3．研究開発領域

3.1　環境・エネルギー

持続可能な社会の実現に向けて、3E（Energy・Environment・Economy）の視点でのバランスの取れた取り組みが重要になっている。特に、エネルギー資源の乏しい日本にとって、非効率なエネルギーの大量消費を根本的に見直し、化石燃料や原子力から太陽光発電や風力発電、地熱発電といった再生可能エネルギーの利用拡大を促進し、エネルギー自給率を向上させることが求められている。

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蓄積・変換、CO_2 排出量の削減など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にあり、ここでは重要な研究開発領域として、太陽電池、人工光合成、燃料電池、熱電変換、蓄電デバイス、パワー半導体、グリーンプロセス触媒を取り上げている。

太陽電池および人工光合成は、再生可能エネルギーの一つである太陽光エネルギーを電気エネルギーまたは化学エネルギーに変換するものであり、新たな物理的・化学的現象の探索や、新たな半導体材料や触媒材料の開発、素子構造の革新などにより、変換効率向上、耐久性向上や低コスト化などが進められている。

燃料電池および熱電変換は、化学エネルギーまたは熱エネルギーを電気エネルギーに変換するものであり、新たな触媒材料や熱電変換材料の開発などにより、変換効率向上、低コスト化などが進められている。

蓄電デバイスは、電気エネルギーを蓄え、必要に応じて放電するものであり、新たな電極材料や電解質の開発などにより、大容量化、高出力化、耐久性向上などが進められている。

パワー半導体は、電気のオン・オフ、昇圧・降圧、直流・交流変換などに利用されるものであり、新たな半導体（ワイドギャップ半導体）の利用や素子構造の革新により、動作時の電力損失を抑制し、パワー半導体を用いた電力制御装置の小型化・軽量化が進められている。

グリーン触媒は、化成品合成やファインケミカルズ合成の製造プロセスに用いられるものであり、新たな触媒材料の開発により、多段階で行っていた反応を１段階で行うなどプロセスの短縮、精密合成、環境負荷の低減などが進められている。

３．１．１　太陽電池

（１）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光を電気エネルギーに変換するデバイスを研究開発する領域である。既に基盤技術が構築されているシリコン系太陽電池に関しては、さらなる低コスト化が課題になり、最近高効率化の進展が著しい有機系太陽電池については、分子設計、プロセス技術の構築、劣化機構の解明などを通じて、変換効率 15%以上のレベルを実現することが課題となる。さらに超高効率を目指した量子ドット系などの新構造太陽電池の開発に取り組む必要もある。加えて特筆すべきは、ここ数年で急激に研究が進展している有機無機ハイブリッド型のペロブスカイト太陽電池である。現在、既に変換効率 20.1%が達成されているが（2014 年 12 月時点）、今後はさらなる高効率化を目指した新材料開発と発電機構の解明、また耐久性の改善が重要な課題となる。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

近年の地球環境・温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。太陽光発電の大量導入が世界的潮流となる中、日本国内でも固定価格買取り制度の後押しを受け太陽光発電の普及が進んでいる。この分野における研究開発の重要性が益々増大している中で、エネルギー変換分野では高効率・低コストの革新的太陽電池の開発が精力的に行われている。

太陽電池モジュールの価格は低下しており、大規模なメガソーラから中規模なシステムでは、システム価格に占めるモジュール価格の割合は 3～4 割程度にまで低下してきた。今後のさらなる普及拡大と低価格化には、最もシェアの大きい結晶 Si 系においては、セルの高効率化を含めたモジュールの高効率化により、整地・架台・配線・施工等の BOS（Balance Of System）コストあたりの設置量を増やすことが求められる。これは、国際的に普及が進む低価格結晶 Si 系モジュールとの差別化においても重要な方向性となる。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。

一方、革新的太陽電池としては有機薄膜型やハイブリッド型が将来性を有する候補として考えられている。これらの分野では、劣化機構解明、接合形成技術、耐久性向上技術、界面制御技術の開発が必要になる。特に、ハイブリッド型の代表であるペロブスカイト太陽電池は急激な勢いで変換効率が上昇しているが、発電機構の詳細は不明なままである。今後の発展のためには、発電機構の解明に基づく新材料の開発が鍵となる。

［これまでの取組み］

実用化が進んでいる、シリコン系太陽電池（結晶 Si、薄膜 Si）や化合物半導体系太陽電池（CIGS［Cu（InGa）Se2］、CdTe、GaAs 集光型）では、より低コスト、より高効率を目指した開発が産学連携により行われてきた。さらに極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面欠陥の削減、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盛んに行われている。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

おり、プレーヤーが増加してきている。直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。

有機系太陽電池においてはこれまでに膨大な研究が実施されており、各種の新規材料開発によって高効率化が達成されてきた。その結果、有機薄膜太陽電池では 10%以上、色素増感太陽電池では 12%以上の変換効率が得られている。ペロブスカイト太陽電池では発明からわずか 5 年で、17.9%（米国 NREL 認証）の変換効率が達成されている。

日本は Si 薄膜、CIGS 共に高い技術を持ち、Si 太陽電池でも企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。超高効率太陽電池などの次世代技術の研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、これらの太陽電池企業の多くは中国、韓国など企業や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶 Si 系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるが、いつまで優位性を維持できるか不安がある。太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の 3 極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。ハイブリッド型であるペロブスカイト太陽電池は、急激な変換効率の上昇に伴い日本、米国、欧州、中国、韓国等、世界中で熾烈な研究開発競争が開始されており、日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発では世界の後塵を拝する結果となっている。

［今後必要となる取組み］

実用化が進んでいるシリコン系や化合物系の太陽電池に関しては、今後、さらなる効率アップ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。現在、日本の集光型太陽光発電関連技術は、世界トップレベルであるが、近年、米国やスペインの進展が著しく、我が国においてもさらなる技術革新が必要である。この分野では、いかにコストを低減できるかが普及の鍵となる。特に、集光用太陽電池として用いられるⅢ-Ⅴ族多接合型太陽電池や、光学系、追尾架台の精度の向上について、国際的に熾烈な競争になっている。また、アモルファスシリコン太陽電池では、高品質光吸収材料の開発とともに、界面制御技術開発、光劣化機構の解明が急務である。

有機系太陽電池については、現時点での光電変換効率の最大値は 10% 程度で、シリコン系太陽電池の半分程度である。従って、その向上が科学技術的に重要な課題である。今後さらなる変換効率の向上には、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などが上げられる。

また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。ここでは量子ドット、プラズモニクスの輸送機構解明が期待される。さらにペロブスカイト太陽電池においては、より一層の高効率化を目指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、高耐久化を目指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。また、発電条件下（光・温度）での耐久性の向上も重要な課題である。従って、実用化に至るには、太陽電池の活性層に用いる有機分子の探索やデバイス構造の改良により、上記の問題を克服しなければならない。

（３）科学技術的・政策的課題

太陽電池の研究開発を進めていく上では、基礎研究段階からプロジェクト形式で産学連携を実施することが重要である。エネルギー分野では基礎は「学」、実用化は「産」という役割分担は効率的ではなく、双方の融合が必須である。そのためには、実用化研究を進めるための、プロジェクト研究拠点を構築し、ファンディングを充実させた上で、そこに産学の研究人材を投入することも有効と考えられる。

・シリコン系太陽電池を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、システム技術の開発が不可欠である。例えば、太陽電池による発電量が大きくなると電力系統による連系許容限界に近づいてくる。電力系統との統合においては、メガソーラ、住宅用ともに発電量予測技術の高精度化とリアルタイム発電量把握技術の確立、および蓄電池やエネルギーマネージメントを最大限利用したピーク抑制と需給バランス確保への貢献に加え、より短時間での変動や急激な出力の立ち上がり(立ち下がり)に対する系統安定化への貢献が期待される。今後も引き続き蓄電池、電気自動車（PHV を含む）などの利用やデマンドレスポンスの活用に向け、スマートグリッド関連技術の開発が求められる。市場拡大が活発化している欧州では既にこうした研究開発が活発化しているが、日本でも早い段階からのシステム技術開発の準備が必要となる。

・有機系太陽電池については、新しい有機分子の開発やデバイス作製法の改良など、個々の要素技術に関する基礎研究は着実に進歩しているものの、実用化に向けた大スケール化などの技術開発までは行われておらず、産官学の緊密な連携下での技術革新が求められる。米国、欧州はもとより、新興各国においても研究が盛んに進められている。そのため、日本の国際競争力を早期に確保するためには実用化に向けた技術開発が吃緊の課題である。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必要である。

・ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が始まったばかりであり、上市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。

・各国で太陽光発電の普及拡大が進む中、ドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統に対する連系許容限界に近づいており、特定の日を見ると風力と併せた再生可能エネルギーが半分以上の電力を供給している時間帯もある。そのため、電力系統の安定運用に向け、発電量予測技術の重要性が高まっている。翌日～リアルタイムまで予測のニーズは広く、衛星画像と地上観測データを用いて広域で正確に予測する技術の開発

が進んでいる。日本国内においても同様の取り組みは進んでいるが、地上における気象庁の日射計測地点数が減少傾向にあることや、導入済の太陽電池のアレイ構成(方位など)がデータベース化されていないことから、予測の高精度化に向けて早急に取り組むべき課題は多い。また、系統全体で見た時の余剰電力や調整力不足の問題に対しては、今後も引き続きスマートグリッド関連技術の開発が必要となる。特に家庭用から電力系統用大型設備まで、蓄電池の導入に関する研究、および蓄電池そのものの開発が各国で進んでおり，これに加えて電気自動車などの移動・流通手段の電化と需給調整などの系統安定化への利用、および建物における省エネ化とエネルギー管理技術の開発が活発に行われている。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・単結晶 Si 太陽電池

1999 年から 15 年間にわたり小面積も含めた結晶 Si 系太陽電池の変換効率の最高値とされてきた 25%の壁が突破された。Panasonic は、高品質なアモルファス Si 層により接合を形成する「ヘテロ接合」の進化と、電極を全て裏面に形成する「バックコンタクト型」を組み合わせることにより、実用サイズ（セル面積 143.7cm^2）のセルで変換効率 25.6%を達成した。SHARP も、コンソーシアム形式のプロジェクトである NEDO 委託研究「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発」の成果を活用することにより、同様のセル構造で小面積（セル面積 3.72cm^2）ではあるが、変換効率 25.1%を達成した。また、米国 SunPower 社も 121 cm^2 のバックコンタクト型セルで 25.0%を達成している。カネカは、銅プレーティング技術を利用した 6 インチのヘテロ接合型太陽電池で 23.5%を達成している。このように、高効率化セルの開発競争においては、日本企業の高い技術力が改めて示されたといえる。住宅用システムなど、限られた屋根面積における設置量増加、施工コストあたりの設置量増加に向け、太陽電池モジュールの高効率化が強く求められている。このような市場では、中期的には、25%を超える変換効率を低価格で実現する必要がある。

太陽電池用 Si 結晶インゴット製造の分野では、低コストで高品質なインゴット開発への指針が二極化している。一つは、大粒径（結晶粒サイズが数 cm～数十 cm）の結晶から構成され、結晶粒方位や結晶粒界などの組織制御による高品質化を目指したものであり、もう一方では、粒径が数 mm 程度の微細な結晶粒を意図的に成長させることで転位密度の低減と結晶の均質化を目指している。前者には、単結晶の種結晶を利用してインゴット製造を行う、モノキャスト技術の研究開発も含まれる。仏 INES は 450kg インゴットで 95%の領域で単結晶を得ることに成功し注目を集めている。歩留まりや品質に課題はあるものの、良質な部分にヘテロ接合太陽電池を適用し、100mm 角セルで 20.2%を達成している。日本国内では、浮遊キャスト成長法、粒界エンジニアリングによる欠陥制御技術、モノキャスト技術の種結晶の小型化、ノンコンタクトクルーシブル法など多くのユニークな研究開発が大学を中心に行われている。技術の引き受け手となる企業が現れることが望まれている。後者は、High-Performance Multi と呼ばれ、主として台湾や中国の企業が生産を行い、高い歩留まりを実現している。

・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、透明中間層の利用、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。バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され、苦しい市場状況が続いており、その結果、大学等における基礎研究、産業界での量産技術開発とも縮小傾向にある。しかし、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、材料の安定供給の面での優位性を考えると、中長期的には重要な分野であるとも言え、このまま薄膜 Si 系の研究開発が後退してしまうことが危惧される。バルク結晶 Si 系では、ウェハの薄型化の流れが今後も継続すると予想されており、薄い Si を使用するという意味において、バルク型と薄膜型は、究極的には同じ目標に向かっているとの見方もある。薄膜 Si 太陽電池において培われた Si 製膜技術や光閉じ込め技術などは、将来的な薄型 Si 太陽電池の効率向上に大きく貢献すると期待される。非晶質 Si、微結晶 Si、薄膜結晶 Si とも、近年最高効率が更新され、着実な技術の向上が見られている。

・CIGS 太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産 1GW を有し、小面積セルでも世界最高の 20.9%を誇り、日本が世界を牽引している。CdTe 太陽電池では First Solar 社が年産 2.7GW と世界を牽引する生産能力を有している。CIGS の代替を目指して、レアメタルフリーの材料が大きく注目されている。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。

集光型太陽電池に使用する多接合型太陽電池において、SHARP は集光時の効率として、44.4%（250-300 倍集光）の世界最高効率を達成している。また、張り合わせ技術（メカニカルスタック）による多接合化についても開発が進んでおり、4 接合で集光時 44.7%が報告されている。米国 Solar Junction 社も世界最高タイ効率である 43.5%（400-600 倍集光）を達成しており、量産レベルでも 42%の高効率を出している。モジュールについては、米国 Semprius 社が 33.9%のモジュール最高効率を達成している。

・有機薄膜型太陽電池

2012 年に三菱化学が変換効率 11.1% の有機薄膜太陽電池を開発し、世界最高の変換効率を更新するなど進展が著しい。住友化学と米カルフォルニア大学により、２種類の光電変換層を組み合わせた「タンデムセル構造」からなる、10.6% の光電変換効率が発表された。さらに、東大とオーストリアのグループと共同で、髪の毛 1 本にも巻ける伸縮自在な世界最薄かつ最軽量のデバイス作製に成功し、東芝は 5 cm 角サイズの有機薄膜太陽電池モジュールにおいて 7.7% の光電変換効率を実現するなど、力強い進歩が見られる。今後も新規な材料開発で、更なる高効率化が期待できる。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 が挙げられる。

・色素増感型太陽電池

発売に向けた地道な研究開発が各企業で実施されている。産官学多くのプレーヤーが関与しているため、今後の益々の進展が期待できる。最近の最大のニュースは、色素増

感型でこの分野を牽引してきた米国ベンチャー企業 Konarka の倒産である。ただ、同社のセルは変換効率が低く、製品としての完成度が不十分だったとの認識が一般的である。現在の色素増感型の主要なベンチャー企業は、G24i から発展した G24 Power（英国）、３GSolar（イスラエル）、Dyesol（オーストラリア）の３社である。この内、G24 Power のセルが Logitech 製 iPad 用外部キーボード電源に採用され（採用時は G24i）、市場投入が始まった。また、サムソン電子が建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源向けに発売を計画している。液晶や有機 EL、リチウムイオン電池の歴史を考えると、後発ながら脅威となる。このような状況下、日本はより高効率化を目指した研究開発が進行中である。

・ペロブスカイト太陽電池

特に欧州で新たな取り組みが進展している。たとえば、独 Fraunhofer 研究所は建材用途に大面積 60 cm x 100 cm セルを作製しようとしており、英国ではベンチャー企業 Oxford Photovoltaics が上市に向けた研究開発をスタートしている。また、米国においても研究が進展しており、スタンフォード大学は CIGS とのタンデム化で 18.6%を達成している。タンデム化では、従来の CIGS や結晶シリコン太陽電池を用いることにより、20%以上の効率が期待されている。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。

［注目すべきプロジェクト］

・シリコン系太陽電池に関しては、NEDO プロジェクトで、結晶 Si 太陽電池のコスト限界を打破し、安価で高効率な結晶 Si 太陽電池を大量に供給する技術の実現を目指したコンソーシアムが形成されている。原料の製造からセルまでの一貫した産学連携の研究体制が構築され、豊田工大には、産業開発プラットフォームとして太陽電池試作ラインが導入された。このプロジェクトからは、前述の SHARP の変換効率 25.1%のセルを始め、結晶成長から高効率セルに至る多くの成果が実現されている。産業技術総合研究所では、2014 年 4 月に再生可能エネルギーに特化した研究施設が、福島県郡山市に開所された。産業の基幹である結晶 Si 太陽電池が研究の対象となり、次世代薄型結晶 Si の研究開発が進められる。また、同じ研究所内では、文部科学省・JST による「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」が実施され、国際的な研究体制が構築され、ナノワイヤ太陽電池の研究開発が集中して行われている。
・最近大きな注目を集めているレアメタルフリーの薄膜 CZTS 太陽電池に関しては、NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア、産業技術総合研究所と複数の大学からなる体制で一気に CZTS 太陽電池の高効率化・物性評価を進める研究がスタートし、材料設計・分析・高効率セル作製を重点的に行っている。ソーラーフロンティアは、世界最高水準の 12.3%という効率を誇っている。CZTS は、日本発の材料であり、JST の CREST でも研究が進められている。JST の ALCA では、フォトニックナノ構造を利用した光マネジメント、窒化物半導体、Si 系クラスレート、多元系混晶、資源戦略性に優れた薄膜太陽電池技術など挑戦的な課題が実施されている。
・2011 年 6 月より、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米にお

いても集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されている。本プロジェクトでは、日本における超高効率太陽電池・材料、集光モジュール、およびシステムに関する研究開発が活発に行われており、欧州諸国との連携を強化している。

・有機系太陽電池は基礎研究段階を離陸し、より製品に近いレベルに達しており、国の後押しも盛んである。例えば NEDO では、「有機系太陽電池実用化先導技術開発」の新規プロジェクトが開始された。ペロブスカイト太陽電池では JST のさきがけ、CREST、ALCA で研究が開始されているが、中でも新たな取り組みとして、さきがけ研究者を結集した横断プロジェクトの成果が期待される。

（５）キーワード

シリコン系太陽電池、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

（６）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	◎	→	無機系太陽電池の日本の基礎研究水準は、これまで個別の研究機関や企業の努力によって高い研究水準を保ってきた。しかし、研究水準の高い欧米の研究機関や、急速な追い上げを見せている新興国への対抗から、産業の主体である結晶系Si太陽電池や、薄膜太陽電池の分野などでは、オールジャパンのコンソーシアムを構築することにより研究体制を強化し、国際競争力を高めようとする動きがある。コンソーシアムの成果として、結晶Si太陽電池では変換効率25%超のセルが実現され、薄膜太陽電池においては、微結晶Siのシングルセルで世界最高効率の11%が達成された。独Fraunhofer研究所、米国NRELなど、研究開発の中核となる研究機関が日本でも求められている。 集光型太陽電池・化合物太陽電池の研究水準は、世界トップレベルにあるが、欧米との開発競争が激化している。ナノワイヤ・量子ドットなどの新概念太陽電池を対象とするプロジェクトが、JSTやNEDOの事業として行われている。 有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が加速している。大学での研究が非常に盛んになるとともに、企業においても三菱化学や住友化学が材料開発の基礎力を活かし、世界最高レベルの変換効率10%を達成。この住友化学の成果は、カリフォルニア大学バークレー校との産学連携の結果である。一方、色素増感型は，産官学分野で地道な高効率化研究が実施されている。新しい流れとして、有機系太陽電池を人工光合成の一種として捉えた国のプロジェクトがスタートしている。 ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発に於いては世界の後塵を拝する結果となっている。ただ、JSTのプロジェクトを始めとした国の主導的な取り組みが始まっており、今後の成果が期待される。
	応用研究・開発	◎	↗	結晶Si系の技術開発は、原料技術からモジュールに至る各要素技術、実用サイズでの効率記録などの高性能化技術において世界トップレベルにある。特に、最近小面積セルを含めた太陽電池セルの世界最高効率を15年ぶりに実用サイズのセルで更新することで、その技術力の高さが改めて世界に示された。薄膜太陽電池では、実用サイズモジュールの効率記録や、ガラスの高いシェアの維持など、技術開発水準は高い。モジュール信頼性やシステム技術に関する技術開発は、これまで個別企業に依存してきたが、一部の技術では、コンソーシアムでの技術開発が行われている。 有機系太陽電池の応用では色素増感型が先行しており、各企業が発売に向けたセル開発を行なっている。また、有機系の特長を活かしたフィルムタイプ太陽電池の研究開発が非常に盛んである。 ペロブスカイト太陽電池は欧米では既にベンチャー企業が創設され始めているが、日本ではまだ基礎研究段階である。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の中で、低価格化が進み、原料やウェハーメーカーなど撤退を余儀なくされた企業もある。業績不振のセルメーカー・装置メーカーも少なくない。一方で、固定価格買い取り制度の後押しもあり、国内各地のメガソーラ―設備や住宅用向けにモジュール生産量は増加してきた。太陽光発電設備を含めたスマートグリッド関連技術の開発など、エネルギーのトータルソリューションを提供することでメーカーは生き残りをはかっている。Si系の薄膜太陽電池では、苦戦が続いている。海外他社との連携や、薄膜技術をヘテロ接合に利用した高性能結晶Si太陽電池の開発に活路を見出そうとの動きもある。 CIGS太陽電池については、ソーラーフロンティアが世界を牽引しており、年産1GWの生産規模は突出している。将来の海外進出時の基本製造プラントとすることを視野に入れ、最新の高効率化製造技術を採用した新工場を建設している。

米国	基礎研究	○	↗	多様な太陽電池に対して低コスト・高効率化を推進するプロジェクトがエネルギー省の事業として実施されている。結晶Si系の基礎研究は、研究人口は多くはないものの、MITやNRELなどにおいて高い水準の研究が行われている。宇宙用・集光用の多接合型太陽電池の研究は活発である。また、太陽光発電の利用技術に関する研究開発は先行している。IBM社は、CZTS太陽電池で構成材料の最適化により12.6%の変換効率を報告している。First Solar 社はCdTe太陽電池での技術革新が著しく、最近セル効率20.4%を報告した。Dupontなどの大企業もCZTSの研究を行っている。Uni-Solar社は、小面積3層タンデムセルで初期変換効率16.3%を達成しており、高い研究水準を有している。量子ドット型やプラズモン太陽電池など新しい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、産官学ともに有機薄膜型の研究が非常に盛んである。高分子型ではカリフォルニア大学バークレー校など、低分子型ではミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心となって基礎研究を牽引しており、それ以外にも多数の研究拠点が存在する。一方、色素増感型の研究は非常に少なく米国NREL等があるのみである。最後に、ペロブスカイト太陽電池に関しては多くの大学で研究されているが、プリンストン大学、カリフォルニア大学バークレー校がその先頭を走っている。この内、カリフォルニア大学バークレー校は非公式ながら19.3%の変換効率を達成している。
	応用研究・開発	○	↗	SunPower社は、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池で、Panasonic社のヘテロ接合型太陽電池と結晶Si系の実用太陽電池における最高効率を競っている。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、新しいアイディアが生まれている。化合物系太陽電池では、多数のベンチャー企業が参入しており動向が注目される。モジュールの信頼性についてはNRELが米国内の議論をリードし、日欧などとの国際協力の下、さらなる長期信頼性の確保に向けて様々な試験方法や規格の提案が行われている。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、低分子系ではGlobal Photonic Energy Corporation（GPEC）が活躍中である。Solarmerはカリフォルニア大学ロサンゼルス校、中国科学協会・化学研究所の研究成果，GPECはプリンストン大学、ミシガン大学などの研究成果を活用している。この内GPECは、NanoFlex Power Corporationと発展的に名称を変更している。
	産業化	△	→	集光型太陽電池や、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池などにおいて優位性がある。Si基板材料関連やCIGS系などで生まれた多くのベンチャー企業は、近年では目立った報告がなく足踏みしているようにみえる。First Solar社は、CdTe太陽電池の製造でトップ技術を有しており、技術革新により近年変換効率が著しく向上している。モジュール効率でも17.0%という高い効率を実現している。また、スマートグリッドなどシステム産業への注力化が顕在化している。
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。独Fraunhofer研究所、Konstanz大、ISFH、オランダECN、ベルギーIMEC、仏INES、ノルウェーNTNU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。開発はどちらかというと現実路線で短期的テーマが中心だが、基礎も重視し各種太陽電池の研究を展開、超薄型や新原料などの次世代技術への取り組みも活発で研究人口も多い。Si系薄膜においては、スイスEPFLが世界の研究開発を牽引している。CIGS太陽電池、CZTS太陽電池ともに、効率自体は日米に及ばないものの、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、色素増感型、有機薄膜型ともに非常に研究が盛んである。色素増感型ではEPFL（グレッツェル研）やウプサラ大学、有機薄膜型ではImperial Collegeが基礎研究を牽引している。また、IMECが産学連携共同研究機構Solliance Allianceを活用し、薄膜太陽電池の研究開発を精力的に行っており、その一つが有機系である。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、色素増感型太陽電池のメッカであるEPFL（グレッツェル研）が世界の研究開発の中心となっている。

	応用研究・開発	◎	→	市場拡大を背景にベンチャー企業が多く設立され、製品化を目指している。企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau社のシリコンヘテロ接合太陽電池製造設備では、平均効率20.7%が達成されている。また、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。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。研究機関の開発成果が人とともに移動して企業の技術開発を支えている。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。各研究所の成果が中国に流れているケースが散見される。有機系太陽電池でも多くのベンチャー企業が活躍中であり、代表的なものは色素増感型の英国G24 Power（以前のG24i）。また、ペロブスカイト太陽電池では同じく英国のベンチャー企業Oxford PhotovoltaicsとドイツのFraunhofer研究所が先陣を切っている。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の影響を受け、セルメーカーやウェハーメーカーなど、厳しい状況にある。過去に世界トップの生産量を記録した独Q-cells社も例外ではなく、2012年8月には、韓国ハンファグループによる買収に合意している。装置メーカーにおいても、量産用薄膜シリコン太陽電池モジュールのターンキー製造ラインで高い実績をもつエリコンソーラー社は、東京エレクトロン社に買収された。さらに東京エレクトロン社はアプライドマテリアルとの経営統合に向かっている。有機系太陽電池のニッチ用途製品が発売され始めた。G24iの色素増感太陽電池が、Logitech製iPadの外部キーボード電源に採用されている。
中国	基礎研究	△	↗	結晶系Si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。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関等の追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。薄膜Si、化合物太陽電池など、その他の太陽電池においても研究活動は見られるが、まだ研究水準は高くない。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	○	↗	企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカー等と連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。結晶Si系太陽電池の大手数社の開発力拡充には注目すべきである。有機系太陽電池においては、中国、台湾ともに多くのベンチャー企業が創立されている。一例として、Yingkou OPV Tech New Energy が挙げられる。企業化まで後一歩の所まで来ており、2015年にも発売が予定されている。
	産業化	◎	↘	急激な成長を遂げ、世界最大の太陽電池生産国にまで上り詰めた。しかし、主要市場であった欧州諸国の購入支援策の縮小や、モジュールの過剰生産による販売価格の急速な低下の影響もあり、世界的な大手であったSuntech Power社が経営破綻にいたるなど状況は厳しさを増している。原料からモジュールまでの垂直統合が行われる一方で、多くの企業が乱立し過剰な投資に政府が懸念を示していた原料製造分野については、淘汰が進んでいる。また、モジュールの信頼性については、特にPIDなど品質に問題のあるケースが指摘されており、信頼性の向上が課題である。政府は、国内導入施策を整備することで、国外市場に強く依存する企業の体質強化をはかっている。薄膜太陽電池では、CIS系で技術力のある欧州企業を買収する動きが進んでいる。
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、太陽光発電産業として育成しようと研究開発を支援している。現実的な技術を中心として、原材料からセル、システムまで研究開発が進められている。次世代技術の研究も主流ではないが進められている。有機系太陽電池の研究機関は多いが、基礎研究力はまだキャッチアップ・レベルである。一方、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、KRICTが世界最高変換効率20.1%（米国NREL認証）を達成している(2014年12月時点)。

韓国	応用研究・開発	○	↗	Samsungグループ、LGグループ、Hyundaiグループなど、財閥系企業が太陽電池製造に参入し、技術開発を進めてきた。卓越した半導体技術を背景として技術水準は着実に上昇傾向にある。LG電子社は、大規模製造プロセスと整合するCuプレーティングを導入したヘテロ接合型太陽電池で20.5%の変換効率を報告している。有機系太陽電池では、色素増感型でSamsungが製品化を企画中。用途は建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源である。
	産業化	○	↗	生産量で中国に遅れを取っていたが、Samsung electronics社、LG electronics社は、生産ラインを本格稼働させて積極投資の姿勢をみせてきた。しかし事業環境の急変により、計画の見直しも行われている。ハンファグループは独Q-cells社を買収し、太陽光発電業界におけるグローバルプレーヤーの仲間入りをした。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（7）参考資料

1）第 40 回 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA, 8-13 June, 2014
2）HOPV14, Lausanne, Swiss, 11-14 May, 2014
3）28 回 EUPVSEC, Paris, France, 30 September-4 October, 2013
4）第 11 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム予稿集
5）サムソン SDI：http://samsungsdi.com/nextenergy/dssc-solar-cell-battery.jsp
6）G24 Power：http://gcell.com/
7）Heliatek：http://www.heliatek.com/?lang=en
8）NEDO：http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100135.html
9）M. D. McGehee, Nature, 501, (2013) 323
10）R. F. Service, Science, 344, (2014) 458
11）Fraunhofer：http://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/

３．１．２　人工光合成

（１）研究開発領域の簡潔な説明

人工光合成は、植物が太陽光エネルギーをエネルギー源に、二酸化炭素と水を原料として、グルコース、デンプンなどの有機物を合成する過程（光合成）を模し、人工的に太陽エネルギーを化学エネルギー（水素や炭化水素）に変換する科学技術である。水のみを原料として水素を生成物とするものを指す場合と、二酸化炭素と水を原料として、液体燃料や有用化学物質を生成物とするものを指す場合とがある。

また、溶液中に分散した半導体光触媒や溶解した有機金属錯体を用いる方法、半導体を電極として光電気化学的に反応を起こす方法、さらに太陽電池で発生させた電気を用いて電気化学的に反応を起こさせる方法などがある。

付加的な過程として二酸化炭素の捕集、濃縮や生成物の分離・濃縮が必要となる。実用的に応用が可能な変換効率や耐久性をもつ材料は未だ見いだされておらず、材料開発の基礎からの研究が必要である。また、目標（水素製造、大気中の二酸化炭素濃度の低減、液体燃料や有用化学物質の合成）を明確にした工学的、経済的評価手法の開発・標準化が必要である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

化石資源に基づいた現在のエネルギー社会は本質的に資源枯渇の問題をはらんでおり、再生可能エネルギーの早期大規模導入が期待されている。地球に照射される太陽光エネルギーは各種の自然エネルギーの源であり、人類の文明活動で消費される一次エネルギーの一万倍が地表に降り注いでいる。集光型太陽熱発電や太陽電池などを用いた太陽光エネルギー利用は既に世界各国で行われている。しかし、これらによって得られる電力は、長期間大量貯蔵や、地球規模での長距離輸送が困難である。化学エネルギーは貯蔵・輸送が比較的容易であり、化石燃料に代わる化学エネルギーを太陽光により創出できれば、その社会的インパクトは極めて大きい。

人工光合成は自然エネルギーから化学エネルギーを直接生産する非常に可能性の高い方法といえ、また水素エネルギー社会の基幹技術となりうる。

水を光により水素と酸素に分解する方法は、酸化チタン電極（光電気化学）を用いた本多藤嶋効果が発表されて以来、我が国で 1970 年代から積極的に研究が進められている分野である[1)]。

［これまでの取り組み］

・半導体光触媒を用いる人工光合成

半導体光触媒を用いる方法には、電極化した半導体光触媒で水素もしくは酸素を発生し、対極で酸素もしくは水素を発生させる光電気化学的な方法と水中に粉末状の半導体光触媒を懸濁し、光照射によって水を水素と酸素に分解する方法とがある。

光電気化学的な方法では、まず 1977 年に酸化チタン光電極と対極の白金電極を直接、接触させたデバイスをつくることを、コロラド大学の Nozik が考えた。その後様々な改良を経て、半導体電極を太陽電池技術によって作製し多段励起型にすることによって、

太陽エネルギー変換効率にして約 12%で水を水素と酸素に分解した報告が 1998 年に Turner （National Renewable Energy Laboratory）らのグループからされている[2)]。また近年では 2011 年頃より Artificial Leaf（人工葉）という水分解が可能な 3 段型シリコン太陽電池を水中に沈め、水素と酸素を 2%前後の太陽光エネルギー変換効率で発生させた研究も Nocera（ハーバード大学）らのグループによって発表されている[3)]。これらは実用的な太陽エネルギー変換効率をもつものの、多段式太陽電池技術を用いたもので、電極が太陽電池よりはるかに高価なものになる。

粉末状の半導体光触媒では、1978 年頃、テキサス大学の Bird らによって、酸化チタンの粉末に白金微粒子をつけた Pt/TiO_2 が生まれたことに端を発する。近年、紫外光によって水を水素と酸素に分解するもので量子収率が 50～70%のものが報告されているが、太陽光に含まれる紫外光のエネルギーの割合は 5%未満と極めて少なく、太陽光エネルギー変換効率に換算すると無に等しい。現在、最も高い太陽光エネルギー変換効率をもつ水分解光触媒は、堂免（東京大学）らによる、窒化ガリウムと酸化亜鉛の固溶体光触媒で、波長 500nm 以下の可視光を吸収し 0.3%前後の太陽光エネルギー変換効率で、水から水素を発生できる。これは通常の植物のエネルギー変換効率と同程度であるが、市販の太陽電池のエネルギー変換効率 10~15%とは大きな差がある。また、水素、酸素混合気体が大面積で出てくるため、分離技術が重要になっている。

これらの光触媒法、光電気化学法を実用につなげるためには、太陽光の大部分を占める可視光全域の光を有効に利用し、安価で大量生産に向く材料によるシステムの開発が重要になっている。

半導体光触媒やその光電極による二酸化炭素還元も研究が進んでいる。銀助触媒を用いることで二酸化炭素を一酸化炭素に選択的に還元することなどが工藤（東京理科大）らによって報告されている。しかし水素発生も無視できない速度で起きるため、完全な二酸化炭素還元選択性を得るためには、さらなる研究開発が必要である。さらに、ギ酸やメタノールなど、二酸化炭素をより有用な有機化合物に変換するためには、無機光触媒では不十分であり、有機金属錯体やタンパク質系の化合物の応用が必要と考えられる。

・有機金属錯体を用いる人工光合成

自然界の光合成を模したものであり、有機金属錯体における光捕集部、電荷分離機構、触媒部位の分子設計が重要な要素である。二酸化炭素と水から、高エネルギーな有機物と酸素を作ることが最終目標であるが、有機金属錯体系の光触媒では、一段の光触媒系でこの反応を起こすことは困難である。自然界の光合成の Z スキーム型 2 段階光反応機構を模したプロセスが必要であり、人工的にどのように全体のプロセスを構築するかが重要になってくる。

現状の有機金属錯体の人工光合成の研究では、二酸化炭素の還元や水からの酸素発生の対の反応になる酸化還元を起こすための犠牲試薬を用いた半反応を研究する例がほとんどであり、全反応として二酸化炭素と水から量論的に有機物と酸素が生成されている例は極めて少ない。

人工光合成に関する研究は、欧米はもとより、中国・韓国などにおいても急激に研究投資が進んでいる分野である。日本は諸外国をリードしているものの研究競争は激化し

ている。

［今後必要となる取組み］

現状の研究においては、犠牲試薬を使った場合、全体として自由エネルギーが負であり、自発的に進行することを無視して太陽エネルギー変換効率としている場合や、光電気化学系では外部バイアスや化学的バイアス（pH 差）を加えているのにそれを無視して太陽エネルギー変換効率としている場合が多い。また、水と CO_2 から有機物を作ったとしている論文のほとんどで犠牲試薬を用いており、酸素が有機物生成に見合う量が検出されていないことには留意すべきである。したがって、まずは各研究グループの結果が比較可能な標準的評価法を確立する必要がある。

その上で、人工光合成の実用化のためには太陽エネルギー変換効率として 5~10%を達成できるプロセスの構築が必要である。そのためには以下の課題例に取組む必要がある。

1）水分解が可能なバンド構造をもつナローギャップ半導体光触媒の開発
2）光電気化学セルにおける電極/電解質/発生水素酸素の構造設計
3）水素/酸素の安全な分離手法の開発
4）高品質な半導体粉末の調製技術の開発
5）高ターンオーバー数で光触媒反応が可能な有機金属錯体光触媒の開発
6）二酸化炭素還元系、酸素発生系を組み合わせた全反応のプロセスの構築

これらの解決のためには無機材料科学、錯体化学の研究者のみでの取り組みでは不十分であり以下のような学術分野との融合が重要である。

1）半導体光触媒分野と有機金属光触媒とのハイブリッド化
2）計算化学・固体半導体物理など広い物理化学理論による物性・機能の解明
3）最先端の計測・分析による材料特性の解明
4）化学工学的な容器設計、電気化学セル設計、生成物分離器設計

特に近年は二酸化炭素排出削減、二酸化炭素排出量の国際取引などの世界的状況から、二酸化炭素を還元して有用な燃料や化成品原料を得ることへの期待が高まっており、水からの水素・酸素発生のみならず、二酸化炭素還元も重要な研究課題である。これには現時点で量論的に最も現実的な太陽電池による発電と水の電気分解による水素製造を組合せ、二酸化炭素+水素の化学プロセスによる有機物製造も視野に入れて取組むことが必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

人工光合成分野は半導体光触媒によるものも、有機金属錯体によるものも我が国が世界をリードする研究分野である。しかしながら、実用化にはまだ遠く、高い太陽光エネルギー変換効率だけを追求した応用研究だけでは不十分であり、分子科学的な反応メカニズムの詳細など、基礎研究の促進も重要である。特に有機金属錯体を用いた方法では、生体分子に近い化合物の利用、生体システムの模倣も重要で生化学分野との融合も必要である。

また、ある効率が得られたときにどれくらいのスケールが必要を考え、実現可能かどうかのクリティカルな評価を踏まえた上で、実用化に向けたプロセス設計など応用面の

研究も進めておく必要性もあり、マルチスケールな視点において化学工学など多分野の研究者が融合する枠組みが必要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

近年は半導体光触媒の分野と有機金属錯体の分野の融合が進んでいて、半導体電極上に有機金属錯体を固定化したものが注目されている。また金属ナノ粒子を用いたプラズモン共鳴型の増感型の光触媒や光電極も研究が進んでいる。

［注目すべきプロジェクト］

文部科学省の科研費から経済産業省未来開拓研究まで幅広い研究投資が同時期に始まったために、基礎研究から応用研究まで取り組みは広がっている。物理化学分野の基礎研究者から、民間企業まで人工光合成の研究に関わることのできる機会は増えているといえる。

