB84の水準には達していない。

一方、QKDは一度に鍵を伝送できる距離、速度に限界がある。このため現状では、安全性の保証された局舎（trusted node）を介したネットワーク化が行われている。最初期の例としては、米国の高等研究計画局（DARPA）がWashigton DCで行った実験がある。ネットワークの制御まで行った例としては、ウィーン市内で欧州の研究機関が構築したSECOQCがある。日本でも2005年ごろから量子暗号ネットワークの検討が始まり、2010年世界最高速のネットワークとしてTokyoQKDが稼働した。2017年に中国が北京-上海間2000 kmの幹線と合肥などでの都市ネットワークを完成させ大型化で先行している。米国でも民間企業がQKDネットワークを提供している。欧州でもEUと各国（英国、ドイツ、イタリア、スペインなど）が量子ネットワークの建設を進めている。最近ではQKD装置を局舎でつなぐだけでなく、鍵生成の制御、生成した鍵の管理、供給といった安全な鍵をアプリケーションに提供するプラットフォームとしての研究開発が進められ、一部は国際電気通信連合・電子通信標準化部門（ITU-T）で標準化作業が行われている。

量子中継は量子もつれスワッピングを用いて隣接しているノード間の量子もつれを離れたノード間の量子もつれに変換していくものである。そのためノードにおける2つの量子ビットの量子もつれ状態（Bell状態）測定の実現が注目された。また、伝送路の光子損失のため光子対の片方が届かないことによるスケーラビリティの消失の問題が指摘され、研究の1つの焦点は量子メモリに移った。量子メモリの主な構成要素としては、原子集団（atomic ensembles）、共振器量子電磁力学（cavity QED）、結晶中の色中心（color defect centers）などが提案されている。メモリ（コヒーレント）時間、フィデリティ（忠実度）など全ての性能指標を満たすものはまだ実現されておらず、しばらくは複数の候補が並行して研究されるものと考えられる。量子メモリの研究開発とともに、量子メモリのコヒーレンス保持時間の要求を低減させるためのアーキテクチャの研究も進められている。今後は誤り訂正技術の研究開発も必要となる。量子メモリを用いない方法として、光だけによる量子中継も提案されているが、光子のクラスター状態を用いた量子誤り訂正を基本としているため、実現には解決すべき問題が多く残されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• 量子優位性を実証できるレベルの量子コンピュータシステム技術

Googleが超伝導量子ビット方式で開発した53量子ビットマシンで量子優位性を実証した、と2019年に発表した。ランダムに選ばれた量子ビットに対しての1量子ビット演算と隣接する量子ビットに対する2量子ビット演算を繰り返すというランダム量子回路からの出力をサンプリングするというタスクにおいて、量子コンピュータが200秒で実行できたのに対して既存のスーパーコンピュータでは1万年以上かかると見積もられた。スーパーコンピュータの計算手法の改善による時間短縮も報告されているが、依然として量子コンピュータでの200秒に対するギャップは埋まっていない。また、スーパーコンピュータが数千ノードの計算機システムであるのに対して、量子コンピュータが1台の希釈冷凍機中の1チップを用いた計算であることを留意しておくべきである。この成果は、50ビットレベルのエラーレートの極めて小さい量子状態制御がハードウェアとして実現したことを意味する。すなわち、量子ビット、読み出し回路、結合回路の設計と超伝導チップの均一性の良い集積技術、チップ同士を3次元的にフリップチップボンディングする多層配線技術、室温からのマイクロ波による精密制御技術が総合的に動作できる環境が整ったといえる。

• NISQ時代の研究開発

NISQ技術の主なターゲットは、(i)量子による計算の加速を科学的に実証する量子優位性の実証、(ii)大規模な量子コンピュータに発展させる要素技術の実証基盤の確立、(iii)古典コンピュータと合わせてその性能を最大限に引き出す古典-量子ハイブリッドアルゴリズムの開発、の3つである。(i)については、2019年にGoogleによって量子優位性が示された。しかし、これは特定のタスクにおいて実時間でスーパーコンピュータに比べて速い、という結果にすぎず、計算量理論的な計算の加速の実証にはまだいたっていない。量子計算理論分野では、量子加速を実験的に検証するための方法が構築されつつある。

長期的な視点に立ち、大規模な量子コンピュータを実現するためには、量子誤り訂正が必須であることは依然として変わっていない。(ii)では、50量子ビット級の量子コンピュータを用いて1つの論理量子ビットに対して量子誤り訂正を実証することが次のマイルストーンになるであろう。また、1万量子ビットへと拡張するためには、現在の制御方法をそのまま拡張するのでは不十分である。大規模化に向けた技術的課題をあぶり出し、それを解決するための方策をNISQデバイスで検証しながら研究開発を進めることが理想的である。

(iii)では、NISQを意味のあるタスク、量子化学計算、近似最適化、機械学習などへ応用する試みが行わ

れている。古典コンピュータでもできる処理と量子コンピュータが得意なタスクを分離し、それぞれを接続して処理を行う量子-古典ハイブリッドアルゴリズムの研究が進められている。

• QKD商用化の動き

中国でQKD機器を開発しているQuantumCTekが、2020年の7月に上海NASDAQ市場に上場し、初日に914%という記録的な値上がりを記録した。このことは研究や安全保障の観点で語られてきた量子暗号技術が民間の投資の対象となったことを示している。日本でも、2020年10月に東芝が、2020年度第4四半期より、国内外での量子暗号通信システムのプラットフォームの提供およびシステムインテグレーション事業を順次開始することを発表した。国内外で、QKDネットワークを構築し、金融機関を中心とした顧客向けQKDサービスを2025年度までに本格的に開始する予定である。

• QKDの長距離化技術

QKDの長距離化技術として、2018年に英国の東芝欧州研究所が、量子メモリを使わずに量子中継1回分の長距離化を実現できるTwin-Field QKD方式を提案し、原理的な実証に成功した。最近では509㎞の伝送に成功している。しかし、この方法は異なる光源の間での位相同期が必要になり、実用にはまだ障害が残っている。位相同期は、コヒーレント光通信やCV-QKDと共通な課題であるので、これらの研究開発から解決策が見出される可能性もある。

もう1つの長距離化技術として、衛星を用いたQKDシステム開発の動きがある。現時点で、グローバルな鍵配送を可能にする唯一の方法であることが主な理由である（地上で大陸を横断するためには、他国の領土に局舎を置く必要があり、非現実的）。2017年に中国が世界初の衛星-地上間 QKD 実証を発表しており、また日米欧それぞれで衛星量子暗号の研究開発が進められている。重要な技術要素の1つは光子レベルでの光ビームの捕捉追尾である。

• 量子中継技術

量子中継、または量子インターネットについては、デルフト工科大学（オランダ）のQuTechプロジェクトが注目されていたが、米国でも研究が本格化している。特にシカゴ大学とハーバード大学の研究グループが注目される。シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所は共同で、量子ネットワークのプロトタイプを開発している。2020年2月にシカゴ郊外の敷設済みファイバを使い、52マイル（約84 km）の量子もつれ共有に成功したことを発表した。また、ハーバード大学、MIT、BBNテクノロジーズが共同でBoston-area Quantum Testbedを運用しており、新しいQKDプロトコルやデバイスのテストとともに、量子中継に用いる量子メモリのインストールを行おうとしている。ハーバード大学のグループは1次元フォトニック結晶共振器の中にシリコン空孔センターを入れたデバイスを試作しており、量子中継に必要な量子メモリの候補として注目される。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

［日本］

2020年1月に策定された量子技術イノベーション戦略により、わが国として研究開発や産業化・事業化を促進するための指針が示され、イノベーション創出に向けた重点推進項目として、「重点領域の設定」「量子拠点の形成」「国際協力の推進」が掲げられた。

量子コンピュータ関連では、JST ERATO中村巨視的機械プロジェクト、JST CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」、JSTさきがけ「量子の状態制御と機能化」が2016年度に発足した。また2018年度からは文科省Q-LEAPプロジェクトが開始し、理化学研究所における超伝導量子ビットハードウェア開発をフラッグシップとして、イオントラップ、半導体量子ビット、量子ソフトウェアなど、量

子コンピューティングに関する研究が強化されてきている。 SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」（2018年度～）でイジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ等のソフトウェア開発が進められている。2019年度からはJSTさきがけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」が開始され、2020年度からは、NISQ型量子コンピュータの応用研究を中心とする文科省Q-LEAPプロジェクト「量子AIフラッグシップ」が発足し、量子ソフトウェア領域の研究強化が始まっている。同じく2020年度に、内閣府ムーンショットプロジェクトの目標6に「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」が設定された。さらに、NEDOは2020年に「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発/【研究開発項目〔2〕】次世代コンピューティング技術の開発」に関する公募を行った。このなかに“量子コンピューティング関連技術”があげられており、アニーリングマシン開発および周辺技術開発が含まれている。2020年に、大学などを中核とした産学連携を推進するためのプログラムである、JST共創の場形成支援プログラム 本格型 政策重点分野「量子ソフトウェア研究拠点」が開始した。加えて2020年度からは、持続的な量子技術分野の人材層の強化を目標とした文科省Q-LEAPプロジェクト「人材育成プログラム」が開始した。以上のように、中期的・長期的な目標設定のもと、量子コンピュータ関連の研究が加速されている。

一方、量子通信については、SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」（2018年度～）でQKDネットワークの実用化研究が行われている。また、量子通信に関する基盤技術開発の底上げのため総務省の直轄プロジェクトとして「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」が2020年度から開始される。これは初年度14.1億円を投じて、QKD技術の高度化（高速化、長距離化、耐環境性の向上）とネットワーク管理技術、量子中継技術に関する研究開発を民間企業、大学、国研から12機関が参画して行うものである。

［米国］

米国では、2018年に出された国家戦略方針（The National Quantum Initiative Act）に基づく国家プロジェクト投資が進んでいる。大統領府は2021年度の予算要求として量子情報研究に4億6700万ドルを計上した。エネルギー省（DOE）は2020年1月に、米国内に2つから5つの学際的な量子情報科学（QIS）研究センターを設立するため今後5年間で最大6億2500万ドルを投資すると発表した。他にも全米科学財団（NSF）などからの国家プロジェクトが複数公募されている。

現在米国では量子インターネットの基盤技術開発のためにThe Chicago Quantum Exchange（CQE）が設立され、シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所、フェルミ加速器研究所が中心となり、中西部の3大学と2020年7月現在15企業パートナーが参加している。また、ブルックヘブン国立研究所を中心としてオークリッジ国立研究所、ロスアラモス国立研究所とストーニーブルック大学がニューヨークでテストベッドを建設している。量子インターネットに向けた動きがDOEとその傘下の国立研究所を中心に進められている。

［中国］

2019年には中国科学技術大学（USTC）が超伝導量子ビットで12ビットの動作を報告し、また2020年12月には、光を使った量子コンピュータで量子優位性の実証に成功した、と発表した。 USTCは、建設が進められている量子情報科学国家実験室（2020年末に第1研究棟完成）と同じ安徽省合肥市にあり、大型研究開発拠点として中国の研究開発加速の中心となるものと思われる。中国科学院と中国IT大手のアリババ（阿里巴巴）グループは、共同で量子計算実験室を設立し量子情報科学の先進的研究、量子コンピュータの開発に取り組んでいる。現在、11ビットの量子コンピュータのクラウドサービスを展開している。

［欧州］

EUでは2018年にEU Quantum Flagshipが採択され活動している。前半は立ち上げフェーズであ

り、2021年から本格化の予定である。この間、2019年にはQuantERAコンソーシアムによる20Mユーロを投じるプロジェクト公募もなされた。この公募は2017年に次いで2度目である。ドイツでは、EU Flagshipの一翼をなすOpenSuperQプロジェクトで、ユーリッヒ研究所にD-Waveのコンピュータを2021年までに導入する計画を発表している。英国は2014年から進められているThe UK National Quantum Technologies Programmeに対する2019年からの追加投資が表明された。産業界からの投資も含めて総額3億5000万ポンドになる。フランス・イノベーション省（MESRI）が量子国家戦略を2021年1月に発表。量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であると表明した。

量子通信基盤の構築に向けたEuroQCI initiativeが進められており、これをサポートするように2019年6月にEuroQCI declarationが採択され、現在25カ国が署名している（2020年10月）。また、QKD実用化のため2019年9月から3年間のプロジェクトOPENQKDが始まっている。ここではQKDを組み込んだ通信インフラの実現をめざして15百万ユーロの予算、38機関（13カ国）からなるコンソーシアムが組まれている。

（5）科学技術的課題

今後は量子ビットの精度向上とシステムとしてのスケーラビリティを同時に実現することがより重要になる。物理研究だけではなく、広く材料科学、デバイス集積技術、3次元実装技術、高周波制御回路、実装部品、冷凍機、システムアーキテクチャなどの広い分野にわたる協業が重要になるものと思われる。これらの技術開発により、現在主流の超伝導量子ビットやほかの方式においても技術的制約・課題が顕在化する可能性があり、どこにブレイクスルーが必要なのかが明確になるだろう。

NISQの応用研究は、この1、2年でかなりの広がりを持った反面、いろいろな課題も浮き彫りになってきた。変分量子アルゴリズムにおける量子状態の表現能力を向上させるためには量子計算のステップ数を増やす必要があるが、パラメータの勾配が消失してしまう問題が生じており、初期パラメータの選択法やパラメータの更新方法において新たなブレイクスルーが必要である。また、扱える問題のサイズにも制限があり、量子化学計算や機械学習などにおいて興味のある対象を扱うにいたっていない。量子コンピュータ実機を使えるメリットを毀損しない形で問題分割し、小規模な量子コンピュータ上で実行可能にするなど、より高度なアルゴリズム設計が求められている。

大規模な量子ネットワークの実現のためには量子暗号通信の高速化や長距離化が必須であるが、長距離化には検出器の低雑音化やTwin-Field QKDなどの新たなプロトコル開発が必要である。また、グローバルネットワークに接続するローカルネットワークでは、低コスト化のために既存の光通信との共存が望まれ、雑音耐性の高いQKDシステムの開発が必要となる。一方、大規模なネットワークでは、異なる方式・異なるベンダの装置の相互接続も課題となる。また、量子セキュアネットワークとしてのキラーアプリの確立も重要な課題である。将来的な全量子ネットワーク実現のためには、十分離れた中継点に置かれた量子メモリ間を光でリンクする必要があり、量子波長変換や光と量子メモリのインターフェース、誤り訂正技術が必要である。

（6）その他の課題

量子技術への国家プロジェクトや産業界からの投資がなされ、研究開発拠点が形成されるなか、世界的に量子技術の人材が不足していくことが予想される。わが国に注目すると、時限的拠点による人材育成以前に、その基盤となる大学における教育体制や安定的地位についた指導側の人材が圧倒的に不足している。基盤予算の削減による大学教員の減少のなか、特に理論分野は海外と比して全くもって脆弱な体制である。国内の

研究者への安定的な地位の拡充や、数少ない既存の研究者が研究教育に専念できる環境や制度の構築、待遇の改善による海外研究者の取り込みによる長期的な教育体制を敷かなければ、量子技術の分野で世界と競争し存在感を示すことは難しいだろう。

量子コンピュータや、量子通信の研究開発は、挑戦的・総合的な工学研究の様相を呈し始めており、これまでの物理学のスキルを中心とした量子人材は視野をより広げることが求められる。同時に、周辺の研究開発分野に携わる人材の関与がますます必要となるため、厚い人材層や周辺技術を保有する産業界とは特に連携を図るべきであり、そのための補助金や研究開発コンソーシアムの形成などの体制づくりが望まれる。また、量子技術を啓蒙する場を作り人材の広がりと育成を図る必要があり、量子技術イノベーション拠点ではこのような活動を強化すべきである。

また、各国が国をあげて研究開発に取り組んでいることから、国家間の技術的な機密性が高まることが予想される。最終形態の量子コンピュータばかりでなくそれを構成する各種要素技術も高度な機密技術となり、必要な要素技術の調達が困難になる可能性もある。要素技術を含むキーとなる技術の育成戦略も重要となる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	量子技術イノベーション戦略が策定、基礎研究から実用化へつなぐ戦略と体制ができた。理化学研究所（Q-LEAPフラッグシッププロジェクト）、大阪大学量子情報・量子生命研究部門、慶應義塾大学量子コンピュータセンターなど、拠点形成が進み、関連研究のシナジーがみえてきている。JST ERATO、CREST、さきがけ、などのプロジェクトにおいて幅広く基礎研究が支援されている。 量子暗号通信に関する理論的研究は東京大学、名古屋大学、富山大学、慶應義塾大学、NICT、NII、産総研、三菱電機等で行われている。実験的研究もNICT、北海道大学と学習院大学でQKDに関して、大阪大学と横浜国立大学で量子中継に関してそれぞれ活発な研究を行っている。 停滞期に比べると上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると相対的に現状維持とせざるをえない。
	応用研究・開発	○	→	Q-LEAP フラッグシッププロジェクト、量子情報処理フラッグシップでは、基礎基盤研究とともに、量子コンピュータや量子シミュレーションの応用研究が進む。イジング専用マシンについては、NEDOプロジェクトにおいて量子デバイスを用いたハードウェア、統合ソフトウェア環境整備、従来型の半導体デバイスを用いた専用マシンの研究開発が進む。 NEC（Q-LEAP、NEDO）、富士通（NEDO）など企業からの国家プロジェクトへの参画が見られ、産学連携による遂行体制が確立しつつある。 NICTを中心に、SIPにおいてネットワークと量子セキュアアプリケーションの研究が進められている。衛星量子通信についても実証に向けた研究がソニー、スカパーJSATも参加して進められている。 停滞期に比べると上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると相対的に現状維持とせざるをえない。
米国	基礎研究	◎	↗	DOE傘下の国立研究所や大学において古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が続けられてきた。総額1000億円を優に超える米国の国家プロジェクトNational Quantum Initiativeにおいても、基礎研究重視や研究インフラの整備が唱えられており、2020年には新たな量子拠点づくりに巨額の投資がなされる。最近では量子中継ネットワークについての研究も進展。

	応用研究・開発	◎	→	上記の基礎研究に支えられ、米国では産業セクターが積極的に量子技術の応用研究を進めている。IT企業からは、Google、IBM、インテル（欧州と連携）、マイクロソフト（世界各国と連携）などが応用研究を進め、また、Rigetti computingやIonQなどに代表されるようなベンチャー企業も多数登場している。量子通信分野では、Quantum XchangeがId Quantiqueと協業し、QKD ネットワークサービスを開始した。各地でフィールドテストのための量子ネットワークテストベッドが作られ、衛星量子通信も量子もつれ共有をターゲットにプロジェクトが始まっている。
欧州	基礎研究	◎	↗	国立研究所や大学において古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が続けられてきた。予算規模1300億円（10年）を超えるEU Quantum Technology Flagshipプロジェクトがスタートし、第一次の採択が決定し本格始動した。英国ではQuantum Technology Hubsのもと約400億円規模（5年）の国家プロジェクトが2014年から進む。 オランダQuTechを中心とした量子ネットワーク研究Quantum Internet Allianceやジュネーブ大・東芝ケンブリッジ研究所ではQKD研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	オランダ、デルフト工科大学を中心とするQuTechでは、インテルやマイクロソフトと共同して、量子コンピュータの実現や応用に向けた研究が進む。 英国Quantum Communication Hubによる量子暗号ネットワークが建設されている。 EUにおけるOPENQKD、スペインでのCVQKDによるネットワーク、ドイツでのQuNet Initiativeなど各国で量子ネットワーク開発が進む。衛星量子通信の研究開発もドイツなどで行われている。ETSIによる標準化活動も進展している。
中国	基礎研究	○	↗	第13次五カ年計画のもと、中国科学院を中心として量子情報科学の拠点形成が進む。安徽省合肥市に量子技術や量子情報科学を対象とする量子情報科学国家実験室の第1研究棟が2020年に完成。また、中国科学技術大学で12量子ビット動作を成功させるなど具体的な成果が出始めた。中国科学技術大学のグループは量子暗号でも新しいプロトコルの実証実験を実施。Atomic ensemble量子メモリ研究も進む。
	応用研究・開発	○	↗	アリババ（阿里巴巴集団）、Huaweiに続き、Origin Quantum（本源量子）も、量子コンピュータのクラウドサービスを提供開始。 北京-上海間の2000 ㎞ネットワークは現在も稼働中。世界に先駆けて衛星量子通信を成功。量子専業企業の株式が上場され量子が投資の対象にもなっている。 ITU-Tでのネットワーク標準化、ISOでの実装安全性の標準化ではリード。
韓国	基礎研究	×	→	現状、量子暗号通信の研究が一部で見られるものの、活発ではない。量子情報処理技術に対する大型国家プロジェクトが発表された。
	応用研究・開発	△	→	SKテレコムがId Quantiqueへの出資、量子乱数源の開発、Korean TelecomがITU-Tを舞台にした標準化活動をそれぞれ行っている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・量子コンピューティング（システム・情報分野　2.4.2）
・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野　2.6.4）

参考・引用文献

1) F. Arute et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature* 574, no. 23（2019）：505-510. doi：10.1038/s41586-019-1666-5
2) K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima and S. Tarucha, "Resonantly Driven Singlet-Triplet Spin Qubit in Silicon", *Phys. Rev. Lett.* 124, no. 11（2020）：117701. doi：10.1103/PhysRevLett.124.117701
3) M. Mizoguchi et al., “Ultrafast creation of overlapping Rydberg electrons in an atomic BEC and Mott-insulator lattice”, *Phys. Rev. Lett.* 124, no. 25（2020）：253201. doi：10.1103/PhysRevLett.124.253201
4) V. Scarani et al., "The Security of Practical Quantum Key Distribution", *Rev. Mod. Phys.* 81, no. 3（2009）：1301. doi：10.1103/RevModPhys.81.1301
5) H.-K. Lo, M. Curty and K. Tamaki, “Secure quantum key distribution”, *Nature Photon.* 8, no. 8（2014）：595–604. doi：10.1038/nphoton.2014.149
6) A. Tomita, "Implementation Security Certification of Decoy - BB84 Quantum Key Distribution Systems", *Adv. Quantum Technol*. 2, no. 5-6（2019）：1900005. doi：10.1002/qute.201900005
7) A. Huang, S. Barz, E. Andersson and V. Makarov, “Implementation vulnerabilities in general quantum cryptography”, *New J. Phys.* 20, no.（2018）：103016. doi：10.1088/1367-2630/aade06
8) M. Sasaki et al., "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network", *Opt. Express* 19, no. 11（2011）：10387-10409. doi：10.1364/OE.19.010387
9) T.A. Eriksson et al., “Wavelength division multiplexing of continuous variable quantum key distribution and 18.3 Tbit/s data channels”, *Commun. Phys.* 2（2019）：9. doi：10.1038/s42005-018-0105-5
10) S. Muralidharan et al., “Optimal architectures for long distance quantum communication”, *Sci. Rep*. 6：（2016）：20463. doi：10.1038/srep20463
11) Q. Zhang, F. Xu, Y.-A. Chen, C.-Z. Peng, and J.-W. Pan, “Large scale quantum key distribution：challenges and solutions”, *Opt. Express* 26, no. 18（2018）：24260-24273. doi：10.1364/OE.26.024260
12) H.-S. Zhong et al., “Quantum computational advantage using photons”, *Science* 370, no. 6523（2020）：1460-1463. doi：10.1126/science.abe8770

2.3.7 量子計測・センシング

（1）研究開発領域の定義

量子力学が記述する電子や光子などが持つ性質（量子性）を積極的に活用して、古典系では実現できない高感度な計測・センシング技術を開発するための領域である。個々の量子や原子集団全体の量子状態を制御しプローブとして用いるもの、複数の量子の相関状態（量子もつれ）や量子干渉を制御するものがあり、その計測・センシング対象も多様である。対象量子系の例としては、冷却原子、原子イオン、ダイヤモンドNVセンター、極低温電子回路、（偏極）核スピン、電子スピン、光子があげられる。

（2）キーワード

量子計測、量子センシング、精密分光、量子生命科学、原子時計、光格子時計、量子慣性センサ、量子ジャイロスコープ、量子もつれ光、超偏極、動的核偏極（DNP）、冷却原子、ダイヤモンドNVセンター、ナノ粒子、周波数標準、光子検出器

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

計測・センシングは、あらゆる科学技術の基盤であり、またSociety 5.0においても、現実世界をデータ化し、サイバー世界と融合させるのに不可欠な技術である。従来の光や電気を用いた計測技術における感度や分解能などの限界を、個々の光子、電子や原子の量子状態を制御することで、打ち破ることが可能になる。その要素技術や基盤となる理論は、量子コンピュータや量子通信などの研究とも密接に関連しており、それらの研究分野の進展にともない、量子計測センシング分野の研究は著しく進展している。実現可能性の高さや、そのアプリケーションの多様さから、科学技術・社会に与える波及効果も大きい。例えば光格子時計は、現在の時間標準として使われているセシウム原子時計を2桁も上回る高い時間精度を持つ。その高い精度のおかげで、時間の進み方が重力の大きさに応じて変わるというアインシュタインの一般相対性理論の効果を、地上わずか1 cmの高さの違いでも検出可能である。そのため、光格子時計は地殻変動、火山活動の観測等への応用が検討されている。衛星からの電波に依存した位置標定システムであるGPSを補完する技術として期待されるのが、量子慣性センサである。加速度計、ジャイロスコープ、重力勾配計など複数の慣性センサを統合することで、衛星からの信号に頼らず自律して位置を把握することができる（慣性航法）。衛星からの電波が届かない海中での作業において真価を発揮するため、排他的経済水域（EEZ）や北極海における資源探査上、極めて有用とされている。慣性航法の精度を律速しているのはジャイロスコープであり、量子技術を用いてその性能を高めることで精度を飛躍的に向上できると期待されている。炭素原子で構成されるダイヤモンドの一部が窒素原子で置換されて形成されたダイヤモンド窒素空孔（Nitrogen Vacancy：NV）センターは、磁場、電場、温度、圧力などの高感度センサとして、工学、医学、生命科学分野など、広範な分野での応用が期待されている。光あるいは物質の量子もつれを利用する量子もつれセンシングは古典技術では実現不可能な高いセンシング能力が約束されており、研究開発が進められている。医療、生命科学分野での応用開発が進められているのが超偏極イメージング技術である。現在主流となっているポジトロン断層法（PET）などの核医学検査は被暴リスクを伴うため、被暴リスクのない超偏極イメージングへの期待は高い。

［研究開発の動向］

• 光格子時計、量子慣性センサ

2001年の光格子時計の提案以降、その研究開発は日本をはじめとして、欧米、アジア各国の計量標準研究所など20以上の研究拠点に波及し、高精度化に向けた基礎研究が進められている。2016年には、日米の研究機関で提案当初の目標であった18桁精度が実現され、現在の研究開発は、基礎研究から時計の応用・実用化へと広がっている。

実用化に向けた技術開発として、各研究機関で開発された時計をつなぐ光ファイバ網の構築が進められている。特に欧州圏では、各国の標準研究所をつなぐ数1000 kmにわたる光ファイバ網の整備が進められ、ドイツ、フランス、英国、イタリアの標準研究所が光ファイバを介して互いの時計を比較できる状況が整いつつある。このような時計のネットワーク化は、開発した時計の再現性の確認や時間情報の共有、相対論的測地による高精度な標高の体系を作るうえで重要である。

また、重力ポテンシャル計としての測地応用に向けて、実験室を離れた環境下でも安定に動作できる可搬型光格子時計の開発も進められている。ドイツ国立物理工学研究所（PTB）では、トレーラーに搭載した光格子時計を開発し、フランスとイタリアの国境の山中のトンネル内に光格子時計を運び、光ファイバでイタリア国立計量研究所（INRiM）の光格子時計とつないで、実験室外での時計比較の実証実験を行った。日本では、18桁精度の可搬型光格子時計を開発し、東京スカイツリーの地上階と展望階に設置し、一般相対性理論の検証実験を行った。時計の可搬化技術によって、例えば火山や地殻変動の測定など、実地に持ち込んで測定が可能となると、測地応用の用途が広がるものと期待される。

時計の各種主要部品の製品化も進められている。欧米のベンチャー企業では、光-光、光-マイクロ波間の周波数変換を担う光周波数コム（Menlo Systems（独）、TOPTICA Photonics（独）、IMRA America（米））や原子冷却用光源（TOPTICA Photonics（独）、MOGLabs（豪））、分光用超狭線幅レーザ光源（Stable Laser Systems（米）、Menlo Systems（独））、光ファイバ周波数伝送装置（Muquans（仏））、レーザー光源、原子減速用真空槽（AOSense（米））等の製品化が行われている。

光格子時計による「秒」の再定義に向けた動向として、光格子時計で時刻標準を生成する取り組みも行われている。今後、このような活動とともに、光格子時計の再現性が多くの拠点で確認され、信頼性が高められることにより、光格子時計による「秒」の再定義の議論はより加速するものと期待される。

量子技術を利用したジャイロスコープとしては、スピンの歳差運動を用いたNMR型や原子波干渉型などがあるが、感度という観点では後者が圧倒的に高い性能を示す。古典のジャイロスコープでは、EEZや北極海における資源探査に必要な精度が実現できておらず、量子技術の導入が必須と考えられている。米国スタンフォード大学で開発された熱原子ビーム干渉型も、仏国LNE-SYRTEで実現された冷却原子噴泉型も、現時点ではロシア製の古典ジャイロスコープの性能に劣る状況にある。しかし、今後性能が飛躍的に向上する可能性があり、古典ジャイロスコープを上回る性能の実現が期待される。

航法研究においては、乗り物のダイナミクスを考慮する必要があるため、加速度耐性、ダイナミックレンジ、バンド幅といった、時計研究とは異なる観点からの性能が求められる。中性原子を用いた干渉計は加速度と角速度の双方に応答してしまうため、これらを切り分ける技術をより改善していくことが不可欠である。この点については、大阪大学において微小空間にトラップされたイオンを対象とした量子ジャイロスコープの研究が進んでいる。このジャイロは乗り物の運動により加速度等が印加されても原理的に角速度計測に影響がでない。

• ダイヤモンドNVセンター

単一ダイヤモンドNVセンターの光検出磁気共鳴（Optically Detected Magnetic Resonance：ODMR）が1997年に初めて報告されてから、二十数年にわたりドイツと米国を中心に、政府投資による基礎研究が強力に進められ、磁場、電場、温度、圧力、pH、などのセンシングにおいて従来技術（超伝導量子干渉計（SQUID）磁気センサ、光ポンピング（OPM）磁気センサ、蛍光分子イメージング、高速AFM、等）を凌ぐ可能性が見出された。 NVision、SQUTEC、QNAMI、QZABRE、Quantum Diamond Technologies Inc.など、基礎的な知財を押さえたうえで当該分野の先駆者を擁するスタートアップが多数立ち上がっており、今後数年のうちに市場が確立されていくと考えられる。中国は10年近く前からNVセンターの研究を本格的に実施している。日本では、筑波大学や産業技術総合研究所が材料面において、当該分野の発展に大きく貢献してきた。また最近、ダイヤモンドの表面近傍に配置したNVセンターにより、ダイヤモンド基板上の分子の核磁気共鳴（NMR）分光にも成功しており、ミクロ領域での分子構造化学を開拓する基礎分析ツールになると期待されている。また、Qdyne（quantum heterodyne）法などの新規な計測プロトコルについても開発が進み、高い周波数分解能でNMR信号を観測することが可能であることが実証された。

生命現象や細胞内環境を精密計測するための超高感度センサとしてダイヤモンドナノ粒子が注目を集めている。近年ナノダイヤに関して、数ナノメートル程度の直径を持つナノ粒子によるさまざまなセンシング機能の発現が報告されていて、例えば、pHや温度の量子計測が実証されてきており、今後の生命科学応用へ期待される。

• 量子もつれセンシング

量子もつれセンシングは、80年代の量子もつれの検証実験、ボーズ-アインシュタイン凝縮（BEC）の実現、また90年代からの量子情報通信処理研究・技術の進展とともに急速に発展してきた。2000年代以降、米国では国防省陸軍研究局（DOD）、陸軍研究局（ARO）、高等研究計画局（DARPA）による投資と研究の進展がみられた。その応用としては、2000年頃に量子光干渉断層像（量子OCT）が提案され、また2000年代中頃に量子イルミネーションが提案された。わが国においては、2007年に北海道大学から位相測定の標準量子限界を超える多光子もつれ干渉の実験が、また2013年にそれを応用した量子もつれ顕微鏡が報告されている。また、2015年には、超広帯域量子もつれ光源を利用し、量子OCTで世界最高の0.54μm分解能（空気中）に相当する2光子干渉縞の取得が報告されている。

• 超偏極NMR/MRI

核スピンの偏極率（NMR/MRI信号強度に比例）を一時的に数万倍にすることで、^{13}Cや^{129}Xe等の安定同位体核の超高感度計測を実現する量子センシング技術である。1990年代から超偏極寿命が長い核スピンを対象に、生体外で励起装置を用いて強力に超偏極誘導し、すぐに検体に投与してMRI撮像を行う新しいイメージング技術が生まれ、現在でも主流となっている。最初の試みは光ポンピングにより励起した^{3}Heや^{129}Xeなど希ガスの超偏極MRIである。欧米や中国で肺疾患を対象とする臨床応用が進んでいる。

2003年にスウェーデンのグループが、水溶性物質を動的核偏極（DNP）で高感度化させてから水溶液に溶解させるdissolution DNP（dDNP）法を開発し、^{13}C NMR信号を1万倍以上増幅することに成功した。この発見を機に、安定同位体元素を超偏極誘導することで、PET等の核医学検査に代わる放射線被暴の無い安全な分子イメージング診断につなげる研究が世界中で始められた。2013年にはカリフォルニア大学サンフランシスコ校（UCSF）で世界初の臨床試験が前立腺がん診断で実施された。現在、世界23カ所以上に、

米国GEヘルスケア社が開発した臨床研究に使える^{13}C励起装置が導入されており、世界10カ所程で数百人規模の臨床試験が進められている。脳腫瘍、乳がん、膵臓がんを含む多くのがん診断や心筋梗塞や糖尿病性心筋症などの心機能評価へと適用拡大が急速に進んでいる。一方、日本国内には臨床研究に使用可能な、医薬品製造の基準（GMP）に対応した^{13}C励起装置は導入実績が無く、開発競争で致命的な遅れを取っている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• 光格子時計高安定化に向けた研究への注目

時計を用いて時間、周波数計測を行う際、いかに短時間でリアルタイムに高精度な測定を行えるかを示す安定度も重要な要素となる。光格子時計は、多数の原子を同時に観測することで高い安定度を実現できる。しかし実際には、時計遷移を励起するためのレーザ光の周波数ノイズにより、光格子時計本来の高安定性が実現できない。レーザ光の不安定性は、参照する光共振器のミラーの熱雑音に起因するため、これを抑えるために、長い共振器や低温シリコン共振器を導入して高い安定度が実現されている。一方で、これらは装置の大型化を招き、時計装置の可搬化の障害となっている。そこで近年、光共振器に頼らずに原子のコヒーレンス等を有効に利用する新たな時計の高安定化の研究が注目されている。例えば、光格子中の原子集団からの超放射の利用、原子の非破壊観測、時計の無駄時間無し連続動作、アクティブ時計、スピンスクイージングの実現等の試みがなされている。このような光格子時計の高安定度化は、今後の重要な研究テーマである。

• 量子もつれ光を用いる赤外量子吸収分光への注目の高まり

2つのもつれ光源における量子もつれ光子対生成過程間の量子干渉を利用することで、高額な赤外領域の検出器を使わずに、可視の光源と検出器のみで赤外領域の吸収分光測定が実現できる。2016年にシンガポールのグループが発表した後、ドイツ、オーストリア、英国、スペインなど欧州諸国で研究が開始された。ドイツでは産学連携を担うフラウンホーファー研究所が中心となって取り組んでいる。国内でも、Q-LEAPプロジェクトの1つとして、これまでの大強度量子もつれ光源開発の強みを活かす特長ある研究が、産学連携の枠組みで進められている。

• dDNP技術開発のさらなる進展

dDNP技術では6～10 Tへの更なる高磁場化に加えて、偏極源であるラジカル剤からまず^{1}H核に偏極を移し、続いて^{1}Hから^{13}Cへと移すCross-Polarizationにより50%以上の^{13}C偏極率を20～30分の短時間で得られる技術が開発されている。第2世代のdDNP型臨床機にはこの技術が採用され利便性が大幅に改善されると見込まれる。 dDNPで励起された分子の超偏極寿命は数分と短いため臨床応用のネックとなっているが、東京大学のグループが開発した^{15}N標記分子では1時間以上の長時間観測に成功している。また、事前に励起さえ始めておけば、ルーチンの形態像撮影にプラス5分で超偏極^{13}C MRIによる分子イメージングを追加できる診断プロトコルが米国で整備され、今後10年で核医学検査から被暴の無い超偏極^{13}C MRI診断への切り替えが進むものと考えられる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

［日本］

量子科学技術（光・量子技術）を駆使して非連続的な解決（quantum leap）をめざす「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」が2018年から10年の予定で実施されている。3つの領域のうちの1つである量子計測・センシング技術領域では、主にダイヤモンドNVセンターを用いたFlagshipプロジェクト（課

題名「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」）が発足し、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発がターゲットとなっている。さらに、量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究など、7件の基礎基盤研究が推進されている。新たに量子生命科学研究のFlagshipプロジェクト（課題名「量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新」）が2020年に発足し、生体ナノ量子センサ、超高感度MRI/NMR、量子論的生命現象の解明・模倣の3つを対象とした研究開発が10年間の予定で行われる。

JSTでは、さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」が発足し、一部のテーマでNVセンターを用いた研究が進められている（2017年度～2022年度）。未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」（2017年～）、「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」（2018年～）が進められている。2020年に、大学などを中核とした産学連携を推進するためのプログラムである、JST共創の場支援プログラム 本格型 政策重点分野「量子航法科学技術拠点」が開始した。

AMED先端計測プログラムの支援により北海道大学とベンチャー企業である日本レドックスの共同開発により純国産のPHIP型^{13}C励起装置の製品化が進められている。2021年度中にまず小動物イメージング用装置として国内販売が予定されており、今後の海外市場への進出と臨床機の開発が期待される。

［欧州］

光格子時計の実用化に向けたプロジェクトが立ち上がっている。欧州で進められているEuropean Quantum FlagshipのIntegrated Quantum Clock（iqClock）プロジェクトでは、光格子時計の可搬化と製品化および超放射レーザーの開発を進めている。英国のバーミンガム大学は企業と共同で小型Sr光格子時計の開発、オランダのアムステルダム大学、デンマークのニールスボーア研究所、ポーランドのニコラスコペルニクス大学、オーストリアのウィーン工科大学、インスブルック大学は、Sr原子を用いた超放射レーザの開発を進めている。プロジェクトには、TELEDYNE e2V、TOPTICA Photonics、NKT Photonicsなどの企業が協力している。英国のQuantum Technology Hubコンソーシアムでは、量子センサの実用化技術開発の一環として、バーミンガム大学のグループが、Sr光格子時計の小型化、可搬化に向けた開発を行っている。欧州宇宙機関（ESA）では、マイクロ波時計を用いたプロジェクト（ACES）の後継として、光時計の宇宙利用（Space Optical Clocks：SOC）のため、光格子時計の国際宇宙ステーション搭載に向けたプロジェクトを2007年より進めている。

ダイヤモンドNVセンターのプロジェクトとして、ASTERIQS（Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing）が、2018年からの3年間（予算1千万ユーロ）の予定で進められている。ダイヤモンドNVセンターによるナノレベル高空間分解能磁気センサ、電池モニタリングシステム開発、小型NMRなどの開発が進む。また、dDNPに代わる新技術確立に向けて、ダイヤモンドNVセンターの核スピン超偏極イメージングへの応用をめざす2つのプロジェクト、MetaboliQsとHYPERDIAMONDが立ち上がり、脱・核医学の動きがさらに加速している。

フランス・イノベーション省（MESRI）が量子国家戦略を2021年1月に発表した。7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であり、その中の1分野が、量子センサ技術の応用開発（総投資額2億5800万ユーロ）である。

（5）科学技術的課題

現在の光格子時計は、すでに社会実装されているマイクロ波時計と比べて装置が大型、煩雑かつ長期安定動作が難しく、それらをいかに小型化・堅牢化するかが重要な課題である。時計を動作させるには、複数台

のレーザを高精度かつ長期間安定に制御する必要がある。今後、レーザ開発や製品化に特化した企業の技術力の導入が重要となってくる。また、光格子時計のネットワーク化においては、実現した高精度な時間、周波数情報をいかに劣化させずに共有できるかが課題となる。従来の衛星を介したマイクロ波周波数伝送では大気の擾乱等の影響により精度、安定度の面で不十分である。一方、光ファイバ周波数伝送に関しても、距離が延びるとともに伝送安定度が劣化するため、地球規模の大陸間長距離伝送に適用するのは難しい。今後、このような長距離伝送に耐えうる高精度な周波数伝送手法の開発が必要となる。

量子慣性センサ開発において、ダイナミックレンジやバンド幅に対する問題は、光格子時計開発よりも切実である。特にバンド幅は、原子波干渉を利用する限りにおいて、回避しがたい技術的難点である。そのため、乗り物などの実環境下で原子波干渉型ジャイロが動作したという実験報告はなく、これまで時計研究に行ってきたのと同様の持続的投資が必須なのは間違いない。この問題点の解決には超高性能古典ジャイロと量子ジャイロとをハイブリッド化することが不可欠であり、すでに中国Wuhan Institute等でこうした研究が始まっている。

ダイヤモンドNVセンターを脳磁計などに応用するには、さらなる高感度化が不可欠である。計測技術の改善、および物質科学的改善によるアプローチの両方が必要と考えられる。計測技術的アプローチでは、環境からのノイズ低減のための量子プロトコル開発などがあげられる。物質科学的アプローチでは、ダイヤモンドのさらなる高品質化やNVセンターの効率的な生成技術開発などが考えられる。実用化の観点からは低価格化が重要であり、小型化、集積化技術開発が必要となる。ダイヤモンドの高速成長技術、大面積化などの研究開発も、長期的に取り組むべき今後の課題としてあげられる。

超偏極イメージングは3次元位置情報＋スペクトル（代謝）情報＋時間の5次元情報として得られることが多く、テンソル分解など高次元データの特徴を活かした情報処理技術や、実用に際して高次元の情報を直感的にわかりやすく表現・提示する技術の必要性が高まっている。また、臨床用MRI装置は通常^{1}H専用機であり、^{13}Cなどの異核は撮像できない。オプションで多核対応できるMRI機種は現状全て海外メーカー品であり、国内メーカーのMRI装置を所有する病院では超偏極^{13}C MRIは実施できない。今後、MRI装置の研究開発やインフラ整備が必要となる。

（6）その他の課題

欧米と比べて量子技術の人材が不足しており、中長期的な観点からは重要な課題と考えられる。量子計測・センシング分野の人材には、センサに関する知識や量子物理のほか、それを取り巻く材料科学、生命科学、情報工学等の幅広い知識の習得や、理論からシステム開発まで見渡せる力が必要である。量子技術、量子情報科学に興味をもつ学生は増えているにもかかわらず、体系的教育は満足にできておらず、大きな課題である。アカデミアのみならず、産業界においても人材の確保は重要な課題である。大学院生や博士研究員などの若手人材を育成し、本領域の将来を支える次世代リーダーを、すそ野を拡げつつ養成する必要がある。今後、拡大が見込まれる量子技術市場において、早い段階から企業の関心を惹きつけ、新たな市場創生につなげるため、アカデミアと企業関係者との間で「量子技術」に関する最新技術と動向を共有することが重要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	Q-LEAP 量子計測・センシング領域や、新規Flagship「量子生命」、JSTさきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」など、複数のプロジェクトによって研究開発が進む。しかし加速度的に増えている海外の投資に比べると十分とはいえない。 日本初の技術である光格子時計では、光格子時計の実証実験と18桁の時計精度を実現した東京大学・理化学研究所を中心に、世界をリード。
	応用研究・開発	○	↗	東京大学・理化学研究所・島津製作所では、可搬型光格子時計を開発し、一般相対論検証実験を実現。未来社会創造事業でも、東京大学・理化学研究所を中心に、社会実装をめざし、小型・可搬型光格子時計の開発を行っている。 Q-LEAP量子計測・センシング技術領域のFlagshipプロジェクトでは、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が進む。量子もつれ光を利用したセンシングへの企業の関心は高まりつつあり、今後の発展が期待される。超偏極イメージングの開発競争で出遅れたが、放射線科医を中心に国内での臨床試験をめざす動きがあり、状況打開を臨む機運は高まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発では、JILA、NISTで世界トップレベルの時計精度を実現。ハーバード大学を中心に、ナノ粒子を用いた磁場計測や温度計測の実証研究などが進む。量子もつれ光を用いた研究では、メリーランド大学、ボストン大学、イリノイ州立大学、カリフォルニア州立大学アーバイン校、NISTなどにも加え、カナダにも複数の拠点があり、北米地域で連携している。超偏極イメージング研究でも、UCSFなどを中心に、多くの研究機関が潤沢な予算のもと、新規トレーサーや疾患モデル動物のイメージングなどで優れた研究成果が出ている。
	応用研究・開発	○	↗	DARPAのプロジェクトで、NISTなどのグループが光周波数コムを搭載した光時計を微細加工した基板上に実装するなど、チップスケール原子時計の開発が進む。 AOSense、Stable Laser Systemsなどのベンチャー企業による時計の要素技術開発と製品化も行われている。ハーバード大学を中心に、神経電流のDC磁場の計測や、NVセンターのスピンをプローブとしたイメージング技術開発がさかん。ゴーストイメージングに関し、その原理を用いた画像処理システムが開発されている。超偏極^{129}XeによるCOPDなどの肺疾患診断と、超偏極^{13}Cによる、がんおよび心筋症の診断で大規模臨床研究が進められ、臨床データを扱う共通プラットフォームや撮像プロトコルの整備も充実。
欧州	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発が各国の計量標準研究所を中心に行われ、各国の研究所間をつなぐ長距離光ファイバ網の構築が進められている。ダイヤモンドNVセンターの研究では、ドイツを中心に先駆的な研究がなされている。シュトゥットガルト大学では、AC磁場に関する世界最高感度900fTHz$^{-1/2}$を達成している。核偏極イメージングでは、黎明期より研究領域の中核を担ってきた大学が多く、近年ではdDNP装置の性能と利便性を大幅に向上するCross-Polarization技術の発明など、革新的な技術を創出。
	応用研究・開発	◎	↗	iqClockプロジェクトでは、可搬型光格子時計の開発と製品化および超放射レーザの開発が進む。欧州宇宙機関（ESA）では、光時計の宇宙利用のため、光格子時計の国際宇宙ステーションへの搭載に向けたプロジェクトが2007年より進む。ベンチャー企業による時計用レーザ光源とその周辺機器の製品化も進展。 MetaboliQsとHYPERDIAMONDの2プロジェクトによる医療応用、ASTERIQSプロジェクトによる高性能センサ開発など、ダイヤモンドNVセンターの応用研究開発が進む。

中国	基礎研究	△	↗	中国計量科学研究院、中国科学院、華東師範大学で光格子時計の開発が進展。中国科技大学、香港中文大学で、磁場計測やタンパク質のスピンラベルに関する研究が進む。量子もつれ光源や、光子検出器に関する研究の質と量は近年著しく向上。^{129}Xeガスの MRI の報告が中国の研究機関からなされている。
	応用研究・開発	△	→	中国科学院で宇宙利用に向けたSr光格子時計の小型化に着手。^{129}Xeガスによる肺疾患の診断は2018年から臨床応用が始まっている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国標準科学研究院では、Yb光格子時計を開発。量子もつれ光を用いた基礎研究に関して、浦項工科大学が世界レベルの研究を実施。 dDNP による認知症の早期診断の可能性を示唆する成果など、著名な基礎研究成果が複数報告された。
	応用研究・開発	△	→	特筆すべき応用研究・開発はみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・バイオ計測・診断デバイス（ナノテク・材料分野　2.2.3）
・バイオイメージング（ナノテク・材料分野　2.2.4）
・MEMS・センシングデバイス（ナノテク・材料分野　2.3.4）
・ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野　2.6.3）

参考・引用文献

1）S. Bennetts, C. C. Chen, B. Pasquiou, and F. Schreck, "Steady-State Magne-to-Optical Trap with 100-Fold Improved Phase-Space Density", *Phys. Rev. Lett.* 119, no. 22（2017）：223202. doi：10.1103/PhysRevLett.119.223202

2）B. Braverman, A. Kawasaki, E. Pedrozo-Penafiel, S. Colombo, C. Shu, Z. Li, E. Mendez, et al., "Near-Unitary Spin Squeezing in ^{171}Yb", *Phys. Rev. Lett.* 122, no. 22（2019）：223203. doi：10.1103/PhysRevLett.122.223203

3）G. Jacopo, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, H. Denker, et al., "Geodesy and Metrology with a Transportable Optical Clock", *Nature Phys*. 14, no. 5（2018）：437-41. doi：10.1038/s41567-017-0042-3

4）S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dorscher, S. Hafner, U. Sterr, and C. Lisdat, "Transportable Optical Lattice Clock with 7×10-17 Uncertainty", *Phys. Rev. Lett*. 118, no. 7（2017）：073601. doi：10.1103/PhysRevLett.118.073601

5）G. E. Marti, R. B. Hutson, A. Goban, S. L. Campbell, N. Poli, and J. Ye, "Imaging Optical Frequencies with 100 μHz Precision and 1.1 μm Resolution", *Phys. Rev. Lett.* 120, no. 10（2018）：103201. doi：10.1103/PhysRevLett.120.103201
6）W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schaffer, K. Beloy, D. Nicolodi, R. C. Brown, et al., "Atomic Clock Performance Enabling Geodesy Below the Centimetre Level", *Nature* 564, no. 7734（2018）：87-90. doi：10.1038/s41586-018-0738-2
7）T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, et al., "Systematic Evaluation of an Atomic Clock at 2×10^{-18} Total Uncertainty", *Nature Commun.* 6（2015）：6896. doi：10.1038/ncomms7896
8）F. Riehle, "Optical Clock Networks", *Nature Photon*. 11, no. 1（2017）：25-31. doi：10.1038/nphoton.2016.235
9）M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, and H. Katori, "Test of General Relativity by a Pair of Transportable Optical Lattice Clocks", *Nature Photon*. 14, no. 7（2020）：411-15. doi：10.1038/s41566-020-0619-8
10）J. M. Boss, S. K. Cujia, J. Zopes, L. C. Degen, "Quantum sensing with arbitrary frequency resolution", *Science* 356, no. 6340（2017）：837-840. doi：10.1126/science.aam7009
11）S. Schmitt et al., "Submillihertz magnetic spectroscopy performed with a nanoscale quantum sensor", *Science* 356, no. 6340（2017）：832-837. doi：10.1126/science.aam5532
12）T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "An entanglement-enhanced microscope", *Nat. Commun*. 4（2013）：2426. doi：https://doi.org/10.1038/ncomms3426
13）S. Pirandola, B. R. Bardhan, T. Gehring, C. Weedbrook, and S. Lloyd, "Advances in photonic quantum sensing", *Nature Photon*. 12（2018）：724-733. doi：https://doi.org/10.1038/s41566-018-0301-6
14）Z. J. Wang et al. "Hyperpolarized ^{13}C MRI：State of the Art and Future Directions", *Radiology* 291, no. 2（2019）：273-84. doi：10.1148/radiol.2019182391
15）J. H. Ardenkjaer-Larsen. "On the Present and Future of Dissolution-DNP", *J. Magn. Reson*. 264（2016）：3-12. doi：10.1016/j.jmr.2016.01.015
16）H. Nonaka et al. "Design of a ^{15}N Molecular Unit to Achieve Long Retention of Hyperpolarized Spin State", *Sci. Rep.* 7（2017）：40104. doi：10.1038/srep40104
17）F. Reineri, T. Boi, and S. Aime, "Parahydrogen Induced Polarization of ^{13}C Carboxylate Res-onance in Acetate and Pyruvate", *Nat. Commun*. 6（2015）：5858. doi：10.1038/ncomms6858
18）B. J. Tickner et al. "Optimisation of Pyruvate Hyperpolarisation Using SABRE by Tuning the Active Magnetisation Transfer Catalyst", *Catal. Sci. Technol*. 10, no. 5（2020）：1343-55. doi：10.1039/c9cy02498k
19）L. Bordonali et al. "Parahydrogen Based NMR Hyperpolarisation Goes Micro：An Alveolus for Small Molecule Chemosensing", *Lab Chip* 19, no. 3（2019）：503-12. doi：10.1039/c8lc01259h

2.4 社会インフラ応用

わが国においては、阪神・淡路大震災や東日本大震災を１つの契機とし、さらに近年において頻発する水害などに対する社会インフラの安全性を担保するための課題がより顕在化している。わが国の国土には、国土交通省道路統計年報によれば65000カ所を超える橋梁と１万カ所以上のトンネルが存在し、それらの多くが老朽化の問題を抱えている。欧米諸国でも同様の問題を抱えており、大型橋梁の崩落事故が国際的に報道されている。これらの老朽化施設の補強技術や更新は喫緊の課題である。2021年度には「防災・減災、国土強靱化のための５か年加速化対策」の開始が予定されており、策定が進められているところでもある。

社会インフラは、道路、鉄道、航空機、各種ライフラインなど多岐にわたり、社会インフラを構成する全てについて俯瞰することは不可能である。そこで、本区分では、国土強靱化と産業競争力強化、さらには環境負荷低減の観点から重要な役割を果たす構造材料（金属材料・複合材料）に焦点を当てる。

構造材料は、社会インフラや輸送機器などの大型部材から人体内で使用するステント材料などの小型部材までの広いスケールや用途をカバーし、高い強度・耐腐食性能などによって社会基盤や人命を支える重要な材料である。使用時の荷重や環境に長期間耐えることに加えて、構造体に成形するための加工性や使用時の変形性（例えば、自動車の衝突安全性を担保するためのエネルギー吸収能が一例）など、多様な機械的特性に対して優れた性能が求められる。特に、部材の軽量化に必要な高強度化と成形性などに必要な延靭性はトレードオフの関係にあり、両性能をバランスよく向上させることが共通の課題である。また、長期間の使用により発生する疲労・クリープ・腐食などの長期損傷課題は、人身事故に直結することや経済的な損失が大きいために、社会的に大きな課題である。

代表的な金属系構造材料は、鉄鋼材料である。鉄鋼は、原料資源が豊富で比較的安価に製造できること、相変態や添加元素の活用で幅広い強度レベルが得られること、リサイクルが容易であることなどから、長い間、私たちの生活には欠かせない材料として使用されてきた。また、鉄鋼材料において開発されたさまざまな材料技術は他の材料にも展開されており、技術的・学術的にフロントランナーの役割を果たしてきた。近年、マルチマテリアル化の傾向が強まっており、非鉄金属材料や有機系材料を鉄鋼材料と組み合わせて長所を活かす新たな技術開発が活発に行われつつある。

金属やプラスチック、セラミックスなど２種類以上の材料を組み合わせることによって、個々の材料では持ちえない機能・性能を有する構造材料が複合材料である。特に、繊維状の強化材とマトリックス材を複合化した材料は、均質材料では達成できない高比強度や高比剛性、高耐熱性などの特性を発揮可能である。複合材料による軽量構造材料は、自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへの適用により、省エネルギー、低環境負荷（CO_2 排出量削減）という地球的課題に対して直接的に貢献することが期待されている。

2.4.1 構造材料（金属）

（1）研究開発領域の定義

構造用金属材料に関して、高強度、高靭性、軽量化（高比強度、高比剛性）、耐環境性（耐熱性、耐食性、耐脆化性など）、易加工性、高耐久性（高疲労強度、耐摩耗性など）、環境調和性（リサイクル性、有害物質フリー）などの材料特性の向上、および高品質、低コスト、高生産速度など製造技術の向上をめざす研究開発領域である。

金属組織設計やその具現化を行うプロセス研究、素材や部品の特性を精緻に定量化する評価研究、金属組織と特性の関係を原理的に解明する解析研究などが主なアプローチである。

（2）キーワード

鉄鋼、鋼、非鉄、合金、セラミックス、高強度、高靭性、高比強度、高比剛性、高延性、加工性、接合性、耐久性、軽量性、耐環境性、耐熱性、耐食性、耐摩耗性、耐脆化性、高疲労強度、変形、破壊、腐食、転位、き裂、ナノ組織、ミクロ組織、マルチスケール、計算科学、顕微鏡解析、機械学習

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

金属材料は国内の材料生産の約50%を占めており、その大半はインフラ、輸送、電気、産業機械などに利用されている。これらの産業分野は日本経済、国内雇用を支える製造業の中核であり、鉄鋼などの素材やこれを使用した自動車などの機械製品の輸出は、輸出総額の8割以上を占めている。国内構造用金属材料の高い競争力が日本全体の技術、経済における国際競争力の基盤の1つとなっており、高度成長期以降の工業生産技術や研究開発実績の蓄積で、わが国は当該分野において世界的にも高い競争力を維持している。今後も高い競争力を維持・向上させるためには、他国の追随を許さない高付加価値材料を生み出す技術力の真価を示すことが必要であろう。構造材料のさらなる性能向上は不可欠であり、今後の国力維持のための大きな柱の1つとして一層注力すべき領域である。

また、地球規模の問題であるCO_2削減・省資源に対しては、発電プラント・輸送機器のエネルギー効率の向上、希少資源の使用量抑制やリサイクル性を向上させる技術などにより、低環境負荷の実現と持続性の担保が強く求められている。相対的に使用量が多い鉄鋼材料は、わずかな性能向上でも全体に与える効果が大きく、継続的な取り組みが今後も求められる。

［研究開発の動向］

構造用金属材料に関する最近の基礎研究では、京都大学構造材料元素戦略研究拠点が「プラストン」と呼ばれる新たな格子欠陥の概念を示した。「プラストン」とは力学的に励起された状態の原子集団を指しており、き裂や転位などの格子欠陥に遷移して構造材料の特性に深く関係する。今後は概念の実証や材料設計に繋がる活動への展開が期待される。

また、ハイエントロピー合金（ハイエントロピーアロイ）に関する研究が世界的に流行している。ハイエントロピー合金は、一般的には4～5元系の元素で構成される固溶体を基本とする多元系合金で、原子半径比や化学ポテンシャルの差を巧みに活用して組織制御を行い、強度-靭性・延性バランスの高い材料などが多く発表されており、同時にその機構解明もさかんに行われている。基礎的な機構である固溶体強化の研究に加

え、疲労などのマクロ特性を対象とする研究に展開している。

積層造形（Additive Manufacturing）は、従来のトップダウン型の組織制御からボトムアップ型に変換する画期的なプロセスとして注目されており、米国を中心に活発に行われ、外形制御技術からメタラジー制御へ展開しつつある。わが国の取り組みは内容・規模ともにやや遅れていたが、メタラジー制御に関する取り組みを得意とすることから追い上げを図っている。精度の向上に伴って、積層造形の目的は外形制御から金属材料の特徴である組織制御に移行しつつあり、今後も注目の技術分野である。

以下に、応用について市場ごとに動向を述べる。構造用金属材料の代表的な適用分野は、建設（建築・土木）、輸送（自動車、船舶、航空、鉄道）、産業機械等であるが、国内においては特に建設、エネルギー、自動車、造船分野が主体となる。

建設分野における金属材料の研究に関しては大きな変化はないが、鉄系形状記憶合金を活用した長寿命制振材料の長尺化と溶接技術開発により、ブレース型のダンパーが登場し実装されている。一方、高度成長期を中心に投資されたインフラ、各種構造物の劣化は国家レベルでの課題と認識されており2019年3月末に終了した内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」において、評価対策の技術開発が推進された。本プログラムが対象としたインフラの主体はコンクリートであり、構造用金属材料との関連は議論の中心ではなかったが、今後金属材料とコンクリート双方を考慮したインフラ維持管理・更新マネジメントに関する技術開発が重要となろう。この方向性を議論する目的で、日本鋼構造協会と日本鉄鋼協会は「鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム」を継続的に開催している。また、2018年に開始したSIP第2期課題の1つである「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」も、素材と構造およびその評価や更新に関する情報蓄積、技術開発が期待される。

エネルギー分野では、今後の国内エネルギーミックスにおける火力発電比率が急速にはゼロに近づかない状況を踏まえ、火力発電の発電効率向上をめざした耐熱材料の研究が進められている。JST先端的低炭素化技術開発（ALCA）にてフェライト系、オーステナイト系の超高温耐熱鋼の開発が大きく進展している。一方、実装化のためには、実発電設備における実証実験が不可避であり、火力発電に対する逆風や大型リソース投入の困難さがその進展を妨げている。近未来のCO_2排出削減対応のためにも早急な対応が期待される。

また、発電プラント材料において、日本国内では新規開発の動きは活発でないが、米国NEI（Nuclear Energy Institute）のレポートによるとAMM（Advanced Manufacturing Methods）で製造した部材を原子力発電プラントで使用するための規格承認が検討されている。AMMとしては、Additive Manufacturing、Near Net Shape Manufacturing、Joining/Cladding、Surface Modification/Coatingを項目として掲げている。ジェットエンジン部材の開発においては、日本では前述のSIPが国家レベルの取り組みとして特筆される。個々の技術開発例としては、セラミックエンジンの実現へ道を拓く自己治癒セラミックの開発が注目されている。従来よりも1000倍程度の高速で治癒反応が進行する技術であり、航空機であれば目的地へ到着するまでの間に治癒が完了すると期待される。

自動車分野では、環境調和を考慮した燃費向上をめざした各種技術開発のなかで、車体軽量化素材研究が進んでいる。自動車用鋼板の開発において強度1.5 GPa以上の実用化へ向けた研究開発が新構造材料技術研究組合（ISMA）を中心に進められている。また、鋼材の高強度化のみならず、トポロジー最適化などによる最適設計や部材成型を容易にする加工性の向上などの取り組みも進められている。鋼材と他の材料とを適切に組み合わせるマルチマテリアル化の取り組みも進展している。異種材料の組み合わせを可能にする接合技術が重要な課題となっている。

国際的には、パリ協定で制定された2050年の環境規制基準の達成に向け、ハイブリッド電気自動車

（HEV）・電気自動車（EV）化の傾向が顕著でこれに合わせた新材料技術開発が活発に行われている。欧州では、日本よりも厳しい排ガス規制を掲げ、米国ではカリフォルニア州がZEV（Zero Emission Vehicle）規制を強化、中国でも企業平均燃費（CAFC）規制を強化して、HEVを製品ラインナップに持っていない自動車メーカーは数年後には中国市場から締め出される可能性がある。これに伴い車体の軽量化技術も進んでおり、欧州では鋼材部品のハイテン（高張力鋼）化、Al合金部材の拡大、CFRPを量販車へ採用する傾向がさらに加速している。モーター性能の向上に欠かせない電磁鋼板などの開発では、日本は技術的な優位性を保っていたが、日本の大手自動車メーカーが中国メーカー製の電磁鋼板の採用に踏み切るとの報道があり、高付加価値化の戦略に影響を与える可能性がある。経済産業省の自動車新時代戦略会議では、自動車における環境への影響がwell to wheelで議論されており、2050年までに電動車（xEV）比率を100%にすることを前提とした技術開発が提唱されている。このような流れから環境調和型素材の研究が期待される。 Well to wheelでの総CO_2排出量削減では、金属材料、特に鉄鋼材料への期待が大きく、高強度鋼材の自動車車体への適用が急速に進んでいる。冷間プレスを行う材料では1.2GPa級鋼板の適用が公表されており、熱利用型のプレス加工（ダイクエンチ、ホットスタンプ）では従来の1.5GPaに加えて1.8GPa級の実車適用も報告されている。研究開発としては、冷間でのプレス加工を前提に高強度と高延性を両立させることができる第2、第3世代の高強度鋼板研究が注目されている。 Mn多量添加型の第2世代が経済的に受け入れられないことから、第3世代ではMn添加量を低下させた「中Mn系」での材料開発が進められている。Mnが従来よりも多く添加された合金系でのミクロ組織制御のために新しい熱処理方法（quench and partition：Q&P）が提案され、その最適化の研究がさかんに行われている。実車適用には延性以外にも、溶接性、耐食性、耐久性など多くの特性が要求されると同時に、高いコスト競争力が望まれることから、一層のプロセス改善が期待される。

造船分野においては、各種耐環境性（低温用、耐食性、高靭性等）とコンテナ船等の大型化対応等、従来のトレンドが継続すると同時に、洋上衝突や座礁などによる海洋環境被害低減のための衝突安全性という新たな市場ニーズが提案されている。タンカー等の衝突時の破孔抑制に寄与する高延性厚板の開発と実用化も報告されており、SDGsへの対応の1つとして注目される。

以上のように、各市場の構造用金属材料開発は着実に進展している。これらの研究開発を支える技術の1つが材料工学と情報工学を融合させたマテリアルズインテグレーション（Materials Integration：MI）であり、要求特性から材料・プロセスをデザインする逆問題MIの手法を開発するSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」に対する期待は大きい。本SIPではMIによる材料開発手法の革新を目標に、産業用発電プラント、航空機機体・エンジン等の材料開発をターゲットとしている。また、JST戦略的創造研究推進事業CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」・さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」が今後の高機能構造用金属材料開発の基盤になるものと考えられる。各種機能発現のためには、ミクロ・ナノレベルでの組織解析技術と材料評価技術が重要となる。従来のSEM、TEM、3Dアトムプローブ等に加え、高エネルギービームや高輝度X線などを利用した微量化学分析技術、空間分解能向上、in-situ観察、さらには3D・4Dの観察技術開発が進められており、今後の材料開発に大きく貢献すると期待される。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

材料設計の指針に関する大きな潮流としては、従来の経験的手法から脱却する2つの方向性が中心である。

1つは情報科学的アプローチ、もう1つは、特性発現の機構解明を徹底的に行う原理・原則アプローチである。

情報科学的アプローチは、米国のMaterials Genome Initiativeが契機となってわが国でも活動が活発化した。膨大な実験結果などから機械学習やMIなどの技術を用いて入出力情報の相関を高精度で求めることにより、いわば究極の経験則を求める手法といえる。一見すると、経験則からの脱却という方針と矛盾するように思えるが、相関関係の確立から物理モデルの精度が上がるなどの効果も期待されており、活用方法によっては総合的に優れた結果をもたらす可能性がある。また、このアプローチで欠かせないのがデータ精度の向上である。優れた計算手法があっても、その元となる実験データの精度が低いと出力の精度が上がらない。精度が高く網羅的なデータベースを充実させることが、競争力強化の鍵である。

原理・原則アプローチは、実験解析や計算機モデリング技術に大きく依存する。材料の特性発現の素過程を微視的にとらえる組織学的・力学的計測手法の高度化が必須であり、3次元アトムプローブ、TEMトモグラフィー、ナノインデンテーションなどの手法をより高度化することが望まれる。計算科学の手法においては、空間・時間スケールの連続性や物理モデルの相関性を高度化した、いわゆるMulti-Scale、Multi-Physicsの取り組みが重要になると考えられる。

構造用金属材料の変形挙動のマルチスケール的研究は長い期間継続されている研究分野であるが、結晶塑性、フェーズフィールド、有限要素法（FEM）といった手法に加え、大型の数値計算プロジェクトが進み、これまで小領域のみで可能であった理論計算が比較的大領域でも可能となった。計算物質科学人材育成コンソーシアム（PCoMS）等による専門家の育成プロジェクトと相まって今後大きな戦力となることが期待できる。また、実験においてはミクロな変形挙動が「不均一」であることを前提とした各種観察技術開発が進み、DIC（Digital Image Correlation）とEBSD（Electron Back Scattered Diffraction Pattern）を組み合わせたサブミクロンオーダーでの局所変形挙動や破壊挙動の検討が進んでおり、計算科学との組み合わせで、金属材料の変形・破壊挙動の理解が一層深まることが期待される。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

データ駆動型材料開発のプロジェクトが国内外で活発に展開中である。先駆けとなった米国のMaterials Genome Initiativeに加え、欧州のEuropean Centres of Excellenceの一環として進められているThe Novel Materials Discovery（NOMAD）があり、また、中韓も同様の取り組みを進行中である。日本国内では、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI^{2}I）やSIP「革新的構造材料」などのプロジェクトにおける取り組みがあげられる。多くの材料に対してデータ駆動型材料開発のアプローチが研究されているが、構造材料に特有の問題として「階層構造性」がしばしば議論される。構造材料の性能が発現する機構として、Processing-Structure-Properties-Performanceの相互関係が鍵であるとする考え方である。この階層性は、入力情報であるProcessingから出力情報であるPerformanceを得る過程を複雑にするため、構造材料領域でデータ駆動型材料開発を成功させる難度は高いと考えられている。

（5）科学技術的課題

構造材料が使用される条件は、静的・動的力学条件、温度・雰囲気などの環境によって極めて多岐にわたる。これらの条件に対して材料設計の最適化を行うためには、単独の領域の知見によるアプローチでは限界があり、分野を横断する総合的な取り組みが求められる。

例えば、将来的に水素利用が発展するためには、水素を貯蔵・運搬する技術が不可欠であるが、水素が関係している水素脆性は構造材料の分野で古くて新しい課題である。未だに確立された理論はなく、したがって

対策も経験則に頼らざるをえない。素過程として考えられる水素発生・侵入は電気化学的なアプローチ、伝播経路やトラップサイトは金属組織・結晶学的なアプローチ、そして亀裂の発生や伝播は機械工学的なアプローチがそれぞれ対応する領域である。これらの異なる領域が相互に効果的に結びつく取り組みを行わない限り、最適解は得られないと考えられる。

また、使用条件の多様性に対応してより高性能化を図る方法として、負荷の大きい方向の強度を特に上げるなどの異方性制御の考え方も有効である。異方性制御には、例えば積層造形による集合組織などの組織制御手法や、異方性の強い異種材料を適切な方向に組み合わせるなどのアプローチが考えられる。異なる強度特性の組み合わせの１つとしてバイモーダル粒径制御が提案されているが、この手法にもさらなる高度化の余地があると考えられる。複雑化する組織因子の予測技術も重要である。これに対応するためには、例えば材料横断型モデリングの高度化が必要と考えられる。実験科学と計算科学の結びつきも大変重要である。例えば、鉄鋼材料とプラスチック材料を接合して使用する場合、全体の力学的な挙動は熱活性化過程などの確率論的なモデルが支配的であるのか、力学条件が決まれば挙動が決まる決定論的なモデルなのか、などの課題がある。変形や破壊の機構を材料の縦割りで議論する取り組みでは最適解を得ることは難しい。

金属材料は塑性変形能が高く、局所的な領域における塑性変形能と破壊限界の競合を評価することで、破壊特性も含めた金属材料の高機能化が可能となる。このためには、局所的不均一変形挙動の実験的評価（高エネルギービーム、X線、DIC、EBSD、3Dアトムプローブ、TEM、SEM、in-situ観察等）と数値計算手法（フェーズフィールド（特に3D化）、結晶塑性、FEM、第一原理計算、分子動力学等）を組み合わせてミクロな特徴からマクロな材料特性を評価する方法の確立が必要となる。これはマルチスケールによる評価として従来から注目されているが、いかに実現するかはこれからの課題といえる。

（6）その他の課題

多様化するニーズに応える最適解を得るには、分野融合の取り組みが欠かせない。わが国の学問・技術分野は、それぞれに長い歴史や伝統を持っているために、自発的な融合は難しいといわざるを得ない。これを打破するためには、短期的には政策的な誘導によって共通課題に取り組むプラットフォームの設定が有効だろう。ただし、そのためには複数の分野を俯瞰できるコーディネーターの存在が不可欠である。この人材は短期的に生まれるものではなく、大学などにおける教育システムから変革する必要も考えられる。例えば、物理・機械・材料は互いに関係が深い分野であるが、大学では学科の縦割りによってこれらを総合的に学ぶ機会が必ずしも多くない。１つの分野を深く極める専門性に加えて、１つの現象を複眼的にとらえられる能力を養う取り組みが今後の人材育成に求められる要素といえる。

産業界と学術界の連携は必須であるものの、各々の役割、分担は明確にされる必要がある。双方が同じ価値観で同一ターゲットをめざすことは、国全体としての研究開発が単色的になる危険性をはらんでいる。産業界は今日・明日の実用化、収益確保に必要な研究開発を主体とし、現時点で出口（商品化や実プロセス化）が明確でない課題にリソースを投入することは容易ではない。一方、多くの場合、出口が見える課題は企業ごとの事業計画とのリンクが強く、公的な立場の学術界が直接関与することは望ましくない場合がある。学術界では、蓄積する知識が将来の（現時点では認識されていない）産業界でのニーズに寄与する可能性を考慮して、極力広範囲での基盤現象の把握、長期的な知識の蓄積や世代を超えた研究継続が重要である。このためには、現時点でのブームやトレンドのみにとらわれない研究課題選択および実行が可能な施策（予算、マンパワーの確保）が求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	新学術領域研究で構造材料関連の複数の課題が同時に進行中であり、基礎的な取り組みは高いレベルを維持している。
	応用研究・開発	○	→	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」や内閣府SIP「革新的構造材料」における取り組みで、自動車・航空機向け材料の開発が推進されている。
米国	基礎研究	◎	→	NSFの工学、数学・物理学分野予算は微減ながら相対的に大きな規模を維持している。論文引用数でも世界トップレベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	Advanced Manufacturingプログラムを政府主導で推進中である。積層造形、軽金属、複合材料などが課題化された。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ、英国を中心に質の高い論文を創出する活動は依然として活発に行われている。しかし、他の各国のレベルは個人研究者に依存している。
	応用研究・開発	◎	↗	EV化のトレンドが世界でもっとも進んでいる地域の1つで、これに関連する産学官連携が活発に行われている。
中国	基礎研究	○	↗	論文数・質ともに上昇傾向が著しい。材料科学全般の被引用数top10%論文のシェアでは米国を上回っている。
	応用研究・開発	○	↗	日本の大手自動車メーカーが電磁鋼板の一部を中国の鉄鋼メーカーから調達するとの報道があり、応用研究・開発の向上を意味している。
韓国	基礎研究	○	→	大学・国研を中心に活発に行われているが、中国との競争でやや苦境に立たされている。
	応用研究・開発	○	→	高いレベルで推移しつつも、力点を置いたMg板材の開発では経済的に大きな成果を上げられず、方針転換を迫られている。
東南アジア地域	基礎研究	○	↗	インドネシア・マレーシア・タイなどの東南アジア地域から日本など東アジア各国への留学生数が増える傾向にあり、人材育成の取り組みがさかんである。
	応用研究・開発	△	→	基盤となる自国企業がまだ創出されておらず、外国企業の進出によって技術力を向上させている段階である。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・破壊力学（環境・エネ分野　2.1.17）
・構造材料（複合材料）（ナノテク・材料分野　2.4.2）

参考・引用文献

1) N. Tsuji, et al., “Strategy for managing both high strength and large ductility in structural materials–sequential nucleation of different deformation modes based on a conceptof plaston”, Scripta Mater. 181（2020）：35-42. DOI： 10.1016/j.scriptamat.2020.02.001
2) T. Osada, et al., “A Novel Design Approach for Self-Crack-Hearing Structural Ceramics with 3D Network of Hearing Activatior”, Scientific Report 7（2017）： 17853-17861. DOI：10.1038/s41598-017-17942-6
3) Ishiuchi K, et al., “Application development of the high formability 1.2GPa ultra high strength steel”, Proceedings of JSAE meeting（2013）：No. 76-13, 20135420, 9-11
4) 匹田和夫他：「TS1800MPa級ホットスタンプ用鋼板の開発」『まてりあ』52巻２号（2013）：68-70, DOI：doi.org/10.2320/materia.52.68.
5) Speer J G, et al., “Carbon partitioning into austenite after martensite transformation”, Acta Materialia 51, no. 9（2003）：2611-2622. DOI：org/10.1016/S1359-6454（03）00059-4
6) 市川和利 他「高強度・高延性鋼による油タンカーの衝突安全性向上」『まてりあ』57巻１号（2018）：14-16, DOI：org/10.2320/materia.57.14.
7) M. Cohen, “Unknowable in the Essence of Materials Science and Engineering”, Materials Science and Engineering 25（1976）：3-4. DOI：10.1016/0025-5416（76）90043-4
8) G. B. Olson, “Computational Design of Hierarchically Structured Materials”, Science 277, no. 5330（1997）：1237-1242. DOI：10.1126/science.277.5330.1237
9) Y. Wang, et al., “High tensile ductility in a nanostructured metal”, Nature 419（2002）：912-914. DOI：10.1038/nature01133