・国内

- 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究[4]：人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合(井上晴夫・首都大学東京ら、2012 年～)
  有機金属錯体の研究者と半導体光触媒の研究者の分野間融合によって人工光合成の研究が進められている。東京工業大学・石谷らのレニウム系二酸化炭素還元触媒が注目されている[5]。
- JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ[6]：光エネルギーと物質変換領域（研究総括 井上晴夫・首都大学東京、2012 年～）
  若手研究者を中心としたプロジェクトであり光触媒型、有機金属錯体型、生化学までを網羅した 40 人前後の研究者からなる研究プロジェクトである。
- JST 戦略的創造研究推進事業先導的物質変換領域（ACT-C）[7]：低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出(國武・北九州産業学術推進機構／根岸・パデュー大学ら、2012 年～)
  この中で「太陽光と水で二酸化炭素を資源化する光触媒反応系の開発」として豊田中研・森川らは半導体光電極と有機金属錯体のハイブリッド電極で二酸化炭素還元を実現している[8]。この他にも多種の人工光合成研究が取り組まれている。
- 経済産業省未来開拓研究：グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）（人工光合成化学プロセス技術研究組合(ARPChem)[9]、堂免・東京大学ら、2012 年～）
  光触媒による人工光合成から水素を生産し、化学品原料として用いるトータルプロセスの研究開発を行っている。最近では堂免らにより粉体光触媒から水分解において高効率な光電極を構築する方法を見出されている[10]。また光電気化学系で光カソードと光アノードを組み合わせ 1%前後の太陽光エネルギー変換効率で水を水素と酸素に分解する方法を見出している。

なお､再生可能エネルギーからの化学エネルギー物質の生産技術開発については､2013 年度から「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」のプロジェクトが文部科学省・経済産業省の連携で開始され、JSTの先端的低炭素化技術開発(ALCA)、CREST 事業で展開されている。さらに 2014 年度からは戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)に展開している[11]。経済産業省でも同期して再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発を展開しているが、前年、多種の人工光合成のプロジェクトが立ち上がったため、これらのエネルギーキャリアプロジェクトでは人工光合成はほとんど取り上げられていない。

・国外

人工光合成型エネルギー変換のプロジェクトは世界各国で進んでいる[12]。主なものでは DOE が 2010 年に人工光合成研究拠点 JCAP（Joint Center for Artificial Photosynthesis）などをスタートさせている[13]。米国では同時期に Energy Frontier Research Centers (EFRCs)が拠点型研究ネットワークとして設立され[14]、この中でも人工光合成型エネルギー変換の研究が進められている。また、NSF が主導する CCI Solar (Center for Chemical Innovation in Solar Fuels)が立ち上がっており、８つの CCI の１つで関連する研究が取り上げられ、2005 年から年間数億円規模の基礎研究が行われている。また、Northwestern 大を中心に当該分野の研究機関をネットワークする SOFI (Solar Fuels Institute)が組織され、研究者間の横連携、実用化を目指した縦連携を模索する動きも注目される。さらに、SunCatalytix[15]や LiquidLight[16]のような大学主導のベンチャーも立ち上がり、産業界の一部も本格的に興味を持ちだした。一方で、近年、シェール資源の開発や最近の原油価格の急速な低下により、米国内におけるクリーンエネルギーに関する関心度は低下している側面もある。

欧州では 2014 年から FP7 の後継となる HORIZON2020 (H2020)において重点課題としてクリーンエネルギーを設定し、再生可能エネルギー分野の研究開発が積極的に実施されている。NanoPEC、EuroSolarFuels、SOLARH2、SOLHYDROMICS など多くの人工光合成に関わるプロジェクトが進行している[12]。

韓国では KCAP(The Korean Centre for Artificial Photosynthesis)が進行している[17]。

また中国では Dalian National Laboratory of Clean Energy を Dalian Institute of Chemical Physics (DICP), Chinese Academy of Sciences (CAS)内に 2008 年に設立し、この中で人工光合成型太陽エネルギー変換は行われている。

また、ソーラー燃料生産の国際ネットワーク[16]が設立されている。

（５）キーワード

太陽光、水分解、二酸化炭素還元、酸素発生、半導体光触媒、有機金属錯体、可視光有効利用、Z スキーム型、光合成、植物模倣

（６）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	◎	↗	本文に示す各種の人工光合成プロジェクトの中間評価の時期であり、多くの研究成果が上げられている。
	応用研究・開発	◎	↗	太陽電池の効率をターゲットにした、エネルギー変換効率の目標を掲げて研究開発がされていて、実用化に近い段階での研究開発が進められている。またフィージビリティ検討やプロセス設計などにも着手していて、応用研究が展開しているといえる。
	産業化	×	↗	人工光合成は実用化の段階にはない。しかし、経済産業省のプロジェクトは多数の民間企業を含んでいて、産業化の土台はできつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	EFRCs, JCAPによって積極的に研究が進められている。ナノテクノロジーを活用した画期的な光触媒のデザインが提案されているが、実際に高いエネルギー変換効率で人工光合成型反応を行うものは、太陽電池を応用したものがほとんどである。
	応用研究・開発	○	→	DOEが研究促進を行っているため、基礎研究を超えた取り組みがなされている。また米国ではElectrofuelsプロジェクトなど[19]、再生可能電力で化石資源を代替する燃料を生産する方法の開発のプロジェクトもあり、これらとの相互作用で人工光合成の注目度は高まっている。 大学教授が興すベンチャーも産業化への重要な推進力となっており、D. Nocera（Harvard）のSun Catalytix[15]やA. Bocarsky（Princeton）のLiquid Light[16]などがある。 しかし、米国、特に応用側の研究者においては、近年シェールガス関連技術の注目度が急激に高まった分、再生可能エネルギー技術への期待は減少している。
	産業化	×	→	人工光合成は未だ実用の段階になく、産業が形成されているとは言い難い。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州はEPLFのGrätzelらの色素増感太陽電池などの光電気化学研究基盤が厚く、光触媒電極を用いた人工光合成反応の研究は進められている。
	応用研究・開発	○	↗	欧州ではSolarFuelなどの再生可能電力から化学燃料を生産するプロジェクトもあり[20]、実用化を見据えた研究が進んでいる。Grätzelらはベンチスケールで色素増感太陽電池と半導体光電極を組み合わせソーラー水素を生産するシステムを構築しているので、応用への視野は開けているといえる。
	産業化	×	→	人工光合成は未だ実用の段階になく、産業が形成されているとは言い難い。
中国	基礎研究	△	↗	人工光合成への注目度は高いが、科学技術として成熟しているとは言い難い。欧米・日本の模倣が多く、独自性のない研究が多くみられる。
	応用研究・開発	△	→	実用化を見据えた研究開発を行っているとは考えにくい。未だ基礎的な段階の研究が多い。
	産業化	×	→	人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。
韓国	基礎研究	○	↗	KCAPが設立されJCAPと連携しているが、それほど注目すべき成果は見られない。
	応用研究・開発	△	→	実用化を見据えた研究開発を行っているとは考えにくい。未だ基礎的な段階の研究が多い。
	産業化	×	→	人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1）A. Fujishima, K. Honda, *Nature*, 1972, **238**, 37.
2）O. Khaselev, J.A. Turner, *Science*, 1998, **280**, 542.
3）S.Y. Reece, J.A. Hamel, K. Sung, T.D. Jarvi, A.J. Esswein,, J.J. H. Pijpers, D.G. Nocera, *Science* 2011, **334**, 645.
http://web.mit.edu/newsoffice/2011/artificial-leaf-0930.html
4）文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究
http://artificial-photosynthesis.net/
5）東京工業大学ニュースリリース
http://www.titech.ac.jp/news/2014/024699.html
Y. Yamamoto, H. Takeda, T. Yui, Y. Ueda, K. Koike, S. Inagaki, O. Ishitani *Chem. Sci.*, 2014, **5**, 639-648.
6）JST 戦略的創造研究推進事業個人型研究さきがけ「光エネルギーと物質変換領域」
http://www.jst.go.jp/presto/chem-conv/index.html
7）JST 戦略的創造研究推進事業先導的物質変換領域（ACT-C）
http://www.jst.go.jp/act-c/
8）JST　ACT-C 太陽光と水で二酸化炭素を資源化する光触媒反応系の開発領域
http://www.jst.go.jp/act-c/research_area/ongoing/morikawa.html
9）経済産業省ニュースリリース
http://www.meti.go.jp/press/2012/11/20121128003/20121128003.html
10）K. Domen, “Innovative fabrication of photoelectrodes for solar water splitting”, SPIE Newsroom, 2014, doi: 10.1117/2.1201408.005496.
11）JST 戦略的イノベーション創造プログラム「エネルギーキャリア」
http://www.jst.go.jp/sip/k04.html
12）Solar Fuels and Artificial Photosynthesis, RSC Advancing the Chemical Science, Jan. 2012.
http://www.rsc.org/images/Solar-fuels_tcm18-221433.pdf
13）米国 DOE, The Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)
http://www.energy.gov/articles/fuels-sunlight-hub
http://solarfuelshub.org/index.html
14）米国 DOE, Energy Frontier Research Centers (EFRCs)
http://science.energy.gov/bes/efrc/
15）Sun Catalytix
http://www.suncatalytix.com/about.html

16) Liquid Light
http://liquidlightinc.com/
17) Korea Center for Artificial Photosynthesis (KCAP)
http://www.k-cap.or.kr/e_index.html
18) Solar Fuels Institute
http://www.solar-fuels.org/
19) 米国 Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), Electrofuels
http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels
20) SolarFuel GmbH
http://setis.ec.europa.eu/system/files/Presentation%20by%20Stephan%20RIEKE.pdf

３．１．３　燃料電池

（１）研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池は、水素などの燃料ガスと酸化剤である空気（酸素）から電気化学反応（酸化還元反応）により電気エネルギーを直接取り出す装置であり、燃料電池自動車、家庭用などの分散型高効率電源として、さらには複合サイクル発電などと組み合わせた発電の高効率化への応用も期待されている。

発電特性を左右する電極（触媒）材料の高性能化、高耐久化、低コスト化、異なる温度領域での作動を可能にする新規電解質材料創製、実用化・製品化に向けたセルスタック（燃料電池の積層体）やシステム技術開発、最適運転指針の確立など、研究開発対象は多岐にわたる。これらの研究開発においては、原子レベル観察から、３次元可視化、その場観察、システム評価手法などの階層的な評価手法も含めたエネルギー変換デバイス・システムの設計技術基盤の確立が求められている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

燃料電池は、化学エネルギーから電気エネルギーへの変換過程で熱や運動エネルギーを経ないため、内燃機関などに比べてエネルギー変換効率が高く、二酸化炭素の排出を大きく削減することが可能であり、今後のクリーンエネルギー時代のキーテクノロジーである。

燃料電池のセルは、電解質膜とその両側にある燃料極（アノード）と空気極（カソード）で構成され、それぞれの極には電気化学反応を促進する触媒が配置されている。電解質膜やその中を通過するイオンの種類によってリン酸形（PAFC）、溶融炭酸塩形（MCFC）、固体高分子形（PEFC）、固体酸化物形（SOFC）の大きく４種類に分類される。PEFC は高出力密度化や小型化が可能であり、室温付近で動作することから自動車や家庭用定置電源などにおいて有望な電池である。特に、2015 年から、燃料電池自動車（FCV）の一般販売が開始される予定であり、そのための量産技術開発や水素インフラ整備が加速されている。

700～900℃付近の高温で作動する SOFC は、熱需要に比べて電力需要の方が多い家庭向けのみならず、業務用・産業用や既存の複合サイクル発電と組み合わせて 70%を超える超高効率発電の技術としても期待されている。現在、家庭用燃料電池（通称「エネファーム」）の主流は PEFC であるが、より効率の高い SOFC 型エネファームの商用化が 2011 年に始まり、業務産業用も 2017 年からの市販開始が国のロードマップに明記されている。

［これまでの取組み］

日本では、ハイブリッド車の普及が進む中、電気自動車と燃料電池自動車の将来市場の棲み分けの議論も進められた。一般に前者は、短距離中心のコミューター的な役割が期待されるのに対し、燃料電池自動車は、航続距離や燃料充填時間が現在の自動車と同等であることから、中長距離向けの用途で期待される。

2011 年には、自動車・家庭用電気・エネルギー企業が参加する燃料電池実用化推進協

議会（FCCJ）の参加企業 13 社によって、2015 年からの燃料電池自動車の普及に向けた量産と 4 大都市圏での水素インフラ整備に関わる共同声明などが出されている。

NEDO 新エネルギー技術開発プログラム「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」(2005～2009 年度)、経済産業省「水素・燃料電池実証プロジェクト(Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project)」（2002～2010 年度）などによって実証試験と水素インフラ整備が行われてきた。2.5～3 KW/L レベルの高性能化や高耐久化、量産技術の進展を受けて、2015 年からの FCV の一般販売が計画されている。

家庭用発電については、2005～2008 年 NEDO/NEF の「家庭用 PEFC の大規模設置事業」、2007～2010 年の「家庭用 SOFC の実証試験」を経て、2009 年「エネファーム」補助事業が開始され、日本で、2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始され、技術力の高さを示しているが、より一層の低コスト化が必要となっている。また、2010 年度に数十台規模の SOFC 実証試験が実施され、その成果を踏まえて、JX 日鉱日石エネルギー社などが 2011 年から SOFC 型で発電効率 45%の高効率エネファームの発売を開始するなど、家庭用定置型電源・コジェネ利用においては我が国は世界を圧倒的にリードしている。

NEDO は「燃料電池・水素開発ロードマップ 2010」を策定し、燃料電池・水素利用技術として定置用燃料電池システム、燃料電池自動車、水素インフラの 3 本柱を設定し、特に PEFC と SOFC に注力した技術開発、実証研究、基準づくり・標準化を一体化させた研究開発が実施された。経済産業省では「水素・燃料電池戦略協議会」が設置され、産業界との議論を踏まえて「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が 2014 年 6 月に策定された。ロードマップでは、2030 年までの水素社会の構築の工程表を提示し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車に加えて、クリーンな水素による発電を想定することで、より一層の低炭素高効率社会の実現を目指している。この中で PEFC は、さらに低コスト化と耐久性向上のための研究開発を実施し、乗用車のみならず商用車や鉄道・船舶・航空機などへ利用先を拡大することが期待されている。「日本再興戦略 2014」等においても、燃料電池自動車の 2015 年販売開始、水素ステーションの設置支援、業務産業用燃料電池の 2017 年市販開始、将来的な水素発電導入や再生可能水素技術開発などが明記されている。

家庭用燃料電池では、PEFC で総合効率が 94～95%レベル（発電効率は 40%程度）まで向上し、SOFC においては発電効率が 45～46.5%での一般販売が開始されている。PEFC では、定価 200 万円を切る普及機の販売が本格化するなど、低コスト化が着実に進んでいる。SOFC でも 4 万時間の耐久性を見通すことができるようになり、年間数千台規模の本格的な家庭用システムの市販が始まっている。両タイプを合わせた累積販売台数は 10 万台に到達しつつある。

欧米では、バックアップ電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネ以外へのアプリケーション開発は、日本よりも活発に行われている。米国では、特にフォークリフトなどで PEFC の普及が始まり、業務用について、米国ブルームエナジー社などが政府や地域の補助金などを受けデータセンターなど IT 分野を中心に燃料電池ビジネスを急展開している。しかし、再生可能エネルギーなどを重視する政府の方針により 2010 年度に水素・燃料電池関連の

政府研究開発予算が大幅に削減され、太陽光、バイオ燃料、蓄電などが優先されていることから、燃料電池分野から他の産業へシフトする傾向が見える。それに伴って高い水準を保っていた技術水準と産業技術力が低下する可能性もあるが、2014 年度、予算抑制の方針を転換したことから今後の動向を見守る必要がある。欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。

中国は、著しい高度成長による国外からの技術流入と、悪化する環境に対応するためのグリーン技術への政府援助の推進により、研究水準・技術開発水準・産業技術力のすべてにおいて上昇を示している。韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。

研究開発面では、米国の研究予算に顕著に現れているように、太陽光発電、二次電池、バイオ燃料などに優先が置かれたことのあおりを受けて、全体的にややトーンダウン、スローダウンの感が否めないが、日米欧が先導している状況は近年と変わりがない。

［今後必要となる取組み］

実用化・普及に必要とされる課題は、システム全体における高効率化・信頼性向上（高耐久化）・低コスト化の３点である。PEFC では、空気極の触媒として白金が使用されているが、この白金のコストが本格普及のネックの一つとして挙げられることが多い（高温作動の SOFC では白金を使用しない）。

触媒の構造や電子状態の変化について構造反応解析を行うなど、材料を原子レベルやナノレベルで見直すとともに、革新的な電極触媒や電解質材料の創製、デバイス開発など上記３つの課題解決に資する以下のような取り組みが挙げられる。

1)電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発に向けた材料設計指針を構築
2)低コスト化を実現する非白金、低白金触媒の開発
3)中温作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料の開発
4)機動性やコンパクト化でメリットが出せる、中温（100～600℃）無加湿運転が可能な電解質の開発。
5)超高効率発電を実現し、高温作動における長時間安定性を有する、燃料電池のセル・スタック・システムの開発・実証

ただし、システムコストの中では、白金のコストは一部であり、移動体用システムでは、水素貯蔵タンクや電気・ガス・水・熱などの制御系統、定置用システムでは改質器や燃料処理器なども大きなコスト要因となっていることに留意して研究開発を進める必要がある。

（３）科学技術的・政策的課題

燃料電池普及の課題は、市場で要求される低価格で機能・性能を充たすシステムが開発途上にあることと、発電効率が高く長期耐久性に優れた製品の信頼性確立や大型化で

ある。

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトでは、2015 年からの燃料電池自動車の市販に向けた近々の技術課題に集中する傾向があり、その先の革新的な次世代技術に対する支援がほとんど成されていない。これらの技術開発は、ハイリスク・ハイリターンであり、一民間企業では対応は難しく、公的研究資金の投入が不可欠な領域である。

次世代を見据えた戦略として多くのシーズ技術を保有する大学・公的研究機関の基盤的研究強化と実用化に注力する企業研究をシームレスに橋渡しする必要がある。基礎学理に基づいた高性能な酸素イオン伝導体、水素イオン伝導体、電極触媒、改質触媒などの革新的材料開発は国内外で地道な基盤研究が行われているが、研究者ネットワークを分野横断的に構築して研究開発に取り組むことで、デバイス化までの研究開発を加速できる。国内には、高度な燃料電池システム技術を有する企業が多く、これらの企業が、迅速かつ効率的に大学発の革新的デバイスのシステム化を行うことで、我が国の産業活性化、さらには、エネルギーセキュリティの問題の解決につながるものと期待される。

これまでの電解質、電極材料の研究では、個々の独立した分野の研究に限定されることが多く、デバイスやシステムを理解した上での材料研究は少ない。また、それらを解析・検討するための新しい手法の開発も不可欠となる。ナノレベルにおいて、リアルタイムで直接観察する分光解析や SPring8 などでの放射光を用いた解析や可視化技術の確立など、次世代測定手法も重要となる。高温作動の固体酸化物形燃料電池においても、高温でのその場観察や可視化、三次元観察、非破壊観察など、革新的な評価手法が求められている。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・Pt 触媒

PEFC においては、本格普及時の燃料電池システムコストに占める電極触媒の割合が、非常に大きくなると予測されることから、主成分である Pt の使用量の現状からの大幅削減（<1/10）、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が世界的に実施されている。前者に関しては Pt 粒度制御、耐食性 Pt 担体利用、あるいは第二、第三成分との合金化とコアシェル化などが、さらには実用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。米国 DOE プロジェクトの成果として、従来の Pt 触媒にくらべて 25 倍程度の活性を示す格子状の構造をもった Pt 触媒が報告されており、今後の動向が注目される。脱 Pt 触媒に関しては、金属酸窒化物、カーボンアロイ、窒素ドープ炭素材料、ポリマーアロイ、Co 担持導電性高分子などが研究されている。これらの基礎研究で得られた結果を評価し、効率的に研究開発を推進するには、評価技術の共有化も極めて重要であり、燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）や NEDO 技術開発機構が評価プロトコルをまとめて公開している。

・PEFC 用の高分子電解質膜

最も使われているのがフッ素系電解質膜であるが、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に繰り広げられている。特に、安定性と耐久性の向上に対する日本企業（旭

化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位の最適化、安定剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発されている。非フッ素系電解質膜としては、芳香族炭化水素系電解質膜を中心に様々な材料が検討されているが、精密な分子設計と物性の精確な評価で、日米の研究開発がこの分野を率いている。ブロック共重合化により低加湿対応への可能性がひらけてきたことが最近の重要な成果であり、フッ素系電解質と同程度の導電率が得られている。今後はいかに耐久性を向上させるかが開発の鍵となる。PEFC の開発においては産学連携が重要となるが、FC-Cubic 技術研究組合や山梨大学「燃料電池ナノ材料研究センター」が PEFC の集中研となって、産学連携の中核的な役割を果たしている。

・SOFC

大きな技術課題であった耐久性をクリアするセルメーカーが増えてきている。劣化メカニズムの解明も着実に進み、形状が異なる各タイプの SOFC セルスタックにおいて、最適化が進んでいる。今後は、普及を見据えたシステムレベルでの性能評価、実証研究、製品化、その中で明らかになった技術課題の材料・セル開発へのフィードバックなどが、本格普及に向けて重要となる。SOFC の開発においても産学連携は重要であり、NEDO 事業で産学が連携した迅速評価手法の確立が進められている。さらに、世界でも例がない SOFC に焦点をあてた産学連携集中研として九州大学「次世代燃料電池産学連携研究センター」が経済産業省の補助で設置されており、実証研究や製品開発も含めた産学連携が進められている。

［注目すべきプロジェクト］

・米国

DOE が中心となって燃料電池水素エネルギーの研究開発プロジェクトが継続的に進められている。新たな取り組みとして、2014 年に中温域燃料電池に特化したプログラム REBELS（Reliable Electricity Based on Electrochemical Systems）が開始された。本プログラムは PEFC と SOFC の長所を組み合わせ、これまでにない革新的な燃料電池を作る試みで、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)が 33 百万ドルの予算を充てている。DOE は明確なコスト・性能目標を提示しており、自動車用燃料電池では、現状（2013 年）は 55 ドル/kW を 2020 年に 40 ドル/kW（50 万ユニット量産時）にし、最終的には 30 ドル/kW にすることを目指している。定置用小型燃料電池（5kW）では、2020 年に 1,500 ドル/kW、発電効率 45%、耐久時間 6 万時間以上を、定置用中型燃料電池（100kW～3MW）では、2020 年までに 1,500 ドル/kW（天然ガス利用）または 2,100 ドル/kW（バイオガス利用）で、発電効率 50%、耐久時間 8 万時間以上を達成することを目標としている。

現在、DOE が集中的に取り組んでいるのは白金担持量の低減と非白金触媒の開発、さらに低コストの膜・電極複合体（MEA）の開発（劣化低減を含む）である。白金担持量低減ではナノフレーム触媒をアルゴンヌ国立研究所とローレンスバークレー国立研究所が開発しており、また 3M のナノ構造薄膜（NSTF）を MEA に適用して 6.2 kW/g-PGM

を達成している。また特徴的なこととして、定置用の大型システムではMCFCの開発を支援している。なお、DOEは小型バックアップ電源として燃料電池の普及を支援しているが、家庭用の小型定置用燃料電池を普及させるプログラムは有していない。

・欧州

欧州燃料電池・水素共同技術イニシアティブ（European Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative：FCH JTI）の下、2008 年、欧州燃料電池・水素共同実施機構（FCH JU: Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking）が立上げられ、技術開発を含めた広範囲な取組みが継続して進められている。例えば、開発する触媒、電解質材料のMEAの構成材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響などの非常に多くの関連研究が実施されている。また Ene.Field プログラムでは、1000 台の燃料電池（高温型 SOFC、中温型 SOFC、高温型 PEFC、低温型 PEFC）の実証試験が欧州 12 カ国で実施されている。

ドイツは2007年に10年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」（NIP: National Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie）を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に充てるとしている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育研究省からのものである。R&Dとデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42%のリソースを自動車分野に充てている。定置用燃料電池分野ではCalluxプログラムで合計 500 台（現状 350 台程度）の定置用燃料電池の実証試験を進めている。参加企業はBaxi Innotech（PEFC）、Hexis（SOFC）、Vaillant（SOFC）である。ドイツでは定置用燃料電池の 2016 年の商用化を目指している。また商用 SOFC に特化したFuelCell@Homeプログラムを実施しており、Ceramic Fuel Cells（CFC）製のSOFCが200台導入される予定である。

・アジア

韓国のLG社は、英国ロールス・ロイス社のSOFC開発部門を買収し、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。現代自動車が燃料電池自動車の一般販売も限定的に始めているが、価格は一千万円を超える水準にとどまっている。

中国も燃料電池自動車の研究開発を推進している。PEFC 搭載バスや自動車の開発は現在実証段階である。2011 年～2015 年の「新 863 プログラム」では主として、PEFC 燃料電池車と関連技術、大型 SOFC スタック、PEFC と SOFC のコジェネシステムの開発に注力している。

（５）キーワード

固体高分子形燃料電池（PEFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、電気化学、固体イオニクス、ナノ構造制御、エネルギー変換、高効率発電、XAFS などの先端計測、非白金・低白金触媒、可視化手法

（６）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	◎	↘	NEDOなどによる研究資金により、全国の複数の集中的研究拠点の研究活動が本格化し、研究水準は引き続き世界をリードしている。しかし、燃料電池導入補助金や水素ステーション設置補助金の増加や二次電池研究への重点投資などに押される形で、基礎研究や次世代技術開発への支援は減少傾向。 PEFCにおいては、山梨大学を中心としたグループでの新規電極触媒開発や触媒製造プロセス構築、FC-Cubic（台場）においては、自動車メーカー等と連携した階層的な評価手法の確立、同志社大学などが中心となったコアシェル型の電極触媒研究と低コスト化に向けた取り組み、横浜国立大学を中心としたグループによる非白金電極触媒開発プロジェクトなどが進められている。並行して、各大学で、JSTや科学研究費補助金などの支援で、自由な発想に基づいた新規材料開発などが進められている。 SOFCにおいては、主要技術課題の一つである耐久性向上に向けた取り組みがNEDO事業で進められ、現在は迅速評価手法の確立に重点が移ってきている。並行して、各大学における新規材料開発や劣化メカニズム解明などが進められている。
	応用研究・開発	◎	→	燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持。集中研究拠点を中心とした産官学の連携強化も図られている。 また、過去数十年、燃料電池の研究に重点的に取り組んできた山梨大学は、「燃料電池ナノ材料研究センター（HyPer-FC）」において電極触媒研究に集中的に取り組んでおり、教育プログラムも含めた総合的な取り組みを継続している。 PEFC分野では、「FC-Cubic技術研究組合」が約10年間活動を継続しており、PEFCの実用化を実現した自動車メーカーおよび家庭用燃料電池「エネファーム」を販売する電機メーカーが、関連する大学とも連携して、集中研の役割を果たしている。大学の成果が触媒、膜メーカーなどに移管され産業化がすすめられている。 また、世界初のSOFC分野の産学連携集中研として発足した九州大学「次世代燃料電池産学連携研究センター（NEXT-FC）」においては、民間企業十数社が入居して、電池セルスタックの顕微観察評価や耐久性評価、実証研究などが進められている。 最近では、「グリーンアジア国際戦略総合特区」事業（平成26年度、17.5億円）も開始され、特に政府のロードマップに明記されている業務産業用SOFCの2017年市販開始に向けた取り組みが民間企業と連携して集中的に進められている。
	産業化	◎	↗	家庭用では固体高分子形燃料電池（PEFC）に続いて石油メーカーとガスメーカーから相次いで固体酸化物形燃料電池（SOFC）の一般販売が開始され、コストダウンや高耐久化技術開発が進展中。家庭用燃料電池の年間販売台数は８万台レベルに到達し、コジェネ利用において世界をリードしている。日本再興戦略においては、2030年までにエネファーム530万台（全世帯の１割）設置が明記されており、補助金なしでの自立的な本格普及に向けた、低コスト化などの取り組みが進められている。 自動車用では、国内各社の実証車の効率・運転性能・走行距離・車両重量など世界をリード。その性能を維持した上での、量産技術の確立による大幅なコストダウンが進行中で、それらを踏まえて、トヨタやホンダ、日産から燃料電池自動車（FCV）が2015年以降、順次発売される予定。欧米と比較して遅れ気味であった水素インフラ整備に関しても、全国100か所の水素ステーション整備などを関連業界が計画して、40基は超えており、国の方も補助率を向上させて、燃料電池自動車市販に向けたインフラ整備を後押ししている。 なお、水素社会構築に向けた取り組み加速に向けて、我が国の水素関連予算（資源エネルギー庁関係）はFY2014年の360億円（エネファーム補助金の補正予算を含む）に対し、FY2015年は401億円の増額要求が出されている。エネファーム導入、水素ステーション設置、燃料電池自動車導入への手厚い補助が予定されている。安倍総理からも、FCVの全省導入の方針が示されている。

米国	基礎研究	◎	→	研究資金は減少傾向。電気自動車関連研究への研究者の移動も見られ、停滞気味の状況が続いている。2010年度には水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約60%削減され、その影響は近いうちに顕在化すると予想される。また2013年度予算の優先課題を見てもソーラー、バイオ燃料、バッテリーなどが優先されており、水素・燃料電池のトーンダウンの感は否めないが、予算的には2014年度は2013年度と同等であり、2015年度も2014年度を維持するなど下げ止まる模様。ただし、水素社会構築の重要研究テーマとして位置づけられ高いレベルを維持している。また、論文では、固体高分子形燃料電池コアシェル触媒などに関するものの伸びが大きく、全体的にはレベルアップ。
	応用研究・開発	◎	→	DOEファンドにより、コスト低減のため、触媒Pt量低減のための材料技術の研究（合金触媒、コアシェル触媒、膜構造触媒、および、非白金触媒）と、低加湿度でも作動する電解質膜の研究が、強力に推進されている。研究チームは、国立研究所、大学、企業の連合により推進されている。開発されたコアシェル触媒や合金触媒などを産業化するための研究開発がベンチャー企業や大手化学会社などで進められている。 従来からの取り組みに加え、2014年秋から中温型燃料電池の開発プロジェクトが始まるなど、新しい試みも始められている。電気自動車関連への方向転換などにより、技術開発力は低下する傾向にあるものの日本と同等以上のレベルを維持していると判断される。
	産業化	○	↘	フォークリフト・非常電源用途、軍事用途など、ニッチな市場への展開は進行中であるが、自動車メーカーの取り組みは停滞気味。自動車会社のFCEVの実用化開始時期は、2020年以降に量産を見込む（GM）など、やや中長期的になっている。 PEFCに関して、バックアップ電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められている。またSOFCでは、ブルームエナジー社が200kW級の発電モジュールを組み合わせて販売しており、商用化で世界トップを走っている。GEもガスエンジンと組み合わせた、発電効率65%で1MWクラスの高効率分散型発電システムの開発を公表している。携帯用SOFCのベンチャー企業も活動中。
欧州	基礎研究	◎	→	FP7の枠組みの元、大学アカデミア向けのファンドによる研究開発が進められている。これに加えて、ドイツやスイスなどでは、各政府によるファンドや研究開発への税制優遇策がとられている。 フランスでは、原子力研究所（CEA）が産業化にそなえて、MEA内の水の挙動モデリングを含めた基礎研究から材料・システムの応用研究まで手がけている。 スイスでは、原子力研究所（PSI）において、基礎研究から、プロトタイプの試作まで手がけている。特筆すべきは、所有する中性子線源による燃料電池内の水の可視化研究であり、世界トップレベルを維持している。ただし、米国NISTなどにおける同様な活動が活発化しており、優位性は薄れてきている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツを中心に、自動車メーカーを含めての異業種連携により、水素社会インフラ構築を精力的に推進している。関連部材産業の技術開発も活発化しており技術水準は上昇している。オーストラリア発祥のCFCL社の市販に続き、スイスHEXIS社など各社で、SOFCの市販やそれを見据えた実証研究が行われている。
	産業化	○	↗	ドイツを中心として政府主導の環境技術への支援、各種実証事業も活発化しており、それに伴って関連産業のアクティビティ・技術力は向上している。米国同様、PEFCに関して、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められているが、SOFCの製品化には時間がかかっている。最近、デンマークのTopsoe社がSOFCシステム開発から撤退して、高温水蒸気電解（SOEC）に特化することを発表するなど、選択と集中も進んでいる。
中国	基礎研究	○	→	FCEVの産業化は、長期的にとらえており、もっぱら基礎研究や応用研究を重視している。国家８６３プロジェクトなどに従って重点的な取り組みを、選択された機関に集中投資して実施している。 主要研究機関での環境整備も進み、研究水準が上昇。PEFC、SOFC、バイオ燃料電池などあらゆる分野で論文数の数、伸びが大きく、燃料電池全体で、論文数は世界トップレベルだが、基礎研究レベルは欧州や米国には劣る。

	応用研究・開発	△	→	政府主導の環境技術への支援が増大、産学連携によるベンチャー企業中心に燃料電池主要部品およびシステムの内製化が進められており技術開発力が向上している。 FCEVのプロトタイプ車作成とデモンストレーションは、上海汽車からのベース車両提供などのサポートの元、同済大学（乗用車）と清華大学（バス）を中心におこなわれ、北京五輪、上海万博などで実施された。
	産業化	△	→	大学・国研の開発中心で産業技術力は高くないが、産業の高度成長およびオリンピックと上海万博での実証デモを経て、確実に向上している。上海汽車が2015年に1,000台規模のFCV（燃料電池自動車）の小規模量産を開始すると発表。
韓国	基礎研究	○	→	韓国科学技術院などを中心に、国のファンドで固体高分子形やリン酸型燃料電池、溶融炭酸塩形燃料電池など、定置用と自動車用の両方の応用を目指して研究開発に取り組んでいる。中国ほどの上昇傾向は見られない。
	応用研究・開発	○	↗	自動車用では、現代自動車で少量連続生産設備が完成。内製技術による日本メーカーに迫るスペックの車両開発が達成され確実な技術力向上が見られる。 定置用においても実証事業が進められ、着実に技術開発水準が向上している。 LG社がロールス・ロイス社のSOFC部門を買収し、SOFC分野の技術開発に本格参入。
	産業化	○	↗	POSCOが溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）の年間生産100MW規模を目指している。現代自動車が2013年2月に少量連続生産設備を完成、2014年6月から米国にてリースを開始した。CFRPの韓国内供給体制も構築が進み、水素タンクの韓国サプライヤもECE認証を取るなど、材料部品レベルでの活動が活発化。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) 平成 23 年度 NEDO 研究成果報告会資料（平成 24 年 12 月開催
http://www.nedo.go.jp/events/FF_100025.html
2) パナソニック株式会社ホームページ
http://panasonic.co.jp/ap/FC/index.htm
3) 東芝燃料電池株式会社ホームページ
http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/index.htm
4) JX 日鉱日石エネルギー株式会社ホームページ
http://www.noe.jx-group.co.jp/lande/product/fuelcell/index.html
5) アイシン精機株式会社ホームページ
http://www.aisin.co.jp/cogene/index.html
6) 特許庁「平成２３年度　特許出願技術動向調査報告書（概要）　燃料電池」
7) 米国エネルギー省　2014 年 Annual Merit Review プロシーディング資料
http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review14_proceedings.html
8) 経済産業省　水素・燃料電池戦略ロードマップ
http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html

３．１．４　熱電変換

（１）研究開発領域の簡潔な説明

廃熱や未利用の熱を電気として高効率に利用する技術開発を目的とする研究開発領域。固体の両端に温度差を与えると温度差に比例した起電力が発生するゼーベック効果を利用した熱電変換素子の高変換効率、高耐久、低重量、低コスト、低環境負荷を実現するための、材料のナノ構造制御、pn 制御技術、低次元量子構造（ナノワイヤ、ナノポーラスなど）の新規熱電材料開発、新原理（磁性や複合効果など）を活用した新規熱電材料・熱電変換素子開発などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

人類が使用する石油・石炭・ガスなどの一次エネルギーの約 7 割は未利用の廃熱として捨てられており、この一部でも電気エネルギーとして回収できれば、省エネ・省 CO_2 社会の実現へ大きく前進することができる。廃熱の大部分は 100~300℃の低温熱エネルギーであり、熱電変換材料・素子を用いた熱電発電は少量の熱エネルギーでも電気に変換できることから、希薄な廃熱エネルギーを回収できる有望な技術として注目されている。また、固体素子であることからメンテナンスフリーでスケール効果が無いため、エネルギーハーベストへの応用も期待される。熱電発電によりセンサ・モジュールにおける電源の問題が解決されれば、エネルギーハーベスト市場のグローバルな拡大が予想される。熱電変換は冷却用のペルチェ素子として実用化されてはいるが、廃熱や未利用熱による発電の実用化には至っていない。しかし、近年のナノテクや新規材料開発の進展により熱電変換の効率が向上し、世界中で実用化に向けた研究開発競争が激化している。

［これまでの取組み］

熱電変換材料の開発は 1950 年代に遡り、ペルチェ冷却素子用途として Bi_2Te_3、宇宙用電源として Si-Ge 合金が実用化された。しかし、熱電変換の高効率化には高ゼーベック係数、高電気伝導、低熱伝導という、相反する性質が材料に求められるため、材料の無次元性能指数 ZT は 1 程度であり、実際の変換効率は数%にとどまっていた。

1990 年代以降、物性理論に基づく新たな設計指針の提唱や、それまで 2 元系化合物半導体が中心だった研究対象が、3 元系以上の様々な材料へと探索の幅が広げられ、各国の環境・エネルギー政策への注力などもあり、熱電材料の研究は活性化し、質、量ともに飛躍的に伸びている。「ガラスのように格子熱伝導を抑え、金属のように電子を流す(Phonon-Glass Electron-Crystal)」材料の概念が提唱されたことは研究者を大いに刺激した。この設計指針に基づき、クラスレートやスクッテルダイトなど、かご状骨格にゲスト原子をゆるく閉じ込めた特別な結晶構造の材料では、ラトリング現象などでフォノンの選択的な散乱を起こし、格子熱伝導を極端に低く抑えられることが発見され、1 を大きく超える ZT を持つ材料の開発につながった。一方、ナノテクの観点からは、超格子などによる低次元量子構造における閉じ込めによるフェルミ面近傍での状態密度増大がゼーベック係数の増大に有効であることが提唱され、また、材料の適度なナノ構造化（結晶粒の微細化）によるフォノンの選択的散乱を利用した材料で ZT の増大が図られてい

る。PbTe 系などでは、ナノ構造化により ZT が 2 を超えるような材料も開発されている。

従来は米国と日本がそれぞれ新規概念や材料研究の厚みで牽引してきた感があったが、2000 年代中盤以降、米国に加えて欧中韓でも国レベルでの研究予算の大増強があり、研究人口の大幅な増加に伴って研究活動の大幅なレベルアップが達成されている。例えば、新規材料発見後の高性能化研究においては、中国が日本を凌駕するケースも数多く出て来ている。以前は論文数で日本は米国と並んで世界トップであったが、現在は、米国と中国の 4 割程度に留まっている。各国の特徴としては、米国では毒性や希少であっても最高性能を追求する PbTe 系や新原理を発掘する研究、日本では有害元素や希少元素を含まない元素戦略的な新規材料創製（シリサイドや酸化物、ハーフホイスラー合金など）と開発研究、欧州はそれに加えて導電性ポリマーの研究や評価研究および自動車応用の開発研究、中国はマンパワーを活かした系統的な最適化研究、韓国はウェアラブル熱電研究などが挙げられる。

産業に関しては、冷却用のペルチェ素子が一定のマーケットを形成しているが、熱電発電が築き得る大きな市場がまだ十分には実現していない。熱電発電は、高温、中温、低温（室温付近）のさまざまな熱源を対象にした省エネからエネルギーハーベスティングの多種多様な応用が考えられ、その実用化は今後の科学技術動向や政策に依存する。

［今後必要となる取組み］

これまでの有望材料の改良や新規材料の創出とともに、実績のあるナノ構造化やカゴ状などの特徴的な原子構造に基づく熱伝導率低減手法を発展させることや、性能を飛躍的に向上させる新原理の探求も必要である。

材料のナノ構造化は ZT の向上に有効な手法であるが、人工的に作製したナノスケールの粒子を焼結する方法では、粒界による電気伝導率低下を回避する必要がある。バルク材料中にナノスケールの第 2 相を析出させる方法では、母相と粒界整合性の良い析出物により電気伝導率を低下させずに熱伝導率のみ低下させることができるが、適用可能な材料が今のところ限られており、適用範囲の拡大に向けた研究開発が必要である。

電気的性能を向上させる新しい手法として変調ドープが挙げられる。変調ドープは、材料中のキャリア供給相と伝導相（母相）を分離し、キャリア供給相から母相にキャリアを流す方法である。キャリア移動度を低下させずにキャリアドープが実現できるため、高い電気伝導率が期待できる。さらに、ゼーベック係数を向上させる方法として、結晶粒界によりエネルギーの低いキャリアを遮断するフィルタリングや、不純物ドープによる共鳴準位形成が提唱されており、これらを効果的に用いた材料の開発が期待される。閉じ込め効果やエネルギーフィルタリングを発現し得る低次元量子構造（ナノ薄膜、超格子、ナノポーラス、ナノワイヤなど）もその有望な候補である。

環境調和型・低コストの熱電材料の開発もこれまで以上に求められていくとみられ、バルク材の応用には元素戦略的な開発を進める必要がある。例えば、カルコパイライトや安四面銅鉱などの鉱物をベースにした高性能材料も見出されており、こうした元素戦略的材料の今後の研究の進展が期待される。また、熱電材料の総合的な開発には、物理、化学、材料科学を統合した連携研究の取り組みが必要であり、さらに実用化への諸問題を解決するためには、企業、大学、国研が実質的に密に連携するオープンイノベーショ

ンの取組みが鍵となる。

熱電変換素子の産業化に関しては、利用する応用で熱電変換素子に求められる動作温度や性能が異なるため、応用目的に合致した研究開発を行う必要がある。例えば、廃熱の回収においては廃熱エネルギー量や回収源(温度・形態)を考慮した高変換効率・高耐久性の材料開発、エネルギーハーベストの用途では低温動作・低重量・低コスト・低環境負荷の材料開発、冷却・過熱制御では高変換効率・省電力特性の材料開発が求められる。

（３）科学技術的・政策的課題

我が国においては、熱電変換用の新材料開発に多くの人材・資金が投入されてきたが、既存熱電材料であるビスマステルライドや鉛テルルの性能（発電効率）を超えるものはいまだ開発されていない。新たな方法としてナノ構造化や低次元量子構造による熱電材料の高性能化が報告されてきたが、今後のさらなる高度化には、ナノスケールでの熱計測・解析技術の開発が必要であり、また、実用化・産業化に向けては、プロセス技術やモジュール技術などの周辺技術の開発も重要である。

日本は個々にオリジナリティの高い有望新規材料や材料研究シーズを見出しているが、最近は研究予算に勝る欧米中韓が厚みのある研究を早いスピードで展開しており、高性能化などで海外に先行される傾向にある。JST の ALCA や CREST、NEDO、経済産業省主導のプロジェクト等で個別に実施されているものの、戦略的な投資はなされていない。このため、今後は、欧米中韓に対抗できるような戦略的なプロジェクトの設立が必要と考えられる。日本の熱電変換に関わる研究者の分野の裾野は非常に広がっており、新規なマーケットの基盤となる材料、プロセシング、モジュール、熱管理などに関わるさまざまな科学技術や技術要素の知財を先取りできるチャンスがあると考えられ、総合的で戦略的な研究投資と開発が望まれている。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

材料開発の設計指針としては、これまでは、フィルドスクッテルダイト化合物に代表される結晶構造制御による Phonon-Glass Electron-Crystal の実現と、ナノ構造化による格子熱伝導率の選択的低減の二つが主要なものであった。ところがここ数年の間に、いくつかの注目すべき現象とそれを利用した熱電材料の性能向上の可能性が提唱されつつある。具体的には、バンド構造の精密制御によるゼーベック係数の増大、キャリアのエネルギーフィルタリング効果を利用したゼーベック係数の増大、変調ドープによるキャリア移動度の増大、結晶中のイオン種の伝導による格子熱伝導率の低減等である。また、従来からあるナノ構造熱電材料の開発研究においても、近年は、特に異種のナノ組織間の格子整合性が熱電特性の向上に極めて重要であることが見出されてきている。

これらの新たな設計指針に基づいた材料開発がなされているが、材料系のトレンドは、大きく二つのグループに分かれている。一つは Pb-Te 系材料であり、もう一つは環境調和型元素から構成される材料、とりわけシリコンである。Pb-Te に関しては、海外、特に米国において研究が活発に行われており、極めて高い ZT を示す物質も多く報告されて

いる。これらの Pb-Te は、Advanced Pb-Te と呼ばれている。一方、環境調和型元素から構成される材料に関しては、我が国が世界の熱電材料研究をリードしている。古くは酸化物熱電材料のブームを起こし、また最近はバルクナノシリコン熱電材料の開発研究が積極的に進められている。

酸化物に関する熱電研究は日本がリードして盛んに行われてきたが、共有結合性を増すことで電気伝導度を増大させた高性能の硫化物、セレン化物が新規に見出された。窒化物の高性能材料も理論計算により示されている。さらに、マテリアルデザインの観点から、ナノブロックインテグレーションの手法が発展し、酸化物に加えて、層状硫化物で、無機・有機のハイブリッド材料も得られ、その優れた制御性が注目されている。

キャリアの精緻な調整により高性能有機材料が報告され、室温近傍のエネルギーハーベスティングに向けた研究が加速している。一方で、高温応用に関しては、発電所における topping cycle の試算や、太陽光集光熱電発電の実証実験が行われて高性能高温熱電材用の必要性が改めて示されている。

高性能化に関する技術動向では、ナノ構造化のためのボールミルプロセスに対して、容易さやコストにメリットがあるナノシート創製などのボトムアッププロセスの開発も進んでいる。一方で、パワーファクターを増強する方法への関心が高まっており、低次元量子構造による閉じ込め効果の幅広い実践や、新原理として発電に本質的なゼーベック効果と電気伝導パスを分離し得る複合効果も報告されており、今後の発展が期待される。また、磁性を利用する試みも増えており、スピンゼーベック効果や異常ネルンスト効果、磁性半導体に関する熱電研究が精力的に進められている。

デバイス・システム研究に関しては、中温域で使用が想定される熱電発電デバイスに注目が集まっている。具体的には、アンチモン系のスクッテルダイト化合物やスズ系のハーフホイスラー合金等を熱電材料としたテルルフリー熱電発電デバイスの開発に期待が寄せられている。新しいシステムに関しては、燃料電池からの高温排熱を利用した熱電発電システムや、従来から注目されている太陽光発電とのハイブリッド発電システムなども、継続して注目を集めている。

［注目すべきプロジェクト］

米国では、熱電関連の EFRC（Energy Frontier Research Center）で唯一更新が内定した MIT 中心の太陽光熱エネルギー変換に関するプロジェクトが、実用化への研究を加速させている。また、スイスの EMPA では太陽光集光熱電発電の実証研究が行われている。

欧州では、2008～2013 年の熱電研究の公的資金投入額が、日本の少なくとも 6 倍という試算があり、大型のプロジェクトが複数あるが、特に自動車応用を目指したものが大きい。

日本国内では、JST の ALCA において、バルクナノシリコン熱電材料の開発研究が 2011 年度から 2016 年度までの予定でスタートしており、着実な研究成果が得られている。同じく JST の CREST においては、スピンゼーベック効果に関する研究開発が 2010 年度から 2014 年度の予定で実施されている。実用化の観点からは、NEDO においてかご状物質を利用した熱電材料の開発研究（2009 年度～2012 年度）や製鉄プロセスにお

ける排熱を利用した熱電発電システムの開発（2011 年度～2013 年度）などが実施されている。また、2013 年度からは、経済産業省の所管で、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発事業がスタートしており、その中で、高効率熱電材料の開発もターゲットとして設定されている。また、物質・材料研究機構にオープンイノベーション拠点が形成され、複数の企業とアカデミア機関が参画し、基礎研究を含めた密な産学官連携により熱電材料と熱管理技術の総合的な開発を行う取組みがある。

（５）キーワード

廃熱利用、廃熱回収、再生エネルギー、エネルギーハーベスティング、エネルギー変換、熱電発電、熱電材料、熱電変換素子、ナノ構造制御、低次元量子構造、ナノスケール熱計測技術、元素戦略、低環境負荷

（６）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	◎	→	新規物質開発やナノ構造物質、スピンゼーベックのような新現象について盛んに研究が行われており、特に材料分野では高い研究レベルを維持している。しかし、他国が大きく論文発表数を伸ばしているにも関わらず、日本のここ数年の論文発表数は横ばいであり、また、文部科学省系の熱電基礎研究へのファンディングが近年は相対的に少ない。一方、天然鉱物や環境調和型材料に関する、熱電発電の実用化を見据えた研究が増加傾向にあり、他分野からの熱電研究への参加も増えており、今後増強する兆候がある。
	応用研究・開発	◎	↗	NEDO 事業として、大手の鉄鋼・材料等のメーカーと大学とが共同で熱電モジュールの開発を進めており、工場排熱を利用した発電の実証実験等が行われている。また、経済産業省の未利用熱を削減する大型プロが産総研と企業中心に立ち上がり、モジュール関連技術や熱管理技術などのモジュール関連技術の開発が進むと期待される。NIMS にオープンイノベーション拠点が形成され、基礎研究を含めた産学官連携により企業の応用開発研究を加速させる取組みもある。
	産業化	○	↗	冷却目的のペルチェ素子については、大手から中・小規模のメーカーまで多くの企業が手掛けている。試作的なモジュールやデバイスに関する新規参入企業の発表が増えており、従来の焼却炉や工業炉への取組みに加えて、エネルギーハーベスティング用の薄膜応用や、温排水や製鉄所の廃熱利用の実証実験が行われるなど、熱電応用に関わる企業や応用先が増えている。
米国	基礎研究	◎	→	新設計指針(低次元量子効果、フォノンの選択散乱、共鳴準位など）に基づく超高性能材料の発表で世界をリードしている。一流ジャーナルへの掲載論文数も高いシェアを維持している。一方で高水準の研究成果が少数の研究グループに偏っている面もある。また、DOE の EFRC で熱電に関連する拠点が１つだけ（MIT 中心のもの）継続が内定され、今後基礎研究の活動が相対的に鈍化する可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↗	NSF や DOE の車載モジュールへ向けた大型プロジェクトが継続しており、さまざまな用途へ向けた新規ベンチャー企業などの動きも活発化している。また、NASA の JPL は熱電発電の技術実証・応用実証を行ってきており、今後、実用化へ向けた応用研究開発が加速すると考えられる。

	産業化	○	↗	DOE の自動車プロジェクトに大手メーカーが参画し、実用化に近づいている。また、材料から発電モジュール、応用まで、多くのベンチャー企業・中小企業が存在している。ハーフホイスラー合金や Mg_2Si など、比較的新しい材料を用いたモジュールも販売されるようになってきている。ペルチェやエネルギーハーベスティング用の熱電モジュールやデバイスのメーカーが大型企業に買収される複数例の動きがあり、熱電マーケットの拡大が予測されていることを裏付ける。
欧州	基礎研究	◎	↗	以前は日米のレベルに届かないものであったが、環境・エネルギーの新規技術に注力する EU の FP7 やドイツの DFG や各省においてここ 10 年間非常に多くの研究予算が投入され、バルクの新規材料創製から薄膜創製、評価、材料開発が高いレベルで進行しており、ドイツやフランスを中心に、論文発表数が増加傾向にある。ドイツ、フランス以外の欧州の国でも研究が活発化し、全体傾向として日本同様に低環境負荷の材料が特に対象となっている。また、有機材料に関しては、比較的高い性能を示す PEDOT 系の火付け役になっている。
	応用研究・開発	◎	↗	FP7 において熱電変換に関するプロジェクト研究が数件実施されており、有機材料やナノ材料の基礎研究からモジュール開発まで幅広く取り組まれている。特にドイツは上記の多くのプロジェクトに関与しているのに加え、ブラウンホーファー研究所を中心とした自動車応用を目指したプロジェクトにおいて、モジュールとシステムの開発や評価に関する技術開発、スケールアップなどを精力的に推進している。フランスでもモジュールの設計や解析研究が進んでいる。活発な基礎研究とファンディングに押し上げられて応用研究開発の動きもさらに進むと考えられる。
	産業化	○	↗	ロシアやウクライナ、ドイツに多くのメーカーが存在する。ドイツでは、エネルギーハーベスト用の熱電発電モジュールを手掛けるベンチャー企業が数社あり、中でもブラウンホーファー研究所の研究者が設立したベンチャー企業は半導体微細加工技術を利用したエネルギーハーベストや局所冷却用の特色のある薄膜モジュールを展開しており、生産規模を拡大している。自動車車載が一つの大きなターゲットであり、ドイツを中心に自動車、半導体、材料、エレクトロニクスメーカーが積極的に取り組んでいる。新規素材で高性能のカゴ状中高温熱電材料に関しては、大型供給の体制を整えている材料メーカーもある。
中国	基礎研究	◎	↗	熱電国際会議の発表数からわかるように極めて活発に研究活動が行われている。大学・研究所に日米欧留学から帰国した研究者が研究活動を引っ張っていることや、人材派遣を含めた米国との密接な共同研究で底上げがなされ、論文発表数や質が徐々に向上し、論文数では米国と並びトップである。また、大型の拠点プロジェクトが複数走っており、バルク材料の新規創製、ナノ構造化などによる高性能化で優れた結果をすでに出している。
	応用研究・開発	◎	↗	冷却と発電素子の両方を製造する会社が増え、活発な基礎研究と連携した製品開発を行っている。熱電変換、太陽エネルギー等の技術が更に伸び、先進国に輸出している。大型の拠点プロジェクトでも、電極接合や応用研究開発により力を入れ始めている。中国はマンパワーに秀でており材料の最適化研究にも強いので、今後さらに企業連携をとおした応用のための技術開発が加速すると予想される
	産業化	○	↗	産業化は発電素子よりも冷却素子が中心であり、国防、家電製品、電子デバイス、工業、医療、農業等への応用が進められている。現状では、日米欧と比較して、熱電モジュール作製技術や周辺技術が進んでいるとは言えないが、冷却素子のメーカーがあることと、基礎研究と応用・開発研究の活動レベルの上昇を考慮すると産業競争力の向上が予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	本格的な参入は上記の国や地域よりも遅く、活動規模も小さかったが、大学・研究所の研究者も徐々に増えるとともに国家プロが立ち上がり、活発化している。理論研究やウェラブル熱電のための有機材料や冷却応用のための Bi_2Te_3 系材料などに特に力を入れており、直近の ICT2015 では、開催国の米国、日本に次いで 3 位の参加人数で、存在感が増している

韓国	応用研究・開発	○	↗	大手有名企業が中心なって実用に向けた応用研究開発が活発であり、かなりのスピードで独自の材料を開発している。また、高性能熱電素子開発に取り組んでいるメーカーも徐々に増えている。特に、ペルチェ素子やウェラブル熱電を目的とした薄膜や有機系材料に関する技術開発が伸びると予想される
	産業化	△	↗	サムソン電子が熱電素子を製造し始めている。また、大手の材料・エレクトロニクス大企業の熱電関連の発表が学会で増えていることから、少なくともペルチェ素子の冷却応用の産業化が進んでいることが示唆される。製品展開力が強いので、今後の動向に注目する必要がある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）Journal of Electronic Materials Vol. 42 (No.7), Vol.43 (No.6) (熱電国際会議 ICT2012, 2013 特集号)
2）ICT2014, 2014.7.6-10, Nashville, USA
3）MRS Fall Meeting 2013.12.1-6, Boston, USA
4）K. Biswas et al., Nature, 489, 414-418
5）B. Yu et al., Nano Letters, 12, 2077–2082.
6）2nd Dresden Conference: Energy in Future, 2013.5.28-29, Dresden, Germany.
7）PACRIM10, 2013.6.2-7, San Diego, USA
8）TEP-CH2013, 2013.9.17-19, Duebendorf, Switzerland.
9）IUMRS-ICAM2013, 2013.9.22-28, Qingdao, China
10）CIMTEC2014, 2014.6.15-20, Montecatini, Italy
11）Thermoelectric Nanomaterials, Springer Series in Materials Science (Springer, Heidelberg, 2013).
12）C. L. Wan et al., J. Electron. Mater. 40, 1271-1280 (2011).
13）K. Yazawa, et al., Energy Conversion and Management 84, 244–252 (2014).

３．１．５　蓄電デバイス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

既存の蓄電池（リチウムイオン電池を含む）が到達できないエネルギー密度を有する電池(*)を、理論的に設計・製造できる基盤技術を創出する研究開発領域である。最先端解析科学と計算材料科学を融合させ、デバイス内部の複雑な反応現象を解明して理論モデルを確立、試作・評価技術に展開して目的とする性能のデバイスを自由に設計・製造できる技術基盤を確立する。

(*)現状の技術レベルに対し、容量 5-10 倍以上、コスト 1/5-1/10 以下で、分散電源端末として大量に普及するレベル。300 W h kg^{-1} を超えて 500 W h kg^{-1} までのエネルギー密度を有する電池。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

新電池・キャパシタ分野は、エレクトロニクス用などの民生用途のみならず、環境保全･温暖化対策としての電動車両用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高出力特性など要求される性能が上がっていて国際技術競争が激化している。さらに、開発途上国の急激な経済成長などによる燃料価格の高騰や原子力発電の安全性への懸念などから、再生可能エネルギーの最大限の活用や非常用電源の確保などに向け大容量の定置用蓄電デバイスのニーズも顕在化してきている。

世界のリチウムイオン電池市場は、2014 年に 1 兆 2137 億円に達すると予測されている（富士経済）。大型の車載用リチウムイオン電池に限れば、2014 年に 6579 億円、2015 年に 9521 億円に達すると見込まれている（矢野経済研究所）。こうしたなかで、わが国は高い材料技術基盤の上に産業界の経験的努力により当該分野で世界的競争力を構築してきたが、ここ 7 年程で日本の電池売上高は世界の 70%から 30%前後にシェアが低下している。しかしながら、韓国や中国も日本からの材料供給が電池製造の鍵となっている。最近になり米国や欧州の材料メーカーが電池材料に進出しつつあるが、電池に関する材料をすべて供給できる国は日本だけである。

将来大きく伸びると考えられる市場で日本の材料技術ならびにモノづくりおよび品質管理の強みなどを活かすべく、現行リチウムイオンの高性能化における開発競争に加え、次世代の革新的二次電池の研究に備える必要がある。

［これまでの取り組み］

従来の電池が有するエネルギー密度より大きなエネルギー密度を有しているため、リチウムイオン電池は定置用や電気自動車用に使用され始めている。今後、コスト面や技術面でのさらなる競争が激化するが、リチウムイオン電池はエネルギー密度の限界に近い電池が既に商品化されている。

次世代の蓄電デバイスでは、リチウムイオン電池より大きなエネルギー密度が必要となる。そのため、世界各国で、革新的な電池反応機構の創製、高性能電極材料の発見を目指した基礎研究および応用研究への投資が著しく増大している。米国、欧州、韓国などにおいて、リチウム・空気電池や全固体電池など新しい電池への取り組みとして、共

同研究施設や国家プロジェクトが立ち上げられ、革新電池の研究を加速的に行おうとしている。現時点では、材料研究を中心に展開されており、電池システム研究へと進展していく。

米国 DOE で EFRC や ARPA-E、エネルギー･イノベーション･ハブ（battery & energy storage hub）など、基礎から応用・実証に至るまでの研究開発が戦略的に推進されている。グリーン政策の影響もあり、スマートグリッドなど再生可能エネルギーの負荷平準化などに利用する大規模定置型蓄電池の研究開発が盛んである。これらは米国にハイブリッド車を生産するメーカーが無いことなど産業構造的な理由が大きいと考えられるが、米テスラモーターズ社など有力な電気自動車企業や、関連してパナソニック エナジーノース米国社の進出など、特徴的な動きがある。欧州では EU 連合の中で電池プロジェクトが立ち上がっている。また、ドイツやフランスなどでは国が電池研究をバックアップしている。これまで基礎研究面では、世界的な潮流を作る新しい電極材料の発明、インターカレーション反応や相変化型電極反応などの固体電気化学分野での新しい現象の発見などは、欧米の研究機関から出てきているものが多い。

日本は、国際的にも見ても大規模な電池開発の国家プロジェクトが複数推進されている。基礎から応用にわたり広いスペクトルの研究を行っており、総合的にはトップレベルと言える。電池および電池材料の製造企業が数多くあり、電池研究の主流は移動体電源、特に電気・ハイブリッド自動車用の高エネルギー密度型二次電池、さらに従来型蓄電池の延長上には無い革新的タイプと位置付けられるポストリチウムイオン電池へシフトしている。市場規模が大きく産業競争力に貢献する自動車用電源を支援する電池基礎研究への投資が加速している。これらの企業の自助努力により研究が支えられている面もある。

論文数では日本は中国の後塵を拝する状況となっているなど、中韓が激しい価格競争のもとでの事業拡大を背景に研究開発レベルをも向上させつつある。

［今後必要となる取組み］

ポストリチウムイオンなど次世代蓄電池の研究開発には基礎研究の強化が重要である。すなわち、電池反応現象を理論的に解明し、材料の選択を含めた最適システムの設計を可能にする技術基盤を構築することが必要である。高性能化が進むとともに安全性と経済性の確保は益々難しくなるなか、こうした技術基盤の存在がなければ次世代蓄電池の実現は不可能といってよい。基礎・基盤研究の強化は、次世代蓄電池の実用化のみならず、足元のリチウムイオン電池の低コスト・高性能化にとっても重要である。さらに、基礎的な知見をいち早く実用化につなげるための、産官学連携体制の強化が必要である。

今後の研究開発課題としては、以下のようなものが考えられるが、そのなかで、ナノテクノロジーがひとつのキーテクノロジーとなっている。

1.新材料開発（新電極材料開発、電極材料界面近傍のナノレベルの三次元構造の最適設計・制御、安全性と高電圧化の両方のバランスを実現する新電解質材料開発、新セパレーター材料開発）

2.蓄電デバイス・システム新技術開発（電池反応の直接観察・計測技術開発、性能低下・劣化機構の解明、反応理論のモデル化、計算科学による予測・シミュレーション技

術開発）
3.電池反応の現象解明と理論モデル構築（電池反応の直接観察・計測技術開発、性能低下・劣化機構の解明、反応理論のモデル化、計算科学による予測・シミュレーション技術開発）

次世代蓄電池としては、全固体電池（硫化物系）、全固体電池（酸化物系）、リチウム・空気電池、リチウム・硫黄電池、多価イオン電池、その他の電池系が研究されているが、取り組まなければならない課題は電池系により異なる。次世代蓄電池の研究を進める上でも新材料研究の重要性は変わらない。特に電解質材料に関する研究はより重要となる。また、活物質を有効に利用するための周辺部材に関する研究も欠かせない。また、実際に電池を作製するためのプロセス開発も必要となる。今後取り組まなければならない重要課題を電池系に分けて記述すると、

・全固体電池（硫化物系）：電池作製プロセスの開発、電極(活物質)／電解質界面の設計
・全固体電池（酸化物系）：固体電解質の開発と電池の構造化、電極(活物質)／電解質界面の設計
・リチウム・空気電池：空気極の高性能化と電池設計
・リチウム・硫黄電池：硫黄極の設計のための周辺部材開発
・多価イオン電池：材料全般に関する研究と電池化
・その他の電池系：原理原則の確認と材料研究

となる。これらの電池系には、実験レベルのセルの状態で留まっているものもあり、可能な限り早く実際の電池を組んでの実験研究が求められる。そのためには、分析、解析、計算機科学などの分野のフォローアップも必須である。この場合には電池系の実験結果を元にして何を分析するのか、何を計算するのかを明確にしなければならない。さらに、各電池系ともに電極（活物質）／電解質界面の現象解明をおこない、界面の設計・制御性を向上させていくことが求められる。

（３）科学技術的・政策的課題

海外では大学や国立研究所と企業の技術開発との連携が多いのに比べて、日本は個人研究や、個別テーマで研究開発が進められる傾向が強い。国内企業間競争よりも国際競争力の強化に力点を置く研究開発を、ポストリチウムに限らずより広い電池系で行う戦略が重要と考えられる。海外では得意な分野や材料を中心に研究を展開し、不足する部分は他の研究者と共同研究を行うことで、研究を進展させている。こうした研究推進には、中長期の集中研究拠点を核とした異分野融合や国際連携も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な産業界での応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。

JST の ALCA - SPRING(先端的低炭素化技術開発－次世代蓄電池特別重点技術領域)では、チームを中心に展開しており、これまでとは異なるプロジェクト体制となっている。しかし、より緊密な協力体制が求められる。得られた基礎的な知見や成果を如何にして実用化し社会へと還元していくのかをさらに議論しなければならないだろう。実際

に電池を製造し商品化した経験がないため、この道筋をどのように形成するのか、技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター（LIBTEC）のような組織との連携が非常に重要となる。ALCA や NEDO - RISING（革新型電池先端 科学基礎研究事業）のような組織との連携が非常に重要となる。ALCA や RISING、LIBTEC のより強い連携を形成していくことが電池研究にとって重要である。科学技術の進展が個人研究の範囲を超えて社会に大きなインパクト与えるには、各研究者の意識改革が必要である。国内のプロジェクトではこの点に関しても議論しながら進めており変革が期待される。政策的には、プロジェクトメイキングに対する基本的な考え方を創成していく、先駆けとなるプロジェクトとして位置付けることができるだろう。

海外では政府や民間資金の支援により有力大学に電池研究者を養成する学科や講座を置く動きが加速しており、将来においても日本の技術開発競争力を維持するためには、現在の高い研究ポテンシャルを継承し、世界をリードできる電池研究者・技術者の育成が極めて重要であり、産学官の総力を挙げた取り組みが求められる。

カリフォルニア州では、ZEV 規制（Zero Emission Vehicle）によって、州内で一定台数以上自動車を販売するメーカーは、その販売台数の一定比率を、プラグインハイブリッドカーやハイブリッドカー、天然ガス車、など排ガスが極めてクリーンな車両にしなければならないと定めており、こうした政策とのリンクが影響する。各国の電池研究開発が国策的かつ大規模になるにつれ、自国の産業構造をベースとした研究開発ターゲットが策定されるので、国情を反映した研究開発が行われていることも把握したうえで、日本の研究開発の方向性を検討していく必要がある。当該分野の基盤研究強化は、エレクトロニクス新デバイス創出の可能性を秘めており、新しい学術分野の開拓や将来のイノベーション誘発のきっかけとなることが期待される。人材育成も含めた幅広い研究戦略が必要となる。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

エネルギー密度のさらなる向上のためには空気電池などに代表される革新電池が必要である。しかし、革新電池の開発に大きな進展をもたらすような知見は世界的に得られておらず、革新電池が将来において現在のリチウムイオン電池を超える電池になるのかどうか、多面的に検討しなければならない。

・革新リチウムイオン電池

負極材料および正極材料に関する研究が活発で、負極では Si に関する研究が多く、充放電の可逆性向上に向けた研究が行われている。また、Li 金属に関する研究も進展しており、今後 1500 mA h g^{-1} を超える容量を有する負極が開発されるとの予想がある。一方、正極に関しては、Li リッチ系あるいは固溶体系と呼ばれる材料に関する研究が圧倒的に多く、300 mA h g^{-1} 程度の容量が期待されている。これらの材料が実用レベルに到達するとリチウムイオン電池あるいはリチウム金属電池により、500 W h kg^{-1} 近いエネルギー密度を有する電池の開発が可能となる。

・金属-空気電池

ガソリン車の貯蔵エネルギー密度に匹敵する 700Wh/kg 超級の蓄電容量を有する高エネルギー密度型電池の研究開発が世界各国で急展開している。米国では金属・空気電池やレドックスフロー電池などに DOE など国策で大きな研究投資が行われている。この研究投資は世界に向けて発信されており、欧・日の企業も参画している。リチウム・空気電池に関する研究は、エーテル系電解液が適用された 2012 年以降、空気極の特性が大きく改善し、世界的な広がりを見せている。空気極については、Li_2O_2 が生成、分解する基本反応が支配的であることが確認され、100 回程度のサイクルも可能になってきた。しかし、充電時に過電圧が高く副反応を伴うことなど、重要な基礎的課題も残されている。また、リチウム金属負極のサイクル性や利用率の向上も大きな課題である。電極材料や電解質の開発を含めた基礎研究の強化と、セル化／システム化に向けた広範な技術開発が求められている。

・リチウム-硫黄電池

硫黄は、放電電位が Li 金属基準で約 2 V と層状酸化物系に較べると低いが、1675 mAh g^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポスト LIB の正極として過去より注目されている。しかし、硫黄の放電時に生成する多硫化リチウムが有機電解液によく溶解するため、その抑制手法の開発が求められている。全固体型電池は多硫化リチウムの溶解が起こらないため、Li-S 電池の有力電池系として検討されており、有機電解液とほぼ同等のイオン伝導特性を示す固体電解質も日本によって発見されている。ただ、充放電に伴い電極物質の体積変化があることから、長寿命の全固体電池を形成する電池構造や製造手法の開発が大きな課題となっている。

・多価カチオン電池

Li の酸化還元は 1 電子反応であるが、多価のカチオンを用いた酸化還元は多電子反応が期待でき、高容量化のアプローチの一つとして注目されている。例えば、マグネシウムは資源的に豊富であり、その化合物の多くは毒性を示さない。しかも、マグネシウム金属極は、比較的低い酸化還元電位（+0.68 V vs. Li^+/Li)を示し、2 電子移動により、2.21 Ah g^{-1}，3.83 Ah cm^{-3} の高容量が期待できる。ただ、マグネシウム金属は、高い還元性を示し、電解質と反応して表面にイオン伝導性、電子伝導性を持たない不動態被膜を形成してしまうため、反応性のほぼない電解質溶液を用いる必要があるが、そのような電解質溶液は比較的低い電位で酸化されてしまうため、適当な正極と組み合わせることができないという大きな課題がある。

［注目すべきプロジェクト］

大規模プロジェクトとしては日本国内のものと米国のものが注目される。現状ではリチウムイオン電池あるいはその延長上の範囲内での現実に即した研究が多く、革新電池に関する研究は大きく展開されていない。革新電池の場合、これまでの電池開発とは異なり、大胆で挑戦的でありかつ実践的な研究が求められる。リチウム・空気電池につい

ては、従来のトヨタに加え、ホンダ、現代、BMW 等の大手自動車メーカーが研究を開始している。

NEDO - RISING（革新型電池先端 科学基礎研究事業）では京都大学に中核的研究拠点を置きつつ大学・独法・企業の産官学連携による基礎から応用に至るまでの革新電池開発プロジェクトが進行中であり、SPring-8, J-PARC などの最先端大型研究施設の共同利用などを行いつつ基礎研究と次世代電池のイノベーションを All Japan 体制で行っている。JST の ALCA - SPRING（先端的低炭素化技術開発－次世代蓄電池特別重点技術領域）でも物質・材料研究機構（NIMS）に共同研究拠点を置き国内大学・独法の研究者を集結し４つの重点課題にグループ編成した大規模な組織的研究開発がスタートしている。このような国内のほぼ全てのアカデミア研究者が参画した産学連携研究開発が、国際的に見ても最大規模かつ Under One Roof の体制の下で発足しているのは特筆すべきことと言えよう。

米国では DOE のエネルギー･イノベーション･ハブの一つ、battery & energy storage hub が 2012 年から発足している。5 年間で 120M ドルの予算が計画され、5 倍の性能、1/5 のコスト実現が目標とされている。

韓国では、WPM (World Premium Material)において電池開発のプログラムが進められ、サムソンを中心に研究が進展している。大学や研究所と企業間の連携が緊密にとられている。日本での NEDO の RISING プロジェクトなどに比べて、韓国ではより電池システム側に立った研究開発が進展しているようであり、日本のプロジェクトとは異なる面を有する。

（５）キーワード

二次電池、蓄電池、次世代蓄電池、革新電池、ポストリチウムイオン電池、金属空気電池、リチウム空気電池、全固体電池、リチウム硫黄電池、多価イオン電池、エネルギー密度、現象解明、活物質、電極、界面

（６）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	◎	↗	リチウムイオン電池（LIB）、ポストLIB、キャパシタとも基礎研究は世界トップレベル。独創性の高いテーマ創出の観点では、欧米などに比べ必ずしも日本に優位性があるとはいえず、中期的には楽観できない。分析や解析をはじめ、材料の新合成などの重要な研究が行われているが、電池のシステム研究などは少ない。ALCA-やNEDOなどの研究プロジェクト、研究グループは増加したが、連携に課題がある。トヨタ、ホンダがリチウム空気電池の研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	電池メーカーや材料メーカーを中心に応用開発研究が行われており、世界トップレベル。基礎研究で得られた知識や知見を産業化に向けることが求められており、応用研究・開発の方法と連携組織としての位置づけについて明確な方向を示す時期であろう。
	産業化	◎	→	定置用および電動車両用や電力貯蔵用途も含め、標準品からハイエンドに至るまで幅広い実製品化を行っており、材料メーカーの参画も含め世界的に最も産業化が進展していると言える。世界で市場が急拡大しており、今後はより高いレベルでの産業化が必要。足元のLIBの低コスト高性能化のみならず、次世代二次電池の開発・実用化についても、産官学が連携し研究成果の迅速な実用化展開が必要となるが、多くの関係組織の力の統合を促進する政策が必要となっている。
米国	基礎研究	◎	↗	DOEを中心に大きな研究費が配布されており、多くの研究者が参画している。ポストLIBなど次世代二次電池に関わる基礎研究が盛ん。米国国内の国立の研究所のほとんどが多かれ少なかれ研究を行っており、大きな基礎研究体を形成している。特にアルゴンヌ国立研究所はDOEと密接に関係し米国の基礎研究をマネジメントしている。
	応用研究・開発	○	↗	ベンチャー企業や国立研究者などを中心に産業界に向けて応用開発研究が行われているが、次世代電池に関する研究が多い。大学発のベンチャー企業がいくつか出てきており期待されるが、電池メーカーとして有力な企業が乏しく応用開発研究のスピードがそれほど速くない。逆に中途半端な開発を基に製品化しようとするグループも見受けられる。
	産業化	△	↗	電池製造に関する産業は一次電池では存在するがリチウムイオン電池ではない。ベンチャー企業も多くは生産を海外で行っており、代表的なA123社も売却され、産業としては定着していない。化学・素材メーカーの一部が基礎素材の提供を行っているが、全体としての産業展開は不透明である。
欧州	基礎研究	◎	↗	LIBおよびポストLIBについて、各国が協力して基礎研究を進めている。欧州共同体として強みを生かしたプロジェクトがあり、材料を中心に基礎研究が進展しているといえる。ボルドーのグループなどいくつかの研究組織で活発な研究が行われている。ドイツも最近では基礎研究に力を入れている。Goodenoughの酸化物正極に関する発見も英での研究成果であり、材料および反応に関する研究ポテンシャルは高い。 BMWがリチウム空気電池の研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	最近ではドイツやフランスで大手化学メーカー（BASFやメルクなど）が参画し始めており、今後の動きが注目される。ただし、現時点では有力な電池メーカーが少なく、研究テーマなどは日本に求めている面もある。
	産業化	○	↗	ドイツとフランスの国営的な企業を中心にリチウムイオン電池の生産が行われているが、日本に比べると規模は小さい。ベンツなどの自動車会社での電池開発が進展すれば欧州での電池製造が増えるかもしれない。材料関係の企業は欧州にあり、今後の動向が注目されるが海外に生産拠点を設ける場合が多くなるであろう。
中国	基礎研究	△	↗	中国での基礎研究への投資は増加しており、装置が充実してくれば研究も進展すると考えられる。現時点では日米欧で提案された考えに基づくものが多い。また材料研究が中心で、電池システムについてはこれからか。

	応用研究・開発	○	↗	電池製造に関する研究にしても、材料に関する応用開発にしても自国の研究は少ない。海外から企業が参画し、中国での応用開発研究を推進している。今後は、応用研究を充実させていくものと思われるが、研究体制など整備しなければならない課題が多い。
	産業化	○	↗	800社近くの電池メーカーがあり、多くの電池を国内向けに生産している。また、海外の企業の進出も著しい。製造レベルは低く、電池の安全性や性能では問題となっている。一方、コスト面では優位に立っている。特許の問題はグレーのままであり、国際化していくための課題である。また、電池の安全上の問題を抱えており、国内産業として産業化大いに進展しているが国際化することは難しいであろう。
韓国	基礎研究	○	↗	ポストLIB系について、Li/S系などで独創的な基礎研究が行われている例があるが、国の政策も産業化への傾斜があり、基礎研究のアクティビティ・研究者層の厚さは、必ずしも高いとはいえない。しかし、分析および解析面でも進歩しており、大学、研究機関、企業ともに活発に研究を推進しはじめているので、今後の動きを注目する必要がある。 現代自動車がリチウム空気電池の研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	市場シェアでトップをとることに集中したリソース投入が行われている。技術開発は日本や米国で提案された手法を踏襲したものが多いが、低コスト化の可能な手法で性能・信頼性を担保するという開発が進んでおり、実用技術開発での成果はすでに日本を凌駕している部分もある。
	産業化	◎	↗	国策としての電池開発強化のもと、財閥系グループの電池メーカーが急速に成長してきており、開発水準も年々向上している。日本企業の競争力が衰えるのに従い人材流出もある。ウォン安など経済環境の効果などにより市場シェアが増大し、民生用のみならず、次の大きな市場である電動車両用途に向けても、日本の強力なライバルとなり得る。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）CRDS-FY2011-SP-03 戦略提言「エネルギー分野研究開発の戦略性強化」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/SP/CRDS-FY2011-SP-03.pdf
2）CRDS-FY2011-SP-04 戦略イニシアティブ「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤技術」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/SP/CRDS-FY2011-SP-04.pdf
3）Electrochemical Society Meeting in Hawaii, October 2012, Abstract.
4）International Lithium Battery Meeting in Cheju, June 2012, Abstract.
5）米国 DOE,　http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/m/index.htms
6）王 子冬、「中国での動力用電池の安全性評価の取り組み」、日経 BP Techon セミナー「第 1 回 日中電池サミット」（2012/5/21、東京）
7）Jiqiang Wang, “R & D Activities & Some Achievements of the Battery Energy Storage Programs in China”, the 5th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications (2012/9/17-20, Istanbul).
8）The 17th International Meeting on Lithium Batteries (2014)

9）第 54 回電池討論会　要旨集（2013）
10）7th International Conference on Advanced Lithium Battery for Automobile Applications (ABAA-7), abstract (2014)

３．１．６　パワー半導体

（１）研究開発領域の簡潔な説明

高効率の電力変換を可能にする超低損失電力制御用デバイス（パワーデバイス）を実現する研究開発領域である。SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体はSiに比べて原理的に内部損失が小さく高効率化に優れるが、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、高精度の熱設計・パワーマネージメント、モジュール・回路技術、周辺部材・受動部品などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

全エネルギー消費に対する電気エネルギーの占める割合は年々増加しつつあり、日本は、高度経済成長期以降、電力消費量とあわせて電力化率を継続的に高めており、現在の約25%から2050年には50%を越えるとの予想もある。このため、電気エネルギーの輸送・変換・制御・供給に関わる広範囲のパワー関連機器において省電力化への期待が高まっている。具体的には、太陽光発電の直流電力を交流に変換するインバータのロスや、電車や電気自動車のようにモーターを制御するときのロスを低減させることが重要であり、高効率の電力変換・スイッチ用パワー半導体デバイスの開発・普及が重要である。また、電力網の長距離化に伴う送電損失の増大を抑えるための送電電圧の高圧化が進みつつあり、パワー半導体デバイスにはより高い耐電圧、低損失（低オン抵抗）が求められている。