2.4.2 構造材料（複合材料）

（1）研究開発領域の定義

金属やプラスチック、セラミックスなど2種類以上の材料を組み合わせることによって、個々の材料では持ちえない機能・性能を有する構造材料の創出をめざす研究開発領域である。特に、繊維状の強化材とマトリックス材を複合化した材料は、均質材料では達成できない高比強度（引張強さ/比重）や高比剛性（剛性/比重）、高耐熱性などの特性を発揮可能であり、代表的な材料には炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、セラミックス基複合材料（CMC）、セルロースナノファイバー複合材料などがある。

（2）キーワード

複合材料、炭素繊維強化プラスチック、炭素繊維、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、SiC繊維、セラミックス基複合材料、セルロースナノファイバー、CNF、高比強度、軽量化、プリプレグ、樹脂含浸成形法、RTM、CFRP、GFRP、SiC/SiC、CMC、MMC

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

複数の異なる材料の複合化によって、均質材料では達成できない特性を発揮する複合材料は、目的に応じて設計可能な材料ともいえる。省エネルギー、低環境負荷（CO_2排出量削減）という地球的課題に対して、軽量高強度を実現する複合材料は自動車、航空機、風車発電等、輸送・エネルギー分野への適用により、その解決に直接的に寄与する。なかでも、繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics：FRP）は高比強度、すなわち強くて軽い、という点で金属材料に大きく優り、さらに理想的には、構造物にかかる荷重の分布に合わせて繊維（強化材）を配置することで、より効率的な材料として機能しうる。一方、金属材料と比較して現状では高価格であり、信頼性、加工性、生産性等にも課題が多いことから、まだ金属系構造材料ほどには普及していないのも事実である。また、セラミックス基複合材料（Ceramics Matrix Composites：CMC）や金属間化合物に関する技術革新は、材料の軽量性と耐熱性を向上させ、航空機用エンジンの高効率化に大きな期待が寄せられている。さらに、航空機分野に比べて市場規模は小さいものの、宇宙分野においても特殊環境下で高信頼性が維持された材料の候補として、複合材料への期待が高まっている。さらに、再生産可能な資源の有効活用および石油資源からの脱却の観点から、強化材としてセルロースナノファイバーが注目を集め、産学官での取組が活発化している。

［研究開発の動向］

一般に、複合材料は強化材としての繊維と母材としてのマトリックスから構成され、前者は炭素、ガラス、セラミックス、セルロース、後者は樹脂、セラミックス、金属が代表的である。実用化された複合材料のなかではFRPがもっとも普及しており、FRP にはガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics: GFRP）と炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP）がある。もっとも使われているのはGFRPであり、その用途は主には浴槽・浴室ユニット等の住宅機材、他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。一方、CFRPはGFRPの数倍の比強度を有するが、高価であるため、一般的な用途はスポーツ用品等に限定されてきた。しかし近年、輸送機器への適用により、CFRPに対する注目度が高まっている。その代表例が航空機であり、例えばボーイング787の機体構造重量の約半分がCFRPである。

エアバスA350においても複合材は 53%と、主翼、胴体、尾翼など主要部位に採用されている。また、自動車についても、2013年11月にドイツBMW社は、世界で初めてCFRPを車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を発売した。加えて、2017年にはトヨタ自動車「プリウスPHV」の新モデルのバックドア骨格にCFRPを採用したことが発表された。

CFRP技術開発は素材開発と成形技術開発に大別される。素材については、炭素繊維にアクリル繊維を使用する PAN系、ピッチを使用するピッチ系がある。いずれも日本発の技術であり、その生産量のおよそ6割超を日本メーカーが占める。前述のボーイング787の場合も、CFRPの70%が日本メーカーにより製造されている。

また、炭素繊維は用途・成形法により、長（連続）繊維と短繊維が使い分けられている。炭素繊維はアクリル繊維を空気中・高温で耐炎化（焼成）して製造するため、高コストかつ高CO_2排出であり、その大幅改善が求められる。一方、樹脂には熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂があり、これらも用途・成形法により使い分けられている。

成形法については、プリプレグ（強化繊維の織物に樹脂を含浸させたシート状の中間基材）をオートクレーブ（圧力釜）にかける方法が代表的であり、高強度、高剛性かつ品質安定性に優れる。一方、高価であり、成形性、生産レートに難があるため、用途が限定される。例えば航空機のように高価な材料の適用が認められやすい場合でも、主翼、胴体という主構造を除く尾翼、ドア等には、新たな成形法が望まれる。その候補は脱オートクレーブ成形法であり、プリプレグを用いる方法とRTM（Resin Transfer Molding：樹脂含浸）成形法がある。 RTM成形法は繊維のみをあらかじめ積層し、その後に樹脂を含浸させるので高価なプリプレグが不要となる。これは1970年代に国内において確立されたが、その発展形であるVaRTM成形法（真空樹脂含浸成形法）は低温で樹脂含浸を行うもので、より低コスト化が可能となる。脱オートクレーブ成形法の最重要課題の1つはボイドの低減である。

さらに、自動車のように、安価かつ成形性、高生産性がより一層重視される生産には、プレス成形、射出成形等が適している場合が多い。以上の成形法を高性能かつ高コストの順に並べると、オートクレーブ、RTM、プレス成形、射出成形となる。このとき、最適な素材の組み合わせも成形法に依存する。繊維については、オートクレーブ、RTMには長繊維、プレス成形、射出成形には短繊維が用いられる。一方、樹脂は、オートクレーブ、RTMには熱硬化性樹脂、射出成形には熱可塑性樹脂、プレス成形には両方の樹脂が候補となりうる。なお、樹脂については、必ずしも成形性、生産性だけを考慮して使い分けることにはならない。例えば、航空機エンジンのファンに適しているのは熱可塑性樹脂と考えられているが、これはバードストライクに対する耐衝撃性が熱硬化性樹脂より優れているためである。ただし同じエンジン部品でも、圧縮機のより高温部（最高でおよそ300℃）に適用可能なCFRP開発の場合、温度特性から熱硬化性樹脂が適当と考えられている。

FRP以外の複合材料には、金属、セラミックスをマトリックスとする金属基複合材料（Metal Matrix Composites：MMC）、セラミックス基複合材料（CMC）がある。なかでもCMCは①酸化物系CMC、②非酸化物系CMCに大別され、非酸化物系CMCであるSiC/SiC CMCはNi基超合金を超える軽量耐熱材料として、民間航空機用エンジンの部品にGE社により実用化されている。このために、プラット・アンド・ホイットニー（P&W）社やロールス・ロイス（RR）社においても開発が急速に進められている。国内重工業メーカーにおいても航空機用エンジン部品用の開発が進められ、この他にも、地上発電用エンジン部品や原子力発電に用いられる燃料棒への用途開発が行われている。

SiC/SiC CMCは、用途に応じた実用材料への選択と集中が行われ、ここ数年間は実使用環境下で生じる問題を解明し、材料の性能向上に活かすという視点からの研究開発が行われてきた。複合化形態は、SiC繊

維の織物にマトリックスとしてのSiCを含浸させたものやSiC繊維を並べたものを積層した繊維構造を持つもの、繊維とマトリックス間界面のコーティングにはBNが用いられ、航空機用としての部品製造技術にはMI法と呼ばれる溶融Siと炭素の反応を利用してSiCを生成させる方法を利用した製造技術が国際的に多数を占めるようになった。さらに、酸化物系、非酸化物系を問わず、損傷許容性を利用した部品設計の考え方や、使用環境下でのクリープや疲労、あるいは両者が混合した環境などにおける長時間耐久性などへ関心が移行した。特に、SiC/SiCでは2700°F級材料としての期待から、1400℃での実使用に耐えるマトリックス材料の改質や使用環境に応じた耐環境コーティング（Environmental Barrier Coating：EBC）の開発も行われている。材料の汎用化という観点からは、現段階では、CMC全般の課題として部位コストに占める製造コストの割合が大きく、低コストプロセスを完成させることが重要と考えられている。また、部材としての実使用に耐える信頼性評価方法の構築や使用時の劣化の定量検出、使用環境下でのバーチャルテスト技術の確立が開発を加速するための技術ツールとして望まれている。今後は、実用化に伴って発生する信頼性確保技術や使用時の劣化診断技術等の構築に必要な、基礎から応用にいたる広範囲な技術の開発と適用が望まれる。

近年、持続性という観点から再生可能かつ生物由来の有機性資源であるバイオマス素材が注目されている。その1つとしてセルロースナノファイバー（Cellulose Nano Fiber：CNF）を強化繊維として用いる複合材料開発に向けた動きが活発化している。CNFは、木材などの植物中から得られるパルプをナノレベルまで解きほぐしたものであり、鉄の5倍の強度で1/5の軽さ、熱膨張率は石英ガラス並という特性を持っているため、樹脂などと複合化することで軽量高強度複合材料や軽量で熱寸法安定性の高いプリント基板への利用が期待されている。また、CNFの原料であるセルロースはあらゆる木材や植物から抽出可能であるため、資源枯渇の心配がないことも特徴である。一方、CNFは表面に水酸基が多数存在するため親水性が極めて高く、疎水性の石油由来の樹脂と複合化するには表面を化学処理する必要があるため、製造コストが高いという問題がある。そのため、現状では機能性添加剤として親水性CNFを用いた大人用おむつや液だれ防止のボールペンインク、エコタイヤの部材、食品容器、歯磨き剤などでの実用化に留まっている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

複合材料全般で注目すべき技術の1つがデータサイエンスの導入である。材料成形プロセスあるいは材料種の選択等に、AIやビッグデータといったデータサイエンスの適用が進められている。今後はより広範囲での利用が期待される。また、モデリング・シミュレーションの研究開発も、成形時の樹脂挙動、成形品の機械的特性等を高精度で予測するために重要である。これらとデータサイエンスが融合することで、複合材料におけるSociety 5.0が構築されることが予想される。

CNFに関しては、オールジャパン体制でナノセルロース（セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル、およびそれらを用いた材料の総称）の研究開発、事業化、標準化を加速するための産業技術総合研究所コンソーシアム「ナノセルロースフォーラム」が2014年6月に発足したが、2020年3月に発展的に解消した。その後、新たに企業主導の「ナノセルロースジャパン（NCJ）」が発足し、木材、製紙、化学・樹脂、自動車、電気・電子製品など幅広い分野から約100社の企業、45名の企業等の個人会員、101の特別会員（大学、国研、公設試験所、県や市のメンバー等）、省庁のオブザーバーが参画している。並行して、東海、近畿、中国、四国などの地域においてもナノセルロースに関する研究会やコンソーシアムが活発に活動している。CNFの社会実装に向けた産官学のダイナミックな動きは、ますます活発化すると考えられる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

• CFRP

日本は炭素繊維の生産では世界市場で圧倒的な強さを維持しているが、成形技術においては、米国、ドイツが日本と同等以上とみられる。主に、米国は航空、ドイツは自動車を対象としてその技術を磨いている。代表的な研究開発拠点として、米国ではデラウェア大学、ドイツではフラウンホーファーのICT（化学技術研究所）、IFAM（生産技術・応用マテリアル研究所）があげられる。また、英国のブリストル大学を中心とするNCC（国立複合材料センター）も、航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。国内では、NEDO「革新的新構造材料等研究開発」（2014～2022年度）、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」（2014～2018年度）がある。前者が主に自動車向け、後者が航空機向けであり、成形技術等の開発が行われている。2018年度より開始されたSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）においては、上記SIP「革新的構造材料」で開発してきたマテリアルズインテグレーション（MI）の素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型MIシステムを世界に先駆けて開発するとともに、MIを活用して、競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立に取り組み、発電プラント用材料や航空用材料等を出口に先端的な構造材料・プロセスの事業化をめざしている。また、NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」（2015～2020年度）は、製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている。NEDO「次世代構造部材創製・成形技術開発」（2020～2021年度）においては中小型機の低コスト・高レートな成形組み立て技術をめざし、設計から製造までを一貫して取り組んでいる。なかでも、高レート生産に適した熱可塑性複合材の積極利用に、その特徴がある。

• SiC/SiC CMC

上記SIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」においては、CMCの研究開発に役立つシミュレーションツールも作成し、国内の重工業3社が参画している。NEDO「次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト」では1400℃級CMC材料の実用化研究開発、高レート・低コスト生産可能なCMC材料およびプロセス開発が行われている。さらに、NEDO「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」（2020～2023年度）では航空機エンジンの燃費改善に寄与するCMCの信頼性・品質保証手法の開発に関する研究が開始され、そのなかでCMCの信頼性保証技術開発として、疲労寿命に関する研究が行われている。米国においては軍や企業からの支援によりCMCの広範囲な技術分野で研究開発が行われている。最近では、特定の企業と特定の大学間の連携が強化されている。フランスではボルドー大学、ドイツではフラウンホーファー、英国ではバーミンガム大学などが企業との密接な関係を持ち公的資金ならびに企業からの支援により研究開発を行なっている。

• CNF

軽量・高強度・低熱膨張などの特性を示すCNFは次世代のグリーンナノ材料として注目を集め、2004年以降、論文数や特許数が増加している。その中心となっているのは、森林資源が豊富で製紙産業がさかんな北欧、北米、日本である。近年、中国のキャッチアップも無視できない状況にある。2011年からはフィンランド、カナダ、米国の主導で国際標準化の議論も始まっている。国内における研究プロジェクトとしては、CNFを活用することで自動車の10%軽量化をめざした環境省「NCV（Nano Cellulose Vehicle）プロジェクト」（2016～2019年度）があり、京都大学をはじめとする21の大学、研究機関、企業等のサプライチェーン

で構成される一気通貫のコンソーシアムが設立された。それらの成果として2019年10月に開催された東京モーターショーでは、NCVが展示され、国内外から大きな関心を集めた。同モーターショーではCNFを用いた自動車用エコタイヤも展示された。 JST未来社会創造事業「低炭素社会」領域（土肥義治分科会長）では、次世代ナノセルロース材料を創製するための階層構造制御技術に関する研究テーマ2件が採択され、2018および2019年度から実施されている。また、NEDO「炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発」（2020～2024年度）では関連するテーマを募集し、2020年度には関連技術開発と安全性評価の合計14件を採択している。特にNEDOプロジェクトでは、CNFの使用量増加と、それに対応して石油系プラスチックの使用量の減少が期待されるCNF/高分子複合化に関するテーマが主体となっている。これまでは、親水性のCNFを疎水性の高分子基材に凝集させることなく均一に複合化させることが課題であった。 NEDOプロジェクトではこれらの課題をCNFの表面改質や複合化技術、各種添加剤との組み合わせによって克服することを主眼としている。その結果、CNF含有高分子複合材料の物性の向上と均一性が達成され、耐水性、耐湿性、長期安定性等の付与技術を構築し、各種高機能材料および汎用材料への利用量拡大をめざしている。

また、複合材料に特化したものではないが、文部科学省における2019年度戦略目標「ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性発現機構の解明」の下に設定されたJST戦略的創造研究推進事業CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」（研究総括：伊藤耕三・東京大学教授、2019～2026年度）およびさきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」（研究総括：北村隆行・京都大学名誉教授、2019～2024年度）において、複合材料のフィラーとマトリックス間のナノスケール界面の解析・制御をはじめとする力学特性発現機構の解明が行われている。

（5）科学技術的課題

CFRPの材料・プロセス技術の進化に伴い、その特長を最大限に活かす構造の設計技術の要望も高まっている。 CFRPはブラックメタルとも呼ばれるが、それは肯定的な意味とはいえず、いまだに金属材料の代替材料という位置づけから脱していない。これまでほとんどの場合、構造設計は金属材料（機械的特性が均一）を前提としたままで適用されてきた。部材内部で機械的特性の分布を変化できることがCFRPの強みであり、それを活かした設計・成形技術により、さらなる軽量化、ひいては省エネルギー、コスト削減が期待される。

さらに、切削等の二次加工技術の進歩も不可欠である。3次元・複雑形状に対して前述の成形技術開発が進められる一方、穴あけ等は成形時に行うことは困難である。併せて、接合技術の重要度も増している。CFRPが全ての特性において金属材料に優るわけではないため、鉄鋼、アルミニウム合金、チタン合金等の異種材料と組み合わせたマルチマテリアル構造が最適な場合もある。そのための異種材料接合技術がキーテクノロジーの1つとなる。例えば、金属材料と同等にボルト接合を行うことは、（一次）部材成形に加えてさらにコスト増加の要因となる。そこで、接着剤による接着に大きな期待が寄せられる。これは既に構造物に多用されている技術ではあるが、主たる荷重を支持する部分に用いられるほどの信頼性は確保されていない。

また、CFRPをはじめとする複合材料の特長を十分に発揮するためには破壊機構の解明が不可欠であるが、まだ十分とはいえない。結果的に、CFRPにおいては板厚を増す、接着とボルト接合を併用するなど、軽量化を犠牲にして安全率を高くする構造を選択する場合が多い。複合材料部材の寿命等、パフォーマンスの評価方法の標準化およびその認証に関する取り組みも併せて重要である。加えて、航空機等向けの大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術においても、欧米に遅れをとっており、キャッチアップが求められる。

複合材料の研究開発においては、構造設計と材料設計が一体となって行われることが多く、研究者も機械工学系が多い傾向にある。しかし、特に、破壊機構、接合の研究を通してさらに進化させるためには、繊維/樹脂間、接合面等の界面の解析・制御をはじめとする、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学工学系との協働の促進が求められる。特にCFRPは炭素を主体とする材料であるため、金属系、セラミックス系と比較して、物理解析技術を適用しにくいことが障壁になっている。その進歩がCFRPの進歩に大きく寄与することは間違いない。

また、成形に関する設備導入コストが膨大であり、新規参入の障壁が高いことも課題の1つになっている。このため、利用方法は従来の金属の延長線上にあり、ブラックメタルとも揶揄されるが、3次元プリンターはその参入障壁を下げる契機になる可能性がある。具体的には、連続繊維を利用できる小型の3次元プリンターが数百万オーダーで購入可能であり、これにより、より自由度の高いプロダクツの製造が可能となる。 CADあるいは各種設計ツールとの連携もスムーズであり、データサイエンスの適用も期待できる。

CNFによる軽量・高強度高分子複合材料開発では、親水性のCNFを疎水性の高分子基材中に均一に分散させる技術の構築、そのメカニズム解析、分散状態の定量的評価方法の開発が求められている。繊維強化高分子複合材料の強度は、その繊維のアスペクト比（長さ/幅の比率）に支配されるため、幅が細く、長さが長いCNFを高分子基材中で複合化できれば、低添加量でCNFの親水性、耐水性の低さ、耐湿性の低さの欠点が現れることなく、軽量高強度高分子複合材料に変換できる。そのためには、CNFの表面改質、添加剤によるCNFのその場表面改質、および適正な複合化技術の構築が必要となる。それらを達成することで初めて、バイオマス由来のCNFの大量利用が可能となり、その先に石油資源の使用量の削減、大気中の二酸化炭素の削減、地球温暖化防止、異常気象防止、海洋マイクロプラスチック問題の解決へとつながる技術となり得る。

（6）その他の課題

航空機産業はCFRP、SiC/SiC CMCの今後の巨大ユーザーと期待されるが、機体はボーイング、エアバス、エンジンはP&W社、GE社、RR社と、米欧メーカーが圧倒的に強い。したがって、彼らの動向を常に注視し、彼らの開発スケジュールに合わせて新技術等を提案する必要がある。標準化についても同様である。さらに、採用までの所要時間を短くするために、日本国内に認証機関を持つことも重要である。これらは、まさに府省連携、産学官連携で取り組まなければ、目標達成は極めて困難である。その際、連携の中核となる拠点形成も必要となる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学、国研による、CNTベースのナノコンポジット、繊維/樹脂界面の解析・制御の研究開発。 ・大学中心の、植物由来原料によるCFRP素材、セルロースナノファイバー関連の開発。 ・国研中心の、耐熱CFRPの開発。 ・2017年に東京工科大学内にCMCセンターを設立。 ・セルロースナノファイバーに関する基礎研究が東大、京大、九大を中心に活発化

	応用研究・開発	◎	↗	・経産省「革新的新構造材料等技術開発」による自動車用CFRP成形技術開発。 ・「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」による構造ヘルスモニタリング技術の開発。 ・内閣府SIP「革新的構造材料」による、航空機用CFRP脱オートクレーブ成形技術、強靭性オートクレーブCFRP材料開発。 ・航空機エンジンメーカー中心の、高性能・高生産性SiC/SiC CMCの開発。 ・宇部興産がSiC繊維を製造できる技術を有する。 ・ほぼ全ての製紙産業と一部の化学産業がナノセルロースの製造と応用展開を進めている。 ・産総研のコンソーシアム「ナノセルロースフォーラム」の後継として、企業主導の「ナノセルロースジャパン」が発足し、ナノセルロースの実用化をめざした情報交換の場として機能。
米国	基礎研究	○	→	・Materials Genome Initiativeの下での計算材料科学による材料設計。 ・CNTなどを用いたナノコンポジットなどの基礎研究。農務省林産物研究所や大学で、数種類のナノセルロースを製造し、企業にサンプル提供。 ・CMCの応用に伴って発生した課題解決のための基礎研究が産学連携体制で開始。
	応用研究・開発	◎	↗	・デラウェア大学複合材料センターによる、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発。 ・エジソン溶接研究所（EWI）による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。 ・DOE/IACMIプログラムによるCFRP材料・成形技術、および成形・損傷シミュレーション技術。 ・1m級の酸化物系CMCを製造できる企業が存在。 ・GE社およびP&W社ではSiC/SiC CMCを航空機エンジン材料としての応用展開が進展。 ・ナノセルロースの先端材料への実用化をめざしたベンチャー企業が存在。
欧州	基礎研究	○	→	・ナノコンポジット、ナノ繊維強化プラスチックの研究への巨額の公的投資。 ・主に北欧では、国研や大学を中心にセルロースナノファイバーの基礎研究が活発化。 ・CMC用強化素材とCMC信頼性保証技術の基礎研究が進展。
	応用研究・開発	◎	↗	・ドイツ連邦教育研究省（BMBF）のファンディングによる「マルチマテリアルシステム」における複数構造材料の組み合わせによる車体軽量化技術開発。 ・フラウンホーファー化学技術研究所（ICT）による、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術の開発。 ・フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所（IFAM）による、大型部材の 生産・検査自動化技術、接合・接着技術（異種材料間含む）の開発。 ・ドイツCFK-Valley Stade、MAI Carbon ClusterなどによるCFRP成形技術拠点。 ・ドイツではすでにCF/SiC CMCを軽量耐摩耗材料として自動車やオートバイのブレーキローターに使用している。 ・産官学の連携体制が強化され、CMC開発拠点を形成。 ・英国溶接接合研究所（TWI）による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。 ・英国（EPSRC）の高価値センター“CATAPULT”プロジェクトによる、ブリストル大学中心の産学官コンソーシアムの航空機向けCFRP研究開発拠点、国立複合材料セン ター（NCC）。 ・製紙産業でナノセルロースやミクロフィブリル化セルロースの製造・販売を開始。プラスチック容器に代わる環境適合型食品容器分野をターゲットにしている。

中国	基礎研究	○	→	・日本のISMA、SIPに相当するような国家プロジェクトは持たないが、政府は有力大学へ個別に研究資金を提供している。特に国家支援の航空機メーカーであるCOMACが関係したものが多く、豊富な資金力で、欧米からの購入により設備、ソフトを揃えている。 ・セルロースナノファイバーに関しては、学術的な論文は多数発表されている。関連学術論文の約半数が中国発。
	応用研究・開発	◎	↗	・1960年に国家建材局の下に4研究所を設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。 ・航空機、電気自動車、風力発電用の応用開発に多額の資金投資中。 ・紙以外の用途に対するナノセルロースの研究開発はさかんではない。 ・SiC繊維の特性向上研究および国内製造・実用化が進展。
韓国	基礎研究	△	↗	・日本のISMA、SIPに相当するような国家プロジェクトはない。個々の研究者による研究が中心。 ・ナノセルロースに関する論文数が増加傾向にある。先端分野への応用研究が主体。
	応用研究・開発	○	→	・2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化。 ・韓国材料科学研究所（KIMS）による、大型FRP部材（風力発電ブレードなど）の性能評価。他に韓国炭素収束技術研究所（KCTECH）による自動車向けCFRPの開発がある。 ・一部の企業がナノセルロースをサンプル提供している。日本のナノセルロースフォーラムのような組織の設立を検討中。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- 破壊力学（環境・エネ分野　2.1.17）
- 構造材料（金属）（ナノテク・材料分野　2.4.1）
- 元素戦略・希少元素代替技術（ナノテク・材料分野　2.5.2）
- マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野　2.5.3）
- 複雑系材料の設計・プロセス（ナノテク・材料分野　2.5.7）
- ナノ力学制御技術（ナノテク・材料分野　2.5.8）
- 物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野　2.6.4）
- 植物由来材料（ライフ・臨床医学分野　2.2.3）

参考・引用文献

1）福田博、邉吾一、末益博志 監修『新版複合材料・技術便覧』（産業技術サービスセンター, 2011）.
2）物質・材料研究機構 調査分析室レポート「社会インフラ材料研究の新たな展開：安全・安心な持続性

社会の構築へ向けて」（2012）.
3）RIMCOF 技術研究組合, http://www.rimcof.or.jp/（2020年10月28日アクセス）
4）武田展雄、越岡康弘「航空宇宙機複合材構造の構造ヘルスモニタリング技術の進展」『非破壊検査』第60巻3号（日本非破壊検査協会, 2013）：157.
5）Shu Minakuchi et al., "Life Cycle Monitoring and Advanced Quality Assurance of L-shaped Composite Corner Part Using Embedded Fiber-optic Sensor," *Composites Part A：Applied Science and Manufacturing* 48（2013）：153. doi：10.1016/j.compositesa.2013.01.009
6）新構造材料技術研究組合（ISMA）, http://isma.jp/（2021年2月17日アクセス）
7）戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」, http://www.jst.go.jp/sip/k03.html（2021年2月17日アクセス）
8）戦略的イノベーション創造プログラム「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」, https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html（2021年2月17日アクセス）
9）デラウェア大学複合材料センター（CCM）, http://www.ccm.udel.edu/（2021年2月17日アクセス）
10）エジソン溶接研究所（EWI）, http://ewi.org/（2021年2月17日アクセス）
11）フラウンホーファー化学技術研究所（ICT）, http://www.ict.fraunhofer.de/en.html（2021年2月17日アクセス）
12）フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所（IFAM）, http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html（2021年2月17日アクセス）
13）英国接合溶接研究所（TWI）, http://www.theweldinginstitute.com/（2021年2月17日アクセス）
14）韓国材料研究所（KIMS）, https://www.kims.re.kr/?lang=en（2019年2月17日アクセス）
15）ナノセルロースジャパン, https://www.nanocellulosejapan.com/（2021年2月17日アクセス）
16）磯貝明「セルロースナノファイバー」『表面技術』71（06）（2020）：389-395.
17）磯貝明「完全分散化セルロースナノファイバーの構造と特性」『粉体技術』11（12）（2019）：1015-1019.
18）磯貝明「セルロースナノファイバーの特性と応用」『自動車技術』73（11）（2019）：88-93.
19）磯貝明「新規ナノ素材『セルロースナノファイバー』の開発の現状と応用展開」『化学装置』62（9）（2020）：600-607.

2.5 物質と機能の設計・制御

物質もしくは機能を設計・制御する概念や技術はナノテクノロジー・材料分野全体に関与するものであり、わが国においては長年の技術蓄積にもとづく強みを有する。進化したナノテクノロジーを駆使することで所望の物質・機能を実現させるための構造の設計・制御を可能とし、サイエンスの新局面を拓き、社会・産業に貢献しうる領域である。以下では、本節で取り上げた8 つの研究開発領域の概略を示す。

［分子技術］

分子を設計・合成・制御・集積することによって、分子の特性を活かして所望の機能を創出し、応用に供するために必要な一連の技術を指す日本発の概念である。「分子の設計・創成技術」、「変換・プロセスの分子技術」、「分子の電子状態制御技術」、「分子の形状・構造制御技術」、「分子集合体・複合体の制御技術」、「分子・イオンの輸送・移動制御技術」から成る6 つの横断的技術分野に分類され、それぞれで連携しながら研究開発が推進されている。

［元素戦略・希少元素代替技術］

物質・材料の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効活用することで、物質・材料の特性・機能の発現機構を明らかにし、希少元素や有害元素に依存することなく高い機能を持った物質・材料を開発することを目的とする。元素戦略は日本発の概念であるが、構造的な資源問題に対処し、持続可能社会を実現するために取り組むべき重要課題として世界中で認知されている。

［マテリアルズ・インフォマティクス］

計算科学やデータ科学を用いた物性予測と、ハイスループット材料合成・評価、データマイニングによる特徴抽出などにより、新材料の設計、探索、発見を飛躍的に加速することを可能にする取り組みを総称した研究開発領域である。材料合成/化学、第一原理計算/物理、データ科学/数学、データベース/リポジトリなどの多分野からの研究者による異分野融合で進められている。究極的には、材料特性を支配する関係性を発見し、自由自在に材料開発を進めると同時にその背景にある原理を見出そうとするものである。

［フォノンエンジニアリング］

ナノスケールの微小空間、微小時間での熱（フォノン）の振る舞いを理解し制御することにより、熱の高効率な利用や、デバイスのさらなる高性能化・高機能化を実現することを目的とする。熱計測、フォノン輸送の理論・シミュレーション、材料・構造作製によるフォノン輸送制御、フォノン/電子/フォトン/スピンなどの量子系の統一的理解と制御、高度な熱伝導制御による蓄熱/放熱/断熱材料や高性能熱電変換素子などの革新的な材料・デバイス技術などに関する研究開発を推進する。

［トポロジカル材料］

数学の分野で発展してきたトポロジー（位相幾何学）を物質系に適用することで、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相としてトポロジカル物質が登場した。この領域では、トポロジーにもとづく新たな物質観によって導かれる物質群の創出とその基礎学理の構築およびトポロジカル材料を応用した革新的デバイス創出をめざしている。原理的にその性能向上の限界が顕在化しているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築き、Society 5.0を支える基盤強化等への貢献が期待される。

［低次元材料］

低次元材料には、グラフェンなどの二次元材料、カーボンナノチューブなどの一次元材料を含み、従来の

バルク材料や単なる薄膜材料とは異なる特性・構造を持つ。低次元材料に特徴的な特性発現の機構を理解するための新しい物理を構築することとともに、エレクトロニクス、センシング、エネルギー変換・貯蔵などの応用分野において、新しい機能や従来材料の特性を凌駕する機能を発現することが期待されている。

［複雑系材料の設計・プロセス］

材料創製の探索範囲をこれまで扱ってこなかった未開拓の領域まで大きく拡大することで、高性能・高機能化、複数機能の共存、相反する機能の両立などを実現する複雑な組成や構造を有する材料の設計技術とプロセス技術を開発することをめざす研究開発領域である。材料の多元素化やハイエントロピー化、準安定相などの多種多様な安定相（準安定相も含む広義の意味）の設計、高効率な材料探索実験手法、プロセス中反応過程のその場観測、プロセス・インフォマティクス、プロセス制御による熱力学的には不安定な構造の安定化などに取り組んでいる。

［ナノ力学制御技術］

材料が本来持つ機能を最大限まで引き出し、これまで実現できなかった高性能・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築するため、力学特性の発現機構をナノスケールまで立ち戻って理解し制御することを目的とした研究開発領域である。社会的要請が強い応用技術領域を代表するものとして「接着」「摩擦・摩耗」「自己修復」があげられ、「接着」では、マルチマテリアル化による軽量化を実現するための異種材料接着に注目が集まっている。「摩擦・摩耗」においては、マイクロ・ナノスケールでの科学的な解明が進んでおり、それらの理解にもとづいてマクロな摩擦摩耗の制御システムの合理的な設計・創成が期待される。「自己修復」では、動的結合や水素結合を利用した新材料の研究がさかんである。

2.5.1 分子技術

（1）研究開発領域の定義

「分子技術」は、日本発の課題解決型の研究開発領域であり、目的を持って分子を設計・合成・操作・制御・集積することにより、分子レベルで所望の物理的・化学的・生物学的機能を創出し、応用に供するための一連の技術を指す。分子技術の集積と体系化により、従前の科学技術では成しえなかった新物質、新材料、新デバイス、新プロセス等の創出が期待できる。これらは、課題解決に対するブレークスルーの提供に留まらず、イノベーションを通して新産業の創出にも繋がりうる。「分子の設計・創成技術」、「変換・プロセスの分子技術」、「分子の電子状態制御技術」、「分子の形状・構造制御技術」、「分子集合体・複合体の制御技術」、「分子・イオンの輸送・移動制御技術」からなる 6 つの横断的技術分野に分類され各技術の研究開発が推進されている。これらは互いに密接な関係を持ち続ける必要がある。

（2）キーワード

分子科学、分子設計、精密合成、高機能触媒、先端材料、ソフトマテリアル、創薬、人工光合成、マイクロフロー技術、先端分析、計算科学

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

分子技術は、環境・エネルギー・資源や医療・健康などに関わる社会的・産業的課題の抜本的解決に貢献し、持続可能な社会の実現に資することが期待されている。これらの分野の現在の課題は、国連の提案するSDGs はその好例である。こうした世界的な課題は人口増加、都市化、高齢化、地球温暖化などのメガトレンドから読み解くことができるが、グローバルに市場や顧客との接点を持つ企業からの情報が、研究開発推進のうえでは重要になる。

分子科学が、分子および分子集合体の構造や物性を解明し、化学反応や分子の相互作用およびその本質を、理論と実験の両面から理解することを目的とする学問であるのに対して、わが国において誕生した技術概念/研究開発領域である分子技術は、分子科学がもたらす知見・理解を基盤として所望の機能を新たに創出することを明確な目的とする工学的な技術概念である。

革新的かつ精密な分子や分子集合体を創出できれば、効果的で、しかも最終的な課題解決が可能になるので、分子技術の開発により産業化された場合には国際的な競争力の獲得につながる。今後、材料に対する要求がますます高度化されることが予想され、したがって、分子技術は、今後重要性が増すと考えられる。

分子技術の基盤を成すのは化学である。従前の化学は分子科学に代表されるように、自然の神秘を解き明かすことに挑戦し続けてきた。しかし、本研究開発領域は、社会や産業の重要課題の解決を目的とするため、物理学、生物学、薬学、数学、情報学等の科学的知見を融合するとともに、最近大きく進展している計算化学なども取り入れ、制限された条件の下に最終的であると同時に最適・最善の解を求めるという工学の手法も取り入れなければならない。このためには、自然の神秘を解き明かす化学から、課題を解決する化学へと、大きなパラダイムシフトが要求される。このパラダイムシフトこそが分子技術獲得の原動力となる。

［研究開発の動向］

従来、さまざまな分野で分子の設計・合成が行われてきたが、普遍的な技術として分子技術が明確に意識

されることはほとんどなかった。すなわち、化学的に構造式レベルでは解明されていても、その構造式によってその化合物が作り出すさまざまな物性についての論理的説明は稀であり、まして、その構造がベストであるという保証はほとんどなかった。すなわち、従来の科学技術は最適な唯一の分子を探し出し、それを合成するというスタンスはほとんどみられなかったため、ある意味では、たとえ素晴らしい物質が見出されても、それは偶然の発見に留まっていた。

最適・最善である新規な分子の設計と合成にいたらない段階で製品化が進んでしまった場合には、その製品はベストである保証はなく、未成熟であるため、その模倣は比較的容易である。また、未成熟ゆえに、特許による技術の保護も十分とはいえないので、市場での成功が明らかになった段階で、開発途上国において、さまざまな後発品が上市されると考えられる。オンリーワン分子の設計と合成を進めるためには、圧倒的に高い水準の分子技術力が必要となるが、この基盤技術の育成に必要な基礎科学を持ち、かつ十分な資金を継続的に提供できる国・企業は世界的に少ない。

なお、分子技術は日本発の研究開発領域ではあるが、フランスなど日本との分子技術に関する共同研究を実施し重要性を理解している国も出てきており、その重要性に対する認識が浸透し始めている。今後、世界的にさらに発展することが想定される。分子技術は多岐にわたる応用分野を持つことため、表面的な工業化の結果だけで、国際的な比較を行うのは適当ではない。言い換えれば、分子科学は、試行錯誤の科学技術から予測可能な科学技術へ方向転換し、それによって真の破壊的イノベーションを定着させることをめざすものであるが、こうした流れを定量的に把握することは極めて難しい。

本領域では、分子技術は 、精密合成技術と理論・計算科学との協働により新機能物質を自在に設計・創成する「設計・創成の分子技術」、分子の形状構造を厳密に制御することにより新たな機能の創出につなげる「形状・構造制御の分子技術」、分子レベルでの精密な構造設計にもとづく新たな触媒・システム開発につなげる「変換・プロセスの分子技術」、分子の電子状態を自在に制御する「電子状態制御の分子技術」、分子集合体・複合体の形成や機能解析・化学制御に関連する「集合体・複合体制御の分子技術」、膜物質を介した分子・イオンの輸送速度や選択性向上などの分子・イオンの輸送に関係する「輸送・移動制御の分子技術」からなる 6 つの横断的技術に分類される。さらには、人間には考えつかなかった究極の分子構造を探索するために計算科学などを活用することも重要な要素である。分子技術は分子のレベルで根源的な物質の性質を創ることが目的であるため、今後、さらに社会の要請に沿って新しい技術課題の解決が要請されると予想される。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

最近の分子技術開発の成功事例は、差別化技術の組み合わせや融合（同時/逐次）を起点としているものが多い。実用化の例として、抗体医薬技術と有機合成技術の融合による優れた抗体薬物複合体（ADC）[抗がん剤]の創出(第一三共)、オレフィン重合触媒技術と金属コロイド触媒技術の組み合わせによるポリオレフィン-シリコンブロック共重合体の創製（三井化学）をあげることができる。

また、アカデミアにおいては、Rh/Alハイブリッド型錯体触媒を用いる、ピリジンの2位選択的シリル化反応（C-H活性化)、フッ素化アリル化合物のアリルマグネシウム化合物への変換（C-F活性化）が達成された(京大・中尾佳亮ら)。一方、ポリマー合成の分野では、リビングラジカル重合とリビングカチオン重合の組み合わせにより、ポリアクリレートとポリビニルエーテルのマルチブロック共重合体が創製されている（名大・上垣外正己ら)。これらはいずれも差別化技術の組み合わせ・融合をベースとする成果である。

東工大・石谷治らは、精密な分子設計によりCu二核錯体光増感剤を開発し、Mn錯体触媒と組み合わせ

ることにより、貴金属および希少金属錯体で構成された従来の光触媒系に匹敵する触媒耐久性と反応効率を実現した。人工光合成分野の新しい可能性を示すものとして注目される。

有機エレクトロニクスは、分子技術の活用が期待される応用分野の１つである。新規有機半導体分子の開発においては、有機低分子あるいはポリマー分子の高次構造や物性を制御することが重要であり、従来、分子科学者と合成化学者が知識と経験をもとに予測しながら開発してきたが、近年では、人工ニューラルネットワークを用いた粗視化によって、膨大な量子科学計算を繰り返すことなく有機半導体の電子構造が求められるという研究成果が発表されている。このような新手法によって高速化していく可能性がある。東大・岡本敏宏らはバンド伝導モデルにもとづいた独自の分子設計を展開し、高キャリア移動度に加えて、実用化に必要不可欠な環境ストレス耐性を併せ持つp型半導体分子を開発した。さらに、同様の性能を示すn型半導体分子の開発にも成功した。

バイオ関係においては、東大・酒井崇匡らは、ハイドロゲルのゲル化の物理的な理解を進め、人工硝子体として機能する材料を構築し、網膜剥離を治療する可能性を示している。理研・田中克典らは、独自の糖鎖クラスターと触媒を組み合わせることにより、効率的な生体内合成化学を行うドラッグデリバリーシステムを創成した。

分子技術を支える分析・解析に関する研究もあげられる。東大・中村栄一らは、従来膜や固体に限られてきた電子顕微鏡観察の限界を打ち破り、個々の分子の動的挙動を原子分解能のビデオ記録する手法を開発した。刻一刻と起きる化学反応事象の「その場」撮影や極微量反応中間体の構造決定など、分子電子顕微鏡学とも呼ぶべき新分野を開拓した。分子科学と分子技術をつなぐ新技術として注目される。さらに、NIMS・川井茂樹らは、独自に原子間力顕微鏡による測定手法を開発して、分子骨格を直接観察することを行い、単に固体の表面を観察するだけでなく、分子の凝集や化学反応の様子をその場観察した。筑波大・羽田真毅らは、分子集合体の動きをピコ秒時間分解でとらえることに成功した。これらの先端計測技術は、分子技術および、それによる先進分子材料の開発に大きく寄与していくものと考えられる。

また、ものづくりという視点からは、京大・前一廣らのマイクロフロー技術の進展にも注目すべきものがある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

2012 年にスタートした JST-CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」（研究総括：山本尚）からは上記を含め多くの成果が得られており、社会や産業の課題解決のブレークスルーにつながる可能性を秘めている。また、同じく JSTさきがけ「分子技術と新機能創出」（研究総括：加藤隆史）でも６技術領域全体にわたって多数の研究テーマが展開され、2017年度に終了したが、一部の成果は新たな研究開発プロジェクトへと発展している。分子技術（Molecular Technology）は、国際的な広がりもみせている。2014年からは、JST-SICORP（戦略的国際共同研究プログラム）日本-フランス共同研究「分子技術」分野（研究主幹：山本尚、副研究主幹：加藤隆史）もスタートして、触媒・ケミカルバイオロジー、エネルギー、材料、センシング、界面制御などに関する研究が展開された。

さらに、2018年度には文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）に、北海道大学「化学反応創成研究拠点」が採択され、10 年間の拠点型研究が開始された。本拠点は前田理（北海道大学）による「人工力誘起反応法」を基盤とし、本法を進化させることを掲げている。他、同じく2018年度にJST-ERATO「ニューロ分子技術」が浜地 格（京都大学）を研究総括として開始された。 さらには、2019年にはJST-ERATO「化学反応創製知能」が前田理（北海道大学）を研究総括として発足している。

また、新学術領域研究「ハイブリッド触媒」（2017～2021年度）は触媒分野の分子技術開発といえる。

さらに、新学術領域研究「水圏機能材料」（2019～2024年度）と2020年にスタートしたJST-CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」（研究総括：君塚信夫）は、分子技術の材料分野版ともいうべきものである。これらは日本が優位性を持つ、触媒および材料分野であり、成果が期待される。

（5）科学技術的課題

分子技術を開発する目的は、社会や産業の重要課題に対する効果的かつ最終的な解決法の提供にある。今後さらに複雑化、高度化すると予想される諸課題に対して、既存の科学技術の延長で対応することは困難である。従って、研究開発テーマには、現在の科学技術では到達できない「夢の目標」と、従前の研究開発の延長ではない新規な研究開発プランが必須である。さらに、プランを進めるための明確で独創的な分子技術の「イメージ・ストーリー」を描き、それを実現することが求められる。そのためには、研究開発に対する姿勢を根本的に変えていく必要がある。すなわち、分子レベルからの課題解決をめざし、化学を基盤として物理学、生物学、薬学、数学、工学などに加えて各種の技術も融合し「最適・最善の解」を得ることが求められる。成功には、基礎科学者、工学者および企業技術者が、分子技術という共通の土台に立ち、協働することが重要となる。一方、本研究開発領域においては、研究者の意識変革もまた重要である。研究者は、自らの研究開発により社会や産業の重要課題を解決するという強い意志を持たなければならない。「やれることをしっかりやる」、「より良いモノを作る」から「やるべきことをやる」、「一番良いモノを創る」という転換も求められる。これらの目標は一朝一夕に解決するものではないが、その目標は従来のトライアルアンドエラーの世界から、論理的にベスト分子を探索するという、アナリシスからシンセシスへの飛翔が要求される。

各技術概念について、今後必要となる研究課題は以下の通りである。

a）分子の設計・創成技術

・機能から分子を創出するための計算化学にもとづく理論創成とシミュレーション技術の開発
・機能設計・予測にもとづく最終目的物をめざす精密合成法の開発
・分子性物質の高純度精製法の開発

b）変換・プロセスの分子技術

・酵素インスパイアードモレキュラーインプリンティング触媒の開発・多酵素の配列による高度な分子設計手法の開発・金属フリー有機合成触媒の開発
・触媒・生成物の in situ キャラクタリゼーション法の開発
・マイクロ反応装置などによるフロー型システムケミストリーの開拓
・原料転換プロセスの開発（未利用化石資源、バイオマスなどの利用）
・室温稼働化学プロセスの開発

c）分子の電子状態制御技術

・電極-有機分子間（電荷注入）、有機分子同士（電荷輸送）の電荷授受の機構解明
・高純度化によるキャリアトラップの解消
・分子性物質の純度測定評価技術の開発
・デバイス上での分子配列技術・階層性構築制御技術の確立
・液体半導体などによる自己修復可能なデバイスの開発
・分子性物質・分子材料の劣化機構の解明

d）分子の形状・構造制御技術

・自己組織化など、ビルドアップおよびトップダウン手法による空間空隙構造形成技術

・ナノからマクロ構造への規模拡大技術、高強度化、高速合成、低コスト化
・マクロ構造を持つ材料における物理的諸現象（貯蔵、物質・エネルギー変換など）の観測・解析技術
・計算機シミュレーションによるマクロ構造の合成および構造・機能の設計・解析

e）分子集合体・複合体の制御技術

・電子デバイス表面における分子集合体の精密配置技術の開発
・創薬開発を目指した分子集合体の動的構造変化と機能制御の解析
・タンパク質への非天然アミノ酸導入による人工酵素の構築
・液体分子の構造と機能制御の解析とシミュレーション

f）分子・イオンの輸送・移動制御技術

・電極への効率的なイオンの挿入・移動を可能にする有機蓄電材料の開発
・不純物の選択的移送と捕捉を目指した超高性能分離膜の開発
・高効率の薬物輸送を実現する高度 DDS の開発

（6）その他の課題

分子技術は、新しい技術体系であるため、今後はさらに中長期的視点に立った次世代の分子技術の開発と集積を戦略的に進める必要がある。6つの横断的技術に分類されることからも分かる通り、分子技術は多様であるため、その構築は継続的な戦略・投資なしには実現しない。社会や産業の課題には終わりがないなかで、新しい挑戦的な目標を掲げた研究開発チームを適時に立ち上げ続けるのが、分子技術推進に必要な姿である。分子技術には、新物質、新材料、新デバイス、新プロセス等のブレークスルーの創出が期待されている。しかし、これらは、分野単独の科学技術から生み出すことは一般に困難であり、多様な分野の科学技術の融合により初めて可能となる。したがって、高い志を持った分野融合型の研究開発チームが容易に組織され、また効率的に活動できる仕組みや仕掛けが要る。分子技術は、基礎科学をスタートとして、その応用により課題解決の解を提供するとともに、イノベーションを通して新産業の創出も期待する研究開発領域である。今後は、文部科学省・JST だけでなく、経済産業省・NEDO とのさらなる緊密な連携が求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	分子技術の重要性が世界で初めて日本で明確に認識されたことは極めて重要な点。日本は、高いレベルの分子科学を持っており、これは競争力ある分子技術の開発基盤となる。今後、化学をはじめ物理学、生物学、数学などの研究者の連携がさらに進めば、この分野を世界的に牽引することが期待できる。創薬、高機能触媒、人工光合成、電子顕微鏡分野などで世界をリードする成果が生まれつつある。分子技術の材料分野版ともいうべきCREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」が2020年にスタートした。
	応用研究・開発	◎	→	環境・エネルギー・資源、医療・健康、水・食料など分子技術が鍵となる応用分野は多い。日本は、それぞれの分野における末端技術には、強弱があるものの、分子技術の基盤となる部分は非常に高いレベルにある。産業化については、持続的イノベーションを志向した研究開発が多く、上述分野への応用展開を企図した、先端材料で優位にある。しかし、米国に比べると、全体として必ずしも十分な競争力はなく、さらに、中国、韓国などに追い上げられつつある。
米国	基礎研究	◎	↘	米国でも、近年、分子工学の重要性が認識され始めている。しかし、バイオやマテリアルなど応用末端の分野にその研究が集中しており、化学というよりも工学が前面に出ている。従って、分子レベルまで掘り下げた設計、合成や制御をめざす研究は多くない。
	応用研究・開発	◎	↗	応用研究は非常に強い。特に資金が集中しているライフサイエンスは圧倒的なレベルにあり、今なお向上し続けている。新型コロナウイルス対応でも力を見せている。産業化については、ベンチャーが中心となって諸課題への対応を図っており、特にライフサイエンスの分野が活発である。巨大製薬企業は、成功したベンチャーの買収により投資リスクの分散を図るとともに、高収益が期待できるビジネスシーズを獲得している。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツでは、大学改革に成功し、分子科学の基礎研究は高いレベルにあり、分子技術においても世界的にトップクラスである。一方、英国はライフサイエンス分野の分子技術が進んでいる。フランスはフッ素化学などの限定された分野では優れているが、全体としては低調である。
	応用研究・開発	○	→	ドイツ、英国のライフサイエンス分野の応用研究は非常に優れている。両国は、新型コロナウイルス対応でも力をみせている。他の国は平均的レベルにある。ライフサイエンス以外の分野においてもドイツ、英国が一歩抜けている。産業化については、一般に、ライフサイエンス分野が堅調である。産業化を促進する制度的バックアップは優れているが、分子技術という視点では若干手薄い。
中国	基礎研究	○	↗	現時点では米欧の後追い研究が中心である。しかし、政府主導の人材循環政策により米欧で成功した研究者が本国に招聘されており、潤沢な資金と相まって、成果をあげ始めている。大学のシステムは米国のシステムの導入に成功している。米国との関係悪化により、今後基礎研究の源を日欧にシフトさせる可能性がある。中国国内では製薬系の大企業が育っていないため、若い研究者の就職先が限られるのはハンディキャップであるが、この状況は国の政策により近年中に変わる可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	大学や公的研究機関に多くの研究費が投入され、応用研究が急速に進展している。米国と似た制度の下で、ベンチャー企業が誕生しやすい環境にある。産業化についても、今後ベンチャーが重きをなす可能性がある。

韓国	基礎研究	△	→	米国型の研究スタイルであるが、最近、大学や政府研究機関で外国人研究者が十分な雇用・処遇を得られないケースがみられる。欧米からの帰国者を優遇し、この点では中国と状況は似ているが、研究レベルは中国に若干遅れている。
	応用研究・開発	○	→	応用研究が進み始めており、今後の発展が見込まれる。比較的ダイナミックに産業化を進めているが、現時点では、分子技術そのものではなく製品設計や開発に強みをもっている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) National Institute of Standards and Technology（NIST）, “Flexible and Printed Electronics”, https://www.nist.gov/programs-projects/flexible-and-printed-electronics（2020年12月29日アクセス）.

2) Office of Naval Research（ONR）：One Liberty Center, “Functional Polymeric and Organic Materials”, https://www.onr.navy.mil/en/Science-Technology/Departments/Code-33/All-Programs/332-naval-materials/functional-polymeric-and-organic-materials（2020年12月29日アクセス）.

3) JST CRDS戦略イニシアティブ「分子技術：“分子レベルからの新機能創出”～異分野融合による持続可能社会への貢献～」（CRDS-FY2009-SP-06）（2010年3月）. https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2009-SP-06.html

4) JST CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」, https://www.jst.go.jp/crest/mt/（2020年12月29日アクセス）.

5) H. Yamamoto and T. Kato, Molecular Technology, vol. 1-4（Weinheim：Wiley-VCH, 2018-2019）, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527823987.

6) JST CREST「分子技術 シンポジウム：～未来に続く、極限のものづくり～」, https://www.jst.go.jp/crest/mt/info/20191115.html（2020年12月29日アクセス）.

7) 東京大学大学院薬学系研究科有機合成化学教室「分子合成オンデマンドを実現するハイブリッド触媒系の創製：Hybrid Catalysis」東京大学大学院薬学系研究科有機合成化学教室, http://hybridcatalysis.jp（2020年12月29日アクセス）.

8) 加藤隆史他「水圏機能材料：環境に調和・応答するマテリアル構築学の創成」水圏機能材料総括班, https://www.aquatic-functional-materials.org/（2020年12月29日アクセス）.

9) JST CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」,　https://www.jst.go.jp/

kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-2.html（2020年12月29日アクセス）.
10) JSTさきがけ「原子・分子の自在配列と特性・機能」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2020-3.html（2020年12月29日アクセス）.

2.5.2 元素戦略・希少元素代替技術

（1）研究開発領域の定義

物質・材料の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効活用することで、物質・材料の特性・機能の発現機構を明らかにし、希少元素や有害元素に依存することなく高い機能を持った物質・材料を開発する研究開発領域である。近年、重希土類元素であるジスプロシウムを一切使わない永久磁石をハイブリッド車用駆動モータに実用化するなど、社会実装への動きも活発化している。

（2）キーワード

元素戦略、Critical Materials、Critical Raw Materials、Critical Minerals、希少元素、希土類元素、循環、減量、代替、材料設計、構造制御

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

ハイブリッド自動車やスマートフォンなど、私たちの日常生活を支えている製品の中には希少元素が使用されているものが数多く存在する。希少元素とは地球上で採掘可能な量が少ないうえに産出国が偏在している元素群（わが国ではレアメタルとも呼ばれる）である。そのため希少元素を用いる製品開発を行う各国においては、世界的な供給量不安定化や価格高騰を含めた資源問題が潜在的に存在する。特に工業製品を輸出の主軸としつつも天然資源に乏しいわが国にとっては死活的な問題になりかねない。2010年に起こったレアアースショック以降、資源問題は一過性のものではなく構造的問題として国際的に協調して対処すべきとの風潮が一気に強まり、日米欧を中心に資源問題に対して政策的な取り組みが開始され、日本発の「元素戦略」が持続可能社会実現に向けて取り組むべき重要課題として世界中で認知されることとなった。

［研究開発の動向］

【日本】

わが国においては、資源は供給されうるものという従来の考え方から脱して、資源をデバイス・部材の中でいかに効率よく使うか、いかに新たな機能を引き出して材料の選択肢を広げるかという視点に立ち、資源の持続可能な利用や高付加価値製品の安定生産をめざすための研究コンセプト「元素戦略」を、2004年に諸外国に先駆けて提唱した。

「元素戦略」は以下の5つの柱によって構成される物質材料科学の基盤を構築する戦略である。

① 代替：特定の元素に依存することなく、豊富で無害な元素により目的機能を代替する
② 減量：希少元素・有害元素の使用量を極限まで低減する
③ 循環：希少元素の循環利用や再生を推進する
④ 規制：有害物質の使用量規制や基準を乗り越える高い技術を戦略的に開発する
⑤ 新機能：元素の秘められた力を引き出すことで新たな機能を生み出す

一般に「元素戦略＝希少元素や有害元素を無害かつありふれた元素に置き換えること」と解釈されがちであるが、それは上記①にすぎない。本質は「物質・材料における各元素の役割を理解し、機能発現メカニズムを解明すること」であることに注意が必要である。また、この概念の特徴としては、化学、物理、金属、セ

ラミックスや磁石など、多彩な学界が共通して取り組めるという点にある。

元素戦略・希少元素代替材料技術に関する研究開発は、2007年に文部科学省による「元素戦略プロジェクト<産学官連携型>」、および密な連携を行う経済産業省による「希少金属代替材料開発プロジェクト」に始まる。前者は元素を特定せず、元素の特性を深く理解することで物質・材料科学のパラダイムシフトを実現し、新しい物質・材料の創製につなげる基礎研究を長期的視点で実施することを目標とした。一方、後者は産業上重要となるいくつかの希少元素を特定し、5年を目処としてそれらの使用量に対する削減目標値（30～50%）を達成するための短期的テーマを推進した。後の府省連携施策の原型となる極めて先進的な国家プロジェクトであり、内閣府を積極的に巻き込みつつ、共同での公募や、役割分担に沿った審査の相互乗り入れを行うなど、従来になかった協力体制で取り組まれた。

その後、2010年にはJST戦略的創造研究推進事業CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」（研究総括：玉尾皓平・理化学研究所顧問（当時）、2010～2017年度）およびさきがけ「新物質科学と元素戦略」（研究総括：細野秀雄・東京工業大学教授、2010～2016年度）が発足した。さらに2012年から10年間の事業として開始された文部科学省「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」においては、磁性材料、電子材料、触媒・電池材料、構造材料を各研究開発テーマとする4つの研究拠点が形成され、「材料創製」「解析評価」「理論」が三位一体となった研究体制が構築されている。

一方、経済産業省・NEDOは比較的短期間での実用化をめざす「希少金属代替材料開発プロジェクト」を進めてきた。2008～2013年度は委託事業として、元素ごとのリスク評価に加えて、リスクの増大が懸念される透明電極向けインジウム（In）、希土類磁石向けジスプロシウム（Dy）、超硬工具向けタングステン（W）、排ガス浄化向け白金族（PGM）・セリウム（Ce）、精密研磨向けセリウム（Ce）、蛍光体向けテルビウム（Tb）・ユーロピウム（Eu）等を対象元素とした代替材料の開発や使用量低減技術の開発を行った。2012～2015年度には産業界での希少金属の使用量低減を促進するため、民間企業から広くテーマを公募し、早期の活用が期待される研究開発として、鉛フリーはんだ（Bi）、樹脂難燃剤（Sb）、ランガサイト型圧電素子（La, Ga, Ta）、レアアースレスモータ（Nd, Dy）、レアアースレス蛍光体（Eu, Ce, Y）、排ガス浄化触媒（Pt, Pd, Rh）、超硬工具（W）、太陽電池波長変換膜（Y）等に対して助成を行った。これらの研究開発を推進するとともに、関連する研究開発動向の調査、事前検討、中長期戦略立案に関する事業など幅広い取り組みを行っている。さらに、2012年からは経済産業省による未来開拓研究プロジェクトのなかで「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」を開始し、その後NEDOが引き継ぐ形で2014～2021年度の8年間という長期プロジェクトが推進されている。

他にも、JSPS科研費の新学術領域研究、内閣府のSIP「革新的構造材料」（2014～2018年度）およびSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）、文部科学省の「東北発素材技術先導プロジェクト」（2012～2016年度）、JSTの「先端的低炭素化技術開発（ALCA）」、「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」、「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」、日-EU共同研究「希少元素代替材料」などの多くの関連プロジェクトも推進されてきた。また、レアメタルにかかる安定したマテリアルフローを実現したサプライチェーンの確立をめざした東北大学レアメタル・グリーンイノベーション研究開発センター（2014年1月設立）などの研究開発拠点も整備されつつある。

【米国】

米国では日本に追随する形で、2010年にエネルギー省（Department of Energy：DOE）が「Critical Materials Strategy」を発表し、Li、Mn、Co、Ni、Ga、Y、In、Te、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Tb、

Dyをキーマテリアルとして、電気自動車、太陽光発電、風力タービンなどのエネルギー産業において米国がリーダーシップをとるためにも希少元素の確実な供給と、需要を減らす代替技術、循環技術を確立すべき対象としたうえで、研究プロジェクトの組織化や国際協力の提案を行っている。また、2012年からInnovation Hub for Critical Materials Researchという拠点形成も進め、Ames研究所にCritical Materials Institute（CMI）が設立された。 CMIでは5年間で約1億2000万ドルの資金が導入され、2018年7月に5年間の延長が認められている。

さらに2017年12月、トランプ政権から大統領令「A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals（安全かつ信頼できる希少鉱物の確保のための連邦政府戦略）」が発令された。ここでは、内務省に対して60日以内の希少鉱物リストの作成、さらには商務省、国防総省、農務省、財務省、エネルギー省などに対して、希少鉱物リスト公開から180日以内に対応方針に関する報告書を提出するよう求めている。内務省は2018年2月に「希少鉱物リスト草案」を公表し、パブリックコメントを実施したうえで、同年5月に「希少鉱物の最終リスト」として希少鉱物35種を特定している。2019年6月には、商務省が政府機関全体の行動計画を含む希少鉱物の供給確保戦略を発表し、リサイクルや代替技術の開発、サプライチェーン強化など希少鉱物の対外依存度低減に向けた方策を打ち出している。

加えて、2020年9月には再びトランプ政権から大統領令「Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries（希少鉱物を外国の敵対勢力に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処）」を発令している。内務長官に対して「関係機関長と協議のうえ、希少鉱物に関する米国の敵対国への依存状況の調査および必要な行政措置を提言する報告書を提出すること」、および内務長官、エネルギー長官はじめ関係機関の長に対し、「ガイダンスの発行、規制の改正、許認可の迅速化など希少鉱物の米国内サプライチェーンの保護および拡大のための措置をとること」を指示している。

【欧州】

欧州では2008年に公表された「Raw Materials Initiative」の下、重要な元素群を「Critical Raw Materials（CRMs）」と命名し、2011年に14種、2014年に20種、2017年に27種、2020年に30種、と3年ごとにCRMsリストを更新している。2014～2020年にかけての研究開発枠組みプログラム（Framework Program：FP）であるHorizon 2020において、希少鉱物関連プロジェクトに総額10億ユーロを投じて、専門家ネットワーク形成プログラムや、リサイクル、マイニング等に関するプロジェクトを実施している。次期FPであるHorizon Europe（2021～2027年）では、全体予算案955億ユーロのうち、第2の柱（社会的課題の解決）の中の6つの社会的課題群（クラスター）の1つ「デジタル・産業・宇宙」（総額155億ユーロ）の一部にRaw Materialsを位置づけており、欧州圏の循環型経済確立に向けた取り組みが活発化していくものと思われる。

【中国】

中国は2020年4月にレアアースを使った新材料や応用技術開発の拠点となる「国家レアアース機能材料イノベーションセンター」の設立許可を発表した。中国産の「戦略資源」であるレアアースを使って磁石、発光体、合金など高機能材料を開発し、自国のハイテク産業を強化しようとするもので、脱輸出依存モデルをめざす取り組みの一環である。

【その他】

鉱物資源国として、オーストラリアが2019年に「オーストラリア希少鉱物戦略（Australia's Critical Minerals Strategy）」、カナダも2019年に「カナダ鉱物・金属計画（The Canadian Minerals and Metals Plan）」を発表しており、それぞれ自国の鉱工業を保護・育成しつつ、戦略的に資源を活用したイノベーションを推進している。

国際協調という観点からは、2011年から毎年「Trilateral EU-US-Japan Conference on Critical Materials」という施策上重要な物質に関する日米欧三極会議が行われている。ここでは、レアアース等の希少元素主要消費国である三極の技術者・研究者が、代替・削減技術および鉱石や製品からの効率的な精製分離技術等について密接な情報交換を行うことで、当該分野の研究促進を図るとともに、希少元素消費国間の連携状況を国際的に発信することを目的としている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

最近特に米国と欧州において、希少資源に関するデータソースの拡充、安定供給ルート確保に向けた取り組みが活発化しようとしている。

前述の通り、米国においてはトランプ大統領による2つの大統領令に象徴される。1つは米国の経済と安全保障に対して脆弱性の要因となりうる希少鉱物の輸入依存の低減と安定供給ルートの確保を目的とした大統領令「A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals（安全かつ信頼できる希少鉱物の確保のための連邦政府戦略）」である（2017年12月に発令）。もう1つは、希少鉱物を外国の敵対勢力に依存している状況の解消を目的とした「Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries（希少鉱物を外国の敵対勢力に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処）」（2020年9月に発令）である。特に2つ目の大統領令では、今後取りうる行政処置として輸入制限を明示しており、今後の米国の動きを注視しておく必要がある。

また、欧州においては、2018年1月に「Report on Critical Raw Materials and Circular Economy（希少原材料と循環型経済に関する報告書）」が公開されている。ここでは、循環型経済の一環として希少資源確保に向けたデータソースの提供、ベストプラクティスの促進、実行可能なアクションプランを特定することを目的として、欧州における関連政策やプロジェクト、CRMsの需要動向について記載している。2018～2022年の間にCRMsに関する活動（CRMsの入手改善、欧州圏内のCRMsの回収率向上、CRMsの輸入依存の低減、欧州圏内での専門家コミュニティの強化など）に2億5000万ユーロ以上の投資が予定されている。さらに、2020年9月に「Action Plan on Critical Raw Materials（希少鉱物に対する行動計画）」を発表した。ここでは、CRMsが幅広い産業において必要不可欠であり、その調達はEUが推進する欧州グリーンディールにおいても戦略上の重要性を持つこと、新型コロナウィルス感染拡大による世界的なサプライチェーンの脆弱性の露呈に対応するため、CRMsのより安定的かつ持続可能な供給のための基盤整備を含む行動計画を示した。

一方、わが国においては、対象を絞りそこに技術と知識を集約して解決する集中型の研究開発により、元素戦略の5つの柱の中の「代替」「減量」に関する取り組み、および、ありふれた元素（earth-abundant elements）で従来を凌駕するあるいは新規の機能発現をめざす創成型の研究開発が主に行われている。特

に、特定元素がなぜその機能を発揮しているのかについて科学的に解明し、その機能発現原理をナノスケールの物質構造（原子配列、格子欠陥、結晶粒、磁区構造、分子構造、表面・界面構造など）からデザインすることによって、希少元素・有害元素の代替に留まらない、「新機能」に関する取り組みを推進することが重視されている。前述のCRESTにおいては、物質の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効活用することで、既存の延長線上にはない物質・材料の革新的な特性や機能の創出をめざした研究開発が行われた。さきがけでは、クラーク数上位の元素を駆使して、ナノ構造や界面・表面、欠陥などの制御と活用による革新的な機能物質や材料の創成と計算科学や先端計測に立脚した新しい物質・材料科学の確立をめざした研究開発が行われた。元素間融合による新規ナノ合金の開発、アルケンのヒドロシリル化用鉄・コバルト触媒の開発、反強磁性スピントロニクスにつながる新たな磁性体の発見など、さらなる発展をめざして新たな研究プロジェクトに採択される多くの興味深い基礎的な成果が創出された。

国内外に共通する新しい展開として、近年の計算科学・シミュレーション技術や計測評価技術、マテリアルズ・インフォマティクスの進展によって、これまでは複雑すぎて人間が扱えなかった領域の解析や予測が可能になりつつあることがあげられる。実際にマテリアルズ・インフォマティクスによって新規電池材料の発見をはじめとする新規機能性材料の予測・発見、実験装置の自動化による研究環境のDX化など、元素戦略を含む多くの材料開発の手法が大きく変わりつつある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

2012年から10年間の事業として開始された文部科学省「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」における4つの研究拠点の目的を以下に示す。

- **磁性材料研究拠点（Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials：ESICMM）**
  磁石の性能に与える元素の役割を基礎物理に遡って解明することにより、ハイブリッド自動車の駆動モーター等に用いられている現在の最高性能を有する希土類永久磁石と同等の性能を有する磁石を、希少元素を用いることなく作成することをめざす。
- **電子材料研究拠点（Tokodai Institute for Element Strategy：TIES）**
  エレクトロニクス産業を支える電子部材（半導体、透明電極・伝導体、誘電体等）を中心として、幅広い材料分野に有効な新しい材料科学を、基礎物理、計算科学、先端解析技術の協働により構築して、希少元素や環境負荷の高い元素を用いない代替材料の開発をめざす。
- **触媒・電池材料研究拠点（Elements Strategy Initiative for Catalysts and Batteries：ESICB）**
  今日の環境産業やエネルギー産業に欠かせない触媒および二次電池の部材について、固体及び気体/液体との間での元素の複雑系反応を基礎科学と実験科学の緊密な連携を通じて解明することにより、触媒及び二次電池に対する元素の機能を予測し、貴金属や希少元素を用いない代替材料の開発をめざす。
- **構造材料研究拠点（Elements Strategy Initiative for Structural Materials：ESISM）**
  材料の「強度」（変形への抵抗）と「延性」（破壊への抵抗）といった相反する性質を基礎科学の段階から解明することで、社会基盤を支え、安全・安心な社会に不可欠な構造材料において、現在大量に使用されている希少元素を抜本的に削減した代替材料の開発をめざす。

本プロジェクトでは、2015、2018年度にそれぞれ中間評価を行い、2021年度に事後評価を行うこととしている。2018年度の第2回目の中間評価においては、「事業開始時に設定した目標達成に向け、事業開始後

約6年間の取り組みとして概ね良好に進捗している」と評価されつつも、「出口戦略や性能目標も具体化されているが、その一方で、「磁石材料拠点」や「触媒・電池材料拠点」では、ターゲットを限定しすぎたことにより、元素戦略の展開に制約が出ていないか留意する必要がある」とされている。また「今後は成果の取り纏めの時期に入ることから、知財戦略の策定や、産業応用の可能性がある成果については積極的に特許化を進めること等の対応が必要である」とされ、残りの研究期間の間に基礎研究を早期に社会実装へつなげる仕組みを構築し、国が主導する研究開発事業のモデルケースとなることを期待されている。さらに、2019年12月に開催された国際評価会議Element Strategy Initiative Advisory Council（ESIAC）において、国際委員から、人材の多様性の確保、若手研究者育成のための拠点横断型取り組みの必要性、スタートアップ企業化に向けた活動の推奨などについてコメントがあった。

経済産業省からNEDOに移管した「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」（2014～2021年度）において、レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発、モータを駆動するためのエネルギーの損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発ならびに新規磁石、新規軟磁性材料の性能を最大限に生かして更なる高効率を達成できるモータ設計の開発を行っている。次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータの省エネ化を図り、競争力を確保し、わが国産業全体の活性化に寄与することが目的である。

これら一連の取り組みの顕著な成果として、2016年7月に大同特殊製鋼と本田技術工業から、重希土類元素を使わないネオジム磁石の開発に成功したことが共同発表され、2016年秋発売のハイブリッド自動車に採用された。さらに、同年11月には東芝と東芝マテリアルから、重希土類フリー高鉄濃度サマリウムコバルト磁石の開発に成功し、サンプル出荷を開始したことが共同発表された。また、2018年2月には、トヨタ自動車がネオジムをランタンやセリウムに置き換えても磁力・耐熱性の悪化を制御できる新技術を生み出し、これによりネオジム使用量を最大50%削減しても従来のネオジム磁石と同等レベルの耐熱性能を持つ磁石「省ネオジム耐熱磁石」の開発に成功したことを発表した。

米国DOEの傘下、Critical Materials Instituteは2020年6月、産業化に焦点を当て、希少鉱物に対する国内サプライチェーン確立をめざし、総額400万ドルの「CMI Open Innovation Project」を公表した。

（5）科学技術的課題

材料開発が原子レベルで行われるようになり、材料の分析手段も原子レベルで行われる必要が出てきており、放射光施設や高性能な電子顕微鏡を用いることで材料の静的な構造などは詳しく解析されるようになっている。しかし、例えば触媒材料開発に注目すると、実際の反応場で材料（触媒）がどのように振る舞っているかの多くは未だ解明されておらず、例えば、鉄触媒研究においては鉄触媒活性種が不安定かつ常磁性状態が安定になりやすいため、溶液中での反応機構の解析手法、それにもとづく合理的な触媒設計や触媒反応設計が確立していない。鉄触媒反応に限らず、さまざまなメカニズムの解明は材料開発にとって不可欠であり、新たな指針を与えるものである。そのためにはその場観察（オペランド）実験手法の確立が必要となる。なかでも高分解能電子顕微鏡のオペランド観察は、反応場における原子の動きを実際に観測することができ、非常に強力な手段と考えられる。日本では最先端の電子顕微鏡があまり普及していないが、欧州では国立研究所（Ernst Ruska-Centre）と電子顕微鏡メーカー（FEI）などが共同開発を行い、実際の反応条件と同等の環境で観察を行える環境制御型電子顕微鏡の開発がさかんに行われており、材料開発を促進している。

（6）その他の課題

元素機能の発現機構は、物理、化学、金属などの既存の学問領域が単独で解明できるものではないため、

異分野の力を結集することが重要である。異分野連携・融合によってさまざまな学問領域の視点から機能発現機構を解明することが材料挙動の原理解明に直結し、材料の革新につながる可能性が高いと考えられる。しかし、この異分野連携・融合が自然発生的に生まれることは一般的には期待できず、政策的な誘導が必要である。JST-CRESTにおいては、各研究チームに理論グループの参画を必須とする等、トップダウンによって異分野連携を促進したが、そのCRESTも2017年度末で終了している。元素戦略プロジェクトやNEDOプロジェクトを補完、またはサポートする新たな方策が必要であると考えられる。

1つの方向性として、これまで主に希少元素や有害元素を対象として元素単体の役割を解明し代替技術、使用量削減技術開発を行ってきたが、今後は複数元素の組み合わせによる機能創出をめざした新たな元素戦略を推進することが期待される。近年、社会ニーズの高度化に伴い、材料が多元素化・複合化もしくは準安定状態の利活用へと向かっている潮流とも合致する。さらに、マイクロプラスチックによる海洋汚染などの社会的問題がクローズアップされるなか、材料循環の意識を高めることも重要である。つまり、材料に求められる機能が「使用時」の機能だけに留まらず、「使用後」の分解・分離といった循環機能にまで拡大しているため、材料のライフサイクル全体を最適化する材料科学の構築が求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	文部科学省、経済産業省、JST、NEDOなどにおける各プロジェクトの推進により基礎学理の構築および研究コミュニティが形成されている。 政府が策定予定の「マテリアル戦略」において、レアメタルの安定供給に関する検討が始まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	上記のプロジェクトで開発された成果をもとに新物質・新材料の実用化が進みつつある。 特にジスプロシウムやネオジムなどの希土類元素の使用量を大幅に削減した永久磁石の開発に成功し、一部は既に市販車に導入されている。
米国	基礎研究	○	↗	Critical Materials Instituteの第2フェーズの開始、希少鉱物に関する2つの大統領令が発令されるなど、今後研究開発が活発化される可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	上述の大統領令により、各省庁が希少鉱物の安定供給ルート確保、敵対国に対する依存度解消に向けた対応策を討議中であり、今後産業応用へ向けた取り組みが活発化する可能性がある。
欧州	基礎研究	○	↗	循環型経済（Circular Economy）の観点で、欧州圏内の希少鉱物の埋蔵量、偏在性の把握に関する活動が活発化している。
	応用研究・開発	○	↗	希少鉱物の安定供給に対する意識が上がってきている。Horizon 2020に引き続き、Horizon Europeにおいても産業化をめざした研究開発プロジェクトが推進される模様。「希少鉱物に対する行動計画」が発表されるなど、今後産業化へ向けた取り組みが活発化する可能性がある。
中国	基礎研究	○	→	貴金属代替（削減）材料開発に関する論文が急増している。 積極的に先端技術を導入して基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	レアアースを使った新材料や応用技術開発を目的とした「国家レアアース機能材料イノベーションセンター」の設立許可が出されるなど、レアアースを使って自国のハイテク産業の強化をめざす動きをみせている。今後、応用研究・開発が活発化する可能性がある。 資源保有国の強みを有し、ネオジム磁石は他国の追随を許さない生産量を誇っている。

韓国	基礎研究	△	→	米国のMaterials Genome Initiativeや日本の元素戦略にならった成果が出ているものの、独自性ある成果はみられない。
	応用研究・開発	×	→	特に目立った動きはみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・分離技術（ナノテク・材料分野　2.1.5）
・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野　2.5.3）
・複雑系材料の設計・プロセス（ナノテク・材料分野　2.5.7）
・ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野　2.6.3）
・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野　2.6.4）

参考・引用文献

1）科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略イニシアティブ『元素戦略』」（CRDS-FY2007-SP-04）（2007年10月），
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2007/SP/CRDS-FY2007-SP-04.pdf（2021年2月17日アクセス）

2）Eiichi Nakamura and Kentaro Sato, "Managing the Scarcity of Chemical Elements", *Nature Materials* 10, no. 3（2011）：158-161. doi：10.1038/nmat2969

3）中山智弘『元素戦略：科学と産業に革命を起こす現代の錬金術』（ダイヤモンド社, 2013）.