現在普及しているパワー半導体は半導体にシリコン（Si）を用いたものであるが、Siの材料定数による限界によるデバイス性能の限界が広く指摘されており、原理的に高耐圧化と低オン抵抗の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などSiよりも禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれており、材料・プロセスからデバイス・回路・実装面にわたる広範囲な研究開発を行う必要がある。このような次世代パワー半導体デバイスが開発できれば、再生可能エネルギーによる発電、電力インフラ（直流送電や系統連携）、鉄道、自動車だけでなく、工場、家電のインバータ、情報機器の電源など極めて広範囲での省電力化につながる。

また、新たな可能性をもつ酸化ガリウム（Ga_2O_3）、ダイヤモンドなどの実証など、多角的に次世代パワー半導体技術を先鋭化させてコア技術とすることで日本の産業の活性化・競争力強化につなげることが期待される。

［これまでの取組み］

Siに関しては、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、製造プロセスの低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクションMOSFET、IGBTの世代交代など）により、性能を向上させてきた。絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）用高品質・量産化を目指したウェハの新しい技術開発がNEDOにより始まっている。Siパワーデバイスは、現在の産業競争の中心であり、特に高耐圧系は欧米と伍して優位な立場を維持している。低耐圧系に関しては、市場がディスクリートからシステム電源へ移行しており、厳しい競争に追い込まれている。ここでは、産業競争力を有

しているSiパワーデバイスで更に勝ち続けるためのシナリオが必要である。

SiCに関しては、ウェハで米国Cree社やダウコーニング社が先行しているが、ドイツのSiCrystalや日本の新日鐵住金も量産を行っており、4インチのウェハについては高い品質のものが世界の複数メーカーから入手可能な状況になりつつあり、一部のメーカーは6インチウエハの出荷も行っている。基板の欠陥密度についても大きく改良が進んでいる。中国（台湾を含む）は新規投資により参入を始めた。SiCパワーデバイスとしてショットキーバリアダイオード（SBD）は2001年にSiCED（現在はInfineon）で始めて商品化されて以降、着実にオン抵抗の低減などの性能向上が進められ、現在は日米欧の複数のメーカーから市販されておいる。一般の回路技術者にもその存在が浸透しつつあり、すでにエアコンの省エネ型インバータや鉄道車両用インバータとして実用化が始まっている。SiCのMOSFETに関しては、Si IGBTよりも優れたデバイス性能の空乏型のDMOSFETが一部のメーカーで市販が開始され、いよいよ普及を狙う段階にきている。モジュールの開発も活発であり、Si-IGBTとSiC-SBDと一体化したSi/SiCのハイブリッドモジュールや、SiC-MOSFETとSiC-SBDを一体化したフルSiCモジュールが開発・商品化されている。Creeなど海外勢もSiC-MOSFETの製品化を行っているが、製品化についてはロームや三菱電機など日本メーカーがトップを走っている。

GaNについては、これまで自立基板材料の開発が遅れたため、サファイアやSiなどの異種基板の上のヘテロエピタキシャル成長層を用いたデバイス開発が進められており、Si基板上に成膜したGaNヘテロ接合FET（HEMT）でパワーデバイスを作製するGaN on Si（GaN/Si）が大きく進展している。数百ボルト級のデバイスとして米国IR社、EPC社が先行して商品化を行ったが、カリフォルニア大学サンタバーバラ校発のベンチャーであるTrasnphorm社が活発に製品開発、学会でのアピールを進めており、存在感を増している。日本国内でもパナソニックをはじめとした数社がGaN/Siデバイスの商品化をアナウンスしている。自立GaN基板については、2インチ径程度の基板が少量生産されているが、まだ欠陥密度が高く、量産性を含めた基礎研究が今後必要である。パワーデバイスとしては通信用高周波パワーデバイスとして移動体通信分野での実用化が先行しているHEMTの他に、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）の研究も進められてきた。

ダイヤモンドは優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有する半導体であり、パワーデバイスとして魅力的な特性を有する。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型ドーピングなど当該分野での画期的な先行研究があり、そのドーピング技術を用いてダイオードやジャンクションFET（JFET）、バイポーラトランジスタ（BJT）、金属半導体接合FET（MESFET）などの通常の半導体のデバイス構造の検討も進められている。また、ダイヤモンドの電子放出源としての働きに着目した新規構造デバイスなどの検討も進んでいが、可能性実証の段階にある。

SiCやGaNよりもバンドギャップの大きな酸化ガリウム（Ga_2O_3）のパワーデバイス応用の研究が始まっている。Ga_2O_3は比較的容易に大型結晶が作製可能で、n型ドーピングが可能である。無色透明で電気伝導に優れていることからGaN LED用の基板として注目を集めていたが、Ga_2O_3自体を半導体デバイスに使う試みが数年前から試みられるようになってきており、ショットキーダイオードやMESFETなどの試作が行われて

いる。まだ萌芽的段階であるが、研究開発用に基板が市販されはじめたので、今後研究者が増える可能性がある。

［今後必要となる取組］

Si パワーデバイスよりも性能的に優れるワイドギャップパワー半導体デバイスの研究開発は、早い段階での普及、産業競争力に結び付けるために、SiC、GaN などワイドギャップ半導体ウェハの高品質化、大口径化や、デバイス構造の最適化、信頼性の高いデバイス作製プロセスの開発、高精度の熱設計・パワーマネージメント、周辺回路部品の開発など、特に Si の置き換えではなくワイドバンドギャップの特性を活かした新機能装置を念頭に総合的な研究開発を加速していくことが必要である。基礎物性の面では、いずれのワイドギャップ半導体も結晶の転位と欠陥の制御、表面・界面における課題が多く、過去の Si や GaAs 等で培われた結晶品質向上、表面・界面制御の知見や施策に学び、基礎基盤研究を進める必要がある。特に、SiC はデバイス製品が上市されているため、基礎研究は終了したと思われがちであるが、MOS 界面をはじめ未解明の点が多々ある。現状は一部の特性を犠牲にして製品化を行っている状況であり、しっかりした基礎的研究を進め、物性制御やデバイスプロセスを確立することで、さらに性能向上できる余地が大いにある。

GaN ウェハは現在はハイドライド気相成長法で作製されており高価であるが、アモノサーマル法や Na フラックス法など低価格で作製できる技術の開発も進みつつあり、SiC パワーデバイスのように同種基板上に縦型パワーデバイスを作製できる可能性もある。GaN は SiC よりも絶縁破壊電界強度が大きく、理論的には SiC よりもオン抵抗を低減できるため、GaN ウェハの低コスト化と組み合わせて、GaN 基板上 GaN 縦型パワーデバイスの研究も必要と考えられる。

SiC や GaN パワー半導体デバイスよりもさらに高性能化が期待できるダイヤモンドや Ga_2O_3 などの新規パワー半導体材料は、材料作製技術と合わせて、材料・電子物性評価、およびその応用を見据えた基礎基盤研究を厚く進めていくことが重要である。世界に先駆けてウェハの高品質化、ドーピング制御、コンタクト、表面・界面制御などの基本課題へ取り組み、大面積化を可能にする製造技術・加工技術、絶対耐圧を出すためのデバイス技術などの研究開発を進めていく必要がある。

ワイドギャップパワー半導体デバイスを中心にその周辺技術（小型・高性能トランス、耐熱コンデンサ、配線、パッケージ、実装技術、新規回路設計、システム設計）の研究開発も今後必要不可欠である。例えば、高温動作に対応できる部品（コンデンサ、コイルなど）や放熱性に優れたパッケージなど、材料科学に立ち戻った研究も行う必要がある。また、付加価値を高め世界をリードできるように、回路、パワーモジュール、システム化技術においても強化する必要があり、ワイドギャップパワー半導体の特性を積極的に活用したこれらの研究開発も重要になってくる。

（３）科学技術的・政策的課題

欧米が、集積化チップ、システム応用からのディスクリードデバイスなど、国レベルの施策としてターゲットを定め、シリコンパワー半導体を中心にして、ワイドバン ギャ

ップ系半導体の導入ポイントを絞りこんで研究開発を進めてきている。また、中国（台湾を含む)、韓国が、自身のファブ能力を活用してシリコンパワー半導体およびワイドバンドギャップ半導体市場への新規参加を企てている。このような動きに対抗して日本の産業競争力を維持していくためには、今日の産業競争における技術の限界追求、来るべき産業競争の場に備えるための研究開発の両輪を国策として進めていく必要がある。

Si は､研究開発といえども既に装置産業規模での取り組みが必要なレベルにあること、大学や公的研究機関、企業の双方に開発投資を含め種々の困難を抱えていることから、国レベルでの取り組みが必要である。

ワイドギャップ半導体パワーデバイスの研究開発では日本は先行しているが、今後の本格的なワイドギャップ半導体パワーデバイス時代が到来することを考えると、研究開発はまだ不十分であり、十分な措置をとらなければ現在の優位性を保持できない。パワーデバイスは LSI 技術とは異なり、用途により扱うべきパワー・周波数などが多岐にわたる。パワー半導体自体も、材料・電子物性において各々が固有の特性を有している。また、産業競争・市場が、これまでのディスクリート半導体から装置・システムへの転換が進んでおり、日本においても、応用分野（家電、電気自動車、鉄道、電力インフラ）を念頭に適切な研究開発を進める必要がある。

次世代のパワーデバイスの研究開発では､産業界が直面する課題の認識が重要であり、大学の研究においても実用化に向けた技術間のトレードオフ関係を考慮した取り組みをさせるような産学連携の形態を模索する必要がある。また、次世代パワーエレクトロニクスを担う人材が圧倒的に不足している現実があることから、広い知識と高度な経験を積んだ学生・研究者・技術者を社会に輩出することは極めて重要であり、研究の担い手であるポスドクを含む博士研究員の役割を再認識し、国のプロジェクトでの彼らの雇用を奨励し、プロジェクト終了後には産業界への円滑な移行を促進するなどの仕組みの検討も必要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・Si

これまで限界到達技術と称されてきたが、パワー用として CZ 法の改善による長ライフタイム結晶成長の報告など、新しい試みが始まっている。

・SiC

Si トランジスタと SiC-SBD を組合せたパワーモジュールの製品化が先行しており、家電や鉄道車両への SiC パワーデバイスの利用が拡大している。また、太陽光発電やエレベータなどの DC-AC コンバータ応用にも SiC の製品化が始まっている。さらに、縦型トレンチ構造を主構造に用いた SiC-MOSFET と SiC-SBD を用いたフルパワーモジュールの出荷も開始された。SiC 基板については、日米欧から６インチ径基板の製品化が相次いでいる。台湾が精力的に SiC に関して結晶からパワーデバイスまで一貫した研究開発を活発化させている。韓国や中国と異なり、台湾には Si パワーデバイスファブの経験、産業があるので、今後急速に立ち上がる可能性がある。

・GaN

Si 基板上の GaN エピ技術を用いて、米国企業が低電圧対応の GaN パワーHEMT の製品化で先行している。一方、600V 応用を想定したパワーHEMT のサンプル出荷は、日米の複数企業を中心に始まっている。研究開発では、安価な大口径 Si 基板を使う技術と、性能向上を狙って低欠陥密度の GaN 基板を使う技術の２極化が進んでいる。なかでも、米国ベンチャーにより GaN 基板上の高耐圧縦型デバイスの研究成果が活発に行われ、耐圧とオン抵抗の相関特性において、理論限界を超える性能が報告されており注目されている。

新しいワイドバンドギャップ材料として、日本から Ga_2O_3 のデバイス基礎実証の報告が始まっているが、欧州で同様のプロジェクトが始まりつつある。

［注目すべきプロジェクト］

欧米では、次世代パワー半導体の先進的な研究成果と研究拠点づくりを目指した特徴あるプロジェクトが進行中である。基礎研究、実用化実証研究、産業競争技術研究など、明確にその目的が示されており、複数のプロジェクトをコンカレントで進めることで、優位性の確保を狙っている。

米国で次世代パワーエレクトロニクスの研究拠点が複数形成されつつあり（The Next Generation Power Electronics Innovation Institute, Power Electronics Manufacturing Consortium など）、材料、デバイス、実装、回路、システム、応用の総合的な研究開発が進められつつある。これらは、産業創出、社会実装を念頭に産学の確固たる連携で計画されており、日本にとって脅威となりうる。また、将来の産業競争力を念頭に米国 APRA-E で、ADEPT（Agile Delivery of Electrical Power Technology）に加え、SWITCHES（Strategies for Wide-Bandgap Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems）が始まり、SiC、GaN、 ダイヤモンドなどのパワー半導体研究に投資がなされている。DARPA の NEXT プログラムでは、GaN の高周波パワーデバイス研究が進行している。

欧州では、今日の産業競争力強化を念頭に EPPL（Enhanced Power Pilot Line）、EPT300（Enabling Power Technologies on 300mm wafers）などが進められている。また、デバイス、回路、パッケージ、評価技術などの要素技術ごとに国家間と産学にまたがる横断的なプロジェクトが進行中である。SiC パワーデバイスのプロジェクト SPEED（Silicon Carbide Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices）、GaN 半導体の極限性能追求を目的とした MORGAN（Materials for Robust Gallium Nitride）や AL-IN-WON（AlGaN and InAlN based microwave components）、高温高出力対応のパッケージ開発を目的とする AGAPAC（Advanced GaN Packaging）、SiC 基板上の GaN 成長に関する EUSIC（High Quality European GaN-wafer on SiC Substrates for Space Applications）、ノーマリーオフ動作の HEMT に関する HiPoSwitch（GaN-based normally-off high power switching transistor for efficient power converters）などのプロジェクトが進められている。

国内では、つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）の６つのコア研究領域の一つ

としてパワーエレクトロニクスが位置づけられており、この中で、2009 年度末より（2013 年度末まで）内閣府の最先端支援プロジェクトの一つとして、木本恒暢教授を中心研究者とする「低炭素社会創成へ向けた炭化珪素（SiC）革新パワーエレクトロニクスの研究開発」、2009 年度より（2014 年度末まで）技術研究組合「次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構」（FUPET）による経済産業省の「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」が実施された。また、2012 年 4 月に産総研と産業界と共同でパワーエレクトロニクス・オープンイノベーションの推進に向けた民活型の共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ（TPEC)」が設立されて活発な活動が行われている。また、JST のスーパークラスタープログラム（2013 年～）の中で、京都地区および愛知地区をコアクラスターとした地域を越えた連携が図られ、SiC デバイスおよび GaN デバイスの研究開発が行われている。

Si パワー半導体のその競争力維持を念頭に、産学連携で新世代 Si-IGBT プロジェクトが始まった。また、2014 年度から新たな戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に基づく「次世代パワーエレクトロニクス」が開始され、SiC、 GaN、酸化ガリウム、ダイヤモンドについて、基板育成、エピタキシャル成長、デバイス、回路モジュール、パッケージ、熱設計などの広範囲な技術開発に関する産学連携プロジェクトが進められている。

（５）キーワード

・パワーエレクトロニクス、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、SBD、HEMT、HBT
・パワー半導体、シリコン、Si
・ワイドギャップ半導体、炭化珪素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga_2O_3
・高効率インバータ、高周波インバータ、電力変換、超高圧送電、HVDC、スマートグリッド

（６）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系パワー半導体は、新たなウェハ材料技術開発が報告されるなど、従来の限界を超える開発が始まっている。SiCはFIRSTプログラムで超高耐圧SiC-IGBTの試作に成功するなどの成果をおさめている。GaNは、GaN基板の欠陥密度低減やAlGaN/GaN-HEMTの高耐圧化などに関して重要な研究が行われている。新材料として、よりバンドギャップの大きなダイヤモンド材料・素子開発が進められ、酸化ガリウムの研究が立ち上がりつつある。
	応用研究・開発	○	→	Si系パワー半導体は、デバイス企業での開発が主である。SiCやGaNは、デバイス、電源企業からの製品化発表（予告を含む）、電車（試験導入）や家電機器（商品）への搭載が始まっている。SiCに関しては、低コスト化を図るために6インチ基板の品質向上に対する取り組みが活発になっている。GaNに関しては、低コスト化のためにSi基板を使う研究と、より高い性能・信頼性を実現するためにGaN基板を使う研究の2つの方向で進められている。
	産業化	◎	→	Si系パワー半導体は、東芝、三菱、ルネサス、富士電機などが世界市場のなかで、高い産業技術力を有している。その競争力維持を念頭に、産学連携で新世代Si-IGBTプロジェクトが始まった。SiCの事業化に関してはローム、三菱電機が非常に活発であり、住友電工や富士電機なども取り組みを本格化させており、世界トップ水準にある。GaNパワーモジュールに関してはやや実用化が遅れており、GaNFETについては、複数社からサンプル出荷が始まっている。
米国	基礎研究	◎	→	ICTや民生家電を対象とする低耐圧系のパワー半導体は集積化・IC化に向かっており、半導体とあわせて磁性体、集積化技術など大学を中心にした産学連携コンソーシアムで推進し、世界の先駆的発表を行なっている。SiCやGaNは、大学発の技術がベンチャーを含む企業群に移行し、大学は要素技術、評価などでさらなる開発を支えている。GaNに関する研究が精力的に進められており、中でもUCSBとMITからの発表数が多い。また、ARPA-E（SWITCHES）において、さらにワイドバンドギャップ系を発展させる試みが国家レベルで始まった。
	応用研究・開発	◎	→	低耐圧集積化パワーチップは開発力が高い。また高耐圧系に関しては、大学主導で米国内にあるワイドバンドギャップ系半導体企業とも連携し、次世代グリッドを見据えたシステム研究を展開している。SiCやGaNなどは、ベンチャーから始まった企業群が製品、R&D品の市場供給を積極的に展開している。SiCのMOSFETの特性改善が報告されており、電力ネットワーク用SiC超高耐圧パワーデバイスの研究も行われている。GaNに関しては、実用化に向けて縦型、横型FETの低オン抵抗化、高耐圧化が着実に進んでいる。
	産業化	◎	→	低耐圧集積化パワーチップ、特に電源は世界市場で最も強力な立場を有している。SiCやGaNでも特にウェハ材料において競争力を有する企業（Cree、ダウコーニング）を有しており、R&D市場で世界を席巻している。GaNデバイスは、Transphorm社、EPC社、IR社の3社が商品化しており、先行している。産業競争力の強化、新規産業の創出などを念頭にした垂直統合・集中型プロジェクトがNewYork、North Carolinaなどで始まった。
欧州	基礎研究	◎	↗	Siパワーデバイスは、低耐圧、高耐圧ともに、極めて高い基礎研究力を有しており、英国、ドイツ、スイスなどから多くの先駆的発表が行われている。SiCでは既にスウェーデン、ドイツが世界トップ水準にあり、基礎研究、応用FS研究で高水準の成果が報告されている。GaNでは国の研究機関が活発な研究を行っており、主にGaNFETの開発をマイクロ波応用と併せて積極的に進めている。いずれも、材料化学、基礎物性のみならず、プロセス基礎研究まで含めて大学や国立研などが高水準研究を続けている。

	応用研究・開発	◎	↗	ECPEの活動に見られるように、欧州では産業界を中心にした産学連携がうまく機能し、大学や国立研での要素技術、システムFS実証が、企業への人・技術の移転にうまくつながっている。また欧州の地域性を利用して、PV、風力、海流、原子力などの多くの電力源からなる電力ネットワークが構成されていることから、システムレベルでの次世代技術開発、実証で新しくかつ高度な成果を発表している。GaNの応用研究はInfineon、IMEC、NXPなどメーカー主導的に進められ、IMECを拠点としたプロジェクトもスタートしている。
	産業化	◎	↗	パワー半導体、およびそれをキーコンポーネントとした電力・エネルギーシステムともに世界的競争力を有している。特に、社会インフラ系システムは圧倒的に強い。この競争力維持を念頭に、特にシリコンに関して、EPPL、EPT300を欧州プロジェクトとして進めている。SiCパワーデバイス、SBDに関してInfineonが先行してディスクリート素子、SiC SBDを組み込んだモジュールなどを販売している。EpiGaNやEPFL(スイス）がGaNエピウエハを商品化している。
中国	基礎研究	△	↗	欧米からの研究者招聘（自国出身、外国出身）、重点拠点化整備を行うなど、急激に強化策がすすめられている。SiCやGaNパワーデバイスに関係する学会や論文誌の掲載論文数はここ１～２年間で急速に増加している。また、盛んに国際学会誘致・開催を行なっており、情報収集も政策的に行なっている。パワー半導体は、シリコン、GaNで香港大学などが高い研究水準を構築しており、2015年度パワーデバイス国際会議（ISPSD）のホストを務めるに至っている。GaNで積極的な研究を行っている香港科学大学（HKUST)では、特に新構造のトランジスタの開発に力を入れている。
	応用研究・開発	△	↗	欧米の企業が中国進出を果たしていること、また昨今の情勢により日本も含めて世界中の企業の買収、研究者・技術者招聘を試みており、これらを連携させた独自技術開発の可能性がある。SiCではまだ目立ったものはないが、HKUSTなどは、GaNトランジスタの実用化で障害となる「電流コラプス」の改善などにも精力的に取り組んでおり、実用化を見越した応用研究が進められている。
	産業化	△	↗	SiCバルク結晶やSiCエピサービスを行うベンチャー企業が存在する。SiCバルク結晶（例えば、Takeblue社やSiCC社）については、まだ、Cree、ダウコーニング、SiCrystal、新日鐵住金にはおよばないが、技術レベルは上がりつつある。
韓国	基礎研究	△	↗	大学や国立研が徐々にではあるが研究水準を高めつつある。ワイドバンドギャプ系パワー半導体はいくつかの国プロが行われている。既存のLSI、LEDなどの関連技術の導入、諸外国との連携模索などが試みられている。SiCについては韓国企業が明確に興味を示しており、今後産学連携などの体制で追い上げてくる可能性はある。GaNに関してはLED,LDに関して多くの経験を有する企業・大学があり、GaNパワーデバイスに転向してくる可能性がある。
	応用研究・開発	△	↗	大学や国立研は、まだ発展途上である。一方で、企業（Samsung、LG Electronicsなど）が勢力的に、かつスピードを伴ってパワー半導体関連の技術開発を進めつつある。今は、独自技術開発ではなく、他国からの技術導入の状況にある。
	産業化	△	↗	LSI系では実力のある企業が存在しており、パワー半導体への展開を始めている。また、これらの企業に加え、これまで異種分野にいた企業群が、特にワイドバンドギャップ系パワー半導体へ新たに参画することを模索している。SKCはSiC事業に取り組むことを表明している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）資源エネルギー庁エネルギー白書、資源エネルギー庁・NEDO 省エネ技術戦略など）
2）デバイス関係の国際会議・ワークショップ報告（ISPSD、IEDM、PCIM など）
3）SiC や GaN など、材料を掲げた国際会議報告（ICSCRM、ICNS など）
4）パワーエレクトロニクス国際会議報告（APEC、ECCE、EPE など）
5）http://arpa-e.energy.gov/
6）http://cordis.europa.eu/home_en.html

３．１．７　グリーン触媒

（１）研究開発領域の簡潔な説明

基礎化成品合成、ファインケミカルズ合成、環境負荷物質の低減のための触媒を対象とした領域である。基礎化成品合成においては、非在来型資源（バイオマスやシェールガスなど）を活かした転換用触媒、多段反応を一段などより少ない反応回数で且つ選択的に穏和な条件で使用できる触媒など、ファインケミカルズ合成では、従来の低分子触媒では実現できない精密合成を可能とする触媒、環境負荷物質の低減においては、自動車排ガス処理触媒の元素戦略的観点などが課題となる。

光触媒については、人工光合成の項で、燃料電池触媒については、燃料電池の項に記載している。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

現在の高度な文明社会を支える化学技術・工業で稼動する化学プロセスの 90%以上が触媒反応であるといわれるほど触媒の貢献は大きい。一般論としては、すでに現状のプロセス技術は飽和しつつあり、向上の余地が小さいものの、化学産業を環境、資源利用効率、エネルギー効率的な観点からみると大きな改善の余地が残されている。前者としては、バイオマス転換やシェールガス利用など、資源とリンクした新たなる化学工業体系の構築が望まれており、後者としては、現行の官能基変換プロセスの高効率化、低環境負荷な原料を用いた新しい合成ルートの開拓、プロセスの安全性・経済性の向上などが急務であり、これらの課題を解決する糸口になるのが、真に力量のある触媒（高活性、高選択性、長寿命）の開発である。

触媒研究は野依（名古屋大学)、鈴木（北海道大)、根岸（パデュー大学）らノーベル賞受賞者を輩出していることからもわかるように、いわば日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究は大きく発展してきた。不均一系触媒（固体触媒)、均一系触媒ともに世界をリードする数多くの基礎研究がなされ、実用化されている。

［これまでの取組み］

グリーン・サステイナブル ケミストリー（GSC）の視点からみた不均一系触媒の適用対象には、バイオマス転換のための触媒として、セルロースの選択的な触媒分解、リグニン分解によるフェノール合成、ポリオールの選択水素化分解、フルフラール類の選択合成などが取組まれている。シェールガスなどの低級不活性アルカンの転換のために、マイクロ波や電場アシスト触媒反応が提案されているが、投入エネルギーに見合う効果が得られるかが課題となっている。ポリマー合成触媒としては、オレフィンージオレフィンの立体特異性ランダム共重合、オレフィンブロック共重合体の触媒的合成などが研究されている。また、元素戦略に基づく自動車排気ガス処理触媒（Pt/Rh/Pd 等貴金属使用量の低減）も重要な対象である。

これら不均一系触媒の活性・選択性は、一般的には均一系触媒よりも劣るとされるが、最近では均一系と同程度あるいはそれらを凌駕する触媒能を有するものが見出されつつ

ある。また、不均一系触媒ならではの反応の開発もされている。ゼオライトを触媒とした気相ベックマン転位、金ー酸化ニッケル触媒によるメタクリル酸メチル製造プロセスなどが国内企業により低環境負荷プロセスとして実用化され運転されている。

均一系触媒分野（有機分子触媒や有機金属錯体触媒）では、分子構造や配位子の精密分子設計に基づいた触媒の分子・原子レベルでの設計指針の確立や、精密有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発において、我が国の研究開発レベルは極めて高い。デザインが容易に行える有機分子のみならず、酸化反応に有効な無機物のみからなる無機分子触媒もある程度自在に合成できるようになっている。例えば、欠損型分子性酸化物ナノクラスターを設計し、それを“分子鋳型”として種々の金属を個数や配位様式を精密に制御して導入することで、機能性無機分子触媒の合成にも世界で初めて成功している。

米国は基礎研究、産業化の双方で先端を走っている。欧州は基礎研究から産業化まで高い能力を有している。中国は日米欧を急速に追い上げており、特に有機合成分野（触媒や新反応開発）で力をつけてきている。

日本においても後述する複数の科研費新学術領域をはじめ、先導的物質変換領域（ACT-C）他、JST 戦略創造事業（CREST、さきがけ）の元素戦略、分子技術、超空間などの各領域において、触媒研究の課題が多く実施されている。

［今後必要となる取組み］

基礎化成品の製造プロセスでは、資源の有効利用、省エネルギー、環境負荷低減が求められており、これらニーズに応じてさらなる高機能触媒や新しい概念の触媒の開発が必要不可欠となっている。多様な資源への対応という観点では、不均一系触媒が特に重要と見られ、木質系バイオマスやシェールガス（メタンおよび随伴するエタン・プロパン）を原料とした化学反応の体系化、多様化、高性能化が望まれる。メタンに代表される低級アルカンからのブテン・ブタジエン・BTX 合成などが重要な反応として考えられる。また、アンモニア合成、メタノール合成、メタン改質などの平衡制約が大きく、反応条件の大幅な緩和が望まれる反応の高効率化、環境触媒（排気ガス浄化）や光触媒の大幅な高性能化、活性成分としての担持金属の脱貴金属化などが望まれる。

ファインケミカルズ合成分野では、還元反応、酸・塩基反応などに比べて酸化反応の開発が圧倒的に遅れており、高機能酸化触媒の開発が切望されている。例えば、種々の有機基質の含酸素有機化合物への変換と脱水素反応に代表される酸化的官能基変換は、いまだに量論量以上のクロム、マンガン、鉛等を含む重金属塩、次亜塩素塩、硝酸などの試薬が用いられているケースがあり、毒性重金属塩の処理等の問題も抱えている。高機能酸化反応触媒開発には、酸素や過酸化水素などのグリーンな酸化剤を効率よく活性化するための活性点構造が必要であるだけではなく、耐酸化性を付与する必要があるため、不均一系触媒が望ましい。活性な（無機）分子触媒をリンカーなどを介して規則正しく配列させたり、担持金属種のサイズや構造の厳密制御、結晶性酸化物の使用など、これまでにない分子論的な観点からの触媒設計が必要不可欠となる。

有機機能材料、医・農薬などの生理活性物質の合成のため、鈴木カップリング、根岸カップリング、溝呂木・ヘック反応に代表されるパラジウム触媒を用いたクロスカップ

リング反応の利用頻度が増えている。しかしながら、これらの反応は活性化された化合物を基質として用いる必要があるため、大量の廃棄物生成や多段階合成に由来する合成効率の低下などの問題点がある。近年、C-H あるいは Y-H（Y＝ ヘテロ元素）結合の直接脱水素型クロスカップリング反応が高い原子効率を有することや一段階合成法であることから注目を集めており、特に、酸素を酸化剤とした脱水素クロスカップリング反応のための触媒開発が必要となる。

医農薬品の中間体製造においては、鏡像異性体など分子式は同じでも構造が異なる分子を作り分けできるような触媒が必要である。従来型の分子触媒（数百の分子量）でも反応の種類によっては高い触媒活性と選択性を示すが、その特徴は高い反応汎用性にあり、より高度な立体化学制御を行うには限界がある。そのため、活性点近傍のみならず、その周辺構造の親・疎水性制御、3 次元構造制御、特異的な基質の取り込み・識別能の付与など、いわゆる反応活性空間制御を目指した新たな取り組みが必要となる。

（３）科学技術的・政策的課題

不均一触媒の研究は泥臭く、均一触媒は大型プロセスに向かないなど、均一系触媒、不均一系触媒にはそれぞれ長所・短所があり、それらの長所を併せ持つような触媒を開発する必要がある。ただ単に、分離・回収・再使用ができるというだけでなく、均一系触媒と同等あるいはそれらを凌駕する活性・選択性を有し、分離・回収・再使用が容易な触媒を開発することが必要である。そのためには、均一系触媒研究者と不均一系触媒研究者のより密な連携をはじめ、多様な分野間の連携が必要となる。

政策的な課題としては、当該分野の若手研究者を育成していく取り組みが必要である。基礎研究に関しては、2013 年 1 年間に主要な触媒専門国際ジャーナル（13 誌）に発表された 4846 報の論文のうち、我が国は 347 報（バイオマス転換 10 報、メタン転換 9 報、GSC 分野 11 報を含む）と、世界におけるシェアが下がっており、米国の 1/4 程度、中国の半分程度となっている。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・日本

Mo-Bi 系触媒によるプロピレン気相酸化、銀触媒によるエチレンオキシド合成、Rh 触媒によるヒドロホルミル化、Pd 合金触媒による液相酸化、ハロゲンフリーワッカー触媒などが商業化・実用化されてきた。

特筆すべきものとして、ナイロン 6 の原料となるε-カプロラクタム合成への不均一触媒の適用が挙げられる。ε-カプロラクタムは従来硫酸を触媒としたシクロヘキサノンオキシムのベックマン転移によって生産されてきたが、この方法では均一系触媒である硫酸の分離、処理に大きなエネルギーを必要する。住友化学によって規則性無機酸化物ナノ多孔体であるシリカライトをベースに開発された不均一系触媒を用いた「気相ベックマン転移」はこの問題点を解決し、低環境負荷プロセスを可能にした。

メタクロレインの酸化メチルエステル化法（直メタ法）において、旭化成によって開発された金－酸化ニッケル触媒は従来の触媒と比べて圧倒的に高活性・高選択性を示し、

触媒寿命も長い。この触媒を用いたプロセスは、海外メーカーへのライセンスやジョイントベンチャー計画も進められている。また、本触媒は直メタ法以外にも様々な酸化反応にも高活性を示すことから、他の酸化反応の実用展開も検討されている。

・世界

現在進行している産業プラントプロジェクトに関しては、2012 年までは中国が 1 位であったが、シェール革命の影響により米国が急増し中国を上回った。また、インドやロシア、イラン、メキシコ、ブラジルが多く、シンガポールやドイツは減少傾向である。とりわけ、北米でのアンモニア・エチレンプラントの増加は驚くべき状況である。以下に用途別に状況を概説する。

ガスから液体燃料を作る FT 反応（鉄系・コバルト系などの不均一系触媒）に関しては、ナイジェリア、米国（いずれも Sasol 技術）、ウズベキスタン、小規模ながらロシア、また石炭起源としてモザンビークでの 9500 バレル/日（Vale/Uhde 技術）のプラント建設・設計が進められている。

石炭（褐炭含む）やバイオマスのガス化については、中国が最も精力的であり、アンモニア合成やメタノール合成のための大規模ガス化プラントが数百基建設され、500 kt/日を上回る大量の石炭が化学品へと転換されている（うちアンモニア合成 50 kt/日、MTP によるプロピレン合成 20 kt/日、メタノール合成 100 kt/日以上）。また豪州では褐炭のガス化による二酸化炭素フリー水素合成の研究開発が進む。

ゼオライト触媒を用いた軽質炭化水素製造のための流動接触分解(FCC)については、印 7 基・越・ウズベキスタン・カザフスタン・アンゴラ・湾岸協力会議（GCC、含むイラク）10 基・露 3 基・独・加・墨 2 基・コロンビア・伯・ペルーでの建設が進み、また水素化分解プロセスについては中・印・ナイジェリア・アンゴラ・露・ブルガリアなどの東欧・GCC・中南米諸国・米・加で進められている。

水素や合成ガス製造のためのナフサの水蒸気改質/部分酸化（ATR 含む）については、中・露・ブルガリア・埃・比・印・GCC・中南米・米・加で進められている。得られた炭化水素の異性化によるオクタン価向上においては、印・ウズベキスタン・アルジェリア・露・イラク・UAE・チリで建設が進む。

アンモニアは現在世界中で 1 億 6000 万トン/年生産され、肥料や各種化学品、近年はエネルギーキャリアとしても注目されている。我が国では北野・細野（東工大）らによる Ru/エレクトライド触媒など新たな報告が相次ぐ。世界では印・中・インドネシア・豪・アルジェリア・埃・仏・露・アゼルバイジャン・トルクメニスタン・UAE・イラン・南米・米で大規模に建設が進められている。

プラスチックの原料となるモノマー合成に関しては、4 大汎用プラスチックスである PP・PE・PS・PVC、ならびに PET、PMMA の各モノマー合成プラント建設が進められている。最も生産量の多いエチレンについては、従来は石油留分由来で無触媒でのナフサクラッカーによるエチレン合成が主であったが、近年はシェールガス随伴あるいは石油随伴のエタンを脱水素する無触媒でのエタンクラッカーの大規模な建設・計画が北米・GCC を中心に 30 以上進められている。プロピレンは従来は上記ナフサクラッカー由来が多かったが、近年はルーマスなどによる触媒脱水素プロセスが印・台湾などでいくつ

も建設・計画されている。スチレン合成はエチルベンゼンの鉄カリ系触媒による脱水素により行われ、印・イラン・韓・伯での大規模プラント増設が進められている。メタノール合成についてはメガプラントがナイジェリア・イラン・米で建設・設計が進められている。MMA についてはサウジアラビアで建設が進む。PE 重合は 50 以上の建設・設計が露・GCC・イラン・埃・中・印・墨・米で進められ、PP 重合は 15 以上、PS 重合はサウジアラビアで、PVC 重合は中・露・イラン・墨・米で、PET 重合はオマーン・米で、キシレンプラントはシンガポール・韓・アルジェリア・ルーマニア・サウジアラビア・イラン・墨・伯で 20 以上が建設・設計中である。

［注目すべきプロジェクト］

・不均一系触媒

- NEDO の「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」で、既存の化学品などの製造プロセスのグリーン化などを目標に研究開発が進められてきた。また、経済産業省の未来開拓技術実現プロジェクトの中で、光触媒により水分解で創り出した水素と、産業界から排出され回収した二酸化炭素から、基幹化学品を合成するための触媒開発が開始されている。
- NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発」（平成 25 年度～31 年度）では、実用化に向けて高いコスト競争力を有する非可食性バイオマスから化学品までの一貫転換プロセスの構築を目指している。
- 平成 27 年度からは、JST　ALCA の特別重点プロジェクト「ホワイトバイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」で、化石資源から脱却した次世代の化成品合成一貫プロセスの研究開発を狙って、従来技術とは非連続的な、バイオマスから化成品等を製造するホワイトバイオテクノロジーの深化が進められる予定である。

・均一系触媒

文部科学省科研費新学術領域研究において精密有機合成の分野で注目すべき研究開発が進められている。

- 「反応集積化の合成化学 革新的手法の開拓と有機物質創成への展開」（領域代表：吉田潤一（京都大学)、平成 21 年度～）では、通常のバッチ反応の条件では反応制御が困難であった不安定な活性種を、マイクロフロー反応装置を用いることによって瞬時に反応を終えることにより制御できるようになりつつある。
- 「有機分子触媒による未来型分子変換」（領域代表：寺田眞浩（東北大学)、平成 23 年度～）では有機分子触媒の開発から有用物質の合成までをターゲットに研究が進められている。
- 「直裁的分子変換を可能とする分子活性化」（領域代表：茶谷直人（大阪大学)、平成 22 年度～）では高効率的な物質合成を実現するために、今まで有効に利用されてこなかった化学結合の新たな活性化法を開発し、従来困難と考えられていたより直截的な触媒的分子変換反応を実現しようとしている。
- 「配位プログラミング　分子超構造体の化学と化学素子の創製」（領域代表：西原

寛（東京大学)、平成 21 年度～）では、化学結合を自由度高く制御するための配位化学を駆使して、ある程度自在に特異な構造を階層的に設計・構築することに成功しつつある。これらの知見は、階層的な固体触媒（分子固体触媒）設計にフィードバックできる。

（５）キーワード

低環境負荷、資源制約、バイオマス転換、シェールガス、均一系触媒、不均一系触媒、ナノ材料、不斉合成、立体化学制御、分子固体触媒

（６）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	◎	→	均一系触媒（銅やパラジウム）を用いたクロスカップリングでは先駆的な仕事が多数あり、世界をけん引している。また金触媒については、春田教授（首都大学東京）の仕事が先駆となり世界が追随している。電子移動に関連した反応や、Rh触媒による不斉付加なども高いレベルにある。 金属錯体触媒から有機分子触媒へと元素戦略に基づく研究成果が次々と生まれており、世界を先導している。とくに、ブレンステッド酸触媒、求核塩基触媒、超原子価ヨウ素触媒の分野で顕著な研究成果が出ている。また、官能基化を伴わないC-H活性化に基づく触媒反応の開発分野の展開も目覚ましい。 一方、バイオマス転換や規則性多孔体触媒、電極触媒などは米国・中国に比して目立っていない。
	応用研究・開発	◎	↘	マイクロフロー反応装置などを利用した反応制御の分野でも世界を先導している。こうした化学工学的なアプローチによる反応制御によって小規模装置による大量合成が可能になりつつある。近年の化学工学の退潮に伴い若手技術者が減少している。
	産業化	○	↘	民間企業は省エネ化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、アジアや中東、北米のエネルギー事情などに押され、新規プロセスの実用化は国の補助頼みである。企業独自での新規プロセス開拓意欲が乏しい。
米国	基礎研究	◎	→	有機分子触媒、特に酸塩基触媒の開発研究では顕著な研究成果を挙げている。官能基化を伴わないC-H活性化に基づく触媒反応の開発分野への関心は高く優れた研究成果が出ている。バイオマス転換による水素製造や金触媒を用いたアミノ化・異性化、電極触媒などでも世界をリードしている。クロスカップリングなどについても多くの研究が展開されている。
	応用研究・開発	○	→	応用を見据えた化学工学のプロセス研究はバイオマス変換、バイオマスリファイナリーを中心に発展しているが、注力される部分が大きく偏っている。DOEのarpa-eなどのプログラムが大学と企業の応用研究を支えている。
	産業化	◎	↗	基礎研究を産業化するための社会システムができ上がっており、産業化の力は強い。 シェールガス革命を背景に、新規ガス転換プロセスが数多く立ち上がっている。近年例のなかったアンモニア合成プラント・メタノール合成プラントなども計画されており、建設・計画はBRICsや中東を上回る。しかし、あたらしい化学プロセスを構築するという傾向はみられない。

欧州	基礎研究	◎	→	欧州各国は伝統的に省エネルギー・環境問題に対して高い意識を持っているため、広い範囲にわたってグリーンプロセス触媒の研究が進んでいる。イオン液体、マイクロフローシステムの分野での研究レベルは高い。この分野の学術誌が欧州に集中していることも当然の結果と考えられる。 金触媒、ナノポーラス金触媒、ナノポーラス銅触媒などではドイツが世界をリードしている。フランスはメタン転換で目立った研究がある。Rh触媒による不斉付加を除き、英国はこの分野での存在が弱い。 また各国の研究者の連携も進んでおり、欧州統合は研究の上で大きな成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	→	FP-7やHorizon2020をベースに多くの多国間協力型プロジェクトが進められている。また民間企業が多くの大学の研究者を支えており、これがよい結果を生み出している。例えばゼオライト研究のパイオニアであるスペインのCormaのグループは多くの民間企業により積極的に支援されている。
	産業化	◎	→	多くの優れたグリーンプロセス触媒が実用化している。英国、フランス、ドイツなどの国ごとに方向性が異なっている。
中国	基礎研究	◎	↗	以前は他研究者の研究の模倣であったが、近年では独自の優れた触媒の研究が多くなってきた。特に若い世代の研究者が中国の発展を牽引しており、すでに我が国にとって、脅威であることは明らかである。例えば水素製造、バイオマス転換、金触媒、Pd触媒によるタンデム反応、電極触媒で数多くの素晴らしい成果が出ている。ゼオライトの研究で優れた不均一触媒が多数現れている。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究と同様に、応用研究・開発には手厚い支援がなされており、活発な開発が推進されている。応用研究・開発力については他の先進国と肩を並べる水準に到達している。石炭ガスから得られた合成ガスを中心として、MTPによるプロピレン合成が実用化された。ガス製造・ガス転換について精力的な研究開発が進められている。化成品生産だけでなく、バイオマス変換、バイオマスリファイナリーを目標とした開発が大々的に進められている。
	産業化	○	↗	応用研究が力づくで商業化までフェーズアップされており、他国に先駆けた新たなプラントの建設が多い。一方で環境配慮に乏しく、環境対応触媒分野の重点化が望まれる。
韓国	基礎研究	△	↘	基礎研究は比較的弱く、一部の著名な研究者の活躍が韓国の触媒分野を支えている。研究者の数も欧米、日本、中国に比べ少ない。
	応用研究・開発	◎	→	燃料電池用の触媒、水素製造触媒、石油化学触媒などに民間企業が注力しており、応用研究・開発の研究は目覚ましいものがある。
	産業化	◎	→	韓国の石油化学産業（触媒を多用）は、我が国に比べ高い競争力を有し、キシレンプラントなどでアジアをリードしている。化成品製造のエネルギー効率についても日本に勝るとも劣らない状況になっている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（7）参考資料

1）Scopus による文献検索
2）触媒年鑑 2013　触媒学会編
3）文部科学省科学技術・学術政策研究所（NISTEP）　サイエンスマップ 2010＆2012

4）NEDO ロードマップ
・エネルギー・基礎化学品分野の触媒開発ロードマップ
・環境保全分野の触媒開発ロードマップ
・機能性化学品製造分野の触媒開発のロードマップ等

5）文部科学省新学術領域一覧
http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/1300048.htm

3.2 健康・医療

健康・医療分野では、病気を早期に発見・予測する技術や、感染症の流行を未然に防止する技術が必要であり、これらの技術は今後急増する医療費の適正化にも不可欠である。また、個別化医療、診断と治療の一体化など、医療介入の効果をより高めていくための技術開発も必要となる。今後発展が期待される再生医療では、材料としての細胞を治療目的に応じて培養・加工する技術の確立が求められている。

健康・医療へのナノテクノロジー・材料分野の貢献は、生命現象の分子レベル解析に必要となるツールを提供するとともに、健康維持や病気の早期発見、診断、治療につながる材料、デバイスを提供することにある。

本項では重要な研究開発領域として、生体材料（バイオマテリアル）、再生医療用材料、ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）、バイオ診断・計測デバイス、バイオイメージング、生体イメージングを取り上げている。

生体材料は生きた生体組織と接して使用される材料であり、とくに生体に埋植される材料は、目的に応じた機能性、安全性、耐久性の向上に向けた研究開発が必要となる領域である。

再生医療用材料は、疾病や負傷により失われた生体組織・臓器の再生促進に使用される生体材料であり、移植可能な組織・臓器の体外での構築や、組織・臓器の再生を体内で誘導・促進するのに適した材料の研究開発を指す。

ナノ薬物送達システムは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ことを目的としたシステムで、高分子、脂質等の材料で構成されるナノ粒子をキャリアとして利用する。生体との相互作用を考慮したキャリアの設計を通じ、患部に特異的な診断・治療技術の確立を目指した研究開発領域である。

バイオ診断・計測デバイスでは、ナノ・マイクロ構造を活用したデバイスにより、微量サンプルから特定の物質や細胞を迅速かつ簡便に抽出・分離する技術、センシングデバイスの高速化・高感度化技術、デバイス・システムの高集積化・アレイ化技術の確立などの研究開発を指す。

バイオイメージングは、細胞内の物質分布や細胞活動を光学技術やプローブを駆使して可視化する技術の研究開発であり、生体イメージングは、生体の生物的プロセスを生きたまま非侵襲的に可視化し、生命科学、前臨床研究および医療において必要となる情報を提供することを目的とした研究開発領域である。

３．２．１　生体材料（バイオマテリアル）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

医療用材料、中でも生きた生体組織と接して使用される材料の研究開発である。手術器具や診断用材料のように短時間だけ生体組織や体液と接する材料と、埋植材料のように長期にわたり生体組織と接した状態で使用される材料がある。前者は材料に求められる機能性の向上が鍵を握るが、後者では材料の機能性に加え、安全性・耐久性の向上が求められる。近年は再生医療研究での利用が進み、また生体内分解性材料の適用が大きな割合を占める。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

わが国では急速に高齢化が進み、医療分野においても健康寿命の延伸、診断・治療の低侵襲化、医療コストの適正化などさまざまな課題がある。生体材料には、金属、無機、高分子材料のほか、タンパク質や多糖類といった天然由来の材料、さらにはこれらを組み合わせた複合材料が用いられている。これらの材料は、骨折固定材、人工関節、人工透析器、ステント、眼内レンズ、人工血管などの体内埋植デバイスの他に、カテーテル、ガイドワイヤや手術用具、注射器等の処置用器具、交流磁場下での発熱を利用した磁性セラミックスによるがんの低侵襲温熱治療など、臨床現場の様々な分野で用いられている。

生体材料を薬剤担持材として活用し、薬物送達システム（DDS）の実用化を目指す研究に加え、近年では再生医療においても生体材料の重要性が増している。それに伴い、生体材料の関わる研究分野も他分野との境界を越えて広がりを見せている。再生医療の実現のためには生体内における細胞の機能とその制御因子の解明が不可欠であり、基礎医学・細胞生物学・発生生物学等における研究ツールとしての生体材料の有用性が指摘されている。

［これまでの取組み］

近年の再生医療分野における細胞培養基材としての生体材料の利用の広まりにともない、関連研究分野として、材料上での種々の細胞（幹細胞、骨細胞、神経細胞等）の挙動や機能、分化状態をタンパク質・遺伝子発現を含めて評価する研究が、日米欧だけでなく世界各国で行われるようになった。同時に、材料開発においても、生体材料そのものの物性や形状効果の検証ではなく、鍵となる生体分子の修飾や徐放による細胞機能制御を中心とした研究が広まっている。

組織再生後に足場となった材料が生体内で分解・消失するよう、生体内分解性材料の適用を中心に研究開発が進められている。生体の軟組織は、繊維状の細胞外マトリックス多孔体の中に細胞が埋まっている状態であると見なせることから、エレクトロスピニングにより作製した生体内分解性高分子不織布やハイドロゲル中での細胞培養・機能評価が多く行われている。細胞親和性の高い水酸アパタイトなどのある種のセラミックスは、骨欠損部に埋入されると周囲の生体骨と一体化するので、骨疾患治療に用いられる人工骨などとして有用である。リン酸カルシウム被覆の検討や繊維状アパタイトの組織

再生への適用研究も見られる。

特定の薬剤・生体分子を徐放する、あるいは体内の特定の細胞・組織に薬剤を送達するための担持材として生体材料を利用する研究も依然として盛んである。分子構造制御によるナノ粒子・ナノミセルの創製、薬剤徐放をターゲットとしたハイドロゲル、高分子不織布の開発等があげられる。薬剤ごとに担持材の微調整が必要であるにしても開発した技術の適用範囲が広く、大きな市場が見込めることが要因であろう。

ドイツではアミノシランで表面修飾した磁性ナノ粒子を用いた温熱治療の研究が進められ、その一部は欧州において薬事承認を得ている。

硬組織関係については、脊椎固定器具等への適用を考慮した純 Ti および Ti 合金製多孔体化、細胞機能性向上のための表面処理研究が相変わらず多いが、動的再結晶を利用したナノ組織化による高強度化と耐食性・生体適合性の向上を検討する研究が散見される。特筆すべき点は、生体内分解性金属材料の開発競争であり、生体必須元素を添加元素とした Mg 合金、Fe 合金の開発が中国、ドイツ、スイス、米国で進められている。

我が国では、独自の生体材料が数多く開発されており、基礎研究ではトップレベルにあるが、その成果は必ずしも産業化されていない。例えば、骨結合性セラミック系材料では、欧米と並ぶ研究成果を挙げてきたが、それが実用化に結びついた例は少ない。米国、欧州の基礎研究レベルは日本と同等であるが、基礎研究と応用研究がバランスよく進められており、産業への展開力は日本より優れている。新たな医療機器のアイデアは米国で発表され、臨床試験は欧州で実施、という流れも多い。

中国、韓国では独創的な研究はまだ少なく、日米欧でなされた研究の延長や焼き直しが多い。ただし、論文数は急速に増えており、さらに国を挙げて産業化を支援する仕組みを整えつつある。特に Mg 合金の医療応用については、地金のほとんどを生産するだけあって大変盛んであり、中小企業は積極的に医療業界への参入を行っている。また、再生医療用足場材料、DDS 用生体材料、あるいは生体材料の表面改質に関する研究が精力的に推進されている。

再生医療に関しては、韓国・シンガポールでは政府が国策として力を入れている。特に後者では海外から多くの研究者を招き研究開発を進めている。それゆえ研究水準も高く、海外企業と連携した製品化も行われている。

インド、イラン、ブラジル、アルゼンチン等の新興国の研究発表も増えており、国内需要の高まりと共に、今後これらの国でも研究開発が盛んになるものと予想される。

［今後必要となる研究課題］

本来の生体材料研究は、目的とする具体的な医療応用の形・イメージがあり、その実現に必要な材料物性を備えた材料を創製し、最終的には臨床試験においてその有効性を実証するものである。臨床試験において対象となる患者の安全性確保のため、有効性や安全性の確認を *in vitro/in vivo* 環境により実施する必要があり、そのために生体内環境を模擬した評価系、例えば疑似体液中の電気化学試験や疲労試験などが開発されてきた。*In vitro* における細胞培養試験や動物体内への埋植試験も、材料の生物学的安全性や有効性を簡便に推測するための試験法の一つである。

しかし、適切な物性を備えた材料の設計・開発は、求められる材料特性が判明してこ

そ可能であり、そのためには埋入部位である生体組織の力学特性や環境を明らかにする研究が必要である。また、生体材料と細胞などの生体組織との相互作用を分子レベルで解明する基礎研究にも積極的に取り組む必要がある。例えば、セラミックス系生体材料分野においては、水酸アパタイトが骨と結合することは周知の事実であるが、その詳細な機構は未だに明らかでない。生体材料と生体組織との分子レベルでの相互作用が明らかになれば、それが革新的な生体材料創出のブレークスルーに繋がる可能性がある。生体組織と生体材料の相互作用に関する研究は、今後も積極的に進めていく必要がある。

臨床応用の観点からは、人工関節や人工歯根などの体内埋入型生体材料表面での抗菌性発現やバイオフィルム制御も今後取り組むべき研究課題である。人工関節に術後感染症が生じると、最悪の場合は人工関節の抜去に至り、その患者および術者に対する負担はきわめて大きいためである。

最終的に材料が実用化されるためには、品質の確認や安全性確保のためのガイドラインが必要不可欠である。生体内分解性材料のような新規材料や新規デバイスには、従来のガイドラインや評価法が適用できず、その不備のために実用化が妨げられる。それゆえ、事業化に先行して合理的なガイドラインを制定する必要があり、そのための基礎的なデータを取得する研究の実施が早急に必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

今後の生体材料研究は、ますます分野横断的に展開することが予想され、携わる研究者・企業側開発者においても、これら異分野の知識が必要とされる。米国スタンフォード大では医療機器イノベーションに従事する人材育成を目的として、臨床現場における隠れたニーズの発掘、市場調査からプロトタイプ作製、さらにはビジネスプランの作成、資金調達まで、一連の医療機器ベンチャーにおける開発プロセス・スキルを実践的に学ぶプログラムが設置されている。産業化における我が国の弱点を克服するためには、従来の医工連携教育では不十分であり、事業化についての実践的教育が必要である。

科学技術的課題に関しては、我が国は生体材料各分野においてバランス良く基礎研究の知見が蓄積されており、重点技術領域、あるいは対応疾患を適切に選択・設定することにより、医療技術・医療機器業界において日本が世界のイニシアチブを取れる可能性はまだ残されている。しかし、その実現には発想の転換が必要であり、従来のような漠然とした基礎指向や研究のための研究ではなく、日本のアドバンテージを活かした、かつ具体的な治療法イメージを持った研究開発を行わなければならない。高い基礎研究のポテンシャルを臨床現場と結びつけることにより新たな技術シーズを創出、医療イノベーションにつなぐ必要がある。

現在の日本の医学・生物学関係の研究予算の一部は、再生医療分野に集中している。しかし、再生治療の限界を正しく理解し、薬剤・人工材料を用いた治療と細胞を用いた再生治療の役割分担を明確にする必要がある。現在の再生医療に関する研究では、生体組織の再生に主眼が置かれ過ぎており、臨床現場の問題を解決するためのアプローチという位置づけは軽視されている。現実の治療では元の組織と同様の機能が得られればよい。今ある技術・知見を組み合わせ現在の患者を救う重要性、工学的発想を忘れてはならない。そのためには、治療達成度の目安として用いられている指標と、デバイス・材

料の物性との相関を明らかにする必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

生体組織は有機物質や無機物質などがナノメートルレベルから高度に組織化されながら組み上げられたボトムアップ型の高次構造をもっており、それゆえに様々な生理学的機能や優れた機械的特性を実現している。生体材料開発においても、この精緻な構造に学びナノ構造、高次構造の面でも精密に制御された新素材開発が重要である。分子レベルで精密に制御された合成プロセスを用い、機能を発現する物質をナノメートルサイズで設計し、それをビルディングユニットとして高度に組織化することにより、種々の機能が融合した新素材を材料構築する技術が進展すると予測される。

工業材の中で強度に優れた PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）材の医療応用が検討されている。主として整形外科分野、中でも強度が要求される脊椎分野での適用検討が進んでいるが、他の領域への検討も広がりつつある。現在の生体材料研究の多くは表面修飾や生体活性分子の固定化、細胞との相互作用評価に主力を割かれているが、物性に優れた材料開発の重要性を示す一例である。

金属材料については、生体内分解性材料として Mg 合金、純 Fe および Fe 合金、さらに Zn の適用が注目を集めている。既に Mg 合金製生体内分解性ステント・スクリューについては欧州で臨床試験が実施されており、ISO、ASTM における規格化の動きも活発化している。

整形外科インプラントや歯科インプラントにおいて術後感染症が生じると、最悪の場合はインプラントの抜去に至り、その患者および術者に対する負担は大きいことから、チタンやリン酸カルシウム等の生体材料に抗菌性や抗バイオフィルム形成能を付与する研究が盛んになりつつある。

外部刺激あるいは周辺環境に応答して薬剤を放出するナノ材料や経皮薬剤投与用材料に関する研究も欧米において積極的に進められている。

［注目すべきプロジェクト］

- JST の戦略的イノベーション創出推進プログラムにおいて、平成 24 年度に「革新的医療を実現するためのバイオ機能材料の創製」が開始された。将来の革新的医療を実現するために必要なバイオ機能材料を開発し、さらに、医療デバイスのプロトタイプの作製と動物実験の評価までを目的として実施される [1)]。
- 平成 25 年度に開始された文部科学省/JST の革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）では、「若者と共存共栄する持続可能な健康長寿社会を目指す～Sustainable Life Care, Ageless Society COI 拠点～」において生体材料関連の課題が取上げられている [2)]。
- 米国 NSF の大学拠点創出事業である Engineering Research Center (ERC)プログラムで、ERC for Revolutionizing Metallic Biomaterials が採択され、2008 年から 10 年間の予定で活動を行っている。North Carolina A&T State University ほか 3 校で構成され、Mg 合金など金属材料を対象に、硬組織代替、ステントなどへの適用を目指

した研究開発が進められている[3)]。

（５）キーワード

生体適合性、生体内分解性、Mg 合金、再生医療

（６）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	◎	→	高分子材料に関する研究は世界をリードしているが、特定の疾患やデバイスを意識した研究は少なく、生物学レベルでの基礎的検討が多い。医用セラミックスや複合材料などの基盤技術研究は高い水準にあるが、原理原則を追究するような基礎研究はあまり多くない。金属材料については、合金開発に取り組む研究者が多いが、米国の開発潮流の後追いの面も否めない。医療機器デバイスメーカーが少ないため、デバイス開発に直結した材料研究が少ない。
	応用研究・開発	○	↘	高分子関係の特定技術以外では、応用を意識した研究は少ない。医療機器開発を担う企業がほとんどなく、そのため大学等で行われる研究は基礎研究の域を出ず、開発力が不足している。革新的な治療法に結びつく研究は少ない。
	産業化	△	→	高分子材料関係の大学発シーズ技術に関するベンチャー企業設立の努力が実り、幾つかの技術が実用化されつつある。しかし、循環器系生体材料や人工関節など，市場規模が大きく、超高齢社会に向けて需要の増加が見込まれる分野の国内生産率が低い。セラミック系生体材料分野で、2013年6月に水酸アパタイト／コラーゲン複合体が製造承認されたが、多大な費用を要する生体材料の実用化を担うことのできる企業は少なく、産業化は活発とはいえない。全体として革新的医療技術の実現を担う医療機器メーカーがなく、大学等で生まれた新しい技術が医療機器開発に結びつくケースは限られている。
米国	基礎研究	○	→	治療手法やデバイスに直結するアイデアを検討する動きが強い。再生医療，ドラッグデリバリー、皮膚などの軟組織修復再生を指向した研究が多く見られる。応用展開を視野に入れながらも、材料レベルから開発・改良を行う動きがあり、研究水準は高い。バイオマテリアル研究者単独での取り組みより、バイオメディカルエンジニアリングという枠組みで、材料研究者、工学研究者、医学者、生物学者の連係で取り組む研究が多い。
	応用研究・開発	◎	→	治療現場に直結するようなアイデアを提案・研究する動きが活発。デバイス・治療法開発の観点では、オリジナルな発想・組み合わせが生まれており、研究者層が厚い。無機材料系としては、ホウケイ酸塩ガラス系ナノファイバーを用いた新規創傷被覆材の開発が特筆される。放射性金被覆塞栓放射線治療用微小球やホウ珪酸塩系ガラス繊維からなる創傷被覆材といった新規材料や、経皮DDSといった新規治療法に用いられる生体材料に関する応用研究も盛んである。
	産業化	◎	→	企業数や売り上げ規模は日本を大きく上回り，培養皮膚，軟骨などの再生医療材料については世界トップの位置を維持している。整形外科関連材料分野で大きな世界シェアを持つ企業が多く、企業による産業化のスピードは早い。十数年来強力に推進されてきたバイオベンチャーについては、スクラップ・アンド・ビルドが最近進行しており，製品の質の維持や保証が今後課題として浮上する可能性がある。
欧州	基礎研究	◎	→	現行デバイスの問題点解析や、材料と生体組織間の反応を系統的に捉え直し、in vitroレベルでのスクリーニング手法に帰結させる、というような、学問的な研究に取り組む流れがある。また、材料の基礎物性に関する研究に強みを持つ。

	応用研究・開発	○	→	感染防止材や骨組織再生関連の研究が多く行われている。ポリエーテルエーテルケトン（PEEK）などの高強度高分子系材料やカーボンナノチューブなどのナノ材料に関する応用研究も多く行われている。また生体内分解性Mg合金製ステント材の臨床試験などが進められており、シーズ技術の製品展開は早い。
	産業化	◎	→	CEマークを取れば、医療者の判断で使用できるため、産業化のスピードは早い。EU全体を市場となるため、中小・ベンチャー企業による開発が盛んである。日本の企業も市場投入の最初の舞台に欧州を選ぶことが多く、臨床試験の実施が新たな医療機器開発の活性化を促す側面もある。歯科用金属材料や高分子材料、材料加工を扱う企業の国際競争力が高い傾向にある。ドイツでは培養皮膚、軟骨の商品化が活発に進められているほか、表面修飾した磁性ナノ粒子を用いた温熱治療の実用化が進められ、その一部は欧州での薬事承認を得ている。
中国	基礎研究	○	↗	独創的なコンセプトには乏しく、欧米の先行研究と酷似した研究が散見するが、研究レベルは年々上昇している。生体材料全体にわたって論文や国際会議などにおける研究報告が増加傾向にある。特に高分子，無機材料，ドラッグデリバリーに関して顕著である。
	応用研究・開発	○	↗	特定デバイス・領域を想定した研究が行われており、国の方針として特定の大学や研究機関に予算が集中的に投下されるため、当該大学や研究機関における応用研究の進捗は早い。一方で、現行デバイスの問題点解析等の分野は弱い。
	産業化	○	↗	自国内に大きな市場を有するため、医療機器メーカーは海外展開の必要がなく、他国メーカー・研究者との連携により開発ペースが早い。単一組成の生体材料開発や供給を取り扱う企業が多いのが特徴である。中国国内で実用化された生体材料の安全性や世界展開力は未知数であるが、高度医療機器や複合化素材については今後の進展の動向を注視する必要がある。
韓国	基礎研究	○	→	研究の担い手が少ないため、行われている研究は限られている。しかし、分野によっては水準の高い研究も見られる。3次元組織工学用材料や金属材料，DDS担体としてのナノ層状複水酸化物に関する基礎研究が盛んである。生体適合性向上のために表面修飾の手法を利用した研究に関する論文が多く見られる。医療機器メーカーが限られているため、基礎的な検討が多い。
	応用研究・開発	○	→	全領域をカバーするには至っていないが、特定のデバイス・疾患領域で、技術水準も高く、実用化を意識した研究も行われている。人工関節や再生医療に関する特許の比率が高い。特に皮膚再生技術に関しては出願数が5地域の中でもトップレベルにある。
	産業化	○	↗	特定のデバイスについて、製品化は進んでいる。特に再生医療分野での産業化に国をあげて力を入れている。国内市場だけでは採算がとれないため、海外市場展開が必須であり、ニッチ市場を目指した戦略的な開発が進められている。歯科用インプラントは国内企業が市場占有率1位を占めており，世界10位以内のメーカーも存在する。マイクロアーク酸化チタンや高分子製の脊椎修復材料の市場化も活発に推進している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料・参考資料

引用資料

1) “研究開発テーマ「革新的医療を実現するためのバイオ機能材料の創製」”
http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h24theme07.html
2) “若者と共存共栄する持続可能な健康長寿社会を目指す Sustainable Life Care, Ageless Scoiety COI 拠点”
http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/slcas-coi/index.html
3) “NSF Engineering Research Center for Revolutionizing Metallic Biomaterials”
http://erc.ncat.edu/

参考資料

1) 厚生労働省. 医療機器産業ビジョン 2013 ～次元の違う取組で、優れた医療機器を迅速に世界の人々に届ける～. 2013.
http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/iryou/shinkou/dl/vision_2013a.pdf
2) 日本政策投資銀行. シリコンバレーにみる医療機器開発エコシステムと日本への示唆. 2013,今月のトピックス No.195-1.
http://www.dbj.jp/pdf/investigate/mo_report/0000013662_file2.pdf
3) みずほコーポレート銀行. 医療機器メーカーの成長戦略～日本のものづくり力を生かした海外展開による競争力強化～. 2012, Mizuho Industry Focus Vol.111.
http://www.mizuhobank.co.jp/corporate/bizinfo/industry/sangyou/pdf/mif_111.pdf
4) 経済産業省 商務情報政策局ヘルスケア産業課 医療・福祉機器産業室. 医工連携による医療機器事業化ガイドブック（2014 年 4 月版）. 2014.
http://www.med-device.jp/pdf/guidebook.pdf
5) 高江慎一. 医療機器開発推進のために考慮すべき事項とは？.
http://www.npo-cens.org/yakuji/data/yakuji_vol3_takae.pdf
6) 25th European Conference on Biomaterials. Madrid, 2013-09-9/12.
7) Composite at Lake Louise-2013. Lake Louise, 2013-11-3/7.
8) 第 35 回日本バイオマテリアル学会大会. 東京, 2013-11-25/26.
9) Innovations in Biomedical Materials: Focus on Ceramics. Columbus, 2014-07-30/08-01. .

３．２．２　再生医療用材料

（１）研究開発領域の簡潔な説明

疾病や負傷により失われ生体組織・臓器の再生を促進するために必要な材料の創出を目的とした研究開発領域である。すなわち、細胞が接着して増殖し、機能を発現するために必要となる足場材料の性状や構造を検討することによって、移植可能な組織・臓器を体外で構築する技術や、組織・臓器の再生を体内で誘導・促進する技術の研究開発を行う。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

再生医療には、細胞、足場材料、および細胞成長因子という３つの要素が含まれる。これら３つの要素を単独、あるいは組み合わせて利用することによって、生体内、および生体外で組織・臓器を修復、再生させる。再生医療のための足場材料は、細胞の接着、増殖、分化、細胞外マトリックス産生などの機能を制御し、組織・臓器の再生を促進させる場（畑のような役割）を提供する。生体内の組織・臓器は細胞と細胞外マトリックスで構築されている。細胞外マトリックスは、細胞を取り囲むようにして存在し、コラーゲン、プロテオグリカン、グリコサミノグリカン、ヒアルロン酸など、多種類の分子を主な成分とする。細胞は、この細胞外マトリックスを介して周囲の細胞と情報伝達しながら生体恒常性を維持している。

ところが、生体組織が損傷を受けると、細胞とともに細胞外マトリックスが失われてしまう。そこで、この失われた細胞外マトリックスのかわりに足場材料を細胞に供給すると、足場材料は組織再生の空間を確保するとともに、再生組織の形状を維持しながら、欠損組織の再生を助ける役割を果たす。材料の組成や構造を制御し、機能を高め、細胞外マトリックスを模倣した足場材料の開発は再生医療の実用化に向けて非常に重要な技術であり、基礎研究と応用・実用化研究の比重は国によって異なるが国内外で盛んに研究開発が行われている。

［これまでの取組み］

再生医療用の足場材料にはいくつかの性質が要求される。細胞の接着、増殖、マトリックス産生を促進して細胞の分化を制御できること、生体に悪影響を及ぼさない性質としての生体適合性、高い強度や多孔性などが要求される。さらに、組織の形成とともに分解・吸収される生体吸収性が要求される。その理由は、増殖した細胞と産生された細胞外マトリックスが組織化し、新しい生体組織が形成されると、人工物である足場材料は障害物となるためである。

足場材料の原料には、リン酸カルシウムや炭酸カルシウムなどの無機化合物とポリ乳酸や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、および脱細胞マトリックスなどが用いられる。さらに、これらの原材料を複合化し、それぞれの材料がもつ特長を相乗的に引き出すことも重要である。有機・高分子化合物と無機化合物との複合化、生体吸収性をもつ合成高分子と天然高分子の複合化、細胞成長因子やサイトカインなどの生理活性物質および遺伝子プラスミドを導入

した足場材料の開発も進められている。さらに、温度変化、力学的刺激、電気的刺激、化学的刺激などに応答する刺激応答性高分子足場材料も開発されている。

足場材料の作製技術として、ポローゲンリーチング法や相分離法、凍結乾燥法、エマルジョン凍結乾燥法、ファイバー融着法、ニードルパンチング法、エレクトロスピニング法、積層造形法が開発されている。

・ポローゲンリーチング法

ポローゲンとよばれる微粒子を高分子溶液または溶融液に分散させたコンポジットを作製した後、ポローゲンを溶出させることによって多孔質足場材料を作製する。多孔質足場材料の気孔率はポローゲンと高分子原材料の仕込み比、空孔のサイズ・形状はポローゲンのサイズ・形状を変えることによってそれぞれ制御することが可能であり、特殊な装置を用いなくても空孔構造を容易に制御できることから、生体吸収性合成高分子からなる多孔質足場材料の作製によく利用されている。また、ポローゲンリーチング法を別の多孔質足場材料作製方法と組み合わせ、細胞をより播種しやすく、足場材料全体に分布させるための工夫もなされている。

ポローゲンには、塩化ナトリウム、ショ糖、パラフィンなどの微粒子が使用される。高分子□ポローゲンコンポジットを適当な溶媒に浸漬することにより、ポローゲンを溶出除去することができる。さらに最近では、ポローゲンとしてあらかじめ作製した氷の微粒子を用いる方法が開発された。氷微粒子を用いた多孔質材料作製法の特長として、ポローゲンである氷微粒子は生体に対する毒性を示さないこと、氷微粒子は凍結乾燥で容易に除去されること、および高分子水溶液の凍結を誘発できることが挙げられる。作製した足場材料は高い連通性を持ち、球状の空孔が得られる。この方法をさらに発展させ、現在では表面構造を制御した多孔質足場材料、さらにマイクロパターン状の多孔質構造を有する足場材料を作製できるようになっている。

・積層造形法

足場材料の外形、および多孔質構造を精密に制御できることから注目されている。積層造形法には、微細粉末をレーザーで焼結して固化するプロセスを繰り返して積層することにより三次元多孔質体を作製する選択的レーザー焼結法、レーザーを光硬化性のポリマー溶液に照射して断面形状を作製するプロセスを繰り返して立体像を形成させるステレオリソグラフィー、熱可塑性樹脂を高温で溶融して断面形状を描画し、それらを積層する熱溶解積層法、インクジェットに似たノズルで接着剤を原料粉末に吹き付けて固化させる 3D プリンティング法などがよく用いられている。

積層造形法では、CAD データを基に材料を積層して目的物を作り上げるもので、足場材料のマクロ形状と内部ミクロ構造を精密に制御することが可能である。また、積層造形法では、生きた細胞と細胞成長因子を直接ヒドロゲルの三次元構造体に導入し、生体内での細胞と細胞外マトリックスの構造を模した構造体を構築することが可能である。

・生体組織の脱細胞化処理

生体組織から細胞成分のみを取り除き細胞外マトリックスを残した脱細胞化組織も足場材料として用いられている。脱細胞化組織は生体組織の構造とよく似ていることと、細胞成長因子などの生理活性物質が豊富に存在するため、組織再生に高い促進効果が期待できる。

脱細胞化処理の方法として、物理的方法、化学的方法と酵素処理法が挙げられる。また、最近では、脱細胞化剤を臓器に灌流する方法により臓器ごと脱細胞化し、その脱細胞化臓器を足場材料として用いる手法が開発された。この手法を用いて、ラットの心臓、肺、肝臓、腎臓を脱細胞化した細胞外マトリックスを各臓器再生の足場材料に用いる研究が報告された。

臓器を脱細胞化して得られた細胞外マトリックス足場材料には、臓器に固有のマトリックスや生理活性物質が含まれ、また、臓器固有の構造が保たれるため、複合構造を有する臓器の再生に有効であると考えられる。ただし、組織・臓器の脱細胞化マトリックス足場材料を作製するためには、ドナー組織・臓器が必要という点がボトルネックである。この問題点の解決を目的として、培養細胞や培養組織を脱細胞化したマトリックス足場材料の作製技術が開発された。この方法では、患者自身の細胞に由来する自家脱細胞化マトリックス足場材料の調製も可能である。自家細胞を利用して得られる自家細胞外マトリックス足場材料は患者自身の細胞に由来するため、移植時に免疫反応も炎症反応も引き起こさず、きわめて高い生体適合性と安全性をもつ。

［今後必要となる取組み］

これまで厚みの少ない組織を再生した成功例はいくつかあるが、今後は、大きな組織、複雑な構造を有する臓器を再生するために、細胞に必要な空間、および必要なシグナルを提供できる材料の開発に取り組む必要がある。材料設計のファクターとして、足場材料の連通性、および血管ネットワーク再生のためのチャンネルが重要である。

足場材料の連通性を高めるために、いくつかの多孔質材料の作製法を組み合わせた方法や、選択的に除去可能な鋳型を用いる方法が開発されつつある。足場材料の連通性を高めることができれば、細胞を足場材料にまんべんなく播種でき、その結果、組織が均一に再生される。

ヒトに臨床応用可能な大きな組織や臓器を再生するための足場材料に血管ネットワークが必要となる。そのためには、血管ネットワークの再生を誘導する生理活性因子をマイクロパターン化して足場材料に導入したり、血管ネットワーク再生のためのチャンネルを設けたりすることが必要である。

積層造形法を用いれば、足場材料の外形と空孔構造を精密に制御することができる。ただし、現在のところ、積層造形法の原料として利用可能な生体材料の種類は非常に限られているので、新たな生体材料の開発が望まれる。また、積層造形法をヒドロゲルの足場材料の構築に応用することにより、生きた細胞と再生成長因子を直接ヒドロゲルの三次元構造体に導入する試みもある。生体内での細胞と細胞外マトリックスの構造を似た構造体を構築できるという特長がある一方、いかに細胞の活性を維持しながら三次元的な構造を保つよう力学強度を高めるかという課題が残されている。

天然組織の機能や構造、物性は多岐にわたっているため、足場材料に必要な機能や構造、物性も、再生しようとする組織の種類によって異なる。足場材料には種々の原材料や材料作製法があり、それぞれ長所と短所がある。多種類の組織や複雑な構造をもつ臓器を再生するためには、種々の材料の特長を生かして複合化することが重要で、複合材料の開発はさらに進めるべきである。また、積層造形法とその他の作製法と併用し、それぞれの方法で作製した多孔質材料の性質を相補する複合構造の創出も強化すべきである。特に、再生したい組織の機能と構造を十分に把握したうえで、足場材料を開発することが理想的な組織を再生するための鍵となる。

これまでに開発された足場材料は受動的に機能するが、今後は能動的な機能を持たせるべきである。すなわち、播種した細胞の生理活性をモニタリングしながら、それに応答する高機能性の足場材料の開発が必要となる。

脱細胞化処理により作製した細胞外マトリックス足場材料の大きな問題点は、力学強度が不十分なことである。組織や臓器は、脱細胞によって細胞外マトリックスの構造に影響を受け、細胞外マトリックス足場材料はもとの組織や臓器よりも柔らかくなってしまう。細胞外マトリックスの力学的強度を維持できる脱細胞化処理法の開発が必要である。さらに、滅菌方法および臨床レベルのバイオリアクターについても検討が必要となる。また、脱細胞化組織を再生医療に用いるためには、免疫反応の惹起や機能・性能のロット差などの問題点をどのように克服するかが課題である。

（３）科学技術的・政策的課題

生体組織･臓器では､細胞と細胞外マトリックスが緻密かつ規則正しい構造を形成し、再生機能を果たす。このとき細胞と細胞外マトリックスはダイナミックに変化している。そのようなダイナミックな細胞外マトリックスを模倣し、組織・臓器の再生に適した足場材料を開発するためには､細胞外マトリックスの構成成分､微小構造､物性を解明し、材料科学の技術によりその組成、微小構造と物性に近い足場材料の設計と作製が必要である。

これらの課題を解決するために、材料合成・分析を行う材料科学、細胞外マトリックスの解明と細胞の機能解析を行う分子細胞生物学、そして足場材料を利用する工学、医学、産業化する企業側の多種多様なバックグラウンドをもつ研究者間の密な連携が不可欠である。このような多分野の融合および横断的な研究を促進するための環境整備および人材の育成は再生医療用材料の開発および実用化を早期に達成する鍵となるため、積極的に推進する必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

足場材料の構造制御とともに、機能の高次化、たとえば、再生する組織・臓器の状況をモニタリングできる材料の開発が望まれるが、米国の研究グループは、再生の再生組織･臓器の細胞を多孔質足場材料にナノスケールの電気センシング機能を持たせるため、シリコンナノワイヤの電界効果トランジスタをコラーゲンやアルギン酸塩、PLGA の足場材料に導入した複合足場材料を開発した。これらの複合足場材料に神経細胞、心筋細

胞、平滑筋細胞を培養し、細胞の薬物に対する反応を直接モニタリングすることができている。

米国の研究グループは、血管ネットワークの形成を促進する足場材料を作製するために、糖ガラスを鋳型として利用する方法を開発した。具体的には、グルコースとスクロースとデキストランを混合し、糖ガラスを調製した。つづいて、3D プリンティング技術で糖ガラスの繊維ネットワークを作製し、細胞とマトリックスの混合液をこのガラス繊維ネットワークに流し込んで、架橋することにより、細胞とマトリックスの構造体を硬化させた。その後、培地中で培養しながら、ガラス繊維を溶解させることによって、培養組織に血管ネットワークを形成するためのチャンネルを設けた。このチャンネルに血管ネットワークが形成されると、機能性を持つ大きな組織の再生が可能となる。

三次元的で複雑な機能・構造を備えた組織・臓器の作製に向けて、日本では細胞外マトリックスを巧妙に利用した研究開発が進められている。細胞をコラーゲンなどの足場材料とともにひも状に加工して細胞から成るファイバーを作り、ファイバーを編むようにして立体的な構造を作製する方法、細胞表面に細胞外マトリックスの薄膜を形成し、これを細胞間の接着剤のように利用して細胞を積層・集積する方法などが挙げられるが、いずれも複数種の細胞の空間配置を制御できるものであり、再生医療のほか臓器チップなどへの今後の展開が期待される。

［注目すべきプロジェクト］

NEDO は、日本が強みを有する優れた立体造形技術を利用して、移植用途の機能的な立体組織や立体臓器の製造技術を開発し、移植組織・臓器不足の是正、および、医療機器産業等の国際競争力強化を実現するための新しいプロジェクト「立体造形による機能的な生体組織製造技術の開発」を平成 26 年度より平成 30 年度まで実施予定である。本プロジェクトでは、足場材料、細胞、三次元造形技術を組み合わせて、移植に使用可能な立体組織（骨、軟骨、血管、0.5cm 程度の厚みのある心筋組織など）および立体臓器（肝臓、腎臓、心臓など）の作製技術、再生技術、および評価技術の確立を推進することが目的である。

（５）キーワード

足場材料、多孔質材料、生体吸収性、細胞外マトリックス、脱細胞化処理、再生医療、組織工学

（６）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	◎	→	高分子、セラミックス、金属の多孔質足場材料およびその複合足場材料に関する基礎研究は盛んに行われている。特に高分子とセラミックスおよび複合足場材料の研究開発は世界のトップクラスである。ただし、新規材料への挑戦は米国に比べ劣っている。
	応用研究・開発	○	↗	足場材料を利用した再生医療の実用化研究はある程度進んでいるが、まだ規模は小さい。基礎研究がよく進んでいるのに対し、応用研究はやや遅れている。足場材料の研究開発を実施している企業も少ない。再生医療を促進するためのいくつかの規制・法律の整備が進んでいるので、足場材料の応用研究も加速していくだろう。
	産業化	○	↗	再生医療の足場材料を製品化する企業、特に大企業は非常に少ない。最近、再生医療を促進するための規制と法律の整備の進歩と伴って、再生医療の足場材料の実用化に参画する企業は増えつつある。特に三次元造形の分野ですぐれた技術をもつ企業も多く、参画しやすいことも一因である。
米国	基礎研究	◎	→	足場材料の基礎研究で世界をリードしている。足場材料の研究者も多く、様々なアプローチおよび分野同士の融合を盛んに行い、各面から再生医療用足場材料の研究を進めている。常に新しい材料に挑戦、新しい概念を導入し、特にオリジナルなものが多い。
	応用研究・開発	◎	→	基礎研究と応用研究を密に行い、実用化を常に重視しつつ、研究を進めている。大学発ベンチャーは多くあり、応用研究しやすい環境はよく整備されている。
	産業化	◎	→	再生皮膚や再生軟骨などの再生医療の製品はほとんど米国発であった。製品開発の段階からFDAと相談しながら進めることから、FDAの審査も迅速で、実用化までの期間は比較的短い。再生医療および足場材料に参画している企業も多く、原材料の生産と加工品を提供している。
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設立され、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、合成および加工まで、種々の分野の研究者が集合して基礎研究を盛んに行っている。
	応用研究・開発	◎	→	再生医療の実用化を進めやすい規制と環境が備えられ、応用研究はよく進んでいる。特にEU加盟国は大型プロジェクトを立ち上げ、再生医療用足場材料の実用化を多国間の協力で推進されている。
	産業化	◎	→	多くの再生医療の製品を実用化している。バイオ関連の企業は多いので、再生医療用足場材料の産業化も良く進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	以前は科学技術先進国を追いかける立場であったが、現在は世界トップレベルの研究が進められている。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、オリジナリティの高い成果も多く出ている。再生医療用足場材料に従事する研究者は急激に増え、多方面から基礎研究を進めている。これからさらに注目されると思われる。
	応用研究・開発	○	↗	応用研究志向の研究開発が大部分であったため、応用研究は基礎研究の段階から取り込むように努力している。米国とよく似ていて、ベンチャー企業を持つ研究者は非常に多い。よって、応用研究の勢いは今後も増していくだろう。
	産業化	△	↗	中国において製品化されているのは培養表皮のみである。バイオ関連の製品はほとんど輸入品であった。国産化するために、多くのベンチャー会社が立ち上げられた。しかしながら、大企業の参画は少ない。ただし、市場が大きく、国も非常に重視しているので、今後産業化が加速されると思われる。

韓国	基礎研究	○	↗	実用化志向の基礎研究は多い。高分子とセラミックの足場材料に関して多くの成果がある。
	応用研究・開発	○	↗	実用化のための応用研究はいろいろな形の連携でよく進んでいる。大学発ベンチャーも多くあり、応用研究はよく進んでいる。
	産業化	○	↗	再生医療の製品はいくつかある。産業化はよく進んでいる。ベンチャーのみならず、大企業の参画も参画しているが、製品はまた国内に市場に留まっている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) Miller JS et al. Rapid casting of patterned vascular networks for perfusable engineered three-dimensional tissues. Nat Mater. 2012, 11, p.768-774.
2) Tian B et al. Macroporous nanowire nanoelectronic scaffolds for synthetic tissues. Nat Mater. 2012, 11, 986-994.
3) Giannitelli SM et al. Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering. Acta Biomater. 2014, 10, p.580-594.
4) Balint R et al. Conductive polymers: towards a smart biomaterial for tissue engineering. Acta Biomater. 2014, 10, p.2341-2353.
5) Bajaj P et al. 3D biofabrication strategies for tissue engineering and regenerative medicine. Annu Rev Biomed Eng. 2014, 11, p.247-276.
6) Zhang Q et al. Pore size effect of collagen scaffolds on cartilage regeneration, Acta Biomater. 2014, 10, p.2005-2013.
7) Joddar B et al. Stem cell culture using cell-derived substrates, Biomater. Sci., 2014,2, p.1595-1603
8) He M et al. Comparison of Methods for Whole-Organ Decellularization in Tissue Engineering of Bioartificial Organs. 2013, Tissue Eng. Part B Rev. 2013, 19, 194-208.