4）『日本発、科学で元素資源問題に挑む“元素戦略”　革新的な物質・材料で持続可能な社会を構築する』（2020年12月），
https://elements-strategy.jp/images/esi_2020/pdf/elements-strategy.pdf（2021年2月17日アクセス）

5）U.S. Department of Energy, *Critical Materials Strategy*（December 2011），
http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf（2021年2月17日アクセス）

6）Critical Materials Institute, https://www.ameslab.gov/cmi
（2021年2月17日アクセス）

7）The White House, *Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries*（September 30, 2020），
https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign（2021

年2月17日アクセス）
8）The White House, *Presidential Executive Order on a Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*（December 20, 2017），
https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals（2021年2月17日アクセス）
9）European Commission, *Report：critical raw materials and the circular economy*（January 16, 2018），
https://ec.europa.eu/commission/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en（2020年2月17日アクセス）
10）European Commission, *Commission announces actions to make Europe's raw materials supply more secure and sustainable*（September 3, 2020），
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542（2021年2月17日アクセス）

2.5.3 マテリアルズ・インフォマティクス

（1）研究開発領域の定義

計算科学やデータ科学を用いた物性予測、ハイスループット材料合成・評価、データマイニングによる特徴抽出などにより、新材料の設計、探索、発見を飛躍的に加速することを可能にする取り組みを総称した技術分野である。従来、交わることが少なかった、材料合成/化学、第一原理計算/物理、データ科学/数学、データベース/リポジトリなどの分野から、研究者が集まっており、学術分野自体が異分野融合になっていることに特徴がある。究極的には、材料特性を支配する究極の関係性を発見し、自由自在に材料開発を進めると同時にその背景にある原理を見出そうとするものである。

（2）キーワード

データ駆動型、Materials Genome Initiative、マテリアルズ・インフォマティクス、マテリアルズ・インテグレーション、機械学習、深層学習、データベース、データ同化、転移学習、回帰、ベイズ推定、ハイスループット合成、ハイスループット計測、プロセスインフォマティクス

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

2011年に米国が「Materials Genome Initiative（MGI）」を発表してから約10年が経過した。この間に、実験科学、理論科学、計算科学に続く第4の科学として、データ科学（Informatics）が材料研究において非常に有力な手法であることはさまざまな研究事例をもって実証され、もはや材料研究にデータ科学を活用することは、当たり前となりつつある。特に、さまざまな材料データ（画像、スペクトル、結晶構造、物理量、文章 など）を記述子としてデータ科学により“新規材料を予測”する技術は確立されつつあり、あらゆる材料開発においてその技術は使われている。

一方、近年では新規材料の予測だけではなく、“新規材料の合成”まで行うことができるマテリアルズ・インフォマティクスが求められ始めている。実験科学、理論科学、計算科学、データ科学に加え、ロボティクス、プラットフォーム、通信、IoT、セキュリティなど、あらゆる技術を発展・融合させることにより“新規材料の合成”までのプロセスを最適化する技術を確立することができれば、材料研究分野における日本の国際競争力の強化に大きく貢献することができると期待される。

［研究開発の動向］

• 日本

2015 年に発足した NIMS を中核機関とする「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（“Materials research by Information Integration”Initiative：MI^{2}I）」（PL：伊藤聡、2015 ～2019 年度）、2014 年に開始した内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program：SIP）「革新的構造材料」（PD：岸輝雄、2014～2018 年度）のなかの研究開発項目の1つ「マテリアルズインテグレーション」（領域長：小関敏彦）、2016 年に開始した経済産業省 / NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト（超超プロジェクト）」（PL：村山宣光、2016～2021 年度）の 3 つのプロジェクトにより、補完的に研究開発が遂行されてきた。また、内閣府における統合型材料開発システムとして、上記の 3 プロジェ クト（MI^{2}I、マテリアルズインテグレーション、超超プロジェクト）の間で、

実施者を加えた 3 府省連絡会議等を適宜開催し、各事業の進捗や成果の共有が図られた。2018 年 には SIP（第 2 期）として、「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（PD： 三島良直、2018～2022 年度）が開始されている。

なお、NIMSにおいては材料データの収集が以前から行われてきたが、2017年度より従来の材料データベースMatNaviを包含し、実験データのリポジトリや解析ツールの提供も含めたデータプラットフォーム構築事業が行われている。

マテリアルズ・インフォマティクスを推進する研究開発事業として、JST 戦略的創造研究推進事業においては、さきがけ研究領域「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクスのための基盤技術の構築」（研究総括：常行真司、2015～2020 年度）、CREST・さきがけ複合領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」（研究総括：雨宮慶幸、副研究総括: 北川源四郎、CREST: 2016～2023 年度、さきがけ: 2016～2021 年度）、CREST 研究領域「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」（研究総括： 細野秀雄、2017～2024 年度）が相次いで発足し、マテリアルズ・インフォマティクスが材料開発の重要なツールであることを示し続けている。

• 米国

2011 年より国家的な取り組みとして 開始されたMGIは、材料開発に要する期間を 2 分の 1 に短縮するという目標を掲げ、「計算ツール」「実験ツール」「デジタル・データ」 を材料イノベーション基盤として整備するべきであるとするものであった。このプロジェクトでは、以下にあげる3つの方向で研究が開始された。

1つ目は、第一原理計算を主体として物質の構造や物性に関するデータを作り出し、所望の性能や機能を持つ物質・材料を見つけ出そうとする流れであり、実験と計算科学にもとづくデータベースとデータ科学にもとづく各種分析ツールを融合した物質の網羅的スクリーニングを行うものである。その例として、マサチューセッツ工科大学（MIT）のグループ（現在は UC Berkeley）とローレンス・バークレー国立研究所による “Materials Project” がある。ここでは、無機結晶構造データベースに収録された結晶構造データをもとに、網羅的に第一原理計算を行った結果を、熱力学データベースをリンクさせて、状態図や構造予測、化学反応予測などを収録したデータベースを公開している。さらに、これらのデータを活用できる各種アプリケーションソフトウェアも公開しており、リチウムイオン電池の正極材料の探索などに用いられている。同様のデータベースの構築と公開は、デューク大学、ノースウェスタン大学をはじめとする、大学・国研で行われている。

2つ目は、コンビナトリアル合成・計測によるハイスループットデータ収集であり、実験家を中心に、高速に物質を合成し、物性を計測し、データベース化するとともに、視覚化ツール、分析ツールを用いて最適物質、構造を予測するというサイクルを構築するものである。こうしたコミュニティの活動 は、エネルギー省傘下の国立研究所ネットワークのもとで、High-Throughput Experimental Materials Collaboratoly（HTE-MC）のプログラム推進に結実している。

3つ目は、統合計算材料工学（Integrated Computational Materials Engineering： ICME）の流れであり、構造材料を中心に、結晶構造（第一原理計算）から高次構造までさまざまなスケールのモデリングをリンクさせ、また、加工プロセスと組織構造の相関もデータにより統合していくものである。2014 年、NIST が立ち上げたCenter for Hierarchical Materials Design（CHiMaD）は、ノースウェスタン大学、シカゴ大学を中心としたもので、熱力学・状態図計算など、個別のニーズに合わせて速度論のシミュレーションを行って材料特性の予測、材料開発の支援を実施している。

MGIに関する最近の注意すべき動きとしてあげられるのが、「Materials Research Data Council

（MaRDaC）」の動きである。この評議会は、2019年11月にスタートし、オープン・アクセス可能・相互運用可能な材料データを実現することを目的として設立された「材料研究データアライアンス（MaRDa）」の運営委員会として位置づけられている。

具体的な動きとして、最初の会合である「Materials Data Summit」がシカゴで開催されたほか、NSFから研究コミュニティに向けて2019年10月に発信されたCSSI Dear Colleague Letter「データ集約型の科学・工学研究をサポートするサイバーインフラストラクチャに関する情報のリクエスト」に呼応して、材料コミュニティからの返答書を2019年12月に返信している。この返信に記述された内容は、（1）サイバーインフラストラクチャ、（2）データベース技術、（3）相互運用可能システムとユーザビリティ、（4）自動データキャプチャ、（5）機械学習、（6）コミュニティ（文化、持続可能性、人材、トレーニング）に関する材料コミュニティからの現状の説明となっている。

もう1つ特筆される取り組みは、NIST-CoEプログラムの1つとして推進されていたCHiMaDの継続である。前述のように2014年からノースウェスタン大学を中心とする研究チームの5年プログラムのファンディングが開始し、NISTのMGI研究チームとの密接なコラボレーションのもとシカゴ地区でのデータ活用型材料研究を牽引してきたが、2019年にさらに5年間にわたるファンディングの継続が決定された。研究チームの中心人物であるOlson教授は2019年12月にMITに移籍しており、CHiMaDセンターとの今後の関係が注目される。

データインフラストラクチャに関しては、MGIの黎明期から国家プロジェクトにおいて開発が進められてきた米国におけるデータプラットフォームシステムのいくつかにおいては、データ公開のサービス運用が開始されている。

Materials Data Facility（MDF）は、CHiMaDのデータツールの1つとしてアルゴンヌ国立研究所を中心に開発が進められてきたものであり、登録されるデータにDOIを付与し、グローバルな学術コミュニケーションの中でデータを流通させることができるほか、組織、登録年、キーワード、関連する元素などに注目した検索機能を有している。

その他としては、ミシガン大学のPRISMSセンターが開発したMaterials Commonsも、同じようなデータ公開機能を有するほか、民間ではCitrine informaticsが旧来からのプラットフォームサービスを継続し、AI活用可能なデータ管理機能を強みとして、製造業との連携を強めている。

• 欧州

FAIR原則（Findable, Accessible, Interoperable, Re-purposable/Reusable）の重要性が材料科学分野においても認識されつつあるなかで、2018年9月に「FAIR Data Infrastructure for Physics, Chemistry, Materials Science, and Astronomy e.V.（FAIR-DI）」がドイツ・オランダを中心とする研究機関連携の母体として発足している。この団体は、Horizon 2020で2015年からファンディングされているNOMAD-CoEを主軸に置くが、材料分野にとどまらずバイオ分野・天文学分野とも横串を刺す形でFAIR原則に従うデータ管理の実現と、そのための世界的なデータインフラストラクチャを構築することを目的としている。 NOMADにおけるインフラストラクチャの整備は系統的に進んでおり、生データを登録・管理するリポジトリサービスのほか、解析ツール、可視化、知識ベース、メタデータの統合と合わせて合計5つのサービスを柱として発展している。2020年3月に3年間の追加ファンディングが決定し、2020年6月には材料分野におけるFAIRデータ管理を主題とした国際ワークショップを開催している。

FAIR-DIがデータインフラストラクチャに焦点を当てている一方で、エクサスケールのHigh Performance Computingのためのインフラストラクチャに焦点を当てるのが「MAterials design at the eXascale（MAX）

a European centre of excellence」である。このセンターでは、5カ所のHPCリソースをネットワークし、それらの上で動くコード開発をテクノロジーパートナーとともにサポート、さらにはHPCリソースを必要とするコミュニティとの連携などを主な活動項目としている。

このセンターのデータ管理プラットフォームとして機能するのが、Materials Cloudである。このシステムはPythonをベースとするオープンなインフラストラクチャシステムであるAiiDAをベースとして動作するもので、特に、計算データの生成ワークフローを管理し、これに伴うデータ来歴（provenance）の管理も行えることが特色となっている。 AiiDA、Materials CloudのいずれもスイスEPFLにおいて開発が進められてきたものであり、必然的にEPFLはMAXの中心的な推進機関でもある。

データの標準化に関しては、European Materials Modeling Council（EMMC）がHorizon 2020ファンディングを得て進めてきたオントロジーを中心としたものになっている。 EMMCはその目標として、材料分野において産業界、とくに中小企業をカスタマーとするデータ市場の立ち上げを掲げており、市場でデータを流通させるために必要な共通記述様式の策定を進めてきた。2018年にロードマップをまとめ上げてHorizon 2020プロジェクトを終了したが、2019年7月に非営利法人化してその後も活動を継続している。データ市場実現に向けたプロジェクトは2つ並行して走っており、いずれもMODAと呼ばれる材料モデリングにおけるデータ記述のための標準規格に準拠した標準オントロジーを基礎においてデータ構造化を進めている。

一方、入出力するデータの形式を揃える別の手段として、入出力結果へのアクセスを全てAPI化し、そのAPIの仕様を標準化するという方法がある。この方式のもと、コミュニティ主導で進められている活動が「OPTIMADE」である。 OPTIMADEは、2018年から一年に一度のワークショップを毎年主催し、材料分野におけるデータ入出力をREST API化することについて議論を進めてきた。現在、バージョン1.0.0として仕様が公開されており、さまざまなプログラムが入出力をその仕様に合わせるように調整を行い始めている。その先鋒となっているのが、NOMADおよびMaterials Cloudの両リポジトリである。加えて、米国の代表的な第一原理計算データベースを運営するAFLOW、Materials Project、OQMDはいずれもこの取り組みに関与しており、現在、16のAPIプロバイダーがOPTIMADEに準拠するとしている。今後、第一原理計算コミュニティにおいて、OPTIMADEはデータ入出力のデファクト標準になる可能性があり、注視する必要がある。

• 中国

中国においては、2014 年に上海市と上海大学が共同で進めるShanghai Materials Genome Institutesを設立し、最近、急速にデータ科学を活用した材料開発研究を進めている。また、2016 年に中国科学院物理研究所と北京科技大学が共同で北京マテリアルズゲノム工学イノベーション連盟を設立している。さらに同年、上海交通大学においてもマテリアルズゲノム連合研究センターを設立するなど、国を挙げてマテリアルゲノム研究に力を入れ始めていると同時に欧米の研究者との連携を強くしている。2016 年 3 月に発表された科学技術イノベーション第 13 次五カ年計画においても、中国産業の国際競争力向上のための重点技術の1つ「新素材技術」のなかに「マテリアルズゲノム工学（目標：新材料の開発期間・コストの半減）」と明記されている。さらに、国家重点研究開発計画の1つとして「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」（2016～2018 年の 3 年間に計 44 課題、総額約 8 億元）が推進されている。

• 韓国

2015 年から 10 年計画でCreative Materials Discovery Projectが開始している。また、最近、韓国科学技術研究所（Korea Institute of Science and Technology：KIST）において計算科学を中心とした

Materials Informatics Database for Advanced Search（MIDAS）が設置された。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

新型コロナウイルス感染症の流行の影響もあり、国内外において研究者がラボに行くことができない状況が多発した。そのため、研究者がラボに出向くことなく材料研究を進めることができる材料開発システムの需要が増大している。また近年、マテリアルズ・インフォマティクスの領域において、『自律的（Autonomous）』という単語が１つのキーワードとなっている。人間が介在することなく、コンピュータ自身が状況に応じてルールを生み出し、自律的に材料開発を進める材料開発システムの構築が、本領域におけるチャレンジングな課題の１つとして考えられる。自律的に材料探索を行うことができる材料開発システムは、大きく分けてバーチャル（仮想空間）での自律的材料探索システムと、リアル（実空間）での自律材料探索システムの２種類に分けて考えることができる。仮想空間での自律的材料探索システムとしては、材料シミュレーション（e.g 第一原理計算）と機械学習を組み合わせた手法の開発が進められている。仮想空間で材料創製および材料特性評価を行う材料シミュレーションを、ベイズ最適化や強化学習などの機械学習を用いて逐次的に実行し続けることによって、仮想材料空間にて自律的に材料を探索することができる。一方、実空間での自律材料探索システムとしては、ロボティクスと機械学習を組み合わせた手法の開発が進められている。簡単な実験系（例えば、材料合成の条件出し）であれば自律的に探索を進めることができるため、人間の工数を削減することができつつある。

機械学習モデルの『解釈性（Interpretability）』も、マテリアルズ・インフォマティクスの領域において大きく取り上げられている。深層学習のようなブラックボックス型の機械学習モデルは、高い予測性能を誇る一方、モデル内部の詳細な情報を抽出することが難しい。そこで近年、高い予測性能を保ちつつ高いモデル解釈性を持つ機械学習手法の開発が進められている。機械学習モデルの解釈性に関しては、材料研究領域だけではなく機械学習（AI）研究領域全体においても非常にホットなトピックであり、“Interpretable machine learning”や“Explainable AI（XAI）”といったカテゴリとして急速に研究が進められている。解釈性の高い機械学習を用いると、物理/化学/材料学の知見をベースとして人間が機械学習モデル内部を解析することができるため、材料研究にかかわる多くの知見や新たな物理法則の導出につなげることができる。そのため、解釈性の高い機械学習技術は、物理/化学/材料学の知見を持った人間とAIが協奏して材料研究を推進するためのキーテクノロジーの１つとして考えられる。機械学習モデルの解釈性を活用し、AIと人間が協創しつつ材料開発を成功させた事例もいくつか報告されている。当然、機械学習のみを使い盲目的にマテリアルズ・インフォマティクスを進めるよりも、研究者が所有する物理/化学/材料学の知見を有効活用しながらマテリアルズ・インフォマティクスを推進した方が効率的であるため、機械学習モデルの解釈性の重要さは、材料研究領域においても認識されつつある。

2017年、Iwasakiらは、３元コンビナトリアル試料の構造評価に機械学習を導入することで特定の箇所の計測だけで全点計測した結果とほぼ同じ結果を得ることが可能であることを示した。材料開発に共通して行われるＸ線構造解析を短時間化したインパクトは大きかった。評価の効率化により、マテリアルズ・インフォマティクスによる材料予測からハイスループット合成・評価までのワークフローが同じペースで実行できプロセスデータを含む材料データセットの作成がほぼ、同じペースで可能となった。教師データの蓄積にも貢献し、バーチャルスクリーニングの精度を向上させることになると期待される。

実験データを共有化する試みも始まっている。National Renewable Energy Laboratories（NREL）では、

これまで蓄積してきたハイスループット実験のデータをプロセス条件も含めて公開している。これらの実験結果は機械学習における教師データとして利用され材料設計の予測精度の向上に寄与すると期待されている。

最近、実験室内を移動ロボットが動き、自動で合成から評価まで行う「ロボット化学者」が登場した。これはリバプール大学にある“Materials Innovation Factory”で行われた試みであるが、今後はハイスループット合成・評価とロボティックスとの融合が進むと考えられる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

■JST-さきがけ、CREST / 計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用（2016年～）

計測・解析技術の深化による新たな科学の開拓や社会的課題の解決のために、多様な計測・解析技術に最先端の情報科学・統計数理の研究を高度に融合させることによって、これまではとらえられなかった物理量・物質状態やその変化あるいは潜在要因等の検出、これまでは困難であった測定対象が実際に動作・機能している条件下でのリアルタイム計測等を実現するインテリジェント計測・解析手法の開発とその応用をめざしている。

■JST-CREST / 実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新（2017年～）

これまで実施されてきた物質・材料開発の基本となる実験科学と、理論、計算、データ科学とを融合させることにより、革新的材料開発へとつながる手法の構築をめざしている。

■SIP第2期 / 統合型材料開発システムによるマテリアル革命（2018年～）

第1期SIP「革新的構造材料」後継プロジェクトとして発足し、マテリアルズインテグレーション（MI）の技術基盤を生かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする逆問題MIに対応した統合型材料開発システムの開発をめざしている。

■新学術領域研究 / ハイパーマテリアルのインフォマティクスとhidden orderの探索（2019年～）

ハイパーマテリアル（準結晶・近似結晶等、補空間を含む高次元空間で統一的に記述される物質群）を対象とするマテリアルズ・インフォマティクス（MI）の学術基盤の構築をめざしている。

■JST未来社会創造事業 / Materials Foudaryのための材料開発システム構築とデータライブラリ作成（2018年～）

データ科学を使ったバーチャルスクリーニング、ハイスループット材料合成・評価を使った材料データライブラリを作成し、新材料開発のワークフローの開発をめざしている。

■JST未来社会創造事業 / マテリアルズロボティクスによる新材料開発（2019年～）

人工知能とロボット、そして、研究者の知識・経験・勘を統合した研究開発共通基盤技術（人工科学者）の確立をめざしている。

【海外】

■Materials Genome Initiative：MGI（2011～2016年）

「計算、データ、実験の各手法を連携させた統合アプローチを主流にするための研究者意識の醸成」「実験・計算・理論の各研究者の統合」「データへの容易なアクセス環境の整備」「世界水準の人材育成」を目標として掲げ、計算科学・データベース・機械学習・深層学習を用いた材料開発の高効率化が進められている。本イニシアティブ自体は、2016年に終了したが、各省4つのセンター（CNGMD、CHiMaD、SUNCAT、PRISMS）を中心にマテリアルズ・インフォマティクスにかかわる研究開発が活発に継続されている。

■Materials Project（2011年～）

材料シミュレーションによるデータ蓄積や機械学習など用いてオンラインツールとして材料スクリーニングを可能とすることを目指している。現在、開発されたオンラインツールやデータベースは、その利便性から世界中で広く使用されている

■中国 国家重点研究開発計画 / 材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム（2016年～）

2016 年から中国国内の研究開発の強化を目的とした国家重点研究開発計画が開始され、その1つとして「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」を指定。2016 年に 14 課題、2017 年に 19 件、2018 年に 11 課題を採択し、総額約 8 億元が投資されている。

（5）科学技術的課題

現状、日本のマテリアルズ・インフォマティクスは、物質・材料設計にかかわる3つの基礎技術「実験科学」「理論科学」「計算科学」に、第4の科学「データ科学（機械学習）」を加えた合計4つの技術の強化およびその融合に注力している。しかし今後は、これら4技術に加え、新たな技術領域の強化およびその融合にも注力すべきと考えられる。具体的には、実空間での自律的材料探索システムで重要な技術となる「ロボティクス技術」、データを効率的に管理・共有するための「プラットフォーム技術」や「クラウド技術」、遠隔操作（リモート制御）でのリアルタイム材料実験を実現するための「通信技術」、材料やプロセスのビッグデータを効率的に取得するための「IoT 技術」、安全なデータ共有およびデータ融通を実現するための「セキュリティ技術」などがあげられる。これらの技術を材料研究へ積極的に取り込み、“新規材料の予測”だけでなく“新規材料の合成”までを一貫して効率的に行うことができる次世代のマテリアルズ・インフォマティクスに向けて材料研究を推進するべきと考えられる。

（6）その他の課題

昨今のマテリアルズ・インフォマティクスの進展によって、材料開発分野とデータ科学（機械学習）分野の技術連携は強化された。しかし、上記したその他の技術分野（ロボティクス、通信、プラットフォーム、IoT、セキュリティ）との連携はいまだ希薄なままである。

インフォマティクスを行うためのデータが少ない点は引き続き大きな問題となっている。元来インフォマティクスはビッグデータを扱うための方法論である。良質の材料データを大量に集めていくことが必要となるが、2020年6月に文部科学省、経済産業省合同の戦略準備委員会から「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて」という取り纏め文書が発表された。そのなかで日本として戦略的にデータを創出し、活用するための基盤、マテリアル DX プラットフォーム構想が打ち出されており、今後の動向が注目される。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・MI 技術にかかわる論文数は増加 ・数多くの国家プロジェクトにMI にかかわる記載あり
	応用研究・開発	○	↗	・産業界からSIP 等の国プロへ参加している事例が増大 ・MI のベンチャー企業も登場

米国	基礎研究	◎	↗	・MGI終了後も、広範囲でMIに関する基礎研究支援体制は継続 ・MI技術にかかわる論文数は増加
	応用研究・開発	○	↗	・MIのベンチャー企業の1つであるCitrine社が健闘（SBIRフェーズ2）
欧州	基礎研究	○	↗	・MI技術にかかわる論文数は増加
	応用研究・開発	○	↗	・GRANTA社のMIにかかわる活動が顕著
中国	基礎研究	○	↗	・MI技術にかかわる論文数は増加 ・中国MGIが進展
	応用研究・開発	○	↗	・MI関連特許多数
韓国	基礎研究	○	↗	・MI技術にかかわる論文数は増加
	応用研究・開発	○	↗	・ChemEssen Inc. からMI関連特許多数

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) E. Gianchandani and M. Parashar, “Dear Colleague Letter：Request for Information on Data-Focused Cyberinfrastructure Needed to Support Future Data-Intensive Science and Engineering Research”, National Science Foundation, https://www.nsf.gov/pubs/2020/nsf20015/nsf20015.jsp（2020年12月21日アクセス）
2) Material Resource Centers, “Materials Genome Initiative”, NIST, https://www.nist.gov/mgi（2020年12月21日アクセス）
3) M. Wilkinson et al., “The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship”, Sci Data 3（2016）：160018. doi：10.1038/sdata.2016.18
4) CHiMaD, “Center for Hierarchical Materials Design”, NIST, https://chimad.northwestern.edu/（2020年12月21日アクセス）
5) Cynthia Rudin, “Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead”, *Nat. Machi. Intell*. 1（2019）：206-215. https://arxiv.org/abs/1811.10154（2020年12月21日アクセス）
6) R. Guidotti et al., “A survey of methods for explaining black box models”, A*CM Comput. Surv.* 51, no. 5（2018）. doi：10.1145/3236009
7) J. Chen et al., “Learning to explain：an information-theoretic perspective on model interpretation”, *Proceedings of International Conference on Machine Learning（ICML）. PMLR* 80（2018）：883–892. http://proceedings.mlr.press/v80/chen18j.html（2020年12月

21日アクセス）
8) R. Sawada, Y. Iwasaki and M. Ishida, “Boosting material modeling using game tree search”, *Phys. Rev. Mater*. 2, no. 10（2018）：103802. doi：10.1103/PhysRevMaterials.2.103802
9) Materials Data Facility, “The Materials Data Facility（MDF）”, NIST, https://materialsdatafacility.org/（2020年12月21日アクセス）
10) Materials Commons, “A site for Material Scientists to collaborate, store and publish research”, Univ. Michigan, https://materialscommons.org/（2020年12月21日アクセス）
11) Globus, “10 Years of Connecting the Research Universe：Research data management simplified”, Univ. Chicago, https://www.globus.org/（2020年12月21日アクセス）
12) Citrine Informatics, “The AI Platform for Materials Development”, Citrine Informatics, https://citrine.io/（2020年12月22日アクセス）
13) FAIR-DI, “WELCOME”, FAIR-DI, https://www.fair-di.eu/（2020年12月22日アクセス）
14) NOMAD, “NOMAD Center of Excellence”, NOMAD, https://nomad-coe.eu/（2020年12月22日アクセス）
15) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, “MAterials design at the eXascale, European Centre of Excellence in materials modelling, simulations and design”, CORDIS, http://www.max-centre.eu/project/id/824143（2020年12月22日アクセス）
16) Z. D. Szotek, “Ab initio（from electronic structure）calculation of complex processes in materials”, Psi-k, https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.434.8016&rep=rep1&type=pdf（2020年12月22日アクセス）
17) CECAM, “Centre Européen de Calcul Atomique et Moléculaire”, CECAM, https://www.cecam.org/（2020年12月22日アクセス）
18) CORDIS, “European Materials Modelling Council”, European Commission, https://cordis.europa.eu/project/id/723867（2020年12月22日アクセス）
19) 21）EMMC, “The European Materials Modelling Council”, EMMC ASBL, https://emmc.eu/（2020年12月22日アクセス）
20) EMMC, “EMMO：an Ontology for Applied Sciences”, The European Materials Modelling Council, https://emmc.info/emmo-info/（2020年12月22日アクセス）
21) Materials-Consortia/OPTIMADE, “OPTIMADE v1.0.0”, Materials-Consortia/OPTIMADE, https://github.com/Materials-Consortia/OPTIMADE/releases/tag/v1.0.0（2020年12月22日アクセス）
22) aiidateam/aiida-optimade, “OPTIMADE RESTful API implementation for AiiDA”, aiidateam/aiida-optimade, https://github.com/aiidateam/aiida-optimade（2020年12月22日アクセス）
23) NOMAD, “NOMAD's OPTiMaDe API implementation”, NOMAD, https://nomad-lab.eu/prod/rae/optimade/（2020年12月22日）
24) AFLOW, “Aflow - Automatic - FLOW for Materials Discovery”, Duke Univ., http://www.aflow.org/（2020年12月22日アクセス）
25) The Materials API, “The Materials Project”, materialsproject/docs, https://materialsproject.org/（2020年12月22日アクセス）

26）材料データプラットフォームセンター「材料データプラットフォームセンター」国立研究開発法人物質・材料研究機構, https://www.nims.go.jp/research/materials-data-pf/,（2020年12月22日アクセス）

2.5.4 フォノンエンジニアリング

（1）研究開発領域の定義

ナノスケールの微小空間、微小時間での熱の振る舞いを理解し制御することにより、熱の高効率な利用や、デバイスのさらなる高性能化・高機能化を実現する。熱計測、フォノン輸送の理論・シミュレーション、材料・構造作製によるフォノン輸送制御、フォノン/電子/フォトン/スピンなどの量子系の統一的理解と制御、高度な熱伝導制御による蓄熱/放熱/断熱材料や高性能熱電変換素子などの革新的な材料・デバイス技術、などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

フォノン、電子、フォトン、スピン、マグノン、フォノン輸送、フォノニクス、フォノニック結晶、ナノ材料、ナノスケール熱伝導、ナノスケール熱計測、時間分解サーモリフレクタンス法、TDTR、ナノ構造制御、熱電変換、熱スピン効果、スピンカロリトロニクス、スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果、トポロジカルフォノニクス、熱環境発電、エネルギーハーベスティング

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

Society 5.0の実現に向けて、大規模情報処理・データストレージやハイパフォーマンスコンピューティングの需要が伸び続け、デバイスやシステムに対するミクロスケール・ナノスケールでの熱マネジメントの重要性が増してきている。デバイスレベルでは、バルク材料中の熱拡散を記述するフーリエ則が成立しない寸法の構造で構成されることが多いため、熱伝導を担う熱フォノンの弾道的輸送特性や異種材料間の界面熱抵抗を考慮して熱伝導を議論することが必須となる。また、熱電変換材料開発においても、フォノンエンジニアリングは90年代に始まった構造設計論的アプローチの中核技術となっており、熱フォノンスペクトルを考慮したマルチスケールデザインによって高性能化を実現している。フォノンエンジニアリングは、このようなメソスケールにおける特殊な熱伝導を理解し、ナノ構造化によって制御を可能にする。そのため、放熱問題の緩和に留まらず固体中のより高度な熱流制御技術や熱マネジメント技術、熱電変換応用などを実現することにより、現代および将来のスマート社会を支えると期待できる。その期待に応えるためにも、理論・計測技術・実験・インフォマティクスの連携により、新たな物理・機能探索、材料開発、制御手法開発を進めていくことが重要になっている。このように、フォノンエンジニアリングはナノスケールの熱伝導理解・熱制御にかかわる様々な技術領域にまたがるが、ここでは、フォノン伝導の制御技術、ゼーベック効果やスピンゼーベック効果などを用いた熱電変換材料・デバイス技術、熱伝導計測技術を中心に紹介する。

［研究開発の動向］

熱電材料の高性能化を実現するためには、電気を流すが熱をできるだけ遮蔽することと、高い出力因子の実現（高電気伝導かつ高ゼーベック係数）が必要である。前者については、ナノスケールでの熱伝導の理解と制御が大きな鍵となることが、1990年代後半以降広く理解されるようになった。電気伝導を損なわずに熱伝導を低減するためには、フォノンの選択的な散乱が必要である。例えば、電荷キャリアとフォノンの平均自由行程の差を利用して、フォノンの長さスケールに対応する種々のナノ・ミクロ構造を材料に作り込むことでフォノンエンジニアリングを実現し、2000年代の中盤以降、熱電性能の高性能化が図られてきた。また、ナ

ノ・ミクロ構造制御のほかにも、カゴ状結晶構造を有するスクッテルダイトやクラスレートなどにおいて、内包する原子のラトリング現象により、音響フォノンが効果的に散乱され、2000年代から新規な高性能熱電材料が見出されてきた。一方、後者の高い出力因子の実現に向けては、フォノンエンジニアリングほど広範囲に有効な出力因子の高性能化原理は最近まで見出されておらず、重要な課題として残されている。熱電材料の研究開発に関しては、指標として論文数などの推移を見ても、高性能材料開発、新原理提案などで、1990年代から2000年代中盤まで、米国と日本が筆頭で世界の熱電研究を先導し、日本も独自の低環境負荷の酸化物熱電材料開発などでリードしていたが、2000年代中盤以降、米国を先頭に欧中韓も追って国家プロジェクトレベルの大型予算が投入され、それらの国での研究人口が大幅に増大し、研究活動のレベルアップが達成されている。

フォノニック結晶は、フォノンに対する人工的な周期構造であり、この構造を用いたフォノン輸送制御を行う場合、波動的な性質を利用する手法と弾道性を利用する手法がある。多くの場合、前者は比較的狭い周波数スペクトルを持つ音響波や弾性波にバンドエンジニアリングを用い、後者は熱フォノンのような広いスペクトルを持ち、周波数が高いフォノンに対して微細構造による散乱で輸送特性の制御が行われてきた。フォノニック結晶の本来の特性を生かしたフォノニクス分野では、歴史的には比較的大きな寸法でフォノニック結晶が作製可能な前者に関する研究が多かったが、近年では、量子情報キャリアとしてのフォノンの活用が検討されている。また、熱を扱うような熱フォノニクスでは、厚さ数nmの超格子構造であれば室温でも熱伝導の低減が可能であることが示されており、フォノニクスは熱制御にも活躍の場を広げつつある。弾道性を用いる場合は、コヒーレンスを必要としないため、活用できる温度帯域や構造寸法が広く低コストで作製できることから、実用的な熱マネジメント技術への期待に応える研究が増加している。欧米中にシミュレーションを中心とした研究グループが多く存在し、国内では北海道大学と東京大学などが研究を進めている。フォノニック結晶によるバンドエンジニアリングは、室温における効果の発現に超微細周期構造が要求されるが、現在主流であるフォノンの弾道性を用いた手法では成しえない新機能や性能を実現する可能性を秘めており、酸化物半導体や二次元層状物質を用いた超格子構造や、トポロジカルフォノニクスを用いたフォノン輸送制御も研究が進展している。

スピンゼーベック効果の発見以降、日本・米国・欧州を中心に、多くの物性物理・磁性分野の研究者がスピンカロリトロニクスに関する研究を開始した。特に、ドイツで2010年に大型プロジェクト「SpinCaT」が立ち上がったことを皮切りに、スピンカロリトロニクス分野の研究者人口が爆発的に増加した。初期の研究の大半はスピンゼーベック効果の発現メカニズムの解明をめざしたものであり、ここ10数年間の基礎研究により、スピン流-熱流変換現象に関する物理的理解は大きく進展した。近年では、微細加工技術や光学・高周波測定技術などを駆使した、熱-スピン変換現象のより微視的な原理解明が進められている。スピンペルチェ効果やスピンネルンスト効果（2017年に初観測）などの相次ぐ新現象の発見に伴って研究対象も広がりをみせており、物理としてのスピンカロリトロニクスは成熟期に入りつつある。スピンゼーベック効果の熱電変換応用をめざした材料探索・開発もさかんに進められてきた。磁性絶縁体材料を用いたスピンゼーベック効果の物質依存性測定により、スピン流−熱流変換はあらゆる磁性材料中に存在しうる普遍的な現象であることが示された。近年では、トポロジカル物質（ワイル磁性体）・ホイスラー合金・永久磁石などさまざまな物質・材料においてスピンカロリトロニクス現象の開拓が進められており、典型的な強磁性金属材料よりも1桁以上大きな異常ネルンスト効果が相次いで見出されるなど、顕著な成果が得られている。スピン自由度を利用した新原理熱電変換素子のパワーファクター向上に向けた取り組みとしては、材料探索のみならず、ナノ～マイクロメートルスケールで緩和して消失してしまうスピン流の効果をマクロスケールで発現させるためのバルクコン

ポジット材料の試作なども報告されている。日本の企業では、スピン駆動熱電素子の熱流センサ応用をめざして、素子の大面積化・フレキシブル化などが進められている。「熱エネルギー制御」や熱電変換をめざした取り組みとして、日本でJSTのERATO、CREST・さきがけ、未来社会創造事業や、NEDOの先導研究プログラム「未踏チャレンジ2050」、「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム」などで研究が進められているが、基礎原理実証が始まった段階である。

時間領域サーモリフレクタンス法（Time-Domain-Thermoreflectance：TDTR）は、ナノスケールの材料や界面における熱物性の計測において、デファクトスタンダード的な位置を占め、材料開発や物性研究において欠かすことのできないツールとなっている。米国に比べて国内における普及は遅れていたが、ここ数年来の国内におけるフォノンエンジニアリング分野の活性化と歩調を合わせて大学や研究機関が導入を進めた結果、TDTR法が関係する研究発表は、その数と質の両面において充実してきた。「Thermoreflectance」をトピックに含む全世界の学術論文数の推移をみると、2000年以前は年間10報程度で推移していたものが、以後は直線的な増加に転じ2018年には120報/年まで増加した。これは2000年前後を境に、世界的な潮流としてTDTR法の基礎開発フェーズが完了し、TDTR法を利用した応用研究（物性値評価等）フェーズへと移行したと推測される。国別の関連論文数（1990～2020年間）では、TDTR発祥の地である米国が800報近くとトップを走り、日本は2番手（約180報）として存在感を有するが、中国（約110報）に追い上げられている状況である。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

国内のアカデミアの動きとして、2016年に応用物理学会に新設された「フォノンエンジニアリング」セッションが定着し、フォノンエンジニアリング研究グループも3年間の活動を高く評価され研究会に昇格した。毎年、研究会が開催され、優秀な発表を行った学生を表彰するなど、人材育成とネットワーキングが活発に行われており、本研究領域の研究力強化につながっている。また、2018年に応用物理学会に設立された「エネルギーハーベスティング研究グループ」も、フォノンエンジニアリングを利用した熱電発電をカバーし、産学連携によるスマート社会化を支える環境発電システムの構築に貢献が期待される。日中韓の熱電学会が起点となり、地理的に近いアジアの国々の連携や若手育成の促進のために2016年に発足したアジア熱電連盟（AAT）は、毎年サマースクールおよびアジア熱電国際会議（ACT）を開催し、タイ、台湾、マレーシア、インドも熱電学会を形成してメンバーに加わり、熱電研究が特に活発なアジアの研究者の交流や人材育成への貢献が注目される取り組みである。

熱電材料の高性能化のためにフォノンの選択的な散乱を実現するための理解がかなり深まってきており、実験的に欠陥・ナノ構造をより精緻に効果的に制御する技術の進展がある。欠陥・ナノ構造に関して理論的な計算を実験に活用する例も増えている。例えば、自己補償効果による空孔の形成の制御、置換ドーピングによる欠陥の形成エネルギーの制御、原子間サイトへのドーピングによる動的なフォノン散乱機構の創出などにより、効果的なフォノン散乱が実現し、熱電材料の高性能化が図られている。電荷キャリアの散乱機構をより詳細に解明して制御しようとする試みも増えている。温度域により、不純物イオン散乱、極性光学フォノン散乱、粒界散乱、音響フォノン散乱、の諸機構を分析し、当該材料の高性能化を実現するために、ドーピングや粒径制御などによる散乱機構の最適化などが行われている。また、多孔材料は熱電性能が低いと思われてきたが、複数の異なる材料系において、多孔生成による高性能化が得られるようになっている。融点の低い析出物や構成元素によって、比較的容易に多孔を生成させることが可能なために、今後さらに幅広く活用

されることが期待される。ナノコンポジット化による高性能化に関しても、以前より変調ドーピングやenergy filteringなどが提唱されていたが、特に後者の高性能化の例が最近数多く見受けられる。

出力因子の増強（電気伝導率とゼーベック係数のトレードオフの凌駕）に関しては、バンド構造の制御に進展があった。有効質量が軽く移動度が高いキャリアのバンドの縮重度が大きくなればゼーベック係数が増強され、高い出力因子が得られることが提唱されていたが、最近ではドーピングなどによりバンドの縮重度の増大を促し、高性能化が実現した例（GeTe、Mg_3Sb_2など）が増えてきており、「バンドエンジニアリング」によって熱電材料の高性能化を進められるようになってきた。

より斬新な高性能化の新原理を発掘しようとする研究においても最近顕著な成果があらわれた。1つには、磁性を活用して熱電材料を高性能化する試みである。以前からマグノンドラッグなどが知られているが、磁気秩序に依存し低温でのみ有効であったりした。そこで、新規な試みとして、磁気秩序に直接依存しない、室温など比較的高温でも有効な電荷と磁性イオン間の磁気相互作用を活用して熱電性能を向上させた、新規な高性能磁性半導体熱電材料が得られている。非常に顕著な展開として、Fe_2VAl系ホイスラー合金において、ある条件下での薄膜化によって、室温近傍で従来のチャンピオン材料であるBi_2Te_3系材料の10倍という極めて巨大な熱電出力因子が発生することが示された。超高性能の詳細な起源は解明中であるが、バルクで存在しえない準安定状態の電子状態によると考えられている。磁性も誘起されており、その役割の解明も急がれているが、準安定状態を活用する潜在能力の高さが示され、今後の研究開発が期待される。本質的に低熱伝導率を有する系や機構の発掘が進んでおり、不対電子や共鳴ボンディングによる非調和性の強い系のほか、液的（liquid-like）で低熱伝導率を発現するCu_2Seなどの超イオン伝導体の研究が活発に行われている。応用には致命的と思われていたエレクトロマイグレーションに関しても、モジュールの設計やイオンを遮蔽する界面の活用などの対策が提案されている。

理論的な取り組みに関しては、現象論的なボルツマン方程式を超えるべく、久保の線形応答理論からの熱電現象の微視的な理解が進み、電子フォノン相互作用、電子相関などのゼーベック係数への影響をモデル的に解析できる理論的体系の構築が進んでいる。一方で、マテリアルズ・インフォマティクスの活用も増えて、有効な記述子（descriptor）の発掘や高性能な熱電材料の予測だけでなく、キャリア濃度の最適化に重要なドーピングの許容具合などの予測を取り入れている例もある。

全体的な熱電材料の研究動向として、以前に比べて応用をより意識した動きが目立つ。例えば、材料開発の論文において平均ZT（使用すると想定される温度域の温度差にわたってZTの平均を取ったものであり、実効的なZT）の値や1対でも試作の熱電素子の性能評価の報告を含める論文が数多くなった。熱電物性だけでなく、実用化への道筋を示すことの重要性が浸透してきている。ウェアラブルなどIoT動作電源をめざしたフレキシブルな熱電材料・デバイスの研究開発が非常に増えてきた。無機材料でAg_2Sなど材料自体がフレキシブルなものも見つかっているが、ポリマー系熱電材料、無機・有機ハイブリッド熱電材料の研究開発に拍車がかかっている。また、冷却を含めて、室温近傍の応用をめざして、無機熱電材料のピーク性能温度を中高温からより低温にバンド構造制御でシフトさせようとする研究も増えている。

マグノンとフォノンの相互作用（磁気弾性相互作用）を介した熱流-スピン流変換の実現や、マグノンの熱ホール効果に関する実験・理論研究の進展など、スピントロニクスとフォノンエンジニアリングの融合の種となりうる研究は多数報告されている。また、トポロジカル物質を用いた熱電変換・熱スピン変換研究は、日本のみならず世界的に研究されており、物性物理学における1つのトレンドとなっている。これらの研究により異常ネルンスト効果の発現機構や材料設計指針が明らかになり、基礎物性開拓から応用研究に今後数年間かけてシフトしていくことが予想される。2018年に報告された量子熱ホール効果によるマヨラナ準粒子の観測を

皮切りとして、熱エネルギー輸送から量子力学的な物性を探る研究も進められている。これに伴って、量子物質・二次元物質などを中心に、ナノスケールでの熱・フォノン輸送やスピンとフォノンの相互作用に関する研究が加速していくと期待される。

ナノスケール熱物性の評価のためのTDTR法の基礎技術は洗練が進み、単純に薄膜の熱物性値（熱伝導率、熱拡散率）を計測することに対しては高い信頼性を有するようになっている。さらに利用範囲を拡大していくための最近の新たな試みを以下に示す。磁気光学特性の熱応答性をKerr効果として利用したTR-MOKE（Time-Resolved Magneto-Optic Kerr Effect）法は、TDTR法のトランスデューサ膜（レーザによる加熱と計測を行うために試料膜上に施される金属膜）の代わりに、極薄の磁性膜を用いて過渡的な熱応答を測定する。レーザ等の構成はTDTRとほぼ同一であるが、測定は磁性膜での反射後のプローブレーザの偏光回転（Kerr効果）により行う。厚さ20 nm以下の磁性膜を用いることができ、トランスデューサ膜（～70 nm）を用いるTDTRに比べて感度を向上させることができる。TDTR法による熱伝導率と比熱の同時決定の試みも一定の成功を見ている。TDTR法では、加熱パルス列に周期変調が加えられており、周期加熱による温度応答も信号に内包している。この変調周波数を変えることで、TDTR計測時の熱浸透率、熱拡散率、比熱容量の各感度を調整することが可能であり、これを積極的に用いることで熱伝導率と比熱容量を同時決定することができる。無機有機多層構造体やポリマー膜など比熱の予測が困難な物質に対して高い効果を示した。TDTR法を用いた熱伝導の異方性計測について、複数の提案がなされた。大別すると、①ポンプに可変の照射スポット径を用いるもの（深さ方向と面内方向との異方性）、②ポンプとプローブのビーム照射位置をオフセットするもの（面内の方位に対する異方性）、③ポンプのスポットを高比率の楕円形状とするもの（面内の方位と深さ方向の双方の異方性）がある。ただし、いずれも解析が複雑化することや、極小のレーザスポットのサイズと位置、形状の制御が必要となるため、これら装置要因に起因する不確かさには十分注意する必要がある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

米国では、エネルギー材料研究に関する政策的な変遷も関連している可能性があるが、2000年中盤から走っていたDOEのEnergy Frontier Research Center（EFRC）の3つのプロジェクトは、第2期まで更新されたMITのプロジェクトS3TECも含めて全て終了する。このため、大規模な拠点的な新規プログラムは無いと思われるが、Northwestern大、Houston大など多くのアクティビティーの高い研究室があることから、今後も多くの成果が出されると考えられる。最近の傾向として、中高温のターゲットから（自動車応用の大型のDOEプログラムも終わっており）、冷却応用を含めて、室温近傍のIoT用の熱電材料研究開発に研究がシフトしており、本分野での激烈な競争が続くと考えられる。フレキシブルなどのIoT用の熱電材料・デバイス開発に関して、特に、Georgia TechやVirginia Techなどで、実用化をめざした大型の取り組みが行われている。NASA JPLは、次世代のRTGに使用する材料としてスクッテルダイトの長時間の耐久性テストなどを完了しており、スクッテルダイト熱電モジュールを探査機に搭載する準備を進めている。

欧州では、各国政府や自治体の大きな予算に加え、THERMOMAG、NANOHIGHTECHなどEUの複数の大型熱電プロジェクトが2000年代後半から走り、熱電研究人口と活動の大幅増をもたらした。2019年にCNRSのNAME（Nanomaterials for Energy Applications）という5年プロジェクトが始動し、ERC（European Research Council）のファンディングも継続している。大型で包括的な材料開発などのプロジェクトがいくつか終了したが、現在でも、ERCから数億円規模の熱電予算のプロジェクトが複数ある（ドイツのトポロジカル熱電材料プロジェクトなど）。Horizon 2020では、熱電変換に関する多数のプロジェクトがあり、数年前は材料開発など基礎的なプロジェクトが多かったが、応用志向のプロジェクトが増加してきた。

HarvestALLやFAST-SMARTなどの環境発電プロジェクト、HYTECやHYPERTHERMなどの有機材料を用いた熱電プロジェクト、モデリングからデバイスまでをめざすHYTECプロジェクトがある。目新しいプロジェクトとしては、二次元材料を用いた量子熱電プロジェクトQTherm-2Dが始動した。

ドイツにおいては、EU関連の大型熱電プロジェクトのほかに、独自に2011～2015年の約30億円規模のプロジェクト「Industrieorientierte Fördermaßnahme ThermoPower」を筆頭に、現在でもそれより小規模であるが、German Science foundation（DFG）やGerman Ministry of Science Education（BMBF）から熱電研究にかなり潤沢な予算が配分されている。フランス固有の大型のプロジェクトとしては、高温熱電材料のHIGHTHERMなどがあり、複数のFrench National Research Agency（ANR）の大型熱電プロジェクトが走っている。英国では、The Engineering and Physical Sciences Research Councilにおいて、熱電関連の個別のプロジェクトが現在約50走っている。

中国においては、総額で極めて大きな熱電予算が投入されており、研究者数では世界トップになったと考えられる。例えば、基礎熱電材料開発には2千人以上の国研・大学の研究者がおり、中国材料学会（Chinese Materials Research Society）の中で、中国熱電学会（Chinese ther-moelectric society）がもっとも大きな組織になっている。大きい研究拠点としては、Wuhan工科大、SICCAS、精華大、Beihang大、SUSTEC、上海大、Zhejiang大などがあり、熱電研究がさかんに行われている。予算に関しては、材料開発の基礎研究はMinistry of Science and Technology（MOST）やNational Natural Science Foundation of China（NSFC）、実用化研究は、National Key Research and Development Program of China で毎年大型の予算が熱電に充てられている。公表されているMOSTの最近の比較的大きなプロジェクトは3億円～5億円の規模で、例えば、マテリアルズ・インフォマティクスを活用して新規構造、新規材料を探索する非常に基礎的なプロジェクト（Thermoelectrics based on materials genome［2017-2021］）、室温近傍の高性能材料の探索研究（Room-temperature TE（targeting ZT=2.0）［2019-2023］）、磁性熱電材料の開発研究（Research on high-efficient, all-solid-energy-conversion, thermoelectromagnetic novel materials and devices［2020-2024］）などがある。 NSFCにおいても、「Thermoelectrics and energy materials」の領域で、さらに大型のプロジェクトが走っている。この他に、フレキシブル熱電材料やマイクロ冷却デバイスなどについても重点的な開発が行われている。また、National Key Research and Development Program of Chinaは、～8億円（5年以内）の大型の熱電実用化プロジェクトを複数走らせている。

韓国においては、基礎の材料開発に比べて、実用化研究に比重がある。研究機関としては、Yonsei大、Kyung Hee大、Seoul大など数多くの大学、KICET、KERI、KAISTなどの国研で熱電研究がさかんに行われている。アカデミア向けの公的な競争的資金では、大小約80件の熱電プロジェクトがある。直近の1年間の集計で総額約24億円/年、2年半の集計で総額約70億円の予算となっており、国の人口を考えると熱電予算規模が非常に大きい。約7割がモジュール関連の研究で材料開発が約3割である。室温近傍の熱電材料・デバイス開発が主流であり、ナノ構造材料を含めて約3分の2のプロジェクトがそこにフォーカスされている（全体の約3分の1のプロジェクトはBi_2Te_3系材料・デバイスに関連）。また、企業が関係した予算プロジェクトはこの数倍の予算であり、産学官の連携が活発である。

日本においては、スピンと電気・熱・電磁波・光などさまざまなエネルギーとの関わりを調べる基礎研究が、2014年度から2019年度まで科学研究費補助金・新学術領域研究「ナノスピン変換科学」において精力的に進められた。2015年からJSTのCREST・さきがけ複合領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」において、複数の熱電関連の課題があり、熱電のエネルギーハーベスティングの実用化に向けた高性能材料・デバイスで有望な成果が得られている。また、複数のCREST SU（ステップアップ）課題が、

2019年から選定されて並行して進められている。2017年からのCREST「ナノスケール・サーマルマネージメント基盤技術の創出」、さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」においては、フォノンエンジニアリングに関する課題が多数進められている。また、2019年の年末から、センサ用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術の課題が、未来社会創造事業の大型プロジェクトで動き出している。高性能熱電材料開発の先端的な技術だけでなく、産業・大量生産に合致したプロセスによる発電モジュールの開発、モジュール関連の要素技術や熱管理技術の開発を進めて、熱電発電の広範囲実用化をめざしている。経産省では未利用熱を削減する大型プロジェクトが産総研と企業中心に走っており、モジュール関連技術などの開発を進めている。

（5）科学技術的課題

ナノスケールにおけるフォノン輸送と熱伝導の物理探求および制御技術は、さまざまな材料、ナノ構造での系統的な実験結果の蓄積とシミュレーション技術の進展に加え、インフォマティクスの活用によって、着実に進展している。しかし、解釈やシミュレーションによる再現が困難な実験データが得られる場合は少なくない。ナノ構造では、構造パラメータに加えて界面や表面の性質、形状、欠陥などに依存する散乱がフォノン輸送特性に大きな影響を与えることが知られており、フォノンエンジニアリングにおいて表面状態や欠陥の制御技術が重要な技術的課題の1つである。

熱電材料の材料開発側面に関しては、ホイスラー系薄膜の準安定状態やCu_2Se系などの超イオン伝導体やイオン化ゲルなど、広くとらえると非平衡的な状態を活用して、熱電の超高性能、高性能を発現させる新規な試みで最近顕著な成果が出ており、こうした準安定や非平衡的な系を系統的に開発する研究開発の仕組みや理論的なツール・方法論などの構築が望まれる。ナノコンポジット材料も、単一の材料の熱電物性を凌駕する方法として、変調ドーピング、energy filtering、粒界に金属相を入れ込んだナノコンポジット化などで熱電性能の高性能化が示されているが、このような熱電ナノコンポジット材料の開発をマテリアルデザインへ昇格させることが重要である。すなわち、より高い制御性で精緻なナノコンポジット構造の作製手法の開発、マルチスケールな第2相が存在する場合の計算手法の開発などが必要である。また、熱電高性能化の簡易なフォノンエンジニアリング手法としてナノ多孔を導入する方法がある。例えば、Bi_2Te_3系材料の代替材料として研究が進んでいるMg_3Sb_2系においてMgに起因すると思われる多孔が散見され、これが高性能の要因の1つと考えられているが、十分な理解や制御ができていない。上記のナノコンポジット同様、ナノ多孔のより精緻な作製手法、およびシミュレーション方法の開発が待たれる。

スピンカロリトロニクスは毎年のように新現象が発見されている稀有な分野であり、領域誕生以来10数年でその学理形成は大きく進展した。しかし、熱-スピン変換現象のメカニズムの本質は解明されてきたものの、実験結果と定量的に比較・検証できる理論モデルが未だ構築されていない点が課題である。ゼーベック効果にもとづく熱電変換能を高めるための原理として、長らく量子効果や低次元化が主要な研究トピックとなり成功を収めているが、スピンカロリトロニクスにおいてはこのような実験報告は見当たらない。各種スピンカロリトロニクス現象の量子効果・低次元化の影響を明らかにすることは、基礎物理・工学応用の両面において重要であろう。実験技術が成熟しているスピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果に関しては、性能指数・熱電発電効率の評価基盤が確立されてきたものの、モジュールに対する適用や、実際の利用形態における性能評価にはいたっていない。熱エネルギー制御技術としての応用をめざすためには、熱エネルギー輸送効率の評価基盤や熱設計指針も必要となる。

TDTR法に関しては、コロラド大のJianらが2018年に著したTDTR法のチュートリアルで、以下の5項

目の課題があげられている。1）粗面の測定（TDTR法ではサンプル表面が光学的に平滑である必要があり、表面RMSとして15nm以下であることが基準）、2）高周波TDTR法（深さ分解能の大幅な向上、非常に薄い薄膜の熱伝導率測定、さらに高い値の界面熱伝導率の測定、およびより広い範囲にわたるフォノンダイナミクスの計測に利点）、3）トランスデューサ膜の問題（金属トランスデューサを使用しない直接TDTR測定について大幅な進歩が必要）、4）フォノン熱輸送による解析（より厳密な方法として、フォノンボルツマン輸送方程式にもとづいてTDTRデータを解析）、5）温度範囲の拡大（およそ30～600 Kに制限されているTDTR法の適応温度範囲を拡大）。

（6）その他の課題

これまでの国内のさまざまな研究開発施策により、熱電材料・デバイスやフォノンエンジニアリングの研究側面における取り組みが充実しており、2000年代中盤以降一時期バブル的な資金投与された米欧中韓と対抗、リードできる競争力を日本が有するようになってきた。フォノンエンジニアリングや熱電環境発電が普及し産業や社会に貢献するためには、キラーアプリの探索に一層の努力が必要である。研究者のボトムアップ的視点に加え、企業だけでなく自治体や起業家などを巻き込んだ異業種、異分野の幅広い人材を交えたオープンイノベーションの仕組みや機会が望まれる。スピンカロリトロニクス研究を例にとると、磁性・スピントロニクス分野だけでなく、エレクトロニクス・材料・伝熱工学などさまざまな分野の専門家、および産業界が結集・連携して、その応用対象やデバイス・システムの設計指針から検討を進めていく必要がある。一方、熱電発電の広範囲な実用化のためには、初期フェーズでコスト側面の圧力を緩和することで、企業の積極的な参画を促したり、新興マーケットの創出を促したりするような適切な政策の支援も重要と考えらえる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・Society 5.0の実現へ向けたIoT熱環境発電開発の必要性により、異分野からの研究者の新規参入で熱電の研究者は増えている。 ・ファンディングにおいても、2015年後半からJSTやNEDOでさまざまなプロジェクトが推進されている。 ・元素戦略的な材料に関する基礎研究や、磁性（磁気相互作用、スピンゆらぎ、スピンゼーベック、異常ネルンスト等）などを活用する日本発の新原理、顕著な成果・発展がみられる。 ・応用物理学会などで、フォノンエンジニアリングやエネルギーハーベスティングの活動が活発化し、ネットワーキング、人材育成が加速している。
	応用研究・開発	○	↗	・経産省の未利用熱を削減する大型プロジェクトが産総研と企業中心に走っており、モジュール作製や評価などに関する実用化技術の開発が進んでいる。 ・薄膜の熱電性能評価の標準化の取り組みも始まっている。 ・NEDO先導研究プログラム「未踏チャレンジ2050」、「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム」でスピンを利用した熱電変換に関する研究が開始された。 ・JSTにおいて、IoTセンサ用の自立電源を開発する未来社会創造事業大型熱電プロジェクトがスタートしている。 ・エネルギーハーベスティングをキーワードに販売開始する動きもあり、コンソーシアム活動なども活発である。

米国	基礎研究	◎	↘	・研究者人口が多く、材料開発、計測技術、理論・数値解析など幅広くカバーしており、二次元材料の作製・熱計測で新展開がみられる。 ・新規な原理（低次元量子効果、フォノンの選択散乱、共鳴準位、変調ドーピング、バンドの縮重度増強など）などを提唱してリードしてきた側面があるが、エネルギー政策的な変遷もあり、熱電関連EFRCなどの大型プロジェクトが終了する。 ・複数の拠点形成型事業により、スピンカロリトロニクスの研究が大学を中心に精力的に進められてきた。
	応用研究・開発	◎	→	・探査機のRTGで長年の実装研究開発実績を誇るNASA JPLは、次世代機へ向けたスクッテルダイトや$Yb_{14}MnSb_{11}$系などの新規材料のモジュール作製技術、長時間の性能試験、信頼性試験と総合的な応用研究の開発能力を持っている。 ・Georgia TechやVirginia Techなどでフレキシブルなど IoT用の熱電発電デバイス開発の比較的大きな取り組みがある。 ・Marlow、Gentherm（元Amerigon）など、主に熱電冷却用で歴史的に市場を確保した企業があり、熱電ベンチャー企業も建ちやすい土壌がある。
欧州	基礎研究	◎	→	・EUからのERC、Horizon 2020の大型予算プロジェクトのほかに各国の個別の熱電プロジェクト予算（ドイツDFG、BMBFやフランスANRなど）がある。例えばスピンカロリトロニクス関係では、ERC Synergy Grants（研究費 約10Mユーロ）でのスピン流-電流変換とスピンカロリトロニクスを主軸とした大型プロジェクト（2014～2020年）や、SPINBEYOND（2017～2022年）などがある。 ・ナノスケール熱伝導においては、SThM、IR SNOM、ラマンなどの計測技術が高度化し、理論研究も発展がみられる。 ・eMRS内のセッションとEurothermおよびワークショップ、スクールが高頻度で開催されており、活発である。 ・フランスでは大きな国研のラボ3つ、CRISMAT、Grenoble（CEA）、Montpellierを筆頭にかなり機関数が多く、材料開発研究が特に活発である。 ・ドイツでは、材料開発研究では複数のMax Planck研究所やLeibniz研究所などが先導している。 ・英国では、Manchester大やQueen Mary U. London、Reading大を中心に数多くの大学で研究を進めており、熱電関連予算プロジェクトが約50個走っている。 ・イタリアでも熱電学会を立ち上げ、熱電研究に従事する大学・国研が活発に増えている。
	応用研究・開発	○	↗	・Horizon 2020で応用研究に関するプロジェクトが多数採択されている。 ・ETCやTHERMINICといった応用をカバーする国際会議やCNRSの熱電ネットワークが活動を継続している。 ・熱電環境発電では、ERC予算配分があり、スタートアップ企業も存在する。 ・モジュール開発に関しては、例えば、フラウンホーファー研究所やGerman Aerospace Center（DLR）で国研ならではの基盤的な研究開発が引き続き行われている。 ・中高温の自動車応用メインから、実用化ターゲットがIoT用発電など多岐に渡りはじめ、さまざまな業態の大企業（例えばフランスTotalやSolvayなど）における熱電研究が始まっている。 ・英国ではInnovateUKの大規模なプロジェクトで、大型の工場廃熱発電と小型のウェアラブル熱電発電の両極端にフォーカスしている。

中国	基礎研究	◎	↗	・MOST、NSFCなどから大きな熱電予算投下がされており、研究者数も世界トップとなっている。 ・Wuhan工科大、SICCAS、上海大、精華大、Beihang大、SUSTEC、Zhejiang大などで大型プロジェクトの下で熱電研究がさかんに行われている。 ・フォノンエンジニアリング、バンドエンジニアリング、などを活用して材料最適化して高性能化するスピードが随一であり、Ag_2Sなどのフレキシブル無機材料や超イオン伝導体熱電材料など新規な話題も多く出されている。
	応用研究・開発	○	↗	・実用化研究に関しては、National Key Research and Development Program of Chinaが、～8億円（5年以内）の大型熱電プロジェクトを複数走らせている。 ・国研・大学での機械的性質や電極コンタクト、モジュール作製・評価などのモジュール開発の研究も増えており、応用に必要な最適化研究も迅速に行える大きなマンパワーも備えている。 ・中国の熱電専門企業は、FerroTecを筆頭にペルチェの熱電冷却の企業の数は非常に多いが、最近、Thermonamicなどのように熱電発電のモジュールやシステムも提供する企業が増えている。
韓国	基礎研究	○	→	・大学・国研向けの熱電関係の予算は直近で約80件で総額約24億円/年（直近2.5年で総額約70億円）と潤沢にある。 ・室温近傍の用途で、熱電冷却やIoT用熱電発電材料・デバイスの研究開発に大きな重点がある。 ・Yonsei大、Kyung Hee大、Seoul大など数多くの大学、KICET、KERI、KAISTなどの国研などで研究がさかんに行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・基礎の材料開発に比べて、応用研究に比重がある。企業が関係した研究プロジェクトの資金も潤沢にある。 ・大学のみならず、KERIやKRISSなどで研究が継続している。 ・LG Innotek などから熱電変換モジュールが販売され、ThermorealがVRエンタテインメント分野にフレキシブル熱電変換デバイスを採用するなど、新しい市場を開拓する動きがみられる。 ・大学発ではフレキシブルでウエラブルな発電デバイスの研究開発が活発に発表されており、KERIなどの国研では、材料開発からモジュール作製、発電評価の一環とした研究開発をできる体制を有している。 ・産学官の連携研究が活発。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・複雑系材料の設計・プロセス（ナノテク・材料分野　2.5.7）

参考・引用文献

1) T. Mori and S. Priya, “Materials for energy harvesting：At the forefront of a new wave”, *MRS Bulletin* 43, no. 3（2018）：176-180. doi：https://doi.org/10.1557/mrs.2018.32
2) K. Biswas et al., “High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures”, *Nature* 489, no. 7416（2012）：414-418. doi：10.1038/nature11439
3) K. Koumoto and T. Mori, *Thermoelectric Nanomaterials：Material Design and Applications*, Springer Series in Materials Science（Heidelberg：Springer, 2013）.
4) Z. Liu et al., “Nano-microstructural control of phonon engineering for thermoelectric energy harvesting”, *MRS Bulletin* 43, no. 3（2018）：181-186. doi：https://doi.org/10.1557/mrs.2018.7
5) J. Qiao et al., “Tailoring Nanoporous Structures in Bi_2Te_3 Thin Films for Improved Thermoelectric Performance”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11, no. 41（2019）：38075-38083. doi：https://doi.org/10.1021/acsami.9b13920
6) T. Mori, “Novel Principles and Nanostructuring Methods for Enhanced Thermoelectrics”, *Small* 13, no. 45（2017）：1702013. doi：https://doi.org/10.1002/small.201702013
7) J. -B. Vaney et al., “Magnetism-mediated thermoelectric performance of the Cr-doped bismuth telluride tetradymite”, *Mater. Today Phys*. 9（2019）：100090. doi：https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.03.004
8) 森孝雄，辻井直人「磁性元素を用いた新規熱電材料の開発」『応用物理』88巻4号（2019）：252-256. doi：https://doi.org/10.11470/oubutsu.88.4_252
9) B. Hinterleitner et al., “Thermoelectric performance of a metastable thin-film Heusler alloy”, *Nature* 576（2019）：85-90. doi：10.1038/s41586-019-1751-9
10) M. Ogata and H. Fukuyama, “Range of Validity of Sommerfeld-Bethe Relation Associated with Seebeck Coefficient and Phonon Drag Contribution”, *J. Phys. Soc. Jpn*. 88, no. 7（2019）：074703. doi：https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.074703
11) X. Song et al., “Grain Boundary Phase Segregation for Dramatic Improvement of the Thermoelectric Performance of Oxide Ceramics”, *ACS Applied Materials & Interfaces* 45（2018）：39018-39024. doi; https://doi.org/10.1021/acsami.8b12710
12) I. Petsagkourakis et al., “Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation”, *Sci. Tech. Adv. Mater.* 19, no. 1（2018）：836-862. doi：https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1530938
13) J. Mao et al., “High thermoelectric cooling performance of n-type Mg_3Bi_2-based materials”, *Science* 365, no. 6452（2019）：495-498. doi：10.1126/science.aax7792
14) Run Hu et al., “Machine-learning-optimized aperiodic superlattice minimizes coherent phonon heat conduction”, *Physical Review X* 10, no. 2：021050. doi：10.1103/PhysRevX.10.021050
15) Puqing Jiang, Xin Qian and Ronggui Yang, “Tutorial：Time-domain thermoreflec-tance（TDTR）for thermal property characterization of bulk and thin film materials”, *J. Appl. Phys*. 124, no. 16（2018）：161103. doi：https://doi.org/10.1063/1.5046944

2.5.5 トポロジカル材料

（1）研究開発領域の定義

トポロジーにもとづく新たな物質観によって導かれる物質群の創出とその基礎学理の構築およびトポロジカル材料を応用した革新的デバイス創出をめざす研究開発領域である。原理的にその性能向上の限界が顕在化しているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築き、Society 5.0を支える基盤強化等への貢献が期待されている。

（2）キーワード

トポロジカル絶縁体、トポロジカル物性、ワイル磁性体、スキルミオン、量子異常ホール効果、量子スピンホール効果、スピン運動量ロッキング、マヨラナ準粒子、トポロジカル量子コンピューティング、トポロジカルスピントロニクス、トポロジカルフォトニクス

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

トポロジーは位相幾何学という数学の分野で発展してきた学問体系であるが、2000 年以降、それを物質系に適用することで、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相として「トポロジカル物質」が登場した。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体においては、物質の内部は絶縁体状態であるにもかかわらず、物質の表面、つまり外部との境界（3 次元系であれば表面、2 次元系であれば端）にトポロジーに特徴づけられた特異な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きを揃えていること（スピン運動量ロッキング）が特徴である。また、トポロジカル絶縁体の派生物質であるトポロジカル超伝導体の中にマヨラナ粒子が存在しうること、トポロジカル半金属の 1 種であるワイル半金属の中にワイル粒子が存在することなどが相次いで発見されている。これらの準粒子はトポロジカル物質の特異な物性の起源となっている。通常の物質とは異なり、トポロジカル物質には非磁性の欠陥や不純物に対して堅牢（ロバスト）な性質を持つ電子が存在するため、スピントロニクスや量子コンピューティングへの応用に大きな期待が寄せられている。さらに、実空間のトポロジーに起因したスキルミオンは、高密度高速メモリへの応用に向けた精力的な研究が行われている。

［研究開発の動向］

本領域では、物質の有する電子構造の成り立ちを基礎的に理解することから始まり、空間群と電子構造を繋ぐ新たな分類を確立しつつある。理論的な観点から、元素を選択するだけで物質の対称性と電子構造の計算結果を表示し、トポロジカルな構造を有するかどうかを示してくれる“Topological Materials Database”もweb上で利用できるようになっている。トポロジカルな電子構造の示す各種物性を基礎的観点から理解することに加えて、それらの制御指針の確立に向けた取り組みが行われている。こうした物質の探索に加えて、薄膜や界面を用いたデバイス化技術の構築も行われつつある。トポロジカルな電子状態に起因する巨大な信号生成や高効率なエネルギー変換、信頼性の高い量子計算技術など高度な情報処理に貢献する技術開発を行っている。最近では、薄膜や界面を精密に合成することで電子構造の制御を通した物性制御の基礎的応用研究も進んでいる。また、表面状態の示す高効率スピン運動量ロッキングを介した強磁性スピン状態の制御や量子異常ホール状態に生じる非散逸エッジ状態の電子伝導方向制御、マヨラナ準粒子の検証実験が広く行

われ、基礎と応用の両面で着実に研究が進んでいる。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• 量子異常ホール効果

二次元トポロジカル物質系に生じる１次元のエッジチャネルは非散逸な伝導チャネルとして活用できることが期待される。従来の量子ホール効果では、エッジ状態を形成させるために強い磁場を印加する必要があるため、標準抵抗の応用以外には、電子素子などへの展開を検討することが困難であった。一方、磁性トポロジカル絶縁体では、磁化でエッジチャネルが形成されるため、小さな外部磁場印加によって磁化の方向を制御して、エッジチャネルの伝導を連動させて制御することが可能になる。すでに、磁化と伝導方位の制御技術は低温で実証されている。強磁性転移温度の上昇やさらなる精緻な伝導性制御が実現されることで、低消費電力素子への基礎技術に発展する可能性がある。

量子異常ホール効果のエッジ状態とｓ波超伝導体との近接効果によって、マヨラナ準粒子を保持することが理論的に示唆されており、実験的にも観測を主張する報告がなされた。再現の報告が待たれる状況ではあるが、マヨラナ準粒子を制御するためのいくつかの手法の１つとして高い注目を集めている。

量子異常ホール効果は2013年の観測以来、表面状態を保持する三次元トポロジカル絶縁体をベースに磁性不純物を添加することで磁気的相互作用を発現させてギャップを形成し、量子化を実現してきた。この手法では精密なフェルミ準位制御を必要とするため、現象が発現する材料系は薄膜や積層構造に限定されている。加えて、最近では、強磁性体とのヘテロ接合により近接効果を誘起してギャップ形成を行う手法も開発されている。

量子異常ホール効果を実現する方法の開発が進むとともに、新たな物質開拓も成果を挙げている。それら量子異常ホール状態をベースとするトポロジカル物性の制御技術開発としても、エッジ流の制御、巨大な電気磁気効果、マヨラナ粒子の形成など、着実に開発が進められている。

• ワイル半金属、ワイル磁性体

ワイル半金属では、物質の結晶構造に由来した偶数個のワイル点を有しており、それぞれがスピンの湧き出しと吸い込みの関係にある。特に、物質の磁性によって創出されるワイル点を持つワイル磁性体は、電子構造と物性の関連について検証が進められている。これらの物質では、ワイル点を持つトポロジカルな電子構造に起因する仮想磁場を利用することで、巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果が発現する。従来の強磁性体と比較した場合、数十～数百倍程度大きな値を示すことが報告されており、これらの巨大な効果を用いた磁気センサや熱電変換素子の実証研究が進められている。こうした電子素子に加えて、３次元で線形な電子構造に由来する高い電子移動度を利用すべく、触媒反応や水分解反応にワイル半金属を適用する研究も複数報告されている。表面にはワイル点を投影した特徴的なバンド状態（フェルミアーク）も存在するため、化学的な側面での研究も今後増える可能性がある。

• スピン流生成と磁化反転

トポロジカル物質群の有する線形な電子状態がもたらすスピン運動量ロッキングを活用したスピン流生成と電流印加による強磁性スピン状態の制御研究が進められている。従来の物質中のスピンホール効果によるスピン流生成に比べて、スピン運動量ロッキングでは高効率にスピン流を生成できることが報告されている。実

際に、強磁性体との接合作製では、三次元トポロジカル絶縁体のみならず、ディラック半金属などでも研究がなされており、低電流密度での磁化反転の実証実験が様々な物質の組み合わせで実現されている。また、磁性を持つワイル半金属中のスピン流生成や磁化反転を伴う制御についての報告も増えている。

• スキルミオンメモリ制御

実空間でトポロジーに保護された磁気構造としてスキルミオンが注目されている。 B20型構造におけるスキルミオン格子の直接観察以来、結晶構造の対称性から物質探索が進み、スキルミオン格子を実現する物質系がおおいに拡張された。特に、外部磁場ゼロで室温においてスキルミオン格子を安定に保持する物質（Co-Zn-Mn合金など）が発見されたことは、実用化に向けて重要な進展と言える。トポロジカルなスピン構造の開拓としても、新たに3次元構造であるヘッジホック構造が見出され、物質の対称性や磁気的性質との相関によって、サイズや安定性の理解について議論が進められている。評価技術においても、ローレンツ顕微鏡を用いた直接観察や中性子散乱、動的安定性の評価など、詳細な検討が進められている。さらに、金属積層構造や各種の積層構造においても、界面のジャロシンスキー守谷相互作用を活用した磁気スキルミオンの形成が世界中から報告されている。特に、電流印加や熱などの外部刺激を用いて、スキルミオンを動作させる研究が急速に進展している。

• シフトカレント、非相反現象

波数空間の電子構造に由来して、実空間で絶縁体でも光照射によって効率的に電流を生成する現象がシフトカレントである。空間反転対称性の破れた強誘電体などを中心に研究されている。半導体を用いた光電効果は、pn接合で電荷制御された界面における光吸収と電荷分離を原理としており、太陽電池への応用が考えられる。一方、シフトカレントは物質中に電荷分布の必要はなく、光吸収によって生成された電荷は波数空間での要請から、実空間で電荷を運ぶことに寄与するため、高速な電荷移動による高効率な光電変換現象として期待されている。

空間反転対称性の破れた界面などにおいて、右向きと左向きの電流や光伝搬の度合いが異なるいくつかの現象が報告されている。ある種のダイオード現象であり、単純な試料構造であるにもかかわらず、信号制御などに利用できる可能性もあり、進展が注目されている。

• マヨラナ準粒子探索

マヨラナ準粒子が持つ非可換統計性を用いることで、誤り訂正を大幅に低減したトポロジカル量子コンピューティングが実現できるとして、世界中の研究者がマヨラナ準粒子の探索を進めている。まだ実証はされていないものの、現状では、超伝導とナノワイヤのヘテロ接合系、分数量子ホール系、量子スピン液体、鉄系超伝導の量子渦などでマヨラナ準粒子が存在するのではないかとの示唆がなされている。

• トポロジカルフォトニクス

電子系のトポロジーの概念をフォトニクスに適用することで、無散乱走行可能な光導波路による低損失かつ高速通信や、伝搬する光の分散関係を制御することで光の遅延回路や光メモリへの応用が進められている。特に最近では、半導体ナノフォトニクスのプラットフォームでの研究がさかんになっている。例えば、半導体ナノフォトニクスを用いたバレーフォトニック結晶導波路、蜂の巣構造フォトニック結晶やバレーフォトニック結晶エッジ状態を用いたレーザ開発、高次トポロジカル状態に対応するコーナー状態を利用した光ナノ共振

器の実現、トポロジカルスローライト導波路の提案などがなされている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

• 日本

2010年から科学研究費助成事業の新学術領域研究において、トポロジーをキーワードとした新しい物理現象の発見および普遍概念の創出をめざした「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子研究」（領域代表者：前野悦輝・京都大学教授、2010～ 2014年度）が開始された。5年間の研究によって、「トポロジカル量子現象」が世界的にも広く認知されるものとなり、特に超伝導体・絶縁体だけではなく、超流動体・冷却原子系も含めた世界的にも他に例を見ない分野融合型プロジェクトをわが国が世界に先駆けて推進した。さらに 2015年度からは、上記新学術領域研究の格段の発展と、トポロジカル物質科学の基礎学理構築をめざして新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（領域代表者：川上則雄・京都大学教授、2015～2019年度）が発足した。他には、東北大学原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIMR、拠点長：小谷元子・東北大学教授）における3つのターゲットプロジェクトの1つとして「トポロジカル機能性材料」が取り上げられ、数学者と材料科学者の共同研究が推進された。また、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「強相関量子科学」（中心研究者：十倉好紀・理化学研究所センター長、研究期間：2009～2013 年度）や最先端・次世代研究開発支援プログラム（NEXT）「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」（研究代表者：安藤陽一・大阪大学教授（当時）、研究期間：2010～2013 年度）においても世界を牽引する研究成果が創出されている。さらに、2018 年にはこれまで蓄積された基礎研究成果を元にデバイス応用へ向けた研究を加速することを目的として文部科学省の戦略目標「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」が設定された。それを受けて、JST においては戦略的創造研究推進事業CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域（2018～2025年度、研究総括：上田正仁・東京大学教授）およびさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」領域（2018～2023年度、村上修一・東京工業大学教授）が発足し、トポロジーの概念によって基礎学理からシーズ育成研究、応用研究までを通して統合し、新たな機能を持つトポロジカル材料の開発や小型化、高速化、低消費電力化、耐傷・伸縮性向上などに資する革新的材料およびデバイスの創出をめざした研究開発を推進している。

• 米国

Microsoft Station Q

Microsoft は、カリフォルニア大学サンタバーバラ校キャンパスにStation Q Santa Barbaraという研究施設を開設し、トポロジカル量子コンピューティングに関する先導的な基礎研究を行ってきた。 Station Q Santa Barbaraを率いるのが数学者の Michael Freedman であり、トポロジーにおいて難問とされるポアンカレ予想が4次元において成立することを証明し 1986 年にフィールズ賞を受賞した人物である。 Station Q では、数学者、物理学者、コンピュータ科学者、工学者が共同で、物質のトポロジカル相がどのように、頑強でスケーラブルな量子コンピュータ・アーキテクチャの構築に使えるかを理解することを目的として、世界中の大学の研究者とも協力しながら基礎研究を進めている。また、Microsoft レドモンド本社の敷地にあるStation Q Redmond では、量子アーキテクチャと量子計算に関する研究を行っており、量子アルゴリズムの開発とそれらの意味を理解することに専念するとともに、スケーラブルで誤り耐性のある量子コンピュータのアルゴリズムやプログラムを作るための包括的なソフトウェア・アーキテクチャをデザインすることに打ち込ん

でいる。さらに、世界中の共同研究者と一緒に量子コンピュータを構築するための取り組みを積極的に行っている。例えば、オランダのデルフト工科大学Leo Kouwenhoven教授、デンマークのコペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所Charles Marcus教授、スイスのチューリッヒ工科大学 Matthias Troyer教授、オーストラリアのシドニー大学David Reilly教授の4氏が、各大学の教授の立場を維持したまま Microsoft にも雇用される形態をとっている。 Microsoftは、各大学にそれぞれ Station Q Delft、Station Q Copenhagen、Station Q Zurich、Station Q Sydney を開設し、プロジェクト最高責任者 Todd Holmdahl のもと、トポロジカル量子コンピュータ研究開発にStation Qの総力をあげて研究開発を実施している。

Gordon and Betty Moore Foundation

米国 Gordon and Betty Moore財団は、Emergent Phenomena in Quantum Systems（EPiQS）Initiativeとして、量子物質における創発現象（電子多体系での高温超伝導、重い電子状態、トポロジカル物性、新しい準粒子の出現など）に関する基礎研究を対象に、第1ステージ（2014～2019年）では実験研究者19名（約2.2億円/人・5年）、物質合成専門家12名（約2.0億円/人・5年）、理論センターとして6大学（ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学、スタンフォード大学、UCバークレー校、UCサンタバーバラ校、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校）に約10億円/5年、さらに第2ステージ（2020～2025年）では実験研究者20名（約1.6億円/人・5年）、物質合成専門家13名（約1.7億円/人・5年）、理論センターとして8大学（カリフォルニア工科大学、ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学、プリンストン大学、スタンフォード大学、UCバークレー校、UCサンタバーバラ校、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校）に約9.4億円/5年を投資している。プログラムディレクターはDusan Pejakovic氏であり、米国内の物性物理学分野の強化とともに若手を含む質の高い研究者の育成を図っている。

エネルギー省（DOE）

米国DOEが実施する41の「Energy Frontier Research Center: EFRC」（約2.1～4.2億円/センター・年）のうち、エイムズ研究所のCenter for the Advancement of Topological Semimetals（CATS）およびジョンズホプキンス大学のInstitute for Quantum Matter（IQM）では、新規トポロジカル材料開発を実施している。

• 欧州

ドイツにおいては、ビュルツブルグ大学のLaurens W. Molenkamp教授、マックスプランク物理学研究所の高木英典教授、および同じくマックスプランク固体化学物理学研究所のAndrew Mackenzie教授、ケルン大学の安藤陽一教授を中心に、トポロジカル絶縁体、量子スピン液体、トポロジカル超伝導などの研究がさかんに行われている。特にDFGのエクセレンス戦略におけるエクセレンスクラスターの1つとして、2019年よりケルン大学を中心とした「Matter and Light for Quantum Computing：ML4Q」が開始され、トポロジカル量子コンピューティング実現へ向けた研究開発が開始されている（第1期は2025年まで）。また、英国では工学物理科学研究会議（Engineering and Physical Sciences Research Council：EPSRC）の支援の下、セントアンドルーズ大学、エジンバラ大学、オックスフォード大学、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンが共同し、2011年から6年間、総額 680万ポンドの研究プログラムTOPNES（Topological Protection and NonEquilibrium States in Strongly Correlated Electron Systems）が推進された。イタリアの CNR-SPIN やロシアのモスクワ物理工科大学Superconducting TQP labなどでもトポロジカル物質関連の研究が行われている。また、上述の通り、オランダのデルフト工科大学では、Microsoft Station Qの支援の下、トポロジカル量子コンピューティング実現に向けた研究開発を実施している。

• 中国

上海交通大学の SCCP（Shanghai Center for Complex Physics）においては、2003年にノーベル物理学賞を受賞したAnthony J. Leggett教授をディレクターに招聘し、100人以上の教職員を抱えて、超高強度レーザ物理、トポロジカル量子物質、高温超伝導、宇宙論、ダークマターなどを対象とした研究開発を推進している。また、1988年のF. D. M. Haldane氏による理論提唱以降、実験的な観測がなされていなかった量子異常ホール効果を2013年に世界で初めて実証した精華大学 Qi-Kun Xue教授に 2016年9月、第1回未来科学大賞（中国版ノーベル賞、賞金 100 万ドル）が授与された。さらに、Qi-Kun Xue教授を院長とする北京量子情報科学研究院（Beijing Academy of Quantum Information Sciences：BAQIS）を2017年12月24日に設立した。研究者および技術者合わせて約1200名（うち、主任研究者（PI）が約50名）の大所帯であり、4つの研究部（量子物質科学研究部、量子計算・通信研究部、量子材料・デバイス研究部、量子精密測定研究部）と2つの技術支援プラットフォーム（先端微細加工プラットフォーム、総合計測・評価プラットフォーム）、技術移転・産業化センター、管理部から構成されている。近年の中国の本研究分野に対する研究アクティビティは質・量ともに非常に高くなっていることは注目に値する。

（5）科学技術的課題

トポロジカル物質群の示す特徴的な性質は、従来の半導体や絶縁体、磁石にはない機能をもたらす可能性がある。これまでは、電子構造と物性との関わりを体系的に理解することが進められてきた。これらは、特に、物理学分野や物質科学分野での研究者が中心となって推進されている。こうした基礎学術の分野では、実験技術の高度化や複合的な検証が世界的な潮流となっており、計算と実験、合成と評価、合成とデバイスなどの融合研究が必須である。国内では、新学術領域がこうした分野融合や共同研究を推進する役割を果たしてきた。今後、基礎と応用、理学と工学の観点で橋渡しして世界に伍する研究発展を加速させる必要がある。基礎の観点では、demand-drivenの研究展開を模索することも重要と思われる。例えば、物理の分野ではあまり研究されていない、省エネや創エネ、水分解などの触媒、電池などの化学的性質に関連した物質適用の研究があげられる。国内においても、独自の新しい物質や薄膜、界面は多く開発されて合成もされているため、それらの物質の有効性を多方面から検証することが新たな機能開発をもたらす可能性があると考えられる。

物性の応用については、工学分野との連携をより一層推進することが今後の課題である。例えば、スピントロニクス分野でのスキルミオンやワイル磁性体を用いた磁気メモリの開発、量子計算分野でのトポロジカル超伝導素子やマヨラナ粒子制御に関する素子、光学素子分野でのトポロジカル光開発などがあげられる。量子計算技術にトポロジカル物質群を用いることが大きなメリットを有することは自明であるものの、段階的な研究開発を長期的な視野に立って持続する必要がある。そうした技術発展を進めることが困難な要因は、基礎研究における検証から、工学応用に向けた制御技術の確立、単一素子から多数素子への工学発展、などの技術的要点があまりに異なっているためである。1人の研究者が統括して、スタートからゴールまでを牽引することは困難であることが多いため、個々のポイントで強いグループをいかにチームとして連携できる体制を作れるか、が課題と考えられる。

（6）その他の課題

これまで、内閣府の最先端研究や科研費の新学術領域、JSTのCRESTやさきがけによる主導的研究が行われてきたため、これら技術を企業へと技術移転していくためにも新たな仕組みを検討する段階に来ていると思われる。海外では、マヨラナ粒子を利用する量子計算技術の確立に複数の企業が積極的に乗り出している

一方、日本企業は手つかずといえる状況である。米国では、量子物質や量子計測の基礎研究や技術開発の支援に対して、Gordon and Betty Moore FoundationのEPiQS（Emerging Phenomena in Quantum Systems）プロジェクトの継続が決定されている。一方、国内ではJSTにおけるCREST、さきがけが継続しているものの、JSPS新学術領域が終了し、これまでの優位を継続することが困難になる可能性がある。

研究課題の推進に合わせて、人材育成も現在の日本における重要な課題の1つである。新学術領域の推進を通して、当該分野で活躍する博士課程学生や若手研究者を多数育成できており、彼らの研究能力をより一層発揮させる制度設計が求められる。特に、技術の発展をめざす場合には、研究者自身に視野を広げさせ、分野を超えた共同研究を活発に推進させることが必要となる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ワイル半金属・ワイル磁性体の開発がさかん。ネルンスト効果を用いた創エネ研究の基礎に強み。 ・2010年以降、新学術領域が分野を牽引している。特に、トポロジカル超伝導体に関する理論と実験に強み。シフトカレントやスキルミオンについても国内に先駆的な研究推進グループが存在。最近では、トポロジカル光のグループも増加。
	応用研究・開発	○	↗	・スピン運動量ロッキングを活用した高効率スピン流生成とその活用方法の検討。ワイル磁性体などを用いたセンサやメモリの応用向け基礎研究が発展途上。 ・マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子コンピューティングが提唱されているが、技術的にはまだ遠い。スキルミオンを用いたメモリなどのデバイス展開が模索。
米国	基礎研究	◎	→	・物質開発に強み。 ARPESやSTMの先端計測のリーディンググループも分野を牽引。 ・スピン運動量ロッキングの活用についても積極的。スピントロニクス分野の研究者が多く参入して、スピン流生成やスキルミオン駆動の研究を牽引。トポロジカル超伝導の実験は企業を含めて強力に推進。政府系、財団系問わず、量子物質や量子技術の開発に積極的なサポート。
	応用研究・開発	◎	↗	・Microsoft Station Qを中心にトポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発が活発である。
欧州	基礎研究	○	→	・エッジ伝導の制御と応用への可能性を検討。ドイツのMolenkampグループの試料を用いた共同研究が進行。 ・MPIのFelserグループが理論を牽引。物質合成と精密計測を加速させている印象。特にワイル半金属を中心に開拓が進む。 ・Molenkampグループの薄膜試料を用いたマヨラナ粒子検出やエッジ伝導制御の研究が進行。 Fertグループを中心に、金属積層薄膜に生成されるスキルミオンの電流駆動など、制御技術開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	・オランダのデルフト工科大学、ドイツのケルン大学などで、トポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発がさかんに行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	・若手研究者らの積極的な分野参入。大型の複合研究機器の導入により、理論家との共同研究を通して、合成と計測が加速的に進められている印象。 ・一旦理論が生まれると、合成から物性計測までスピーディに行える体制が整っている。
	応用研究・開発	○	↗	・実用化に向けた大きな動きは見られないが、基礎研究所内に技術移転・産業化センターを設置するなど、今後の活発化していく可能性がある。

韓国	基礎研究	○	→	・特に顕著な動きは見られない。
	応用研究・開発	△	→	・特に顕著な動きは見られない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・新機能ナノエレクトロニクスデバイス（ナノテク・材料分野　2.3.1）
・集積フォトニクス（ナノテク・材料分野　2.3.2）
・スピントロニクス（ナノテク・材料分野　2.3.3）
・量子情報・通信（ナノテク・材料分野　2.3.6）
・量子計測・センシング（ナノテク・材料分野　2.3.7）
・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野　2.5.3）
・低次元材料（ナノテク・材料分野　2.5.6）

参考・引用文献

1) トポロジカル絶縁体入門　安藤陽一著　講談社
2) スピン流とトポロジカル絶縁体　齊藤英治・村上修一著　共立出版
3) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル『トポロジカル量子戦略～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション』」（CRDS-FY2016-SP-02）（2017年3月）, http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/SP/CRDS-FY2016-SP-02.pdf（2021年2月17日アクセス）
4) M. Z. Hasan and C. L. Kane, “Colloquium：Topological insulators”, Review of Modern Physics 82, no.4（2010）：3045-3068. doi：org/10.1103/RevModPhys.82.3045.
5) O. Vafek and A. Vishwanath, “Dirac Fermions in Solids - from High Tc cuprates and Graphene to Topological Insulators and Weyl Semimetals”, *Annu. Rev. Mat. Sci*. 5：83-112（2014）. doi：10.1146/annurev-conmatphys-031113-133841.
6) N. P. Armitage, E. J. Mele and A. Vishwanath, “Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids”, *Review of Modern Physics* 90（2018）：015001. doi：10.1103/RevModPhys.90.015001.
7) N. Nagaosa, T. Morimoto and Y. Tokura, “Transport, magnetic and optical properties of Weyl materials”, *Nature Reviews Materials* 5（2020）：621-635, doi：10.1038/s41578-020-0208-y.
8) Y. Tokura, K. Yasuda and A. Tsukazaki, “Magnetic topological insulators”, *Nature Reviews Physics* 1（2019）：126-143. doi：10.1038/s42254-018-0011-5.

9) N. Nagaosa and Y. Tokura, Nature Nanotechnology 8, 899（2013）.
10) K. E. Sitte, J. Masell, R. M. Reeve and M. Klaui “Perspective：Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field”, *J. Appl. Phys*. 124（2018）：240901. doi：10.1063/1.5048972.
11) X. Zhang et al., “Skyrmion-electronics：writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications”, *J. Phys.：Condens. Matter*. 32, no.14（2020）：143001. doi：10.1088/1361-648X/ab5488.
12) Database, https://www.topologicalquantumchemistry.com/#/（2021年2月17日アクセス）
13) B. Lian, J. Wang and S. C. Zhang, “Edge-state-induced Andreev oscillation in quantum anomalous Hall insulator-superconductor junctions”, *Phys. Rev. B* 93：161401（2016）. doi：10.1103/PhysRevB.93.161401.
14) Q. L. He et al., “Chiral Majorana fermion modes in a quantum anomalous Hall insulator-superconductor structure”, *Science* 357（2017）：294-299. doi：10.1126/science.aag2792.
15) M. M. Otrokov et al., “Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator”, *Nature* 576（2019）：416-422, doi：10.1038/s41586-019-1840-9.
16) Y. Deng et al., “Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi2Te4”, *Science* 367, no. 6480（2020）：895-900. doi：10.1126/science.aax8156.
17) E. Liu et al., “Giant anomalous Hall effect in a ferromagnetic Kagomé-lattice semimetal”, *Nature Physics* 14, no.11（2018）：1125-1131. doi：10.1038/s41567-018-0234-5.
18) L. Ye et al., “Massive Dirac fermions in a ferromagnetic kagome metal”, *Nature* 555, no.7698（2018）：638-642. doi：10.1038/nature25987.
19) S. N. Guin et al., “Zero - Field Nernst Effect in a Ferromagnetic Kagome - Lattice Weyl - Semimetal Co3Sn2S2”, *Advanced Materials* 31, no. 25（2019）：1806622. doi：10.1002/adma.201806622.
20) A. Sakai et al., “Giant anomalous Nernst effect and quantum-critical scaling in a ferromagnetic semimetal”, *Nature Physics* 14（2018）：1119-1124, doi： 10.1038/s41567-018-0225-6.
21) K. Kuroda et. al., “Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal”, *Nature Materials* 16（2017）：1090-1095, doi：10.1038/nmat4987.
22) C. R. Rajamathi et al., “Weyl Semimetals as Hydrogen Evolution Catalysts”, *Advanced Materials* 29（2017）：1606202. doi：10.1002/adma.201606202.
23) G. Li et al., “Surface states in bulk single crystal of topological semimetal Co3Sn2S2 toward water oxidation”, *Science Advances* 5（2019）, no.8：9867. doi：10.1126/sciadv.aaw9867.
24) A. Soumyanarayanan, N. Reyren, A. Fert and C. Panagopoulos, “ Emergent phenomena induced by spin–orbit coupling at surfaces and interfaces”, *Nature* 539, no.7630（2016）：509-517. doi：10.1038/nature19820.
25) Y. Fan and K. L. Wang, “Spintronics Based on Topological Insulators”, *SPIN* 6, no.2（2016）：164001. doi：10.1142/S2010324716400014.
26) Z. -K. Shao et al., “A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-

induced reflection", *Nat. Nanotechnol*. 15（2020）：67-72, doi：10.1038/s41565-019-0584-x .
27) H. Yoshimi et al., "Slow light waveguides in topological valley photonic crystals", *Opt. Lett.* 45, no.9（2020）：2648-2651. doi：10.1364/OL.391764.

2.5.6 低次元材料

（1）研究開発領域の定義

低次元材料は、材料の空間的な構造に着目した際にその性質が通常のバルク材料（3次元材料）と異なり、2辺（幅と長さ）もしくは1辺（長さ）だけで決まる材料であり、それぞれ二次元、一次元材料と呼ばれる。低次元材料の概念は20世紀から広くあったが、1991年のカーボンナノチューブ（一次元）また2004年のグラフェン（二次元）の発見により、具体的に存在する物質として実用を視野においた研究が開始された。グラフェンの発見に触発されるように、金属カルコゲナイド、カーバイドなどの多くの種類の二次元物質が発見されてきたが、それらの多くはバルクではみられない特徴的な電子状態を持ち、新しい物理構築だけでなく、エレクトロニクス、センシング、エネルギー変換・貯蔵などの応用に期待が持たれている。この項では、こうした、低次元化によって3次元バルク材料からは得ることのできない特異な性質を持つことになる材料に注目する。特に最近の進展が著しい二次元材料を中心に記載する。

（2）キーワード

グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）、金属モノカルコゲナイド、h-BN、ボロフェン、シリセン、六方晶窒化ホウ素、原子層、二次元ナノシート、ヘテロ超格子、Van der Waals heterostructures、層状物質、単層剥離、ビルディングブロック、レイヤーバイレイヤー積層、階層構造制御、モアレ構造、ツイスト積層界面、トポロジー、バレートロニクス、スピントロニクス、ツイストロニクス、エッジトロニクス、二次元超伝導、二次元磁性、相対論的Dirac電子、Weyl電子

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

低次元材料の研究開発を行う意義は、大きく分けて2つある。1つは、「原子～分子レベルでの薄さ、細さ」という構造的特徴を持った物質が示す特異な物性やその応用の探求である。グラフェン、カルコゲン化物（カルコゲナイド）シートなどにみられる、特徴的な電子状態（層数に依存した電子バンド構造の変調、Dirac電子系の出現、非常に高い易動度など）とそれを用いたエレクトロニクスデバイス、遷移金属酸化物や水酸化物ナノシートの優れたエネルギー貯蔵、変換機能（電極活物質、電極触媒）とそれを利用したエネルギーデバイス、低次元物質特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用した、オプトエレクトロニクスやスピントロニクスデバイスなどが、その例である。現在に至っても、組成、構造を精密に制御した新規二次元材料の合成が行われていることを考えると、さらなる掘り下げにより新しい発見、成果に期待が持てる。

もう1つは、複数の二次元物質をビルディングブロックとした新たな材料の創生や、二次元物質の積層界面を作ることで生じる新たな機能の探求である。前者には二次元ナノシートを1枚1枚操作して基板表面の望みの場所に配置した例や、基板上に隙間や重なりがほとんどない形（稠密配列）で単層膜として堆積させ、これをレイヤーバイレイヤーで反復して多層ナノ構造や超格子構造を構築することを可能とした例がある。また、後者では、結晶格子の大きさや対称性の異なる異種の二次元物質を積層して母相にはないトポロジカルな性質を発現させた例や、同種の二次元物質を捻って積層することで母物質では現れない物性を発現させた例などがある。二次元結晶の組み合わせは実質無限に存在し、適切な組み合わせを選ぶことで有用な機能性を出すことが可能であると同時に、界面の超構造等に着目することで、元々の低次元物質からは想像もしなかったような物性が発現することが分かってきている。

このように大きなポテンシャルを秘めた低次元物質の研究領域は、今後も固体物理学における1つの中心的な物質系であることは疑いようがない。

［研究開発の動向］

新規二次元材料の創製研究については、多くの物質系で精力的な研究が約20年にわたって展開されてきており、それらにおいては組成や構造をチューニングすることによる機能制御、サイズ、形状の精密制御による品質向上に研究に力点がシフトしてきている。一方で新規二次元系物質の探索もいまださかんであり、フォスフォレン（黒リンの単層）、炭窒化物（MXenes）や二次元金属錯体ナノシート（Coordination nanosheet：CONASH）の発見のように様々な成果があがっている。

半導体であるフォスフォレンや、化学組成、結晶構造に応じて金属から半導体まで幅広い物性を示す遷移金属ダイカルコゲナイドは、どちらも剥片化により、バンドギャップの拡大、間接遷移型から直遷移型半導体への変化という特徴が一般的にみられ、on/off比に優れたトランジスタや発光素子等、様々なデバイス応用が追究されている。トランジスタ応用としては、2011年にKisらが最初に単層MoS_2をチャネル層に用いた電界効果型トランジスタ（Field Effect Transistor：FET）について報告した後、WSe_2、InSe等、種々の遷移金属カルコゲナイドについての半導体応用が進み、優れた半導体性が見出されるとともに、光センサ等、関連応用技術の開発についても研究が進んでいる。また、FeSeを単層化すると、バルクでは8 Kの超伝導転移温度（T_C）が100 Kに達する可能性があることが報告され、高T_C発現メカニズムの解明、T_C制御への研究が継続されている。一方化学分野では、金属伝導性を示すMoS_2（1T相）やNbS_2が、優れた電気化学触媒活性を示すことが見出され、貴金属フリーH_2O分解触媒（H_2生成）の実現に向けた研究が活発に行われている。

剥離した二次元結晶を再び積層させることで実現される、van der Waals結晶界面の研究も飛躍的に進展してきた。このvan der Waals結晶界面の研究には、主に3つの方向性があげられる。第1に、表面が原子レベルで平坦であることを利用して、良質な基板材料として用いる利用方法がある。例えば、グラフェン等の二次元物質をh-BNで挟んだ界面では、従来の酸化物基板上への剥離では得ることが難しかった、試料劣化に対して強く、原子レベルで平坦な二次元界面を実現でき、飛躍的に移動度等を向上させることで、容易に量子輸送現象へアプローチすることが可能となった。このような、h-BNを試料劣化防止のためのキャップや原子平坦性を実現するための基板として用いる方法は、現在では二次元物質研究のスタンダードとなっており、NIMSの谷口、渡邊らによる超高圧合成法によって得られた高品質h-BNは世界中の研究グループが使用するところとなっている。また、第2の方向性として、さまざまなvan der Waals結晶を組み合わせてヘテロ界面を作製し、特徴的機能性を創出するという取り組みも積極的に行われている。当初、このvan der Waals結晶ヘテロ界面の研究は、界面を構成する各々の二次元物質の特徴を上手く生かした機能性の開拓が積極的に行われてきた。例えば、p型およびn型の半導体二次元結晶を組み合わせて、p-n接合や界面を作製することで、特徴的な発光・光電流特性が実現したり、電子・ホールが層間に分離された層間励起子と呼ばれる、安定かつユニークな二次元励起子物性が出現することが知られている。また、絶縁体超薄膜を挟んでトンネル接合機能を持たせるといった例が挙げられる。さらに最近では、第3の方向性として、前述したような界面を構成する物質の性質の組み合わせによる物性開拓だけでなく、モアレ構造等の界面の長周期構造や対称性を詳細に反映した物性も発見されてきている。この第3の潮流は、van der Waals積層構造研究のパラダイムシフトともとらえられ、後述するように、h-BN/グラフェンの研究を発端として、ツイスト積層させたグラフェンやTMD、グラフェンと黒リン界面等、現在世界中で極めて多彩な研究が進捗中であり、単層の結晶からは

想像もできないような物性が続々と実現されてきている。

以上であげた、個々の二次元物質やvan der Waals界面の物性研究において、特に最近、顕著にみられる傾向は、固体物理学の他分野（ナノ物質研究以外の分野）で提唱されたり、発展したりしてきた概念・コンセプトを積極的に輸入し、融合させていく研究の方向性である。遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレー物性の理解の進展や最近の磁性van der Waals結晶の発見に伴う、電気磁気物性やスピントロニクス機能の探索、ツイスト二層グラフェンにおける強相関絶縁体層や超伝導相と高温超伝導との類似性の指摘、WTe_2やツイスト二層グラフェン磁性相でみられるようなトポロジカル物性、ツイスト界面における準結晶的構造等が良い例である。

酸化物、水酸化物、炭窒化物等のナノシートはグラフェン、カルコゲナイドシートでは現れない物性（誘電性、強誘電性、光触媒性、酸化・還元反応性など）を示すことから、その活用をめざした研究展開が進められている。特に遷移金属酸化物および水酸化物ナノシートの多くは優れたレドックス性を示すことから電極活物質や触媒として期待される。事実これらナノシートの母相となる層状化合物では$LiCoO_2$に代表されるように正極活物質として実用化されているものも少なくないことは周知の事実である。これらの材料では陽イオン（Liイオンなど）が層間を長距離拡散してレドックスサイトに行きつく必要があるのに対して、これを剥離して得られるナノシートではすべてが表面と表現できるユニークな構造を有しているため、レドックスサイトが大きく露出していることに加えて、イオンの拡散距離も短く済むため、高い電池性能を実現できることが報告されている。このようにこれら遷移金属層状化合物およびそのナノシートは電極活物質として有望な性能を発揮するものの、骨格となる酸化物、水酸化物の大半は絶縁性であるため、特に充放電レート特性などにおいて改善すべき余地も多い。そこで遷移金属酸化物または水酸化物ナノシートを酸化グラフェン（graphene oxide：GO）または還元型酸化グラフェン（reduced GO：rGO）と交互に積み重ねた超格子複合体を合成することにより、優れた電極性能が実現された。さらにこれらの超格子複合体は水分解反応における酸素および水素発生活性においても、貴金属電極触媒と匹敵する極めて高い性能を示すことから注目を集めている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

・グラフェンでは回転角という新しいパラメータが見出され、モアレ超格子が物性発現の新しい設計指針となっている。その中のハイライトがグラフェンモアレ超格子による超伝導発現である。カルコゲン化物シートでも$MoSe_2/WS_2$ヘテロ構造において構成結晶の面内方位のずれに依存し、バンド構造が変調される現象が観察されており、今後、van der Waalsヘテロ構造体において面内結晶方向の整合性を新たな構造設計指針とした物性制御、機能発現について研究が進むと予想される。

・カルコゲン化物ナノシートでは上述した負性抵抗、トンネル素子、多値論理演算素子などの研究発表が相次いでいる。さらにはカルコゲン化物シートが様々な電子バンド構造を有することに着目して、異種シートをヘテロ接合することにより光励起キャリアの移動を制御し、p-nダイオードや発光素子などの開発が報告されている。いずれも高品質なヘテロ界面だからこその成果といえる。

・新材料に関しては、絶縁体である$CrGeTe_3$およびCrI_3が単層にしても磁気秩序を持つことが明らかにされ、二次元物質を用いた磁性の研究やスピントロニクス機能の開拓への道が開けた。特に、CrI_3は層数によって磁性が変化するという特徴を持ち、二層CrI_3では特徴的対称性と磁気構造による電気磁気効果およびそれを用いた電場による磁性制御や巨大な磁気トンネル効果といった、これまで特殊な三次元磁性体や磁性薄膜試料で研究されてきたエキゾチックな現象が超巨大応答として報告されている。また、静電的な応答

だけでなく、キャリアをドープしてトランジスタ動作させると同時に磁性を制御できるといった報告もなされてきており、強磁性トランジスタといった新しい応用へのポテンシャルも見出されている。他の二次元物質とのヘテロ界面の研究もさかんで、二次元磁性体と遷移金属ダイカルコゲナイドのヘテロ界面はスピンとバレーが結合したユニークな系として認知されるようになっている。

・金属的性質を持つ二次元磁性体Fe_3GeTe_2やVSe_2、量子異常ホール効果を示す二次元磁性トポロジカル絶縁体$MnBi_2Te_4$等、新規二次元強磁性体が次々と見つかってきている。二次元反強磁性体の研究も進んでおり、元々劈開可能性等が検証されていたMPX_3（M=Cr, Mn, Fe, Ni, X=S, Se）において磁性の層数依存が報告されたり、遷移金属ダイカルコゲナイド界面での光特性も報告されてきている。

・トポロジカル物性を持つ二次元物質の物性研究にも顕著な進展が見られる。 WTe_2は二次元トポロジカル絶縁体（量子スピンホール絶縁体）であることが示されていたが、電界効果によって超伝導が発現することが発見され、トポロジカル超伝導との関連性や二次元超伝導の性質が調べられるようになってきた。また、数層WTe_2は、波動関数のトポロジーや幾何学に起因した特徴的バンド構造を持っていることが知られているが、それを反映した新規輸送現象、特に異常光電流効果や非線形ホール効果といった、非線形輸送現象の発見も相次いでいる。

・その他のヘテロ接合体として、グラフェンとh-BN等、2種の原子層を面内で接合した面内ヘテロ構造についても研究が行われており、この場合でも一次元界面を介したp/n接合等が実現している。

・酸化・還元特性に優れた遷移金属酸化物または水酸化物ナノシートを高伝導性のグラフェンと交互に積み重ねた超格子複合体は、これまでで最高レベルの性能を発揮する電極材料、触媒として働くことが最近明らかにされた。例えばMnO_2ナノシート/rGO超格子複合体はこれまでで最高レベルの容量、優れた出力特性、サイクル安定性を示すことが報告されている。また電極触媒能に関してはNiFe 水酸化物/rGO超格子複合体が非常に小さな過電圧で酸素発生反応が進行することなどが報告されている。これらの特性は貴金属電極のそれに匹敵あるいは上回るものであることから、さらなる性能向上に向けてナノシートの組成チューニング、グラフェンとの複合ナノ構造のデザインなどに関する多数の研究が進められている。

・酸化物をはじめとした多くの二次元マテリアルが水溶液中に単分散したコロイドであり、その極めて大きなアスペクト比に由来して、顕著な液晶性を示すことを利用したさまざまな展開が最近さかんになってきている。これらの系では、電解質濃度を制御することによりナノシートの間隔を数十～数百nmのメソスケールレンジに制御することが可能である。特に酸化チタンナノシートが強磁場印加により数センチメートルサイズの容器内で一方向に配列し、鮮やかな構造色を呈するといった興味深い結果が示されている。さらにこの液晶全体をヒドロゲルやシリカゲルに変換すると、これまでのゲルでは実現できなかった異方的な特性やトップレベルの機械的強度を実現できるといった興味深い結果が得られており、本トピックスにおいては今後大きな飛躍が予感される。

・種々の金属と有機配位子を液液もしくは気液界面で合成することにより、CONASH（二次元金属錯体ナノシート）が二次元マテリアルの新顔として報告された。金属イオンと配位子との組み合わせが多様であるためより広範なデザインが可能であり、大きな発展が期待できる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

EU、米国、韓国、シンガポール、中国等、世界各国では基礎科学から応用研究、産業実用化までをめざす大型プロジェクトや産業界での実用化に向けた展開が行われている。特に、グラフェンの2010年度ノーベル物理学賞受賞を契機として欧州に設立された研究イニシアチブ：Graphene Flagshipは 10億ユーロの巨

額な競争的資金を10年計画で研究開発投資中であり、欧州の当該分野の科学技術水準の向上と産業応用の加速化を推進する原動力として機能している。

EUから独立した英国は、Graphene Flagship 中興の祖として継続して研究投資対象国であるが、英国独自の大規模かつ多面的な研究振興施策を講じている。 National Graphene Research Center in Univ. Manchester（Director： Prof. V. Falko、2015年設立、6100万ポンド）、EPSRC（英国工学物理科学研究評議会）によるvan der Waalsヘテロ二次元材料やフレキシブル光電子材料開拓など（総額3700万ポンド）をはじめとする総額1.4億ポンド規模の研究投資を行っている。

以下各国の研究開発プロジェクトの概要を述べる。

ドイツでは、基礎から応用にいたる二次元材料とそのデバイス応用研究をMax Planck Institute、大学、Fraunhofer Institute、が相互に役割分担し切れ目のない強固な研究開発体制を構築している。特に、Graphene FlagshipとパートナーのRWTH（アーヘン工科大学）とAMO GmbH（産学連携オープンイノベーションを促進する非営利団体）とが共同で、Aachen Graphene & 2D-Materials Centerを2017年に設立し、CVDによるウェハスケールでのグラフェンおよび遷移金属カルコゲナイド等の二次元材料による大規模集積デバイス・回路・システムの先端研究を国家的に推進している。 Graphene Flagship Work Package 6：Sensor（主幹：デルフト工科大学、オランダ）、7：Electronic Devices（主幹：AMO GmbH）、10：Wafer Scale Integration（主幹：CNIT、イタリア）の3本のプロジェクト、European Commission のFlagship-Era（FETデバイスシステムの先端研究推進プロジェクト）によるTUGRACO - Towards Ubiquitous Graphene based RF Communicationsプログラムを中心として2014～2020年の7年間で100億円規模の研究投資を行っている。

中国では、泰州巨納新能源有限公司が中国初のグラフェン国家基準「ナノテク 専門用語 第13部分：グラフェン及び関連二次元材料」（GB/T 30544.13-2018）」を2018年に制定し、グラフェン、CNT、および関連二次元材料の基礎から産業応用にいたる全領域を対象として35億円/年規模の研究投資を行っている。韓国では、韓国政府主導のKorean Graphene Hubが2013～2018年の6年間で約200億円の研究投資を行っている。また、わが国のNEDOに相当するとみられる半官半民のGraphene Materials and Components Commercialization Project が産業応用に重点を置いて2013～2018年の6年間で230億円規模の研究投資を行っている。シンガポールにおいても二次元材料の研究開発に80億円規模の研究投資を行っているとみられる。

日本におけるグラフェンや原子膜の政府主体のプロジェクトは、2011年NEDOの「希少金属代替材料開発」が最初であり、その後、2012年、NEDO「革新的ナノカーボン材料先導研究開発」、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト/グラフェン基盤研究開発」（2012～2014年度）、2013年文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」（2013～2017年度、10億円規模）、2014年NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」（2014～2016年度、120億円規模）、JSTのCRESTプロジェクトとして、「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」（2014～2021年度、50億円規模）が推進されてきており、2013年以降、組織的で大きな取り組みが展開されてきた。また低次元材料のトポロジカルな性質をさらに発展させるべくJST-CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域（2018～2028年度、50億円、研究総括：上田 正仁（東大 教授））が新設されたことは、組織的な大型研究推進プログラムの継続推進の観点で望ましいといえる。

産業界では、世界的なグラフェン研究の展開のなかで、その応用と産業化での関心が高まり、2010年、化学技術戦略推進機構（現新化学技術推進協会）で企業の情報交換の場としてのグラフェン研究会が設けられた。その後、2011年には技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構（TASC）グラフェン事業部が企業5社と産業技術総合研究所により設立された。現在、電気、化学関連企業を中心に研究開発が行われ

ている。また、産総研グラフェンコンソーシアムが2013年に立ち上げられ、企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として機能を果たしている。

（5）科学技術的課題

Van der Waals系層状二次元物質に関する技術的な課題は、大面積で高品質の薄膜成長技術を確立することである。いつまでもスコッチテープで切り貼りしていては、そう遠くない将来にこの分野は行き詰まると思われる。これまでの研究はテープにより層状結晶を劈開させ、多数の劈開片の中から単層部分を探し出し、これにマイクロ電極を取り付けて物性測定を行うという形で行われてきており、その中で驚異的といえる物性値が発見されている。これらはある意味、理想的な場合の最高値を示すものであるが、歩留まり、サイズなどからデバイス開発に向けては大きな谷間が存在すると言わざるをえない。その解決をめざして、化学気相蒸着法（CVD）を中心として大面積で高品質の薄膜成長の精力的な検討が行われてきている。その結果、ミリスケールの単層単結晶や、均一膜の作製が達成されている。しかしながら最高物性値を達成するための膜質という面では多くの問題が未解決であり、スコッチテープ法により得られる二次元物質とのギャップは10年以上埋まっていない。

二次元物質界面の作製にも未だ課題が多い。マジック角度ツイスト二層グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドツイスト界面を作製するためには、0.1度以上の精度での積層角度制御が必要である上に、転写作業後に試料の角度がずれてしまう可能性がある。そのため、作製した界面の質は研究グループや作業者によってかなりばらつきがあるのが現状である。このようなエキゾチックな物性まで探索が可能な、良質な界面を容易にかつ高確率で作製できる技術革新が求められる。

また、二次元物質の中には不安定な物質も多々存在し、試料の劣化は大きな問題である。例えば、遷移金属ダイカルコゲナイドに次ぐ二次元半導体材料として注目を集めている黒リンや二次元磁性体CrI_3、Fe_3GeTe_2等は大気中で不安定であり、グローブボックス中での劈開・転写作業が必須であり、かつ、h-BN等でキャップすることにより表面や界面を保護する必要がある。このような作業を簡略化するプロセスの開発や新しいデバイス作製手法の開拓が望まれる。

酸化物、炭化物などの二次元ナノシートについても、サイズ、形状を制御した合成が重要な課題である。層状物質の劈開、剥離により得られるナノシートは一辺の長さが1 μm前後で無秩序な外形を有するものが多い。このサイズを大きくすることができれば、これをビルディングブロックとした材料の構造秩序性が高まり、機能性も向上することが期待でき、理想的には同じ形状、同じサイズのシートが合成できれば、基板上に自己組織化的にタイルを並べるような形で秩序配列させることも可能と予想され、ナノシートの機能をより効果的に取り出すことにつながると期待される。さらにナノメートル領域でのナノシートの配列にとどまらず、上記のメソスケールの配列制御技術が発達すれば、材料科学的な幅が大きく拡大すると期待できる。現在までのところ、層状物質の剥離ナノシート化プロセスの学術的理解は十分とはいえず、サイズ、形状を制御したナノシート合成のためには詳細な基礎研究が今後求められる。

（6）その他の課題

日本のグラフェン・二次元機能性原子膜の研究開発については、研究への関心、予算規模、また、産業界の活動等、世界の先端からは大きく水をあけられている。文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」（2013～2017年度）では、基礎研究において一定の成果を生み出したが、2017年度には終了しており、JSPS関連でのグラフェン・二次元機能性原子膜への新たなプロジェクトの計画もない。世界各国では、例え

ば、EUのGraphene Flagaship等、基礎研究から応用研究、実用化研究への技術移転の流れが加速しており、大学・研究機関と産業界の連携が密接となってきている。一方、日本では従来から裾野の広い物質科学の研究が行われており、グラフェンと関連物質の研究開発には大きなポテンシャルを有するとともに新たな研究成果も多く生まれており、国際的にも学術的優位性を維持している。にもかかわらず、大学・研究機関と産業界の連携は十分には行われていない。日本の基礎科学での強みを生かして、研究の組織的な展開を促すとともに、産業界との強い連携をより一層推進する取り組みが求められる。

新材料創製、デバイス学理創造には、基礎物理、基礎化学に立ち帰った基礎基盤研究の推進が欠かせない。二次元機能性原子薄膜材料を科学技術イノベーションとして将来の新産業創出に結実させ、わが国がこれを主導するためには、デバイスからシステム応用までを俯瞰した目的志向型の材料・プロセス技術の革新が求められる。これらを相補的に推進するためには、省庁の垣根を越えた柔軟な産学官連携研究の推進体制・制度の構築が不可欠である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・酸化物および水酸化物ナノシート、二次元金属配位高分子は日本発の二次元ナノシートであり、先行的位置を確保している。 ・高品質h-BNはグラフェンやカルコゲン化物の物性研究にとって必要欠くべからざる素材であり、世界標準になっている。ただ物性研究自体では米国、英国、シンガポールに先行を許している状況にある。 ・二次元超伝導体の研究や非線形伝導等の物性開拓、単層SnSや高品質h-BNの合成等、ユニークな業績を出している。ロボット制御による転写・界面作製といったオリジナリティーのある技術の構築・デモンストレーションも報告された。
	応用研究・開発	○	↘	・企業などは、二次元物質を本格的に応用研究に着手する、緊急性の高い課題を見出していないことと、経済状態から大きな投資をすることはできない。 ・カルコゲン化物ナノシートの応用研究では研究者人口が圧倒的に少ない。
米国	基礎研究	◎	↗	・二次元磁性体の発見やその機能開拓、ツイスト積層界面における物性探索に至るまで二次元物質研究を主導しており、トレンドの発信地として確固たる存在感を示している。 ・莫大な研究予算と、アジア諸国からの留学生などの人材によって、依然として高い基礎研究の成果を出している。 ・最近のハイライトであるツイスト積層2層グラフェンにおける超伝導の発現（マジック角）研究に関してはMIT、Caltechなどが中心。 ・MXenesはDrexel大がパイオニアであり、先導している。
	応用研究・開発	◎	→	・応用研究でも研究の活発な展開が行われており、優れた研究成果を生み出している。 ・TMDをチャネル材料とするFETデバイス応用研究が加速しており、ポストSi-CMOSテクノロジーとしての議論が活発化している。デバイス応用研究の動向は、エナジーハーベスターへの重点化が目立つ。 ・カルコゲン化物ナノシートを使った応用研究では多くの先進的成果をあげている。

欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ・グラフェンが発見された欧州では、依然として二次元物質の研究がさかんである。二次元磁性体を用いた機能性開拓等で、米国と同様に、二次元物質研究の潮流を作っており、高いプレゼンスを見せると同時に、励起子の電場による駆動・制御といったユニークな研究成果も報告している。巨額の予算を持つGraphene Flagshipが継続中であり、基礎研究に大きな投資が行われている。 【ドイツ】 ・Max Planck Institute、大学、Fraunhofer Institute、が相互に役割分担し切れ目のない強固な研究開発体制を構築している。 【フランス】 ・スピントロニクス・製膜に特色ある強みを持っている。 【英国】 ・独自の研究所をマンチェスター大学に設置して、研究を進めている。 【スイス】 ・光電子物性、スピントロニクスの分野が強い。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 ・2013年にEUでの大型プロジェクトGraphene Flagship（2013～2022、総額10億ユーロ）がスタートし、多くの大学、研究機関の参加のもと応用に向けた様々な分野での研究が展開されており、独自の研究開発でリーダーシップをとりつつある。 【ドイツ】 ・Graphene FlagshipとパートナーのRWTH（アーヘン工科大学）とAMO GmbH（産学連携オープンイノベーションを促進する非営利団体）とが共同で、Aachen Graphene & 2D-Materials Centerを2017年に設立し、CVDによるウェハスケールでのグラフェンおよびTMD等の二次元材料による大規模集積デバイス・回路・システムの先端研究を国家的に推進している。 【英国】 ・National Graphene Research Center in Univ. Manchester（Director：Prof. V. Falko、2015年設立、6100万ポンド）、EPSRC（英国工学物理科学研究評議会）によるvan der Waalsヘテロ二次元材料やフレキシブル光電子材料開拓など総額3700万ポンドをはじめとする総額200億円規模の研究投資を行っている。
中国	基礎研究	○	→	・応用研究に比較すると基礎研究力は低いが、基礎研究への取り組みも急速に拡大してきており、固体物性実験・理論、材料科学領域でも大きな存在感のある展開をしている。 ・かつては、国として基礎研究に興味がなく、実用的な研究には多くの予算が与えられるが、予算を与えられない研究者が、お金のかからない基礎研究をするというような様子が感じられた。近年では、米国で有名な成果をあげた研究者が中国の大学で研究室を持ち、基礎研究を主導しているように見受けられる。
	応用研究・開発	◎	↗	・グラフェンの産業化を活発に進めており、特許登録数も世界でトップとなっている。 ・グラフェンの電池応用、カルコゲン化物ナノシート積層界面を使った素子開発が活発。有望だと狙いを定めたら一斉に集中して類似テーマに取り組む勢いは大きい。 ・カルコゲン化物ナノシート積層界面を使った素子開発が活発。

韓国	基礎研究	○	→	・各大学、研究機関で材料科学、物理等のグラフェン研究がさかんに行われていて、二次元強磁性体・反強磁性体の研究や準結晶的構造を持つ30度ツイスト積層２層グラフェンの報告等、独自の研究成果を創出している。 ・基礎研究が歴史的に重要視されてこなかったが、メディアなどで批判を受け、基礎科学を積極的に推進するための、IBS（Institute of Basic Science）を設立。他の分野同様グラフェンに関する基礎研究の中核を支えている。
	応用研究・開発	◎	↗	・CVD製膜技術が強く、それを活かしたタッチパネル、透明電極関連研究が多い。 ・Global Frontier Program：Soft electronics（2011～2020、総額81億円）のプロジェクトが行われ、約30の研究グループが参加し、新しいプロセス、デバイス等、フレキシブルエレクトロニクスをめざした研究が展開されている。2012年のSamsungとSung Kyunkwan大の共同による30インチのグラフェンシートのRoll-to-roll製膜はディスプレイ応用に特化した先導的成果として有名である。
シンガポール	基礎研究	○	→	・グラフェン研究の世界三大センターの１つが存在する。現在はグラフェンからそれ以外（beyond graphene：カルコゲン化物ほか）にシフトしている。 ・有望な研究者が集まってきており、非線形輸送や新しい二次元バレー物質の理論予測と実証、二次元強磁性体のトランジスタ動作と磁性制御等、いくつかの注目すべき成果をあげている。
	応用研究・開発	△	→	特記事項なし

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・トポロジカル材料（ナノテク・材料分野　2.5.5）

参考・引用文献

1) L. Li et al., “Black phosphorus field-effect transistors”, *Nature Nanotech*. 9（2014）：372-377. doi：10.1038/nnano.2014.35
2) M. Naguib et al., “Two - Dimensional Materials：25th Anniversary Article：MXenes：A New Family of Two - Dimensional Materials”, *Adv. Mater*. 26, no. 7（2014）：982-982. doi：10.1002/adma.201470041
3) H. Maeda, R. Sakamoto and H. Nishihara, “Coordination Programming of Two-Dimensional Metal Complex Frameworks”, *Langmuir* 32, no. 11（2016）：2527-2532. doi：10.1021/acs.langmuir.6b00156

4) B. Radisavljevic et al., “Single-layer MoS2 transistors”, *Nature Nanotech*. 6（2011）：147-150. doi：10.1038/nnano.2010.279
5) J.-F. Ge et al., “Superconductivity above 100 K in single-layer FeSe films on doped SrTiO3”, *Nature Mater*. 14（2015）：285–289. doi：10.1038/nmat4153
6) M. A. Lukowski et al., “Enhanced Hydrogen Evolution Catalysis from Chemically Exfoliated Metallic MoS2 Nanosheets”, *J. Am. Chem. Soc*. 135, no. 28（2013）：10274-10277. doi：10.1021/ja404523s
7) Y. Cao et al., “Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices”, *Nature* 556, no. 7699（2018）：43-50. doi：10.1038/nature26160
8) K. L. Seyler et al., “Signatures of moiré-trapped valley excitons in MoSe2/WSe2 heterobilayers”, *Nature* 567（2019）：66-70. doi：10.1038/s41586-019-0957-1
9) J. C. W. Song and N. M. Gobor, “Electron quantum metamaterials in van der Waals heterostructures”, *Nature Nanotech*. 13（2018）：986–993. doi：10.1038/s41565-018-0294-9
10) Nitin Samarth, “Magnetism in flatland”, Nature 546（2017）：216-217. doi：10.1038/546216a
11) Cheng Gong et al., “Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals”, *Nature* 546（2017）：265-269. doi：10.1038/nature22060
12) S. Jiang,J. Shan and K. F. Mak, “Electric-field switching of two-dimensional van der Waals magnets”, *Nature Mater*. 17（2018）：406-410. doi：10.1038/s41563-018-0040-6
13) Bevin Huang et al., “Electrical control of 2D magnetism in bilayer CrI3”, *Nature Nanotech*. 13（2018）：544–548. doi：10.1038/s41565-018-0121-3
14) Tiancheng Song et al., “Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures”, *Science* 360, no. 6394（2018）：1214-1218. doi：10.1126/science.aar4851
15) Ding Zhong et al., “Layer-resolved magnetic proximity effect in van der Waals hetero-structures”, *Nature Nanotech*. 15（2020）：187–191. doi：10.1038/s41565-019-0629-1
16) Zaiyao Fei et al., “Two-dimensional itinerant ferromagnetism in atomically thin Fe3GeTe2”, *Nature Mater*. 17（2018）：778–782. doi：10.1038/s41563-018-0149-7
17) M. Bonilla et al., ”Strong room-temperature ferromagnetism in VSe2 monolayers on van der Waals substrates” *Nature Nanotech*. 13（2018）：289–293. doi：10.1038/s41565-018-0063-9
18) Y. Deng et al. “Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi2Te4”, *Science* 367（2020）：895-900. doi：10.1126/science.aax8156
19) Zaiyao Fei et al., “Ferroelectric switching of a two-dimensional metal”, Nature 560（2018）：336-339. doi：10.1038/s41586-018-0336-3
20) M. P. Levendorf et al., “Graphene and boron nitride lateral heterostructures for atomically thin circuitry”, *Nature* 488（2012）：627-632. doi：10.1038/nature11408
21) P. Xiong et al., “Genuine Unilamellar Metal Oxide Nanosheets Confined in a Superlattice like Structure for Superior Energy Storage”, *ACS Nano* 12, NO. 2（2018）：1768-1777. doi：10.1021/acsnano.7b08522

22) W. Ma et al., “A Superlattice of Alternately Stacked Ni–Fe Hydroxide Nanosheets and Graphene for Efficient Splitting of Water”, *ACS Nano* 9, NO. 2（2015）：1977-1984. doi：10.1021/nn5069836
23) M. Liu et al., “An anisotropic hydrogel with electrostatic repulsion between cofacially aligned nanosheets”, *Nature* 517（2015）：68-72. doi：10.1038/nature14060
24) K. Sano et al., “Photonic water dynamically responsive to external stimuli”, *Nature Commun*. 7（2016）：12559. doi：10.1038/ncomms12559
25) Y. S. Kim et al., “Thermoresponsive actuation enabled by permittivity switching in an electrostatically anisotropic hydrogel” *Nature Mater*. 14（2015）：1002–1007. doi：10.1038/nmat4363
26) K. Sano et al., “Extra - Large Mechanical Anisotropy of a Hydrogel with Maximized Electrostatic Repulsion between Cofacially Aligned 2D Electrolytes”, *Angew. Chem*. 57, no. 38（2018）：12508-12513. doi：10.1002/anie.201807240

2.5.7 複雑系材料の設計・プロセス

（1）研究開発領域の定義

材料創製の探索範囲をこれまで扱ってこなかった未開拓の領域まで大きく拡大することで、高性能・高機能化、複数機能の共存、相反する機能の両立などを実現する複雑な組成や構造を有する材料の設計技術とプロセス技術を開発する。材料の多元素化やハイエントロピー化、準安定相などの多種多様な安定相（準安定相も含む広義の意味）の設計、高効率な材料探索実験手法、プロセス中反応過程のオペランド観測、プロセス・インフォマティクス、プロセス制御による熱力学的には不安定な構造の安定化などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

多元素化、ハイエントロピー、ハイエントロピー合金、準安定相、カクテル効果、触媒、ナノ粒子、ハイスループット材料創製、ハイスループット計測、コンビナトリアル、データ科学、機械学習、能動学習、第一原理計算、量子化学計算、数値流体力学、化学気相成長、オペランド計測、マテリアルズ・インフォマティクス、計測インフォマティクス、プロセス・インフォマティクス、マルチスケールシミュレーション、ロボット科学者、多元系化合物半導体、カルコゲナイド、化合物薄膜太陽電池

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

近年、自動運転に代表される快適なモビリティやIoT/AIなどの利用によるSociety 5.0の実現、SDGs（Sustainable Development Goals、持続可能な開発目標）のもと、CO_2削減に向けた再生可能エネルギーの大量導入や高度なエネルギーマネジメント、製品の製造・使用過程における環境負荷の低減などの様々な社会的要請に応えるべく、材料・デバイスの高性能化・高機能化に対する要求や期待がますます高まってきている。例えば、超軽量素材では高強度かつ高靭性、熱電材料では高電気伝導かつ低熱伝導、といった複数の機能の共存や相反する機能の両立などが、さらなる高性能化とともに要求されるようになってきている。これらの機能材料開発に対する高度な要求に対し、それぞれの応用分野における単純な元素構成、実現容易な安定相（結晶構造）の利用など従来の材料探索範囲での新材料開発は困難になってきている。このため、未知なる可能性を秘めている複雑な組成や未利用安定相の活用など未開拓の材料群へ対象を広げていくことが必要である。また、材料開発競争の激化から、新材料の探索から実際の材料作製に至る材料設計や作製プロセス設計も含めた開発期間の短縮も求められており、応用分野を越えた新材料創製の新たな指針の構築が必要になってきている。このような研究を進めるためには、従来型の専門家の経験や勘に頼った材料探索では、これらの複雑系材料を短期間で探索することは不可能であると考えられ、データ科学を利用した材料設計、プロセス設計、オペランド計測、ハイスループット実験などの新たな研究手法が必要である。また、革新的な複雑系材料開発のためには、原子レベルで物質の結晶構造や局所構造をミクロに設計し作り込むだけでなく、多種多様な安定相を含んだ微細組織や界面などメゾスケールの構造の制御、さらにはバルクの材料（素材）としてのマクロスケールにいたる、階層的な不均一構造について、それらの構造情報や特性の要因を明らかにし、材料設計・プロセス設計へとフィードバックすることが極めて重要となる。

複数機能の共存や相反する機能の両立など、従来の材料にはない高い付加価値を持つ複雑系材料の研究開発は、わが国の産業を支える基盤として、あるいは複雑系材料創製自身がわが国の新しい産業となりうる可能性を秘めており、今後戦略的に推進していくことが重要である。この研究開発領域では、材料探索空間を広げ

るための材料の多元素化やハイエントロピー合金、準安定相の利用、材料作製・評価を効率的に進めるハイスループット実験、作製プロセス中の現象を把握するオペランド計測、適切な製造プロセスを探索するプロセス・インフォマティクス、などを中心に記載する。この領域は、マテリアルズ・インフォマティクス、ナノ・オペランド計測などの技術とも深くかかわってくるが、これらの詳細についてはそれぞれの研究開発領域を参照されたい。

［研究開発の動向］

高性能化や相反する機能の両立など材料に対する高度化した要求は、半導体材料、蓄電池、磁石、構造材料、熱電材料、触媒材料などさまざまな分野にあるが、ここでは多元素化の例として多元系太陽電池材料、ハイエントロピー合金の例として触媒材料、準安定相の利用としてパワーエレクトロニクス用のワイドバンドギャップ半導体ついて研究開発動向を説明する。

多元系材料を利用することで、太陽電池における高効率化、長寿命化・高信頼化、資源制約回避などのさまざまな要求を同時に満たすことができると考えられる。バンドギャップの異なる複数の層を重ねるタンデム型の太陽電池は変換効率向上が大きく期待されている。現在普及している単結晶・多結晶シリコン（Si）との組み合わせを考えると、結晶構造としてⅢ-Ⅴ化合物半導体やCIS（CuInSe）系が有望であるが、一方で希少資源を含むため資源問題がある。このため、新たな化合物半導体の研究開発が必要であり、これまで主に検討されてきたカルコゲナイド（硫化物、セレン化物、テルル化物）に加え、近年、CZTS（Cu_2ZnSnS_4、$Cu_2ZnSnSe_4$）系材料、CZTSからの派生材料系、新規カルコゲナイド材料、無機ペロブスカイト材料などが研究されている。一例として、CZTS系化合物半導体太陽電池がある。これは日本発の太陽電池であり、CIS系太陽電池の$CuInSe_2$の派生構造であるが、InのサイトをZnおよびSnが占有する構造のため、希少金属を利用しない材料系である。ただし、変換効率は最高でも12.6%とCIS系太陽電池に比べてかなり低く、深い準位などの制御も含めた4元系の結晶成長・結晶構造の制御法の確立が望まれる。

5種以上の構成元素がおおむね等しい量において原子レベルで混合したハイエントロピー合金が近年注目を集めている。これは2004年に台湾国立清華大の葉均蔚（Jien-Wei Yeh）教授らによって提案された新しいカテゴリーの合金であり、従来の合金に比べて多種の原子が結晶格子内の原子位置において乱雑に配置されることで（配置のエントロピーが大きい）、機械的特性や高温特性に優れ、良い耐腐食性を示すため、高温ガスタービンやエンジン部品などの高温構造材料等の候補として研究が行われている。ハイエントロピーナノ合金の開発および触媒としての利用は歴史が浅く、2018年Science誌に掲載された米メリーランド大学のLiangbing（Bing）Hu教授らによるCarbothermal shock合成法を用いたものが初めての報告例とみられる。この方法では、PtNiやAuCuといった2元系、PtPdNiやAuCuSnといった3元系、PtPdCoNiFeといった5元系、PtPdCoNiFeCuAuSnの8元系ナノ粒子などが報告されている。合成法やその触媒利用に関しての報告はここ2、3年で活発化している。触媒としての利用に関しては、高い熱安定性に着目したものやこれまでPtなどの貴金属が使用されてきた反応に利用したものなど多岐にわたるが、単金属触媒の論文に比べて、そのメカニズムを深く議論しているものや、系統的に組成を変化させた研究は少ない。現在の潮流としては、実験ではハイスループット装置を用いて実験数を増やすこと、第一原理計算などでは単金属の吸着エネルギーをもとに、インフォマティクスを利用した組成最適化のアプローチなどが考案されている。京都大学北川宏らのグループでは白金族6元素全てを含んだ白金族ハイエントロピー合金触媒を簡便な液相還元法で合成し、従来の触媒ではほとんど例のない、12電子反応の電気化学的エタノール完全酸化を達成しており、複雑な高難度反応に対して良い触媒が得られる可能性を示唆している。世界的には米国のグループからハイイン

パクトな論文がもっとも多く発表されており、次いでドイツなどの欧州、中国が続く形である。

準安定相の利用の例として、パワー半導体用のワイドバンドギャップ半導体の１つであるGa_2O_3の研究開発動向について記載する。これまではワイドバンドギャップ半導体としてSiCとGaNが主に研究開発されてきたが、さらに大きなバンドギャップを有し基板の作製が容易ということから酸化ガリウム（Ga_2O_3）が最近注目されるようになってきた。このGa_2O_3はさまざまな結晶の形を持っており、コランダム構造（菱面体晶）のα型、斜方晶構造のβ型、立方晶のγ型、δ型、六方晶のε型がある。このなかで最安定相はβ型であり、単結晶基板が製品化されており、この上でパワーデバイス開発が世界中で活発に行われている。パワー半導体の詳細については研究開発領域「パワー半導体材料・デバイス」を参照されたい。β型以外の結晶構造は準安定相であり作製が難しいと考えられてきたが、デバイス構造の視点からは他の半導体とのヘテロ構造が作りやすいα型が注目される。 Ga_2O_3とヘテロ構造を作製できる半導体としてAl_2O_3、Ga_2O_3、In_2O_3 が考えられるが、これらの安定相は菱面体晶（α型）、斜方晶（β型）、立方晶（δ型）と、3つとも結晶構造が異なるため、このままの安定相を利用することはできない。しかし、もしコランダム構造（α型）のGa_2O_3とIn_2O_3が実現できれば、全てコランダム構造を持つ混晶系ができ、GaN 系と同様なバンドギャップのエンジニアリングによって、さまざまなデバイスへの展開が期待される。通常のMOCVDやMBEを用いた結晶成長ではサファイヤ基板上へのα型Ga_2O_3の形成は困難であるが、ミストCVD法により可能となっており、すでにショットキーダイオードなどのデバイスが製品化されている。また、p型のα-Ir_2O_3（準安定相）とn型のα-Ga_2O_3とのヘテロ構造の作製などの研究も進められており、新たなデバイス機能の実現をめざしてこのような準安定相を積極的に利用していくことが行われている。

ハイスループット材料合成については、大きな流れとして2つの方向性があげられる。1つは、コンビナトリアル合成手法を用いて、事前に絞り込んだ探索空間に存在する材料をハイスループットで作製し、同時にハイスループットで特性評価を行う方法である。もう1つは、全自動で自律的に新材料を探索していくclosed loop手法であり、「実験計画策定→合成→評価→実験計画策定」のサイクルを研究者が関与することなく行うことを特徴としている。最近はデータ科学/人工知能技術の進展もあり、このclosed loop手法が注目されるようになってきている。特に複雑系材料探索においては、元素の組み合わせに加え多くのパラメータ（物質設計やプロセス設計など）を同時に最適化する必要があり組み合わせ数が膨大になるため、非常に有用になると考えられる。一例として、リチウムイオン電池の電池寿命を最大化する材料選定、セル製造、プロセスと制御の最適化を考える場合、寿命を評価するための実験が1回あたり数カ月から数年かかる。そのため、必要とする実験の数を減らして効率的に探索空間を絞り込むために、ベイズ最適化などの最適化手法が重要となる。多次元探索空間での探索は、人間には想像しづらく、人間の能力を超えてしまうが、コンピュータは数理的手法により多次元空間を最適化することが可能である。このため、複雑系材料探索ではclosed loop手法は不可欠となり、自律的に動作するロボット技術が極めて重要である。すでに、主に欧州を中心にロボット科学者（Robot Scientist）と呼ばれる自動材料合成ロボットと特性評価、材料予測とを組み合わせた研究が進展をみせている。しかし、欧米では製薬や有機系に特化しており、機能性材料についてはこれからの発展が期待される。

結晶成長過程の準安定構造や発生する結晶歪をオペランド観察する表面X線回折は、これまで有機金属気相成長法（MOCVD）や分子線エピタキシー法（MBE）を用いた半導体薄膜や金属薄膜の成長過程の研究で使われることが主流であったが、ここ数年、パルスレーザ堆積法（PLD）やスパッタ法など成長方法が多様化している。それに伴って材料も強誘電体や有機半導体などにも応用範囲が拡大している。測定方法も、従来のCTR（Crystal Truncation Rods）散乱や反射率測定から、集光ビームを用いた局所構造解析やX

線光子相関分光法（XPCS）による表面構造ゆらぎのその場観察にまで発展している。積極的に準安定構造を探索するという立場から、高温高圧合成法が注目されている。常圧下では準安定な構造相を、その相が最安定となる高温高圧下で合成して急冷し、室温以下の低温で減圧するなどの方法により、常圧相への逆転移を抑制できれば、高圧相を準安定状態で回収可能である。ダイヤモンドをはじめとする超硬材料では古くから実績が豊富であり、他の材料系への展開が期待されている。放射光X線を用いると高温高圧下のその場X線回折測定が可能であり、反応の進行の様子をその場で観察できるため、高温高圧法と放射光その場観察を組み合わせた物質探索研究が精力的に進められている。固相-気相反応により固相が生成するような合成反応は、原理的に高温高圧合成法が有利であり、新規酸化物や水素化物、酸水素化物などが実現されている。特に、水素化物分野では新しいクラスの水素化物が多数合成されており、「水素化物ルネッサンス」とも呼べる潮流が生まれている。高温高圧合成技術の進歩の一方、その場観察技術に関しては従来の白色X線回折法を利用してきたが、近年、粗大粒観察のための新しい測定手法の開発が求められている。

材料開発におけるプロセス・インフォマティクスは、蓄積したプロセスのデータを活用して目的とする材料作製の適切な製造プロセスを探索する技術であるが、その手法・アプローチは応用・アプリケーションに応じて使用するデータベースの選択によって3つに分類される。1番目は実際の試験や実験、半経験的パラメータを用いた数値流体力学計算（Computational Fluid Dynamics：CFD）などで得られたデータを使用して製造プロセスの最適化を行うものである。材料開発の事例として、機械学習を活用した$SrRuO_3$開発があげられる。ある程度のデータ蓄積・実績のある研究を加速する目的であればこのアプローチは有用である。2番目はマテリアルズ・インフォマティクスの延長で行われているプロセス・インフォマティクスであり、量子論にもとづく第一原理計算（密度汎関数理論、Density Functional Theory：DFT）を用いて仮想空間において所望の物性を持つマテリアル構造・組成を予測し、得られた知見を現実空間にフィードバックする手法である。未知の材料を開拓する目的であればこのアプローチが必要であるが、第一原理計算により得られる物性値は原則として絶対零度（0 K）における値であるため、その延長で行われるプロセス・インフォマティクスは現実空間と乖離していることを注意せねばならない。3番目が仮想空間と現実空間を結ぶマルチフィジックスシミュレーションにより得られるデータと機械学習を融合させて、製造プロセスのモデル化・定量予測を行うものである。ここで取り組む材料の多元素化やハイエントロピー化、準安定相などの多種多様な安定相の設計を具現化するには、材料製造プロセスの真のモデル化と定量予測が不可欠であり、このアプローチの進展が期待されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

国際動向として、エネルギー関連材料、構造材料など応用分野を横断した多元素材料やハイエントロピー材料の国際会議が活発化している。例えば、多元素材料の国際会議として、「21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds（ICTMC-21）」［September 9-13, 2018 in Boulder, Colorado, USA］が開催されており、応用分野としては太陽光発電、熱電発電、電池、発光体、機能材料、超伝導体にわたり、3元および多元素の化合物に関連するトピックをカバーしている。また、ハイエントロピー合金に関するシンポジウムとして、TMS（The Minerals, Metals & Materials Society）やMRS（Material Research Society）などの定期大会だけでなく、「International Conference on High-Entropy Materials（ICHEM 2018）」［February 19-20, 2018 in Paris, France］など独立した国際会議としても多数開催されている。国内でも複雑系材料の設計・プロセスに関する学会活動が活発に

なってきている。2019年10月の第48回結晶成長国内会議（JCCG-48）においてシンポジウム「多様な安定相の成長技術と応用」、2020年3月の応用物理学会シンポジウム「多様な安定相のエンジニアリングによる多元系材料の新展開」、2020年9月の応用物理学会シンポジウム「多様な安定相のエンジニアリングの新展開～環境・エネルギーデバイスと材料の未来～」、などが開催された。また、2021年3月のThe 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology（CGCT-8）でジョイントセッション「Application of Diverse Stable Phases」が開催予定であり、従来の専門領域の枠を越えたコミュニティ形成が進んでいる。

多元系の太陽電池として近年注目を集めているカルコゲナイドを利用した太陽電池に、3元系の$CuSbSe_2$化合物および2元系のSb_2Se_3（Sb_2S_3）がある。いずれもSbを利用した化合物でありその結晶構造および原子の配列や結合に大きな特徴がある。その結晶構造は直方晶系であり、CISeとは異なり2種類の配位構造を有する疑似2次元構造をとる。また、孤立電子対を含みダングリングボンドを形成しないため、多結晶薄膜ではしばしば問題となる粒界での再結合低減が期待されている。また、有機基を含まない完全に無機材料からなるペロブスカイト化合物群は、シリコン太陽電池に迫る高い変換効率を持つ有機・無機ペロブスカイト太陽電池の安定性の問題を解決するものとして期待され、研究が活発になっている。代表的な、有機・無機ペロブスカイトの$MAPbI_3$のMA基を1族元素で置換した$CsPbI_3$では、15.7%の変換効率が報告されている。ただし、この系においても重金属のPbが含まれているため、有機・無機ペロブスカイト系と同様に同族のSnによる置換を進める研究も活発に進められている。

米国で毎年開催されている材料学会のイベントであるMRS fall meetingでは、2019年も2018年に引き続きハイエントロピー合金のセッションが開催されており、その他にも、World Congress on High Entropy Alloys（HEA 2019）（November 17-20, 2019, Seattle, Washington, USA）などがあり、米国や欧州でハイエントロピー合金を中心とした学会が多くなっている。多くはバルクのハイエントロピー合金に関する研究であるが、MRSなどでは数件のハイエントロピーナノ合金とその触媒利用に関しての講演があった。

Closed loopのハイスループット材料合成に関しては、国内外でロボットを活用した実験システムの構築が進められている。国内では、東京工業大学でTiO_2薄膜の電気抵抗を全自動で自律的に最小化する無機材料合成実験を行うシステムが構築され、従来の10倍の実験効率化を実証している。カナダのブリティッシュコロンビア大学では、人工知能（AI）アルゴリズムによって制御されたロボット「Ada」を開発している。導電性フィルム開発を対象として、溶液の混合、フィルムのキャスト、熱処理などの材料合成や、フィルムの導電性テスト、微細構造評価を自動で行い、さらに実験結果の自動解釈と次の合成条件の決定という自律的なサイクルを可能にすることで、以前は9カ月かかっていた材料開発期間を5日間に短縮可能にしている。また、英国のグラスゴー大学では、IoTに用いられる安価な機器を用いて、手頃な価格（500ドル未満）で化学実験が可能なロボットを開発し、インターネット接続された2台のロボットで複数の化学合成プロセスを共同で行うことが可能にしている。また、リバプール大では、mobile robotic chemistと呼ばれる可搬型で自律的に実験機器間を移動し実験を行うロボットを開発した。実験装置を自動化するのではなく、自由に動くことのできるロボットで研究者・作業者の代わりを務めさせるというモジュール型のアプローチであり、今後の展開が期待される。

先にも述べたが、第一原理計算により得られる物性値は原則として絶対零度（0K）における値であるため、その延長で行われるプロセス・インフォマティクス（マテリアル製造プロセスの探索）は現実空間（実際の実験）と乖離している。この仮想空間と現実空間の乖離を補正するために、例えば、遷移状態理論を用いた化学気相成長（CVD）のプロセス解析が行われている。しかし、複雑な気相反応を伴うCVDプロセスを遷移

状態理論で網羅的に解析することは困難であるため、2001年に気相の自由エネルギーを考慮した第一原理計算が提案され、近年、その理論が体系化されてきている。その理論を用いてCVDにおける表面反応を第一原理的に議論し、意図しない不純物取込みのプロセス解明もなされている。

作製プロセス中のオペランド計測においては、固体/液体界面の秩序構造や成長表面の局所的なゆらぎの観察などができるようになってきている。これまで、結晶成長条件下での界面の原子配列をその場観察した報告はなかったが、フランスのESRF（European Synchrotron Radiation Facility）のグループは窒化ガリウム（GaN）のバルク成長においてCTR散乱（X-ray crystal truncation rod scattering）をその場測定し、固体/液体界面で形成される原子の秩序構造を決定することに成功している。また、従来の表面X線回折はミリ～サブミクロンスケールの入射X線を用いることでブラッグ反射やCTR散乱をその場測定し、入射X線の照射領域に対応する結晶成長表面の平均的な構造変化を観測することが主流であったが、入射X線に位相のそろったコヒーレントX線を利用し、X 線光子相関分光法（XPCS）によって結晶成長表面の局所的な構造ゆらぎをその場観察する手法を報告している。高温高圧合成法においては、高エネルギー対応の2次元検出器を用いた粗大粒の観察が可能になりつつある。高温高圧法による水素吸蔵合金の開発では、最近、アルミニウムと3d遷移金属を組み合わせた合金が水素化物になることが複数発見され、従来は水素化物にはならないと考えられていた金属も水素化物を形成することが分かってきた。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

先に述べたように、国内外において、多元化合物やハイエントロピー合金など複雑系材料に関しては応用分野を越えて学会の活動が活発化しているが、複雑系材料の設計・制御による未開拓の材料創製空間への展開といった視点で、複雑系材料の設計、作製プロセス制御、オペランド計測、ハイスループット実験、プロセス・インフォマティクスなどの研究開発を統合的に含むようなの施策・プロジェクトはまだ存在しない。国内でこの領域に関連するものとしては、ハイエントロピー合金に関する新学術領域研究「ハイエントロピー合金～元素の多様性と不均一性に基づく新しい材料の学理～」が2018年より立ち上がり、ナノ粒子、ナノポーラス材料としての研究が進められている。また、オペランド計測に関しては、新学術領域研究「ハイドロジェノミクス」、「ハイパーマテリアル」等で、計測班といえるものが立ち上がっており、これらのなかで「その場測定」は主要なキーワードになっている。プロセス・インフォマティクスに関しては、文部科学省の「材料の社会実装に向けたプロセスサイエンス構築事業」、「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発～中核拠点（主課題c）：インテリジェント・マニュファクチャリング実現のための結晶成長過程コンピュータシミュレーション技術の構築～」、「スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム～省エネルギー次世代半導体デバイス開発のための量子論マルチシミュレーション～」、新学術領域研究「特異構造の結晶科学　完全性と不完全性の協奏で拓く新機能エレクトロニクス　～計算科学によるヘテロボンドの理論的材料設計～」などにおいて部分的に研究開発が始動している。

新材料創出にかかわる文部科学省の「元素戦略プロジェクト」（2007年～）は産学官連携型、CREST・さきがけ（JST）、研究拠点形成型と発展して継続的に推進され、希少元素代替など多くの成果をあげてきている。一方、本研究領域は未踏材料空間の拡大をめざして、元素の多様な組み合わせや構造、結晶相まで活用していくものであり、元素戦略の発展形とみることもでき、日本の材料技術のさらなる強化に向けて、早期の施策・プロジェクト化が望まれる。なお、米国では、オバマ政権が2011年に発表した「Materials Genome Initiative（MGI）」においてマテリアルズ・インフォマティクスの推進を打ち出し、日本をはじめ世界中でマテリアルズ・インフォマティクスの取り組みが活発になった。このイニシアティブは5年間で終了し、政策上は

後継が顕在化していなかったが、NISTや大学での活動は大変活発で継続されており、米国大統領科学技術諮問会議（PCAST）が2020年6月に発出したレポートにおいて、ポストMGIとして強化すべきことが指摘されており、施策化の動きなどに注意しておく必要がある。

（5）科学技術的課題

多元系化合物薄膜太陽電池のような多元素系材料・デバイスの開発においては、性能を支配している要因を科学的に解明し、その知見にもとづき普遍的な開発指針を確立することが望まれるが、その際の重要な技術の1つが熱力学的な相の制御技術であろう。準安定相などの多種多様な安定相の設計と制御を行う指針、および実際にそれらを実現するための作製プロセス技術の創出が必須であり、マテリアルズ・インフォマティクス、プロセス中のオペランド計測、プロセス・インフォマティクス、それらにもとづく高度なプロセス制御技術の開発を進めていくことが不可欠である。

ハイエントロピー合金のナノ粒子化および触媒利用における課題としては、効率的な材料探索であり、インフォマティクスの利用や、新しい理論的な方法論、ハイスループット合成装置の利用などが必要となると考えられる。また、理論的モデルの検証には実際の構造を原子レベルで同定することも必要になると考えられる。しかし、ナノサイズと多元素ということがハードルとなり、電子顕微鏡やX線などを用いた各元素の状態を調べることは困難になると考えられる。これを乗り越えるには、材料開発の方法論だけではなく、微量の原子を正確に同定する技術の開発や検出器の性能向上などハード面での進歩も必須となると考えられる。

新たな準安定相などの新物質探索・創製に有効な高温高圧合成においては、高エネルギー対応の2次元検出器を利用した高温高圧その場観察技術の開発が重要になる。高温高圧水素化物探索研究は水素貯蔵やイオン伝導、高温超伝導など、インパクトが多方面にわたり、世界的にみても日本の競争力が高い分野であるので、今後も取組を強化すべきである。

複雑系材料の結晶成長プロセスは基本的には反応炉の中で、（1）気相反応、（2）表面反応、（3）固相拡散などの素過程を経て進行する。これまで、個々の素過程に焦点を絞った理論解析は行われているが、それらを統合したマルチフィジックスシミュレーションはまだ完成の域に達していない。すでに要素技術は開発されているので、それらを統合した物理モデル構築が望まれる。また、反応炉内の正確なガス組成分析技術が開発されているので、マルチフィジックスシミュレーションを実装したCFD（Computational Fluid Dynamics）計算との直接比較により物理モデルの妥当性の検証および改良が期待される。これによりプロセス・インフォマティクスのフレームワークを構築し、複雑系材料への応用展開が進むと考えられる。

インフォマティクスとロボットの統合による実験の自動化に加え、コモディティ（汎用）化された計測（放射光実験であればX線回折やXAFSなど）の自動化だけでなく、先端的な計測を自動化するための必要技術について検討し開発する必要がある。物質合成・試料加工・マクロ物性測定（輸送特性、磁気特性など）・ミクロ物性測定（X線構造解析、光電子分光、XAFSなどによる電子状態解析）を一気通貫かつ自動で行うためのclosed loop統合システムの実現や、このようなシステムを用いた新物質・材料開発の加速も重要である。また、物質・材料データベースと材料合成システム、計測システムの統合も重要であり、これまで実験者のノウハウとして暗黙的に取り入れられてきた知見・知識を材料合成、計測に明示的に導入することで、実験を効率化することが可能になると期待される。

（6）その他の課題

近年、欧米においては、先端的な分光研究者と材料・デバイス研究者の連携が活発化しており、これが関

連分野における欧米の優位性の向上につながっている。一方、これまでの日本国内における放射光計測技術の利用は、計測技術の開発を行っている研究者やその周辺に限定されることが多く、材料・デバイス研究者との密接な協力体制の整備は進んでいない。現場のニーズをくみ取る仕掛けや複眼的なアプローチで議論できる仕掛け（コミュニティの形成）を作り、政策的にもこのような連携を加速することが必要である。また、材料系、情報系の専門性を持つ人材が不足しており、企業側の人材需要に対して大学側の人材供給が追い付いていない状況である。複雑系材料の設計・プロセスに関する大型プロジェクトや産学共同研究などを通して材料・情報に専門性を持つ若手・博士人材を育成していくことが必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・新学術領域研究をはじめ、ハイエントロピー合金という領域が表に出てきてはいるが、その触媒応用は徐々に出始めた状況である。 ・その場観察についてはSPring-8、PF、UVSORなど8つの放射光施設で研究が進められている。 ・応用物理学会などで多元素化、準安定相、ハイエントロピー合金などに関する複数のシンポジウムが開催され、活動が活発化している。 ・マテリアルズ・インフォマティクスやハイスループット実験が、基礎研究にはあまり取り入れられていない。
	応用研究・開発	○	→	・触媒への応用に興味を示す企業が散見されるが、実際に表に出てきている状況は少ない。 ・伝統的に産業界の寄与が強い。計測分野でもSPring-8のFSBL、サンビーム、産業利用BL、豊田BLのほか、あいちシンクロトロン光センター等において産業界の利用がある他、その効率化等において企業の参画が見られる。 ・ソーラーフロンティアがNEDO事業も活用してCIS系太陽電池開発をしており、1GWスケールの量産に世界で唯一成功している。 ・主に産業界でマテリアルズ・インフォマティクスやハイスループット実験への期待が大きく、他国と比べても、これらの分野への集中的な人員配置などが行われている。
米国	基礎研究	◎	→	・研究成果がトップジャーナルで確認できる。特殊な方法でも製造法も量産化を狙った技術もあり、もっとも進んでいるといえる。 ・APS、ALS、NSLSIIなどを中心に計測分野の研究が進められている。米国発の技術は多数あり、Bragg-CDI法のin-operando/in-situへの投入など質の高い研究を継続的に輩出している。 ・CdTe太陽電池についてはサンショットイニシアチブの下で、基礎研究も含めて研究開発が継続して続けれられている。 ・マテリアルズ・インフォマティクスやハイスループット実験についてはMGIによるアドバンテージが大きい。基礎的な領域の研究に強みがある。ロボット科学者に関する研究はあまり行われていない。
	応用研究・開発	○	→	・主要な研究グループには多数の企業から資金提供があるようで、応用研究も進んでいると見受けられる。 ・APSやALS、NSLS II等で産業利用プログラムが準備されている。 ・ファーストソーラー社がCdTeの太陽電池の量産に世界で唯一成功している。 ・圧倒的なAI技術と組み合わせMI分野で世界をリードしている。

欧州	基礎研究	◎	↗	・理論をはじめ、触媒としての応用の基礎学理の構築がドイツ、デンマークを中心に進んでいる。 ・ESRF、Diamond、SLSなどを中心に計測分野の研究が進められている。 ・欧州では化合物太陽電池関係の国際会議が数多く開催されている。 ・ロボット科学者による自律的な科学実験や材料探索について英国が圧倒的に強い。
	応用研究・開発	○	↗	・米国同様、企業との連携があるように思われる。 ・ESRFのhighlightではセラミック燃料電池や触媒等、エネルギー分野における産業利用例が紹介された。産業利用事業収入（300 M ユーロ）との記述もある（FY2018版）。 ・Horizon 2020においては、CIS系太陽電池およびCZTS太陽電池の研究開発が進められた。とくに、CZTS太陽電池についてはいくつかのプロジェクトが同時に実施され現在にいたっている。 ・材料分野では、産業界が積極的にロボット科学者やマテリアルズ・インフォマティクスを活用する方向性が見えていない。
中国	基礎研究	○	↗	・米・欧に次いで、学術論文が多く見られる。トップジャーナルも散見される。 ・SSRFを中心に計測分野の研究が進められおり、エネルギー、高分子分野で成果が見られる。 ・化合物薄膜太陽電池に関してPVSEC、IEEE-PVSC、EU-PVSECなどでも積極的に発表しており、基礎研究の実力も高まっている。 ・マテリアルズ・インフォマティクスについては、非常にさかんに研究が行われており、論文数も圧倒的に多い。中国国内でのAI技術も強い。
	応用研究・開発	○	↗	・特別目立った動きは見られないが、米国で最先端の研究を行っているグループは中国系であることを考えると、様々な連携があると予想される。 ・関連論文に企業からの著者が入っている例は限定的である。 ・シリコン太陽電池はほぼ中国で生産されており、化合物薄膜太陽電池についても生産地の中心という特徴を生かして中国企業が欧米の企業を傘下に入れ、研究開発を加速させている。 ・ロボット技術の進展のスピードが他国を圧倒している。
韓国	基礎研究	△	↗	・論文ではほとんど目立った成果は見えていない。 ・PLSにoperandoのプラットフォームとなるビームラインの整備が進められている。 ・近年はCZTS太陽電池についても研究開発が急速に進み世界をリードしている。 ・AI利用（特に深層学習）に集中している。
	応用研究・開発	△	→	・論文同様目立った成果は見えていない。 ・関連論文に企業からの著者が入っている例は限定的である。 ・スタートアップ企業も含め化合物薄膜太陽電池そのものを生産する企業は存在しない。 ・基礎研究同様に深層学習に集中している。マテリアルズ・インフォマティクス のベンチャーを立ち上げる動きはある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・データに基づく問題解決（システム・情報分野　2.1.6）
・パワー半導体材料・デバイス（ナノテク・材料分野　2.1.3）
・元素戦略・希少元素代替技術（ナノテク・材料分野　2.5.2）
・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野　2.5.3）
・フォノンエンジニアリング（ナノテク・材料分野　2.5.4）
・ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野　2.6.3）

参考・引用文献

1) J.-W. Yeh et al., "Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements：Novel Alloy Design Concepts and Outcomes", *Advanced Engineering Materials* 6, no. 5（2004）：299-303. doi：https://doi.org/10.1002/adem.200300567
2) Y. Yao et al., “Carbothermal shock synthesis of high-entropy-alloy nanoparticles”, *Science* 359, no. 6383（2018）：1489-1494. doi：10.1126/science.aan5412
3) Yonggang Yao et al., “High-throughput, combinatorial synthesis of multimetallic nanoclusters”, *PNAS*, 117, no. 12（2020）：6316-6322. doi：https://doi.org/10.1073/pnas.1903721117
4) Dongshuang Wu et al., “Platinum-Group-Metal High-Entropy-Alloy Nanoparticles”, *J. Am. Chem. Soc.* 142, no. 32（2020）：13833-13838. doi：10.1021/jacs.0c04807
5) P. M. Attia et al., “Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning”, *Nature* 578（2020）：397-402. doi：https://doi.org/10.1038/s41586-020-1994-5
6) H. Suzuki et al., “Coherent strain evolution at the initial growth stage of AlN on SiC（0001）proved by in-situ synchrotron X-ray diffraction”, *Appl. Phys. Express* 13, no. 5（2020）：055501. doi：https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab84bf
7) R. Mohtadi and SI. Orimo, “The renaissance of hydrides as energy materials”, *Nat. Rev. Mater*. 2, no. 3（2017）：16091. doi：10.1038/natrevmats.2016.91
8) Y. K. Wakabayashi et al., “Machine-learning-assisted thin-film growth：Bayesian optimization in molecular beam epitaxy of $SrRuO_3$ thin films”, *APL Materials* 7（2019）：101114. doi：10.1063/1.5123019
9) S. Kajita et al., “A universal 3d voxel descriptor for solid-state material informatics with deep convolutional neural networks”, *Scientific Reports* 7, no. 1（2017）：16991. doi：10.1038/s41598-017-17299-w
10) Daisuke Sinohara and Shizuo Fujita, “Heteroepitaxy of Corundum-Structured α -Ga_2O_3 Thin Films on α -Al_2O_3 Substrates by Ultrasonic Mist Chemical Vapor Deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys*. 47, no. 9R（2008）：7311. doi：https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7311
11) B. P. MacLeod et al., “Self-driving laboratory for accelerated discovery of thin-film materials”, *Science Advances* 6, no. 20（2020）：eaaz8867. doi：10.1126/sciadv.aaz8867

12) D. Caramelli et al. “Networking chemical robots for reaction multitasking”, *Nature Commun.* 9, no. 1（2018）：3406. doi：10.1038/s41467-018-05828-8

13) *Epitaxial Growth of III-Nitride Compounds：Computational Approach,* T. Matsuoka and Y. Kangawa ed., vol. 269, Springer Series in Materials Science（Switzerland：Springer International Publishing, 2018）.