３．２．３　ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

高分子、脂質等の材料で構成されるナノ粒子をキャリアとして利用し、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ことを目的とした研究開発領域である。生体との相互作用を考慮したキャリアの設計を通じ、生体中でのキャリアの空間的、時間的分布や患部における薬物の放出を制御し、患部に特異的な診断・治療技術の確立を目指した研究開発が進められている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

ナノ DDS はナノ粒子の性状で体内動態を制御し、患部に選択的に薬物を送り届けることを目的としている。体内に薬物を投与すると全身に分布してしまい、その結果、副作用が生じたり、患部での薬物濃度が不十分で治療効果が十分に達成できないことがある。このような薬物をナノ DDS に搭載することで副作用を軽減し治療効果を向上させることができれば、新薬開発と比べてより低コストで優れた医薬品を開発することが可能となり、総医療費の抑制に大きく貢献できる。

1970 年代に提唱された薬物送達システム（DDS）は、薬物治療の最適化のために、必要な時に、必要な時間、必要な量を、必要な場所で放出し、期待する薬理効果を発揮させることを目的とし、当初はカプセルから薬物の放出速度を制御や、難吸収性の薬物の吸収性を向上させる研究が行われてきた。1980 年代後半からは、リポソームや高分子ミセルなど 100 nm オーダーの粒径をもつナノ粒子を薬物のキャリアとして用いるナノ DDS の開発が進められている。

さらに、バイオ医薬の実用化では、ナノ DDS の利用が不可欠である。21 世紀に入り、医薬品開発の潮流は、低分子医薬から蛋白質（抗体など）、核酸などのバイオ医薬へと移行しつつある。核酸医薬の作用部位は細胞内であるが、核酸自体は細胞内へ入ることができない。そのため、核酸医薬を実用化するためには、体内動態制御のみならず細胞内動態制御も可能なナノ DDS の開発が必須であり、研究の進展が期待されている。

また、核磁気共鳴画像法やポジトロン断層法などの画像診断で使用される造影剤を薬物とともにナノ DDS に搭載することで、ナノ DDS の患部への集積から治療効果までを画像診断で確認できるようになり、より精密で確実な診断・治療が可能になりつつある。また、生体に対して安全な光、超音波などの物理エネルギーとナノ DDS の組み合わせによる超低侵襲治療システムも大きな注目を集めている。ワクチンや再生医療においても、ナノ DDS 技術の応用が期待されている。

［これまでの取組み］

薬物のキャリアとなるナノ粒子には、毒性がないことや薬物を効率よく搭載できることといった基本的な性質のほかに様々な性質・機能を付与する必要がある。ナノ粒子を血中に投与した場合、抗体や補体など免疫系による認識を受け、肝臓や脾臓のマクロファージにより血中から除去されてしまうが、ポリエチレングリコールなどでナノ粒子を修飾することで、免疫系による認識を回避することができるようになった。

薬物を患部に送達するには、ナノ粒子は血管を通過し、患部組織に浸透する必要がある。腫瘍組織（固形がん）では正常組織の血管の物質透過性が高く、リンパ系が発達していないため、腫瘍組織に到達した物質は蓄積しやすい。これを EPR（Enhanced Permeability and Retention）効果という。EPR 効果を利用して 100 nm 程度の粒径のナノ粒子は血管を通過して腫瘍組織に到達することができる。抗がん剤のドキソルビシンを搭載したリポソーム製剤は 1995 年から臨床で用いられている。また、日本で開発された高分子ミセル型ナノ DDS は、抗がん剤を内包させた製剤のうち 2 品目が治験第 3 相試験へと進み、数年以内の実用化が期待されていることから、世界的に大きな注目を集めている。

米国、欧州の大学・公的機関におけるナノ DDS の研究水準は非常に高い。米国では国立がん研究所（National Cancer Institute）や大学に設置されたナノテク研究拠点を中心にレベルの高い研究開発が行われている。欧州では、ナノメディシンに関して、EU 支援の下で欧州テクノロジープラットフォーム（European Technology Platform on Nanomedicine、EPTN）を設立し、ナノ DDS の研究開発を加速している。米国、欧州とも、大学等の研究機関で得られた成果を産業化につなげる体制が整っている。

近年、この領域における中国、韓国の台頭が著しい。中国では 2003 年に設立された National Center for Nanoscience and Technology においてバイオナノテクノロジーの研究を推進しており、その結果、DDS に関する論文・特許数が指数的に増加している。DDS の国際学会である Controlled Release Society の年会や、米国遺伝子細胞治療学会など、ナノ DDS と密接にかかわる国際学会において、中国と韓国のプレゼンスが大きくなっている。

日本は、材料開発において高い優位性を有し、大学・公的機関における研究レベルは欧米に劣らず非常に高いが、研究成果が実用化へとなかなかつながらないことが大きな課題となっている。

［今後必要となる取組み］

アプタマー、ペプチド、抗体といった標的指向性分子（リガンド分子）を搭載したナノ DDS の開発は極めて重要である。リガンド分子搭載により、ナノ DDS が能動的に到達できる疾患部位を拡張することが、新しい治療法を生み出す鍵といえる。現在、腫瘍組織の血管、肺の血管、脂肪組織の血管などの能動的標的化が可能となりつつあり、ナノ DDS が標的化できる組織が拡大している。今後は、リガンド分子を搭載したナノ DDS により、がん、循環器疾患のみならず、感染症、中枢系疾患、代謝性疾患などの幅広い疾患の診断・治療へと適用範囲をさらに拡大していく必要がある。

近年、大きな注目を集めている核酸医薬に関しても、実用化に向けて技術面での鍵を握るのが、核酸分子を送達するナノ DDS の開発である。siRNA のように細胞質中で機能する場合には、エンドサイトーシスによる細胞への取り込みと、エンドソームから細胞質への脱出過程を制御する必要がある。このためには、ナノ DDS の標的細胞による取り込みを促進するためのリガンド分子に加え、細胞内の環境に応じて選択的に機能発現するための環境応答性材料の開発や、ナノ粒子構造の精緻化が必要になる。さらに、有効性・安全性に優れ、かつ長期備蓄が可能なワクチンの開発や細胞移植を必要としない

再生医療の実現に向けたナノ DDS の開発も必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

ナノ DDS の研究は、ボトムアップで行われ、各研究者が独自のシステムを開発し、優劣を競っている傾向がある。各研究者が開発したシステムの性能を客観的に比較評価できる標準化された評価システムを確立する必要がある。また、基礎研究の成果を円滑に実用化につなげるには、GMP 基準に基づく製造法を確立しなければならない。

また、研究成果をスムーズに企業へと移管するためには、企業とアカデミアが早い段階から共同研究・開発体制を取ることが重要である。アカデミア側には、企業のニーズに関する情報が不足していることや、課題設定自体に問題がある場合がある。一方、企業側には、設備、人材、技術の不足（製薬企業ではナノ DDS は製剤部門が担当するが、高分子の精密合成等の高度化したナノ DDS 技術に対応することは困難）や前例がないことによる開発リスクの存在といった問題がある。これらの問題を回避するには、研究開発の早い段階から産学連携が必要となる。ナノ DDS の開発リスクを低減させるためには、薬事法上の審査を効率的に行うためのカイドラインの策定が極めて重要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

新薬開発研究の行き詰まりを打開する方法として、既に承認された薬剤の新たな作用を見出し、これまでに適応のない疾患の治療へと応用するドラッグリポジショニング（DR）が注目されている。DR で見出された薬剤は、早期に臨床開発に進むことが可能であり、臨床試験が予期せぬ副作用で失敗する確率が低いことから、医薬品開発における時間とコストの大幅な削減が可能であるが、これらの薬剤を実用化するための技術として、ナノ DDS が注目されている。

メッセンジャーRNA（mRNA）を遺伝子治療へと応用する研究が注目を集めている。mRNA は、ホストゲノムへの挿入リスクが無いことから非常に安全であり、神経細胞などの非分裂細胞への導入が可能であることからウイルスベクターやプラスミド DNA と比べて大きな利点を有しているが、mRNA による遺伝子治療の実現には mRNA を細胞質に送達し、持続的なタンパク質発現を可能にするナノ DDS の開発が進められている。

さらに、このような mRNA や siRNA、miRNA 等の核酸医薬を送達するナノ DDS の新たな応用として、長期備蓄が可能なワクチンの開発や細胞移植を必要としない再生医療の実現が期待されている。

核酸分子の送達システムとしては、ポリマーや脂質ではなく、細胞から分泌された脂質二重膜で形成される直径 40 nm～100 nm 程度の小胞であるエキソソームの利用が試みられている。

ナノ DDS の製造技術として、Nano Packaging という革新的な製造技術の開発が進められている。微細流路の流れの中で脂質ナノ粒子を連続的に形成する技術で、実用化されつつある。

［注目すべきプロジェクト］

米国は、過去 10 年間で National Nanotechnology Initiative、NIH and the American Recovery & Reinvestment Act 、国立がん研究所の Alliance for Nanotechnology in Cancer など様々な施策によりナノ DDS 研究に対する支援を行ってきた。国立がん研究所の Nanotechnology Characterization Laboratory では IND 申請（米国における治験）に必要な物性解析をサポートしており、300 近いナノ DDS の解析実績と National Institute of Standards and Technology との共同開発による解析技術により、ナノ DDS の物性解析で世界をリードしている。

欧州では、前述の ETPN により、遺伝子治療や標的化技術等の特定の技術テーマについての研究開発が推進されている。ETPN は産業界主導で設立・運営され、15 社の中小企業（主にベンチャー企業）が参画しており、産官学でネットワークを形成している。2014 年から 2020 年までの研究イノベーション計画である Horizon 2020 ではナノテクノロジーは重点領域の 1 つとされ、産業振興を目的にナノ DDS が推進されている。ナノ DDS などのナノメディシンについて、GMP 下での製造スケールアップ、Translation Hub ネットワークの確立、疾患別の重点化（がん、糖尿病、アルハイマー病）に対し、予算化が決定されている。

日本では、新薬の開発におけるナノ DDS の重要性が再認識され、2014 年度より、文部科学省の「革新的バイオ医薬品創出基盤開発事業」、「次世代がん研究シーズ戦略的育成プログラム（2014 年より DDS 技術が追加）」、厚生労働省の「革新的がん医療実用化研究事業」など新技術の企業への導入による事業化を視野に入れた様々なプロジェクトが立ち上がっている。

また、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文部科学省/JST の「革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）」では、ナノ DDS に関する課題として「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（COINS）」が採択されている。さらに、文部科学省の「地域資源等を活用した産学連携による国際科学イノベーション拠点整備事業」の支援を受けて、川崎市にナノ DDS のオールジャパン型のオープンイノベーションを推進する「ナノ医療イノベーションセンター」が建設された。本センターは、アカデミアと企業がイノベーションに向けた共同研究を行う場を提供し、新たなベンチャーの起業、制度改革や規制緩和に関する提言などを通じて、ナノ DDS を日本の新産業・輸出産業して成長させることを目的としている。

ナノ DDS などのナノメディシンの評価手法、ガイドラインの整備に向け、厚生労働省の革新的医薬品・医療機器・再生医療製品実用化促進事業において「ナノテクノロジーを基盤とした革新的医薬品に関する評価方法」が 2012 年度に開始されている。

（５）キーワード

DDS、ナノ粒子、高分子ミセル、リポソーム、Nano Packaging、がん、EPR 効果、細胞内動態制御、能動的標的化、バイオ医薬、核酸医薬、再生医療、ワクチン

（６）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	◎	→	・高分子ミセル、リポソーム、乳酸・グリコール酸共重合体等を用いた独創性の高いナノ粒子に関する研究が発展している。ナノDDSの開発において材料は極めて重要であり、この点において日本は高い優位性を有している。核酸医薬やイメージングのためのDDS、物理エネルギーを利用したDDSなどの研究開発も進行している。 ・EPR（Enhanced permeation and retention）効果は、日本の研究者によって発見され、受動的標的化の基本原理となっている。
	応用研究・開発	◎	↗	・新薬の開発におけるDDSの重要性が再認識され、2014年度より新技術の企業への導入による事業化を視野に入れた様々なプロジェクトが施行されており、その成果が期待される。 ・高分子ミセル型のナノDDSの規制方針に関して、2013年に厚生労働省／欧州医薬品庁(EMA)による共同リフレクションペーパーが日本主導で作成・公表されており、当該製剤の国際的優位性を表している。
	産業化	○	↗	・抗がん剤のパクリタキセルやシスプラチンを内包した高分子ミセルの治験第3相試験が進んでおり、数年以内の実用化が期待される。 ・ベンチャー企業の育成が大きな課題である。
米国	基礎研究	◎	↗	・大学・公的機関における研究レベルは非常に高く、世界をリードしている。 ・National Cancer Institute（NCI）によるナノテクアライアンスでは、標的発見研究の手法開発、分子イメージング・早期発見、予防とコントロール、in vivoイメージング、多機能治療薬、効果判定指標の6分野を分野横断的に発展させることを目標としている。この他にも、多くのナノテク融合研究拠点が設立され、ナノDDS研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	・抗体-薬剤コンジュゲート（ADC）が主流となりつつあり、約30品目が臨床試験中である。多くのナノDDS医薬品が上市、臨床開発へと進んでいる。 ・日本と比較して、核酸やタンパク質に関する特許が多く、日本では研究機関が出願人であるのに対して、米国では出願人が大手製薬企業である。対象としている疾患も、がん、循環器疾患のみならず、感染症、中枢系疾患、代謝性疾患など幅広い。 ・NCIの中に、物性解析を無償で行うNanotechnology Characterization Laboratoryを設置し、治験を促進すると同時に、NISTと共同してナノDDSに特化した解析技術・ノウハウを蓄積している。 ・ナノDDSの治験は米国が最も多く、FDAが世界の規制当局の中で最も情報を蓄積している。
	産業化	◎	↗	・多様なナノDDS製剤が実用化に向けて開発が進められている。核酸医薬やタンパク質等のバイオ医薬品に関してもベンチャー企業が多く設立され、有望な企業に対してはメガファーマが支援を行い、実用化を加速する仕組みが出来ている。
欧州	基礎研究	◎	→	・欧州は、高分子－薬剤コンジュゲート、リポソーム、ナノ粒子など、第一世代のDDSの多くを世界に先駆けて開発してきた。近年も、核酸医薬のデリバリーシステムの研究開発などにおいて、世界をリードしている。 ・6大学連携によるナノメディシンに特化した博士課程教育プログラムNanoFarにより若手研究者の育成を図っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・欧州科学財団（ESF）や欧州薬品庁（EMA）でナノメディシンは主要課題として取り上げられており、尾一貫したアプローチによってナノDDSの研究開発を進め、競争力を強化している。 ・スイスのThe Swiss Nanoscience Institute等のナノテク融合研究拠点やドイツのNanosystems Initiative Munich等のリサーチクラスターが設立され、活発なDDS研究が行われている。 ・EMAにより2010年以降、毎年ナノ医療の規制方針に関する文書が策定されている。

	産業化	◎	↗	・欧州の製薬企業は、メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有しており、また。新薬の治験体制も整っていることから、今後も高い水準を維持するものと考えられる。 ・ポリエチレングリコール化インターフェロン（Pegasys）がロッシュ社より開発されている。 ・EMAはナノDDSについて11品目の承認審査、50以上の開発相談を実施している。
中国	基礎研究	◎	↗	・中国では、中国科学院と中国教育省との共同出資で、National Center for Nanoscience and Technology（NCNST）を北京大学と清華大学の構内に2003年に設立し、ナノテクノロジーおよびナノバイオテクノロジー研究を推進している。特に、NCNSTでは、ナノマテリアル、ナノデバイス、ナノバイオロジーに重点を置き、中でもナノDDSは高い関心を集めている。 ・ナノDDS領域の主要雑誌であるJournal of Controlled Releaseにおいて、引用回数でみても米国とトップを争うレベルに到達している。
	応用研究・開発	○	↗	・科学技術人材の呼び戻し政策の継続的実施により、優秀な留学生が多数帰国しているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め応用研究と技術開発の水準が急速に上昇している。
	産業化	△	↗	・医薬品開発においては、臨床研究などの法的拘束が少なく、今後DDSの臨床治験が進む可能性が高い。また、中国ではバイオベンチャーが数多く設立されており、DDS関連においても今後ベンチャー企業が増えていくものと予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	・日本のCOEプロジェクトにあたるNew University for Regional Innovation(NURI)に採択されている延世大学、亜州大学、漢陽大学等が、超高感度ナノバイオセンサーによる癌と梗塞の早期診断、多機能型ナノハイブリッド材料によるナノ治療、生体内外での診断とバイオイメージング等の研究を精力的に行っている。
	応用研究・開発	○	↗	・ナノバイオに関しては、国家レベルでのインフラ整備が進められており、Seoul National UniversityやYonsei Universityなどの重点的な投資により、臨床まで見据えたナノDDSの研究プロジェクトが進められており、技術開発水準も上昇している。
	産業化	○	↗	・サムヤン ジェネックス社は、高分子ナノ粒子を利用した抗がん剤やsiRNAのナノDDS製剤の研究および臨床治験を進めており、産業技術力は着実に上昇している。サムヤン ジェネックス社のパクリタキセルを内包した高分子ミセル製剤（Genexol-PM）を国内で上市している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) 菊地寛. DDS 医薬品の開発状況と将来展望 医薬品医療機器レギュラトリーサイエンス.2013, 44 (8), p.602-611.
2) 特許庁. 平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書：ドラッグデリバリーシステム(DDS).2011.
3) 松村保広. 高分子ミセル医薬の臨床開発. Medical Science Digest. 2014, 40(2), p.61-64.
4) 加藤くみ子ほか. ブロック共重合体ミセル医薬品の評価. 医薬品医療機器レギュラトリーサイエンス. 2013, 44 (12), p.968-975.

5) 厚生労働省医薬食品局審査管理課長. ブロック共重合体ミセル医薬品の開発に関する厚生労働省／欧州医薬品庁の共同リフレクションペーパーの公表等について. 2014, 薬食審査発 0110 第 1 号.
http://www.pmda.go.jp/kijunsakusei/file/tsuchi/20140110-1.pdf
6) 原島秀吉, 秋田英万, 加藤くみ子, 石井武彦, 松村保弘, 片岡一則. ナノテクノロジーを基盤とした医薬品のレギュラトリーサイエンス研究への取り組み. 2014, Drug Delivery System, 29(3), p.217-225.
7) 櫻木誠, 安西智宏, 木村廣道, 原島秀吉. ナノメディシン規制整備と推進体制をグローバルに俯瞰する. 2013, 薬剤学, 73(5), p.312-320.
8) 革新的医薬品・医療機器・再生医療製品実用化促進事業について.
http://www.pmda.go.jp/guide/kagakuiinkai/kagakuiinkai/h240618gijishidai/file/shiryo9.pdf
9) Matsumura, Y.; Maeda, H. A new concept for macromolecular therapeutics in cancer chemotherapy: mechanism of tumoritropic accumulation of proteins and the antitumor agent Smancs. Cancer Res. 1986, 46, p.6387-6392.
10) Mullard, A. Maturing antibody-drug conjugate pipeline hits 30. Nature Rev. Drug Discov. 2013, 12, p.329-332.
11) Duncan R. The dawning era of polymer therapeutics. Nature Rev. Drug Discov. 2003, 2, p.347-360.
12) Davis, M. E.; Chen, Z.; Shin, D. M. Nanoparticle therapeutics: an emerging treatment modality for cancer. Nature Rev. Drug Discov. 2008, 7, p.771-782.
13) Editorial. Join the dialogue. Nature Nanotech. 2012, 7, p.545.
14) National Economic Council; Council of Economic Advisers; Office of Science and Technology Policy. A Strategy for American Innovation: Securing Our Economic Growth and Prosperity. 2011.
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/uploads/InnovationStrategy.pdf
15) The National Cancer Institute. “NCI Alliance for Nanotechnology.”
http://nano.cancer.gov/
16) Cruz, Celia N. et al. CDER Risk Assessment Exercise to Evaluate Potential Risks from the Use of Nanomaterials in Drug Products. The AAPS Journal. 2013, 15(3), p.623-628
17) Ehmann, F. Next-generation nanomedicines and nanosimilars: EU regulators’ initiatives relating to the development and evaluation of nanomedicines. Nanomedicine. 2013, 8(5), p.849–856
18) The National Cancer Instituite. “Nanotechnology Characterization Lab”.
http://ncl.cancer.gov/
19) “FDA issues guidance to support the responsible development of nanotechnology products.”
http://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm402499.htm
20) Nanomedicine Alliance
http://www.nanomedicines-alliance.org/

21）European Technology Platform Nanomedicine
http://www.etp-nanomedicin
22）Haubenreisser, Saine. “EMA perspective on the development of Nanomedicines.” PQRI Nanotechnology Workshop. Washington DC, 2014-01-14/15.
http://www.pqri.org/workshops/Nanomaterials2013/Sabine.Haubenriesser.Presentation.pdf

３．２．４　バイオ計測・診断デバイス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

ナノ・マイクロ構造を活用したデバイスによる生体由来物質の高感度検出・分析技術の確立と、ウイルス・病原菌・バイオマーカー検出などへの応用による診断デバイスの創出を目的とした研究開発領域である。微量サンプルから特定の物質や細胞を迅速かつ簡便に抽出・分離する技術、センシングデバイスの高速化・高感度化技術、デバイス・システムの高集積化・アレイ化技術の確立などを目指した研究開発が進められている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

人口の高齢化とともに先進国における医療費の増加が各国の財政を圧迫しており、医療費削減につながる方策の創出は、緊急な課題となっている。その解決策の１つが、検査・診断することで病気を未然に防ぐ予防医療であり、診断デバイスは、予防医療を実現するキーデバイスに位置づけられている。不振の続く半導体業界は、これまで巨額の投資で築いてきたインフラを活用しながらも、従来の電子デバイスに変わる新たなデバイスを模索しており、診断デバイスを１つの成長戦略に据えつつある。このような社会的要請が合致した結果、エボラ出血熱やデング熱などのウイルス感染を防止するデバイスの開発要請と相まって、世界中で、診断デバイスの研究開発が行われている。特に、従来の診断デバイスの検出感度と検出速度を超え、かつ低コストのデバイスの開発が、ナノ構造を用いたナノ計測を基盤技術として展開されている。

医療技術を支える基礎医学や生命科学の分野では、同じゲノムを有し、形態学的に同一に見える細胞集団であっても、分子レベルは個々の細胞間で大きな差異があることが明らかになり、1 細胞レベルにおいてその状態を分子レベルで解明する 1 細胞解析デバイスが求められている。例えば、がん細胞の集団の中には自己複製能と多分化能を有するがん幹細胞が存在しており、がん組織の増殖や転移をコントロールしていると言われている。がん治療においては、このがん幹細胞を死滅させることで治癒・再発防止することが可能となると考えられており、多数のがん細胞の中からがん幹細胞を迅速かつ簡便に見つけ出す分析技術が期待されている。また、再生医療や細胞医療の分野においては、分化誘導をかけた体性幹細胞が全て意図通りの細胞に分化するわけではないため、高効率の分化誘導法が必要とされており、この分化における差異が何に依存しているのか個々の細胞レベルで分析できる技術が必要になっている。このような技術的要請に対し、細胞と同程度の空間を有するマイクロデバイスは、並列処理による迅速化や高感度化が可能といった特徴を生かすことにより、1 細胞レベルで細胞内に存在する DNA やマーカータンパク質といった分子を同定・定量が可能なものとして研究開発が進められている。

［これまでの取組み］

相補的塩基対形成を利用した DNA チップは広く実用化され、遺伝子発現解析を行う標準的なデバイスとなっており、一般消費者向け遺伝子解析サービスを支えるデバイスへと発展している。DNA チップの実用化は、新たな応用分野を切り拓く大きなドライビ

ングフォースとなり、薬剤効果の予測・診断やアレルギー診断を目的とした医療分野への応用や、薬の毒性や薬理を評価する創薬分野へと応用が広がっている。さらに、食品の機能と安全性を評価する食品分野など当初予測していなかった分野へと DNA チップは普及しつつある。また、DNA チップの発展形として、タンパク質や糖鎖の機能解析を目的としたプロテインチップや糖鎖チップなどが開発されており、DNA チップ型の診断デバイスは出揃った感がある。今後は、検出プローブの最適化や検出チップの集積化が課題となる。

一方、DNA や RNA などの 1 生体分子をターゲットにした診断デバイスとナノ計測法の熾烈な開発競争が、半導体メーカーが所在する米国、日本、台湾、韓国、シンガポールを中心に行われている。特に、2014 年までの 10 年間に渡って NIH(米国立衛生研究所)が主導した 1000 ドルゲノムプロジェクトは、大学とベンチャー企業における 1 分子 DNA シーケンサーの研究開発を強力に後押し、1 分子検出を原理に持つ第 3 世代 DNA シーケンサーの実用化を実現した。さらに、この数年間の間に、1 分子を検出するナノポア型の第 4 世代 DNA シーケンサーの動作原理が実証され、1 分子解析技術を基盤とする診断デバイスの研究開発が加速されている。

半導体製造技術を利用してチップ上に作製した微小な流路や構造体により化学・生化学分析を行うシステムとして 1990 年に提唱されたμTAS（micro Total Analysis Systems）や Lab on a Chip と呼ばれる概念は、2000 年代に入って要素技術が確立されてくると、急速に実用化が進められ、市販装置として供給されるようになり、基礎医学や生命科学の発展に大きく寄与してきた。1 細胞解析に関しては、米国での研究成果をもとに起業された Fluidigm 社が、全自動 1 細胞単離・核酸調製機を上市するなど、専門外の研究者でも扱える装置の市販が始まっている。

マイクロデバイスを用いた 1 細胞解析技術は、例えばがん細胞集団中に含まれるがん幹細胞の診断や、血液 10 mL 中に数個～数十個しか存在しない血中循環がん細胞（Circulating Tumor Cell: CTC）の解析などに応用することが想定されるが、細胞群から計測対象細胞を 1 細胞レベルで分離・捕捉する過程は従来のセルソーターを用いる必要があったり、分離・捕捉後も並列処理できる細胞数が数十個であったりしたことから、必要な前処理行程を全て統合して、細胞集団に対して網羅的に 1 細胞解析を行うためのデバイス開発競争が世界中で広げられている。

世界における 1 細胞解析デバイスの開発状況を見ると、欧米、特に米国が牽引役となり、日本や韓国、台湾、シンガポール、中国といった東アジア諸国における米国からの帰国研究者が追随する形となっている。米国が主導的な立場となっている理由として、医学・生物学研究者とエンジニア、バイオ・メディカルインフォマティシャンが分野横断的に協調できる体制が整っていること、デバイス研究のような製品志向の研究を実用化しようとする起業家の存在、技術移転体制の整備体制、さらには医療産業ビジネスの専門家や医療機器の承認に携わる専門家が研究開発の初期から連携することで、早い段階から製品化を睨んだ研究開発体制が整っていることが挙げられる。

［今後必要となる取組み］

2001 年から世界中で本格化したナノテクノロジーの研究開発は、微細加工技術を発展

させ、1 分子を計測するナノ計測法と、バイオ計測・診断デバイスの要素技術となる前処理デバイスと検出デバイスの開発を先導してきた。この 10 年間で要素技術は大きな進展をみたが、細胞の分離・分取といった試料前処理工程のデバイス化への取り組みは十分とはいえず、臨床現場などで使用可能なレベルに完成度を上げていく必要がある。

今後は、Sample-in, Answer-out 型のデバイス実用化に向けて要素技術の集積化研究が本格化すると予測される。Sample-in, Answer-out 型デバイスでは、ミリメートルオーダーの前処理デバイスとナノメートルオーダーの検出デバイスを集積化しなければならないため、工学的に大きなチャレンジとなる。特に、大きさに 10^6 にも及ぶギャップ（メガギャップ）があるデバイス構造の間を連続的に接続し、その間で生体分子を輸送する手段は未解決な課題として残っている。この課題の解決には、実際の集積デバイス構造を対象とした流体力学、電磁気学、イオン輸送、および分子動力学を取り入れたマルチフィジックスの研究が必須となり、これまで以上に学際的研究の深化が求められる。

1 分子解析技術を基盤とする集積診断デバイスの実用化には、高精度、高スループットに加え、超微量検出が求められる。特に、1 細胞を 1 分子レベルで解析するデバイスは、究極のバイオ計測・診断デバイスと考えられているため、今後、この分野の研究開発が加速されると予測される。1 分子を対象とするデバイスでは、高い精度を得るために、デバイスから出力される大量データに基づく解析が必要となるため、解析法の研究開発が必要となる。

生体機能に近いヒト組織・臓器モデルの開発が、疾患研究や創薬において重要である。バイオマテリアルやマイクロフルイディクス技術、iPS 細胞技術を含む細胞組織工学の進展を統合し、生体組織・臓器の機能を模倣した新しい三次元培養モデル（Organ-on-a-Chip、臓器チップ）の開発に注力する必要がある。治療法や医薬品の開発では動物モデルを利用して多くの検討が行われてきているが、最近では動物モデルの使用が制限される場合があり、臓器チップの開発が喫緊の課題となっている。臓器チップの開発により、これまで検討が不可能であった特殊な環境における細胞間の反応を組み合わせることができ、病態解析に非常に有用なシステムになると考えられ、将来的には、目的の作用についての全身応答が解析可能な「Body-on-a-Chip」の基盤になり得る。現在検討されている臓器チップのほとんどが、肺、肝、腸などの消化呼吸器系を対象としており、眼、鼻、耳などの特殊感覚器を対象としたモデルはほとんどない。このような特殊感覚器の疾患は患者の QOL を大きく低下させるため、臓器チップの開発対象を広げていくことも必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

わが国のナノ計測・バイオ診断デバイスの要素技術開発と基礎研究は、世界の中で高い研究レベルを維持しており、世界の研究を牽引している。これは、文部科学省の下で行われたナノテクノロジーネットワークと、その後継にあたるナノテクノロジープラットフォームで整備された微細加工共用施設・装置群が大きな役割を果たし、要素デバイスの研究開発を加速させてきたが、前述のメガギャップを持つ集積デバイス（以下、メガギャップデバイスという）の研究開発を実証する共用施設としては十分ではない。米国の NNIN、ベルギーの imec、シンガポールの IME で設置された微細加工共用施設で

は、集積デバイスのプロトタイプ開発を行える装置群が整備されているため、メガギャップデバイスの典型である MEMS/NEMS とマイクロ流路の集積デバイスや、臓器模倣デバイスの開発を容易に行うことが可能である。また、これらの施設が、大学の基礎研究と応用研究をスムーズに橋渡す役割を担っており、バイオ診断デバイスを開発するベンチャー企業育成の一翼を担っている。今後、世界をリードする我が国の科学技術の応用化・実用化研究を促進し、社会に変革をもたらす診断デバイスを開発するためには、試作量産を可能にする半導体製造ラインと先端微細加工装置が混在する試作量産可能なファウンダリが必須である。

バイオ計測・診断デバイスの応用化・実用化は、集積デバイスの構造・機能の最適化が必須であり、ある程度の数の均一なデバイスが、早いターンで製造・評価されてはじめて、メガギャップデバイスにおける科学技術の発展が可能となる。ビッグデータは耳慣れて久しい言葉となったが、バイオ診断デバイスの分野において情報科学との融合が未だなされていないのは、均一かつ大量のデバイスが得られないため、大量のデータを産出できないことにある。このように、試作量産可能なファウンダリは、ナノテクノロジーと情報科学を融合させるためにも必須である。

基礎研究から応用・実用化を促進させる観点からは、試作量産可能なファウンダリの設置とともに、ファウンダリ周辺にベンチャー企業育成を支援するベンチャーキャピタルとベンチャー企業の集積化も必要となる。これまでの産学連携は、企業ニーズに応える形の共同研究であったが、企業ニーズが必ずしも社会ニーズと一致している訳でない。社会ニーズは、消費者や顧客と直接接してはじめて得られ、応用・実用化の明確なターゲットを与える。このため、単なる科学技術の集積化を目指すファンダリではなく、基礎研究から実用化までを一貫して行える具体的なパスを示せるインフラが必要である。

1 細胞解析デバイスのような高感度な計測系と並列処理（網羅的解析）が求められる製品は、前処理から測定に至るまでに使用する試薬や工程、さらには得られた情報の取扱・処理過程を標準化しなければ、応用・普及させることは望めない。この標準化を通して解析デバイスとしてプラットフォーム化していくことにより、多分野に応用可能なデバイスとして普及し、新しい市場を創出・拡大することが可能となる。

臓器チップの研究開発には、細胞組織工学、ナノ・マイクロデバイス工学などの密接な連携が必要である。また、学術のみならず産業界との連携の必要性も高い。共同研究の枠を超えた連携研究を支援し、マネジメントするシステムや研究拠点が必要である。さらに、創薬や診断に使用可能な臓器チップには、患者の細胞を搭載することが必要不可欠であり、患者から採取した細胞を簡便に使える環境を整える必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

現在まで、ミリからナノまでのメガギャップを連続的につなぐバイオナノデバイスの開発例はないが、ミリからサブミクロン領域で効率的に物質を輸送している生体は、今後、参考にすべきモデルと考えられる。最近では、連続的なスケールでの物質輸送に焦点が当てられつつあり、肝臓、小腸、肺などの臓器機能を１チップ上で実現するデバイスの開発が行われ始めている。一方、データのバックグラウンドにある現象の理解が深

まり、かつ大量のデータが得られている 1 分子計測結果を対象に、経験則を使わないで情報科学で解析するデータ駆動型解析法の研究が始まっている。

1 分子の DNA からそのシーケンスを読み取る方法として、α-Hemolysin や MspA といった膜タンパク質とイオン電流計測を組み合わせたナノポアシーケンサーがオックスフォードナノポア社により実用化されつつあるが、膜タンパク質を用いていることもあり、産業製品としての耐久性や信頼性には疑問が残ったままである。この問題を解決するために、日本のベンチャー企業、クオンタムバイオシステムズでは半導体加工技術を用いてシリコン基板上にナノポアを作製し、トンネル電流を計測する方式で製品化を目指して開発しており、前述の 1 細胞前処理デバイスなどと統合・集積化が可能となれば、真の 1 分子シーケンサーが登場すると期待される。

生体反応や細胞応答の一部をチップ上で再現する研究はこれまでにも単発的に行われてきたが、D.E. Ingber （Harvard University）のグループが、「Lung-on-a-Chip」と冠した三次元培養モデルを報告して以来、マイクロデバイス上に組織臓器を集積する研究が米国を中心に急速に進展している。

［注目すべきプロジェクト］

米国 NIH が 2014 年から Single Cell Analysis プロジェクトを立ち上げ、細胞の不均一さがもたらす生物学的な重要性を解析し、理解する 1 細胞解析技術の開発を進めている。特に、in situ における個々の細胞の経時変化を長期間追跡できる計測技術の開発にフォーカスしている。本プロジェクトは、1 細胞解析技術が疾病の発見と治療へと応用される出口を見据えているものの、基礎生物学の原理解明に重きを置いている。

米国 DARPA は、2014 年からミリメートルからナノメートルの 10^6 の広範囲に及ぶ領域を Assembly Gap と設定し、ナノスケールの要素デバイスや要素構造を集積させるプロセス開発に特化したプロジェクトを開始している。