14) A. E. F. de Jong et al., “Complex geometric structure of a simple solid-liquid interface：GaN（0001）-Ga”, *Phys. Rev. Lett*. 124（2020）：086101. doi： https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.08610115）

15) G. Ju, D. Xu et al., “Coherent X-ray spectroscopy reveals the persistence of island arrangements during layer-by-layer growth”, *Nat. Phys*. 15, no. 6（2019）：589-594. doi：https://doi.org/10.1038/s41567-019-0448-1

2.5.8 ナノ力学制御技術

（1）研究開発領域の定義

材料が本来持つ力学機能を最大限まで引き出し、これまで実現できなかった高性能・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築するため、力学特性の発現機構をナノスケールまで立ち戻って理解し制御することを目的とした研究開発領域である。マクロな材料力学特性に関して社会的要請が強い応用技術領域を代表するものとして、「接着」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3つを取り上げる。ナノスケールでのその場計測下の力学実験技術、力学解析法、シミュレーション技術、そこを起点としてマクロスケールにおける力学特性の理解への橋渡しなどの研究開発課題がある。

（2）キーワード

マルチスケール解析、ナノ構造、ナノ界面、オペランド計測、ナノ計測、接着界面、分子接着技術、マルチマテリアル化、キッシング・ボンド、トライボ化学反応、表面テクスチャ、コーティング、固液界面、超低摩擦、自己修復、水素結合、動的架橋、超分子

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

材料が本来持つ力学機能を最大限まで引き出すためには、従来行われてきた現象論・経験則によるアプローチから脱し、ナノスケールにおける力学的な相互作用にまで立ち戻り、それを出発点としてマクロな力学特性の発現メカニズムを体系的に理解することが重要である。それによって、これまで実現できなかった高性能・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築することができるようになる。ナノスケールにおける非平衡・散逸・非定常状態も含めた現象メカニズムの解析結果を起点とし、ナノスケール～メソスケール～マクロスケールの各階層構造の枠を超えたトランススケールな解析を行うことが重要である。本章では、マクロな材料力学特性に関して社会的要請が強い応用技術領域を代表するものとして、「接着」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3 つを取り上げる。

• 接着

次世代型の自動車や航空機などの輸送機器におけるCO_2排出量の削減を目的として、マルチマテリアル化による軽量化を実現するためのキーテクノロジーとなる異種材料接着に注目が集まっている。しかし、現状では信頼性の観点から、ボルト・リベット等を併用せざるをえず、軽量化効果が不十分である。界面の直接評価法の確立や、官能基レベルから巨視的なサイズまでの空間スケールに時間を考慮した4次元マルチスケール解析にもとづく、材料の寿命評価と信頼性確保が実現されると軽量化が実現し、燃費向上による省エネ化、低炭素化への貢献が大きい。

また、次世代接着技術として、タフネス性、自己修復性や易解体性等の新しい機能の付与、さらには、接着剤の脱石油化をめざした研究開発も必要とされる。接着技術に関連するユーザー企業は多種多様であり、自動車、車載機器、ディスプレイ、ジェルネイル、衛生材料、衣服や瓶のラベルなど、その出口は多岐に渡る。

• 摩擦・摩耗

機械システムがその機能を実現するために動く箇所には必ず「摩擦」が発生し、それはエネルギー損失の

大きな要因となる。現在の自動車において、燃料の約1/3はエンジンや変速機、タイヤなどにおける摩擦損失によって消費されている。摩擦制御技術は、自動車、家電、情報機器、産業用ロボットなど機械産業機器、生活環境におけるエネルギー高効率化の鍵を握る。一方、機械システムの故障や寿命の原因の75%は摩擦により引き起こされる「摩耗」に起因しており、耐摩耗技術は、コスト損失や時に重大事故の抑制など機械システムの信頼性と耐久性の鍵を握る。

しかし、摩擦と摩耗は、個別の材料の特性ではなく、接触条件や環境など多様な因子に敏感に左右されるシステムの応答特性であり動的変化を伴う複雑系の現象であるため、ナノスケールでの構造や挙動に関する科学的知見とマクロな摩擦摩耗現象を制御する技術開発の間には大きな乖離がある。マクロスケールの現象をナノスケールでの現象まで立ち戻っての理解を基盤とする合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

• 自己修復

材料の自己修復が可能になれば、メンテナンスの費用が大幅に削減できるだけでなく、材料の長寿命化を通じてCO_2の削減にも大きな効果が期待される。また、宇宙空間や深海など、通常のメンテナンスが困難な応用先では特に重要な技術と考えられる。

自己修復現象はマクロな力学特性であるが、それを実現するためには、ナノおよびマイクロスケールの原子・分子の構造または高次構造と、そのダイナミクスが決定的な役割を果たす。したがって自己修復現象を科学的に理解し、その修復の程度や速度を制御するためには、ナノとマクロをつなぐ時空間の階層構造に関する学理、それぞれの時空間スケールをカバーする測定手法の開発、マルチスケールシミュレーションなどの基礎研究が必要となる。

［研究開発の動向］

持続可能社会を実現するためには、素材産業や機械産業に対するCO_2 排出量削減や低消費電力化などの環境低負荷に向けた要求がますます高まり、素材が持つ性能を極限まで引き出す機械機器設計が求められている。いわゆる「限界設計」の時代に突入しつつある今、社会的な要求を満たすためには、高性能な材料開発はもちろんのこと、それらの機能発現メカニズムの本質的な理解を通じた材料の余寿命予測技術の確立、さらに最終製品の信頼性や耐久性を担保できる新しいサイエンスが求められている。そのため、現象論的なマクロ特性の解析のみならず、ナノスケールにまで掘り下げた詳細な機能発現の原理解明が必要となり、機械工学や流体工学などのマクロスケール現象を取り扱う研究者・研究分野と、化学や物理などのナノスケール現象を取り扱う研究者・研究分野の協働が重要になってきている。個々の研究分野においては、データ科学やシミュレーション技術も駆使してナノとマクロの両方からのアプローチをすることによって革新材料の創製をめざす動きが徐々に始まっている。

• 接着

接着では、被着体の表面と接着剤が密接に接触しているにもかかわらず「キッシング・ボンド」と呼ばれる弱い結合状態の影響や長期使用等による接着界面の劣化によって破壊強度が大幅に低下する場合がある。しかしながら、接着界面の状況を外から直接観測することが困難なため信頼性を担保できないという大きな課題を抱えている。また、接着界面を分子からマクロまでのマルチスケール、さらには、時間を考慮した4次元で解析する技術も達成されていない。これらの状況が、接着界面での破壊挙動はもちろん、接着機構すら理解できていない状況を生んでいる。人命にかかわるモビリティ分野をはじめ、幅広い分野に接着技術を導入

するには、学理にもとづく強度や耐久性の保証およびそれらにもとづいた健全性や信頼性が求められる。具体的には、接着現象を、分子中の官能基の配向状態から巨視的な力学強度までのマルチスケールな空間で、かつ、時間変化で包括的に解析し、その発現機構を明らかにする必要がある。これらを分子設計に活かすことで、これまで達成できなかったレベルの接着が可能となる。さらには、高強度や高耐熱性はもちろん、全く新しい機能、例えば、タフネス性、自己修復性、易解体性なども接着技術に導入されることが期待される。これらの新しい知見を、これまで蓄積してきた構造接着分野のさまざまな知見と融合させることで基盤技術として体系化し、社会実装に応用することが望まれる。

・摩擦・摩耗

1980年代末頃の磁気記憶装置の急速な発展時の小さな接触面でのゼロ摩耗の要求が、マイクロおよびナノスケールでの摩擦・摩耗制御技術と原子・分子レベルでの摩擦・摩耗メカニズムの科学的解明に取り組むきっかけとなっている。ものづくりとして実用化される表面では、均質な表面であることはなく、また取り巻く環境はさまざまであり、さらに、摩擦エネルギーにより表面は常に変化するため、実際の表面では科学と技術のギャップは大きい。特に、摩擦および摩耗過程では、環境の影響も相まってさまざまな化学反応（トライボケミカル反応）が発生する。その結果として形成されるナノメートルオーダーの表面層の理解が、摩擦・摩耗解明のためには不可欠となる。また、摩擦と摩耗の動的な現象を真に理解するためには、in situ観察技術が必要であり、光干渉法、分光法、TEM、振動分光法、その場放射XRD等の最先端の表面評価装置と摩擦摺動部を組み合わせた摩擦界面のin situ観察技術の開発が国内外で進んでいる。

摩擦がゼロに近づく現象およびそのアプローチを超潤滑（Superlubricity）と呼び、マイクロ・ナノスケールにおいて多くの注目を集め数多くの研究が推進されてきた。その発現機構については科学的な解明が進む一方で、超潤滑の最終的な目的である超低摩擦と超低摩耗を備えた有望な機械システムの設計への展開は依然として困難な状況であり、課題となっている。

・自己修復

自己修復材料の対象は、有機・高分子材料と無機材料に大別できる。有機・高分子材料の自己修復としては、もっとも大きな応用分野が自動車などの自己修復コーティングである。すでに各自動車メーカーからトップコートのオプションとして高級車に導入されており、最近では携帯電話などにも展開している。このような自己修復コーティングのほぼ全ては、軽微な擦り傷が時間とともに修復するものであり、変形した高分子の形状が自然に元に戻る物理的な自己修復である。ヤング率が低い柔らかい高分子では当然のことであるが、比較的硬いコーティング用の高分子材料で実現することに意義がある。しかし、硬い高分子材料で高い復元性と速い復元速度を低温で両立することは今でも困難であり、架橋密度の制御、水素結合の部分的導入、トポロジカル超分子の利用など新しい技術を導入しながら現在もさかんに研究されている。これに加えて最近は化学的な自己修復が注目されている。化学的な自己修復のなかには、水素結合、疎水性相互作用、結晶化、ホストゲスト相互作用などのさまざまな非共有性相互作用を用いるものや、エステル交換反応、Diels-Alder反応などの動的結合を利用するものなどさまざまな研究成果が報告されている。典型的な例として、完全に切断した後、切断面を密着すると、比較的短い時間と室温程度のマイルドな条件で元の強度まで修復する材料が多数、報告され大きな注目を集めている。

無機材料分野である自己治癒セラミックスの研究開発については、おおむね3世代に分けることができる。第1世代は、亀裂の入ったセラミックスを再焼結することによる亀裂の再接合の現象解析を中心に研究開発が

行われた。この段階は自己治癒性を積極的に活用した材料設計がなされたわけではない。第２世代は、SiC粒子の高温酸化を利用した自己治癒セラミックスなどであり、粒子分散材と分散質の化学反応を活用した亀裂の再接合現象を中心に研究開発が行われている。第３世代は想定される用途に合わせて自己治癒機能を発現する最適な化学反応を選定し材料設計を実施するものであり、長繊維強化自己治癒セラミックスが代表例である。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• 接着

接着現象においてその理論強度は、界面における接着剤と被着体の分子間相互作用に帰属するが、接着剤の架橋反応によって誘起されるメゾスケールでの不均一構造による応力集中は接着強度を低下させる。また、剥離過程での亀裂の進展速度は、接着界面の破壊靭性に影響を与える。このように、接着メカニズムを理解するためにはマルチスケール解析が必要になる。

原子・官能基スケールでは、イオンスパッタリングを併用したＸ線光電子分光（XPS）および放射光を用いたXPS測定による接着界面の化学状態とその空間分布の分析や和周波発生（SFG）分光測定による官能基の配向状態分析が実施されている。また、理論接着強度は第一原理計算にもとづく検討が始まっており、密度汎関数（DFT）計算による接着界面の構造最適化や反応の遷移状態解析、接着界面の結合エネルギーなどによる金属やフィラーと高分子あるいは高分子同士等の異種・同種材料間での理論接着強度が明らかにされている。

ナノスケールでは、化学状態の面内分布を非破壊で評価するための新しいＸ線イメージング法や共焦点レーザーラマン分光等の解析技術を動的過程にも適用することで、劣化や破断等による接着界面の変化をその場観察する試みが始まっている。また、全原子分子動力学（MD）により、分子配向の面内分布を評価し、計算結果と実験結果を比較検討することで、接着界面における現実的な化学状態が明らかになりつつある。

メゾスケールでは、接着剤の架橋反応により生じた界面不均一構造は、量子ビーム（放射光・中性子）を用いた散乱・反射率測定による逆空間観測、走査・透過電子顕微鏡（SEM、TEM）を用いた実空間観察、および粗視化MD計算による評価が始まっている。

マクロスケールにおいては、電子顕微鏡内に力学試験機を導入し、マイクロビームＸ線などにより界面剥離のその場観察を行うことで、亀裂進展と構造変化の関係が検討され始めている。また、ミクロスケールの力学応答を与えるシミュレーション手法も開発し、これに有限要素解析（FEM）を適用することで、破壊過程の再現が試みられている。

接着現象の本質的理解にもとづく、さらなる耐熱化・高強度化のための接着剤の分子設計も進んでいる。また、しなやか・タフネス性や自己修復性は、耐熱サイクルや振動外乱対策における新たな設計概念であり、マルチマテリアル化を加速させるために重要である。易解体性の実現は、部材組立時の歩留まり向上や使用後部材のリサイクル化の意味で重要である。また、バイオベース接着剤の開発は、エネルギーアクセスや環境問題に直結する。

• 摩擦・摩耗

中性子測定とミュー粒子測定を組み合わせることによって摩擦現象の解明をめざす研究や、摩擦下での化学反応ダイナミクスを解明可能な反応力場分子動力学シミュレータにより摩擦下で発生するトライボエミッション現象のメカニズムを明らかにする研究が実施されている。

また、超低摩擦現象については、摺動面の直接観察にもとづき相界面の構造、機構を解明し制御すること

によりマクロな摩擦特性の制御を試みた研究や、摩擦によって自己形成されるナノ界面に着目した研究が実施されている。後者では、機械、材料、計測、計算分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的な設計が推進されている。

材料としては、濃厚ポリマーブラシやイオン液体による潤滑効果の研究が進められている。濃厚ポリマーブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに生体内潤滑モデルとして世界的に大学を中心に研究されてきているが、耐荷重性に乏しく実用化には限界があるものであった。これに対し、京都大学の辻井敬亘らのグループは濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功し、膨潤溶媒にイオン液体や潤滑油を利用することも可能になり、実用化に向かって進展している。

• 自己修復

有機・高分子材料の自己修復としては、動的結合を利用したものがさかんに研究されている。 Leiblerらフランス CNRS のグループのエステル交換反応で自己修復するヴィトリマーと呼ばれる熱硬化樹脂や、東京工業大学の大塚英幸らのグループのジアリールビベンゾフラノンの動的結合を利用した例などがあげられる。また、水素結合を利用した自己修復材料では、理化学研究所の相田卓三らのグループが、ガラス状の硬い自己修復材料の合成に成功した。従来の有機・高分子の自己修復材料は、弾性率が低い柔らかい材料に限定されていたが、ポリエーテルにチオ尿素を導入することで、硬い材料でありながら、室温で数時間圧着するだけで強度が元に戻ることができる。ちなみに水素結合を用いた自己修復材料としては、Leiblerらと共同しながらアルケマ社が「Reverlink®」という製品を実用化している。

一方、超分子の包接錯体やロタキサンを利用した自己修復材料が大阪大学の原田明らのグループによって開発されている。ゲルやエラストマーで完全に切断した状態で、切断面に少量の水分を与えると瞬時に接合し、ほとんど元の強度を回復する。その他、理化学研究所の侯召民らのグループでは、希土類金属触媒を用いた極性オレフィンとエチレンとの精密共重合によりランダムブロックコポリマーを用いた自己修復材料の合成に成功した。これは水中でも自己修復する点に特徴があり、耐環境性に優れていることから、様々な分野での応用展開が期待されている。

無機材料系自己治癒材料の研究開発において注目される動向として、自己治癒材料の微構造制御を積極的に取り入れるアプローチがある。横浜国立大学の中尾航らが発表した長繊維強化自己治癒セラミックスは、自己治癒エージェントを強化材であるセラミックス繊維束と母材との界面に偏在化させることにより、強度、破壊靭性と自己治癒機能との共生を可能としている。また、サーキュラーエコノミーに対応する材料技術として、外因的刺激を受けて自己治癒機能を発現する材料が再注目されている。特定の外因的刺激（高電圧負荷やマイクロ波照射）などを行うことで、部材を再度健全な状態に戻すことが可能であるため、再利用が可能になる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

• 接着

［日本］CO_2削減の重要性が世界規模で取り上げられ、自動車や航空機など輸送機器の軽量化のために「接着」にかかわる取り組みがさかんである。

NEDOの「革新的新構造材料等研究開発」（2011～2022年度）では、新構造材料技術研究組合（ISMA）において接着関連技術の研究開発が行われている。特に、異種材料接合のための構造材料用接着技術の開発を進め、2023年以降の事業化をめざしている。

内閣府戦略的イノベーションプログラム（SIP）では、「革新構造材料」（2013～2019年度）や「革新的設計生産技術」（2014～2018年度）の取り組みが行われており、軽量で耐熱・耐環境性に優れた材料の開発と航空機等への実機適用が検討されている。さらに、産総研に接着・界面現象研究ラボを設立し、接着・接合技術コンソーシアム（T-CAB）が動き出し、接着界面の分析や強度・信頼性評価への取り組みが行われている。

JST未来社会創造事業における「Society 5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発」（2018年度～）では、接着界面における分子描像を明らかにしてマルチスケールかつ時間軸を含めた4次元で接着機構の原理解明に取り組んでいる。

その他、産総研を中心としたNEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016～2021年度）やJST-CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」（2019～2026年度）、さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」（2019～2024年度）における接着・破壊機構の解明に向けた取り組みがある。

［海外］ 米国では、オークリッジ国立研究所（ORNL）に低コスト炭素繊維の開発・製造を目的としたコンソーシアム（2009～2022年）やミシガン州立大に類似・異種材料接合技術の実現に向けたイノベーションセンター（2013～2016年）が設立されている。

欧州では、ドイツが接着分野における研究開発を先導している。フラウンホーファー研究機構は欧州企業を含む10社が参画するプロジェクトFlexHyJoin（2015～2030年）を主導し、鋼板とプラスチックの接合技術に関し、軽量化、コストと時間の効率化、接合強度向上に取り組んでいる。同じくフラウンホーファー研究機構が中心となり、欧州の自動車企業が参画したプロジェクトENLIGHTにおいて自動車の軽量化に取り組んでいる。

中国では、中国製造2025の10の重点分野の中の素材テーマにおいて接着に関する研究が行われている。韓国では世界市場先占十大中核素材開発事業（WPM）で、接着剤・複合材のテーマが設定されている。

• 摩擦・摩耗

［日本］マイクロ・ナノスケールにおける現象解明にもとづく摩擦摩耗の理論的設計をめざすプロジェクトとして以下のものをあげることができる。

JST「光・量子融合連携研究開発プログラム」（2013～2017年度）において、中性子測定とミュー粒子測定を組み合わせることによる「摩擦」と「潤滑」の本質的理解をめざす研究が行われた。また、JSTさきがけ「エネルギー高効率利用のための相界面科学」（2013～2018年度）では中性子反射率計や赤外分光計などを導入した独自の測定技術による摺動面の直接観察にもとづき超低摩擦特性を発現する相界面の構造、機構を解明し制御することによりにマクロな摩擦特性の制御を試みた研究が実施された。さらに、JST-CREST「エネルギー高効率利用のための相界面科学」（2013～2018年度）では、炭素系硬質薄膜やセラミックス等の硬質材料において、摩擦によって自己形成されるナノ界面に着目し、機械のみならず材料、化学、物理の視点から摩擦により誘起されるトライボ化学反応を解明し制御することにより、マクロな摩擦特性の制御を試みた研究が実施された。機械、材料、計測、計算分野の融合による摩擦現象の解明にもとづく低摩擦の合理的な設計が推進されている。

また、JST-ACCELでは「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」（2015～2019年度）が実施され、濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功し、膨潤溶媒も水に加えイオン液体や潤滑油が可能になり、実用化の可能性のある日本独自の技術展開につながっている。

［海外］ EUでは、リーズ大学（英国）でのイオン液体（IL）の潤滑剤としての応用やボローニャ大学（イタリア）でのエンジンオイル用の環境に優しい添加剤に関する研究があげられるが、どちらも界面における固

体表面と潤滑剤分子の相互作用のメカニズム解明にもとづく合理的な設計をめざすものである。

中国では、清華大学摩擦学国家重点実験室で、数十人規模の博士課程学生によりマイクロ・ナノスケールのトライボロジー現象の科学的解明のための研究が推進されている。韓国では、延世大学Center for Nano-Wearにおいて、実験的なアプローチに加えて、理論的解釈とシミュレーションなどを活用した幅広い研究がなされている。

・自己修復

［日本］ 内閣府「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」の「超薄膜化・強靱化『しなやかなタフポリマー』の実現」（2014～2018年度）において、有機・高分子の自己修復材料が取り上げられ、画期的な成果が得られている。また、2019年度より始まったJST-CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」およびさきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」においても、自己修復材料は力学機能の1つとして有力な対象となっている。

［海外］ 自己修復材料を集中的に研究している組織として、米国のイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校（UIUC）、オランダのデルフト工科大学、ドイツのフラウンホーファーIFAM、ライプニッツ高分子研究所などが良く知られている。それぞれ中心としている研究対象は異なり、イリノイ大学では接着剤入りの微粒子を用いた高分子の自己修復樹脂、デルフト工科大学は自己修復コンクリート、フラウンホーファーはコーティング材料、ライプニッツ高分子研究所はタイヤを含むエラストマーなどに注力している。国際会議としては、International Conference on Self-healing Materials という国際会議が2年おきに開催されており、2019年は横浜で開催された。

（5）科学技術的課題

接着現象の機構が理解できていないことに起因して、強度の支配因子が不明、環境劣化の理由不明、品質保証・健全性の指針がないなどの問題がある。これら問題を解決するための課題には、接着剤となる分子の設計・配合、接着界面解析、硬化樹脂の構造・物性解析と力学特性評価、さらには、プロセス設計など多様な要素があり、その解決には、化学、物理、数学や機械を代表とする工学等幅広い専門分野の連携が必要である。また、接着現象を正しく理解するためには、実試料での界面計測とシミュレーションをマルチスケール、かつ、時間を含めた4次元で行う必要がある。得られる情報を数理統計解析、また、データ科学を活用して包括的に解釈して、分子接着と構造接着を統合できる接着機構を解明する必要がある。

摩擦・摩耗に関しては、マイクロ・ナノスケールでの科学的な解明が進む一方で、それらの理解にもとづくマクロな摩擦摩耗の制御システムの合理的な設計と創成には未だ繋がっていない。今後は、これらの理解にもとづく実用機械システムへの発展とそのためのマイクロ・ナノスケールでの摩擦面の変化の理解を機械システム設計につなげる新しいアプローチが求められる。また摩耗機構にもとづいた低摩擦の信頼性と耐久性の評価が重要となる。

自己修復材料においても、修復の分子的機構については、未だにほとんど理解が進んでいない。具体的には、自己修復の速度や回復率を決める要因が明らかになっていない。たとえば接着剤入りの微粒子を用いた自己修復性樹脂については、修復に時間を必要とし、また、元の強度までには完全に回復しないという問題があり、より高速で完全に強度が回復する技術開発が求められている。また、物理的な自己修復コーティング材料については、擦り傷程度は回復するが、材料の切断を伴うような大きな傷は回復できないことから、より強い負荷に対する自己修復性が求められている。さらに、動的結合や水素結合を用いた化学的な自己修復

高分子材料の場合には、完全に切断しても、切断面を接合するだけで元の強度まで回復するが、回復に時間がかかるなどの問題を抱えている。今後は、自己修復メカニズムをナノスケールで集中的に研究することが重要であり、それによって、飛躍的な性能の向上や修復機能の制御、耐環境性の改善などが期待される。

ナノスケールでのその場計測下の力学実験技術、力学解析法、シミュレーション技術により、機能発現のメカニズムの理解を進める必要があること、そこを起点としてマクロスケールにおける設計へと繋がる技術体系とする必要があることなどが、接着、摩擦・摩耗、自己修復のいずれの領域にも共通する技術課題である。

（6）その他の課題

ナノ力学制御技術は、力学的特性評価や界面分析、非破壊検査、表面処理、分子設計、プロセス設計など多様な要素があり、課題の解決には、機械や物理、化学等幅広い分野の専門家の連携が不可欠である。また長年の実用実績によって支えられて発展してきた技術であるため、実経験のある研究者の協力も不可欠である。これらをとりまとめられる横断的な知見を有する優れたリーダーと、受け皿となる連携促進するための組織が求められる。

また、エネルギーの高効率利用による温室効果ガス排出削減、省エネルギー・省資源としての低炭素化社会構築、安全安心な機械システム・社会構築、そしてその経済効果等、昨今の社会要請に応える鍵を握る基礎科学技術の１つでありながら、その意義があまり注目されていない研究領域であり、その重要性とその成果を世の中に訴求する必要がある。

この他、接着剤では薬品規制への対応の課題がある。接着剤には多くの反応性物質が含まれているが、多価アミンやビスフェノールA、ジイソシアネートなど、最近の規制強化により使用が制限された成分もあり、これらの代替研究も必要になっている。また、接着信頼性を確保するために、接着工程のプロセス管理という考え方もあり、欧州では接着業務作業者の資格取得を義務化する動きがあり、日本国内でも対応が必要となる可能性がある。

自己修復材料については、機械部品や構造材料として設計する指針が存在しないという課題もあげられる。従来、機械部品や構造材料は、充分な強度・耐久性を維持するように設計される。しかし、自己修復機能は、損傷が発生した後に効果が現れるため、現在の設計指針には考慮されていない機能である。重要部材に応用するためには、損傷が始まっても最終破壊までの猶予を確保しているという新たな安全性指針を構築する必要がある。自己修復機能を活用した新たな強度基準を提唱、実証し、法規制することが必要になっている。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	接着については、JST未来社会創造事業において、接着界面における分子描像を明らかにして接着機構の原理解明に向けた研究が加速している。摩擦についても、近年、化学、計測、計算分野の研究者の参画が増加したことにより、マイクロ・ナノスケールの現象の解明が進んでいる。 また、濃厚ポリマーブラシ、トライボ化学反応を制御した低摩擦ナノ界面創成などの研究も進んでいる。自己修復材料では、有機・高分子材料、無機材料ともに高いレベルにあり、新しいコンセプトを提示している。ただし、個々の研究者が行っている状況で、研究拠点あるいは自己修復材料に特化したプロジェクトは存在しない。
	応用研究・開発	◎	↗	SIPやNEDOのプロジェクトにおいて、接着・接合技術の向上と信頼性の担保に向けた研究が進められている。自己修復材料の主用途である耐傷性コーティングは自動車メーカーや化学メーカーを中心に研究開発がさかんに行われている。

米国	基礎研究	◎	↗	Materials Genome Initiative（MGI）の波及効果として接着・接合技術の研究環境が整備されている（オークリッジ国立研究所、ミシガン州立大など）。Carpickら（ペンシルベニア大学）が最新の研究成果を加えた摩擦・摩耗に関するテキストを出版。自己修復材料では、特に有機・高分子材料の分野で高いレベルにあり、新しいコンセプトを提示し、世界をリードしている。接着剤入りの微粒子を用いた自己修復材料では、イリノイ大学が世界的な拠点になっている。
	応用研究・開発	◎	→	接着分野では、MGIの成果の企業への移転が行われている。米アルゴンヌ国立研究所は、低摩擦機構解明とともに低摩擦技術のための数多くの特許を取得している。自己修復材料では、接着剤入りの微粒子を用いた自己修復材料の実用化に向けた研究が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	［EU］ 摩擦・摩耗に関してERC（European Research Council）およびHorizon 2020により計算の側面から優れた基礎研究が推進されている。 ［ドイツ］ フラウンホーファー研究機構が推進するFlexHyJoinプロジェクトが接着分野をリードしている。 ［フランス］ Ecole Centrale de Lyonのトライボロジー研究グループでは、先端的解析・分析装置が継続的に開発されており、質の高い基礎研究を支えている。CNRSにおける動的架橋を用いた新規な自己修復材料など自己修復材料の研究をリードしている。 ［オランダ］ デルフト工科大学で10年間、自己修復コンクリートのプロジェクトが実施された。
	応用研究・開発	○	↗	接着技術の自動車の軽量化への応用が盛ん。EUCARの下のENLIGHTやALIVEプロジェクトやBMWで研究が進められている。自己修復材料については、フラウンホーファーやアルケマ社での研究がさかん。
中国	基礎研究	○	↗	国家政策としての中国製造2025の下、研究拠点が設立されている。清華大学摩擦学国家重点実験室を軸に、マイクロ・ナノスケールのトライボロジー現象の科学的解明が急速に進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	新エネルギー車などの重点分野が設定され、軽量化のため接着分野の応用研究が加速されている。 Institute of Superlubricity Technology, Shenzhen, China（超潤滑技術研究センター、深圳、中国）の設立が2019年10月に発表されている。
韓国	基礎研究	○	→	MGIの韓国版、クリエイティブ・マテリアルズ・ディスカバリー・プロジェクトが進められている。
	応用研究・開発	○	→	韓国政府の主導で、接着剤・複合材の研究が加速している。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・トライボロジー（環境・エネ分野　2.1.16）

参考・引用文献

1) JST CRDS戦略プロポーザル「トランススケール力学制御による材料イノベーション」（CRDS-FY2018-SP-05）　https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2018-SP-05.html
2) 森誠之「せん断場におけるマイクロ・ナノ薄膜のその場観察」『トライボロジスト』51巻9号（2006）：621-626. https://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=web&lang=ja&tourl=8096691&naid=10018266641
3) 三宅晃司他「特集：摩擦界面のその場観察技術の進展」『表面科学』38巻3号（2017）：104-134. doi：10.1380/jsssj.38.104
4) C. A. Volkert et al., “In Situ Tribology”, *MRS Bulletin* 33, no. 12（2008）：1132-1208. doi：10.1557/mrs2008.233
5) J. Xu and J. Li, “New Achievements in Superlubricity from International Workshop on Superlubricity：Fundamental and Applications”, *Friction* 3, no. 4（2015）：344–351. doi：10.1007/s40544-015-0100-8
6) P. Cordier et al., “Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular self-assembly”, *Nature* 451, no. 7181（2008）：977-980. doi：10.1038/nature06669
7) M. Damien, “Silica-like malleable materials from permanet organic networks”, *Science* 334, no. 6058（2011）：965-968. doi：10.1126/science.1212648
8) T. L. Sun et al., “Physical hydrogels composed of polyampholytes demonstrate high toughness and viscoelasticity”, *Nature Materials* 12, no. 10（2013）：932-937. doi：10.1038/nmat3713
9) T. Kakuta et al., “Preorganized hydrogel：self-healing properties of supramolecular hydrogels formed by polymerization of host-guest-monomers that contain cyclodextrins and hydrophobic guest groups”, *Advanced Materials* 25, no. 20（2013）：2849. doi：10.1002/adma.201205321
10) M. Burnworth et al., “Optically healable supramolecular polymers”, *Nature* 472, no. 7343（2011）：334-337. doi：10.1038/nature09963
11) X. Chen et al., “A thermally re-mendable cross-linked polymeric material”, *Science* 295, no. 5560（2002）：1698-1702. doi：10.1126/science.1065879
12) K. Imato et al., “Self‐Healing of Chemical Gels Cross‐Linked by Diarylbibenzofuranone‐Based Trigger‐Free Dynamic Covalent Bonds at Room Temperature”, *Angewandte Chemie International Edition* 51, no. 5（2012）：1138-1142. doi：10.1002/anie.201104069
13) Y. Chen et al., “Multiphase design of autonomic self-healing thermoplastic elastomers”, *Nature Communication* 4, no. 6（2012）：467-472. doi：10.1038/nchem.1314
14) Y. Yanagisawa et al., “Mechanically robust, readily repairable polymers via tailored noncovalent cross-linking”, *Science* 359, no. 6371（2018）：72-76. doi：10.1126/science.

aam7588
15) H. Wang et al., “Synthesis of Self-Healing Polymers by Scandium-Catalyzed Copolymerization of Ethylene and Anisylpropylenes”, *Journal of American Chemical Society* 141, no. 7（2019）：3249-3257. doi：10.1021/jacs.8b13316
16) Yang Wang et al., “Triboemission of Hydrocarbon Molecules from Diamond-like Carbon Friction Interface induces Atomic-Scale Wear”, *Science Advances* 5, no. 11（2019）：eaax9301. doi：10.1126/sciadv.aax9301
17) Mika Aoki et al., “Segregation of an Amine Component in a Model Epoxy Resin at Copper Interface”, *Polymer Journal* 51, no. 3（2019）：359-363. doi：10.1038/s41428-018-0129-4
18) Manabu Inutsuka et al., “Adhesion Control of Elastomer Sheet on the Basis of Interfacial Segregation of Hyperbranched Polymer”, *ACS Macro Letters* 8, no. 3（2019）：267-271. doi：10.1021/acsmacrolett.8b00971
19) Yuta Tsuji et al., “Adhesion of Epoxy Resin with Hexagonal Boron Nitride and Graphite”, *ACS Omega* 4, no. 3（2019）：4491-4504. doi：10.1021/acsomega.9b00129
20) Mika Aoki et al., “Mesoscopic Heterogeneity in the Curing Process of an Epoxy-Amine System”, *Macromolecules* 52, no. 5（2019）：2075-2082. doi：10.1021/acs.macromol.8b02416
21) Ayuko Tsuruoka et al., “Fusion of Different Crosslinked Polymers Based on Dynamic Disulfide Exchange”, *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 11（2020）：4294-4298. doi：10.1002/anie.201913430
22) Eriko Sato et al., " Thermal Latent Reductants for Controlled Degradation of Polyperoxides and Their Application to High Performance Dismantlable Adhesives", *ACS Applied Polymer Materials* 1, no. 8（2019）：2140-2148. doi：10.1021/acsapm.9b00422
23) C. Mathew Mate and Robert W. Carpick, *Tribology on the Small Scale：A Modern Textbook on Friction, Lubrication and wear*, Second Edition（Oxford：Oxford University Press, 2019）.

2.6 共通基盤科学技術

ナノテクノロジー・材料分野の基礎および応用を支える「共通基盤科学技術」区分には、「加工・プロセス」（微細加工プロセス、積層造形・レーザ加工）、「計測・分析」（ナノ・オペランド計測）、および「理論・計算科学」（物質・材料シミュレーション）が含まれる。

「加工・プロセス」のなかでも微細加工プロセスはナノメートルレベルの加工を可能とするナノテクノロジー・材料分野を支える重要な技術領域である。半導体デバイス領域で発展したこの微細加工プロセスは、半導体分野にとどまらず、ナノメカニクス、スピントロニクス、バイオナノテクノロジーなどへの波及が進んでいる。

本節では、大規模集積回路（LSI）の高集積化を実現するためのシリコンの微細加工プロセスに絞り、10 nm以下のシングルナノメートル領域に向けた最先端技術の現状、および開発課題について述べる。現状のArF液浸露光技術とマルチプルパターニング技術の高度化に関する取り組みに加え、極端紫外線（EUV）リソグラフィ、ナノインプリント、原子層エッチング（ALE）などのトップダウン技術、原子層堆積（ALD）やブロックコポリマー（block copolymer）の誘導自己組織化パターンなどを利用したボトムアップ技術などの研究開発が進められている。

積層造形・レーザ加工は高付加価値の多品種少量生産やカスタムメイド生産のための技術開発領域である。積層造形は付加製造（Additive Manufacturing）、3D プリンティングとも呼ばれ、立体物を水平に輪切りにした断面データをもとに、樹脂や金属粉などをレーザまたは電子線で溶融させて薄い層を積み上げ、プラスチックや金属の立体物を製作する技術である。レーザ加工は、金属、セラミックス、ガラス、樹脂、生体などの材料に対し、除去（切削・切断）、穴開け、曲げ、溶接・接合加工や表面加工、内部・体積加工を施すものである。いずれもデジタル・マニュファクチャリング技術であることから、IoTやAIとの整合性が極めて良く、次世代のものづくりにおける重要な加工技術の１つとなってきている。また将来をにらみ、サイバーフィジカルシステム（CPS）を取り入れた新しい技術開発への挑戦も行われている。

「計測・分析」では、材料やデバイスに対する実使用下での時間分解計測、すなわち機能発現中に刻々と変化し続ける現象の実時間または経時観測により、測定対象のナノスケール構造と機能との相関を見出すことを目的としたナノ・オペランド計測を取り上げる。プローブとして走査プローブ顕微鏡（SPM）、透過型電子顕微鏡（TEM）、放射光Ｘ線、中性子線、レーザなどが利用されている。応用分野の大きなトレンドとしては、二次電池（特に、Liイオン電池）があげられるが、それ以外にも、「オペランド」という用語が初めて使われた触媒分野、エネルギー変換デバイス（太陽電池、燃料電池など）、生命科学分野（生きた細胞、生体関連分子など）にまで測定対象が広がってきている。

「理論・計算科学」の物質・材料シミュレーションは、物質・材料科学の基礎を支える重要な科学技術で、量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立をめざす研究領域である。計算の分野としては、分子系電子状態計算、固体系電子状態計算、分子シミュレーション、モンテカルロシミュレーション、統計力学にもとづく積分方程式、連続体モデルなどがある。近年、マテリアルズ・インフォマティクスによる材料探索の高効率化や、量子コンピュータを利用する量子化学計算アルゴリズムの開発が新たな潮流となってきた。ナノテクノロジー・材料分野におけるグローバルな研究開発競争が激化するなか、計算物質科学やデータ科学を駆使したハイスループットな材料開発に大きな期待が寄せられている。

2.6.1 微細加工プロセス

（1）研究開発領域の定義

シングルナノメートルレベルまでのシリコンの微細加工プロセスの高度化を実現する研究開発領域である。現状のArF液浸露光技術と多重露光技術の高度化に加え、EUVリソグラフィ、ナノインプリント、ブロックコポリマー（block copolymer）の誘導自己組織化パターンなどの利用によるシングルナノメートルレベルの新たなリソグラフィ技術、高アスペクト比パターン形成、原子層堆積・エッチング（ALD・ALE）などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

シングルナノ、リソグラフィ技術、露光装置、ArF液浸、極端紫外線、EUV、誘導自己組織化、DSA、ブロックコポリマー、多重露光、線幅バラツキ、LWR、ナノインプリント、NIL、モールド、複製テンプレート、ロールtoロール、マルチビーム描画、金属酸化物系レジスト、自由電子レーザ EUV 光源、原子層堆積、ALD、原子層エッチング、ALE、選択的原子層堆積、AS-ALD、熱的原子層エッチング、Thermal ALE

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

ICT産業の発展は、CPUやメモリに代表される大規模集積回路（Large Scale Integration：LSI）の性能向上によって支えられている。この性能向上をけん引する技術が、プロセス技術の高度化、デバイス構造の改変、材料技術の革新を含む微細加工技術である。

微細加工技術の中核を担う光リソグラフィ技術は、使用する光の短波長化、縮小投影技術、近接効果補正、液浸技術など光学系やマスクの工夫、レジスト材料の改良、ケミカルメカニカルポリッシング（Chemical Mechanical Polishing：CMP）などさまざまな技術を取り入れ、波長 193nm のフッ化アルゴン（ArF）エキシマレーザ光による液浸リソグラフィを用いた多重露光技術により、10nm 台の回路パターンを持つLSIが量産されるにいたった。2019年には、波長13.5 nmの極端紫外線（Extreme Ultraviolet：EUV）リソグラフィの量産技術適用も始まった。一方、光リソグラフィのように露光波長による解像度の制限がない、ナノインプリント技術の実用化研究も進められている。ナノインプリントは原版となるモールド（金型）を型押しして数十nm単位の3Dパターンを一括加工する技術であり、従来技術と比較して大幅な低コスト化が期待できる。

最先端の半導体プロセス技術では、セルフアライメント化と高アスペクト比化も重要な進化軸となっている。セルフアライメントパターニングでは超高選択比加工が要求され、原子層エッチング（Atomic Layer Etching：ALE）が有望な候補と目されている。トップダウン技術の先にはボトムアップ技術の登場が期待され、セルフアライメントとセルフアセンブリーを実現できる選択的原子層堆積（Area-Selective Atomic Layer Deposition：AS-ALD）や、ブロックコポリマー（block copolymer）を用いた誘導自己組織化（Directed Self-Assembly：DSA）パターン形成が有力候補にあがっている。3D加工を実現するには、アスペクト比に依存しない成膜、加工技術も必要となる。3D NAND型フラッシュメモリやDRAM等では、50超の超高アスペクト比の絶縁膜加工が要求されており、ドライエッチング技術分野で最重要課題の1つとなっている。高アスペクト比化に応じて加工レートや洗浄レートが低下する本質的な課題を解決するため、自己停止プロセスであるALDやALEのニーズが今後高まると予想される。

ビッグデータ処理、自動運転、人工知能（AI）、IoT などの応用に向けて、今後もさらなる情報処理能力

の向上、低消費電力化がLSIに要求される。自己選択、自己組織化、自己停止など原子・分子レベルの自己制御技術による3D微細加工プロセスは、将来の半導体技術を支える基礎的で重要な研究開発領域である。

［研究開発の動向］

• 光リソグラフィ技術

ArF液浸リソグラフィによる多重露光技術では、波長限界より微細なパターン形成を可能にする反面、製造コストの高さが課題となってきた。そこでさらに波長が短いEUV光源を用いたリソグラフィの技術開発が進められ、2019年にはTSMCとSamsungがスマートフォン用16 nm（7 nm世代）ロジックデバイスの量産技術としてEUVリソグラフィの適用を開始した。今後EUVリソグラフィが半導体微細加工技術の主流になると期待される。

EUVリソグラフィ技術の研究開発項目として、①EUVレジスト材料およびプロセス技術開発、②EUVマスクの開発、③EUV光源の開発があげられる。5 nm世代以降の量産展開に向けて、これら3つの項目の研究開発が続けられている。

①レジスト材料に関しては、高解像、高感度、低LWR（line width roughness）、低アウトガスのEUV用レジスト材料が要求される。特に重要な課題が低LWRの実現である。線幅のばらつきにより回路の動作速度がばらつく。周辺回路のクロック周波数は最も遅い動作に合わせる必要があるため、苦労して微細化しても高速動作を実現できないことになる。 LWRの主要因はレジスト材料そのものにあると考えられ、化学増幅系レジストの場合、酸発生材（photoacid generator：PAG）の不均一分布がLWRの主要因であることが明らかにされている。これまでレジスト構成材の空間的なばらつきを測定する手法がなかったが、近年、軟X線の共鳴散乱法でPAG等の凝集状態を観測できるようになった。この手法はEUV用レジストに限らず、Ar液浸リソグラフィや、後述するナノインプリント用のレジスト材料のLWR低減にも貢献すると期待される。また、さらなる高感度化、高解像度化を可能にするレジスト材料として、金属酸化物系レジストの研究開発が進められている。これは金属錯体を骨格にした2～3 nm程度の粒子サイズを有する材料であり、EUV光に対して大きな吸収断面積を有するHf、Sn、Zr、Zn等の金属が用いられている。金属含有レジストの実用化に向けた課題は保存安定性とプロセス安定性であり、特に大気中の水分に大きく影響されることが問題となっている。

②マスク開発では、レチクル基板洗浄技術、多層膜成膜技術の開発に加えて、マスク欠陥検査・修正技術、並びにペリクル技術の開発が進められている。量産用露光装置では、光学系やマスク表面への炭素堆積を防止するため、真空中に水素ガスが導入される。このため、高強度EUV露光環境下ではマスクの多層膜や吸収体、ペリクル、レジストが水素化されることで、微細パターン形成に大きな影響を及ぼす。こうした実際の露光環境に耐えるマスクの開発が進められている。

③EUV光源については、高スループットを維持するため光源のさらなる高強度化が要求される。また、EUV光源として使用されるレーザプラズマ光源（Laser Produced Plasma：LPP）はEUV光以外の波長の光（Out of Band：OoB）も発する。 OoBのうち深紫外線（Deep Ultraviolet：DUV）は多層膜光学系やマスク表面、マスク吸収体表面で反射され、LWR増大の要因となる。兵庫県立大学では同大学が有するニュースバル放射光施設でOoB光による影響の評価が可能な評価系の開発が進められている。

• ナノインプリント技術

ナノインプリント技術は実用化研究の段階に進んでいる。特に円筒形のモールドを用いて連続生産を行うロールtoロール機構の研究開発がさかんになり、機能性光学フィルムの製造をはじめ、機能性表面加工、マイクロ流路への適用が進められている。最近ではナノインプリントにより形成したナノパターンの溝部分に毛細管現象を利用して機能性ナノインクを充填する手法も複数の機関で研究されており、この方法で金属パターンも形成できる。

世界のナノインプリント研究の動向は、国際会議Nanoimprint and Nanoprint Technology（NNT）の発表状況からおおよそ知ることができる。欧州ではマイクロメートルサイズの光学デバイスの製造に力点がおかれ、200～300 mmサイズの大面積モールドによるウェハー括パターニング技術の開発が進められている。欧州では各国で研究が進められているが、特にドイツが充実している。 Wuppertal大は基礎研究を行っているが、他の多くの機関は応用研究にシフトしている。最近特に存在感を示しているオーストリアのPROFACTOR社では光学デバイス応用の研究が行われている。この他、フランスCEAの研究機関LetiではEVG社の200mmウェハ用装置を用いた大量生産技術の研究が行われ、Schott社は同装置を利用したAR/MR（拡張現実/複合現実）用の光学デバイスの開発を進めている。オランダのPhilips社のSCIL（Surface Conformal Imprint Lithography）の装置の利用も広まっている。

米国と日本では最先端の半導体集積回路製造への応用が進められており、有効エリア30 mm角程度のモールドを用いたステップアンドリピート方式のパターン形成技術の開発が行われている。米国の大学ではプリンストン大、ミシガン大、テキサス大が歴史的に強い。最近ではマサチューセッツ大がロールtoロールに力を入れている。企業ではキヤノンナノテクノロジーズが日本のキヤノンと共同で半導体用のナノインプリントステッパーの開発を続けている。日本では、大日本印刷がキヤノンのナノインプリントステッパー用のモールドを開発し、キオクシアが四日市工場でNAND型フラッシュメモリの製造プロセスへの導入を始めている。大学では大阪府立大、東北大の発表が多い。また、産業技術総合研究所とエリオニクスが大面積モールド用の超高速電子ビーム描画装置の開発を進めている。

中国は国際会議での発表件数は多くないが、2018年からナノインプリント技術の研究開発がブームを迎えており、2019年には論文発表件数で世界トップに躍り出た。香港大学、南方科技大学、天津大学、中国科学院、大連理工大学、南京大学、厦門大学などから多くの発表がなされている。韓国からの2019年の論文発表件数は中国、日本、米国に次ぐ数であり、韓国機械技術研究院（Korea Institute of Machinery and Materials and Technology：KIMM）、Korea大を中心に研究開発が続けられている。 SK Hynixは2016年から2018年にかけて東芝メモリと共同で多くの発表を行っていたが、2019年以降は発表が途絶えた。研究開発フェーズが変化したものとみられる。

• 原子層堆積（ALD）・原子層エッチング（ALE）技術

ALD技術の産業応用は、先端CMOSデバイスへの高誘電率（High-k）ゲート絶縁膜の導入を契機に劇的に活発化した。2007年にALD技術が量産技術に採用されたのち、2009年頃からプラズマALDによるSiO_2の成膜技術が報告されるようになった。これがArF液浸リソグラフィの自己整合ダブルパターニング（Self-Aligned Double Patterning：SADP）のスペーサーとして検討され始めた。 SADP技術は2010年代の後半からフラッシュメモリやDRAM等の微細パターニングに用いられ始め、現在では、SADPを2回繰り返すことで密度をさらに倍増するSelf-Aligned Quadruple Patterning（SAQP）も実用化されている。

ALE技術の量産展開も2010年代後半より活発化し、ロジックデバイスのSAC（Self-Aligned Contact）工程から使用され始めた。従来のドライエッチングではSiO_2加工時の対SiN選択比が不十分だったが、ALE技術であればより高い選択比の加工が実現できる。 ALE最大の課題は処理時間の長さである。そのためコストが重視されるメモリデバイスでは採用が見送られている。一方、最先端のロジックデバイスでは数nmの制御が要求されるため、今後ALE技術の適用が拡大すると考えられる。近年では、熱的原子層エッチング（Thermal ALE）技術の開発が日立ハイテク社を中心に活発化しており、最先端の3D FinFETの製造等に用いられつつある。

• 誘導自己組織化（DSA）技術

ブロックコポリマーを用いたDSA技術に関しては、欠陥低減が最大の課題である。また、さらなる高解像

度化に向けて、相互作用パラメータ（χ）の大きな高χ材料の開発も重要である。実用化に向けた技術課題として、像形成シミュレーション技術の高度化、形成された像の評価・検査技術の高度化などがあげられる。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

EUVリソグラフィ技術の量産適用がもっとも進んでいるのは台湾TSMCとみられる。 TSMCは2020年より5 nm世代プロセスを用いた本格量産を開始し、このプロセスで製造されたチップを搭載した最新端末がAppleより販売された。TSMCは2022年には4 nm世代プロセスの量産を始める計画を発表している。

EUV リソグラフィでは、LWRおよびStochastic欠陥の低減が特に注目されている。実際、1つのチップ上に10nmレベルのパターンを数十億個以上形成すると、統計的ゆらぎ（Stochastic effect）に伴う欠陥が顕在化してくる。これがStochastic欠陥であり、何が原因でどう対処すべきか大きな議論となっている。 EUV光の入射フォトンのゆらぎ、すなわちショットノイズが原因とみられていたが、2019年の2月に開催されたSPIE Advanced Lithographyの国際会議で、レジスト材料そのものに原因があるとの見解が示された。現在、レジスト構成材の空間的なばらつきを測定し低減をめざす研究が進められている。

ロールtoロールのナノインプリント技術に関する最近の報告は、毎分何mでロールを流せるか、毎分何m^2の製造が可能かなど、高い生産性を競う報告が多くなっており、製造と直結する水準に達していることを伺わせる。ステップアンドリピート方式のナノインプリント技術に関しては、キヤノンナノインプリントステッパーの性能が年々着実に向上しており、半導体デバイス生産が間近に迫っている。モールド作製では、マルチビームの電子ビーム描画装置が実用化され、複雑で微細なパターンが高速に描画できるようになった。最近、200 mmウェハを1日で描画できる、ポイントビームの低コストの超高スループット電子ビーム描画装置が開発され、電子ビームによるウェハ寸法のモールドへのナノパターン作製の道が開けた。ウェハ一括のナノインプリント装置もすでに販売されている。大量生産に向けて完全自動化された300 mm用UVナノインプリントリソグラフィ装置がEVG社より販売され、AR/MRウェアラブルディスプレイ用導波路の製造に用いられている。AR/MR用デバイスはナノインプリントのキラーアプリケーションになると考えられる。

ALD/ALEを用いたセルフアライメントパターニングに関して、現在、特に活発に研究されているのがArea-selective ALD（AS-ALD）技術である。選択成長技術は以前より検討がなされているが、AS-ALDも同様に、成長の選択性に最大の課題があり、まだ半導体デバイス製造には用いられていない。特に膜の成長を決定付ける材料表面の高精度制御に関する研究が重要となる。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

EUV リソグラフィ技術の開発に関して、米国では2016年より5年間で5億ドル支出し、Global Foundries 社とニューヨーク州立大 Albany 校（SUNY）で進められている。また、Intel、Samsung、TSMC、Inpriaが出資し、ローレンスバークレイ国立研究所内にEUREKAと呼ぶ研究センターが形成されている。ベルギーのIMECやフランスのLeti等のコンソーシアムでは、シングルナノメートルの微細加工プロセス技術開発を継続中であり、EUV露光やEB（Electron Beam）露光技術の開発を精力的に進めている。IMECには日本、韓国、米国から多くの半導体プロセス技術者が出向し、量産型露光装置NXE-3400Bを導入して応用研究が進められている。

国内ではEIDEC（Evolving Nano-process Infrastructure Development Center）を中心とするプロジェクトが2015年に終了して以来、進行中の国家プロジェクトはない。兵庫県立大学ではEUVリソグラフィの基

盤技術開発を目的とし、企業との共同研究の形で実質的なコンソーシアムが形成されている。光学系、レジスト、マスクにわたって、EUVリソグラフィ技術の基礎から応用まで幅広い研究開発が進められている。兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が有するニュースバル放射光施設は、国内で大学が保有する最大の放射光施設であり、2000年の供用開始以来、多くのEUVリソグラフィ用基盤技術の研究開発が進められてきた。EUVレジストの研究では、大面積による解像度評価、EUV干渉露光系による10 nm級のパターン形成・評価、アウトガス評価、新規EUVレジスト開発、軟X線吸収分光によるレジストの反応解析、並びにレジストの透過率測定系の開発を進めてきた。 EUVマスクの研究では、視野EUV顕微鏡およびEUVコヒーレントスキャトロメトリ顕微鏡による欠陥検査の開発を進めてきた。さらに、LPP方式のEUV光源パワーの向上を目的に、新たに開発した大型反射率系によるEUV光源用大型ミラーの反射率評価を進めている。兵庫県立大学以外では、QST、大阪大学、関西大学でEUVレジストの研究開発が行われている。

ナノインプリント技術に関しては、LetiとEVGによる INSPIRE（2015.7-）プログラムが進められている。国内においては、戦略的基盤技術高度化支援事業（プロジェクト委託型）において、エリオニクスと産業技術総合研究所による「ウエハサイズ3次元ナノインプリントモールド用超高速電子ビーム加工装置の研究開発」（2016.9-2019.3）が進められた。またJST戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）「日本-ドイツ国際産学連携共同研究」（オプティクス・フォトニクス）「プラズモニック金属ナノ構造を用いた高感度・高機能性SERS/LSPRバイオセンサーの開発」でナノインプリント技術が用いられている。

ALD/ALEに関しては、米国や欧州では国家プロジェクト等はない。韓国では半導体産業寄りの研究体制が敷かれている。産業界では、ベルギーのIMECがコンソーシアムとして業界内での存在感を示しおり、特にAS-ALDの分野で活発に対外発表がなされている。

（5）科学技術的課題

半導体デバイスプロセスの国際会議であるInternational Electron Devices Meeting（IEDM）2019では、1.5 nmノードの半導体デバイスの量産が2028年頃に予定されており、今後のさらなる微細加工技術の進展を期待する報告がTSMCやIntel等からあった。今後さらに微細化を進めていくための課題として、EUVリソグラフィをはじめ他のリソグラフィに共通してあげられるのがLWRの低減であり、上記（4）で列挙した研究開発項目に今後も取り組む必要がある。また、解像性能向上にはレジストのパターン倒れの抑制が必須である。基板との密着性の向上でパターン倒れを抑制する試みがあるが、抜本的な解決にはいたっていない。軟X線共鳴散乱法を用いて薄膜の単層レジストの膜構造を評価すると内部で層分離が起きていることが報告されており、まずはレジスト材料の層構造を明らかにする必要がある。また、従来のスピンコート法に代わる可能性を有する、CVDやALDによる新しいレジスト成膜法を検討する必要もある。従来のウェット現像に代わってドライ現像プロセスも視野に入れた研究開発が求められる。また、EUV 光源のさらなる高出力化に向けて、自由電子レーザ（FEL）光を用いた光源の開発も重要である。この方式であればkW 級の高出力化が期待できる。ただし、パルス幅がフェムト秒レベルで輝度が非常に高く、レジストのアブレーションや多層膜へのダメージが問題となると予想される。今後、SACLA等の実験設備を用いた検討が進められることが期待される。

ナノインプリント技術については、サブ20nmになるとモールド側のホールパターンへの樹脂の充填が難しくなるため、この充填機構の解明が必要となる。また、残膜厚を薄くしていくと10nm あたりから急に樹脂の粘度が高くなるため、充填に時間がかかりスループットの低下につながる。より低残膜にするには、この高粘度化機構を理解し、樹脂およびモールド表面処理の工夫と、高粘度化しない範囲でのプロセスが必要になる。半導体応用ではアライメントに関してはかなり改善が見られたが、モールドの耐久性に関して依然として改善の余

地がある。耐久性の低下はモールドがインプリント中に微粒子を噛み込むことが原因と考えられ、インプリント環境の更なる清浄化が必要である。また、離型は常に課題となっている。ウェハー括でのモールド作製技術に関しては、50～500 nm程度の寸法のパターンを自在に加工する技術が全く未開の状態にあったが、最近開発された低コストの超高スループット電子ビーム描画装置により低コストでウェハー括用モールドがようやく作製できるようになり、新たな展開が期待できる。この領域に早く手をつけるべきである。ただし、一般のリソグラフィとは異なり、パターン配置精度がパターン寸法に劣ってもよい新発想の利用形態を考えていく必要がある。

ALD/ALEに関しては、処理時間の長さが最大の課題である。現在、量産技術では原子層レベルの理想的なALD/ALEはほとんど使用されていないが、デバイス寸法が10nm以下になると、理想的なALD/ALEの実用化が必要となる。 ALD技術における近年最大のトピックスはAS-ALDである。選択成長技術はCVD等で長年研究されてきたが、完全な選択性が得られず量産化にいたらなかった。選択成長は、成長領域と非成長領域でのインキュベーション時間の差違を利用したサイクル時間制御によって行われているが、表面状態に大きく左右されるため、成長プロセス途中の表面状態の把握と制御が重要な課題となる。近年、ALD単体での選択成長の困難さから、表面機能化（Surface functionalization）と選択エッチングの組み合わせで選択成長を行う研究開発が活発化している。選択エッチングとは成膜とエッチングをサイクリックに繰り返す手法であり、堆積させたくない場所に成膜してしまった残渣（欠陥）をエッチングで除去しながら成膜プロセスを行う。表面機能化に関しては自己組織化膜（Self-Assembled Monolayers：SAMs）でALD成長を不活性化させる手法が注目されている。 SAMは通常ウェット処理で成膜され、ALD成長を阻害する役割を果たす。 SAM上にも部分的に成膜してしまう場合もあるが、SAMを除去する際にこの不要な膜も除去できる。AS-ALDの1つの課題は、マッシュルーム成長と呼ばれる、等方的な成長に起因した寸法の拡大である。等方成長はALDの基本原理であり根本的な解決策はないが、プラズマALD技術やエッチングとの組み合わせで、この問題を解決できないか検討されている。 ALE技術に関する課題として、吸着ガスの探索、表面機能化による高選択比加工、ALEサイクルごとの表面状態や自己制御プロセスの再現性と安定性の向上、プラズマダメージの抑制などがあげられる。現在、吸着ガスには従来のエッチング用ガスを元にしたガス系が用いられており、ALEに特化したガス系の探索が求められる。またALD同様、表面状態の差によって高選択比加工を実現していることから、極めて高い精度で材料表面を制御する技術が要求される。さらに、完全な自己制御プロセスが難しく、サイクルごとの表面状態の安定性の確保、装置内壁の状態の変化に起因する再現性低下の抑制も重要な課題である。Thermal ALEもALD同様、原理的に等方性加工となる課題がある。そこでプラズマプロセスで異方的に変質層を形成し、変質層のみをThermal ALEで除去して異方性加工を行う新しい試みが提案されている。

ALD/ALE技術では、材料ごとに最適なガスケミストリーや表面処理が異なるため、材料とプロセスのデータベース化が強く求められている。また脱離物の分子量が大きいので、脱離中に分解し、加工速度が安定しない課題がある。分解反応を抑制する目的で添加するガス（Stabilizer）の検討も必要である。 Thermal ALEは最新の研究分野であり、今後大いに発展する可能性を秘めている。

（6）その他の課題

10nmノード以降の微細加工プロセスを有している半導体メーカーが、Intel、Samsung、TSMC などの海外企業に限られてきているなかで、日本としてどのようにして微細加工プロセス技術の開発を進めて行くのか、難しい状況にある。日本の半導体サプライヤーは高い技術を持ちながら、その多くは生産に莫大な設備投資がかかる自社での生産をやめ、設計をしたものをファウンドリに製造委託している。しかし海外への製造委託により重要な設計思想やデータも委託先に開示されることになり、知的財産保護の観点から好ましい状

況とはいえない。今後どのような体制で先端の微細加工プロセス技術を保有し人材育成を図っていくのか、レジスト材料技術や欠陥評価技術などの優位性も考慮し、IMECなど世界のコンソーシアムとの差別化や連携も含めて検討していく必要がある。

ALD/ALEの分野は、極めて近い研究開発分野であるにもかかわらず、国内を見渡すと両分野の連携が極めて乏しい。国内で目立った大型プロジェクトもなく、デバイスメーカー、装置メーカー、大学がそれぞれ独自に検討している状況である。ボトムアッププロセスが中心的な役割を果たす微細加工プロセス技術の新時代に向けて、国内での包括的なプロジェクトの発足が望まれる。

半導体分野を志す学生の減少も大きな問題である。大学の学生も参加できる産学連携のスキームを構築することが、わが国における先端技術の持続的発展と人材育成の観点から重要と考えられる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	・EUVリソグラフィの基礎研究では兵庫県立大学で光学系、レジスト、マスク等の基盤技術開発の基礎研究が精力的に進められている。 ・ナノインプリント技術に関して、大阪府立大学、東北大学、産業技術総合研究所などで各種基礎検討を続けている。極限ナノ造形・構造物性研究会ではシングルナノ領域のナノインプリントに取り組んでいる。 ・ALD技術は東大、芝浦工大で研究が行われているが、日本の存在感は低下傾向である。ALE技術は、名古屋大、大阪大が、国内の研究拠点となっており、精力的に研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	→	・EUV用光源開発ではGigaphotonが、EUVマスク欠陥検査装置開発ではレーザーテックが精力的に進めている。また、三井化学と信越化学工業がペリクルの開発を進めている。 ・マルチビーム描画装置の開発では、欧州勢にやや遅れている。ナノインプリント技術については、東芝メモリ、キヤノン、大日本印刷がNANDフラッシュメモリの生産に向けて精力的に研究開発を行っている。 ・ALDでは、東京エレクトロン、日立国際電気が、High-k等を含む金属材料の熱ALD技術で世界的なシェアを有する。 ALEでは、東京エレクトロンが異方性ALE（絶縁膜）の量産適用を世界に先駆けて実現。日立ハイテクも、等方的なThermal ALE技術のデバイス適応を世界に先駆けて検討中。デバイスメーカーでは、ソニーが低ダメージを目的とした研究発表を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	・EUVリソグラフィに関しては無機材料を中心としたレジスト材料の開発と、そのメカニズム解析が、材料メーカーだけでなく、大学や研究機関によって積極的に進められている。 ・ナノインプリント技術は、プリンストン大、ミシガン大、テキサス大、マサチューセッツ大で精力的に研究されている。 ・AS-ALDおよびThermal ALEについて、コロラド大やスタンフォード大などが先駆的な発表を継続的に発表している。 LAM Research社、Intel社等との連携も見られる。
	応用研究・開発	◎	→	・EUVリソグラフィの実用化が着実に進んでいる。 ・ナノインプリント技術についてはキヤノンナノテクノロジーズが引き続き米国を拠点として精力的に研究開発を進めている。ロールtoロールの研究もある。 ・Intel社の先端ロジックデバイスではALEやThermal ALE技術がFinFETの製造で用いられている。 Thermal ALEは日立ハイテクの技術である。またLAM Research社の絶縁膜系のALEもコンタクト加工で用いられている。

欧州	基礎研究	○	→	・EUVリソグラフィについては、スイスのPSIにおける放射光を用いた干渉露光や、Carl Zeiss SMTでの高NA化開発等、微細化の最前線を牽引している。材料面でもMulti Triger型など提案している。 ・ナノインプリント技術はWuppertal大、PSI、Letiなどで研究しているが、NaPaNILの後は大きなプロジェクトは走っていない。 ・ALD/ALEについてはアイントホーヘン工科大で進んだ研究開発が行われており、大学研究の中心的な役割を担っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ベルギーのIMECにおける微細加工技術、オランダのASM/ASMLでの装置開発が、半導体の微細化技術の中心として君臨している。EUVリソグラフィ、マルチビーム型描画装置や検査装置、ALD、ALEなど、積極的に研究開発を進めている。 ・ナノインプリントについてはEVGおよびLetiがウェハー括ナノインプリントの実用化に力を入れている。 ・英国のOxford Instruments社は、研究用途のALD装置を多く製造し、幅広く使用されている。
中国	基礎研究	△	→	欧米や日本を追う状況に変わりはないが、大学からの研究発表がみられるようになり、近い将来、研究者や研究費の増加で基礎研究が活発化していく可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	各種加工技術関連装置開発、プロセス技術開発、材料開発が積極的に進められており、発表文献数にも伸びがみられる。
韓国	基礎研究	△	→	・EUVリソグラフィ技術に関しては、Hanyan大学でEUV用ペリクル膜の研究が進められているが、基礎研究のレベルはそれほど高くない。 ・ナノインプリント技術ではKIMMとKorea大が基礎研究を行っている。ALD技術については研究機関や大学で極めて活発に研究開発が行われており、国際学会発表件数も非常に多い。
	応用研究・開発	◎	→	Samsungが微細加工技術の最先端技術をリードしている。ALE技術については東京エレクトロン社、LAM Research社の技術を用いているとみられる。SK Hynixが東芝メモリとナノインプリントの共同研究を行っている。
台湾	基礎研究	○	→	リソグラフィ技術の先端的研究の一部は台湾放射光施設で進められているが、活発に進められている状況ではない。ALD関連の学会発表件数は比較的多い国に分類される。
	応用研究・開発	◎	→	TSMC社は世界のファウンドリのトップ企業であり、半導体製造の量産技術で微細化のトレンドを牽引している。ALE技術については東京エレクトロン社、LAM Research社の技術を用いていると予想される。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・パワー半導体材料・デバイス（ナノテク・材料分野　2.1.3）
・新機能ナノエレクトロニクスデバイス（ナノテク・材料分野　2.3.1）
・集積フォトニクス（ナノテク・材料分野　2.3.2）