国内では、理研の生命システム研究センター（QBiC）の設立や、文部科学省の「革新的細胞解析研究プログラム（セルイノベーション）」、JST 戦略的創造研究推進事業の「統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤」など、1 細胞中に含まれる核酸、ペプチド、タンパク質などの網羅的解析技術の研究開発にフォーカスしたプロジェクトが進行中である。

臓器チップに関しては、米国が大型プロジェクトを推進している。NIH は 2012 年から 5 年間で 70 百万ドル規模の“Tissue Chip for Drug Screening program”を、DARPA も同規模で“Microphysiological Systems program”を運営している。

（5）キーワード

1 分子、1 細胞、マイクロ・ナノ流路、ナノポア、DNA シーケンサー、Organ on a Chip、臓器チップ

（６）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	◎	→	・高い研究レベルを維持している。本分野に関連する国際会議μTASにおける採択件数は依然トップレベルにある。ただし、解析手法が非常に特殊であったり、デバイス化を優先的に考慮していなかったりするため、応用展開して医療現場や産業界へ普及させようとする動きが鈍く、基礎研究レベルに留まっている。 ・ナノテクノロジープラットフォームの浸透により、デバイス開発は広がりを見せているが、微細加工設備群を持つ特定の大学・国研に研究が集中しているため、研究テーマの広がりに課題がある。
	応用研究・開発	○	↗	・Nano TechやJASISなどのビジネス展示会で、国内の多くのバイオ診断機器の発表がなされており、企業における応用研究は成長している。国内でDNAシーケンサーのベンチャー企業が立ち上がり、ベンチャー支援の国策もあって、バイオベンチャー起業の機運が高まっている。 ・医療現場での利用を想定した応用研究・開発が着実に続けられている。ただ、細胞レベルでの解析デバイスに関しては、まだ大きな流れになっていない。
	産業化	△	→	・成長産業の１つとしてバイオ診断デバイスの産業化が進められているが、ターゲットとなる市場が特定されておらず、新規デバイスの市場投入は停滞している。また、多くのバイオ計測・診断デバイスは、半導体製造ラインで作られることが想定されているものの、半導体メーカーの参入が遅れていることが産業化の停滞の原因になっている。 ・ベンチャー企業により、核酸やタンパク質の解析デバイスの実用化は既に行われているが、1細胞そのものを対象としたデバイスの実用化にはもう少し時間がかかる状況である。
米国	基礎研究	◎	→	・高い研究レベルを維持し、集積デバイスの開発が進められている。Stanford、MIT、Princeton、Cornel、Caltech、UCBなどマイクロ・ナノデバイスに必要で共用可能な大規模加工設備を有する大学が多数あり、活発な研究が推進されている。 ・近年方法論の開発や現象解明などの基礎研究から応用研究にシフトしており、基礎研究は横ばいか減少傾向である。
	応用研究・開発	◎	→	・ベンチャー企業による活発な研究開発が継続されている。特に、米国立衛生研究所の1000ドルゲノムプロジェクトが、ベンチャー企業における次々世代DNAシーケンサーの応用研究を後押ししている。また、有力大学周辺に立地するベンチャーキャピタルが、大学からベンチャー企業への技術移転を促進しており、応用研究へのスムーズな移行を実現している。 ・マイクロデバイス上で組織や臓器再構成を試みなどでユニークかつ先駆的な報告が多くなされている。臨床医が研究に参加するなど、現場でのニーズを汲み取る研究体制が出来上がっている。
	産業化	◎	↗	・多くのベンチャー企業がマイクロ・ナノ流体デバイスの実用化に取り組んでおりその数も増えていることから、産業応用開発は非常に活発である。 ・Fluidigm社の装置をはじめ、すでに世界中で市販されるに至った装置もあるなど、積極的に製品化が進められている。次世代シーケンサーなどとの統合により、1細胞解析デバイスとしてのひとつの最終形に結びつきつつある。
欧州	基礎研究	○	→	・がん細胞の1チップ解析を目的としたMEMS/NEMSとセンサデバイスの開発と、それらの集積デバイスの基礎研究は、高い研究レベルを維持している。がん細胞検出デバイスの開発が欧州連合のプロジェクトとして進行しているため、細胞にフォーカスした流路デバイスの開発が盛んである。 ・スウェーデン、スイス、オランダ、ドイツを中心として、活発な基礎研究が行われているが、国単位で見ると日本や米国に比べてそのレベルはそれほど高くない。

欧州	応用研究・開発	○	→	・ベルギーimecを中心に、エレクトロニクス・フォトニクスを用いたバイオ診断デバイスの応用研究が行われている。微細加工設備群が特定の地域に集約されているため、開発される診断デバイスの広がりに課題がある。 ・全欧・各国レベルで中小・ベンチャー起業を巻き込んだ技術移転のための施策が多く施されている。 ・医療分野で非常に高い技術力を有するスウェーデンを中心として、血中循環癌細胞（CTC）などの細胞分析や血液診断デバイスなど医工連携による医療分野への技術開発が活発に行われている。
	産業化	△	↗	・新規なバイオ診断デバイスの市場投入が大手企業により行われておらず、ベンチャー企業のM&Aに留まっている。英国ベンチャー企業Oxford Nanopore Technolgiesは、ナノポアシーケンサーの早期利用プログラムを開始している。 ・スウェーデンやオランダなど大学からスピンオフしたベンチャー企業がいくつかあり、システム実用化に成功している例もある。また、マイクロ化学チップの加工受託、流体制御のためのポンプなどの周辺機器など、要素技術をターゲットとして製造・販売するベンチャー企業がドイツやフランスにおいて増えており（Microfludic Chipshop社など）、欧州全体としてベンチャー企業が増えているが、資金調達や製品販売ルートなどの整備が不十分なためビジネスとしての展開はそれほど速くない。
中国	基礎研究	△	↗	・国家プロジェクトとして、北京大学、中国科学技術大学、清華大学で、重点的にナノテクノロジーの研究が進められている。 ・海外留学から帰国する若手研究者が、基礎研究レベル向上と世界レベルのキャッチアップを行っている。微細加工設備群の整備は、まだ十分ではないため、バイオ計測・診断デバイスの基礎研究は発展途上にある。
	応用研究・開発	△	→	・医療診断（Point-of-care）や細胞診断に加え、ドラッグスクリーニングなどへの広がりがみられるものの、大企業やベンチャー企業における応用研究は、あまり進んでいない。 ・他国と比べて、臨床サンプルを用いた研究を行いやすい環境にあるため、中国内外の企業による応用研究は今後、増加すると考えられる。 ・国内の食品問題に対する迅速分析法の高いニーズがあり、マイクロデバイスを用いた分析法に対する期待が高いが、あまり進んでいない。
	産業化	△	→	・バイオ計測・診断デバイスの産業化は、エレクトロニクス・フォトニクスの両分野において進んでいない。既存の技術を用いてゲノムの受託解析を行う北京ゲノム研究所は、多数の国際プロジェクトに参加し、ユーザーの集約と遺伝子ビッグデータの蓄積を行っており、今後、急速に産業化が進むと予測される。 ・実用化している企業の数は増えていないが、マイクロ化学チップの製作・販売や周辺機器で実用化している企業がいくつかある。全体的には、システム開発よりも要素技術の産業化にとどまっている。
韓国	基礎研究	○	↗	・ソウル大学、延世大学、KAIST、POSTECHを中心に、微細加工技術を用いたバイオ計測・診断デバイスの開発が進められている。半導体インフラを活かして、MEMS/NEMSと流路デバイスの基礎研究に強みを持つ。 ・米国からの帰国研究者の増加とSumsongの支援などが相まって、微量の血液、尿をターゲットとしたバイオチップが大きく進展しており、この分野の有力誌（Lab on a Chipなど）に掲載される論文の多くを韓国勢が占めるような状況になっている。
	応用研究・開発	○	↗	・試作量産可能な国立ナノファブセンターの支援を受けて、ウエハレベルのデバイス試作が可能であり、基礎研究から応用研究の橋渡しが行われている。成長市場であるバイオデバイスを模索する半導体企業との共同により、応用研究が進むと考えられる。
	産業化	△	↗	・大企業を中心にバイオ計測・診断デバイスの産業化が進められている。 グルコースセンサーやコレステロールセンサー、DNAチップやreal time PCRチップが・ベンチャー企業を中心に製品化されている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）nano tech 2014 第 13 回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議. 東京, 2014-01-29/31.
2）JASIS 2014 （分析展 2014（第 52 回）/科学機器展 2014（第 37 回））. 千葉, 2014-09-03/05.
3）National Nanotechnology Infrastructure Network.
http://www.nnin.org/
4）National Human Genome Research Institute. Genome Technology Project.
http://www.genome.gov/10000368
5）Manyika, J. et al. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. McKinsey Global Institute, 2013.
http://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/dotcom/Insights%20and%20pubs/MGI/Research/Technology%20and%20Innovation/Disruptive%20technologies/MGI_Disruptive_technologies_Full_report_May2013.ashx
6）Innovation Conference & Expo. Nanotech Advanced Materials & Applications. Washington DC, 2014-06-15/18.
http://www.techconnectworld.com/Nanotech2014/
7）EuroNanoForum 2013. Dublin, 2013-06-18/20.
http://www.euronanoforum2013.eu/
8）MIRACLE AN FP7 EU funded R&D project.
http://www.miracle-fp7.eu/
9）International Conference on Nanoscience and Technology, ChinaNANO 2013. Beijing, 2013-09-05/07.
http://www.chinanano.org/
10）Nano Korea 2014. Seoul, 2014-07-02/04.
11）The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2013). Freiburg, 2013-10-27/31.
http://www.microtas2013.org/
12）National Institute of Health. Single Cell Analysis.
http://commonfund.nih.gov/Singlecell/index
13）Taniguchi, Y. et al. Quantifying E. coli Proteome and Transcriptome with Single-Molecule Sensitivity in Single Cells. 2010, Science, 2329, p.533-538.
14）Kovarik M. L.; Allbritton N. L. Measuring enzyme activity in single cells. 2011, Trends in Biotechnology, 29, p.222-230
15）Wang Y. et al. Clonal evolution in breast cancer revealed by single nucleus genome sequencing. 2014, Nature, 512, p.155-160.
16）化学とマイクロ・ナノシステム学会第 29 回研究会. 東京, 2014-05-22/23.

３．２．５　イメージング

３．２．５．１　バイオイメージング

（１）研究開発領域の簡潔な説明

生体におけるタンパク質などの物質分布や細胞などの活動状況を可視化し、生命科学、医療、創薬において必要となる情報を提供することを目的とした研究開発領域である。可視化に必要とされる試薬、ハードウェア、画像取得・解析ソフトウェアなど広範囲の技術要素を有機的に統合することを目指した研究開発が進められている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

生命現象は、生体を構成するさまざまな分子が時空間的に制御された状態でその機能を発現することで維持されている。生命現象を分子やイオン、小分子化合物、タンパク質などの物質レベルで理解するには、これらの物質の細胞や組織での空間配置やその経時変化、物質間の相互作用などを、「生きた」状態で観察・解析する必要がある。

バイオイメージングは、光学関連技術と蛍光色素や蛍光タンパク質などのプローブ技術の発展により、生命現象をより高い時間・空間分解能で可視化できるようになってきており、基礎生命科学の進展のみならず、疾患メカニズムの解明、病気の診断や治療効果の確認など医学分野においても不可欠な領域となっている。

［これまでの取組み］

タンパク質や核酸、イオンなどのといった生体物質の動態や相互作用、濃度変化、機能変化などのバイオイメージングには、試料を蛍光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。プローブからのシグナルを検出し画像化するための光学技術において、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の一つであったが、1990 年代中頃から 2000 年代中頃にかけて、回折限界を超えた空間分解能を達成するための原理が提案され、また、実験的にもその有効性が証明された。2010 年頃から、40～100 nm の空間分解能を有する超解像顕微鏡が既に市販されている。STED (STimulated Emission Depletion)や PALM (PhotoActiavation Localization Microscopy)といった超解像計測法と、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 年度のノーベル化学賞の授賞対象となった。

超解像顕微鏡に適した光化学特性を有するプローブ分子の開発も日進月歩の勢いで進んでおり、細胞のみならず動物実験への応用も進んでいる。一方、分光分析法や高次高調波発生を利用することで試料をプローブ標識することなく特定の生体物質をイメージングする技術も進展してきている。

細胞や生体組織はダイナミックに変化しているため、その三次元構造の時間変化を観察することは重要である。これを実現する技術にも大きな進展が見られている。代表例がライトシート顕微鏡で、試料側面からシート状の光（もしくは、ガウス/ベッセルビームの走査）を照射して、対物レンズで観察する面のみに光照射を限定させて観察する顕微鏡である。光ダメージが少ないという特徴もあり、線虫やショウジョウバエなど小動物の発生過程における細胞の三次元動態を長時間追跡することが可能になった。

生命現象を統合的に理解するためには、個々の分子だけでなく、細胞レベル、組織レベルにイメージング対象のスケールを拡大する必要がある。また、空間的な広がりだけでなく、時間的にもスケールを拡大し、生体の動的変化を一定時間連続的にイメージングできるようにすることも必要である。試料の長時間計測において最も問題となる点は、蛍光プローブの褪色である。蛍光色素や蛍光タンパク質は容易に褪色をする。最近は量子ドットがプローブとして用いられるようになり、長時間観察が可能となってきた。

分子レベルでのバイオイメージング分野では、日米欧が熾烈な国際競争を行っている。日本は顕微鏡、カメラなどハードウェアについては高い国際競争力を有している。米国は顕微鏡の新規技術開発に優れ、臨床応用でも最先端の研究が多く行われている。欧州も顕微鏡の新規技術開発に優れ、とくに、超解像顕微鏡の新原理の大半はドイツで開発されている。中国、韓国は欧米から帰国した研究者により大学で基礎的な研究が開始されているが、研究水準のレベルアップにはまだ時間が必要な状況にある。韓国ではイメージング関連製品について、いくつかのベンチャー企業がユニークな開発を行っているものの、日米欧からかなりの遅れをとっている。

イメージング用プローブの開発は米国を中心に研究が進んでおり、特に量子ドットなどの半導体イメージング材料の分野では米国が先行している。日本は蛍光・化学発光プローブを精密な戦略で開発することを得意としている。ソフトウェア開発では欧米が先行している。バイオイメージングの応用では、動物実験による実証が米国では進んでいるが、日本、欧州はこの点で若干遅れをとっている。

［今後必要となる取組み］

・量子ドットプローブ

量子ドットプローブは蛍光褪色が起こりにくいという特徴をもつが、大きさが 10 nm 以上と蛍光色素などに比べて 10 倍以上大きい。量子ドットのコアの大きさ自体は nm オーダーであるが、毒性を抑えるためや化学修飾を容易にするためにコア周囲をコーティングする必要があり、サイズが大きくなる。標識対象への立体障害などの影響を小さくするには、コーティング層を薄くしてサイズを抑えた量子ドットが求められる。また、ここ数年 Nitrogen-Vacancy (N-V)ダイヤモンド（窒素欠陥ダイヤモンド）と呼ばれるダイヤモンドがプローブとして用いられるようになってきた。蛍光褪色が無いことから、新しい蛍光プローブとして注目されている。大きさや供給の問題があるため、今後の改良が求められる。

・補償光学を利用した光学顕微鏡

厚みのある試料の超解像イメージングでは収差の発生が問題となる。補償光学を適用することで、1 分子の輝点から得られる輝度値を高め、高開口数の対物レンズを用いた計測において試料深部における解像度を高めることができる。補償光学を利用するためには波面補正が必要であり、そのため時間分解能の低下等の問題があるが、CMOS を利用した高速撮像技術や多数分子の同時局在化を実現する画像処理法の開発により撮像速度の大幅な向上もみられており、今後の発展が期待される。

・無標識イメージング

蛍光を用いたバイオイメージングでは、蛍光色素やタンパク質などのプローブを、目的とする分子に特異的に標識することで、生命現象を観察することができる。しかし、蛍光標識という操作自体が侵襲的であり、場合によっては生理機能の阻害につながることもある。また、標識対象をあらかじめ決定しなければならない。従来の標識技術に頼るだけでなく、生体内の分子の働きを直接分析しつつ、その分布や動態を観察するという新たなアプローチ（無標識分析イメージング）を進展させる必要がある。

ラマン散乱分光を利用したラマン顕微鏡は、分子に光を当てた時のラマン散乱を検出する。ラマン散乱の波数は分子の振動モードに依存し、得られるスペクトルは、多くの分子に共通の基準振動モードから、分子固有の指紋領域に存在するスペクトルまで幅広い。各ピークの帰属はこれまでの知見で明らかにされていることから、無標識で分子を観察することができる。ラマン散乱はその極めて弱い強度のため、強力な励起光を要し、また十分な信号強度を得るために、検出時間を長くする必要があることから、時間分解能に問題があったが、ラインスキャン型のラマン散乱顕微鏡や高感度検出器によりこれら問題点は少しずつ改善されてきている。また、コヒーレントラマン散乱を利用した手法による撮像速度の向上も図られており、今後、ラマン顕微鏡は無標識イメージング技術として重要になると考えられる。

希薄ガスの測定に用いられている吸収増幅分光法のように光学系の工夫により実質的な光路長を長くできれば、細胞のような薄い試料でも吸光度測定が可能になり、ラマン顕微鏡とは異なるアプローチでイメージングを行うことができるものと期待される。光を吸収するが非蛍光性の色素タンパク質や薬剤などを生体内で効率よく検出できれば、イメージング対象は飛躍的に拡大する。また、薬剤スクリーンニングなど広範な応用が期待できる。これまでサブ細胞レベルで吸光度測定に基づくイメージングを可能にする顕微鏡はほとんど例がないが、今後重要になる技術であると考えられる。

・化学発光イメージング

化学発光を利用したイメージング（化学発光イメージング）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イメージング技術として期待される。蛍光観察と遜色ない観察が可能な非常に明るい化学発光プローブも開発されている。しかし、励起光を必要としないことから、構造化照明による励起光学系の工夫を用いた超解像顕微鏡を用いることはできない。FINCH（Fresnel Incoherent Correlation Holography）法のように照明光学系に依存しない超解像イメージング技術を開発・応用していく必要がある。化学発光プローブについても、発光強度をさらなる増加、生体深部の観察に向けた発光波長の近赤外化などの研究開発が必要である。

化学発光イメージングはオプトジェネティクスにおいても有用なツールとなる。オプトジェネティクスは光によるタンパク質機能の制御を介して生体の生理機能を操作することができる技術として、脳科学分野を中心に利用されている。光刺激により引き起こされた生理機能の変化、とくに細胞内の物質濃度変化は蛍光プローブを用いて計測されることが多いが、そのために外部から励起光を細胞に照射すると、それ自体が光刺激と

なって物質濃度を変化させてしまうことから、励起光を必要としない化学発光イメージングの必要性は高い。

・三次元イメージング

三次元イメージング技術については、ライトシート顕微鏡がその先駆的な役割を担っているが、空間分解能、時間分解能が共に低く、適用可能な試料には制限がある。生体は立体構造を持っており、その三次元空間内で分子は動的な分布をとることから、高速に分子レベルで三次元観察を可能とする技術は今後必須となると考えられる。例えば、培養細胞においても平面培養されたものと三次元的に培養されたものとでは、その機能や刺激への応答に大きな違いがあることが知られており、試料作製および観察の両面から三次元空間を考慮した技術を開発する必要がある。

・細胞内局所環境場の可視化

細胞内部は、細胞小器官を含むあらゆる空間が高度に区画化された複雑な構造をとっており、生体分子は不均一に分布している。細胞内の 1～数百ナノメートル程度の微小空間では特異的な環境（温度、圧力、親・疎水性など）が形成されていると考えられ、均一溶液中とは異なる状態にある。このような細胞内の局所的な環境場は生体分子の状態や動態に大きな影響を与えると考えられることから、環境場の物理的パラメータを可視化できるイメージング技術を開発する必要がある。

・ダイナミックレンジの拡大

生体機能を総合的に理解するためには、ナノ/ミクロとマクロを繋げる技術が必要となるが、このように大きなダイナミックレンジを取り扱うことができるイメージング機器はほとんどない。簡単な解決方法としては、ナノを得意とする機器とマクロを得意とする機器を単純に組み合わせ、各測定結果をリンクさせる方法が考えられる。しかし、通常それらの機器が測定する物理量は異なるものであるため、それぞれの機器の測定レンジを大幅に向上するというアプローチの方が測定結果の理解をより助け、ブレークスルーにつながる。

（３）科学技術的・政策的課題

バイオイメージングで取得される画像データは膨大であり、今後、三次元・高速イメージング技術が進歩すると、その量はさらにふくれあがる。現状でも個々の研究者が必要とする以上の情報量が画像データに含まれている。それを、他の研究者と共有し、それぞれの研究者が個別の観点から解析出来るようにすることで、取得したデータをより有効に利用できる。また、異なる手法により得られたデータを共有し組み合わせることにより、さらに高度な解釈を得ることも可能になる。このためには、大きな画像データの通信のための強力なインフラ、また画像データ形式、および画像を計測する機器の標準化が必要となる。インフラ、標準化に関連しては、取得されるデータをより有効に活用するために、データ形式の標準化と、データ共有のためのインフラの整備が必要となる。

バイオイメージングの領域では、装置開発、プローブ開発、バイオ応用の 3 つをバランスよく調和させなければ、実用につながる技術の開発し、普及させることはできない。生物学、物理学、化学、情報科学、計算科学、数理科学、計測分析機器エンジニアリングといった様々な分野の研究者が一堂に会し、議論し、研究開発を進めていくことが求められる。特に、近年のバイオイメージングにおいては、前述のように膨大な量のデータを効率良く扱うことが求められている。したがって、情報系の研究者や企業関係者との連携が重要であるが、現在の大学・研究機関では、一部の志ある研究者間以外ではそもそも接点を持つことすら難しい。産官学連携により、これら異分野融合を進めていく必要がある。また、わが国では、装置開発を行うことができる若手の人材が不足しており、人材の育成・確保が急務である。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

・ベッセルビーム顕微鏡

ライトシート顕微鏡のように試料を側方から照明するが、照明パターンをベッセルビームの走査により構造化することで空間分解能を高めている。現在のところ 200 枚の画像スタックからなる三次元像を、1 秒の時間分解能で、かつ約 0.3 μm の空間分解能（三次元の全ての方向で同じ）で得た結果が報告されている。

・レンズレスイメージング

新しい顕微イメージングの原理として、レンズを用いない手法がいくつか提案されている。ひとつはホログラフィックな手法で、イメージセンサ上に細胞等の試料を配置し、上方から光を照射し、試料からの透過光と回折光との干渉縞を記録する。試料の画像は、記録された回折パターンから計算により求められる。レンズや鏡筒が必要無いため、非常に小型ながらも広い視野を確保できる。レンズの代わりに光ファイバーや散乱物体を利用する手法もいくつか提案されている。これらの手法では、光ファイバーや散乱物体中での光の波面の変化を計測しておき、これらを透過した後の光が集光されるように入射光の波面を事前に調整しておく。いずれも結像にレンズを用いないため、顕微鏡装置の小型化が可能になり、形態、使用環境にも大きな自由度を与えると期待されることから、バイオイメージングにパラダイムシフトをもたらす可能性がある。

・メゾレンズ

高空間分解能、低倍率の対物レンズであるメゾレンズが開発されている。波長以下の空間分解能を有しながらも、生体組織の広い範囲を同時に観察することが可能であり、細胞内の微細構造や分子動態が、よりマクロな生体機能にどのように反映されているか可視化できると期待されている。

・参照光を必要としないホログラフィー法

一般的に、蛍光観察等で三次元イメージングを行う場合、試料もしくは対物レンズを Z 軸にそってスキャンする必要があり、時間分解能を大きく損なう要員の一つとなって

いる。スキャンレスで一度に 3 次元像を取得する方法として、特殊な回折格子パターンによる 3 次元像撮像法や、参照光を必要としない新しいホログラフィー法である FINCH（Fresnel Incoherent Correlation Holography）などが挙げられる。これら手法の認知度は未だ低いが、今後注目が集まる技術と考えられる。

・生体の透明化試薬

光学的手法によるイメージングでは、生体試料の低い光透過性が問題となるが、生体試料を透明化する試薬が日本で開発されており、マウス全身の透明化にも成功している。

［注目すべきプロジェクト］

海外のバイオイメージング研究拠点は、米国では UC Berkeley Biological Imaging Faculty、UC San Diego National Center for Microscopy and Imaging Research、Caltech Biological Imaging Center、欧州では EMBL European Institute for Biomedical Imaging Research、France Bio Imaging Infrastructure、アジアでは NUS Center for Bioimaging Science など、すでに数多く設置されている。また、Francis Crick Institute と名付けられた大規模なバイオメディカル研究所が英国ロンドンに 2015 年に発足予定である。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その中心的な目標とされている。

バイオイメージングのためのハードウェア、ソフトウェアのオープン化が進みつつある。ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラムの支援を受けた Open SPIM では、ライトシート顕微鏡の組み立てと操作に必要な情報をインターネット上に公開している。同様なプロジェクトとして OPEN SPIN MICROSCOPY（ライトシート顕微鏡）、QuickPALM、rapidSTORM（ずれも蛍光分子局在顕微鏡データの解析ソフトウェア）が挙げられる。

計測した画像データを共有するための、データベース、インフラ技術の構築も進んでいる（例えば、理化学研究所の Systems Science of Biological Dynamics (SSBD) database）。また、画像データ形式や計測方法の表記形式(BDML や PDPML）の標準化が進められている。

（５）キーワード

超解像顕微鏡、生体深部イメージング、三次元イメージング、ラマン顕微鏡、無標識イメージング、オプトジェネティクス

（６）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、無標識顕微鏡の装置開発から、透明化試薬など生体試料の作製技術や蛍光プローブ技術（各種物質のセンサ、生体発光プローブ、超解像用プローブ等）の開発まで、イメージング係わる幅広い分野で基礎研究が進められている。これらの基礎研究に係わる研究者も増えている。
	応用研究・開発	◎	↗	超解像顕微鏡、ライトシート顕微鏡、ラマン散乱顕微鏡の新しい製品の市場投入が進んでおり、それらを利用した応用研究が増えている。背景には、製品の登場以外にも、大学や研究所でのイメージングセンターやイメージング技術についての研究会（バイオラマン等）を通した、新しいイメージング技術の啓蒙活動が挙げられる。
	産業化	◎	↗	国内メーカーからは、超解像顕微鏡、ラマン散乱顕微鏡の新しい製品の市場投入があり、市場が活気づいている。しかし、光源、センサ等、基礎研究の基盤を支える新製品はあまり登場していない。
米国	基礎研究	◎	↗	超解像顕微鏡、ライトシート顕微鏡、光音響イメージング、振動分光イメージングについて、新しい技術が継続的に開発されている。特に脳機能や神経機能についての基礎研究が増えており、脳組織の透明化技術や光細胞制御技術（オプトジェネティクス）等の画期的な技術が登場している。レンズレスイメージングのような新しいイメージング様式の研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	超解像顕微鏡、ライトシート顕微鏡等の新しい顕微鏡技術の応用研究への導入が早く、多くの研究成果が発表されている。基礎研究から応用研究までの移行が早く、また非常に広い範囲の分野の研究者が関わり、質の高い研究が進められている。
	産業化	○	→	イメージング機器を開発する大きな企業は無いが、光源、センサ等の部品、から試薬関連会社まで、層が厚い。しかし、この分野の基礎研究の産業化については、特に目立った動きは見られない。
欧州	基礎研究	◎	↗	ドイツ、オランダ、英国を中心に、質の高い基礎研究が進められている。超解像顕微鏡、ライトシート顕微鏡、振動分光イメージング等、新しいバイオイメージング技術の著名な研究者が揃っている。
	応用研究・開発	◎	↗	The Europe Molecular Biology Laboratory (EMBL)、Max Plank Institutes (MPI)、Institute、 Institute of Photonic Technology (IPHT)等の研究成果を活用した応用研究が多く見られる。異分野間での連携研究も多い。
	産業化	◎	→	引き続き、Carl Zeiss、Leica等の顕微鏡メーカーが積極的に基礎研究の実用化を行っており、製品を世界各国で販売している。レーザー機器、イメージング機器、光学部品、試薬を開発する企業も継続的に新しい製品を発表しており、基礎研究を支えている。
中国	基礎研究	△	→	最先端研究へのキャッチアップは進んでいるが、あまり顕著な成果は見られない。
	応用研究・開発	△	→	基礎研究と同様に、特に目立つ成果は見られない。
	産業化	×	→	特に目立った動きは見られない。
韓国	基礎研究	△	↗	フォトニクスやイメージングに関する基礎技術について進歩が認められる。しかし、応用を見据えた研究例は未だ少ない。
	応用研究・開発	△	→	新技術を取り入れた応用研究は進んでいるが、国内で開発、もしくは製品化された技術の応用はあまり見られない。
	産業化	×	→	特に目立った動きは見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) Funatsu, T. et al. Imaging of single fluorescent molecules and individual ATP turnovers by single myosin molecules in aqueous solution. 1995, Nature. 374, p.555–559.
2) Tiwari, D. K.; Nagai, T. Smart fluorescent proteins: Innovation for barrier-free superresolution imaging in living cells. 2013, Dev. Growth Differ. 55, p.491–507.
3) “Superresolution Microscopy". Zeiss Education in Microscopy and Digital Imaging. http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/superresolution/index.html
4) Nobelprize.org. The Nobel Prize in Chemistry 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2014/
5) “Light Sheet Microscopy”. Zeiss Education in Microscopy and Digital Imaging. http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/referencelibrary/lightsheet.html
6) Michalet, X. et al. Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics. 2005, Science 307, p.538–44.
7) Igarashi, R. et al. Real-time background-free selective imaging of fluorescent nanodiamonds in vivo. 2012, Nano Lett. 12, p.5726–5732.
8) Balasubramanian, G. et al. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions. 2008, Nature 455, p.648–651.
9) Ji, N.; Milkie, D.E.; Betzig, E. Adaptive optics via pupil segmentation for high-resolution imaging in biological tissues. 2010, Nat. Methods. 7, p.141–147.
10) Palonpon, A.F.; Sodeoka, M.; Fujita, K. Molecular imaging of live cells by Raman microscopy. 2013, Curr. Opin. Chem. Biol., 17(4), p.708-715.
11) Palonpon, A.F. et al. Raman and SERS microscopy for molecular imaging of live cells. 2013, Nat. Protocol., 8(4), p.677-692.
12) Camp Jr, Charles H. et al. High-speed coherent Raman fingerprint imaging of biological tissues. 2014, Nature Photon., 8(8), p.627-634.
13) Ozeki, Yasuyuki et al. High-speed molecular spectral imaging of tissue with stimulated Raman scattering. 2012, Nature Photon., 6(12), p845-851.
14) O’Keefe, A. Integrated cavity output analysis of ultra-weak absorption. 1998, Chem. Phys. Lett. 293, p.331–336.
15) K. Saito et al. Luminescent proteins for high-speed single-cell and whole-body imaging. 2012, Nat. Commun. 3, 1262 doi:10.1038/ncomms2248.
16) Katz, B. et al.　Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM). 2012, Opt. Express. 20 p.9109-9121.
17) Deisseroth K. Optogenetics. 2011, Nat. Methods. 8, p.26–29.

18) Planchon, Thomas A. et al. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination. 2011, Nat. Methods, 8(5), p.417-423.
19) Liang Gao et al. Noninvasive Imaging beyond the Diffraction Limit of 3D Dynamics in Thickly Fluorescent Specimens. 2012, Cell, 151(6), p.1370-1385.
20) Mcleod, Euan et al. Toward giga-pixel nanoscopy on a chip: a computational wide-field look at the nano-scale without the use of lenses. 2013, Lab Chip, 13, p.2028-2035.
21) Vellekoop, I.M. et al. Exploiting disorder for perfect focusing. 2010, Nat. Photonics, 4(5), p.320-322.
22) Papadopoulos, Ioannis N. High-resolution, lensless endoscope based on digital scanning through a multimode optical fiber. Biomed. Opt. Express, 2013, 4(2), p.260-270
23) Youngwoon Choi et al. Scanner-Free and Wide-Field Endoscopic Imaging by Using a Single Multimode Optical Fiber. 2012, Phys. Rev. Lett, 109(20), 203901.
24) Mesolens Ltd., Mesolens
http://www.mesolens.com/
http://uk.reuters.com/video/2013/08/07/mesolens-brings-3d-detail-to-microscopy?videoId=235390185&videoChannel=2603
25) Hama, Hiroshi et al. Scale: a chemical approach for fluorescence imaging and reconstruction of transparent mouse brain. 2011, Nat Neurosci. 14(11), p.1481-1488.
26) Chung, Kwanghun et al. Structural and molecular interrogation of intact biological systems. 2013, Nature 497, p.332-337.
27) Susaki, Etsuo A. et al. Whole-Brain Imaging with Single-Cell Resolution Using Chemical Cocktails and Computational Analysis. 2014, Cell, 157(3), p.726-739.
28) OpenSPIM
http://openspim.org/
29) OPEN SPIN MICROSCOPY
http://sites.google.com/site/openspinmicroscopy/
30) quickpalm
http://code.google.com/p/quickpalm/
31) rapidSTORM
http://www.super-resolution.biozentrum.uni-wuerzburg.de/research_topics/rapidstorm
32) Systems Science of Biological Dynamics (SSBD) database
http://ssbd.qbic.riken.jp
33) figshare
http://figshare.com/
34) OMERO
http://www.openmicroscopy.org/site/products/omero

３．２．５．２　生体イメージング

（１）研究開発領域の簡潔な説明

生体における形態・機能・代謝等の生物的プロセス、あるいは受容体などの特定の生体内分子などを、生きたまま非侵襲的に可視化し、基礎的なライフサイエンス、前臨床研究および医療において必要となる情報を提供することを目的とした研究開発領域である。可視化の手法として、MRI（磁気共鳴画像法）、PET（ポジトロン断層法）、SPECT（単一光子放射断層法）、蛍光・生物発光、X 線 CT（コンピュータ断層法）、超音波、光音響が主に用いられる。イメージングに必要とされる計測装置（ハードウェア）や撮像手法、分子プローブや造影剤などの試薬と標的化技術、画像解析ソフトウェア、病態を反映する動物モデル技術、治療評価法など広範囲の技術要素を総合的に確立することを目指した研究開発が進められている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

生体イメージングは、臨床における画像診断と表裏一体の関係であり、その多くが臨床に応用され、あるいは臨床での診断・検査法としての利用を指向している。同時に、マウスなどの小動物、あるいは小型霊長類や家畜類を対象としたライフサイエンスにおける基礎研究、あるいは臨床への移行を目指した前臨床研究のツールとしても重要な役割を演じている。

1990 年代に計測技術や画像処理技術が飛躍的に発展する中で、生体イメージングは解剖学的な形態を反映する技術から機能・代謝情報の取得へと進化した。今世紀に入り、生体分子や遺伝子を標的とするバイオイメージング技術が培養細胞等の「生体外（in vitro、ex vivo）」から、小動物やヒト等の「生体内（in vivo）」へと応用される中で、分子イメージングというキーワードが登場し、生体イメージングの概念を生体内の分子・細胞の情報を可視化する方向へと拡張が進んだ。その過程において、特定の受容体など組織に集積する標的化プローブ、生体組織の pH や酵素などのバイオマーカーに応答して信号を変化させる反応性プローブ、長い血中半減期を持つ高分子・ナノ粒子プローブが登場した。ナノ粒子を基盤とするプローブは、治療と可視化を同時に実施するセラノスティック・プローブや複数のイメージング手法での同時評価が可能なマルチモーダル・イメージング・プローブなど多様な発展へと繋がった。

生体イメージングは前述のように臨床用診断装置の側面を持つため、産業化は迅速である。2011 年の厚労省調査では、MRI は 5,990 台、PET(PET/CT)は 466 台、SPECT は 1,360 台、X 線 CT は 12,943 台が国内医療機関で稼動している [1)]。

これらの臨床用診断装置において国産部品が国際的に多用される一方で、最先端技術が必要なハイグレード機器を中心に国内企業の占有率は低く、高額機器の大半が輸入に頼ることで医療経済の圧迫につながっている。今後、ナノ粒子が応用されたプローブ（造影剤）や治療剤が実用化される過程で生じると考えられるパラダイムシフトに対して、どこまで国産技術が実用化されるかが、医療経済的には重要な岐路になることが予想される。

［これまでの取組み］

MRI は静磁場中で水分子の水素原子核が特定周波数の電磁波に対して共鳴する現象を利用した生体イメージング法で、電離放射線の被ばくが無く高解像度での 3D 撮像を可能とし、マウスからヒトまで幅広い対象をカバーする。

MRI では古くからナノ粒子が臨床応用されてきた。糖の一種であるカルボキシデキストランで被覆した平均粒径約 60 nm の酸化鉄ナノ粒子が肝腫瘍造影剤として 2002 年に国内販売が開始された。現在では後発品に市場を譲ったものの、酸化鉄ナノ粒子は幹細胞標識による細胞追跡や標的化造影剤として基礎～前臨床研究に今も幅広く使用され、例えば一細胞追跡など解像度を生かした応用が進んでいる。MRI は PET と比較して、特定のプローブに対する感度が低い（PET は nM～pM、MRI では μM の濃度が必要）が、空間分解能が高い（PET は数 mm、MRI は 50 μm 以下）という特性を持つ。酸化鉄ナノ粒子は撮像法によっては、実体積の数百倍もの拡張効果で信号を増強することで、感度の不足を補うことが出来る。

また、臨床で幅広く使用されるガドリニウム錯体造影剤を担持したナノ粒子（ナノミセル、PEG 化リポソーム、量子ドット、デンドリマー、シリカナノ粒子、PLGA など高分子ナノ粒子、フラーレン、カーボンナノチューブなど）は、白い高信号として観察できるため視認性が良く、また単一粒子に多数の造影剤を担持することで感度上昇に貢献する。加えて、造影剤と治療薬あるいは治療効果を持つ素材を搭載することで、「可視化しながら治療する」というイメージガイド治療あるいはセラノスティック造影剤と呼ばれる技術が、ここ 5 年で多数登場してきた。これらは、MRI 装置の高感度化、さらなる高解像度化（マイクロ・イメージング）、定量化そして解析技術の向上によって、例えば、がん内部の微小環境の可視化（不均一性解析）など、従来不可能だった診断技術をもたらしつつある。

放射性同位体を体内に投与する PET および SPECT は核医学イメージングと総称され、空間分解能は低いものの、非常に高い感度（nM～pM）でのプローブの検出が可能で、また体内の薬剤分布を臓器毎に定量するなどの利用が容易である。PET では短半減期核種の利用が多いため、放射性プローブの医療機関への配達に限界があり稼働台数は全国で 500 台程度と多くない。また、短半減期核種では、血中滞留性の長い高分子・ナノ粒子プローブの追跡に限界があるため、実用的には中半減期核種の利用が視野に入ると考えられる。前臨床研究としてはナノ粒子に PET あるいは SPECT 核種を搭載した研究報告が多数あり、その定量性を生かし動態解析に用いられている。SPECT では比較的長めの半減期核種が使用され、医療機関への配達も可能であることから 1,360 台の臨床装置が全国で稼動している。マウスーヒトキメラ型抗 CD20 抗体をインジウムで標識したものが臨床認可されており、また前臨床研究では、標識抗体の動態追跡やナノ粒子型プローブへの応用が多く報告されている。臨床での空間分解能は限定されるが、前臨床用 SPECT の解像度は高いため、今後、新規ナノ粒子開発における動態の定量評価法としての貢献が期待できる。

蛍光を用いた生体イメージングは、原理的には細胞や組織染色等で使用される蛍光顕微鏡と同じ手法であるが、生体内からの蛍光信号を検出するために、組織透過性の高い近赤外光に近い周波数帯が主に使用されている。蛍光による断層イメージングは、散乱