参考・引用文献

1) Alberto Pirati et al., "The Future of EUV Lithography：Enabling Moore's Law in the next Decade", *Proceedings of SPIE* 10143, In Extreme Ultraviolet Lithography 8（2017）：101430G. doi：10.1117/12.2261079
2) Yannick Vesters et al, "Sensitizers in EUV Chemically Amplified Resist：Mechanism of sensitivity improvement", *Proceedings of SPIE* 10583, In Extreme Ultraviolet Lithography 9（2018）：1058307. doi：10.1117/12.2297627
3) Christopher K. Ober et al, "EUV Photolithography：resist progress and challenges", *Proceedings of SPIE* 10583, In Extreme Ultraviolet Lithography 9（2018）：1058306. doi：10.1117/12.2302759
4) C. Popescu et al, "Sensitivity Enhancement of the high-resolution xMT multi-trigger resist for EUV lithography", *Proceedings of SPIE* 10143, In Extreme Ultraviolet Lithography 8（2017）：101430V. doi：10.1117/12.2258098
5) Erik R. Hosler, Obert R. Wood and William A. Barletta, "Free-electron Laser Emission Architecture Impact on Extreme Ultraviolet Lithography", *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 16, No. 4（2017）：041009. doi：10.1117/1.JMM.16.4.041009
6) Takeo Watanabe and Tetsuo Harada, "EUVL Research Activity at Center for EUV Lithography", *J. Photopolym. Sci. Technol*. 29, no. 5（2016）：737-744. doi：10.2494/photopolymer.29.737
7) Keisuke Tsuda, Tetsuo Harada and Takeo Watanabe, "Development of an EUV and OoB Reflectometer at NewSUBARU Synchrotron Light Facility", *Proceedings of SPIE* 11148, In Photomask Technology 2019（2019）：111481N. doi：10.1117/12.2540815
8) Jun Tanaka et al., "Resonant Soft X-ray Scattering for the Stochastic Origin Analysis in EUV Resist", *J. Photopolym. Sci. Technol*. 32, no. 2（2019）：327-331. doi：10.2494/photopolymer.32.327
9) The 18th International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technologies, "2019 Agenda", NNT2019, https://nnt2019.org/#agenda（2021年1月20日アクセス）.
10) Hirotaka Tsuda et al., "Process control technology for nanoimprint lithography", *Proceedings of SPIE* 10584, In Novel Patterning Technologies 2018（2018）：105841D. doi：10.1117/12.2297332
11) M. Mühlberger et al., "Multilayer Multimaterial Nanoimprinting combined with Inkjet Printing", Nanoimprint and Nanoprint Technologies 2019, https://nnt2019.org/documents/uploads/M._Muehlberger_A._R._Moharana_H._Ausserhuber_S._Kopp_T._Mitteramskogler_

D._Fechtig～NNT2019_Abstract_mmuehl.pdf（2021年1月20日アクセス）.
12) Marc A. Verschuuren, Korneel Ridderbeek and Rob Voorkamp, “Substrate conformal imprint lithography：functional resists, overlay performance, and volume production results”, *Proceedings of SPIE* 10958, In Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS, and MOEMS 2019（2019）：109580D. doi：10.1117/12.2514757
13) 尹 成圓 他「超高速電子ビーム描画装置及び高精度ナノインプリント技術の開発」『2019年度精密工学秋季大会』（2019）：214-215. doi：10.11522/pscjspe.2019A.0_214
14) 応用物理学会・ナノインプリント技術研究会『ナノインプリント技術ハンドブック』（東京：オーム社，2019）, https://www.ohmsha.co.jp/book/9784274224485/.
15) K. J. Kanarik et al., “Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry”,*J. Vac. Sci. Technol*. A 33, no. 2（2015）：020802. doi：10.1116/1.4913379
16) K. J. Kanarik, S. Tan and R. A. Gottscho, “Atomic Layer Etching: Rethinking the Art of Etch”,*J. Phys. Chem. Lett.* 9, no. 16（2018）：4814-4821. doi：10.1021/acs.jpclett.8b00997
17) R. W. Johnson, A. Hultqvist and S. F. Bent, “A brief review of atomic layer deposition：from fundamentals to applications”,*Materials today* 17, no. 5（2014）：236-246. doi：10.1016/j.mattod.2014.04.026
18) H. C. M. Knoops et al., “Status and prospects of plasma-assisted atomic layer deposition”,*J. Vac. Sci. Technol*. A 37, no. 3（2019）：030902. doi：10.1116/1.5088582
19) M. Honda et al., “Benefits of atomic-level processing by quasi-ALE and ALD technique”,*J. Phys. D：Appl. Phys*. 50, no. 23（2017）：234002. doi：10.1088/1361-6463/aa6f27
20) K. Shinoda et al., “Thermal Cyclic Atomic-Level Etching of Nitride Films：A Novel Way for Atomic-Scale Nanofabrication”, *ECS Trans*. 80, no. 3（2017）. doi：10.1149/08003.0003ecst
21) A. Hirata et al., “Mechanism of SiN etching rate fluctuation in atomic layer etching”,*J. Vac. Sci. Technol*. A 38, no. 6（2020）：0602601. doi：10.1116/6.0000257
22) Y. Lee, C. Huffman and S. M. George, “Selectivity in Thermal Atomic Layer Etching Using Sequential, Self-Limiting Fluorination and Ligand-Exchange Reactions”, *Chem. Mater*. 28, no. 21（2016）：7657-7665. doi：10.1021/acs.chemmater.6b02543
23) X. Sang, E. Chen and J. P. Chan, “Patterning nickel for extreme ultraviolet lithography mask application I. Atomic layer etch processing”,*J. Vac. Sci. Technol*. A 38, no. 4（2020）：042603. doi：10.1116/6.0000190
24) X. Sang et al., “Patterning nickel for extreme ultraviolet lithography mask application. II. Hybrid reactive ion etch and atomic layer etch processing”,*J. Vac. Sci. Technol*. A 38, no. 4（2020）：042604. doi：10.1116/6.0000191
25) R. J. Gasvoda et al., “Surface prefunctionalization of SiO_2 to modify the etch per cycle during plasma-assisted atomic layer etching”, *J. Vac. Sci. Technol*. A 37（2019）：051003. doi：10.1116/1.5110907

2.6.2 積層造形・レーザ加工

（1）研究開発領域の定義

近年、重要性を増している多品種少量生産やカスタムメイド生産の高効率化、製品の高付加価値化をめざす技術を研究開発の対象とする領域である。積層造形は、立体物を水平に輪切りにした断面データをもとに、樹脂や金属粉などを用いて薄い層を積み上げて立体物を製作する技術であり、3Dプリンティングとも呼ばれる。最近はファイバーレーザなどの近赤外域レーザの普及により、レーザ方式の積層造形も広がりをみせている。一方レーザ加工は、金属、セラミックス、半導体、ガラス、樹脂、生体などのさまざまな材料に対し、除去（切削・切断、穴あけ）、塑性（曲げ）加工、接合加工や表面加工（改質、パターン化、マイクロ・ナノ構造化）、内部・体積加工を施すものである。短パルスレーザによる非熱的加工は、仕上がり精度が高いという利点があり、産業利用がさかんになってきている。

（2）キーワード

3Dプリンティング、粉末床溶融結合、指向性エネルギー堆積、結合剤噴射、材料押出、溶融・凝固現象、プロセスモニタリング、シミュレーション、ファイバーレーザ、半導体レーザ、切断加工（切削加工）、接合加工、純銅、品質保証、短波長レーザ、連続波（CW）レーザ、フェムト秒レーザ、炭酸ガスレーザ、エキシマレーザ、固体レーザ、ビーム整形、除去（切削・切断）加工、塑性（曲げ）加工、接合加工、表面加工（改質）、3次元加工、表面微細構造、品質保証、その場/オペランド計測、サイバー・フィジカルシステム（CPS）、デジタルツイン、人工知能（AI）、多光子励起、トンネル励起、緩和過程、マルチスケール、マルチフィジックス、2温度モデル、分子動力学、流体力学、時間依存密度汎関数法、電磁場解析

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

積層造形は、学術用語としてはAdditive Manufacturing（AM、和訳は付加製造）と呼ばれる。 AMは、設計の自由度が大きく、トポロジー最適化やラティス構造などを適用した従来の加工法では不可能な形状品を造形できることから、軽量化や高機能化を大幅に改善した製品を一体化して製造できるなどの特徴を有している。このため、航空・宇宙分野、医療分野などの製品に適用されている。金属を対象とすると、これまで主に粉末床溶融結合によるジェットエンジン部品などの航空・宇宙分野、インプラントなどの医療分野、金型などが主体であったが、ここ数年で結合剤噴射や材料押出による小型精密部品への展開も可能となってきており、とりわけ自動車分野への展開が期待されている。また、従来造形が難しかった高強度アルミニウム合金や純銅、さらには耐熱・耐食材料や高融点材料などもAM装置の高機能化と材料開発により可能となってきている。

加えて、AMはデジタル・マニュファクチャリング技術であることから、IoTやAIとの整合性が極めて良く、次世代のものづくりにおける重要な加工技術の1つとして、すでに海外ではスマート工場のモデル化が進行している。米国、欧州、中国などにおける研究開発が実用化段階を迎えており、また昨今の新型コロナウイルス感染症流行拡大によってサプライチェーンが混乱し、3Dプリンタの有用性が再認識されたことを考えると、わが国においても積極的に導入を行うことが重要である。

20世紀の最高の発明の1つにあげられるレーザは、現在多様な分野で利用されている。その中でもレーザ加工はもっとも重要な応用の1つである。実際、レーザ加工は自由度に富み、金属、セラミックス、半導体、

ガラス、樹脂、生体などの材料に対して、除去、付加、改質、接合、微細構造化などの多様な加工が行なえるだけでなく、高品質、高解像度の空間選択的加工も実現する。また多くの場合、特殊な環境（真空、雰囲気ガス）を必要とせず、プロセス工程も削減できるため、薬品などの使用量が削減できて環境にも優しい。実際、レーザ加工は、自動車、鉄鋼、造船、航空産業などにおける厚鋼板の溶接・切断といったマクロ加工用途から、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス産業などにおける微細穴あけ、スクライビング、マーキング、リソグラフィといったマイクロ加工用途まで広範囲な領域で実用化されている。近年は、新しい光源の開発、レーザ発振器の高出力化・高性能化に加えて、ビーム整形技術、加工光学系やロボット、加工装置などの周辺機器の進歩も著しく、その重要性はますます増大している。

一方、ドイツのIndustrie 4.0やわが国のSociety 5.0による超スマート社会実現のためのものづくり革新において、収集データのAI処理による知のデジタル化に注目が集まっている。多くの加工パラメータの最適化が必要なレーザ加工においても、AIや深層学習との融合や、理論計算・シミュレーションにもとづいた学理解明が重要な課題として注目され、研究開発が進められている。

フェムト秒やアト秒といった極短パルスレーザによる加工は、光の伝搬、光吸収による電子励起、励起電子－格子相互作用、エネルギー輸送、加工（破壊）という異なる物理過程が、時間経過に応じて連続的に起きる。これらは違う分野として扱われてきた現象であるが、それらが連続的に起きるために、高エネルギー物理学を除くあらゆる物理過程を考慮しなくてはいけないのがレーザ加工研究の理論的難しさである。このような融合は各分野の研究者が扱いにくさのために避けられてきたものである。レーザ加工という現象を扱うことで新しい分野横断的研究領域が形成され、新しい科学研究の芽がそこから生まれることが期待される。

［研究開発の動向］

金属のAMにおいて用いられる代表的な方法は、現状においても粉末床溶融結合と指向性エネルギー堆積である。粉末床溶融結合における装置開発の最近の動向をみると、熱源としてレーザの高出力化や多光源化により大型・高速化をめざした装置開発が引き続き進められている。これは、ジェットエンジンやロケットエンジンなどの航空・宇宙関連部品やタービンブレードなどエネルギー・産業機器分野に対応した大型製品が多くなってきていることに起因する。このため、深さ方向を1 m以上とした専用機の開発などが行われ、GE Additiveではジェットエンジンのハウジング造形用の特殊装置開発も行っている。

粉末床溶融結合においては、熱源としてレーザが主流であり、炭酸ガスレーザから波長1070 nmのYbファイバーレーザに主流が移り変わったことにより、造形品質の安定化と鉄系合金やニッケル基超合金などに加え、アルミニウム合金の造形が可能となり、実用に供されるようになった。しかし、今後の自動車の電動化などを見据えた際に重要な純銅の造形は、ファイバーレーザでは吸収率が低いことから難しく、短波長のレーザを適用する必要がある。最近、緑色レーザを搭載した装置開発も行われており、純銅の高密度での造形も可能となっている。また、ファイバーレーザの高出力化と低コスト化が進んだことにより多光源化も進んでいる。4台のファイバーレーザを搭載した、大面積の造形面を有する大型装置が開発されており、高速化が進んでいる。さらに、従来の装置では割れの発生しやすい高炭素濃度の鉄系材料やニッケル基合金などは造形が難しかったが、最近ではベースプレート温度を従来の200℃から500℃、さらには700℃まで加熱可能な装置開発が行われたことで、熱変形を抑えるとともに、割れの発生防止が可能となっており、これに伴って適用材料の範囲も大幅に広がってきた。併せて、品質の安定化を図るためのモニタリング機能を搭載した装置が増えているが、フィードバック機能については研究段階である。

電子ビームを搭載した装置はほぼ1社の独占であったが、経済産業省およびNEDOのプロジェクト

（2014～2018年度）で技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（Technology Research Association for Future Additive Manufacturing：TRAFAM）が開発した2機種の装置のうち、1機種の装置の販売が2019年より始まった。電子ビームの装置は、TiAlなどの酸素を嫌う高融点材料や溶接で割れが発生する材料などへの適用が有利であり、今後の展開が期待される。

一方、指向性エネルギー堆積は、これまで熱源としてレーザを使用し、粉末供給して造形する装置が多かったが、近年、熱源としてアーク放電を利用してワイヤを送給して造形する装置や、アルミニウムと銅系に限定されるもののコールドスプレイによる方式の装置が注目されている。指向性エネルギー堆積法は、これまで通り、その製法の特徴から単純形状で大型製品へ適用されている。わが国ではTRAFAMによるプロジェクトにおいて、指向性エネルギー堆積法の装置2機種が開発されており、500 cc/時間での高速造形が可能となっている。さらに、メルトプールの形状や温度をモニタリングすることでフィードバック制御を可能とした装置の開発も行われており、造形品質の安定化につながると期待されている。

最近、従来の方式に加えて、結合剤噴射および材料押出による造形法が注目されており、装置が安価であることから装置販売の台数も大幅に伸びている。結合剤噴射はMITにより開発された技術であり、2000年頃に金属用として実用化されたが、その後は鋳造用砂型の造形に利用されている。 AMの自動車分野への展開では、大手メーカーとドイツの自動車メーカーが開発を開始したことから再び注目を浴びている。製品は小型部品が中心で、造形体の密度も98%程度で材質も限定されるが、大量生産可能なことから今後大きな伸びが予測される。また、材料押出による金属材料への展開も注目されているが、いずれの方式も成形後の脱バインダ・焼結工程が必要なことに注意すべきである。すでに、金属粉末射出成形（Metal Injection Molding：MIM）技術を有している企業にとっては、新たな製品展開の有効な手段となりうる。

AMは、Industrie 4.0において重要な加工法として位置づけられているため、装置の周辺技術である搬送装置やロボットとの統合化をめざしたモデルシステムの構築が進められ、ドイツの自動車産業においては積極的な導入が検討されている。また、将来を睨んでサイバーフィジカルシステム（CPS）を取り入れた新しい技術開発への挑戦も行われている。将来のものづくりにおいて極めて重要な技術であり、すでに欧米の大手企業がAMを活用したデジタルツインの開発を行っている。

レーザ加工は、自動車、造船産業などにおける厚鋼板の溶接・切断といったマクロ加工用途から、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス産業などにおける微細穴あけ、スクライビング、マーキング、リソグラフィといったマイクロ加工用途まで広範囲な領域で利用されている。レーザ加工の市場動向は、わが国の経済動向と密接に連動している。すなわちレーザ加工分野は、1990年度以降長期経済低迷により厳しい状況にあったが、1995年度頃からIT産業に支えられ、エキシマレーザリソグラフィの実用化もあり、急速に成長した。その後はわが国の経済状況に連動して多少の増減を繰り返すものの、これまで順調に成長を続けている。レーザ加工分野の市場において、もっとも大きなシェアを占めるのはエキシマレーザ加工であり、約50%を占める。一方、EUVリソグラフィの実用化も現実的となりつつある。EUVリソグラフィ用光源の駆動用レーザには、炭酸ガスレーザが採用される予定である。炭酸ガスレーザ加工は、10年近く前まではエキシマレーザに次いで2位の約1/4のシェアを誇っていた。しかし、小型・堅牢、高輝度、低環境負荷の特長を有するファイバーレーザが台頭してくるにつれ、炭酸ガスレーザによる加工は年々市場が小さくなり、ついに数年前にファイバーレーザ加工とシェアが逆転した。特に、溶接・接合分野やマーキング分野での炭酸ガスレーザからファイバーレーザへの置き換わりが著しい。 YAGやYVO_4に代表される固体レーザも、溶接・接合分野やマーキング分野でファイバーレーザへの置き換わりが進展しているが、半導体基板、自動車、スマートフォン、ディスプレイの部品・デバイス用途の微細切断・穴あけ分野では、固体レーザの需要は拡大している。またフェ

ムト秒レーザやピコ秒レーザといった超短パルスレーザ加工も実用化されつつある。半導体レーザ加工の市場規模はまだ小さいが、年々着実に市場を拡大している。特に高輝度半導体レーザの開発や青色半導体レーザの加工への応用は、今後の成長を後押しすることが期待される。

基礎研究においては、特にマイクロ・ナノ加工において精力的に研究が進められている。そのうちフェムト秒レーザを用いた研究が60%以上を占めている。フェムト秒レーザ加工の研究分野は、3次元加工・内部加工、精密微細加工、表面マイクロ・ナノ構造化、穴あけ、切断・ダイシング、スライシング、接合、ナノ材料創成など多岐にわたる。1980年代後半から1990年代に盛んに用いられたエキシマレーザは、今日では基礎研究にはほとんど用いられていない。紫外ナノ秒レーザ光による加工は、多くの場合Qスイッチ固体レーザの3次、4次高調波が用いられる。一方、近年リソグラフィ用に開発された高出力のエキシマレーザを、加工に応用しようといった動きもある。

現在、主なレーザ加工シミュレーションは2温度モデルを基本としてKeldysh理論や電磁場解析、プラズマ物理の知見を取り入れた確率方程式を用いることが多く、ドイツのフラウンホーファー研究所のQuCutなどが代表的な公開コードである。2温度モデルは格子温度を扱うため古典分子動力学計算（古典MD）と相性のよい理論モデルである。古典MDは格子の熱を基本とした運動の記述が主であり電子から格子への熱移行を記述する2温度モデルとは自然な形での融合が可能である。特に電子励起過程が線形過程である金属については多くの報告がなされている。また、電磁場ダイナミクスや流体力学などの視点から加工現象を取り扱う流れもある。電磁波の波としての振る舞いや流体力学を利用するため、一般的な確率方程式のみによるアプローチより計算コストはかかるが、近接場といった物質構造に由来する励起場所の解析や熱伝搬の正確な記述などの利点がある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• AMにおけるプロセスモニタリングとシミュレーション

海外では、AMにおけるプロセスモニタリングとシミュレーションによる品質保証技術が重要な研究開発課題であり、装置・計測機器・ソフトウェアメーカーと大学、国立研究所がプロジェクトを組んで実施されている。溶融凝固現象については、米国のNISTをはじめとする国立研究所が中心となり、高速度カメラやサーモビューワによるメルトプールのその場・オペランド計測、さらには超短パルスX線による表面や内部の構造変化の実時間計測を実施し、欠陥発生のメカニズムが明らかになってきたが、これらの結果に基づいた品質保証のためのフィードバック制御までにはいたっていない。わが国ではTRAFAMのプロジェクトにおいて、レーザおよび電子ビームを熱源としたパウダーベッド方式における溶融凝固現象やパウダーベッドの状況を詳細にモニタリングできるテストベンチを開発し、これらのデータにもとづくフィードバック制御技術の開発をめざしており、同様の研究開発が欧米でも検討されている。

シミュレーションに関しては、溶融凝固現象にとどまらず、組織、熱変形予測に関してマルチスケール、マルチフィジックスをベースとした開発が行われている。熱変形予測は重要であるが、現状では多くの材料に対するデータが不足しているとともに、これらの現象を体系化したソフトウェアは開発途上である。今後、AM向けシミュレーション技術の開発は、製品の品質安定化と併せて、将来のデジタルツイン実現のための大きな課題の1つである。

• CPS化による効率的加工技術の急速な進展

米国のGeneral Electric（GE）は、航空機産業にCPSの概念を取り入れた先駆者で、部品のデジタル設

計データをクラウド上に送信しそれをもとに細部にまで造形された構造物を作成するシステムを構築している。GE以外に、AM事業において多くの産業部品を手がけてきた米国のストラタシスも航空機部品のデジタル製造に乗り出している。ドイツのシーメンスは、AMとデジタルツインを連携したシステム構築を行っている。

• 4次元プリンティング

3次元プリンティングはレーザ加工の重要な応用分野の1つである。3次元プリンティングは3次元の構造体を構築するが、4次元プリンティングでは構築した3次元構造体を、熱、湿度、pHといった周囲の環境変化や、電流、光などの外部刺激により、時間とともに形状や機能を変化させることができる。4次元プリンティングが提唱されたのはごく最近であるが、研究開発が活発化している。4次元プリンティングは単一材料でも複数の材料の組み合わせでも実現できるが、複数の材料を用いそれぞれの造形箇所を3次元空間的に制御して物体を作製できれば、より多様で自由度の高い4次元動作が得られる。フェムト秒レーザを用いた2光子造形は多種類の材料を空間選択的に造形することが可能で、加工解像度がきわめて高い。それによりマイクロ・ナノスケールの異種物質からなる4次元プリンティングを実現でき、マイクロアクチュエータやマイクロロボット、さらには全く予想もつかないような応用が期待される。

• 複合加工技術

加工の形態は、付加加工（薄膜堆積、3Dプリンティングなど）、除去加工（エッチング、アブレーションなど）、無変形加工（改質、表面マイクロ・ナノ構造化など）の3つに分類される。それぞれの加工形態には異なった特徴があり、異なる加工形態を組み合わせることで、より複雑な構造を有する物体や、より高機能な物質の創成が期待される。金属のAMにおいては、他技術との複合化により、造形物の加工面の平坦化や構造のリペア、コーティングが行われている。2光子造形においては、より複雑で微細な3次元構造を実現するため、フェムト秒レーザナノアブレーションとの組み合わせが試みられている。フェムト秒レーザ3次元加工では、除去加工によって作製されたマイクロ流体デバイスに、無変形加工により光導波路を集積化、あるいは付加加工（2光子造形）によりポリマーマイクロ機能素子を集積化した高機能バイオチップの作製が試みられている。このように加工技術の複合化は、これまでの単一の技術では実現できなかった構造や機能を持つ物質を作製でき、今後ますます重要になる。

• マイクロ・ナノ表面階層構造の作製

直線偏光のパルスレーザ光を物質に照射すると、物質表面に周期構造（Laser-Induced Periodic Surface Structure：LIPSS）が形成されることはよく知られている。形成される構造の周期は、レーザ光照射条件（波長、パルス幅、フルエンスなど）、材料、照射雰囲気に依存するが、波長～波長の1/10程度である。このうち波長～波長の1/2程度のものは低空間周波数LIPSS、1/2波長～波長の1/10程度のものは高空間周波数LIPSSと呼ばれている。特に高空間周波数LIPSSは超短パルスレーザに特有の構造であり、2000年代前半にその形成が初めて報告された。LIPSSに関する研究は今日でも多くの研究者が携わっており、LIPSS形成のメカニズムと応用に2極化している。実用的な応用には大面積の処理が重要であるが、直描技術や多光束干渉技術を用いると、大面積処理が可能になるだけでなく、マイクロ・ナノ階層構造が構築され、材料表面を高機能化できる。さらに最近では、照射条件を調整することにより、LIPSS内にさらに周期の短い（50 nm以下、波長の数十分の1）超高空間周波数LIPSSや特異的な形状のナノ構造（人工擬似微細生物構造）も形成できることが報告されている。このようなマイクロ～ナノサイズの多様な構造から形成される階層構想は、これまでにない光学特性（着色、吸収、偏光依存性など）、濡れ性（超疎水性、超親水性）、抗菌、抗ウイルス、生体親和性などの機能を付与することが期待でき、この後さらに研究開発が活発化すると考えられる。

• ビーム整形加工技術

加工の高品質化、高効率化、高解像度化を実現するため、レーザビームを整形し加工を行うことが近年のトレンドとなっており、特に欧州では、国家的プロジェクトとして研究開発が進められている。ファイバーレーザによる金属加工で、材質や板厚に応じてレーザ光を空間的に最適なビーム形状に制御することで、加工速度の向上、厚板の高速安定加工、ドロスの低減、ベベルの低減、面粗度の向上が実現した。また、集光したスポットが長い距離伝搬するベッセルビームの利用は、高アスペクト比穴あけ加工やガラス・半導体基板切断用途においてトレンドになっている。以上は、空間的なビーム整形の例であるが、時間的なビーム整形（パルス整形）も、高品質化、高効率化、高解像度化に有用である。特に、超短パルスレーザのバーストモードは、加工の高品質・高効率化を実現し、広く研究開発が行われている。従来のバーストモードは、バースト内のイントラパルスの繰り返し周波数はMHz領域であったが、2016年にGHzバーストを用いたアブレーション冷却という概念が論文発表され、大きな話題となった。 GHzバーストアブレーションでは、加工領域外に熱が拡散する前にレーザエネルギーを全て物質に投与してアブレーションを完了することができ、ターゲット材料内部の平均温度を低下させる効果がある（アブレーション冷却）。この冷却効果により、最適条件では加工領域周辺部に発生する熱影響領域や損傷を回避することが可能となる。同時に、アブレーション閾値を下げる効果もあり、加工効率も改善される。この論文に触発され、現在GHzバーストモードアブレーション研究は活発化している。

• 電子－レーザ相互作用にもとづくレーザ加工シミュレーション

ここ10年ほどの間に、電子－レーザ相互作用の微視的記述にもとづいたレーザ加工シミュレーションが出現した。筑波大学が公開しているSALMONでは多電子ダイナミクスを記述できる時間依存密度汎関数法と電磁場ダイナミクスを記述するMaxwell方程式を融合したマルチスケール計算が可能であり、半導体誘電体表面および界面での電子励起過程を経験的パラメータ無しで計算することが可能である。2012年にSALMONの基本となる論文が出版されて以降、同手法を用いたレーザ加工シミュレーションが実施され、また同様のプログラムが幾つか提案されている。レーザ加工の初期過程解明や最適化に向けた強力なツールとなる可能性がある。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

国内におけるAMのプロジェクトでは、経済産業省からの受託によりTRAFAMが実施した「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発プログラム）」（2014～2018年度）、NEDO「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」（2017～2018年度）、ならびに内閣府SIP「革新的設計生産技術」（2014～2018年度）の24課題が終了した。TRAFAMのプロジェクトにおいては、電子ビームPBF方式2機種とレーザPBF方式1機種、ならびにレーザDED方式の2機種を開発し、すでに3機種は販売を開始した。またSIPでは、大阪大学接合科学研究所を中心に青色半導体レーザによるAM装置開発と純銅加工技術の開発が行われた。 TRAFAMでは、AM技術の企業への展開を図るため、NEDO「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（2019～2021年度）でモニタリング・フィードバック技術開発、ならびにデータベース構築を進めている。また、SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）で、マテリアルズインテグレーション（MI）技術を三次元積層造形へ展開するためのプロジェクトが物質・材料研究機構を中心に実施されており、Ni基合金やTiAl合金を対象として、プロセスの最適化、MIによる最適合金設計、組織予測や強度予測などを可能とする研究開発が進められている。

レーザ加工に関しては、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」（2016～2020年度）で、①深紫外・ピコ秒レーザによる加工技術の開発、②高出力パルスレーザによる新しい加工技術の開発、③次々世代加工光源技術の開発、④最適条件を導くレーザ加工プラットフォームの構築、⑤短波長レーザによる加工技術の開発、の5テーマに取り組んでいる。SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」（2018～2022年度）では、①CPS型レーザ加工機システム研究開発、②空間光制御技術開発、③フォトニック結晶レーザの開発が進む。Q-LEAP「次世代レーザー：光量子科学によるものづくりCPS化拠点（STELLA）」（2018～2027年度）は、前半の5年はAI-CPS型レーザ加工技術開発、後半の5年は学理解明をもとに、学理CPS型レーザ加工技術の開発をめざしている。これら3プロジェクトは共通する点も多く、COIプログラム「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」（2013～2021年度）やTACMIコンソーシアムも含めて連携を図ることで、Industrie 4.0やSociety 5.0による超スマート社会実現に向け、特にCPS型レーザ加工技術の実現に向けたシナジー効果が期待される。

米国では、America MakesのプロジェクトがAMの実用化を睨んだ研究開発に移行しているとともに、GE Additiveなど企業が中心となって実用化のための研究開発を実施している。

欧州では、Horizon 2020プロジェクト後のRoadmap 2030を作成し、AMへの取り組みが引き続き行われており、実用的なプロジェクトが数多く実施されているのが特徴である。レーザ加工に関しても、Horizon 2020で関連プログラムが提供されている。プロジェクトテーマは、超短パルスレーザ加工と応用、ビーム整形加工などであり、合計で年間約1億ユーロの資金が提供されている。2020年12月現在、次期フレームワークのHorizon Europeプログラムが議論されており、年間約1億ユーロがレーザ加工に配賦される予定であるが、実用的な応用とリンクしていることが要求される。さらに、欧州グリーンディールと完全なデジタル製造技術に対応する必要がある。ドイツでは、2012年にフォトニクスに関する国家プログラムが、年間予算約1億ユーロの10年プログラムとして更新された。このプログラムは「Photonikforschung」と呼ばれ、超短パルスレーザとそのマイクロ加工への応用、電気自動車製造応用の緑と青色高出力レーザ、積層造形用のプロセスチェーンなど、さまざまなホットトピックを支援している。最新の公募（Effilas-program）は、材料加工用の新しいレーザ光源を対象としており、全体で11のプロジェクトがあり、各プロジェクトの研究開発費は平均で300万ユーロである。

中国では、National Key R&D Program“Additive manufacturing and laser manufacturing”（総額18億中国元、2016～2021年）が行われている。本プロジェクトでは、マクロスケールのAM、およびマクロ、ミクロ、マイクロスケールのレーザ加工に関し、基礎研究、応用研究、装置開発を展開している。本プロジェクトのテーマには、超短パルスレーザ加工とそのメカニズム解明も含まれる。

（5）科学技術的課題

将来の“ものづくり”を見据えたうえで、デジタルツインは重要なテーマであり、デジタル・マニュファクチャリング技術であるAMとの連携は極めて重要であるが、それを実現するための基礎技術・データが不足している。なかでもモニタリング技術に関しては、粉末床や造形体におけるその場観察での欠陥検出技術、高精度・高速処理可能な画像処理技術、これに伴うフィードバック技術の開発、さらにはAIを利用した欠陥予測システムの開発などが重要な課題である。一方、シミュレーションに関しては、粉体レベルにおけるミクロ溶融凝固シミュレーション、組織予測シミュレーションおよび熱変形予測シミュレーションの開発を体系的に開発すること、およびシミュレーションに使用する材料物性値の取得が大きな課題である。

超短パルスレーザ加工では、現状ピコ秒レーザが用いられることが多いが、今後はさらにパルス幅の短い

フェムト秒レーザに移行していくと思われる。フェムト秒レーザ加工の産業応用には、発振器の高信頼性、高安定性、高出力化と、フォトンコストの低減とともに、加工効率や品質の向上を実現する光学系や加工ステージを含めたシステムの開発が必要である。

（6）その他の課題

AMのための設計技術者の育成とこの分野の研究・開発者が不足しており、人材育成が世界的に喫緊の課題となっている。とりわけ、金属AMにおいては、3D-CAD技術だけでなく、トポロジー最適化のような新しい設計技術、溶融・凝固現象を取り扱うのに要する材料学の知識や計測評価技術といった幅広い素養が必要となることから、実習を伴った教育が必須で、わが国独自の人材育成プログラムを開発することが必須である。

一方、レーザ加工分野でも若い人材の育成は急務である。もっとも大きな問題は、日本人学生が博士課程に進学しないことであり、多くの大学では、外国籍の博士課程の学生の割合が増えている。米国も同様の状況である。このような状況が続けば、本分野におけるわが国の科学技術力の低下は避けられない。これを打破するためには、日本人博士課程学生への経済的支援だけでなく、学位取得後安定したポジションに着任できるシステムの構築が求められる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	TRAFAMやNEDO、SIPプロジェクトなどにより、溶融凝固現象の解析やシミュレーション技術の開発など、学理解明にもとづいた積層造形・レーザ加工条件に関する基礎研究が実施され、成果が出始めている。また、SIPによりAMのためのCPSやMIに関するプロジェクトも開始された。フェムト秒レーザ加工において、世界トップレベルの研究成果があがっている。SIPやQ-LEAPによりCPS型レーザ加工の実現が期待される。
	応用研究・開発	○	↗	TRAFAMプロジェクトにおいて、指向性エネルギー堆積による装置2機種と電子ビーム粉末床溶融結合の1機種が開発され上市にいたっている。また、新たに2社のメーカーが指向性エネルギー堆積による装置2機種の販売を開始した。純銅などのレーザ加工に優位性を有する青色半導体レーザによる装置開発が行われた。レーザ加工分野は順調な成長を示している。
米国	基礎研究	○	→	ローレンスリバモア、NISTなどの各国立研究所が、大学や企業との連携によってテストベンチを利用した溶融凝固現象の解明、計測評価技術の開発、シミュレーション技術の開発などを実施している。持続的な推進によって、多くの成果が出てきており、活性度が高い。
	応用研究・開発	○	→	国立研究所・大学・企業による新たな製品開発プロジェクトを実施し、大きな成果が継続的に出ている。また、GE AdditiveやVelo 3Dが新たな装置開発を実施するなど、多くの応用研究・開発が積極的に進められている。結合剤噴射、材料押出によるAM装置開発もHPやDesktop Metal、Markforgedなどにより積極的に行われている。一方レーザ加工は、ドイツや中国に比べると大きな遅れをとっている。軍事や核エネルギー用途のレーザピーニングは数少ない成功例の1つ。

欧州	基礎研究	○	↗	AMについては、大学やフラウンホーファー研究所などの研究機関が着実、持続的に研究開発を行っているが、以前と比べて目新しい研究開発が少ない。一方、レーザと物質の相互作用に関する理論および実験による研究は活発化が予想される。3次元加工、表面ナノ構造化、ナノ材料創成、ビーム整形加工、薄膜形成など、多種多様な研究が展開されている。特にバーストモードの研究は欧州が中心。
	応用研究・開発	◎	↗	レーザ熱源のAM装置については、大型化・高速化のための装置開発や専用機械のための技術開発を着実に実施しており、金属AMの分野で世界をリード。また、ドイツで緑色レーザ利用の装置開発が行われるなど動きは活発である。 BMW、シーメンスなどを中心としてIndustrie 4.0の実現に向け、着実に研究開発を実施。レーザ加工でも、Horizon 2020やPhotonikforschungなどのプログラムによる支援のもと、超短パルスレーザ加工、ビーム整形加工、AMの実用化が進められている。
中国	基礎研究	◎	↗	AM、レーザ加工分野ともに巨額の投資が行われている。大学並びに大学発ベンチャーを中心に装置が導入されるとともに、非常に多くの特許・論文発表が行われている。超短パルスレーザ加工に関しても、大学における基礎研究が活発化している。一方、この分野への政府からの財政支援が大きくないのは、将来の発展において不安材料。
	応用研究・開発	◎	↗	粉末床溶融結合、指向性エネルギー堆積とも、AM装置開発が積極的に行われており、多くの企業が設立されている。 BLTは世界最大級の粉末床溶融結合装置開発を進めている。航空宇宙分野に加えて、大学に金型に特化した研究拠点も設置されている。また、AM用の粉末メーカーが非常に多い。中国産の安価な発振器や光学素子をもとに、レーザ加工産業も成長著しい。
韓国	基礎研究	△	↗	一部フレキシブルエレクトロニクスへの応用に関して良い成果がみられるものの、その他に顕著な研究成果はみられない。
	応用研究・開発	○	↗	Samsung、LG、Hyundaiなどを中心に、エレクトロニクス・オプトエレクトロニクスや自動車製造分野において、レーザ加工は不可欠な技術となっている。特に超短パルスレーザ加工の実用化には力を入れている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・バイオ材料（ナノテク・材料分野　2.2.1）
・ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野　2.6.3）
・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野　2.6.4）

参考・引用文献

1) 一般財団法人日本規格協会＆技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（原案作成）：JIS B 9441：2020　付加製造（AM）― 用語及び基本的概念, 日本規格協会, 2020.
2) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター：金属積層造形プロセス分野の技術戦略策定に向けて, 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight Vol.32, 2019.
3) R. Berger：Additive manufacturing：A game changer for the manufacturing industry?, 2013.
4) R. Berger：Focus Advancements in metal 3D printing：Beyond powder bed – Additive manufacturing on the brink of industrialization, 2018.
5) A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, A.F. Lasagni, “Micro-fabrication of high aspect ratio periodic structures on stainless steel by picosecond direct laser interference patterning”, *J. Mater. Process Technol*. 252,（2018）：313-321. doi：10.1016/j.jmatprotec.2017.09.039
6) D. Zhang, B. Ranjan, T. Tanaka, and K. Sugioka, “Carbonized Hybrid Micro/Nanostructured Metasurfaces Produced by Femtosecond Laser Ablation in Organic Solvents for Biomimetic Antireflective Surfaces”, *ACS Appl. Nano Mater*. 3, no. 2（2020）：1855-1871. doi：10.1021/acsanm.9b02520
7) Z. Yao, L. Jiang, X. Li, A. Wang, Z. Wang, M. Li, and Y. Lu, “Non-diffraction-length, tunable, Bessel-like beams generation by spatially shaping a femtosecond laser beam for high-aspect-ratio micro-hole drilling”, *Opt. Express* 26, no. 17（2018）：21960-21968. doi：10.1364/OE.26.021960
8) C. Kerse et al., “Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses”, *Nature* 537,（2016）：84-89. doi：10.1038/nature18619
9) Y. Hu et al., "4D Printing：Botanical - Inspired 4D Printing of Hydrogel at the Microscale" *Adv. Funct. Mater.* 30, no. 4（2020）：2070026. doi：10.1002/adfm.202070026
10) R. R. Gattass and E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials” *Nat. Photonics* 2（2008）：219-225. doi：10.1038/nphoton.2008.47
11) L.V. Keldysh, “Ionization in the field of a strong electromagnetic wave”, *Soviet Physics JETP* 20, no. 5（1965）：1307-1314.
12) I.S. Anisimov, L.B. Kapeliovich, and L.T. Perel’man, “Electron emission from metak surface exposed to ultrashort laser pulses”, *Soviet Physics JETP* 39, no. 2（1973）：375-377.
13) B. Rethfeld, “Unified Model for the Free-Electron Avalanche in Laser-Irradiated Dielectrics”, *Phys. Rev. Lett.* 92, no. 18（2004）：187401-1 – 187401-4. DOI：10.1103/PhysRevLett.92.187401
14) S. Ono, “Thermalization in simple metals：Role of electron-phonon and phonon-phonon scattering”, *Phys. Rev. B* 97, no. 5（2018）：054310. doi：10.1103/PhysRevB.97.054310
15) C. Wu and L.V. Zhigilei, “Microscopic mechanisms of laser spalla-tion and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations”, *Appl. Phys. A* 114, no.114（2014）：11-32. doi：10.1007/s00339-013-8086-4
16) M. Noda, S.A. Sato, Y. Hirokawa et al., “SALMON：Scalable Ab-initio Light-Matter simulator for Optics and Nanoscience”, *Comput. Phys. Commun*. 235（2019）：356-365. doi：10.1016/j.cpc.2018.09.018

2.6.3 ナノ・オペランド計測技術

（1）研究開発領域の定義

材料やデバイスに対する実使用下の時間分解計測、すなわち機能発現中に刻々と変化し続ける現象の実時間または経時観測によって、測定対象のナノスケール構造と機能との相関を見出すことを目的とした研究開発領域である。ラテン語で"working"や"operating"を意味する「オペランド/*operando*」は、広義には材料分野における「その場/*in situ*」の代替語として用いられるが、狭義では「時間変化」「動作環境」「その場」の3要素がそろう必要がある。しかし、実際には「その場」と「オペランド」の違いは曖昧であることが多い。最近では、「オペランド」という用語が初めて使われた触媒分野にとどまらず、生きた細胞や組織などの生体試料から、半導体や蓄電池などの実デバイスにまで測定対象は急速な広がりをみせ、学術界と産業界の両方において不可欠な研究手法となりつつある。

（2）キーワード

オペランド計測、「その場」（in situ）測定、走査型トンネル顕微鏡（STM）、原子間力顕微鏡（AFM）、透過型電子顕微鏡（TEM）、走査透過型電子顕微鏡（STEM）、分割型検出器、ピクセル検出器、「その場」専用試料ホルダ、MEMSチップ、環境セル、液中セル、電子エネルギー損失分光法（EELS）、放射光X線、X線吸収分光（XAS）、中性子線、回折法、小角散乱法、X線顕微鏡、コヒーレント回折イメージング（CDI）、タイコグラフィ、メカノオペランド分析、反射率法、ストロボスコピック計測法、超短パルスレーザ光、超高速電子顕微鏡（UEM）、コヒーレントラマン散乱、近接場光学顕微鏡

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

多くの材料研究では、ある特異な機能が見出されたとき、その発現にいたった原因が何かを究明するために材料の構造や電子状態を計測する。ところが、そのような計測は多くの場合、機能発現時と別環境の（いわゆるex situ）測定であるため、真の原因を決定できないことがままある。それを克服するために、雰囲気、温度、圧力等を制御して、実際の「動作環境」と似た状態に保って計測するのが、「その場」（いわゆるin situ）測定である。

「その場」測定の概念をより一歩進めたものが「オペランド」測定である。「オペランド」測定は材料をその機能が発現する実際の「動作環境」に置きながら、構造、電子状態、分光特性等の「時間変化」を観測する。元来、「オペランド」という用語は分光特性と機能との相関を調べる研究で用いられた経緯があるが、今日では回折法のような非分光的手法まで含め、「動作環境」での測定を広く指すときに用いられている。

実際の「動作環境」であるか否かとの意味で、「その場」と「オペランド」は包含関係にあっても、研究の意義的に上下関係にある概念ではない。すなわち、「オペランド」ができれば「その場」は必要ない、ということではない。例えば、反応より吸着の過程が律速であるような速い触媒反応を対象にすると、「オペランド」計測を行っても触媒周囲には何の変化も得られない。対象材料のある特性に対して意味のある（真の）計測を行う場合、必ずしも「オペランド」である必要はない。この例で言えば、反応物の濃度を変化させ吸着を制御するなど、条件に制約をかけた方が有効である。

ナノスケール計測の観点では、空間分解能の向上をめざす絶え間ない努力によって、究極の原子・分子計測が可能になりつつある。走査プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscope：SPM）は、尖鋭な突端

を有する探針を走査することにより形状や物性を原子スケールで測定でき、かつ単原子操作などの多様なナノ創製加工も実現できる手法である。走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope：STM）、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope：AFM）などが代表例である。また、電子顕微鏡についても、電磁レンズ系の球面収差や色収差を補正する技術が実用レベルに達するとともに、制御系の高度な安定性が実現したことに起因して、技術進展が大きい。特に、材料内部に存在する界面、粒界、点欠陥、表面などの欠陥構造を原子レベルで観察することが可能となり、世界中の学術・産業分野において広く利用されている。

量子ビームを用いた計測は、加速器、原子炉等の大型施設を用いる放射光X線や中性子線、並びに実験室レベルで使用可能なレーザ光が利用されている。放射光を含むX線や中性子線を用いたオペランド測定は、多くのビームラインで簡便に実施できるほど一般的になってきており、自動車に用いられている排ガス浄化触媒、二次電池をはじめとして、各種の金属、半導体、樹脂材料まで、ありとあらゆるものが対象となっている。オペランド計測において重要な量子ビームの特徴は、特定元素の電子・化学状態、結晶構造、表面～内部構造を非破壊で計測できる能力であり、これにより材料の3次元情報もオペランド計測で取得できる。一方、レーザを用いたオペランド計測では、物質中の電子や原子核の動きに伴う光学的性質の時間変化を分光計測することで、非破壊・非接触の条件で、高い時間分解能を実現できるところに特徴がある。さらに、他の計測法（放射光X線、中性子線、SPM、電子顕微鏡）よりもコンパクトな装置で計測可能な場合が多く、ユーザーに使い易さを提供できる可能性が高い。

［研究開発の動向］

• 走査プローブ顕微鏡（SPM）

材料研究にとって重要な環境場としては、量子マテリアル等の機能性評価のための複合極限場（極低温場・高磁場・極高真空場）、耐熱材料などの評価に必要な高温場、触媒材料の評価に必要なガス雰囲気・温度制御場、格子歪制御による物性制御に必要な応力歪場、電池材料の評価に必要な不活性ガス雰囲気場などがある。例えば、高温場やガス雰囲気場で稼働する原子分解能SPM、外部制御された応力場における原子分解能SPMなどの材料イノベーションに関連した環境場制御SPM計測技術の開発が進展している。

量子コンピュータ用デバイスや量子マテリアルの研究開発に関しては、複合極限場（極低温、高磁場、極高真空）における原子分解能オペランドSPMが研究開発のキーテクノロジーとなる。国内では、複合極限場における原子分解能STM/AFMの高度化と量子マテリアル研究への応用展開は、東京大学（物理学科、物性研）、理化学研究所（創発物性科学研究センター）、物質・材料研究機構（NIMS）等において継続的に進められている。海外では米国（NISTなど）、欧州（ドイツ、スイス）が伝統的に競争力を有している。韓国、中国も最先端ナノサイエンスとして重要視しており、特に中国（清華大学、中国科学技術大学など）は最先端の複合極限場SPMの整備・拡充に世界でもっとも注力している。

高温場AFMでは1000 K程度での原子ステップ分解能、応力歪場SPMでは原子分解能が達成されている。触媒応用に関連したガス雰囲気高圧場や高温場を制御しつつ反応生成物の計測も融合させた反応場オペランドSPMはReactorSTMやReactorAFMとも呼ばれる。このタイプのオペランドSPMは、オランダ・ライデン大学で精力的に開発されており、モデル触媒における原子分解能での触媒反応解析に応用されている。

環境エネルギー問題への関心の高まりとともに、エネルギー変換（太陽電池など）やエネルギー貯蔵（Liイオン電池など）のデバイスや材料がさかんに研究されている。デバイス性能の向上を図るには、素子動作下で物性の変化を直接的に計測・評価し、その動作原理を明らかにすることが重要である。ナノ構造を積極的に利用する次世代デバイス開発をめざし、さまざまな環境下（液中、光照射場、電圧印加場、不活性雰囲気

場、超高真空）でのナノ～原子スケールの局所物性の評価を可能にする非接触AFMの１つであるケルビンプローブフォース顕微鏡（Kelvin Probe Force Microscopy: KPFM）と、オペランド計測に必要な基盤技術（断面SPM、光照射場SPMなど）の開発が進展している。NIMSでは、全固体型Liイオン電池の内部界面を削り出し、不活性雰囲気中で充放電動作させながらKPFMでナノスケール計測することにより、電池反応ダイナミクスの可視化を実現している。

• 透過型電子顕微鏡（TEM）

透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope：TEM）を用いた観察・計測において、試料は真空かつ数mm以下の空間に置かれる。したがって、その場計測、あるいはオペランド計測を行うためには特殊なTEM用試料ホルダが必須となる。近年、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を用いたホルダが市販化され、ガス中、液中、電圧印加、加熱、冷却、磁場印加など特殊な環境下における観察が可能になり、世界的に行われるようになった。

応用分野の大きなトレンドとしては二次電池（特に、Liイオン電池）があげられる。使用するホルダのタイプで大きく３種類に分けられる。１つ目は「オープンセル」構造と呼ばれるホルダを使用し、ナノワイヤや粒子形状の電極材料にイオン液体やLiO_xなどの被膜を介してイオンを直接挿入した状態で、電極形状や結晶構造の変化をリアルタイム計測する研究である。電圧を印加できるホルダがあれば比較的容易に実験ができるため、多くの研究者によって同種の研究が行われており、日本では北陸先端科学技術大学院大学が実施している。しかし、電極材料の形状や反応時の環境が実際の蓄電池とは大きく異なるため、電池の性能向上に有効な成果を得ることは難しい。

２つ目は「液体セル」構造と呼ばれる、MEMS技術による特殊な液中電圧印加ホルダを用いた計測である。電極材料と液体の電解液を窒化シリコン膜でパッキングした特殊な小型チップをこのホルダにセットすることで、充放電反応を観察できる。この液中オペランド観察では、Liデンドライト成長の観測や、$LiFePO_4$正極材料へのLiイオン挿入反応のリアルタイム観察などが実現された。この手法は装置内で液体が漏れた時のリスク管理（保守、点検など）が必要であり、研究予算が潤沢ないくつかの大学や国立研究機関でのみ行われている。

３つ目は「固体電池セル」構造と呼ばれる、正極/固体電解質/負極を用いた全固体電池のフルセルを集束イオンビーム（Focused Ion Beam：FIB）で薄片化したものを、実際に充放電させながら観察を行う研究である。電池のフルセル（正極/固体電解質/負極）を電子顕微鏡内で動作させており「オペランド」と呼ぶにふさわしい計測技術といえる。日本のファインセラミックスセンター（Japan Fine Ceramics Center：JFCC）で初めて実現され、電池内部の電位分布の変化がとらえられた。これまでに、走査型透過電子顕微鏡（Scanning Transmission Electron Microscope：STEM）を用いた電子エネルギー損失分光（Electron Energy Loss Spectroscopy：EELS）計測でのLi分布観察などの成功例がある。

• 放射光Ｘ線

放射光Ｘ線での計測の基本は「回折・散乱」、「分光」の２つであるが、最近は回折イメージングや分光イメージングのように、イメージング（可視化）と組み合わせることが志向されている。実用の現場では「非一様」な材料が圧倒的に多く、非一様材料の理解（あるいは、その利用）において、機能の起源の可視化は圧倒的説得力を持った「特効薬」だからである。

ミクロからマクロへいたる複数のスケール階層の連関を解明することが非一様な材料の理解には必要であ

る。非一様な材料に対し、計測に求められる要件の1つは「マルチスケール」対応であり、計測手法としてもっとも汎用化が進んでいるのは全散乱である。全散乱プロファイルをフーリエ変換して導出される二体分布関数（Pair Distribution Function：PDF）をもとに、溶液から結晶にいたる幅広い対象をカバーし、固体では原子レベルから数10 nmまでの構造を一気に議論できる。大面積の2次元検出器と高エネルギーX線を利用した迅速なX線全散乱測定法が2000年代に米国で開発されて普及し、現在では多くの放射光施設でその場計測、オペランド計測に供されている。水素吸蔵合金の水素吸蔵放出過程における構造変化、燃料電池の充放電過程における電解質の局所構造変化、水熱合成反応における材料合成過程の観測、セメント材料やバルクメタリックガラスの負荷応力印加過程、溶媒中の金属結晶核生成過程の観察などに適用されている。ガス雰囲気下測定に関しては、フランスにある欧州シンクロトロン放射光施設（European Synchrotron Radiation Facility：ESRF）にて200気圧まで可能との報告がある。欧米ではPDFによる燃料電池の充放電過程における電解質の局所構造変化の観測の実施例が多い。米国のAdvanced Photon Source（APS）や英国のDiamond Light Sourceでは専用に開発されたオペランド測定用試料セルを複数個並べて、順に測定するシステムが導入されている。

コヒーレントX線回折イメージング（Coherent X-ray Diffraction Imaging：CDI）は、従来のX線用レンズの開口数の制限（分解能は100 nm程度）を解消する手法として注目され、開発が進められている。SPring-8をはじめとしてタイコグラフィ（Ptychography）とよばれる走査型計測の開発が進み、大面積高分解能（10 nm）、さらには分光要素を付加したタイコグラフィ-XAFSが達成されており、10 nmから数μm程度の非一様な構造を調べることが可能となった。材料が結晶であることに注目したBragg-CDI法は歪みや欠陥に感度を持ち、非一様なナノ～ミクロ結晶材料との相性が良いことから、APSを中心にその場/オペランド計測に対しての開発が進み、触媒反応やナノ粒子へのガス吸蔵プロセス、電場印加下の計測、バッテリーサイクル中カソードナノ粒子の転位ダイナミクス観測などで成果が出ている。

各種分光法の持つさまざまな「選択性」は、非一様な材料の計測において極めて重要となる特長である。X線吸収分光（X-ray Absorption Spectroscopy：XAS）は、吸収端近傍のXANES（X-ray Absorption Near Edge Structure）とより高いエネルギーのEXAFS（Extended X-ray Absorption Fine Structure）を測定することで元素選択的に電子状態と原子配置の両方の情報を得ることができ、特に高い透過能を持つ硬X線は窓材を通しての測定が容易であるため、その場/オペランド計測との相性が良い。近年のX線吸収分光は、高空間分解能、高時間分解能を志向した技術開発がさかんであり、それを利用した計測が行われている。また、X線を吸収した元素から放出される蛍光X線を高エネルギー分解能で検出するX線吸収分光HERFD-XAS（High Energy Resolution Fluorescence Detected XAS）も世界各地の放射光施設で行われており、燃料電池電極触媒のオペランド計測などでの利用が進んでいる。

• 中性子線

中性子線の特徴は、物質との相互作用が弱く物質透過性が高いこと、LiやHなどの軽元素測定に有利なこと、同位体を見分けること、磁気構造を測定できること、物質構造を測定できること、物質の動き（運動）を見やすいことなどがあげられる。一方、放射光X線と比べた場合にはそのビーム強度は弱く、ハイスループットやオペランド測定には不利であるが、オペランド測定で重要となる試料ホルダの窓材の確保が容易であり、中性子の特徴を活かしたオペランド計測が行われている。

オペランド計測では、広角中性子回折法（Wide-angle Neutron Diffraction：WAND）、小角中性子散乱法（Small Angle Neutron Scattering：SANS）、中性子反射率（Neutron Reflectivity：NR）測定

法が主に用いられ、結晶構造の解析、金属部材の残留応力の測定やバルク材料中のナノ析出物の同定が可能である。日本、世界問わず活発な研究分野の１つは二次電池電極の実電池計測である。中性子の特徴を活かし、充放電状態にある Liイオン実電池や車載用電池の内部を非破壊的に解析し、電極活物質における不均一性の時間変化から電池仕様の改良や電池制御システムの開発に役立てられようとしている。最近では、電極界面のSEI（Solid Electrolyte Interphase）被膜の生成過程のオペランド測定がNR法を用いて行われている。引張りや圧縮を含む機械的操作の下で現象のダイナミクスを追うオペランド計測は「メカノオペランド分析」と呼ばれるが、鉄鋼材料の実際の成型加工過程に近い条件での圧縮、延伸過程における構造変化・相変態のオペランド測定が行われ、材料開発に利用されている。その他、中性子の特性を活かした高分子の紡糸過程や湿度環境を模擬したオペランド測定も行われている。

中性子イメージング技術のオペランド計測への応用は最近急速な発展を遂げている。これまでは定常中性子源を利用した医療診断やヒートパイプ内の熱流体移送現象、水素貯蔵合金における水素可視化の研究などや、オペランド測定としてはデモンストレーションの域を出ないが、稼働エンジンの内部構造の可視化や燃料電池の水分布の変化の測定などが行われてきた。2015年にJ-PARC 物質・生命科学実験施設（Materials and Life Science Experimental Facility：MLF）のエネルギー分析型中性子イメージング装置RADENが立ち上がり、パルス特性を利用したオペランド計測が本格的に始まった。中性子による回折とイメージングの原理を組み合わせたブラッグエッジイメージングが新しい解析手法として期待される。これにより、電池充電量の空間分布から劣化度の測定が可能となり、自動車メーカーを中心に産業界から注目が集まっている。さらに特筆すべきはパルス中性子と外場環境（外部刺激）とを同期させるストロボスコピック測定法の実現であり、この手法と中性子偏極解析を用いて稼働モータやトランスの漏れ磁場の可視化を実現した。その他にも印加電圧に対する圧電素子の構造変化、焦電材料の温度・電場変化、トポロジカルな磁気渦である磁気スキルミオン形成過程のオペランド測定がなされている。

中性子非弾性散乱や準弾性散乱は分子や原子のピコ秒からナノ秒の運動を測定する強力な手段であるが、ビーム強度の弱さのためオペランド測定にはなかなか手が届かなかった。しかし、J-PARC MLFの1 MW試験運転においてポテトスターチ凝固に伴う分子運動の遅化のオペランド測定に成功しており、J-PARCの出力増大に期待が持たれている。

日本の加速器中性子源であるJ-PARC MLFは、世界最高クラスの大強度パルス中性子源である（計画出力1 MWの試験運転に2020年6月に成功）。一方、J-PARCのような大型施設だけでなく、使い勝手がよく、産業界からも注目を集める小型中性子源の開発が急速に進みつつあり、米国インディアナ大学のLENS（Low Energy Neutron Source）や北海道大学のHUNS（Hokkaido University Neutron Source）、理化学研究所の RANS（RIKEN Accelerator Neutron Source）などのラボ中性子源が近年脚光を浴びている。

・レーザ

超短パルス光を用いた計測は、超短パルス光の持続時間であるフェムト秒の時間分解能で、物質中の電子や原子核の動きに伴う光学的性質の時間変化を分光計測するものである。したがって、オペランド計測に必要な「フェムト秒時間分解能」を原理的に有する計測法である。

電子顕微鏡の有する優れた空間分解能に、ピコ秒からフェムト秒の時間分解能を組み合わせる手法として、超高速電子顕微鏡（Ultrafast Electron Microscope：UEM）の開発が進んでいる。この超高速電子顕微鏡では、顕微観察の電子放出源としてフェムト秒パルスをカソード電極に照射した際に放出される光電子を用いている。実空間イメージングやブラッグ回折によって単一の孤立したナノ構造のダイナミクスを観察すること

が可能となった。最近の進展としては、このUEMにEELSを組み合わせた手法があげられる。ナノメートルの空間分解能、フェムト秒の時間分解能、さらにはmeVのスペクトル分解能を同時に実現し、固体の電子的・磁気的な動的特性の評価が可能となった。具体的には、グラファイトを光照射で励起したときの炭素間結合のダイナミクスを観察した報告例がある。この他、生成方法が進歩してきたアト秒光パルスをゲートとすることで、30 fs幅の電子パルスが生成された。オペランド計測という観点からは、このUEMを用いて触媒内の局所的な活性部位における原子配置の動的変化を測定する研究例がある。

オペランド計測に必須な条件である非破壊・非接触の計測法のうち、空間分解能は光回折限界（数μm）で制限されるが、コヒーレントラマン散乱による振動分光も極めて有用な手法である。特に燃焼状態のオペランド計測は、実用上の価値が極めて高い。近年は、コヒーレントラマン顕微鏡を生体関連分子の画像化に利用する例が増えてきた。コヒーレントラマン顕微鏡は、その高い化学的選択性、感度、イメージング速度により、細胞イメージングのための強力なプラットフォームであり、細胞内構造の同定、代謝の観察などに広く利用されてきた。生命科学分野で標準的な蛍光顕微鏡に対して、蛍光タグをつけてしまうと生理活性が変わってしまうような低分子量の生体関連分子を生体内で観察するにあたっては、蛍光タグの付加を必要としないラベルフリーのイメージング技術が求められる。非破壊・非接触・無標識というコヒーレントラマン顕微鏡の特長は、この要請に応えるものの1つといえる。微生物学、神経生理学、腫瘍生物学、システム生物学など広範な分野での活用例が報告されている。

超短パルス光計測の時間分解能を最大限に生かしつつ、光の回折限界を下回る空間分解能を実現する別の方法として、近接場光学顕微鏡がある。金属カンチレバーに超短パルスを照射し、プローブの先端に生じる近接場によって試料の局所的な光学特性を測定できる。近年では、フェムト秒パルスレーザとSTMを組み合わせた光STM技術が進展した。 STMの走査プローブ先端にテラヘルツ周波数領域のパルスを結合させたテラヘルツSTMではサブピコ秒（<500 fs）の時間分解能とナノメートル（2 nm）の原子分解能を同時に実現している。単一InAsナノドットへの超高速キャリア捕獲を直接画像化した報告例がある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• TEMの高速化・低侵襲化技術の進展

透過電子顕微鏡の電子源は放射光などと比べて輝度が圧倒的に低いため、高速化すると画像に使用される電子の量が少なくなり、暗すぎて像が観察できなくなる。これを解決する手段の1つとして、機械学習による画像解析があげられる。ここ数年、その適用例が米国や日本の顕微鏡学会において増えている。特に圧縮センシングと呼ばれる手法は、少ない画像情報から真と思われる画像に復元する機械学習アルゴリズムの1つであり、2000年代後半から医用画像への応用などさまざまな分野に拡がった。2014年に米国Pacific Northwest国立研究所が、STEMによる原子構造像に圧縮センシングを適用し、通常の10 %程度の電子線照射でも画像を回復できる可能性を示した。その後、各国で機械学習を活用した高速化・低侵襲化技術の開発が進んでいる。

• 次世代放射光施設の建設

2023年の運用開始をめざし、次世代放射光施設の建設が東北大学キャンパス内で進んでいる。軟X線、テンダーX線領域でSPring-8の最大100倍となるといわれているコヒーレンスによる可視化技術の産学の活用を中心課題の1つとしている。コヒーレントイメージングに特化したビームラインや、オペランド計測を可能とするビームラインの建設を予定しており、スペクトロ・タイコグラフィを開発した研究者たちが中心となって

ビームライン整備が行われている。これらのビームラインに参画を予定している企業からの期待は大きく、これまで放射光を利用した経験のない企業、学術経験者が、SPring-8での試験研究に取り組み始めている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

現在、日本でナノ・オペランド計測に特化した大型プロジェクトは見当たらないが、JST未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」領域（2018年度～）、未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「界面マルチスケール4次元解析による革新的接着技術の構築」（2018年度～最大10年間）、ERATO「百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト」（2015～2020年度、特別重点期間2020年度）、CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」（2019～2025年度）、科学研究費補助金 新学術領域研究「ハイパーマテリアル：補空間が創る新物質科学」（2019～2023年度）、「ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・反応プロセスの創成」（2018～2022年度）、「ミルフィーユ構造の材料科学−新強化原理に基づく次世代構造材料の創製」（2018～2022年度）、「蓄電固体界面科学」（2019～2023年度）、特別推進研究「原子・イオンダイナミックスの超高分解能直接観察に基づく新材料創成」（2017～2021年度）の一部課題として、STEM、放射光、X線、中性子線などによるイメージング技術関連の研究を含んでいる。また、放射光X線のオペランド観測については、NEDO「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」（2016～2020年度）、文部科学省が実施している「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」（2012～2021年度）も深く関わっている。計測技術を対象としたプロジェクトとしては、ナノテクノロジープラットフォーム事業（2012～2021年度）、JST CREST/さきがけ「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」（2016～2022年度）などが進んでいる。

国内の各研究拠点でも、オペランド計測を志向した動きが続く。NIMS 先端材料解析研究拠点では、第4期中長期計画プロジェクト（2016～2022年度）の主要テーマの1つとして「表面敏感オペランドナノ計測法の開発と先進材料応用」を取り上げた。金沢大学は、文部科学省世界トップレベル研究拠点（WPI）プログラムの支援を受け、2017年にナノ生命科学研究所（NanoLSI）を設立した。産総研と東京大学は共同で、産総研・東大 先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ（オペランド計測OIL）を2017年に設立した。

諸外国でも、オペランド計測に注力するプロジェクトへの大規模な政府投資はみられない。米国ではDOEによる研究費としては2015年から「オペランドSPM：可変圧力＆温度」のタイトルがみられる。オペランドSPMのキーワードを含む論文出版数は米国がもっとも多く、エネルギー分野のオペランド分光的研究も活発である。次世代エネルギーデバイスに関する応用指向的なタイトルの下でオペランドSPMの研究開発が進展しているものと思われる。

欧州ではHorizon 2020のエネルギー関連プロジェクトのなかでオペランドSPMの研究開発もサポートされている。また、欧州プロジェクト「Nanoscience Foundries and Fine Analysis（NFFA）」は、ナノテクノロジー研究環境の統合とオープンアクセス化を志向したものである。英国EPSRCによる「Enabling next generation lithium batteries」プロジェクトも注目に値する。欧州と中東の加速器ベース施設へのアクセスと利用サポートのプログラムCALIPSOplusが用意されている。

（5）科学技術的課題

オペランドSPM計測を実現するためには、従来のSPM表面機能計測とは全く異なる以下の新規要素技術の開発が必要となる。これらの基盤要素技術開発には新たなイノベーションが必要である。さらにグローバ

ルな普及を加速するために、キーオプション技術として商用化を見据えた応用展開が望ましい。具体的には、オペランドSPM計測のための①断面試料調製技術、②環境場創製技術、③ビッグデータ解析技術、などが対象となる。

透過型電子顕微鏡では、オペランド計測の更なる高速化、低侵襲化、高感度化が要求されるが、それを阻む課題は、電子源の輝度不足による量子ノイズの問題である。電界放出型電子銃が一般の透過電子顕微鏡に搭載されて約40年経つが、電子銃の輝度の大幅な性能向上は見られない。一方、カメラや分析機器の検出感度は、電子直接検出型の検出器が出現してから大幅に向上した。しかし現状は、量子ノイズの問題のため、露光時間1/1500秒の画像は像にならない。この問題を解決するには、高度な画像解析技術と電子顕微鏡計測技術の融合が必要となる。

放射光X線による計測では、コロナ禍の状況も見据え、自動化（計測と解析双方）が1つの課題と思われる。解析に関しては高次元データが取得できるようになってきた現在、説得力を持った可視化が課題である。海外の放射光施設もコヒーレンスの向上を図るため、加速器のアップグレード計画を進めている。放射光のナノ・オペランド計測が、今後数年のうちにナノ・イメージング・オペランド計測に大きく変貌を遂げるものと予見させる。 DX化を単なるリモート計測化ではなく、リアルタイムでのナノ・イメージ・オペランド計測の実現をめざす必要がある。

現状の中性子線の強度は、オペランド測定にとっては十分ではない。大きな原子炉の建設や新たな巨大加速器の建設は社会情勢を考えるとあまり現実的ではなく、オペランド測定をより汎用化するためには、入射ビーム集光技術や散乱ビームの集光技術、さらに検出技術の開発が重要になる。今後汎用化が一層進む小型中性子源を利用したオペランド測定についても、これらの技術開発は必要不可欠である。

（6）その他の課題

欧州、米国、中国、韓国などは、活発に国際的な共同研究を推進しており、実際に成果をあげている。欧米では国際共同研究の実施における法的な障壁が低いことも要因であると思われる。一方、日本では、輸出貿易管理規則による該非判定プロセスが大学、国研において厳格かつ非効率に運用されている場合が見受けられ、試料、データ、治具などの持ち込みや共有が不可欠な国際的な共同研究の実施において律速となっている。国際的な協働促進を阻害する要因とならないよう、本来の輸出貿易管理の主旨から逸脱する運用がないか、注視する必要がある。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	オペランド・ナノSPM計測技術の研究開発では世界を先導してきた実績があり、NIMS、理化学研究所、東京大学、金沢大学、京都大学などで世界トップ水準の成果を創出。SPring-8、PFなど8つの放射光施設でオペランド計測の研究開発が進展。日本発の計測原理（Inami効果）、計測技術（3D-HXSP法、局所磁性探査）、解析技術（スパース位相回復法）などのオペランド計測への応用展開に期待。パルス中性子を用いたストロボスコピック計測法の開発とその応用技術開発で世界に先んじている。小型中性子源や測定技術開発も進展。蓄電池関連の国家プロジェクトには、電子顕微鏡や放射光、中性子など高度計測を担う研究チームが組織されており、その連携も活発。

	応用研究・開発	◎	→	日本国内の企業からもオペランド計測のニーズは高まっているが、対応できる大学や研究機関が少ない。環境エネルギー分野での新規材料・デバイス開発に資する応用研究、特に太陽電池や全固体電池の内部を可視化するオペランドSPM計測の応用展開が進展。放射光X線の計測は、伝統的に産業界の寄与が大きく、計測効率化等において企業の参画が見られる。中性子研究でも、蓄電池におけるLiの動き、電極界面での構造形成の測定などが順調に進む。
米国	基礎研究	◎	↗	DOEから多くの研究資金が国立研究機関や大学に配分され、オペランド計測のための装置や人材が揃う。米国はエネルギー材料デバイス応用を指向した様々な新規SPM計測、多次元SPM計測手法の開発で世界を先導。放射光X線の研究でも米国発の技術は多数あり、質の高い研究成果を継続的に創出。中性子線の研究でもNCNRやORNLにおけるオペランド測定（特に蓄電池、燃料電池関係）が進む。
	応用研究・開発	◎	↗	オペランド/その場計測用試料ホルダの開発を行うベンチャー企業や電子顕微鏡関連メーカーが連携しており、高度な研究開発が進む。国研、大学などにおいて、Liイオン電池、太陽電池などのエネルギーデバイス分野のオペランドSPMによる応用研究が活発に進展。各放射光施設で産業利用プログラムが準備されている。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 放射光施設ESRF、Diamond、SLSなどで精力的に研究が進められる。ILL は世界最高強度の中性子ビームラインと試料環境を持ち、X線との完全同時小角散乱測定を実現するなど、オペランド測定でも世界を主導。 【ドイツ】 電子顕微鏡ハードウェアに強く高性能な電子顕微鏡の開発が進む。ハンブルグ大学が、量子応用のためのオペランド複合極限場SPM（STM/AFM）の開発で先導。 【オランダ】 高温・高圧ガス雰囲気環境でのオペランドSPMの基礎研究と装置開発がライデン大学で進展。 【デンマーク】 高温・高圧ガス雰囲気環境でのオペランドSPMの基礎研究と装置開発がデンマーク工科大学（DTU）で進展。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 エネルギー関連材料への展開ではドイツが最もさかんで、英国、オランダ、フランス、ベルギー、スイス、スペインなどの欧州各国において、次世代太陽電池とLiイオン電池などの次世代二次電池のオペランドSPM（特にKPFM）を用いた応用研究が進む。 ILLに加えて、PSI-SINQにおけるイメージング技術は順調に発展。 【ドイツ】 CEOS社が収差補正器を世界で初めて市販化するなど、ハードウェアの研究開発が活発。電池関連の企業と研究機関が連携して研究開発が進む。
中国	基礎研究	○	↗	オペランドSPM計測技術としては、界面超伝導やナノフォトニクスなどの量子効果応用を指向した複合極限場SPMの開発と基礎研究で、清華大学、中国科学技術大学などが先導。最先端の電子顕微鏡装置が多くの大学や研究機関に設置。また日欧米で技術を培った人材を早くから教授として招聘。放射光施設ではSSRFを中心に研究が進んでおり、エネルギー、高分子分野で成果がみられる。中性子施設CAS-CSNS が2018年に実運転を開始。
	応用研究・開発	△	↗	エネルギーナノデバイス分野でのオペランドSPMの応用研究が進展、論文等の出版数も米国に次いで多い。電気自動車の大幅な普及に向けて、電池の研究開発が活発化。

韓国	基礎研究	△	→	ナノサイエンス量子応用を志向した極限場SPMの基礎研究ではソウル大学やナノ量子サイエンスセンターで進展。エネルギー分野のオペランドSPMの研究は活発ではない。PLSにオペランドのプラットフォームとなるビームラインの整備が進む。
	応用研究・開発	△	→	電池の研究で、韓国企業が欧米の大学に資金を提供して共同研究を行っている例がある程度で、目立った成果はない。
オーストラリア	基礎研究	○	↗	中性子線の研究では、ANSTOのACNS原子炉中性子源（OPAR）は年間約300日という余裕ある稼働日数をベースに適切な施設運営により、産業界を含め外部ユーザーに使いやすい施設になっている。
	応用研究・開発	○	↗	中性子線の研究では、産業利用に非常に力をいれ、オペランド測定も始まりつつある。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- バイオイメージング（ナノテク・材料分野　2.2.4）
- 構造解析（ライフ・臨床医学分野　2.5.1）
- 光学イメージング（ライフ・臨床医学分野　2.5.2）
- トランススケールイメージング（ライフ・臨床医学分野　2.5.3）

参考・引用文献

1）C.T. Herbschleb et al., “The ReactorSTM：Atomically resolved scanning tunneling microscopy under highpressure, high-temperature catalytic reaction con-ditions”, *Rev. Sci. Instrum*. 85（2014）：083703. doi：10.1063/1.4891811

2）S.B. Roobol et al., “The ReactorAFM：Non-contact atomic force microscope operating under high-pressure and high-temperature catalytic conditions”, *Rev. Sci. Instrum.* 86（2015）：033706. doi：10.1063/1.4916194

3）J. Frenken and I. Groot（ed）, “Operando Research in Heterogeneous Catalysis”, Springer Series in Chemical Physics Book 114, Springer（2017）. doi：10.1007/978-3-319-44439-0

4）J. Schwenk et al., “Achieving μeV tunneling resolution in an in-operando scanning tunneling microscopy, atomic force microscopy, and magnetotransport system for quantum materials research”, *Rev. Sci. Instrum*. 91（2020）：071101. doi：10.1063/5.0005320

5）A. Palacio-Morales et al., “Atomic-scale interface engineering of Majorana edge modes in a 2D magnet-superconductor hybrid system”, *Sci. Adv*. 5（2019）：eaav6600. doi：10.1126/

sciadv.aav6600
6）J.-F. Ge et al., “Superconductivity above 100 K in Single-Layer FeSe Films on Doped $SrTiO_3$”, *Nat. Mater*. 14,（2015）：285. doi：10.1038/nmat4153
7）Y. Zhang et al., “Sub-nanometre control of the coherent interaction between a single molecule and a plasmonic nanocavity”, *Nat. Commun*. 8（2017）：15225. doi：10.1038/ncomms15225
8）W. Yu, H. J. Fu, T. Mueller, B.S. Brunschwig, and N.S. Lewis, “Atomic force microscopy：Emerging illuminated and operando techniques for solar fuel research”, *J. Chem. Phys*. 153（2020）：020902. doi：10.1063/5.0009858
9）J. Y. Huang et al. "In situ observation of the electrochemical lithiation of a single SnO_2 nanowire electrode", *Science* 330（2010）：1515-1520. doi：10.1126/science.1195628
10）M. Gu et al., "Demostration of an electrochemical liquid cell for operando transmission electron microscopy observation of the lithiation/delithiation behavior of Si nanowire battery an-odes", *Nano Lett.* 13, no. 12（2013）：6106-6112. doi：10.1021/nl403402q
11）K. Yamamoto et al., "Dynamic visualization of the electric potential in an all-solid-state rechargeable lithium battery", *Angew. Chem. Int. Ed*. 49（2010）：4414-4417. doi：10.1002/anie.200907319
12）Z. Wang et al., "In situ STEM-EELS observation of nanoscale interfacial phenomena in all-solid-state batteries", *Nano Lett*. 16（2016）：3760-3767. doi：10.1021/acs.nanolett.6b01119
13）K. Sakaki, H. Kim, A. Machida, T. Watanuki, Y. Katayama, and Y. Nakamura, “Development of an in-situ synchrotron X-ray total scattering setup under pressurized hydrogen gas”, *J. Appl. Cryst*. 51（2018）：796–801. doi：https://doi.org/10.1107/S1600576718005101
14）K. W. Chapman, “Emerging operando and x-ray pair distribution function methods for energy materials development”. *MRS Bull*. 41（2016）：231. doi：https://doi.org/10.1557/mrs.2016.26
15）S. Tominaka, H. Yamada, S. Hiroi, S. I. Kawaguchi, and K. Ohara, “Lepidocrocite-Type Titanate Formation from Isostructural Prestructures under Hydrothermal Reactions：Observation by Synchrotron X-ray Total Scattering Analyses”, *ACS Omega*, 3（2018）：8874 – 8881. doi：10.1021/acsomega.8b01693
16）G.B.M. Vaughan et al., “ID15A at the ESRF – a beamline for high speed *operando* X-ray diffraction, diffraction tomography and total scattering”, *J. Synchrotron Radiat*. 27（2020）：515–528 . doi：https://doi.org/10.1107/S1600577519016813
17）S.A. Aseyev, E.A. Ryabov, B.N. Mironov, and A.A. Ischenko, "The Development of Ultrafast Electron Microscopy", *Crystals* 10, no. 6（2020）：452. doi：10.3390/cryst10060452
18）E. Pomarico et al., "meV Resolution in Laser-Assisted Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy" *ACS Photonics* 5, no. 3（2018）：759–764. doi：10.1021/acsphotonics.7b01393
19）D. Polli, V. Kumar, C.M. Valensise, M. Marangoni, and G. Cerullo, "Broadband Coherent Raman Scattering Microscopy" *Laser Photonics Rev*. 12,（2018）：1800020. doi：10.1002/

lpor.201800020
20）A.A. Fung and L. Shi, "Mammalian cell and tissue imaging using Raman and coherent Raman microscopy", *Wiley Interdiscip Rev. Syst. Biol. Med*.（2020）：e1501. doi：10.1002/wsbm.1501
21）A. Stevens et al., "The potential for Bayesian compressive sensing to significantly reduce electron dose in high-resolution STEM images", *Microscopy* 63（2013）：41-51. doi：10.1093/jmicro/dft042

2.6.4 物質・材料シミュレーション

（1）研究開発領域の定義

量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立をめざす研究開発領域である。原子・電子レベルの現象の解明に加えて、それらがミクロな組織や物性に与える影響、メゾスコピックレベルの非線形現象とマクロな特性・機能との関係性など、マルチスケールの階層構造を明らかにすることで諸現象の制御方法を見出し、新材料の設計指針を提供する。また、実験的手段による解析が困難な極限環境下の現象予測などにおいても、非経験的で予言能力の高いシミュレーション技術が大きな役割を果たす。近年、マテリアルズ・インフォマティクスによる材料探索の高効率化や、量子コンピュータを利用する量子化学計算アルゴリズムの開発が新たな潮流を形成しつつある。

（2）キーワード

計算物質探索・材料設計（コンピューテーショナルマテリアルデザイン：CMD）、第一原理電子状態計算、量子化学、分子シミュレーション、（第一原理）分子動力学法、（量子）モンテカルロ法、フェーズフィールド法、粒子法、マルチスケールシミュレーション、マテリアルズ・インフォマティクス、ケム・インフォマティクス、データ同化、量子コンピュータ

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

物質の性質の大部分はその電子状態で決まるため、原子配列の自由度に加えて電子状態における電荷自由度、スピン自由度、軌道自由度の4つの自由度を自在に操る方法を明らかにすることが、新規機能性物質の開発で重要となる。また“材料組織”の制御も重要である。これは顕微鏡で観察されるメゾスケール（数十nm～数百μm）の不均一パターンであり、その形態やサイズがマクロスケールの材料の機械的・熱的・電気的・磁気的特性、そして各種機能の発現に影響を及ぼす。したがって、メゾスコピック現象をいかに正しく理解し制御するかが、多くの材料開発・設計において重要となる。

物質・材料シミュレーション分野は、近年の計算機の大幅な性能向上と、計算プログラムの高度化により、10年前と比較して格段の進歩を遂げた。今や実験結果の解釈ばかりでなく、実験の計画段階におけるスクリーニングや物性予測にも用いられる。実験研究者が自身で計算機を用いてモデリングを行う事例も増えており、計算物質科学の専門家と実験研究者の距離が縮まっている。したがって、これからの物質・材料シミュレーションには、実験で扱う系により近い大規模なシミュレーション技術の開発、実験的に解明が困難なナノ、メゾ、マクロの異なるスケールが複雑に絡み合った現象の解明、化学反応や物理現象、材料組織が絡み合ったマルチフィジックス現象の解明や予測などが求められる。また、近年著しい発展を遂げている機械学習をはじめ、データ科学の手法と物質・材料シミュレーションの連携による、材料探索や反応経路探索の高効率化、帰納的・経験的推論の効率化が新潮流となってきている。

グローバルな研究開発競争が激化するなか、ナノテクノロジー・材料分野で日本がこれまで同様に先導的な役割を果たせるか、予断を許さない状況にある。このような背景から、計算物質科学やデータ科学を駆使したハイスループットな材料開発に大きな期待が寄せられている。2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の拡大は研究開発のデジタルトランスフォーメーション（DX）に拍車をかけており、本研究領域の役割はますます大きくなっていくものと考えられる。

［研究開発の動向］

計算物質科学ではさまざまなプログラムが開発され、それらを用いた応用計算が数多く行われている。東京大学物性研究所は、物質科学シミュレーションのポータルサイトMateriAppsを運営しており、目的にあったソフトウェアを簡単に検索できる環境が整備されている。 MateriApps には2020年8月現在、273件のアプリケーションソフトウェアが登録されている。以下では個々の分野において広く使われるプログラム、および特に顕著な進展を示す。なお、人名、所属が明記してあるものは、日本の研究者によるものである。

• 分子系電子状態計算分野

海外製の有償ソフトウェアGaussianがもっとも広く使われている。他の有償ソフトウェアとしてSpartan、Jaguar、Q-Chem、molpro、molcas、AcesIII、TURBOMOLE、ADFなどがある。無償のソフトウェアには Gamess、NWChem、Orca、Columbus、Firefly、BAGLE、NTChem（中嶋：理化学研究所）、SMASH（石村：クロスアビリティ）、GELLAN（天能：神戸大学）、ABINIT-MP（望月：立教大学）、PAICS（石川：鹿児島大学）などがある。新しい手法の開発も進んでおり、SAC-CI法（中辻：量子化学研究協会）、Devide&Conquer（DC）法、およびDC法と密度汎関数強結合近似（DFTB）を融合した大規模半経験的分子動力学計算手法（中井：早稲田大学）、Fragment Molecular Orbital（FMO）法（北浦：理化学研究所、望月：立教大学、石川：鹿児島大学）、Matrix Product State（MPS）波動関数法を用いた密度行列繰り込み群（DMRG）法（柳井：名古屋大学、倉重：京都大学）など、当該分野の発展に日本が大きく貢献している。

• 固体系量子状態計算分野

海外製の有償ソフトウェアVASPがもっとも普及している。他の有償ソフトウェアとしてWein2K、Sienta、Castep、Crystal14なども広く用いられる。無償のプログラムとして、Quantum Espresso、CPMD、CP2K、exciting、xTAPP（山内：慶應義塾大学、吉本：東京大学）、RSDFT（岩田：Advance Soft）、RSPACE（小野：神戸大学）、State（森川：大阪大学）、QMAS（石橋：産業技術総合研究所）、Conquest（宮崎：物質・材料研究機構）、PHASE/0（物質・材料研究機構）、SALMON（矢花：筑波大学）などがあり、OpenMX（尾崎：東京大学）は非平衡グリーン関数電気伝導計算にも対応する。最近では、スピン系の有効モデルに対する統合ソフトウェアＨΦの開発（山地ら、東京大学）、テンソルネットワーク法やテンソル繰り込み群等の新規手法の開発が進められている。

• 分子シミュレーション分野

無機材料ソフトマター系のシミュレーションではLAMMPSが、生体分子系のシミュレーションではGROMACSがもっとも広く使用されている。この他、有償ソフトウェアとしてAmber、CHARMM、無償ソフトウェアとしてNAMD、MODYLAS（岡崎：名古屋大学）、myPrest（中村：大阪大学）、GENESIS（杉田：理化学研究所）、CafeMol（高田：京都大学）、Marble（池口：横浜市立大学）などがある。分子動力学計算（MD）では、汎用グラフィカルボード（General purpose graphical processing unit：GPGPU）やIntel Xeon Phiなどのメニーコア型演算加速器向けプログラムの開発が進んでいる。また近年、機械学習を使って分子動力学の長時間シミュレーションの結果を予測するMD-GAN、第一原理計算の結果から分子力場を機械学習する方法の開発が進められている。

• モンテカルロシミュレーション分野

格子系に関しては無償ソフトウェアDSQSS（川島：東京大学）がある。実装やカスタマイズがしやすい定番ソフトウェアといえるものはないが、ALPSプロジェクト（藤堂：東京大学）などモンテカルロ計算に関するさまざまなライブラリを提供する取り組みがある。モンテカルロ法は、アモルファス構造の生成や第一原理

計算への応用、Boltzmann輸送方程式にもとづく輸送シミュレーションなど、計算科学のさまざまな場面で用いられる有用な方法である。

• 統計力学理論にもとづくシミュレーション分野

積分方程式理論にもとづいて溶液中の溶媒和効果を扱うRISM-SCFや3D-RISM（吉田：九州大学）などのプログラム開発が行われている。エネルギー表示法にもとづいて溶媒和自由エネルギーを簡便に計算できるERmod（松林：大阪大学）は、小分子から高分子まで幅広く適用できる。さらに、固体の電子状態計算と融合させた、第一原理電気化学界面シミュレーションの開発も進んでいる（大谷：産業技術研究所、西原：Advance Soft）。

• 連続体シミュレーション分野

Micress、MMSP、OpenPhase、OCTA（土井：北京航空航天大学）などのソフトウェアがあり、主に混晶構造の解析や、ソフトマターの構造転移などの問題に適用されている。特にOCTAはミクロスケールからメゾスケールまで幅広い系を扱うことができるプラットフォームであり、物質のマルチスケールシミュレーションの草分け的プログラムである。流体力学解析ツールボックスのOpenFormは、化学反応、燃焼、超伝導、乱流などのシミュレーションに広く用いられている。また、高分子の第一原理計算（前述、FMO）を連続体モデルと接続する望月・土井らの試みなど、マルチスケールシミュレーションの高度化が進められている。

• 量子コンピュータによる量子化学計算

トロント大（カナダ）のAlan Aspuru-Guzikらが量子コンピュータによる量子化学計算手法を提示して以来、基礎的な研究が進められている。量子ゲートマシン向けの量子化学計算ライブラリOpenFermionをはじめ、波動関数を最適化する変分量子固有値法（Variational Quantum Eigensolver：VQE）を含む開発環境がGoogle、IBM、MicroSoftなどから提供されるなど、ソフトウェア開発の環境整備が進んでいる。世界中でベンチャー企業が立ち上がっており、国内でもQunaSys、blueqat（旧 MDR）などが注目を集めている。ただし誤り耐性を有する量子コンピュータの実用化は数十年以上先ともいわれ、NISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）デバイスなど、早期実現が期待されるハードウェアを想定したソフトウェア開発が進められている。

• その他

第一原理計算や分子動力学計算の応用手法として、反応経路ネットワークを探索するGRRM/AFIR法（前田：北海道大学）、TSMD（津田：東京大学）、マルチカノニカル分子動力学法（岡本：名古屋大）、カスケード型分子動力学法（原田：筑波大）、分子振動やフォノン分散を解析するSindo（八木：理化学研究所）、Phonopy（東後：京都大学）、ALAMODE（只野：東京大学）があげられる。機械学習を用いたケム・インフォマティクスのツールも無償で公開されており、iqsprおよびXenonPy（吉田：統計数理研究所）、化学構造式のための深層学習ツールChainer Chemistry（Preferred Networks）などがある。

また、励起状態間の遷移を取り扱うsurface hopping（SH）法など非断熱ダイナミクスに関しても、MCTDH、Newton X、PIMD、CPMDなど汎用ソフトウェアが無償で提供されており、さまざまな電子状態計算ソフトウェアと組み合わせることで光化学反応の解析などが可能である。 SH法に関しては台湾交通大のZhuらによって開発された方法により、計算時間を要していた非断熱結合定数が不要になるなど、光化学分野のダイナミクスに道がつけられつつある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

データ科学の手法と物質・材料シミュレーションの連携による効率的な材料探索を進める取り組みが、近年ますます活発化している。国内初のマテリアルズ・インフォマティクス関連プロジェクト「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI²I）」は2020年3月に終了したが、JSTさきがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクスのための基盤技術の構築」、JST-CREST「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」が進行中であり、さらに2018年から産業技術総合研究所によって、世界最大規模の人工知能処理向け計算インフラストラクチャであるAI橋渡しクラウド（ABCI）が運用されている。理論化学および計算化学にインフォマティクスを適用するケム・インフォマティクス領域では、半経験的量子化学計算におけるパラメータの構築、密度汎関数理論における運動エネルギー汎関数および交換相関汎関数の構築、波動関数理論における電子相関エネルギーの予測などに応用されている。

国内では運動エネルギー汎関数の開発（中井：早稲田大学）、電子相関モデル（同左）、交換相関汎関数の開発（常行：東京大学）など、優れた成果があがっている。分子動力学および粗視化分子動力学法においては、系のエネルギーの見積もりや力場の構築、自由エネルギー曲面や運動エネルギーの計算、平衡構造のほか観測したい構造のサンプリングなどに活用されている。ケム・インフォマティクスを活用したソフトウェアの開発・公開も進んでおり、英国のブリストル大学およびスイスのバーゼル大学を中心として開発されたQML、ドイツのベルリン工科大学を中心として開発されたSchNetPackなどが有力である。また、シミュレーションと実測データを融合し相乗効果を生み出す「データ同化」の技術を物質・材料シミュレーションへ導入する研究も活発化している。従来はゲリラ豪雨の予測などの気象分野で活用されてきた技術であるが、近年はX線回折実験とシミュレーションのデータ同化による結晶構造解析、フェーズフィールド法のシミュレーション結果に合致するように分子動力学シミュレーションの原子間パラメータを最適化する技術などの新たな試みが行われている。シミュレーションで得られる物理量を記述子として実験データを機械学習させる未知化合物の物性や反応を予測する技術の開発や、自動有機合成機械と計算データを融合しリアルタイムに機械学習を行うことで自動的に未知反応を予測する技術の開発も進められている。

もう1つ、注目すべき新潮流として、量子コンピュータの利用があげられる。2019年、Googleが53量子ビットの量子コンピュータを作製し、量子優位性を達成したことは大きな話題を呼んだ。誤り耐性を持たない数十から数百量子ビットの量子コンピュータ（NISQデバイス）の時代が到来しつつある。 NISQデバイスを活用するため、量子コンピュータと従来型の古典コンピュータを組み合わせた量子古典混合アルゴリズムが現在さかんに研究されている。なかでも計算物質科学は特に有望な応用先と目されており、量子古典混合アルゴリズムの中で波動関数を最適化するVQEに加え、量子回路学習など機械学習に向けたアルゴリズムも提案されており、マテリアルズ・インフォマティクスへの応用も期待されている。物質シミュレーションに向けた量子古典混合アルゴリズムの研究開発は、公的研究機関や大企業だけでなく、国内外のベンチャー企業も積極的に取り組んでおり、1つのムーブメントを形成している。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

2014年度から開始された文部科学省ポスト「京」重点課題、2016年度から開始されたポスト「京」萌芽的課題が2020年3月に終了したことに伴い、2020年4月から新たに文部科学省補助事業・「富岳」成果創出加速プログラムがスタートした。このプログラムでは、①精密・広域・長時間のシミュレーションによるブレークスルー、②膨大な組み合わせや多様・複雑な条件下でのシミュレーションによる新たな知見の獲得、

③大量データ処理・ビッグデータ解析による新たな研究・開発の展開など、フラッグシップスーパーコンピュータ「富岳」で初めて可能となる超大規模計算・データ解析が求められている。

計算物質科学領域からは、「富岳」成果創出加速プログラムに下記の6課題が採択されている。

［領域①　人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓］

1）量子物質の創発と機能のための基礎科学―「富岳」と最先端実験の密連携による革新的強相関電子科学（今田 正俊：早稲田大学理工学術院総合研究所）

2）全原子・粗視化分子動力学による細胞内分子動態の解明（杉田 有治：理化学研究所生命機能科学研究センター）

［領域③　産業競争力の強化］

3）省エネルギー次世代半導体デバイス開発のための量子論マルチシミュレーション（押山 淳：名古屋大学未来材料・システム研究所）

4）次世代二次電池・燃料電池開発によるET革命に向けた計算・データ材料科学研究（館山 佳尚：物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点）

5）環境適合型機能性化学品（松林 伸幸：大阪大学大学院基礎工学研究科）

6）大規模計算とデータ駆動手法による高性能永久磁石の開発（三宅 隆：産業技術総合研究所 材料・化学領域 機能材料コンピュテーショナルデザイン研究センター）

2015年度よりJSTによる支援の下、NIMSにおいて情報統合型物質・材料開発研究拠点（拠点長：伊藤聡）が設立され、また、それと連携する形で戦略的創造研究推進事業（さきがけ）「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクスのための基盤技術の構築」（2015～2020年度）および、CREST「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」（2017～2024年度）の研究領域が発足し、情報科学の研究手法を物質設計に活用し、データベースの構築や機械学習により新規物質、高性能化のための物質設計指針の導出の自動探索に向けた取り組みを牽引している。また、有機材料を対象としたマテリアルズ・インフォマティクスとして、NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016～2021年度）が進められ、産業技術総合研究所を中心に化学メーカー企業も参画した産学連携研究が推進されている。

2019年10月から、JST-ERATOプログラムで初の計算物質科学分野のプロジェクトとして「ERATO前田化学反応創成知能プロジェクト」（2019～2024年度）がスタートした。北大の前田らが開発した反応経路自動探索技術（AFIR法）と組み合わせ最適化技術を基盤として、量子化学計算、情報科学、さらにはマテリアルズ・インフォマティクスの技術を組み合わせることで、化学反応における原子の動きを予測し、未知の化学反応を提案する技術を開発している。また2018年から世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の拠点として化学反応創成研究拠点（ICReDD）が北大に設置され、AFIR法で算出した化学反応経路ネットワークを用いて計算科学、情報科学、実験科学の3分野融合の研究を推進している。

その他、文部科学省の元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>（2012～2021年度）においては、磁性材料（拠点長：広澤哲、NIMS）、触媒・電池材料（拠点長：田中庸裕、京都大学）、電子材料（拠点長：細野秀雄、東京工業大学）、構造材料（拠点長：田中功、京都大学）の各拠点において、さまざまな実験・計測、および計算・理論研究が有機的に連携した取り組みが精力的になされている。

計算物質科学分野の人材育成およびコミュニティ形成活動として、東北大学、東京大学、分子科学研究所、大阪大学の4機関によって2015年に設立された計算物質科学人材育成コンソーシアム（Professional development Consortium for Computational Materials Scientists：PCoMS）、ならびに2020年5月

に組織された「計算物質科学協議会（Computational Materials Science Forum：CMSF）」がある。

産学官連携の取り組みとして、2018年から運営が始まった「電気化学界面シミュレーションコンソーシアム」が注目されている。電気化学界面シミュレーション技術を普及し、高性能デバイス開発（電池、キャパシタ、電気メッキ、腐食、防食、電気化学センサ）を促進することをめざした産学官連携組織で、現在18社の企業が法人会員として参画している。

量子コンピュータによる量子化学計算への支援も始まっている。2018年に発足した文部科学省の「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」では、「量子情報処理」技術領域において量子コンピュータのアプリケーション研究が進められており、その中で材料シミュレーションに向けたアルゴリズム開発も行われている。2019年にはJSTさきがけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」（2019～2024年度）の研究領域が立ち上がり、量子コンピュータを物性物理や量子化学計算に応用する研究も支援している。内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」においても量子アルゴリズムの実行時間も含めた評価・検討が進められている。情報処理推進機構（IPA）が進める未踏ターゲット事業においても、2018年度から3年続けて「量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発」がテーマとして設定されており、材料シミュレーションと関連したテーマが採択されている。民間では、blueqat（旧MDR）、QunaSys、Quemixなどのスタートアップ企業が量子コンピュータの物質科学への応用に向けた取り組みを行っている。2020年には量子コンピュータの材料開発への応用をめざすコミュニティ「QPARC」が開設され、材料系メーカーを中心に数十社が参画している。産学の協力も進んでおり、IBMの量子コンピュータにアクセスできるハブ拠点が2018年に慶應義塾大学に開設され、量子コンピュータの実機を用いた量子化学計算の検証も試みられている。2020年には東京大学を中心として「量子イノベーションイニシアティブ協議会（QII協議会）」が立ち上がり、化学メーカーを含む複数の企業が参加している。

［米国］

2011年に発表された「Materials Genome Initiative（MGI）」を契機に、物質・材料分野へ5年間で5億ドルの巨費が投入され、マテリアルズ・インフォマティクス分野を牽引した。現在は、MITのMaterials Project、Duke大学のAFLOW、Harvard 大学のClean Energy Projectなどで、第一原理計算結果のデータベース開発や材料探索が行われている。 Aspuru-Guzikを計画責任者とするベンチャー企業Kebotixが2018年に発足し、人工知能による分子や材料の効率探索や設計、次々に資金調達に成功している。同社は、MIT Technology reviewの“10 Breakthrough Technologies list”や、World Economic Forumの“Technology Pioneer”に選出されるなど注目を集めている。米IBM社もケム・インフォマティクス研究に乗り出しており、産業界からのアプローチも今後増えると予想される。

量子コンピュータを用いた計算化学技術の開発も活発化している。2018年に署名されたNational Quantum Initiative Actでは、量子コンピュータ分野に5年間で1400億円相当の拠出が約束されている。NFSによるQuantum Leap in Chemistry（QLC）をはじめ、DOEも量子情報に関連する材料・化学研究予算をサポートしている。2019年にはNIST（National Institute of Standards and Technology、米国立標準技術研究所）主導のコンソーシアムQuantum Economic Development Consortium（QED-C）が発足し、100社を超える企業と30以上の大学等の研究機関が参加している。

［欧州］

EUのHorizon 2020（2014～2020年）にもとづいて、インフラ（PEACE）、テクノロジー（ETP4HPC）、

アプリケーション（CoE）を3つの軸にして、スーパーコンピュータのシステム開発、ソフトウェア開発、そして利用拡大が推進されている。 PRACE（Partnership for Advanced Computing in Europe）は2012年に組織され、現在も計算科学の諸分野への支援を行っている。参加国は26カ国で、特に、計算機システムに関してはBSC（スペイン）、CINECA（イタリア）、GCS（ドイツ）、GENCI（フランス）、CSCSおよびETH（スイス）の各国研究機関が担当する。また、ICMEg（Integrated Computational Materials Engineering expert group）を中心に物質、構造材料、機械などの産業分野における計算科学分野の連携研究も重層的に進められている。マテリアルズ・インフォマティクス関連ではNOMAD CoE（Novel Materials Discovery Center of Excellence）が推進されている。 Glasgow大学のL. Croninのグループは、実験化学とインフォマティクスの融合により、実験の計画から実験操作まで自動で行うロボットおよびシステムを開発し、高インパクトジャーナルに次々と成果を発表している。量子コンピュータ関連では、2018年にQuantum Flagshipプログラムが設立され、10年間で10億ユーロ（約1400億円）が投じられる。

［アジア諸国］

中国では、計算物質科学研究に関する論文が格段に増加し、質の高さでも日本を凌駕している。これは、論文発表に対して給与外の金銭的なインセンティブがあることにも起因していると考えられる。超並列計算機環境も世界で上位を占めており、応用計算に多くの資源が供給されている。プログラム開発に関してはまだ途上にあるが、千人計画で欧米から戻った研究者が増加しており、さらには欧米でリタイアした研究者を研究室ごと引き抜くなど、大胆な政策を行なっている。今後、計算物質科学分野においても、中国の存在感はますます高まることが予想される。マテリアルズ・インフォマティクス関連の動向として、例えば2012年に上海大学に設置されたMaterials Genome Instituteがある。量子コンピュータに対しても科学技術イノベーション5カ年計画にもとづき、10年で1200億円以上の投資が行われる計画であり、この枠組みのなかで量子コンピュータを利用した物質シミュレーションの研究開発も進行すると考えられる。

シンガポールでは、国外の研究者にインセンティブを与えて積極的に誘致している。アジアでいち早く大学のグローバル化を進めてきたことが奏功し、近年、研究のレベルが格段に向上している。

韓国、台湾においても当該分野への関心が高まっており、中国やシンガポールと同様に海外からの研究者の積極的な獲得を通じ、研究レベルの向上を図っている途上にあると考えられる。特に韓国では電気・電子材料に、台湾では基礎研究への投資が多くなされている。

西アジアにおいては、サウジアラビアが海外の研究者の積極的誘致や計算機環境の向上に力を入れており、質の高い論文が発表され始めている。

（5）科学技術的課題

近年の計算機環境、計測・分析機器の進展および理論・計算手法の向上により、ナノ、メゾ、マクロのそれぞれのスケールにおける物質・材料の組織や特性の理解は着実に進んでいる。今後は第一原理にもとづく分子シミュレーションや統計力学理論（溶液論、フェイズフィールド法）との融合によって、より高度なマルチスケールモデリング計算手法を開発し、より現実の系に則したナノ構造体における反応や物性の制御がシミュレートできる環境を整えていくことが重要である。そのためには、物理・化学・材料科学の諸分野の力を結集するだけではなく、数学、化学工学、機械工学、さらには情報科学分野との融合を進める必要がある。

マテリアルズ・インフォマティクスに関しては、日本の強みである基礎理論と計算プログラム開発を、実際の材料開発・合成技術と融合する取り組みが一部で進んでおり、今後のさらなる研究開発投資により材料開

発のハイスループット化が進むことが期待される。ただし、異分野融合の盛り上がりは依然として欧米の後塵を拝している。特に国内のケム・インフォマティクスは歴史的な経緯から化学工学や創薬研究が主流で、分子科学系研究者のコミュニティが醸成していない。化学系を含む理論・実験・計算科学の連携は限定的である。

量子コンピュータ技術に関して、NISQデバイス向けの量子古典混合アルゴリズムについて、ノイズの混入や量子回路自体の最適化の難しさなど、この数年で課題が認知されるようになってきた。現在のところ量子コンピュータの応用に向けた研究は古典アルゴリズムの延長線上にあるものが多い。今後は柔軟な発想のもと、既存の物質・材料シミュレーションの枠組みを超えた方向性を見つけることが肝要である。量子コンピュータ技術はまだ萌芽段階にあり期待先行の面が強い。そのため、期待と現実との乖離が大きいほど反動が生じやすく、これが長期的な研究開発の継続をはばむ恐れがある。ムーアの法則の限界が近づきつつある状況と既存の物質シミュレーションの成熟度に鑑みると、量子コンピュータ技術の開発は持続的に取り組むべき基礎的研究課題である。

計算物質科学の裾野は広がっており、宇宙・惑星科学、地球科学、海洋科学領域などにおける極限環境下での特異な物質・物性に関して、その基礎研究に計算物質科学の研究手法をもっと適用していくべきである。他にも、分子生物学、構造生物学、薬学、医学などの生命科学の諸分野でも計算物質科学との共同研究は可能である。これらの分野においては、従来の研究領域とは異なる条件や要請があり、それらを解決するための手法開発が必要となるであろう。

（6）その他の課題

計算物質科学の分野における「個々」の日本の研究者の層は非常に厚く、研究の独自性やプログラムの機能も欧米に引けを取らない一方で、研究のフォロワーやユーザーが少なくシェアが小さいことが一番の難点である。現状を打破するためには、個々の研究を1つに束ねる核となる施策と、国際共同研究への支援策が課題である。また、計算物質科学分野内のコミュニティにとどまらず、実験研究分野のコミュニティとの連携を支援する研究プロジェクトを継続することで、実験側のニーズに即した課題解決が可能になると考えられる。特定の研究者に集中投資するファンディング体制だけでなく、少額で短期間のファンディングの機会を増やすことも重要であり、これによって多くのトライアルがなされ、欧米や中国に負けない速いサイクルで材料開発が進むことが期待される。

一方で、発想を大きく転換し、海外の主要オープンソースの開発に積極的に参入する、という戦略も取りうる。これらは多国籍で開発されており、そこに日本が入り込むことは十分に可能である。欧米で頻繁に開催されているコード開発の研究会に積極的に参加し、パッケージの一部でもわが国が主導権を握れば、欧米諸国から日本で研究を行うことを希望する研究者も増えると期待され、それによって日本の計算物質科学分野の底上げが期待される。そのためには、グローバルで活躍できる人材育成・活用体制の構築が必要である。特にイノベーションの本質は人であることから、グローバルな視点を備えた計算物質科学のエキスパートが、産業の強化・革新、新産業の創出を担う企業において活躍できる場を設けることが政策的にみて極めて肝要であると考えられる。

データ科学と物質・材料シミュレーションの連携で研究データが爆発的に増加していくことが見込まれ、今後は計算物質科学領域においても「研究データリポジトリ整備・運用ガイドライン」に沿ったデータマネージメントを行うことが求められている。計算物質科学コミュニティ全体を巻き込んだデータリポジトリの仕組みと継続的な利活用の体制を構築していく必要がある。東京大学物性研究所では、「富岳」成果創出加速プログラムの参画者を対象としたデータリポジトリ事業をいち早く進めている。研究データの可用性と完全性の確保だけでなく、サービスレベルに合わせて機密性を確保する仕組みを整備することが、国内の産学連携を促

進するために重要な課題となる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・従来から電子状態計算法の開発がさかんで高い独自性を発揮している。 ・ポスト「京」重点課題・萌芽的課題で開発された超並列計算ソフトウェアが「富岳」成果創出加速プログラムに引き継がれ世界を牽引。 ・反応経路自動探索プログラム GRRM が注目を集めている。 ・マテリアルズ・インフォマティクスの研究が活発化している。 ・量子コンピュータによる物質計算の研究者が増加しており、論文の質も欧米と比較して遜色ないレベルにある。
	応用研究・開発	◎	↗	・国の大型プロジェクトが物質・材料シミュレーションの応用研究を牽引。計算、実験、計測、さらにはデータ科学の合同プロジェクトが増え、出口を見据えた応用研究の取り組みが強化されている。 ・材料系・製薬系のメーカーから物質・材料シミュレーションが重要視され、コンソーシアムやプロジェクトが拡大している。 ・スタートアップ企業を中心に量子コンピューティングのアルゴリズム開発が進められている。
米国	基礎研究	◎	↗	・Gaussian、LAMMPSをはじめ、商用・無償プログラムが充実し、新理論の導入やバージョンアップがさかんに進められている。 ・マテリアルズ・インフォマティクス分野について、さまざまな研究がなされており、世界を大きくリードしている。 ・GoogleとIBMなどのIT大手企業が量子コンピュータ研究を推進しており、CaltechのChanのグループやVirginia TechのMayhallのグループが量子コンピュータによる物質計算で優れた成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	・GPU化への対応を含めてプログラム開発および公開などが活発。 ・物質・材料シミュレーションのソフトウェア開発自身が1つの産業として定着している。タミフルの薬剤設計の例にみるように、産業界においてシミュレーション分野の貢献が大きくなっている。 ・材料組織のデータベースの分野で、材料組織の3次元解析ソフトのDREAM.3Dが定番ソフトの地位を確立しつつある。 ・Materials Project、AFLOWに代表されるように、第一原理計算結果のデータベースの開発に加えて、データベースとマテリアルズ・インフォマティクス技術を活用した材料探索など活発に応用研究・材料設計を推進している。
欧州	基礎研究	◎	↗	・EU全体としてプロジェクトを推進し、活発な研究開発を行っている。 ・固体系電子状態計算ソフトウェアVASPに代表されるように、計算の高速化や高精度化をめざした電子状態計算ソフトウェアが充実している。 ・反応解析ソフトウェア開発も進んでいる。 ・マテリアルズ・インフォマティクス分野の人事公募案件が増えている。 ・NISQに向けた化学計算の先駆的論文が英国およびスイスを中心に数多く発表されている。オランダでは実機上での分子構造の最適化が初めて行われた。
	応用研究・開発	◎	↗	・Horizon 2020で、スーパーコンピュータのシステム・ソフトウェア開発の成果を活用した応用研究が精力的に推進された。ソフトウェア開発そのものが産業の一部となっている。 ・状態図分野では、スウェーデン王立工科大で開発したThermo-Calcが世界のスタンダードとなっている。 ・フェーズフィールド法のソフト開発では、ドイツが先行。

中国	基礎研究	○	↗	・マクロスケールのシミュレーションが中心。 ・日欧米へ留学していた研究者が本国へ戻り活躍し始めており、今後は方法論およびプログラムの開発力が向上していく可能性がある。マテリアルズ・インフォマティクス分野の研究もさかんになってきている。 ・VQEなど量子古典混合アルゴリズムの研究報告例が増えている。
	応用研究・開発	○	↗	・マクロスケールのシミュレーションの応用研究が中心。今後、ナノ・メゾスケールのシミュレーションも、日欧米から中国に帰国した研究者により活発化する可能性が高い。
韓国	基礎研究	△	→	・フェーズフィールド法関連の基礎研究に対する韓国の貢献度は大きいが、一部の著名な研究者に限定されている。 ・Samsungが量子コンピュータ・ベンチャー企業に出資するなど量子コンピュータに関与しているが、物質シミュレーションに向けた具体的な成果は報告されていない。
	応用研究・開発	△	→	・エレクトロニクス関係の論文は多いが、今後さらに応用研究が活発化する兆候はみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・量子情報・通信（ナノテク・材料分野　2.3.6）
・元素戦略・希少元素代替技術（ナノテク・材料分野　2.5.2）
・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野　2.5.3）

参考・引用文献

1) 物質科学シミュレーションのポータルサイト「News/Event」『物質科学シミュレーションのポータルサイト』, https://ma.issp.u-tokyo.ac.jp/（2021年1月27日アクセス）.
2) 中嶋隆人「量子系分子科学研究チーム」『理化学研究所 計算科学研究センター』, https://www.r-ccs.riken.jp/jp/overview/lab/cmsrt.html（2021年1月27日アクセス）.
3) Scalable Molecular Analysis Solver for High-performance computing systems （SMASH), “Welcome to SMASH Page”, SMASH, http://smash-qc.sourceforge.net（2021年1月27日アクセス）.
4) 中辻博「研究所の主な研究活動とご寄付のお願い」『認定NPO法人量子化学研究協会研究所』, http://www.qcri.or.jp（2021年1月27日アクセス）.
5) アドバンスソフト株式会社「To the Next Stage」『アドバンスソフト株式会社』, http://www.advancesoft.jp（2021年1月27日アクセス）.
6) HPCI戦略プログラム分野「予測する生命科学・医療および創薬基盤」（SCLS）「ソフトウェア一覧」

『SCLS』, http://www.scls.riken.jp/scruise/software.html（2021年1月27日アクセス）.
7) ALPS WIKI, “Welcome to the ALPS project”, ALPS WIKI, http://alps.comp-phys.org/mediawiki/index.php/Main_Page（2021年1月27日アクセス）.
8) フリーでオープンなマルチスケールシミュレーションプラットフォーム（OCTA）「What’s New」『OCTA』, http://octa.jp/jp/（2021年1月27日アクセス）.
9) 大野公一「量子科学で世界を変える」『NPO法人量子化学探索研究所』, https://iqce.jp/（2021年1月27日アクセス）.
10) High performance computer infrastructure（HPCI）「ホームページ」『一般財団法人高度情報科学技術研究機構』, http://www.hpci-office.jp（2021年1月27日アクセス）.
11) 伊藤聡「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（Mi²i）」『Mi²i』, https://www.nims.go.jp/MII-I/（2021年1月27日アクセス）.
12) 科学技術振興機構さきがけ研究領域「［革新材料開発］理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合 した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」『さきがけ』, https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah27-4.html（2021年1月27日アクセス）.
13) 科学技術振興機構CREST研究領域「［革新材料開発］実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」『戦略的創造研究事業推進機構（CREST）』, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah29-3.html（2021年1月27日アクセス）.
14) 国立研究開発法人産業技術総合研究所「機械学習処理ベンチマークMLPerf HPCにて最高レベルの速度を達成」『AI橋渡しクラウド』, https://abci.ai/ja/（2021年1月27日アクセス）.
15) A. Aspuru-Guzik, R. Lindh and M. Reiher, “The Matter Simulation（R）evolution”, *ACS Cent. Sci.* 4, no. 2（2018）：144-152. doi：10.1021/acscentsci.7b00550
16) T. Lookman, F. J. Alexander and K. Rajan『マテリアルズインフォマティクス～探索と設計～』（東京：S&T出版, 2018）, http://www.stbook.co.jp/products/detail.php?product_id=392.
17) Emily Grumbling and Mark Horowitz（eds.）『米国科学・工学・医学アカデミーによる量子コンピュータの進歩と展望』西森秀稔 訳（東京：共立出版, 2020）, https://www.kyoritsu-pub.co.jp/bookdetail/9784320124554.
18) A. Peruzzo et al., “A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor”, *Nature Communications* 5（2014）：4213. doi：10.1038/ncomms5213
19) スーパーコンピュータ「富岳」開発：フラッグシップ2020プロジェクト「スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラムについて『理化学研究所 計算科学研究センター』, https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/promoting-researches（2021年1月27日アクセス）.
20) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」『新エネルギー・産業技術総合開発機構』, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100119.html（2021年1月27日アクセス）.
21) 前田理, 岩田覚「前田化学反応創成知能プロジェクト」『戦略的創造研究推進事業』, https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/jpmjer1903.html（2021年1月27日アクセス）.
22) 計算物質科学協議会「NEWS」『計算物質科学協議会』, https://cms-forum.jp/（2021年1月27日アクセス）.
23) Materials Genome Institute of Shanghai University（MGI）, “About MGI”, MGI, http://en.mgi.

shu.edu.cn/About_Us/About_MGI.htm（2021年1月27日アクセス）.
24) 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）・国際動向を踏まえたオープンサイエンスの推進に関する検討会「研究データリポジトリ整備・運用ガイドライン」『内閣府』, https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kokusaiopen/guideline.pdf（2021年1月27日アクセス）.

2.7 共通支援策

2.7.1 ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準

（1）研究開発領域の定義

新規物質や新製品の健康・環境への影響、倫理面の取り扱い、リスクの評価・管理、標準化は、国際的課題である。ナノ・マイクロ材料は、従来の材料とは異なる微小構造ゆえの新物性を持つものがあることから、未知のものとして適切な評価や管理を行うことが求められる。組成だけで分類することができず、サイズ、形状、表面状態など多岐にわたることから、科学的評価には多大な時間・資金・設備等リソースを要する。そのことから、国や国際協調の枠組みのもと、世界の産官学で取り組まれている。リスク評価手法・管理手法の確立に関する科学的再現性の担保や、医学・疫学的評価、評価結果の知識基盤整備、社会への情報提供とコミュニケーションの仕組み構築、産業界や社会における情報の活用システム、合意形成と意思決定の在り方など、多様な課題が存在する。倫理的・法的・社会的側面（ELSI）からと、環境・健康・安全（EHS）の科学的側面からの取り組みがあるが、近年特にナノ材料を使用した製品の実用化の進展や、海洋ナノ・マイクロプラスチック問題などに対し、各国・地域単位で規制・制度面の整備が顕在化してきた。有用材料のリスクを適切に管理し、恩恵を社会が広く享受するためには、健全な国際市場での流通が欠かせない。固有の用語、評価試験方法、リスク評価法などの多方面にわたる国際標準化が重要となる。

（2）キーワード

ナノ材料、ナノマテリアル、ナノ粒子、ナノ安全、ナノEHS、ナノELSI、RRI、リスク評価、国際標準化、試験法ガイドライン、カテゴリー評価、ナノ規制、動態制御、ナノカーボン、カーボンナノチューブ、グラフェン、セルロースナノファイバー、リポソーム、ナノクレイ、マイクロプラスチック、二酸化チタン、酸化亜鉛、銀ナノ粒子、REACH、TSCA、ECHA、OECD/WPMN、ISO/TC229、IEC/TC113、VAMAS

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

ナノテクノロジー・材料科学技術への期待の1つに、ナノ・マイクロ材料が従来の化学物質やバルク材料とは異なる新奇で優れた特性を有していることがある。このことは同時に、ナノ・マイクロ材料が健康や環境に対して未知の影響をもたらす可能性があることも意味し、材料の有用面だけでなく、リスクが適切に評価・管理されることが重要となる。人類が公害問題で経験した化学物質や、農産物における遺伝子組み換え技術のように、適切な利用に限れば有用な技術であっても、不確実性・リスクへの懸念や不安から、社会が判断を下すことが難しくなる、または拒絶する可能性がある。社会への周知やコンセンサス形成が十分でないままに、効用・効率のみを追い求めて大規模に環境へ暴露してしまう懸念もある。例えば近年、マイクロプラスチック（およびナノプラスチック）による海洋汚染の影響がクローズアップされているが、原料から製造・使用・廃棄・リサイクルまでの循環を考慮し、科学的評価を踏まえ、持続可能な使用を実現することが求められている。そのためには、科学者、技術者、事業者、消費者・市民、行政が、ナノ・マイクロ材料の未知の側面に関心を寄せるとともに、適切な役割分担で取り組み、ルール形成や意思決定に反映していくことが肝要となる。

ナノ材料は、少なくとも1次元の大きさが100 nm以下で人工的に製造された材料を指すことが一般的であ

る。免疫グロブリンタンパク質の大きさが10～100 nmほどであることを考えると、ナノマテリアルは生体高分子とほぼ同等のサイズといえる。最近では、10 nm以下のサブナノマテリアル材料も増えており、分子状物質と変わらない大きさである。このようなサイズの低減により、生体にとっては組織浸透性が向上することに加え、比表面積が大きくなることで電子反応性や界面反応性も向上し、高機能化が実現している。特に、医薬品（造影剤やドラッグデリバリーシステムのキャリアなど）や、化粧品（ファンデーションや日焼け止めなど）、食品（固結防止剤など）に使用され、革新的素材になっている。なかでも、米国食品医薬品局（FDA）の調査では、食品ナノ材料の含有製品は、ナノテクノロジーの進歩とともに加速度的に増加しているとし、増粘安定剤/保存吸湿剤/着色料としての「微粒子」を含有しない加工食品はほぼない。そのため、私たちが食品ナノ材料を摂取する量は増加していくことが予想されている。製品に使用されるナノ材料の種類の増加に伴い、今後、ナノ材料への暴露機会が増加していく可能性を踏まえると、安全性を確保するためには、「生体影響や環境影響」の評価は当然ながら、サイズや表面性状をはじめとした「物性」との連関を解析することが必要となる。この観点から、さまざまなナノ材料を細胞/動物に添加/投与し、その応答が解析されているものの、ハザード同定に軸足が置かれており、研究者の専門性に応じて解析項目も設定されがちである。リスクの解析には、暴露実態に沿った生体応答/細胞応答評価が求めらる。すなわち、ハザード情報のみならず、吸収・分布・代謝・排泄や蓄積といった動態情報を定性・定量解析し、「暴露実態」を解明することで、リスク解析に資する情報の集積を図ることが必要となる。

近年、欧州を中心にナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進んできた。このことは、事業者がナノ材料を活用したビジネスを行うに際し、事業推進の可否に決定的な影響を及ぼすことになる。ナノ材料の定義、分類、測定方法、評価方法、評価結果の解釈は国際協調で進むが、関連データの共有は十分に進んでおらず、また、対象範囲やバラつきも多いことから、あらゆるナノ材料種に完全に対応するような取り組みは現実的でなくほぼ不可能である。

一方、現時点において「ナノであるがゆえに特有」の負の健康影響や環境影響は、科学的には確定していない。近年はどちらかといえばナノ特有の生体作用機序は存在しないのではないかといった専門家の見解も広がりつつある。これを断定的に考えるべきではないが、従来型の化学物質のガイドライン類が、基本的にはナノ材料の評価にも適当であるとする考え方が広がってきている。このことを踏まえ、世界的にナノ材料を含む化学物質の規制当局は、ナノ材料の登録制度を開始するなどしながら、それぞれの規制枠組みのなかで実際にどのようにナノ材料のリスク評価を行うのかという観点で議論するようになってきている。

ナノ材料の健康・環境へのリスク評価の必要性の国際的な高まりを受けて、15年近くが過ぎた現在、その当初は分野横断的な技術的連携の必要性が提言されると同時に、これまでの化学物質のリスク評価・管理の枠組みを拡張する方向でさまざまな評価法の開発が進められてきた。2019年からは欧州の化学物質規制の根幹である欧州化学品規制REACH（化学物質の登録、評価、認可及び制限に関する法規制）において、ナノ材料が本格的に対象となり、それらの安全性を評価するためのOECDによるリスク評価の為の試験法ガイドラインの開発や改良が欧州を中心に急ピッチで進められている状況にある。近年では、ナノ材料を含めた先端的材料やそれらを複合的に組み合わせた新規物質をアドバンストマテリアル（Advanced Materials）ととらえ、ナノ材料からより広い分野に対する新材料の安全性をどう評価すべきであるかという方向に議論は広がっている。

しかし、評価対象がナノ材料からアドバンストマテリアルに拡大するとしても、生体への吸収性や反応性の点では検討すべきことは同様であると考えられ、ナノ材料の安全性評価のために検討してきた研究課題のフレームには、毒性学的観点からは大きく変わることはない。単一の化学物質のサイズ領域である1nm以上か

ら、生体には吸収されないであろう巨大な粒子や高分子ポリマーサイズ（数十μm以上）の間に入るサイズの物質の評価を行う為の手法開発が、中心的な課題である。一方、評価対象がナノ材料からアドバンストマテリアルに拡がる際の課題は、健康評価の毒性学的観点よりも行政的なリスク評価・管理体制へのインパクトの方が大きいと考えられる。新規の物性・機能を多くの用途へと応用できるナノ材料の評価は、さまざまな材料の原料としての化学物質の評価体系のなかで行おうとしてきているが、アドバンストマテリアルは、単なる一材料としての評価だけではなく最終（消費者）製品としての製品評価を行うことが必要であり、現に医療機器や食品容器などへの適用が進んできていることから、化学物質を単独で管理する体系とは異なった行政的な管理体系での評価も必要となる。例えば、わが国の「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」は化学物質が環境経由でヒトに暴露する際の安全性を評価対象としているが、医療や食品関連へ開発された物質が直接ヒトに暴露する際の安全性評価に対して、環境経由による影響評価を行う毒性試験の暴露形態では、本来的に評価対象とすべきアドバンストマテリアルのリスクをカバーできない可能性がある。また、医療や食品関連の製品は独自の評価システムで管理されているので、1つの物質でも異なった評価が行われることがあることは安全性評価上の整合性の観点からの課題である。

また一方、長期暴露による発がん性を中心とした評価法の課題は、依然として解決していない。慢性影響の評価を確定する為の試験は、動物実験などの長期毒性試験に頼らざるをえず、アドバンストマテリアルに拡がる数多くの物質に対して、このような試験を行うことはますます現実的でなく、より効率的な試験法の開発が必要となる。このような慢性影響を評価するための行政的な管理システムは、通常の化学物質に対する評価・管理システムでさえも効率的に機能しているとはいえない状況もあるなかで、難問である。特に今後、社会的なニーズにかなったアドバンストマテリアルを用いた製品は、広範かつ長期にわたり使用され続けることが想定されており、この長期的な暴露による将来のリスクを回避するとともに、安全性を担保してかつ国際的競争力を高めた製品を市場に提供するための評価システム構築の必要性が高いだろう。従来の化学物質の評価においても、カテゴリー化・グルーピング（類似の物質を括って評価する）、リードアクロス（評価対象物質の特性を、類似物質の既評価物質の特性から類推する）、QSAR（Quantitative Structure Activity Relationship/定量的構造活性相関：物質の構造や基本的な物理化学特性値から有害性等を推定する）が行われてきた。ナノ材料またはアドバンストマテリアルにおいて、評価の効率化が求められていることは、単なる試験コスト削減に留まらず、最近強まっている動物試験削減の動きや、新材料の活用によるイノベーションへの期待を背景にしている。

研究者と社会の多様なステークホルダーによる、相互作用的なプロセスを経て科学技術研究の成果を社会へ還元させるべきであるという「責任ある研究とイノベーション（RRI）」の考え方が国際的に拡がり、わが国の第5期科学技術基本計画では「社会と共創する科学技術」が掲げられた。不確実性やリスクを科学的に払拭することが難しい新興科学技術（Emerging Science and Technology）であるナノテクノロジーやアドバンストマテリアルの研究開発では、社会とこのような新しい関係を築くことが重要になる。

ナノ材料を用いた消費者製品が増加するにつれて、製品の輸送、保管、販売、使用、さらには使用済み製品の廃棄やリサイクルなど、全ライフサイクルを対象にしたヒトや環境への影響を明らかにする研究が関心を集めるようになってきている。製品応用の進展を背景に、安全性について特に関心を集める代表的なナノ材料の1つに、カーボンナノチューブがある。繊維状で高アスペクト比という形状が、アスベストに似ているのではないかとされるが、両者の使用環境におけるサイズには相違があり、生体影響に関する相違は科学的に十分に明らかになっていない。そのため各国の関心も高い。2017年には、アスベストとカーボンナノチューブ

を比較し、両者によるがんや中皮腫等の発症にいたるメカニズムの解明をめざした研究が注目された。また、ナノスケールの銀、酸化チタン、酸化亜鉛についても、高い殺菌効果や紫外線からの保護性能等に着目した製品、例えば日焼け止め、抗菌防臭剤、食品添加物などへの応用が増える一方で、有害性やリスクを評価するためのデータはいまだ十分ではなく、さらなる研究が必要であると指摘されている。ナノスケールの銀、酸化チタン、酸化亜鉛は、すでに市場に流通する製品も多く、消費者からの関心は高い。各国政府や環境保護団体などから消費者に向けたファクトレポートや、材料の安全性や製品の安全な使用方法についての説明を含むFAQなどが公開されている。

［研究開発の動向］

米国ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）、およびEU Nanosafety Clusterの各種報告から、欧米は単にELSI、EHSだけではなく、ナノテクのリスク評価を通商政策や国家安全保障政策において戦略的に利用する方針を掲げている。このような動きは、欧州化学品規制REACHやRoHS指令（特定有害物質使用制限）の制定の契機の1つと考えられ、各国の化学物質の登録制度のなかでナノ材料の規制に関する事例が増えてきている。ここ数年、REACH登録や食品関連規制、消費者製品に関する具体的な評価ガイダンスが公表されるようになってきており、さらに、登録制度に必要な各種評価試験法のガイドラインをナノ材料に対応させるプロジェクトが進んでいる。欧州では実際の規制（登録）を年々具体化させてきており、これらの政策を支えるために数多くのプロジェクトが推進されて、その成果が今後の政策の基盤になっていくと想定されている。

しかし、科学的な成果は必ずしも以前に比べて進展してきたといえない面があり、最終的な結論はナノ材料に対応した物性の測定と、それをグルーピング化することにより、多種多様なナノ材料生体影響や環境影響を効率的に評価することが重要であるといったことは変わっていない。もちろん、さまざまな研究成果や具体的なデータは蓄積しているが、酸化銀や酸化チタン、二酸化ケイ素など比較的扱いやすい物質についての具体例であり、産業界からもそれ以外の物質に展開できるようなものでないとの批判もある。また、動物愛護の観点やコストが大きいことからin vitroの研究が多く、最終的なリスク評価に必要なin vivo試験のデータは不足している。

2014年ごろまでは、規制対象を明確にするために「ナノ材料」の定義の議論が先行した。これは、実社会で現実に製造・輸入・販売される材料をナノ材料として判断する基準を定めるもので、2010年にISO（国際標準化機構）のナノテクノロジー技術委員会（TC229）で策定されたTS 80004-1における規定をベースとしているが、EU 独自の定義、ISO/TC229にもとづいた米国の考察など、各国・地域で独自の解釈を有している。2011年に欧州委員会はナノ材料の定義を、「粒子の1つ以上の次元の外寸が1nmから100nmで、それが個数濃度として50%以上あるものを遊離した状態あるいは凝集体として含むような、天然の材料/付随してできた材料/製造された材料である」とした。しかし、この時点においてこの定義通りに任意の材料がナノ材料であるかどうかを判別する計測技術が確立していないという技術的な課題が生じた。これに対応すべく日本では、産業技術総合研究所と複数の分析機器メーカーを中心としたコンソーシアムCOMS-NANO（Consortium for Measurement Solutions for Industrial Use of Nanomaterials）が組織され、欧州のナノ材料定義にその材料が当たるかどうかの判定を行う計測技術開発・方法の確立を進めて成果をあげている。分級システムなどによって、予め粒径分布をいくつかに分画し、分画された試料に対して複数の計測評価法により粒径分布を計測し、データを合成するなど一連の作業をシステム化することにより、生体内での詳細な粒径プロファイルの理解が期待されるものである。ナノ素材を計測する前に、原理の異なる手法を組み合わせることによって、粒子径のみならず、形状や電荷の違いも理解できるプラットフォームの構築が期待される。

また、欧州委員会によるナノ材料の定義は変更が議論されているが、現時点で変更後の定義は確定していない。

世界的には、上市するナノ材料の登録制度の整備が進んでいる。欧州では、フランス、ベルギー、デンマーク、スウェーデン、ノルウェー、イタリア、ドイツ、スイスにおいて、登録制度が実施されている状況であり、ECHA（欧州化学品庁）は、ナノ材料をREACH登録するにあたってのデータ要求についてガイダンスの整備を進めている。例えば、フランスにおける規制は、100g以上の工業ナノ材料を扱う業者、研究所、特定使用者が対象であり、量、サイズ、サイズ分布と、使用目的に関して届け出ることが義務づけられた。届け出を怠った際は罰則金を支払わなければならないことが規定されている。

EUでは、製品にナノ材料を使用していることを明示するラベルの貼付が、一部製品に義務づけられている。欧州化粧品規則（EC）No 1223/2009では、化粧品にナノ材料が含まれる場合に、事業者はCosmetic Products Notification Portal（CPNP）に登録し、成分表示の際に「（nano）」と記載することが義務づけられている。 EUでは食品に関しても、ナノ材料が含まれる場合は成分表示に記載することが、2016年に施行された消費者への食品情報の提供に関する欧州規則（（EU）No.1169/2011）および2018年に施行された改正新規食品規則（（EU）2015/2283）によって事業者に義務づけられている。また医療機器規則（2017年5月制定、2020年5月からの本格施行が新型コロナの影響で1年延期された）でも内部暴露のリスクがあるとしてナノ材料が規制されている。

一方、このような規制とは別に、ナノテク・ナノ材料製品の認証制度によって、製品の高性能・高機能を保証するためのラベリング制度が、台湾、タイ、イラン、マレーシアで導入されている。台湾の工業技術研究院（ITRI）が実施している「奈米製品検査体系計画」（ナノマーク制度）は、ナノテクの産業化を戦略的に支援・促進するものである。イランやマレーシアもこれに倣ったナノテク認証制度を導入している。

・ISO

国際標準は、客観性のある科学的知見にもとづき国際的な合意の下で形成された文書であり、国際標準に準拠したナノ材料は、その信頼性を市場開拓にあたっては特にその効果を発揮すると期待される。ナノテクに関する国際標準化は、ISO/TC229（ナノテクノロジー）において主導的に進められており、英国が幹事国である。ISO/TC229は、ナノ材料の用語・命名法（JWG1）、計測と特性評価（JWG2）、環境・健康・安全（WG3）、材料規格（WG4）、製品と応用（WG5）の5つのワーキンググループにより構成される。これらのうち、用語・命名法ならびに計測と特性評価のワーキンググループはIEC（国際電気標準会議）/TC113（ナノエレクトロニクス）と合同ワーキンググループ（Joint Working Group：JWG）を形成している。 ISO/TC229は2020年8月現在でP-メンバー（Participating members）36カ国、O-メンバー（Observing members）18カ国が参加し、2005年のTC設置以来81の規格文書を出版しており、ISOのなかでも最も活発に活動が展開されている技術委員会の1つである。TC229の発足時に設置された3つのWGである用語・命名法はカナダが、計測と特性評価は日本が、環境・健康・安全は米国がコンビナーを務める。一方、その後に設置された2つのWGである材料規格（2008年設置）は中国が、製品と応用（2016年設置）は韓国が、各々提案してコンビナーを獲得しており、中国や韓国が積極的にナノテクの主導的立場の確保に動いていることが見て取れる。用語・命名法WGのスコープは、ナノ材料における一義的かつ一貫した用語および命名法を定義し、開発することであり、新技術の普及には不可欠なものである。ISOは、ナノ材料を「外形寸法」のいずれかが1 nmから100 nmのナノスケール、または内部構造あるいは表面構造がナノスケールの材料」と定義している。これまでに、共通的に重要なコア用語、ナノ粒子やナノファイバーなどのナノ物質に関する用語、カーボンナノチューブなどの主に炭素から成るナノ物質に関する用語、ナノ物質のキャラクタリゼーショ

ンと計測方法に関する用語、医療応用に関する用語、加工製造に関する用語などの多数の規格を出版してきた。今後も引き続き、グラフェンやリポソーム、ナノ空孔を有する構造材料などの、ナノテク応用分野における新規材料に対応することになる。

ISO/TC229特有の傾向として、設立された初期に整備された規格の多くは、ナノテク分野の技術的な進展が速いため、定期見直しのサイクルが短いTS（技術仕様書）というタイプの規格が大勢を占めていたが、ナノテクノロジーのTCが設立されて15年を経過したこともあって、昨今は定期見直しを契機に、審査も長く一度成立したら見直しの周期がTSより長いIS（国際規格）化する動きや、これまで分かれて作られていた規格を束ねて整備しようという動きなど、その規格を使う側にとって、より長期的に使いやすい形に見直す動きも現れてきている。

ISO/TC229では、ドラッグデリバリーシステムへの応用が進んでいるリポソームに関するスタディグループが米国主導で立ち上り、リポソームに係る用語規格の予備検討が始まった。リポソームの用語規格は今度、TSとして整備される可能性があり、定義された用語にもとづき、計測法の規格や安全性に関する規格が今後提案される可能性は高い。

• OECD

OECDは化学物質評価のための各種テストガイドラインを出版している。2017年に化学物質の吸入毒性（呼吸により暴露した化学物質による毒性影響）を評価するためのテストガイドラインTG412（亜急性）とTG413（亜慢性）について、ナノ材料の評価をするための改訂を行い、それらに対応したガイダンス文書GD39の改訂を行った。また、ナノ材料の評価に特化したガイドラインとして、模擬環境水中でのナノ材料の分散安定性の評価にかかるTG318も出版されている。欧州ではナノ材料の評価に特化して、OECDのテストガイドラインまたはガイダンス文書の改訂または新規作成を目的とした“Malta Project”を2017年より開始している。 OECD-WPMN（Working Party on Manufactured Nanomaterials）の場でも、それら文書の改訂または新規作成の事案が活発に議論されるようになった。

OECD-WPMNで2007年より実施されたナノ材料の試験プログラムは、13種のナノ材料を対象として、各国が「スポンサー」となり、それぞれの材料の基本情報、物理化学特性、環境動態、環境生物への毒性、ほ乳類への毒性、安全性、に関する情報を取得するものであった。試験結果は、ドシエと呼ぶ報告書とその要約としてまとめられている。2020年12月時点で、11種のナノ材料全てのドシエと、そのうち6種のナノ材料の要約が公開されている。また、2016年後半以降、OECD-WPMNから発行された文書には、さまざまな種類のリスク評価に関する調査、生体内分解性と表面配位子の評価方法、OECD試験プログラムにおけるヒト健康影響評価のためのin vitro試験方法の評価、消費者と環境暴露に関する調査、作業環境空気中の濃度測定方法、代替試験方法に関する戦略、カーボンナノチューブのトレーサーとしての金属不純物の利用、金ナノ粒子の作業環境曝露評価などがある。

また、2019年からはナノ材料に限定せず、ナノ材料固有の特性、機能性を有する材料全般を対象として、それらを先進材料（Advanced Materials）と称し、ナノ材料における検討の経験を生かした機能性材料の規制の在り方についての検討が進められている。

• 欧州

EUのナノ材料の規制の観点は常に重視され、ナノEHSは継続的に取り組むべき重要項目とされている。Horizon 2020（2014～2020年度）では、「卓越した科学」、「産業界のリーダーシップ確保」、「社会的課

題への取り組み」の3つのプライオリティが設定された。このうち「産業界のリーダーシップ確保」において、「実現可能かつ産業的な技術でのリーダーシップ」（Leadership in Enabling and Industrial Technologies：LEIT）のなかにICT、バイオテクノロジー、先進製造プロセス（Advanced Manufacturing and Processing）、宇宙と並んでナノテクノロジー、先進材料（Advanced Matarials）が位置づけられている。特にナノテクノロジーと先進材料は、先進製造プロセスとバイオテクノロジーと合わせて、LEIT-NMBP（Nanotechnologies, advanced Materials, Biotechnology, advanced manufacturing and Processing）として推進されている。 Horizon 2020 LETI-NMBPの2018年度以降のワークプログラムでは、「オープンイノベーション・テストベッド」としてナノ材料に関する多くのテーマが含まれている。また、ナノEHSに関しては、「ガバナンス、科学にもとづくリスク評価と規制面」として、「ナノテクノロジーのリスクガバナンス（Risk Governance of Nanotechnology）」、「ナノインフォマティクス：材料モデルから予測的毒性学・生態毒性学へ（Nanoinformatics：from materials model to predictive toxicology and ecotoxicology）」、「多成分系ナノ材料の振舞い：デザインによる安全、科学から規制へ（Safe by design, from science to regulation：behavior of multi-component nanomaterials）」など、ナノEHSに関するテーマが強力に推進されている。それとともに、最近の欧州の大きな動きとして、2050年に温室効果ガスの排出量を正味でゼロにすることをめざした「欧州グリーンディール」政策と連動した動きが、化学物質管理戦略にも影響を与えている。化学物質のライフサイクル全体にわたって、ヒトや環境への影響を考慮した持続可能な化学物質戦略が検討され、ナノ材料に関しても、廃棄物の管理やリサイクルの可能性まで含めた製品設計の必要性に関する考え方が浸透し、安全設計（Safe-by-design）に関する議論が活発化している。

欧州には、Horizon 2020 のもとで “NanoSafety Cluster” というプラットフォームが存在する。ナノ材料のリスク評価、伝達、情報交換のツールを開発し、リスク管理の基盤を構築するという明瞭な目標を設定している。 EU全体の主要研究機関および規制官庁の共同でClusterを形成しプログラムを推進している。この枠組み・傘下に多数の新プロジェクトを発進させる構造が確立されている。 Clusterを傘にして、規制当局や国研だけでなく、大学、NGO、NPO、産業界、シンクタンクなど、多様なステークホルダーがプロジェクトに参画している。OECDの項で記載した “Malta Project” や、規制当局によるリスク評価やナノ材料の製品設計のための安全性評価を促進するためにグルーピングおよびリードアクロス法を用いた評価手法のためのフレームワークを開発し提供することを目的とした “GRACIOUS Project” が2018年に開始された。さらに2019年からは、“RiskGONE”、“NANORIGO”、“Gov4Nano”、“NanoSolveIT”、“NanoInformaTIX”、さらに2020年からは “NanoHarmony” といった略称の、さまざまなプロジェクトが推進されている。このことからも、本領域は今後も欧州が世界の流れをリードし形成していくことが予想される。

ECのREACH委員会は2018年12月、REACH規則の下でナノ材料として登録され市場に導入される物質とその量に関する理解のギャップを埋めるため、ナノ材料登録必要条件を明確にするREACH規則付属書を改定した。改定内容にはナノ材料の登録及び登録更新を2020年1月までに実施することが含まれていた。ECHAはこの改正により多くの材料がナノ材料として登録更新、登録されることを期待していたが、実際には施行後1年経っても、期待していた数の登録更新が行われず、運用には課題が残っている。改定されたのは付属書I、III、VI、VII、VIII、IX、X、XI、XIIである。改定内容の骨子では、ナノ材料の定義は「欧州委員会によるナノ材料の定義に関する勧告（2011年）」に従うものの、新たな用語として「ナノ形態」（nano-form）が定義された。また、ナノ材料は表面修飾等により多様であることから、いくつかのナノ材料についてハザード評価、暴露評価、リスク評価結果が同じものはグルーピングし、グループとして評価し、それらをナノ形態のセットとして登録・評価が可能とした。各ナノ材料/各ナノ材料のグループについて、「粒子サイズ」、「形状」、

「表面特性」、「製造」、「使用」、「暴露」の各情報について報告する。遺伝毒性試験としてAmes試験が適用できない場合は、1つ以上の哺乳類細胞を用いたin vitro変異原性試験/国際的に認識されている他のin vitro試験にて代用する。人への暴露の可能性がある場合を除き、急性毒性試験は吸入経路とする。吸入経路での、短期反復投与及び亜慢性毒性情報を作成することや、毒物動態学的挙動の評価等である。

上記のような改定内容に対して、日本の企業もその対応を求められることになる。また、吸入経路での毒性試験についても、日本では国内の試験機関が限られているために、欧州に輸出を検討している企業等においても、試験実施の制約が大きいことに、懸念がある。

• 米国

国家ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）には、プログラムコンポーネント領域（Program Component Area：PCA）の5領域の1つに「環境・健康・安全（ナノEHS）」領域がある。潜在的な環境、健康、安全への影響に焦点を当てた研究開発の取り組みは、責任ある開発に不可欠であるとしてNNIの開始以来、現在まで重要目標として継続されている。ナノEHSと、潜在的な倫理的・法的・社会的影響（ELSI）の両方が含まれており、労働者、消費者、および環境を保護することを目的としている。また、これらの知識は一般の人々の信頼性と規制の確実性を確立し、ナノテクのイノベーションの市場移行を促進するものとしている。ナノテクの応用市場セグメントの多様性を考えた際に、米国のイノベーションと産業競争力にとって不可欠と位置づけられており、この点は日本のそれとは大きな違いである。過去NNIではナノELSI・EHS関連プログラムに累積で13億ドル以上を投資してきた。 NIH、NIOSH、NIST、NSFなどの機関がナノEHSの知識ベースを拡大する基礎研究を継続的に行っている。 NIHのナノEHS研究はNIEHS（国立環境衛生科学研究所）が主導しており、工業ナノ材料への生体の応答に関与する分子および病理学的経路の基本的理解を得ることをめざしている。 NIEHSにおけるNational Toxicology Programは最近、労働者の低容量暴露による潜在的な健康影響をよりよく理解するために、齧歯類モデルを用いた多層カーボンナノチューブの吸入による免疫系への影響評価を完了した。 National Toxicology Programのもと、FDAとの協力的な取り組みと、ナノプラスチックに関する省庁間議論への積極的な参加は、2021年以降も優先事項である。 FDAのNational Center for Toxicological Research（NCTR）とOffice of Regulatory Affairs（ORA）は、ナノ材料のリスクをよりよく理解するために、高度なツール、安全性評価、スタッフのトレーニング、標準化手法、および方法論の開発に投資することを計画している。NIOSHは、空気中のナノ粒子の検出と測定が可能な直接読み取り装置の開発、試験、評価を計画している。産業界と協力して、ナノ材料のライフサイクルを通してナノ材料のリスクの「実世界」での実用的な評価方法を開発し、ナノカーボン、金属ナノ粒子、ナノセルロース、ナノクレイ材料の安全性を評価する。 NISTは、ナノプラスチックを評価するナノ流体測定装置と光学顕微鏡法に関する研究開発を確立する。また、ナノ粒子の特性評価に使用される機器の正確な較正を可能にするために、ポリスチレン、金、シリカを含むさまざまな材料とサイズのナノ粒子標準物質（SRM）の開発も行っている。空気中の人工ナノ粒子への消費者の暴露を評価するための計算ツールの改良を続けている。 NSFは、工学局のナノEHSプログラムの名称を「ナノスケール相互作用」に変更しており、持続可能なナノテクノロジーセンターを支援している。また、NSFは、動物や人間の健康との関連を含め、環境中でのナノプラスチックの特性、挙動、反応性の基礎となる科学的な疑問に関心を持っている。 DOEとNSFは、プラスチックのリサイクルとアップサイクルを改善し、プラスチック廃棄物を最小限に抑える技術にも力を入れている。

米国政府は、ナノ材料およびナノテクノロジー対応製品の安全性を確保することについて、世界中の規制機関および研究機関と関心を共有している。 NNI各機関とNNCOは、二国間の議論や様々な多国間フォーラ

ムを通じて、国際的なカウンターパートと情報を共有している。例えば、2019年9月、FDAは、イタリアのストレーザで欧州委員会共同研究センターと共同で、ナノテクとナノプラスチックに関する規制科学に関するグローバルサミット（GSRS19）を共催した。サミットには30カ国以上の規制当局や関係者が参加し、ナノテクとナノプラスチックの規制科学における研究のギャップと優先事項を特定した。 NNIの各機関はまた、ナノプラスチックの研究やラウンドロビン試験に取り組む関連国際機関とも連携している。 NNCOと欧州委員会は、米国-欧州ナノEHS研究コミュニティ（CORs）を積極的に推進している。 CORsを構成する7つのテーマ別コミュニティは、EU-USロードマップ・ナノインフォマティクス2030など、多くの具体的な成果物や共同研究を推進している。

米国当局は、包括的な規制は明示しておらず、EPA（環境保護庁）が多層カーボンナノチューブに対する個別のSNUR（重要新規用途ルール）を行った以外は、業界向けにはナノ材料の特性に応じた物性が引き起こす生体影響を個別に評価するべきであるというガイダンスを示すにとどまっている。2017年より、製造ナノ材料の基本情報、暴露、有害性に関する情報を報告することを求めることとなった。技術的な試験法などの開発研究においては、欧州と相互の評価機関で連携した評価ストラテジーの提言を行うなど、政策レベルも含めて欧州との連携が進んでいる。

また、NNIの4つのゴールの1つである「商業的および公共の利益のための新技術の製品への移転の促進」において、「標準開発機関との協力（Working with standards developing organizations）」と題して、国際標準化団体（ASTM International、IEC、ISO）との協働をあげている。特にISO/TC229に対しては、NISTを中心として積極的にナノテクの国際標準化に貢献している。具体的には、ナノ材料とナノテクの安全性に対する信頼を高めるうえで重要な国際標準規格を開発し、貿易と商取引を支援することにより、ナノテクの技術的な成長と商業化に貢献している。そのような標準化の例には、ナノ製造プロセスの用語、粒子サイズ分布の計測方法、およびナノ材料含有ポリマー複合材料から製造されたナノ材料の遊離評価方法などが含まれている。

米国では化学物質管理の基本的な枠組みである有害物質規制法TSCA（Toxic Substances Control Act）の46年ぶりとなる全面的な改訂が、数年の議論を経て2016年に成立している。TSCAにおいてPMN（新規物質の製造前届出）を課しており、ある程度のリスクが懸念される場合にはSNUR（重要新規用途ルール）が制定されるような運用を行っている。 TSCAにおけるセクション8（a）の下に、ナノ材料の製造者及び加工者に対して「報告・記録保管を義務付ける規則」を提案した（2015年3月）。その後米国官報で最終規則（ナノスケールで製造または加工される特定の化学物質に関する報告及び記録保持の義務を定める、TSCAにもとづくもの）を公開し（2017年1月）、最終的に2017年8月14日発効、同時に最終ガイダンスも発行された。

この規則内容骨子は、ナノ材料の定義として「一次粒子、強凝集体（aggregate）、弱凝集体（agglomerate）が1～100nmのサイズの範囲内であって、そのサイズゆえにユニークで新しい特性や性質を示すような形態（form）で製造又は加工されている、25℃及び大気圧で固体である化学物質」に適用される。報告すべき情報が明記され、1回限りの電子報告が義務化された。また記録保管のために報告者は、報告書及び報告したデータの復元に必要な資料を3年間保管する義務がある。報告内容の一部または全部を営業（企業）秘密情報として指定できる。ナノ材料定義の特徴として、寸法に加えて、「そのサイズゆえにユニークで新しい特性や性質を示すような形態」をうたっており、欧州の定義とは異なるということが着目点であろう。また、報告すべき情報は、特定の化学的アイデンティティ、生産量、製造と加工の方法、使用・暴露及び放出の情報、利用可能な健康及び安全性のデータを含む特定の情報、である。

• アジア

アジア圏では、中国、台湾、韓国、シンガポール、マレーシア、タイ、イラン、インドなどで安全性評価に関する研究開発と、標準化への取り組みが活発である。例えば、中国政府は2001年以来、ナノテクに関する公的予算の7%をナノ安全に継続的に配分している。特に近年の大幅な研究予算増を考慮すると、非常に大きな予算が配分され続けていると考えられる。環境・健康へのリスクを定量化するための標準プロトコル開発や、食品や医療行為を通じて取り込まれる可能性のあるナノ栄養物質を規制するガイドライン作成をサポートするなどしている。中国科学院の国家ナノ科学・ナノテクセンターに、ナノ材料生体影響評価・ナノ安全ラボが設置されている。

韓国では、2018年に関連10省庁の合同で作成した「第3次国家ナノテクノロジー指導（2018～2027年）」を発表した。ナノテク6大分野の1つとしてナノ安全を指定している。 K-REACH施行令（2018年1月施行）のもとナノ材料を定義し、「有害性評価が必要であると認められる化学物質」にナノ材料を追加した。

極めて活発な活動を展開しているのはイランである。イランはアジア・ナノ・フォーラム（ANF）を通じてEU圏と連携し、“EU-Asia Dialogue on NanoSafety”を開催するなど、ナノ安全や標準化を国際的に情報共有することや国際連携を模索して取り組んでいる。また、世界で最初に台湾が始めた「奈米製品検査体系計画」（ナノマーク制度）は、ナノテクの産業化を支援・促進するものだが、イランやマレーシアもこれに倣った認証制度を導入している。マレーシアはナノテク認証プログラムNANOVerifiedを運営している。

• 日本

わが国におけるナノテクのELSI/EHSに関する取り組みは、経産省やNEDO等の大型プロジェクトが2016年頃までに終了している。第3期科学技術基本計画において内閣府の連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発」が省庁連携施策の枠組みで実施された（2007～2010年）が、これ以降は包括的な施策はない。2020年現在、化審法において、ナノ材料であるということによる届け出義務等の規制は課せられていない。ただし、ナノ材料情報収集・発信プログラムとして、カーボンナノチューブ（CNT）、カーボンブラック、二酸化チタンなどのナノ材料を製造している事業者に対して、自主的な情報提供を呼びかけ、情報提供シートを公開・適宜更新している。厚生労働省は2016年に、カーボンナノチューブ（の内MWNT-7）をがん原性指針の対象物質に追加し、労働暴露に関する指針を示している。 IARC（国際がん研究機関）の評価では、多層CNTの一種であるMWNT-7はグループ2B（ヒトに対する発がん性が疑われる）、その他の多層CNTと単層CNTについてはグループ3（ヒトに対する発がん性が分類できない）とされた。 MWNT-7は、日本バイオアッセイ研究センターにおいて実施されていた吸入暴露（全身暴露）による2年間の発がん性試験の結果、がん原性が確認されたものである。また、MWNT-7とは異なるタイプの多層CNTを用いたラット気管内投与試験（投与後2年間観察）において、中皮腫と肺がんの発生が観察されたとする報告がなされた。ただし、これらはいずれも特定タイプの多層CNTであり、あらゆる多層CNTに対するものではないことには留意が要る。多様なCNTの発がん性の懸念やその実態を明らかにすることの重要性は高まっているが、がん原性試験は一般に5年程の期間と数億円規模の費用を要するため、企業が独自に実施することは実現していない。公的な第三者機関による評価とその評価データの蓄積が重要であろう。なお、CNTの比較となる「アスベスト」がクラス1（人に対して発がん性がある、他にはアフラトキシンやタバコ煙などがこのクラス）に分類されていることに比べて、ある程度差別化されたということを受け、少しずつであるが社会の受容が進みつつあるという産業界の判断も加わったためか、近年徐々にCNT応用製品が上市されている。

これまで日本は、CNTを中心としたナノ炭素材料を対象として、NEDOプロジェクトが多数実施された。事業者による自主安全管理技術の構築を目的とし、細胞試験による簡易な有害性評価技術を開発し、さらにこれを補完する動物実験の評価手法と実施例を加えた手順書が公開された。また、作業環境での簡便な暴露計測手法やナノ炭素材料が用いられた製品からの排出や暴露の評価手法を開発し、これらの手法と具体的な計測事例をまとめた手引きが公開された。また、経済産業省プロジェクト「ナノ材料の安全・安心確保のための国際先導的安全性評価技術の開発」（2011～2015年度）では、評価の効率化のため類似のナノ材料を集約して評価するための判断基準（同等性判断基準）の構築を目的として、二酸化チタン、酸化ニッケル、二酸化ケイ素のナノ材料を対象としたケーススタディの結果がまとめられた。これらの成果をOECDへ発信するため、経済産業省によるフォローアップ事業「2016、2017年度化学物質安全対策（ナノ材料気管内投与試験法等の国際標準化に関する調査）」が実施され、気管内投与試験の国内ラボ間の比較試験が行われた。

このようなプロジェクト終了後、産業技術総合研究所の安全科学研究部門が引き継いで2017年よりウェブサイトにて「リスク評価書」として公開している。同安全科学研究部門は「Nano Safety Web Site」としてナノ炭素材料の安全性に関する研究成果等をワンストップで発信するとともに、世界各国・各機関の工業ナノ材料に関する法規制やガイドラインについての動向も集約・公開している。さらに、産業技術総合研究所のナノチューブ実用化研究センターのホームページ上でも、2017年12月より「リスクマネジメント関連情報」を発信するなど、実用化橋渡しの公的研究機関がELSI/EHSに向き合っている。同様に、ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）も、「ナノカーボンFAQ」の一部として「ナノ材料の法規制及び標準化」に関するFAQを2018年より同ホームページ上から情報発信している。これらは日本の活動として、国際的にも国内的にも重要な意義を持つものである。

日本では「吸入」されるナノ材料のがん原性に関心が高く、厚生労働省により、がん原性試験対象物質の候補として、酸化チタン（ルチル形）、フラーレン、カーボンブラックとともに、銀ナノ粒子があげられている。酸化チタンについては、日本バイオアッセイ研究センターにおいて、2017年から2018年にかけて、アナターゼ型の酸化チタンナノ粒子を対象とし、ラット及びマウスを用いた2年間の吸入暴露試験が実施されている。試験結果は2020年度に公表されている。

2018年度において日本で実施されていたのは、ナノセルロースに関するプロジェクトである。上記のOECD-WPMNの試験プログラムが開始された時点では主要なナノ材料として認識されていなかったが、近年の材料開発と応用製品開発が活発である状況を受けて、リスク評価への関心が高まっている。セルロースナノファイバー（CNF）を対象とし、NEDOプロジェクト「CNF安全性評価手法の開発」（2017～2019年度）が実施された。CNFの生体への取り込みの把握に必要な検出・定量手法などからなる有害性試験手法と、粉体及び応用製品の製造・使用・廃棄プロセスなどにおける排出・暴露可能性の評価手法の開発とを目的としたプロジェクトであり、産業技術総合研究所と国内の主要なCNF事業者4社の共同により実施された。他にも、農林水産省事業 革新的技術創造促進事業（異分野融合共同研究）において、「物理処理と酵素処理を併用した木質材料由来ナノファイバーの食品等への応用」（森林総合研究所）、「セルロースナノファイバーを基材としたQOL向上のための食品・化粧品ソフトマターの開発（ナノセルロースに対する生物学的応答と安全性の評価）」（京都大学）が行われた。

このように、毒性学的関心のみならず、産業化の進行との兼ね合いにおいて、有害性評価・リスク評価の関心を集める新たなナノ材料が登場する可能性がある。規制枠組みを支える試験方法の整備に関する研究としては、気管内投与試験方法の投与手技に関するラボ間比較試験が、経済産業省プロジェクトに対するフォローアップ事業として実施された。産業技術総合研究所が取りまとめ機関となり、気管内投与試験が実施可

能な大学や受託試験機関など5機関により実施されたもので、その結果にもとづいて、気管内投与手技のラボ間・ラボ内のバラツキの大きさが把握され、経済産業省プロジェクトの成果としてまとめられた気管内投与試験の標準的手順の改良が行われた。

政策レベルの検討としては、内閣府総合科学技術・イノベーション会議のワーキンググループが主導して、2016～2017年度にかけ「ナノ材料安全問題実務者連絡会」さらに「ナノ材料安全問題府省横断有識者ワーキンググループ」が組織され検討が進められた。ナノ材料に関する安心安全の担保のため、産業界等に対する適切な安全指針・規制の提示と認可等の仕組みづくりが必要であるとされた。また、安全基準の標準化において世界をリードする機能も同時に担うことで、日本における研究開発から社会実装が加速し、国際市場で安全に使用されるナノ材料と製品を生み出すことが可能になるという方向性が共有された。ワーキンググループにおける検討を経て、CNT評価の簡易プロトコル開発の方向性がまとめられた。

この検討を活かし、厚生労働省 国立医薬品食品衛生研究所では「ナノマテリアル暴露による慢性影響の効率的評価手法開発に関する研究（2018年度～）」を開始した。過去、厚生労働省は「化学物質のリスク評価検討会（2011年12月）」で「ナノマテリアルのリスク評価の方針」を示した。リスク評価の対象候補物質として、酸化チタン、カーボンブラック、カーボンナノチューブ、フラーレンおよび銀、その他のナノ材料があげられた。酸化チタンに関しては、IARC分類が 2Bであることから有害性が高いとの前提でリスク評価の対象になり、2010年、2011年および2016年にナノ以外の酸化チタン、そして2012年、2013年にナノ酸化チタンの個人暴露測定が行われた。その結果、個人暴露測定値が、産業衛生学会が提唱した許容濃度（二次評価値）を越えたことからリスク評価検討会でリスクが高い物質との結論に至り、2017年には化学物質による労働者の健康障害防止措置検討に係わる検討会（以下措置検討会）に議論の場が移った。2017年度にはヒアリングとリスクコミュニケーションを通して、検討すべき課題が明らかにされた。そこでは、暴露に関しては本来測定すべき（有害性が高いとされる）酸化チタンを測定していないということ、有害性に関しては、日本バイオアッセイ研究センターで実施中のナノアナターゼ型酸化チタンの吸入暴露試験結果も考慮すべきこと、欧州ではラットの発がんは酸化チタン固有の問題ではなく、難溶性低毒性（poorly soluble low toxicity：PSLT）粒子（いわゆる粉じん）としての対処が必要であるとの認識が進んでいること、およびそのうえで今後の議論の進展等の最新知見を参考にし、慎重な措置検討会の運営及び行政判断を行うこと、これらが措置検討会の結論を得る前に検討すべき課題であるとした。そして2018年第1回措置検討会でこれら検討課題に対し更なる検討が必要なため酸化チタンの措置検討はいったん中断し、未処理酸化チタンのリスク評価を再度実施することになった。ただし、当面の対応として、（1）未処理酸化チタンを取り扱う事業場を対象とした暴露実態調査、（2）樹脂等と混合された酸化チタンの再発じんの可能性に係る調査、（3）EUにおける議論に係る情報収集、（4）酸化チタンに係る新たな知見の収集及び酸化チタン関係業界に対する注意喚起が盛り込まれた。その後、（1）に関しては2019年度に未処理酸化チタンメーカーおよびそれを取り扱う川下メーカーにおいて未処理酸化チタンへの個人暴露測定が実施された。本測定結果は2020年度の「ばく露評価小検討会」で報告された。また2017年4月から2019年3月までのナノ酸化チタンを用いた2年間のラット吸入暴露試験が実施され、その後2019年4月から2020年3月まで検体の病理評価が実施された。その結果は「有害性評価小検討会」で報告され、がん原性を示す証拠は得られなかったと結論された。同省のリスク評価の考え方では、「有害性評価小検討会」で二次評価値（行政措置の必要性判断）を設定し、「ばく露評価小検討会」で個人暴露測定値が報告される。そして「リスク評価検討会」では、個人暴露測定値が二次評価値を超過するか否かで当該物質のリスクの大小が判断される。現在進行中の未処理酸化チタンを例に取ると、2019年度に測定された個人暴露実測値が二次評価値（酸化チタンの評価値には、顔料酸化

チタンは1mg/m³、ナノ酸化チタンは0.3mg/m³の2種類が存在するが、安全側で考えると0.3mg/m³と比較されるか）より低ければ、未処理酸化チタンのリスクは小さいとなり、現行通り企業の自主管理継続となろう。しかし、個人暴露実測値が二次評価値を上回っていれば、詳細評価段階に移行することになる。ただし、「有害性評価小検討会」に報告予定のナノ酸化チタンを用いた2年間のラット吸入暴露試験結果が二次評価値の見直しに繋がるか否かは現時点で判断できない。

未処理酸化チタンに続き2019年度ではカーボンブラックの製造・取り扱いを行う作業者に対して個人暴露測定が実施された。2020年度以降は酸化チタンの場合と同様カーボンブラックの個人暴露測定値が二次評価値を超過するか否かの判断が行われることになる。カーボンナノチューブに関しては2015年、MWNT-7のがん原性試験結果及びIARC評価結果を基に議論され、MWCNTおよびSWCNTのリスク評価は当面実施しないこととなった。MWNT-7の流通量が少ないこと、MWNT-7以外のCNTの有害性が明確になっていないことがその理由である。フラーレンおよび銀に関しては活動着手に至っていないようであり、当初のスケジュール（平成25年度開始）に対して大幅な遅れが生じている。リスク評価の対象にするには、発がん性等の有害性が認められることが前提になっているようである。ただ現状では、MWNT-7以外の複数のCNTが上市されてきている。フラーレンや銀等も実用化が進展しつつある。

日本におけるリスク評価は先に述べたように個人暴露測定値が二次評価値を超過するか否かによって、当該物質のリスクの大小が議論されている。そのリスクが大きければ特定化学物質障害予防規則で指定され、いわゆる発がん性物質としての懸念が生じることになり、作業主任者の選任始め健康診断記録や作業記録の保管期間が30年となる。また作業環境では許容濃度を参考にした管理濃度が設定されることになる。

• ヒトにおけるナノ材料暴露実態の解明

従来の評価手法では、ナノ材料のリスク解析・評価に重要なナノ材料の定量と存在様式の同時解析が困難なこともあり、ヒトにおけるリスク解析に向けた研究はほとんど進展していない。このような背景の根幹にある問題は、ナノ材料の暴露実態の解明には、従来の評価手法（透過型電子顕微鏡や動的光散乱法など）を適用するだけでは不十分であるということによる。例えば、金属ナノ粒子の定量的解析手法として汎用されるICP-MSは、元素の選択性に優れる一方で、得られた結果は、サンプル中に含有される元素の量として検出されることから、金属ナノ粒子としての存在量を直接検出することはできない。さらに、ICP-MSを適用するだけでは、動的光散乱法などを用いた解析により得られる、存在様式（サイズ分布や分散/凝集状態など）に関する議論すら困難である。また、ナノ材料が生体・環境に及ぼす影響の質や強弱の変化は、粒子径や分散/凝集状態といった、ナノ材料の存在様式の違いに起因することが明らかとされつつある。本観点から、ハザード研究のままで終わらせることなく、ヒトがどういった種類のナノ材料にどれくらいの量、暴露しているかを同定するのみならず、ナノ材料の存在様式（サイズ分布、分散/凝集状態など）と動態の両面から、暴露実態を把握することが重要である。このような背景のもと、「種類」「量」と「存在様式」の同時解析をめざした、生体内に残留した金属系ナノ粒子の測定技術（single particle-ICP-MS）の構築・改良が試みられている。本分析手法は、ICP-MSが有する元素の選択性と元素の定量性、ならびに動的光散乱法などを用いることで解析可能な存在様式の評価といった、従来の評価手法の利点を合わせ持つことから、ナノ材料の同定のみならず、暴露実態を迅速かつ簡便に解析し、暴露実態情報を複合的に理解できることが期待されている。このように、ナノ材料とその他を切り分けられる解析手法の開発が進展し、その手法を用いた臨床情報の集積により、ヒトにおけるナノ材料のハザードを暴露実態と結びつけることができれば、「ナノ材料は、ヒトの健康に負の影響を与えうるのか」といった根本問題に迫ることが可能となり、レギュレーション策定に必要な情

報を提供可能となる。

• ナノ材料と生殖発生系の関係

胎児や乳幼児は、血液脳関門や免疫系といった生体防御機構が未発達である。したがって、化学物質暴露に対して、成人では生体影響が認められない量の暴露であっても、致命的な有害事象を誘発する可能性が指摘されている。げっ歯類や初代培養細胞を用いた検討においては、これまでに、ナノシリカ粒子、ナノ酸化チタン、ナノポリスチレン、銀ナノ粒子といったナノ材料が胎盤に移行しうる事例が報告されている。また、ナノ材料による胎盤関門の透過機構としては、クラスリン-カベオリン介在性のエンドサイトーシスの関与や、ナノ材料の直接的な影響により関門機構が破綻する可能性、また最近では、ナノ材料が血管内皮細胞における物質透過性を向上しうることが示され、血液胎盤関門などの生体バリアの透過性を亢進するといったことも示されつつある。一方で、その胎盤透過率は低いものと考えられ、透過性を規定する要素としては、粒子サイズの他に、表面性状をはじめとする、粒子の物性の違いが一因としてあげられる。血液胎盤関門を透過しうるナノ材料は、胎盤に対するハザードを呈する可能性が報告されており、これまでにさまざまな素材、物性を有するナノ材料を対象とした研究が取り組まれている。

• ナノ材料と脳神経系の関係

近年の疫学研究により、PM2.5などの環境中微粒子を含め、天然の外因性細胞外微粒子の吸入暴露が呼吸器系のみならず、脳・神経系に影響を及ぼす可能性が指摘されている。ナノ・マイクロ材料の場合、吸入暴露後に哺乳動物の鼻腔や気管支、肺胞領域への沈着のみならず、脳神経系にまで到達する可能性が示されている。微粒子が、鼻腔-脳経路などを介して脳内に移行し、脳神経系疾患のリスク因子となる可能性も指摘されている。さらに、出生前のナノ二酸化チタンの暴露が、生理的発達に大きな変化を引き起こすことなく、自閉症スペクトラム障害をはじめとした神経発達障害に関連する行動障害を誘発する可能性なども報告されている。現状、ナノ材料の暴露とヒトにおける神経発達障害との連関については知見に乏しいものの、これらの報告は、ナノ材料の出生前暴露が、自閉症スペクトラム障害や他の神経発達障害の病因としてはたらく可能性を示すものである。

• ナノ材料と免疫系の関係

生体応答のなかでも、免疫細胞は異物を生体内における防御機構の一部として認識しているため、宿主の免疫に対する影響は特に重要である。ナノ材料による免疫活性化作用と抑制作用のいずれについても多くの報告がなされており、最近ではナノ材料による抗炎症、免疫抑制作用に注目が集まっている。ナノ粒子は、工業的な環境だけで精密製造されるのみならず、生活環境下においても、汗などによって溶出したイオンが再凝集することで、ナノ粒子が自然生成しうることが報告されている。ヒトはアクセサリーなどを身に着けた際に、汗などにより溶出した金属イオンのみならず、そのイオンが再凝集することで生成した、金属ナノ粒子にも暴露している可能性が考えられる。本観点において、金属アレルギーの発症における金属ナノ粒子の関与が明らかとされ、微粒子への暴露に着眼した、新たな病態発症機序が提唱されている。このように、金属アレルギーの発症に対する有用な動物モデルが存在しない現状において、本モデルの病態発症機序を解明することで、ヒトの金属アレルギー病態の理解にもつながることが期待されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

・ナノ計測に関して、日本では欧州や北米におけるナノ材料規制、特にサイズとサイズ分布評価に対応して、日本が主導している電子顕微鏡や分球法を利用した粒径分布計測のISO/TC229 国際規格（IS）化が進められ、投票や出版に向けての取り組みが進展している。米国と日本が共同リーダーとなって進めた透過型電子顕微鏡を用いたナノ粒子の粒径分布測定方法については国際規格（IS）として、2020年ISO 21363として出版された。これはOECDのテストガイドラインにもナノ粒子の特性評価方法として引用される予定である。また分級法を利用した粒径分布測定法の規格ISO/TS 21362は2018年に技術仕様書（TS）として出版された後、国際規格（IS）化することが合意され、科学的な根拠を補強するための国際的な比較試験が進んでいる。走査型電子顕微鏡（SEM）は企業のナノ材料製造時の工程管理や品質保証に利用できるものとして、産業界の関心も高い。ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）が、SEM 計測に関心のある企業10 社程度が参加する作業部会を設け、共通試料を用いたラウンドロビン試験を実施し、粒径分布計測の精度向上のためのプロトコル作成を進め、走査型電子顕微鏡を用いた粒径分布測定方法の国際規格IS 19749にその骨子を盛り込んだ。現在、規格案に対する全てのコメントが解決され、出版段階に進んでいる。また、ナノの基盤的な規格のみにならず、ナノセルロースやナノクレイといった比較的最近注目されている材料については、それぞれ国内にあるコンソーシアムの中に設置されている作業部会での議論にもとづいた規格がISO/TC229に提案され、日本主導での規格開発が進んでおり、2020年にそれぞれ出版段階に進んでいる。

・従来の化学物質とは異なり、ナノ材料の特有の性質の1つとしては、生体内での存在様式変化があげられる。特に、ナノ銀粒子などの金属素材のナノ材料では、暴露される時点では粒子であっても、生体内でイオン化され、粒子径が小さくなるうえ、粒子体の他にイオン体が共存することになる。さらに、植物や細菌では、「Biogenic Nanoparticles」といったキーワードで知られているように、金属イオンが酸化・還元を受けることで、粒子化することが報告されている。近年、これら存在様式を解析可能なsingle particle-ICP-MSなどの開発・高感度化もあって、ヒトにおいても起こりうる現象であることが明らかにされつつある。これまでの研究から、粒子の大きさや、粒子とイオンの違いは、生体応答（ハザード）の質・量に変化を与えることが知られているため、ヒトがナノ材料を暴露した後の安全性を科学的に担保していくためには、暴露されるナノ材料の物性や、暴露後の生体応答のみならず、存在様式を加味した動態解析（どこの組織には、何が、どれほど存在しているのか）が、新たな潮流となりうる。実際、新学術領域研究において、「生命金属科学」領域が提案され、一部、組織だった研究が進められているほか、Marine Biotechnology Conference 2019といった国際学会や、2020年日本毒性学会などの国内学会においても、シンポジウムが構成され、広島大学にはバイオジェニックナノマテリアル融合研究拠点が設立されている。

・ECHAは、REACHでの安全性評価と情報要求に関するガイダンスの1つである「QSARと化学物質のグルーピング（Chapter R.6）」について、ナノ材料に特有な情報をまとめた付属文書を公開した。段階的なアプローチを採用しており、まず物理化学特性に基づいて初期的なグルーピングを行い、必要に応じて試験を行うなどして有害性、環境動態、体内動態のデータを集めて検証を行う。また、REACH附属書のナノ材料に即した改定に合わせ「登録と物質の同定に関するガイダンスに適用するナノ形態の付属文書」を2019年に公開し、ナノ形態の登録に係る文書の作成に関する助言を与えている。さらに、2020年にはエンドポ

イント固有のガイダンス（Chapter R.7-1）のうち、試験材料の物理化学特性（Chapter R.7a）と生態毒性・生物蓄積性（Chapter R.7c）の更新作業が進められている。

・欧州CLH分類（Harmonized classification and labelling）：CLH分類で新たな有害性が認知されるとCLP規則（Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures）で分類と表示等が義務づけられる。酸化チタンを例にCLH分類からCLP規則に掲載されるまでを説明する。フランスからの提案をもとにECHAが酸化チタン（Titanium dioxide in all phases and phase combinations; particles in all sizes/morphologies）は発がん区分1B（吸入）に分類することを提案している（2016年5月）が、その根拠は厚生労働省のリスク評価検討会同様、IARCでの酸化チタンによるラットの吸入暴露試験結果であった。この試験結果にいたった背景は、ラット肺への過負荷な吸入が主因であり、さらには試験方法自体がOECDテストガイドラインに準拠していないものであった。 ECHAからの提案に続く次の段階はRAC Opinion（ECHAのリスク評価委員会のopinion）発出である。 RAC会合では欧州酸化チタン工業会はじめステークホルダーからも毒性学者が技術的議論に参加し、上述した問題点を提起したことにより、酸化チタンの発がん性区分は1B（吸入）ではなく区分2（吸入）が妥当である旨のRAC Opinionに至った（2017年6月）。この議論の中で特筆すべきは、ラットの発がんは酸化チタン固有の有害性故では無く、難溶性低毒性粒子（いわゆる粉じん）を過剰に吸入した事による二次的な作用により発がんにいたったとの見解が示された点である。次のステップが実質的に最終ステップであり、欧州委員会と各加盟国との意見調整が行われた。基本的には欧州委員会提案は加盟国全体のコンセンサス（コンセンサスが得られない場合は投票）を経て可決されることが通常であるが、酸化チタンの場合多くの国が欧州委員会提案に反対の意を表明し混乱した。この間複数回の委員会が開催され欧州委員会側は加盟国が歩み寄れるよう規制対象の酸化チタンの範囲を【気中を漂う直径10μm以下の粒子を1%以上含む粉状の粒子】に狭め、注釈を付けたがコンセンサスを得るにはいたらなかった。ところが2019年夏大きな制度変更があった。従来各加盟国とのコンセンサスまたは投票が必要であったが、欧州委員会の権限でCLH分類を採択できる委任法案が可決したことから、欧州委員会は酸化チタンを含む14版ATP（Adaptation to Technical and Scientific Progress）を採択し、欧州議会と理事会に送付した（2019年9月）。欧州議会と理事会で4カ月（通常は2カ月間）の精査期間が終了し、2020年2月欧州官報が発出された。しかしこの決定には間違いがあった。上述したようにRAC Opinionでは酸化チタンには固有の有害性は無いと述べているにもかからず、固有の有害性がある物質を規制するCLP規則で酸化チタンを規制することになったことである。一連の行政手続きは既に終了しているため、この決定を取り下げるには司法手続きしかなく、現在3つのグループから酸化チタンの発がん区分取り消し訴訟が提起されている。

・米国では、平均粒子サイズやゼータポテンシャル等の物理化学特性が測定値の7標準偏差以上異なるようなナノ材料で、サイズや特性の変化をもたらす異なる製造プロセスで作られているものは、TSCAでのナノ材料の届け出に際して異なる材料として扱うこととされた。言い換えると、その範囲の材料であれば個別のナノ材料として届け出る必要はなく、ある種のグルーピングであるといえる。例えば、製造バッチ間の変動による意図しないサイズ等の変動があった場合や、ナノ材料の変更を意図しないような製造プロセスの変更があった場合には、個別の届け出は必要ないとされている。その他、最近出版された論文や報告書等としては、二酸化チタンナノ材料の遺伝毒性に関するグルーピングとリードアクロスのケーススタディ、欧州の化学物質規制におけるグルーピングとリードアクロスの可能性に関する考察、ナノ材料をグルーピングする

ための仮説の構築を支援するフレームワーク（草案）などがある。また、米国はセルロースナノクリスタル、セルロースナノファイバーのリスク評価を系統的かつ網羅的に進めており、リスク評価の手法の国際標準化へ向けた動きがある。さらに、米国やカナダで商業生産が行われているセルロースナノクリスタルのリスク評価のデータを積極的に公表している。

・ナノテク・ナノ材料製品の世界市場は成長している。米国では、NNIが市場における製品化にどのように寄与しているかを明らかにし、今後の政策立案に活かすために、科学技術政策局（OSTP）と国家ナノテクノロジーコーディネーションオフィス（NNCO）がナノテクノロジーの製品化に関する情報の収集と解析を行っている。一方、日本にはこのような解析はなく、どの程度の種類・数のナノテク製品が市場に出回っているのかは不明である。ナノテクに関する統計・情報を提供しているStatNano.comが運営するNanotechnology Products Databaseには、353件の日本製品が登録されているが（2018年6月時点）、これが全てではない。日本では、ナノカーボン材料の研究開発・製品化の現状を俯瞰することのできるデータとして、業界マップが2018年9月にナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）より公開され、2020年7月に更新されている。

・教育プログラムに関して、米国や台湾の取り組みが初期のころから継続的に行われている。米国NNIでは、大学・大学院生を対象とするプログラムだけでなく、小学生から社会人までの幅広い年齢層を対象とした学習用教材やプログラムが開発されている。また、ナノテク教育を行う教員に向けた授業のモデルプランの提案、あるいは教材の開発がさかんに行われている。

台湾は、米国に倣ったナノテク教育プログラムを2002年より実施している。小学生～高校生（K-12）、大学・大学院生、教員に向けてナノテクノロジー学習・教育を支援するプログラムである。プログラムの中心は学生と教師であるが、社会人・市民なども対象とされている。例えば広く一般にナノテクについて知ってもらうため博物館と連携してバスで全国を巡回するMobile Museumという展示プログラムも実施された。このプログラムでは、低学年からナノテクに親しんでもらうための工夫としてアニメーション映画やコミックブックを作成するなどもしており、日本で開催される世界最大の国際ナノテク展示会“nano tech”でも、本プログラムで開発された学習用教材が毎年展示されている。（わが国では、2005～2006年度に、「ナノテクノロジーをテーマとした博物館活動の事例調査」が行われたが、現在、ナノテクを前面に出した展示等は博物館、科学技術館等で見当たらない。）また、教員向けには研修プログラムの開発、授業計画のモデルプランやマニュアルの開発などが行われている。各地の教育機関を繋いで学習用の教材データの共有やeラーニングの提供などが行われている。同時に、米国、台湾ともナノテク教育プログラムには、ナノテク・ナノ材料のELSI/EHSも含まれている。例えば台湾のK-12向けのeラーニングには「奈米安全與科技倫理（ナノ安全と技術倫理）」という項目が設けられ、有害性評価や製品認証システム（nanoMark）について紹介されている。

欧州では、フランス（CEA）におけるNanoSmileというナノテク研究開発と社会をつなぐ試みがあり、これは一時的な取り組みで終わらずに、継続的に行われている。また、ELSI/EHSのさまざまな課題に関わる活動を支える新たなプログラムとして、ECによりObservatoryNano（EUON）の提供が開始されている。EUONは、ウェブ上に設けられたポータル兼データベースである。

一方、中南米諸国や南アフリカなどの国々でも進展がみられる。国連訓練調査研究所（UNITAR）あるいは日本や米国といった国々との二国間協力による支援を軸に、研究開発計画や規制策の策定と実施、人

材育成、教育などが行われている。特にUNITARはナノ材料の安全な取り扱いに関するキャパシティビルディングの取り組みをOECDと連携して行っており、これまでにコロンビアなどの中南米、アルメニアなどの中東欧、タイなどの東南アジアの国々を対象にワークショップなどを実施している。 UNITARは、eラーニングコースの開発、政策および研究開発プログラム策定のためのガイダンスの提供なども行っている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

・ナノテク分野の国際規格において、ナノ材料の試験方法に関することに対しては、その妥当性に科学的根拠を求められる。その根拠として国際的な比較試験が求められるが、近年Versailles Project on Advanced Materials and Standards（VAMAS）の枠組みを使った比較試験が活発である。VAMASの目的は測定法の技術的基盤を提供し、標準化につながる国際的な協力を通じて、先進材料のイノベーションと実用化によって世界貿易を促進することであり、作業部会Technical Working Area（以下TWA）ごとにさまざまなプロジェクトが進んでおり、ISO/TC229に関係するTWAとしては、TWA 34（ナノ粒子の特性評価）、TWA 41（グラフェンおよび関連2次元材料）があげられる。

・「NanoHarmony」プロジェクトは、Horizon 2020を通じて資金提供され、欧州10カ国から14の専門家を集め、OECDやECHAと協力して、ナノ材料の試験において優先順位の高い8つのエンドポイントの試験ガイドラインおよびガイダンス文書の策定を支援するものである。このプロジェクトでは、試験手法開発をサポートするために、入手可能な情報の収集および利用を調整し、また、試験手法の成熟化や将来の規制開発につなげるため、データ分析や提言に必要な持続可能で国際的な専門家ネットワークを組織している。

・「InnoMat.Life」プロジェクトは、ドイツ連邦リスク評価研究所が運営する共同研究プロジェクトである。ドイツ連邦教育科学・研究技術省によって資金提供され、公共機関や学界、業界からの10のパートナーが協力し、ヒトの健康および環境リスクの効率的な評価のための基準を確立することを目的としている。このプロジェクトでは、ナノ材料に関し、設計から製造、使用、処分までのライフサイクルを通じた人々の健康と環境への影響を考慮したうえで、さまざまな形やサイズのナノ粒子だけではなく、3D印刷用の金属やポリマー粉末などの幅広い粒度分布を持つ材料、ならびに、2つ以上の物質から成るハイブリッド材料にまで研究対象を拡大し、それらのハザードポテンシャルに関してグルーピングやカテゴリー評価が推進されている。

・NBCIは、ナノ材料安全分科会（30社強の企業の集まり）を2017年10月に設立した。産業界におけるナノ材料の安全性問題に対しての関心の高さがうかがえる。大きく3つの主課題が設定され、①ナノ材料の有害性評価に関する主課題、②ナノ材料のリスク評価に関する主課題、③ナノ材料等にかかる各国の規制動向等の調査（情報収集と必要に応じ提言）、として活動が進められている。リスク評価や規制動向への関心は特に高く、官学との連携も重視しながら、運用基準の設定や事業形態のあり方等を検討している。 NBCIは特にナノカーボンの社会実装の促進に関し「ナノカーボンFAQ」を22件作成し、2018年からホームページで公開している。「ナノ材料の取扱い」「ナノ材料とは」「ナノ材料の用途」「ナノ材料の安全性」および「ナノ材料の法規制及び標準化」の観点で世の中の認識を簡潔に整理したものである。また2019年10月より冊子「ナノカーボンFAQ」を整備、ナノカーボンを使用する企業や大学・公共機関にも展開されつつあり、ナノ

カーボンの普及に一翼を担うことが期待される。さらに、「CNT取扱い管理一覧表」を作成し、nano tech 2020 で公開した。これは厚生労働省ガイドライン「ナノマテリアルに対するばく露防止等のための予防的対応について」（労働基準局長基発第0331013号2009年3月31日）の内容を簡潔に整理したうえで、より詳細な情報（例えばメーカー名や型番を使用例として記載）を追加した一覧表である。暴露防止の観点からCNTを扱う関係者にとってより実効性のある内容・活用が期待されるものである。

NBCIは2015年12月にナノカーボン実用化WG（100社参加、2020年8月現在）を設立し、共通の評価方法の検討、技術情報・ビジネス情報の共有の場として運用してきた。その1つとして「ナノカーボン業界マップ」がある（図2.7.1-1）。ナノカーボン素材を生産する企業から始まり、中間部材を経て最終製品に繋がるサプライチェーンを横軸にとっている。これらの基盤をなす製造装置や評価・分析装置を提供している企業もマップに記載されている。

ナノカーボンの代表であるCNTは、リチウムイオン電池導電助剤としての需要が増大すること、全固体電池等の次世代電池においては更にその導電機能が発現しやすいことが期待されている。複合材料向けでは電子部品の搬送用トレー、自動車のフューエル（燃料供給）部品等の用途が本格化すると見込まれている。またCNTに関する発表論文の最近の傾向は、基礎科学に関する内容に加え、その応用に関する割合が増加している。

フラーレンは化粧品、スポーツ用品、有機薄膜太陽電池、潤滑油等に機能材として使用されており、さらに樹脂添加剤分野やエレクトロニクス分野等広い用途での上市検討が進められている。グラフェンの応

図2.7.1-1　　ナノカーボン業界マップ（NBCI2020年版）

用としては、圧力センサ、透明導電性フィルム、機能性インク、電池等があげられる。またナノセルロースは食品、生活用品、文房具、スポーツ用品等で上市されつつある。このように新素材として期待されるナノカーボンはサイエンスとしての研究と同時に量産技術の研究も本格化しつつある。ナノカーボンは今までにない新素材であることから、安全性にも配慮しながら、個々の素材の持つ特殊機能・特性が活かされる本来用途を見定め、腰を据えた取り組みが必要とされる。

・ナノ懇談会：ナノ材料等の海外規制への対応を主に、関係者が集まる場として、ナノ懇談会が2018年2月に結成され運用を開始した。日本化学工業協会、日本無機薬品協会、日本化粧品工業連合会、カーボンブラック協会、日本酸化チタン工業会、日本軽微性炭酸カルシウム工業組合およびNBCIの7団体が集まるものである。海外規制、特にREACH附属書改定（ナノ規制）に関しての情報交換や対応について意見交換が行われている。

（5）科学技術的課題

・体内動態制御技術の開発：ナノ材料の体内動態解析が、生体応答（ハザード）の理解に重要であるということは、別の視点からとらえると、体内動態を制御することによって、安全性を高められることと同義である。そのため、医薬品領域を中心に、ナノ材料のDrug Delivery System研究（ナノDDS）が推進されている。現状は、単純に、Enhanced Permeation and Retention Effect（EPR効果）といったPassive Targetingや、抗体などの組織指向性分子を融合させたActive Targetingが主であるものの、存在様式を加味した体内動態が詳細に理解されれば、ナノ材料の特性に立脚し、新たな作用点にもとづいた動態制御技術の開発も同時に推進可能である。将来的に、医薬品領域のみならず、ナノ材料が汎用されている食品領域においても、体内動態制御技術（Food Delivery Sytem）が応用されることで、幅広くナノ材料のEHSに貢献することが期待される。

・ナノ材料と生体分子との相互作用：ナノ材料がタンパク質と相互作用することにより、プロテインコロナと呼ばれるナノ材料を取り囲むタンパク質層が形成されることが知られており、経口/経肺といった暴露経路の違いによって、相互作用するタンパク質の種類が変化することが報告されている。このようなプロテインコロナ構成タンパク質の変化が、ナノ材料の生体内動態や生体応答に影響を及ぼし得ると指摘され、近年、ナノ粒子とタンパク質間との相互作用に関する研究がさかんに取り組まれている。これらナノ粒子とタンパク質間との相互作用を理解し、制御することは、タンパク質の構造変化や凝集メカニズムに関する基礎的な知識の提供に直結する。さらには、ナノ材料と相互作用するタンパク質の種類/量と、生体内動態との連関が明らかにされることで、ナノ材料の物性から動態を制御し、安全なナノ材料をデザインされることが期待される。

・マイクロプラスチック問題：プラスチックゴミ問題は加速度的に大きな社会問題となり、プラスチック含有製品等の販売が規制される事態となっている。マイクロプラスチックがヒト健康に及ぼす影響評価は、まだ初期段階であるものの、マイクロプラスチックが、環境中でさらに微細なナノプラスチックへと変化するという報告もなされており、人体への潜在的健康リスクを追究していくことが、今後、中長期的にみて取り組むべき課題であると考えられる。また、マイクロプラスチックは、環境中での外的要因によって、複雑多岐な化学組成へと変化していることが示されており、その物理化学的性状や生体内での動態を解析するための評

価系の構築も希求される。加えて、重合体組成、粒子形状、表面積、密度、残留性、収着汚染物質、添加物含有量といった、マイクロプラスチック特有の因子についても考慮する必要があり、今後の研究の推進と技術開発が期待される。

・情報・アクセス・データ蓄積の国際的なディスアドバンテージ：欧州を中心に行われたさまざまな安全性評価関連のプロジェクトでは、多くの知見が蓄えられてはいる。しかし、当初から提言されてきた物理化学的性状に応じたグルーピングやカテゴリー評価が有用であるという一般的概念に対して、技術的に新しい進展があったわけではなく、金属酸化物などの特定のナノ材料に対する知見が蓄えられたにすぎない状況にもかかわらず、欧州ではフレームワークを作り、ガイドラインも整備して、REACH登録制度などのさまざまな規制・登録制度に取り込んでいる。このことは結局、さまざまなナノ材料・関連製品の安全性にかかわる情報は、個々の企業が実際に試験を行うことで作成し、それを欧州当局が吸い上げるという構図になっていくことを示し、そのようなスキーム・制度を持たない国では、官民ともにナノ材料に関する安全性情報が手に入らなくなる。さらに、欧州では動物実験が実施しにくい流れになっているが、安全性を基本的に評価するOECD試験法の多くはin vivo試験であり、現に欧米主導でin vivo吸入試験の改定が行われた。このことは、依然として現時点では欧米当局でも安全性評価のためには動物試験を必要としていることを示しており、将来的に欧米の規制当局で開発されると予想される物理化学性状に応じたグルーピングやカテゴリー評価手法開発のための基本的なin vivo試験情報は、企業から申請された企業秘密データとして公開されることはなく、対応するスキーム・制度を持たない日本を含む国々では、ナノ材料の安全性情報の収集にとり残される懸念がある。少なくとも、事業者の独自の蓄積・取り組みには限界があり、公的に、第三者が利用可能なかたちで適切に安全性情報をデータベース化し、そのデータを活用することで、新たな学術的な研究や、新規材料への評価対応、輸出入されるナノ材料の安全性をチェックし適切に規制・認可の判断をすることなどが求められる。

既に述べたように、ナノ材料のリスク評価に関する研究開発は、個々のナノ材料のリスクを明らかにするための研究と、規制枠組みを支える試験方法の整備に関する研究、特に効率的な評価枠組みを構築するための研究、に大別されるようになってきている。日本では、個々のナノ材料について、例えば多層CNTのMWNT-7をがん原性指針に追加するなどの対応は行われているが、ナノ材料に対する全体的な規制制度が存在していないこともあり、効率的な評価枠組み検討の方向性が明確になっていないことが問題である。ナノ材料製造・応用開発と同時に安全性研究を行い、安全性研究の結果をフィードバックすることで、より有害性が低く、より暴露可能性が低い製品の開発に貢献することができる。また、作業現場の適切な安全管理を支援することができる。

一方、欧米各国の規制当局は、それぞれの国や地域の化学物質管理枠組みやナノ材料の産業化の状況を前提に、届け出の際に要求するデータ項目を決定するとともに、カテゴリー化等の考え方を構築しつつある。日本の関連産業や社会が諸外国の規制に遅れることによる不利益を被らないためには、単に諸外国の規制制度の状況を踏まえるだけでなく、また、単に学術的な関心からの試験・研究だけではなく、自国の置かれた状況に即したリスク評価技術の研究開発を産学官連携の体制により進めることが必要と考えられる。特に日本で開発が先行する材料について、グローバル市場に出る際には、各国・地域の規制を前にしても科学的な安全性評価データをしっかり蓄積し、公表・発信していくことが重要である。

（6）その他の課題

・2006年に日本で開催された2nd International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology（国際対話）の際に、会議の参加国間でナノテク研究開発予算のおおよそ5～7%程度をELSI/EHSに措置することが、責任ある研究開発を進めるうえで理想的であるとされた。その後、EUはFP7と、続くHorizon 2020で、また米国はNNIの毎年度の予算でその配分率が概ね達成されている。例えば米トランプ政権下にあっても、NNI予算の内、EHS関連は全体の5%であり、中国においても7%である。翻って日本は、国際対話の後に一時的に増加傾向にあったものの、現在の状況はかけ離れた状況にある。 Horizon 2020では、社会との新しい関係のもとに研究開発を進める責任ある研究とイノベーション（RRI）が、分野横断的に取り組むべき課題とされており、ナノテクの研究開発においても他の課題と一体で取り組みがなされている。例えば、NANO2ALLプロジェクトでは、社会の価値、ニーズ、期待に適う研究・イノベーションの実施と、ナノテクに対する社会からの信頼を醸成することを主要目標として掲げ、この目標の実現のためにコミュニケーション手法の設計を行い、レポートを取りまとめている。

・日本では、毒性学を含めた安全性研究やリスク評価の体制は欧米に比較して脆弱であり、特に材料開発研究との協力体制が弱い。日本の毒性学の専門家人材は、近年、減少の一途を辿っている。日本毒性学会の最近の発表事例等をみると、産業医科大学、国立医薬品食品衛生研究所、名古屋市立大学、大阪大学、慶應義塾大学、東京理科大学等の一部の機関に限られている傾向にある。開発段階の材料については、試料の入手性の観点からもナノ材料製造・応用開発側との連携が必要となる。連携により物性や特性（材料のサイズ、濃度、表面修飾等）が多岐にわたる材料を準備することで、各物性や特性が安全性に与える影響などを詳細に評価できるようになるためである。各国が将来の発展の基礎として戦略的に位置づけるナノテクの競争優位性は、安全性研究の学術的基盤の整備と一体で行われないかぎり、なしえないだろう。日本における安全性評価研究は、個別プロジェクト課題としてごく部分的に継続している状況ではあるものの、産学官が連携した戦略的体制はできていない。このような取り組みの差は、国際市場を想定したナノ材料・ナノ製品の開発およびその競争力に影響を及ぼすようになる。さらに、今後は製品の廃棄時やリサイクル時における評価と対策手法も重要になってくる。このような背景から、産業界、特にベンチャー・スタートアップとして新規ナノ材料の事業化を行おうとする際などに、第三者的な評価を行うにも多額のコストと長期間を要する。このことが起業家のアントレプレナーシップにネガティブな影響を与え、体力的にも事業化を躊躇させる要因となってしまうことに課題がある。大企業であっても、特に日本では経営層レベルで科学技術面のELSIに関する認識不足があり、評価への十分な投資が難しく、開発がとん挫してしまうことがある。

・横断的な性格を有するナノテク標準化 母体（ISO/TC229）と、産業縦割り的な性格を有する他の標準化母体との連携・調整が必要な案件が生じている。日本では国際標準化にかかわる人的リソースが特に限られているため、連携・調整を積極的に推進する国内母体（審議の場）を醸成する必要性が高まっている。例えば、国内産業界の状況・意向を汲んだ戦略的な国際標準化提案や審議対応を強化するために、ナノテクに関係する国内審議委員会等が横断的に連携・調整する場をつくることや、そのような場がナノテクに関連する標準化動向を俯瞰し、関連標準化資源の最大活用を図ることなどが考えられるだろう。

　近年、web会議の機会が大幅に増えた。国際標準化の交渉の場では、会議での議論の他にコーヒーブレイクで個別に話すことで合意を得る細かな調整などが重要である。日本人のみに限った話ではないが、コーヒーブレイクで収集できる情報や本音が得られる重要な場が大幅に減ったことは痛手である。その分

web会議でどれだけタイミングよく自身の主張をきちん述べて味方を作るか、これは国際標準化の調整の場に出る際に新たに磨きをかけなくてはならないスキルとなるであろう。一方で、web会議が増えたということは、これまで対面会合に参加できなかった人が容易に参加できる環境が整備されてきているともいえる。ナノテクは横断的であるため、その専門人材の確保は日本だけに限らず難しい課題である。 web会議が増えることで、参加自体に対してハードルが下がることは、国内の専門家を幅広く動員しやすくなったとも言える。この環境変化をナノテクの国際標準化の場では積極的に活用していくべきであろう。

・評価試験に関しては、欧州では改定されたREACHにおいて、急性毒性試験は吸入経路が基本とされているにもかかわらず、日本では吸入暴露試験の実施機関が限られているため、自国で必要な試験ができない。国内ではこれまで気管内投与試験法の開発を進めてきたが、世界では動物試験削減の方向性にあり、日本として、ナノ材料の吸入による影響の評価試験に対する考え方を明確にし、国内規制においても、評価試験法に関する考え方を明確にする時期に来ている。それと同時に、ナノ材料を個別に評価する仕組み自体が欠けている現在の国内規制の見直しの時期でもある。こうした国内法の整備が遅れることで、ナノ材料の開発へのインセンティブが働かなくなる可能性もある。

・ナノ材料に限らず今後も創出され続けるアドバンストマテリアルのリスク評価全体を、公的研究機関が、産学と連携して定常的に担っていく必要がある。欧米にみられるように、関連する公的研究機関の研究者が「組織の壁を越えて連携する（バーチャルな）組織」を構築し、それを支える定常的な財源が課題である。特に、高度なリスク評価技術を身に着けた技術者が、プロジェクト期間の終了とともに現場を離れざるをえない状況は好ましくない。このような体制づくりは、各研究者の効率的な役割分担・負担の均等化につながるものであり、また、それぞれ得意とする評価試験を適材適所で行うことで、負担の大きい評価プロセスの投資効率を最大化することが可能になる。そのために、行政的な管理の確立を待たず、自主的にアドバンストマテリアルの種類等を把握し、さらに慢性毒性に関する情報を取得しながら安全性の高いマテリアルの自給体制構築をサポートするようなシステムをどう作るかが課題である。各企業が新規に開発するマテリアルに対して、高度な毒性学的情報にもとづいた付加価値の高い製品開発を支援することができるようになると考えられる。

・日本ではナノテクの研究者を志す人に向けた優れたカリキュラムを提供する大学・大学院は多いが、その一方で、学生がRRIの文脈に触れる機会は極めて少ない。現在の日本の大学・大学院教育のなかではそのような機会を得ることは難しい。日本では、大阪大学のナノサイエンスデザイン教育研究センターが、ナノテクの社会受容にかかわる課題をテーマとし、ナノテク・ナノ材料研究開発に携わる研究者・学生が様々な課題の最新の動向に触れる機会を提供する「特別集中講座『ナノテクノロジーデザイン特論Ａ』」を継続して開講している。

・ナノテクのRRIに関連する施策としては、日本ではJST社会技術研究開発センター（RISTEX）「先進技術の社会影響評価（テクノロジーアセスメント）手法の開発と社会への定着」（2007～2011年度）の終了後は目立った取り組みがなく、この成果を具体的に活かすような施策も実施されていない。ナノテクに限らずテクノロジーアセスメント全般について、継続した施策がないといえる。同時に人材（自然科学の素養も持つ社会科学者）の育成も課題であり、それには彼らのキャリアパスの確立も含まれる。また、ナノ材料を製

造する事業者が、官と連携してリスク評価を行い、社会に伝える機能と、社会とともに歩む研究開発文化の醸成が課題である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	取り組み水準	△	↘	・ナノ材料の安全性に対する取り組みは国家プロジェクトの多くが終了して、現在も顕在化する国家的な取り組みはほとんどみられない。内閣府はナノ安全にかかる府省横断検討会を継続できておらず、安全性評価やリスク評価がなかなか進展していない。 ・多層CNTの有害性評価研究など、個別のナノマテリアルに関して一定の成果がみられる。また、成果の活用に関しても、個別のナノマテリアル、例えばカーボンナノマテリアルなど、に関しては実施されており、活かすべき蓄積・専門家は存在する。国際標準化の体制も継続して維持され、これらの活動は世界で善戦している。 ・国際標準化提案は一定のペースで行われている。また計測分野で主導的な役割を継続。 ・ナノEHSや標準化において主導的役割を果たすには国際的なコミュニケーション能力を具備するエキスパート人材育成が急務だが、対応できていない。
	実効性	×	→	・現状は国家レベルでの基本施策が欠如しており、国研の研究者や企業技術者の自発的な貢献に依存する状況にある。 ・中長期的な実効性のある組織的取り組みが困難になりつつある。 ・特に、評価データや経験によって得られた成果の活用に関して、データ共有の仕組み構築など、改善の余地が大きいと考えられる。
米国	取り組み水準	○	→	・NNIなど国家レベルの推進体制は堅持されている。 ・ナノEHSに対する取り組みも、戦略的な体制と予算が継続されている。 ・国際標準化においてもナノEHSを中心に全分野で主導的役割を継続。 ・欧州との積極的な連携など、産官学の協調と国際連携が重視されている。
	実効性	○	→	・近年の届け出規制は現実的であり、事業者と十分なコミュニケーションのもと戦略的にルールづくりが進められている。 ・環境保護庁の取り組みなど、EHSの課題に関して確実に実施されている。
欧州	取り組み水準	◎	↗	・ナノELSI/EHSに関して旺盛な研究開発体制と潤沢な予算措置が継続中。 ・標準化に関して主導的かつ積極的。 Horizon 2020や各国のプロジェクトも多数推進。 ・REACH附属書が改訂され、ナノ形状物質が評価の対象として明記され、2020年1月1日施行された。 ・次期フレームワークのHorizon Europeへ向け、現在までの体制と蓄積を活かした準備が着々と進められている。
	実効性	◎	→	・EUとして研究開発体制が構築されており、多数のエキスパートが参加、産業界との連携も十分に図られており、実効性は極めて高い。 ・規制・登録の対象としてEUや各国でナノ形状物質のルール整備が進む。製造・輸入されるトン数に応じ情報が要求されることになってきた。 ・コミュニケーションや情報の共有に関して、利用可能なツールの開発と公開・活用がしっかりと行われている。

中国	取り組み水準	○	↗	・ナノEHSへの投資は15年以上にわたってナノテク予算の7%を継続確保。 ・国際標準化を国家レベルで重要施策に位置づけている。ナノテクの国際標準化においても材料規格においても主導的に活動。 ・国際標準化に関するデジュール標準戦略が極めて明確。
	実効性	○	↗	・ナノEHSに関する研究体制ならびに欧米から戻った研究者が重要な役割を担っている。
韓国	取り組み水準	○	→	・ナノEHSに対する取り組みは活発に国家主導で行われている。 ・ナノテクの国際標準化においてもWG5のコンビナーを獲得するなど、活発化。パフォーマンス・性能評価において主導的に活動。
	実効性	○	→	・ナノエレクトロニクスに関連する世界有数の産業を有しており、産業界と連携、国際標準化においても積極的。

（註1）フェーズ

取り組み水準：政策/制度/体制面の充実度合いや具体的活動の水準

実効性：上記取組みの実効性に関する見解・事柄

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎　特に顕著な活動・成果が見えている　　○　顕著な活動・成果が見えている

△　顕著な活動・成果が見えていない　　×　特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・有機化学物質分析・毒性評価（環境・エネルギー分野　2.2.6）
・無機化学物質分析・動態把握（環境・エネルギー分野　2.2.7）

参考・引用文献

1) D. Michael et al. ed., “ISO/TC229：Nanotechnologies”, ISO Technical Committees. https://www.iso.org/committee/381983.html（2020年12月15日アクセス）
2) Environment Directorate OECD, “Developments in Delegations on the Safety of Manufactured Nanomaterials - Tour de Table”, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials no. 87（2018）：1-82. https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2018)10&doclanguage=en（2020年12月17日アクセス）
3) Environment Directorate OECD, “Case Study on Grouping and Read -Across for Nanomaterials -Genotoxicity of Nano TiO2”, Series on Testing and Assessment no. 292（2018）：1-56. http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO(2018)28&docLanguage=En（2020年12月17日アクセス）
4) K. Moss, “OECD WPMN Expoert Meeting on Physico-Chemical Parameters Framework for the risk Assessment of Nanomaterials”, hehscenter.org（2018）. https://hehscenter.org/oecd-wpmn-expert-meeting-on-physico-chemical-parameters-framework-for-the-risk-assessment-of-nanomaterials/（2020年12月17日アクセス）
5) Horizon 2020 Work Programme 2018-2020, “5.ii Nanotechnologies, Advanced Materials,

Biotechnology and Advanced Manufacturing and Processing”, European Commision Decision C（2020）：1-48. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/main/h2020-wp1617-leit-nmp_en.pdf（2020年12月17日アクセス）
6) OECD joint meeting：Sept 12-13, “Nanotechnology experts from across the globe join forces to advance nanomaterials safety testing through Grouping and Read Across”, NanoReg2（2018）. https://www.h2020gracious.eu/news/nanotechnology-experts-from-across-the-globe-join-forces-to-advance-nanomaterials-safety-assessment（2020年12月17日アクセス）
7) GRACIOUS Project, “GRACIOUS Framework for Grouping and Read-Across of Nanomaterials for Regulatory Risk Assessment and Safe-by Design”, gracious（2018）：1-71. https://www.h2020gracious.eu/files/documents/GRACIOUS%20Draft%20framework%2020180620%20circulation.pdf（2020年12月17日アクセス）
8) A. Mech et al., “Insights into possibilities for grouping and read-across for nanomaterials in EU chemicals legislation”, Nanotoxicology 13, no.1（2018）：119-141. doi：10.1080/17435390.2018.1513092
9) K. Arnold, “NIOSH Current Intelligence Bulletin：Health Effects of Occupational Exposure to Silver Nanomaterials”, SciPol.org. https://scipol.duke.edu/track/revised-draft-niosh-current-intelligence-bulletin-health-effects-occupational-exposure-0（2020年12月16日アクセス）
10) R. J. B. Peterset al., "Silicon dioxide and titanium dioxide particles found in human tissues", Nanotoxicology 14, no. 3（2020）：420-432. doi：10.1080/17435390.2020.1718232
11) M. B. Heringa et al., "Detection of titanium particles in human liver and spleen and possible health implications", Particle and Fibre Toxicology 15, no. 1（2018）：15. doi：10.1186/s12989-018-0251-7
12) D. Semenova and Y. E. Silina, "The Role of Nanoanalytics in the Development of Organic-Inorganic Nanohybrids-Seeing Nanomaterials as They Are", Nanomaterials（Basel）9, no. 12（2019）：1673. doi：10.3390/nano9121673
13) L. Zhang et al., "Gestational exposure to titanium dioxide nanoparticles impairs the placentation through dysregulation of vascularization, proliferation and apoptosis in mice", Int J Nanomedicine 13（2018）：777-789. doi：10.2147/IJN.S152400
14) H. Juch et al., "Dendritic polyglycerol nanoparticles show charge dependent bio-distribution in early human placental explants and reduce hCG secretion", Nanotoxicology 12, no. 2（2018）：90-103. doi：10.1080/17435390.2018.1425496
15) B. B. Dugershaw et al., "Recent insights on indirect mechanisms in developmental toxicity of nanomaterials", Part Fibre Toxicol 17, no. 1（2020）：31. doi：10.1186/s12989-020-00359-x
16) F. Huaux, "Emerging Role of Immunosuppression in Diseases Induced by Micro- and Nano-Particles：Time to Revisit the Exclusive Inflammatory Scenario", Front Immunol. 9（2018）：2364. doi：10.3389/fimmu.2018.02364

17) VAMAS「新材料及び標準に関するベルサイユプロジェクト」物質・材料研究機構. https://www.nims.go.jp/vamas/index.html（2020年12月16日アクセス）
18) 経済産業省製造産業局化学物質管理課化学物質リスク評価室「ナノマテリアル情報収集・発信プログラム（概要）」経済産業省.
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano.html（2020年12月16日アクセス）
19) 厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課化学物質評価室「令和２年度第２回化学物質のリスク評価に係る規格検討会試料」.
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_13359.html（2020年12月16日アクセス）
20) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「ナノ炭素材料の安全性試験総合手順書を公表」
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100719.html（2020年12月16日アクセス）
21) ナノテクノロジー標準化国内審議委員会事務局「ナノテク国際標準化ニューズレター［2020 特別号］」国立研究開発法人産業技術総合研究所.（2020）：1-26. https://unit.aist.go.jp/stapc/tc229/nanoletter/NanoLetter_S2020.pdf（2020年12月16日アクセス）
22) ナノセルロースジャパン事務局.
https://www.nanocellulosejapan.com/（2020年12月16日アクセス）
23) Clayteam事務局 プレスリリース 国立研究開発法人産業技術総合研究所化学プロセス研究部門.
https://unit.aist.go.jp/cpt/clayteam/results/press.html（2020年12月16日アクセス）

付録1　検討の経緯

本報告書はCRDS における俯瞰に関連する諸活動および下記の報告書などに基づいている。各報告書はCRDSのホームページからダウンロード可能である。

1. 俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会
「光技術の俯瞰　～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～」
CRDS-FY2019-WR-06
2. 俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会
「ナノテク・材料研究が実現する新興感染症対策能力の持続的強化　～ポストコロナ時代を見据えて～」
CRDS-FY2020-WR-05
3. 俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会
「プロセスインフォマティクスの俯瞰　～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～」
CRDS-FY2020-WR-06
4. 俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 全体会議
「ポストコロナ時代における研究開発・人材育成手法の変革と注目すべき技術領域」
CRDS-FY2020-WR-10

2019～2020年度CRDS俯瞰ワークショップ　ナノテクノロジー・材料分野（区分別分科会および全体会議）開催状況

2019年12月23日	光技術の俯瞰　～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～
2020年2月11日	プロセスインフォマティクスの俯瞰Ⅰ ～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～
2020年7月12日、18日	ナノテク・材料研究が実現する新興感染症対策能力の持続的強化 ～ポストコロナ時代を見据えて～
2020年7月29日	プロセスインフォマティクスの俯瞰Ⅱ ～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～
2020年10月3日、7日	全体会議

以下に各ワークショップの招聘者を掲載する。
※ 五十音順、敬称略、所属・役職は原則、ワークショップ参加時のもの。

1. 光技術の俯瞰 ～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～

岩國　加奈	電気通信大学レーザー新世代研究センター　助教
内田　淳史	埼玉大学数理電子情報部門　教授
枝村　忠孝	浜松ホトニクス中央研究所材料研究室　副研究室長
尾松　孝茂	千葉大学大学院工学研究院　教授
小澤　祐市	東北大学多元物質科学研究所　准教授
小関　泰之	東京大学大学院工学系研究科　准教授
河田　聡	大阪大学　名誉教授
高原　淳一	大阪大学大学院工学研究科　教授
中野　義昭	東京大学大学院工学系研究科　教授、光技術動向調査委員会　議長
並木　周	産業技術総合研究所電子光技術研究部門　副研究部門長

納谷　昌之　　富士フイルム株式会社 R&D 統括本部 解析技術センター　研究主幹
納富　雅也　　東京工業大学理学院　教授、NTT 物性科学基礎研究所　上席特別研究員
橋本　俊和　　NTT 先端集積デバイス研究所　主幹研究員
馬場　俊彦　　横浜国立大学大学院工学研究院　教授

2. ナノテク・材料研究が実現する新興感染症対策能力の持続的強化 ～ポストコロナ時代を見据えて～

秋永　士朗　　アキュルナ株式会社　代表取締役社長
伊藤　嘉浩　　理化学研究所伊藤ナノ医工学研究室　主任研究員
奥野　恭史　　京都大学大学院医学研究科　教授
片岡　一則　　（公財）川崎市産業振興財団ナノ医療イノベーションセンター　センター長、
　　東京大学未来ビジョン研究センター　特任教授
加藤　隆史　　東京大学大学院工学系研究科　教授
川嶋　健嗣　　東京大学大学院情報理工学系研究科　教授
合田　圭介　　東京大学大学院理学系研究科　教授、UCLA　教授 、武漢大学　教授
田島　俊樹　　カリフォルニア大学アーバイン校　教授
立川　愛　　国立感染症研究所　室長
立間　徹　　東京大学生産技術研究所　教授
津本　浩平　　東京大学大学院工学系研究科　教授
野地　博行　　東京大学大学院工学系研究科　教授
馬場　嘉信　　名古屋大学未来社会創造機構ナノライフシステム研究所　所長、
　　量子科学技術研究開発機構量子生命科学領域　領域長
松本　和彦　　大阪大学産業科学研究所　特任教授

3. プロセスインフォマティクスの俯瞰　～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～

【I】

宇治原　徹　　名古屋大学未来材料・システム研究所　教授
宇佐美　徳隆　名古屋大学大学院工学研究科　教授
柿本　浩一　　九州大学応用力学研究所　教授
知京　豊裕　　物質・材料研究機構情報統合型物質・材料研究拠点　副拠点長
桑谷　立　　海洋研究開発機構火山・地球内部研究センター　研究員

【II】

青柳　岳司　　産業技術総合研究所機能材料コンピュテーショナルデザイン研究センター
　　総括研究主幹
池端　久貴　　旭化成株式会社研究・開発本部インフォマティクス推進センター
　　リードエキスパート
高橋　啓介　　北海道大学大学院理学研究院　准教授
瀧川　一学　　理化学研究所革新知能統合研究センター　研究員、
　　北海道大学化学反応創成研究拠点　主任研究者
谷池　俊明　　北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科　准教授

冨谷　茂隆　　ソニー株式会社 R&D センター　主幹研究員
永木　愛一郎　京都大学大学院工学研究科　准教授
畑中　美穂　　慶應義塾大学理工学部　准教授

4. 全体会議

木場　祥介　　ユニバーサルマテリアルズインキュベーター株式会社
　　代表取締役パートナー
小出　康夫　　物質・材料研究機構　ナノテクノロジープラットフォームセンター長
瀬戸山　亨　　三菱ケミカル株式会社　エグゼクティブ・フェロー
長谷川　美貴　青山学院大学理工学部化学・生命科学科　教授
一杉　太郎　　東京工業大学物質理工学院　教授
藤井　輝夫　　東京大学生産技術研究所　理事・副学長、教授
藤ヶ谷　剛彦　九州大学大学院工学研究院　応用化学部門　教授
松尾　保孝　　北海道大学電子科学研究所　教授
宮本　重幸　　日本電気株式会社研究・開発ユニットコーポレート技術戦略本部
　　シニアマネージャー
村山　宣光　　産業技術総合研究所　理事、材料・化学領域　領域長
山根　深一　　東レ株式会社研究・開発企画部　担当部長
吉本　昌広　　京都工芸繊維大学電子システム工学課程・専攻　理事・副学長、教授

上記すべてのワークショップの開催に際して下記の府省関係者に適宜ご参加いただいた。
・内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付
　産業技術・ナノテクノロジーグループ
・文部科学省 研究振興局参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付
・文部科学省 科学技術・学術政策局企画評価課 新興・融合領域研究開発調査戦略室
・経済産業省 産業技術環境局研究開発課

付録2　作成協力者一覧

※五十音順、敬称略、所属・役職は協力時点のもの

■ 2.1 環境・エネルギー応用

赤木　泰文　東京工業大学イノベーション人材養成機構　特任教授
宇恵　誠　物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点　特別研究員
宇佐美　徳隆　名古屋大学大学院工学研究科　教授
江口　浩一　京都大学大学院工学研究科　教授
大西　剛　物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点　グループリーダー
小島　由継　広島大学自然科学研究支援開発センター　教授
児玉　大輔　日本大学工学部　准教授
須田　淳　名古屋大学大学院工学研究科　教授
都留　稔了　広島大学大学院先進理工系科学研究科　教授
所　千晴　早稲田大学理工学術院　教授
錦谷　禎範　早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構　研究院客員教授
東脇　正高　情報通信研究機構未来ICT研究所　センター長
平本　俊郎　東京大学生産技術研究所　教授
松田　圭悟　山形大学大学院理工学研究科　准教授
光島　重徳　横浜国立大学大学院工学研究院　教授
矢野　裕司　筑波大学数理物質系　准教授

■ 2.2 ライフ・ヘルスケア応用

秋吉　一成　京都大学大学院工学研究科　教授
荒川　貴博　東京医科歯科大学生体材料工学研究所　講師
一柳　優子　横浜国立大学大学院工学研究院　教授
梅澤　雅和　東京理科大学基礎工学部　博士研究員
大久保　喬平　東京理科大学基礎工学部　助教
大矢根　綾子　産業技術総合研究所ナノ材料研究部門　研究グループ長
上村　真生　東京理科大学基礎工学部　講師
菊池　明彦　東京理科大学基礎工学部　教授
曽我　公平　東京理科大学基礎工学部　教授
谷口　正輝　大阪大学産業科学研究所　教授
田畑　泰彦　京都大学ウイルス・再生医科学研究所　教授
陳　国平　物質・材料研究機構機能性材料研究拠点　グループリーダー
當麻　浩司　東京医科歯科大学生体材料工学研究所　助教
渡慶次　学　北海道大学大学院工学研究院　教授
永井　健治　大阪大学産業科学研究所　教授
藤田　克昌　大阪大学大学院工学研究科　教授
松崎　典弥　大阪大学大学院工学研究科　教授
三林　浩二　東京医科歯科大学生体材料工学研究所　教授
宮田　完二郎　東京大学大学院工学系研究科　准教授

■ 2.3 ICT・エレクトロニクス応用

内田　建	東京大学大学院工学系研究科　教授
大橋　啓之	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構　研究院教授
勝又　竜太	キオクシア株式会社先端メモリ開発センター　センター長附
加藤　雄一郎	理化学研究所加藤ナノ量子フォトニクス研究室　主任研究員
川嶋　健嗣	東京大学大学院情報理工学系研究科　教授
上妻　幹旺	東京工業大学理学院　教授
澤田　和明	豊橋技術科学大学大学院工学研究科　教授
下田　真吾	理化学研究所脳神経科学研究センター　ユニットリーダー
鈴木　義茂	大阪大学大学院基礎工学研究科　教授
高本　将男	理化学研究所香取量子計測研究室　専任研究員
竹内　繁樹	京都大学大学院工学研究科　教授
田中　秀治	東北大学大学院工学研究科　教授
富田　章久	北海道大学大学院情報科学研究院　教授
納富　雅也	東京工業大学理学院　教授、NTT物性科学基礎研究所　上席特別研究員
長谷川　剛	早稲田大学理工学術院　教授
林　喜宏	慶應義塾大学理工学部　訪問教授
藤井　啓祐	大阪大学大学院基礎工学研究科　教授
藤方　潤一	光電子融合基盤技術研究所　主幹研究員
前田　真吾	芝浦工業大学工学部　准教授
松元　慎吾	北海道大学大学院情報科学研究院　准教授
水落　憲和	京都大学化学研究所　教授
柳田　剛	東京大学大学院工学系研究科　教授
萬　伸一	理化学研究所創発物性科学研究センター　コーディネータ

■ 2.4 社会インフラ応用

磯貝　明	東京大学大学院農学生命科学研究科　特別教授
大村　孝仁	物質・材料研究機構構造材料研究拠点　副拠点長
岡部　朋永	東北大学大学院工学研究科　教授
香川　豊	東京工科大学片柳研究所　所長・教授
髙橋　学	九州大学大学院総合理工学研究院　教授

■ 2.5 物質と機能の設計・制御

足立　幸志	東北大学大学院工学研究科　教授
井手上　敏也	東京大学大学院工学系研究科　助教
伊藤　耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科　教授
岩崎　悠真	日本電気株式会社システムプラットフォーム研究所　主任研究員
内田　健一	物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点　グループリーダー
尾辻　泰一	東北大学電気通信研究所　教授

小野　寛太　　高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所　准教授
大和田　謙二　　量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門　グループリーダー
加藤　隆史　　東京大学大学院工学系研究科　教授
門平　卓也　　物質・材料研究機構統合型材料開発・情報基盤部門　グループリーダー
寒川　義裕　　九州大学応用力学研究所　教授
北川　宏　　京都大学大学院理学研究科　教授
草田　康平　　京都大学大学院理学研究科　特定助教
齋藤　理一郎　　東北大学大学院理学研究科　教授
佐々木　高義　　物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点　拠点長
柴田　肇　　産業技術総合研究所省エネルギー研究部門　招聘研究員
田中　敬二　　九州大学次世代接着技術研究センター　センター長
反保　衆志　　産業技術総合研究所太陽光発電研究センター　主任研究員
知京　豊裕　　物質・材料研究機構統合型材料開発・情報基盤部門　グループリーダー
塚﨑　敦　　東北大学金属材料研究所　教授
中尾　航　　横浜国立大学大学院工学研究院　教授
中村　雅一　　奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学領域　教授
野村　政宏　　東京大学生産技術研究所　准教授
一杉　太郎　　東京工業大学物質理工学院　教授
藤田　照典　　三井化学株式会社　リサーチフェロー
宮崎　康次　　九州工業大学大学院工学研究院　教授
森　孝雄　　物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点　グループリーダー
八木　貴志　　産業技術総合研究所物質計測標準研究部門　主任研究員
山本　智　　九州大学次世代接着技術研究センター　教授
山本　尚　　中部大学先端研究センター　センター長

■ 2.6 共通基盤科学技術

大和田　謙二　　量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門　グループリーダー
乙部　智仁　　量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門　上席研究員
金谷　利治　　京都大学　名誉教授
京極　秀樹　　近畿大学次世代基盤技術研究所　特任教授
久保　百司　　東北大学金属材料研究所　教授
重田　育照　　筑波大学計算科学研究センター　教授
杉岡　幸次　　理化学研究所光量子工学研究センター　チームリーダー
高田　昌樹　　東北大学多元物質科学研究所　教授
中井　浩巳　　早稲田大学理工学術院　教授
廣島　洋　　産業技術総合研究所柏センター　所長
深沢　正永　　ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社　シニアプロセスマネージャー
藤田　大介　　物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点　拠点長
三沢　和彦　　東京農工大学工学研究院　工学研究院長・教授

水上　渉　　大阪大学先導的学際研究機構　特任准教授
山本　和生　　一般財団法人ファインセラミックスセンターナノ構造研究所　グループ長・主席研究員
渡邊　健夫　　兵庫県立大学高度産業科学技術研究所　所長・教授

■ 2.7 共通支援策

加藤　豊　　一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会　事務局次長
杉浦　琴　　JFEテクノリサーチ株式会社ビジネスコンサルティング本部　エキスパート
竹歳　尚之　　産業技術総合研究所物質計測標準研究部門　副研究部門長
辻野　博文　　大阪大学大学院薬学研究科　准教授
堤　康央　　大阪大学大学院薬学研究科　教授
長野　一也　　大阪大学大学院薬学研究科　准教授
東阪　和馬　　大阪大学大学院医学系研究科　特任講師
広瀬　明彦　　国立医薬品食品衛生研究所安全性生物試験研究センター　部長

付録3 研究開発の俯瞰報告書（2021年）全分野で対象としている俯瞰区分・研究開発領域一覧

1.環境・エネルギー分野（CRDS-FY2020-FR-01）

俯瞰区分	研究開発領域
エネルギー	エネルギー資源探査・開発技術、CCS
	火力発電
	原子力発電
	太陽光発電
	風力発電
	バイオマス発電・利用
	その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）
	電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）
	電気エネルギー利用（電力貯蔵）
	熱エネルギー利用（産業熱利用）
	熱エネルギー利用（民生熱利用）
	化学エネルギー利用
	地域熱供給（地域冷暖房）
	エネルギーシステム評価
	反応性熱流体
	トライボロジー
	破壊力学
	計算工学
環境	気候変動観測
	気候変動予測
	水循環（水資源・水防災）
	水利用・水処理
	除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）
	有機化学物質分析・毒性評価
	無機化学物質分析・動態把握
	生態系・生物多様性の観測・評価・予測
	社会-生態システムの評価・予測
	循環利用とライフサイクル評価
	都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）
	農林水産業における気候変動適応・緩和

2. システム・情報科学技術分野（CRDS-FY2020-FR-02）

俯瞰区分	研究開発領域
人工知能・ビッグデータ	知覚・運動系のAI技術
	言語・知識系のAI技術
	エージェント技術
	AIソフトウェア工学
	意思決定・合意形成支援
	データに基づく問題解決
	計算脳科学
	認知発達ロボティクス
	社会におけるAI
ロボティクス	ソフトロボティクス
	生物規範型ロボティクス
	インタラクション
	システム化技術
	モビリティーロボット
	フィールドロボット
	生活支援ロボット
	サービスロボット
	産業用ロボット
	農林水産ロボット
	ロボティクスと社会
社会システム科学	デジタル変革
	サービスサイエンス
	社会システムアーキテクチャー
	メカニズムデザイン
	計算社会科学
セキュリティー・トラスト	IoT・制御システムセキュリティー
	サイバーセキュリティー
	データ・コンテンツのセキュリティー
	トラスト
コンピューティングアーキテクチャー	プロセッサーアーキテクチャー
	量子コンピューティング
	データセンタースケールコンピューティング
	データ処理基盤
	IoTアーキテクチャー
	デジタル社会インフラ
	ブロックチェーン

3.ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2020-FR-03）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	次世代太陽電池材料
	蓄電デバイス
	パワー半導体材料・デバイス
	エネルギーキャリア
	分離技術
ライフ・ヘルスケア応用	バイオ材料
	ナノ医療システム
	バイオ計測・診断デバイス
	バイオイメージング
ICT・エレクトロニクス応用	新機能ナノエレクトロニクスデバイス
	集積フォトニクス
	スピントロニクス
	MEMS・センシングデバイス
	ロボット基盤技術
	量子情報・通信
	量子計測・センシング
社会インフラ応用	構造材料（金属）
	構造材料（複合材料）
物質と機能の設計・制御	分子技術
	元素戦略・希少元素代替技術
	マテリアルズ・インフォマティクス
	フォノンエンジニアリング
	トポロジカル材料
	低次元材料
	複雑系材料の設計・プロセス
	ナノ力学制御技術
共通基盤科学技術	微細加工プロセス
	積層造形・レーザ加工
	ナノ・オペランド計測技術
	物質・材料シミュレーション
共通支援策	ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準

4.ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2020-FR-04）

俯瞰区分	研究開発領域
健康・医療	低・中分子創薬
	高分子創薬（抗体）
	感染症（抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等）
	AI創薬・インシリコ創薬
	再生医療・幹細胞治療
	細胞治療（CAR-T等）・遺伝子治療
	ゲノム医療
	バイオマーカー・リキッドバイオプシー
	ヘルスケアIoT（ウェアラブル・生体埋め込み計測）
バイオエコノミー	微生物分子生産
	植物分子生産
	植物由来材料
	植物・農業
	植物工場
	水産
	畜産
	林業
基礎基盤科学技術：組織（生理・恒常性）	免疫
	生体時計・睡眠
	老化
	マイクロバイオーム
	感覚器
	脳・神経
	臓器連関
基礎基盤科学技術：分子・細胞	遺伝子発現機構（RNA・エピゲノム・クロマチン）
	細胞外微粒子・細胞外小胞
	一細胞オミクス
	ゲノム編集・エピゲノム編集
	オプトバイオロジー
	ケミカルバイオロジー
	合成生物学（人工生体高分子・人工細胞合成）
基礎基盤科学技術：分析・計測技術	構造解析
	光学イメージング
	トランススケールイメージング
	計測×AI
	BMI・BCI

謝辞

本報告書は作成の過程において、総勢170名を超える第一線の研究者・技術者および行政関係者、産業界・学術界の方々から多大なご協力をいただきました。約2年間にわたる調査・情報提供・分析およびインタビューやワークショップ等の議論に参画いただきました皆様のお力添えなしには、本報告書が発行に至ることはありませんでした。ここに深く感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。

研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット一同

作成メンバー

曽根 純一	上席フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
眞子 隆志	フェロー／ユニットリーダー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
赤木 浩	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（2020年4月～）
荒岡 礼	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
大山 みづほ	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（2020年1月～）
河村 誠一郎	フェロー／エキスパート	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（～2020年3月）
永野 智己	フェロー／総括ユニットリーダー／JST研究監	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
沼澤 修平	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（2020年10月～）
馬場 寿夫	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
福井 弘行	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（2020年4月～）
宮下 哲	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
渡邉 孝信	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（2020年4月～）
伊藤 聡	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
岩本 敏	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
川合 知二	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
佐藤 勝昭	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
清水 敏美	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
田中 一宜	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（～2020年3月）
玉野井 冬彦	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
本間 格	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
村井 眞二	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）
八巻 徹也	特任フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）

研究開発の俯瞰報告書 **CRDS-FY2020-FR-03**

ナノテクノロジー・材料分野（2021年）

PANORAMIC VIEW REPORT

Nanotechnology/Materials Research Field (2021)

令和 3 年 3 月　March 2021
ISBN 978-4-88890-710-1

国立研究開発法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
電話　03-5214-7481
E-mail crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
This publication is protected by copyright law and international treaties.
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.
Any quotations must be appropriately acknowledged.
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

ISBN 978-4-88890-710-1

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY

https://www.jst.go.jp/crds/