による解像度の低下などにより困難であったが､マウスで良好な断層像を得られる 3D イメージングが最近可能となりつつある。ヒトにおいては体表か内視鏡による消化管表面や術中などの利用に限定されるが、臨床での安全性が確認されているインドシアニン・グリーン（ICG）は生体を透過しやすい近赤外帯の蛍光波長を持つため、その応用研究が広がっている。近年、多様な蛍光プローブが開発され、試薬として提供される他、in vivo イメージング測定が簡便で装置が安価なこともあり、蛍光を用いた生体イメージングは基礎研究、前臨床研究に幅広く普及し、ナノ粒子を用いた生体イメージングとして最も多く研究に使用されている。また、in vivo 共焦点顕微鏡や多光子顕微鏡など光学系も発展し、やや侵襲性を伴うものの生体において高解像度かつリアルタイム観測が可能になりつつある。プローブ開発としては、生体のバイオマーカーに応答して蛍光強度を変化させる反応性プローブ（responsive または activatable probe）は、特異性の高い信号をもたらし、臨床応用への試みも始まっている。

［今後必要となる取組み］

ナノ粒子の技術を活用したより高機能・高精度なイメージング・プローブ（造影剤）の研究開発が必要である。特異性が高く、生体中の環境に高感度に応答するプローブ、治療薬と造影剤を同時に担持し、治療経過を迅速に可視化できるプローブなどの研究開発が、高機能化・高精度化の方向性となるであろう。

研究開発体制の面では、基礎研究から前臨床研究を経て臨床研究へと迅速に繋ぐ体制が必要である。基礎研究によって原理を発見した単一の研究者や組織が全工程を行うのではなく、各専門性を生かした広域連携による枠組構築が望まれる。生体イメージングに関連する技術は広範囲にわたり、単一機関や企業のみで全技術を保有することは難しく、オープンイノベーションの枠組なしには国際競争力が維持できなくなると考えられる。

一方、基礎研究の範囲を臨床応用可能なもののみに限定すると、研究の自由度・発展性が阻害され、中長期的なイノベーション創出において逆効果となる。基礎研究者は、その研究範囲の一部に臨床応用を視野に入れ、安全性・低毒性の向上、低価格化などを関心領域に入れるよう、インセンティブの付与を含めた連携枠組の構築が望まれる。その上で、基礎研究の幅広い裾野を維持しつつ、迅速に前臨床研究による有用性の確認や選別が実施され、製薬企業や病院等の連携を含めた臨床研究への移行を加速する事が求められる。

（３）科学技術的・政策的課題

生体イメージング技術は全般的に、ハードウェアや計測法が成熟してきており、その進化速度がやや低下しつつある。情報通信機器と同様に、多くの装置に国産部品が採用される一方、製品パッケージとしては欧米企業が大半を占める。また新興国との技術差は縮小し、またこれまで投資が不十分だった技術分野（例えば、ソフトウェア開発等）では欧米との間に生じた決定的な差がいつまでも縮小できない状況も見られる。これは臨床装置・前臨床装置に共通して見られる状況で、製品の最終的な評価を決定するソフトウェア開発の人員不足・投資不足により、パッケージとしての国産装置の価値が低下

している。

例えば、MRI の場合、これまでの直線的な発展、例えば高磁場化、高解像度化、高速化といった明確な技術課題に対する対応は容易に予測可能であったが、技術全体が成熟する中で今後、直線的でないパラダイムシフトがどのような形で生じるか予測が困難な状況になりつつある。このような状況において、ナノテクノロジーを活用した可視化あるいは治療技術は、生体イメージングの発展を牽引し大きなパラダイムシフトを期待し得るが、臨床での有用性・市場性・経済性を含めた展望は未だ具体的でない。最終的な製品イメージを共有し、関連技術を結集して、パッケージ化された技術を生み出す必要性があると考えられ、そのための枠組構築が急務である。

政策上、最も大きなボトルネックは異分野の連携体制の不備であり、オープンイノベーションを促すためのインセンティブ付与の枠組が未確立である点である。例えば、生体イメージングが関わる診断（計測・分析）分野に関してでさえ、研究開発体制は各モダリティに分断され、それぞれの分野内のみで細部の改良が行われている。診断と治療の各部門が連携し、共通の問題を解決しようとする体制は、一部を除いてほとんど存在しない。基礎技術を中心とした各モダリティ内・単一ディシプリン内での高精度化や持続的進展の必要性は言うまでもないが、異なる計測・分析分野の連携、治療と診断部門の連携など、これまで交わることの無かった部門、とりわけ、それぞれが世界最先端の研究部門が交わることで、真に国際競争力を持つイノベーションが期待できる。例えば、ナノプローブと介入治療、ナノテクノロジーと分子イメージング、放射線治療など、既に双方の研究分野が単独で確立し運営されている複数分野（多くは所轄官庁も異なる）を、適切なインセンティブを与える事で連携を促すことが望まれる。複数組織における知財管理や製品化への企業連携を視野に入れるために、簡便にオープンイノベーションに参加出来る受け皿の構築に向けた検討も必要である。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

「セラノスティクス（Theranostics）」とは、治療学・治療法をあらわす「Therapeutics」と診断学・診断法「Diagnostics」を組み合わせた新しい言葉であり、治療と診断を一体化・複合化した新たな医療技術、開発コンセプトあるいは医学研究を示す。セラノスティクスの関連分野は多岐に渡るが、例えば、体外診断技術（血中バイオマーカー分析）、分子標的プローブや反応性プローブなどの各種分子イメージング技術、IVR（Interventional Radiology）を含むイメージガイド治療、コンパニオン診断と分子標的治療など、標的の分析を治療にリンクさせる最先端技術の多くが関連する。

セラノスティクスを技術的側面から見ると、例えば体外診断（分子・遺伝子）、高精度生体イメージングなどの計測技術、抗体・核酸医薬、ナノ薬剤送達技術（DDS）、内視鏡手術や IVR、ピンポイント放射線治療、放射性同位体内用治療など、診断・治療双方の最先端技術の異分野連携による革新を生み出し得る。またその成果は、薬剤や放射線治療に対する耐性化・難治化のメカニズム解明、併用療法の根拠の付与、治療のベストミックスの確立など、多くの分野における医学研究の発展に貢献し、個別化医療の具体的な実施形態になる。また医療経済の観点からは、「薬剤投与後に効果を見ながら試行錯誤

する」という回り道を最小化し、ワンストップで診断から治療に移行する事で、これまでの医療プロセスの効率化に貢献し、何よりも「患者が医療に拘束されることで生じる経済的損失」の軽減が期待できる。また、治療診断一体機器、あるいはコンパニオン診断薬を含めた薬剤・計測複合機器といった新しい市場開拓も展望できる。

［注目すべきプロジェクト］

EU において European Society of Pharmacogenomics and Theranostics（ヨーロッパ・ゲノム薬理セラノスティクス学会）が設立された。

2010 年、D.O. Lapotko（Rice University）が、ナノバブルに関するセラノスティクス研究で米国 NIH より大型の研究プロジェクトグラントを獲得するなど、研究費のサポートが始まっている。

（５）キーワード

MRI、核磁気共鳴画像法、PET、ポジトロン断層法、SPECT、単一光子放射断層法、セラノスティクス、ナノ薬剤送達システム、ナノ DDS、バイオマーカー、オミクス、分子イメージング、イメージガイド治療、分子標的

（６）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	◎	↗	生体への応用が有望なナノミセル、ナノゲル、高分子ナノ粒子など優れたナノ・プラットフォームをもち、また炭素素材、量子ドットなど多くのナノ基盤技術を持つ。また、生体イメージングにおいても各モダリティにおいて国際的に優れた要素技術を持ち、基礎研究は国際的に高い水準にあると言える。
	応用研究・開発	○	↗	蛍光やMRIを中心に生体イメージングに応用した例は多く、独自性や水準は高いが、欧米と比較して取り組む大学・研究機関や人員が小規模であり、連携や総量として改善の必要性がある。
	産業化	△	→	治療を目的としたナノ粒子は臨床研究に入っているが、イメージングを含めた技術では、試薬レベルに留まり、臨床応用の道筋が未だ明確でない。
米国	基礎研究	◎	↗	多数の大学や研究機関で、ナノ粒子の高度な要素技術が開発され、併せて生体イメージングに応用する研究例も、質・量共に優れている。最近は、中核的な大学や研究機関だけで無く、地方大学へも裾野が拡大している。
	応用研究・開発	◎	↗	蛍光・MRI・核医学など全般に渡って、基礎研究の成果を前臨床研究に迅速に移行している。NIHから研究資金の供給が継続されており、また、一つの研究室に、世界中から複数分野の専門家を雇用し分業化する体制が確立していることが強みと考えられる。
	産業化	◎	↗	Caltech, UCLAがPETプローブ、ワシントン大学がMRIの標的造影剤、ノースカロライナ大学がCT造影剤、スタンフォード大学が炭素素材によるイメージング等が臨床治験を走らせており、活発である。試薬や機器メーカーも多数存在する。ベンチャー企業とそれを支えるリスクマネーが循環することで商品化までの速度が速く、NIHなどを中心としたサポート体制も大きい[2)]。
欧州	基礎研究	◎	↗	ドイツを筆頭に、オランダ、英国、フランス、イタリアを中心にナノ粒子の高度な要素技術が開発され、併せて生体イメージングに応用する研究例も、質・量共に優れている。
	応用研究・開発	◎	↗	各国で得意分野に違いはあるが、EU全体として蛍光・MRI・核医学など全般に渡って、基礎研究の成果を前臨床研究に着実に移行させている。2007-2010年にEuropean Commissionの枠組で370億円をナノ医療関連研究に投下[3)]、標的化ナノ医薬・早期診断クラスターで25の研究計画を産学連携で運用している[4, 5)]。
	産業化	○	↗	EUの枠組では「ナノ医療のためのEuropean Technology Platform」が存在し、技術を産業化へ繋ぐ役割を果たす。ドイツでは、バイエル社の酸化鉄微粒子の臨床応用を皮切りに、高分子MRI造影剤としてVasovistの商品化など臨床への道筋が明確である。試薬や機器メーカーも多数存在し、臨床ではドイツ・シーメンス社、前臨床ではブルカー社がイメージング機器業界を牽引する。
中国	基礎研究	○	↗	本国における独自技術の開発は多くないが、欧米や日本の基礎技術を確実にキャッチアップしている。また、欧米で職を得て活躍する研究者を含めると、基礎研究の水準は極めて高いと言える。
	応用研究・開発	○	↗	欧米や日本で報告された要素技術を使用して、多数の大学・研究機関から応用研究が報告されている。その独創性は高くないが、研究報告数は多く、技術水準も向上しつつある。
	産業化	△	→	産業化に関して体系的な動きは目立たないが、臨床研究へのハードルが低いため、例えば、脊髄損傷患者に対するナノ粒子標識の幹細胞移植の臨床研究が米国と同時期に実施されるなど、時に迅速な動きを見せる。
韓国	基礎研究	◎	↗	高い水準を持ち、欧米や日本の基礎技術と遜色ないレベルにある。多様なナノ粒子の開発について活発であり、欧米からの帰国者を中心に活発な研究が展開されている。

	応用研究・開発	○	↗	多数の応用研究が精力的に発表されている。基礎科学支援研究所（KBSI）では海外の研究者を優遇してリクルートする体制を整備し多国籍体制での研究推進が行われている。またソウル近郊に多くの研究機関や大学、現代やサムソン等企業の大規模医療センターが集約化されているため、一定の連携体制も確立されている。
	産業化	△	→	一部でベンチャー的な試薬開発などの動きが見られるが、臨床応用までは到達しておらず、産業化の総量としては限定的である。しかし、産業化への要素技術を保有しており、今後の施策によっては急発展する可能性がある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1）厚生労働省. 平成２３年医療施設（静態・動態）調査, a0075, a0117
2）National Cancer Institute. NCI Alliance for Nanotechnology in Cancer. Nanotechnology in Clinical Trials
http://nano.cancer.gov/learn/now/clinical-trials.asp
3）European Commission. RESEARCH & INNOVATION. Key Enabling Technologies. Nano in Healthcare.
http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/nano-in-healthcare_en.html
4）European Commission. Mapping Portal for Nanotechnology Research: FP6/7 Projects.
http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/ec-nanotechnology-research-mapping_en.pdf
5）European Commission. RESEARCH & INNOVATION. Key Enabling Technologies. Targeted Nano-Pharmaceuticals and Early Diagnostics cluster
http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/targeted-nano-pharmaceuticals_en.html

3.3 社会インフラ

わが国を取り巻く社会的課題は刻々と顕在化しており、これらの課題に対応するために必要とされる社会インフラ需要も質的に大きく変化しつつある。例えば、道路等の事故が相次いでおり、今後インフラが一斉に更新期を迎え、維持補修・更新に係る投資が発生することが想定される。さらに、大規模自然災害等については、平成 25 年 12 月に「国土強靭化基本法」が成立し、国土強靭化に関する施策を総合的かつ計画的に推進することとされた。水の浄化技術、大気汚染、温室効果ガス、水素社会の到来は世界規模の重要課題であり、効率的な液体・ガスの分離・精製技術の必要性は論を俟たない。電力の将来的課題としては、超伝導直流送電による送電ロスの減少も検討されている。また、原発事故に伴う放射線の影響をできるだけ早く減らしていくことも官民の責務である。

そこで、生活のライフラインである水、電力、交通、通信などを想定した社会インフラの項目を新設し、今後ナノテクノロジー・材料が特に貢献しうる、構造材料、水処理膜、センサデバイス、超伝導送電、放射線除染・減容化を本報告書では取り上げた（これらは当然、エネルギー分野、情報通信分野とも重複する）。

ICT 等の高度技術を駆使した新しい社会インフラのあり方として、ソフト・ハードの両面を併せた社会を官民連携しながら構築していくことが求められる。

３．３．１　構造材料

３．３．１．１　構造材料（金属系）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

金属系構造材料に関して、高強度、高靭性、軽量（高比強度）、耐環境性（耐熱性、耐食性など）、易加工性など材料特性の向上、および高品質、低コスト、高生産速度など製造プロセス技術の向上を目指す研究開発領域である。強化、破壊、腐食の機構を解明し、材料開発の指導原理を見出し、さらにそれらをもとに使用環境下での寿命予測法を確立する。また、（単純形状の）一次素材のみならず最終形状に近い素形材をも、高品質、低コスト、高生産速度で製造する技術を確立する。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

構造材料は、構造物がその構造および機能を維持すべく、自重および荷重に耐えるために必要な力学的特性を有する材料である。特に鉄鋼をはじめとする金属系構造材料は人類の歴史で最も長く使用され、今もなお幅広い機能、高い性能が求められ続けている。近年では東日本大震災を一つの契機として、構造材料には、災害に耐えて社会インフラを支え、エネルギー効率を高めて資源を節約し、環境負荷を下げて持続性を維持するための機能、性能の向上がより一層求められ、国家主導の技術開発政策が次々と打ち出されている。

［これまでの取組み］

従来の金属系構造材料の結晶粒径は小さくても 10 μm 程度であったが、これを一桁以上小さくすることにより、様々な特性が現れることが近年明らかになってきた。例えばアルミニウムの結晶粒径を制御することにより、鉄鋼と同程度の強度が得られ、さらに、靭性もある程度達成できることが示されている。

日本は、鉄鋼、軽金属ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。例えば、ナノスケールの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンが市販されている。一方、欧米は軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において依然として研究開発から産業化まで優位性を保っている。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタンに関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。軽金属では、ロシアとカナダにおけるアルミニウムの生産量が米国を上回っており、固溶強化、析出強化型の東南アジア、インド、イランなどのアジア圏も追い上げ傾向にある。

［今後必要となる取組み］

金属系構造材料設計は、これまで実験に基づく経験則を中心に行われてきたのが実状である。しかし、実験のみから導き出される特性は飽和状態に近づきつつある。全ての金属系構造材料について、製造・加工時の熱的・機械的履歴により材料組織が変化し、さらに諸特性、使用時のパフォーマンスも変化する。その履歴と使用条件のあらゆる組

み合わせを、実験により再現することは過大のコスト、時間を要する。革新的な材料を短時間で産み出すために、材料設計、製造プロセスともに、計算科学、情報学（インフォマティクス）などを積極的に導入すべきである。

ただし、計算科学の重要度が増す一方で、計測・評価技術の進歩が不要となるわけでは決してない。進歩の方向性の一つが微細構造に向かうことは確かである。構造材料開発に長期間を要する原因は、疲労、クリープ、応力腐食割れ、水素脆化など、時間依存性の破壊現象にある。巨視的な破壊が起こるまでに何十年もかかる場合もあり、それをより短期間で把握するために、微視的兆候を捉えることが有効と考えられる。また、もう一つの方向性としては、材料の状態を三次元で把握することが挙げられる。それは三次元アトムプローブ、FIB-SEM などのように微細構造解析に限らず、中性子線による三次元の残留応力測定、多軸応力場での力学特性評価など、より巨視的な計測・評価も含まれる。部材の形状、荷重、拘束の条件が複雑化する状況において、単純な機械的試験のみから部材のパフォーマンスを予測することには無理がある。これらのデータがデータベースに蓄積されることにより、材料開発のより一層のスピードアップが期待される。

（３）科学技術的・政策的課題

大学、公的研究機関においては、金属系構造材料に取り組む研究者、特に若手研究者層の薄さが最も懸念される。一方、素材産業においては、市場がグローバル化し、海外、特に新興国のメーカーが競争力をつける中、国内企業の統合が進んではいるが、産学官連携、オープンイノベーションなどの国家政策に十分に協調しているとは言い難い。例えば鉄鋼メーカーは高い技術開発力を持ち、大規模な高炉一貫鉄鋼プロセスを扱う。他の市場が確立された金属材料についても概ね同様のことが言える。彼らの技術開発に大学、公的機関が直接的に貢献することは易しくないのが実状である。これは日本のみならず海外にもあてはまり、例えば素材産業において日本の技術力に肉迫する中国、韓国の場合、代表的な国立材料研究機関である中国科学院金属研究所(CAS-IMR)、韓国材料科学研究所(KIMS)の研究対象に鉄鋼材料関連はほとんどない。これは鉄鋼業界が高い技術開発力を備えているからであり、例えば韓国の浦項製鉄(POSCO)が自ら浦項工科大学(POSTECH)を創立して鉄鋼材料研究を一手に引き受けている。一方、非鉄金属（アルミニウム、チタン、マグネシウム、ニッケル基合金）に関しては、産業がまだ発展途上にあり技術開発力がないために、国立研究所が産学官連携の中で技術開発の主導的役割を担っている。CAS-IMR、KIMS ともに、材料開発から鋳造、圧延などのプロセス技術開発まで行う。

ただし、先進国には金属系構造材料に関する産学官連携のテーマはないか、といえば否である。その例を NIST に見出すことができる。彼らは NIST 自動車軽量化センター(NCAL)という、自動車メーカー（トヨタ、ホンダ含む)、素材メーカー（鉄鋼、化学など）から成るコンソーシアムを設立し、部材パフォーマンス評価などで主導的立場にある。NIMS など日本の公的研究機関にも、同様のことができないはずがない。産学連携に適したテーマとして、部材パフォーマンス評価・寿命予測、先端計測、異種材料接合などが検討に値する。実際、NIMS では平成 26 年度に構造材料研究拠点が発足し、その中で、構造材料つくばオープンプラザ(TOPAS)が産学官連携のプラットフォームとなる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

第一原理計算、分子動力学法、熱力学計算、フェーズフィールド法、有限要素法などを組み合わせて駆使し、原子・分子レベルのナノスケールから、ミクロを経て、部材レベルのマクロスケールまでを結び付けようとする、いわゆるマルチスケール解析の有効性が顕在化しつつある。また、その計算には相応のデータベース、併せてそこから有用なデータを抽出するデータマイニング技術なども重視されている。

製造技術に関しては、少量多品種生産への適応がトレンドの一つであるが、その際に歩留まり向上の要件の一つとなり、ネットシェイプまたはそれに準じるニアネットシェイプの成形加工技術が重視される。従来からある鋳造、鍛造などに加え、粉末冶金の発展形としての射出成形、三次元積層造形などが有望視される。また、次世代自動車に求められる、車両のより一層の軽量化と安全性の両立からマルチマテリアル化は必須であり、そのための異種材料接合技術がキーテクノロジーとなる。例えば、摩擦攪拌溶接(FSW)が代表的だが、金属と CFRP の接合においては、接着剤の使用も視野に入る。

［注目すべきプロジェクト］

・科学研究費新学術領域研究「バルクナノメタル」（平成 22 年度～）では、マトリクスを構成する結晶粒や相の大きさが 1 μm 以下であるバルク形状の多結晶金属を対象とする研究開発が進められている。
・JST 産学共創基礎基盤研究「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」（平成 22 年度～）は、微視・巨視双方のレベルでのヘテロ（不均一）構造を積極的に活用して、次世代金属構造材料開発への道筋を作ろうとするものである。
・JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」（平成 23 年度～）では、低炭素化社会の実現に向けた、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発が推進されている。
・文部科学省「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」（平成 23 年度～）は、希少元素を用いない材料開発を目指すものであり、構造材料に関しても、京都大学構造材料元素戦略研究拠点が設立された。拠点形成により、協働が進みにくい材料創成と電子論との連携を図ることを大きな特徴としている。

さらに、産業化に向けた出口戦略を重視した、材料技術開発プロジェクトして、次の２つが挙げられる。

・経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（平成 25 年度～）は、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、鋼材、アルミニウム、チタン、マグネシウムの材料・プロセス・接合技術開発に関して 19 企業、1 独法が加入した。

・平成 26 年度に開始される内閣府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」では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRP とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、チタンアルミの加工技術開発などが行われる予定である。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

（５）キーワード

高強度化、軽量化、耐熱性、計算科学、情報学、異種材料接合

（６）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	◎	↗	超微細粒材料、周期構造Mg合金、微細析出組織材料などのシーズ技術の研究が鉄鋼・軽金属ともに盛んに進められている。鉄鋼では，マルテンサイトなどの従来型ナノ組織材料の解析が進んでいる。文部科学省「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」、「元素戦略プロジェクト（京都大学構造材料元素戦略研究拠点」の研究成果も期待される。
	応用研究・開発	◎	↗	経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」による自動車向け材料(鉄鋼、Al, Ti, Mg)軽量化（高比強度化）、内閣府SIP「革新的構造材料」による航空機エンジン向け耐熱材料(Ni, Ti, TiAl)の材料・プロセス技術開発。
	産業化	◎	↗	ナノサイズの析出物によって強化した鉄鋼をナノハイテンとしてJFEスチールが製品化した。自動車向け高級鋼板として競争力強化に寄与している。ナノ炭素材料の大量合成技術の産業化が活発に行われているものの、これを用いた産業化は導電性などの機能材的使用が主流で、構造材料用途への展開は目立った進展が乏しい。
米国	基礎研究	◎	→	・2011年に発表されたMaterials Genome Initiativeは、材料開発全般において計算科学、情報学を活用して、新材料の開発から実用化までの期間・コストの削減しようとするもので、構造材料分野も視野に含まれる。 ・エジソン溶接研究所(EWI)による摩擦攪拌溶接(FSW)などの異種金属接合技術開発。
	応用研究・開発	◎	↗	原子力材料技術などの開発では、依然として他国をリードしている。エネルギーに加えて、軍用の材料技術開発（高強度、軽量化、耐熱性）が多く行われているはずであるが、表には出にくい。
	産業化	○	↗	・鉄鋼企業の競争力は高くないものの、軽金属（特にアルミニウム）企業の組織微細化技術は高い。
欧州	基礎研究	◎	↗	・ナノスケールフェライトーマルテンサイトDP鋼、超微細粒材料などの開発で日本と同等レベルにある。 ・独マックスプランク鉄鋼研(MPIE)、シュツットガルト大学など、鉄鋼材料を主な対象とする計算材料科学、マルチスケールシミュレーションに関して日本に勝る。
	応用研究・開発	◎	↗	・独の連邦政府ファンディングによる自動車向けマルチマテリアルシステム技術開発プログラム。 ・英国接合溶接研究所(TWI)による摩擦攪拌溶接(FSW)などの異種金属接合技術開発。
	産業化	◎	↗	自動車用鋼板などの開発で高い技術をもつ。独、仏に拠点を有する企業が産業を牽引している。

中国	基礎研究	△	↗	第12次5カ年計画において政府としてナノ技術に関する高強度､軽量化材料の研究開発費を大幅に増加している。特にアルミニウムやマグネシウムなど航空用合金材料およびナノ高強度、軽量化材料に集中している。
	応用研究・開発	◎	↗	米国と同様に，軍需利用が大きなニーズの一つとなっている。自動車の国産化に対応できる微細組織鉄鋼の開発を目指している。中国科学院金属研究所(CAS-IMR)は、軽金属(Al, Ti, Mg)の材料・プロセス・加工・接合技術開発に約50人の研究者を充てている。
	産業化	◎	↗	規格化・標準化などを戦略に掲げ、自国で評価技術を確立する動きが活発化している。鉄鋼，Ni，Al，Ti，Mgなどの主な金属材料の生産量は世界一である。
韓国	基礎研究	△	↗	日米欧のレベルには達しないものの、超微細粒材料研究などでは高いレベルの研究が行われている。応用研究を優先して行う方針が強く、第二次科学技術基本計画により基礎研究水準は向上してきている。
	応用研究・開発	○	↗	TRIP鋼の開発研究は日本とともに高いレベルを持っている。韓国材料科学研究所(KIMS)は、軽金属(Al, Ti, Mg)の材料・プロセス・加工・接合技術開発に約50人の研究者を充てている。
	産業化	○	↗	自動車向けMg合金シートは世界に先駆けて量産化に入った。ナノ組織制御は日本などとの共同研究を推進している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) 物質・材料研究機構．“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 ．NIMS 調査分析室レポート．
2) 特集・鉄鋼材料を活かすナノ組織制御技術．ふぇらむ（日本鉄鋼協会会報），2007, 12（12），p.748-794.
3) 文部科学省科学研究費補助金「バルクナノメタル」：http://www.bnm.mtl.kyoto-u.ac.jp/
4) JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御」：http://www.jst.go.jp/kyousou/theme/h22theme01.html
5) JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)：http://www.jst.go.jp/alca/index.html
6) 新構造材料技術研究組合(ISMA)：http://isma.jp/index.html
7) JST 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
8) 米国マテリアルゲノムイニシアチブ(MGI)：　http://www.whitehouse.gov/mgi
9) NIST 自動車軽量化センター(NCAL)：　http://www.nist.gov/lightweighting/
10) エジソン溶接研究所(EWI)：　http://ewi.org/
11) マックスプランク鉄鋼研究所(MPIE)：　http://www.mpie.de/
12) シュツットガルト大学材料試験研究所(MPA)、材料試験・材料科学・材料強度研究：http://www.mpa.uni-stuttgart.de/index.en.html, http://www.imwf.uni-stuttgart.de/index.en.html

13）英国接合溶接研究所(TWI)： http://www.whitehouse.gov/mgi
14）中国科学院(CAS)金属研究所（IMR)： http://english.imr.cas.cn/
15）韓国材料科学研究所(KIMS)： http://www.kims.re.kr/eng/
16）浦項工科大学(POSTECH)： http://www.postech.ac.kr/

３．３．１．２　構造材料（複合材料）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

複数の異なる材料の複合化により、高比強度（引張強さ/比重）など、均質材料では達成できない機械的特性を発揮し、構造物の軽量化等に貢献することを目指す研究開発領域である。その代表であるFRP（繊維強化プラスチック）においては、繊維、樹脂おのおのの開発に加えて成形技術の開発が活発化し、加工性、生産性等の向上と併せて製造コスト低減を追求している。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

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、その解決に直接的に貢献する。代表的な複合材料であるFRPは、マトリックスとしての樹脂の中に強化材としての繊維が配置された、高比強度、すなわち強くて軽い構造材料である。さらに、構造物にかかる荷重の分布に合わせて強化材を配置することが可能である、効率的な材料でもある。しかし実際には高価格であり、併せて加工性、生産性などにも難があることから、まだ金属系構造材料ほど普及していない。

逆にいえば、鉄鋼をはじめとする金属材料の開発が成熟に至る一方、炭素繊維複合材料（CFRP）技術開発は、特にプロセス技術開発にまだ大きな伸びしろを有している。炭素繊維には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が、いずれも日本発の技術であり、その生産量において日本は世界のおよそ7割を占める。世界の需要は2013年には48千トン/年であるが、2015年には70千トン/年、2020年には140千トン/年、という見通しもある。この炭素繊維を用いたCFRPは今後、自動車・航空機産業に革新をもたらし、産業・社会にパラダイムシフトを引き起こす可能性が高い。

［これまでの取組み］

日本のFRPの出荷量は1960年代後半から徐々に増加し、1996年にはピークの479.5千トンに達したが、その後は減少を続け、2009年以後200千トン台を低迷している。一方、世界の総出荷量（2008年）はおよそ8.6百万トンで、そのおよそ4割が米国、3割が欧州、3割がアジアと言われている。アジアの中で最も出荷量が多いのは中国（1.6百万トン）で、年成長率も日本よりはるかに高い。国内生産のFRPの需要として最も大きいのは浴槽・浴室ユニットなどの住宅機材であり、生産量全体の約半分を占め続けている。他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。そのほとんどはGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）である。GFRPの成形法は、1980年代にはほぼ確立されていた。1980年にはハンドレイアップ法、スプレーアップ法が主流で、FRP成形法全体のおよそ5割を占めていたが、その後モールディングコンパウンド法の割合が増加し、現在およそ5割を占めている。前述の住宅機材にもこの成形法が使用されている。

CFRP（炭素繊維強化プラスチック)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）にかけるという成形法が代表的である。高性能だが高価であるため、その主な用途はスポーツ用品、航空機等に限定さ

れる。ボーイング 787 の機体構造重量の 35%が日本メーカーの製造する CFRP であり（CFRP 全体が機体構造重量の 50%）、CFRP 製造においても日本は高い国際競争力を有してきたが、欧州が次世代航空機の製造技術（自動化等）の研究開発を着々と進めており、日本は遅れをとっている。また、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」を一般向けに発売しており、日本に先行する形となっている。

なお、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(MMC)、セラミックス基複合材料(CMC)もあり、1980 年代のいわゆる新素材ブームの中で多くの研究開発がなされたが、有力な商品は生まれず 90 年代のバブル経済崩壊とともにほとんどの企業は撤退した。有望な材料としては SiC/SiC コンポジットが、Ni 基超合金を超える耐熱材料として、次世代航空機エンジンのタービン翼への適用が期待されている。

［今後必要となる取組み］

炭素繊維の製造において、アクリル繊維を空気中高温で耐炎化（焼成）するため、製造エネルギーおよび CO_2 排出量のいずれもが鉄の約 10 倍である（1 トンの炭素繊維をつくるのに、20 トンの炭酸ガスがでる）。自動車用材料等として、より広く社会に普及するためには原料、製造プロセスの抜本的な見直しによる製造エネルギーおよび CO_2 排出量の大幅低減が求められる。

FRP の製造においては、プリプレグ、オートクレーブを用いる方法は、生産に長時間を要し、かつ設備投資も大きい。さらに、曲率半径が小さいとプリプレグ積層体に層うねりやしわが発生し、さらにこれらに起因してボイドや繊維配向乱れが発生し、生産性低下や部材不良率上昇を招きやすい。オートクレーブ法自身の技術開発課題としては、製造工程の短縮化、成形品の寸法精度向上などが挙げられる。一方、より高生産性かつロバストな生産技術として、脱オートクレーブ成形法の技術開発も志向すべきである。

航空機体向けなど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。

CFRP の航空機、自動車への本格的な適用はまだ始まったばかりで、その破壊過程、耐久性、耐衝撃性などに関して得られた知見は不十分である。材料の健全性の評価・検査技術の開発と併せて、そのデータを蓄積、解析する必要がある。

将来、機体、車体の部材が大幅に CFRP に置き換われば、従来の金属材料を前提とした構造設計が根本から見直されるはずである。ただし、金属材料が全て CFRP に置き換わる状況は考えにくい。鉄鋼、アルミニウム、チタンなどの異種材料を組み合わせて構造を作るマルチマテリアル化の傾向は必至であり、そのための異種材料接合・接着技術もキーテクノロジーとなる。

（３）科学技術的・政策的課題

複合材料の研究開発においては、構造物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。しかし更なる高性能化のためには繊維/樹脂界面の解析・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。

また現時点では日本は米欧に後れを取っており、ユーザー産業、素材産業の協働の促進を政府が強力に支援すべきである。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

前述の脱オートクレーブ成形法の一つとして、RTM 成形法（Resin Transfer Molding: 樹脂含浸)が挙げられる。これは繊維のみを予め積層し、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。RTM 成形法は 1970 年代に既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。一方、素材である樹脂についても、従来は主に熱硬化性樹脂が使用されてきたが、今後は射出成形、スタンピング成形等、各種成形法に比較的対応しやすく、かつ長時間の硬化工程も不要な熱可塑性樹脂の使用が高生産性の確立に有効であると考えられる。

検査技術としては、構造ヘルスモニタリング技術が注目されている。これは光ファイバセンサなどを CFRP 複合材料製造時に埋め込み、製造時、使用時のひずみ、振動、温度変化、損傷などをリアルタイムで検知・診断するもので、航空機認証機関による認証取得の段階にまで達している。

［注目すべきプロジェクト］

- 経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」（平成 23 年度～）炭素繊維製造時の消費エネルギー消費量・CO_2 排出量の半減及び生産性の大幅向上(大量供給)を実現する、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立することを目的としている。
- 経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造)」（平成 25 年度～）は、航空機用 CFRP 構造ヘルスモニタリング技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている。
- 経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（平成 25 年度～）では、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、より広く、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）とともに CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う。CFRP に関しては、量産車の超軽量化のための熱可塑性 CFRP(CFRTP)の開発を行っている。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、CFRP に関して名古屋大学をはじめ 1 大学、17 企業が加入した。
- 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」（平成 26 年度～では、航空機用樹脂、FRP がセラミックスコーティング、耐熱合金・金属間化合物等とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジンファンケース・ブレード向け CFRTP、航空機機体構造用の脱オートクレーブ成形技術、大型部材成形技術などが行われる予定である。全 26 採択課題のうち、1 拠点を含む 6 課題が航空機用樹脂・FRP 領域に属する。

（５）キーワード

複合材料、炭素繊維、CFRP、CFRTP、熱可塑性樹脂、高比強度、軽量化、脱オートクレーブ、低コスト化

（６）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	○	→	・物質・材料研究機構による、繊維/樹脂界面の解析・制御研究。 ・大学、独法による、CNTベースのナノコンポジットによる高性能化の研究開発。
	応用研究・開発	◎	↗	・経済産業省「革新的新構造材料等技術開発」、内閣府「革新的構造材料」による、CFRTP成形技術開発、脱オートクレーブ成形技術。
	産業化	◎	↗	・ボーイング787の機体構造重量の35%（全体50%）を製造。 ・東レがボーイング、帝人がエアバスに供給。 ・東レが2014年から3年間で炭素繊維・繊維事業に1300億円投資。
米国	基礎研究	○	→	・。Materials Genome Initiativeの下で計算材料科学による材料設計が進んでいる。 ・CNTなどを用いたナノコンポジットなどの基礎研究。
	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。
	産業化	◎	↗	・ボーイング787が機体重量の50%にCFRPを採用。 ・開発を目指す次期ボーイング777X主翼にCFRPを採用し、米国内で製造予定。
欧州	基礎研究	○	→	・ナノコンポジット、ナノ強化繊維強化プラスチックの研究への巨額の公的投資。
	応用研究・開発	◎	↗	・独連邦教育研究省(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。 ・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。
	産業化	◎	↗	・独ＢＭＷが2014年5月、炭素繊維の生産能力を現状の３倍である年産9,000トンにすると発表。昨年発売した、CFRPを全面的に採用した量産型電気自動車（ＥＶ）「ｉ３」の受注が1万台を超え。国外への販売も開始、今後の需要拡大に対応。 ・エアバスがA350XWBの胴体、機体にCFRPを本格採用。
中国	基礎研究	○	→	大学、国研によるCNT、炭素繊維複合材料に関する基礎研究。研究ポテンシャルの上昇著しい。
	応用研究・開発	◎	↗	・1960年に国家建材局の下に4研究所が設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。
	産業化	◎	↗	・FRP生産量は2000年に日本を抜き、中国複合材料工業協会(CCIA)は2020年には6百万トンに達すると予想（現在の3~4倍）。 ・大型旅客機の国産化の計画があり、それに合わせて炭素繊維の国産化を推進。 ・現在の主な用途は建材、輸送機器（自動車・鉄道車両、枕木など）、エネルギー（風力発電ブレード、パイプ）。

韓国	基礎研究	△	→	・他国に比べて顕著な活動・成果が見えない
	応用研究・開発	○	→	・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。
	産業化	○	→	・炭素繊維の生産系列設置が進む。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（7）参考資料

1) “新版複合材料・技術便覧”. 2011. 強化プラスチック協会、日本複合材料学会.
2) “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 . 物質・材料研究機構.
3) 武田展雄, 水口周, 伊藤悠策「先端複合材料構造の成形モデリングおよびモニタリングの最近の動向」日本機械学会論文集（A 編）78 巻 795 号 （2012-11）.
4) 武田展雄、越岡康弘「航空宇宙木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」（日本非破壊検査協会誌）第 60 号 3 号, 2013.
5) S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito, N. Takeda, Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor, Composites: Part A 48 (2013) 153–161
6) 新構造材料技術研究組合(ISMA)：　http://isma.jp/index.html
7) JST 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
8) デラウェア大学複合材料センター(CCM)：　http://www.ccm.udel.edu/
9) エジソン溶接研究所(EWI)：　http://ewi.org/
10) フラウンホーファー化学技術研究所(ICT)：http://www.ict.fraunhofer.de/en.html
11) フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所：
http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html
12) 英国接合溶接研究所(TWI)：　http://www.whitehouse.gov/mgi

３．３．２　水処理用分離膜

（１）研究開発領域の簡潔な説明

水処理における分離対象物質の性状や分離の目的に適した分離膜の開発を対象とした研究開発領域である。分離膜の工学的性能（分離性能、水透過速度、強度、加工性、安定性）の向上を目指した研究開発が進められている。また最近新たな概念に基づく革新的な分離膜が提案されてきている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

水の需要が近年世界的に増加する中、水資源の確保は世界的に喫緊の課題となっている。また、金属資源やオイルサンド、シェールガスなどの化石資源の採掘・採取は地下水汚染や汚染水の排出といった環境問題を引き起こしている。このような世界的な水不足・水環境問題を解決する手段としては、膜技術がその根幹をなすものと言え、膜を用いた水処理は現在非常に多くの関心を集めている。

膜分離プロセスを用いた水処理技術は，逆浸透膜（RO 膜）による海水淡水化，精密ろ過膜（MF 膜）/限外ろ過膜（UF 膜）による浄水処理，MF/UF/RO 膜による廃水処理および再生水処理に大別できる。

2025 年には水ビジネスは 100 兆円市場にも発展すると言われている。日本の膜産業が世界において優位にある今こそ、次世代型の膜材料や膜プロセスの開発に選択的に資金と人材を集中し、さらに一歩先に進むための取り組みが望まれる。

［これまでの取組み］

日本の膜メーカーは積極的に膜の開発を推進し、信頼性の高い優秀な膜を多数開発してきた。例えばＲＯ膜については、日本の 2 つの企業が競い合うように、塩の阻止率と水の透水性能を向上させた膜の開発を行ってきた。また別の日本企業は、中空糸タイプのＲＯ膜を開発し、サウジアラビアを中心に多くの市場に導入している。またＭＦ膜については、日本膜メーカーの１社は機械的強度と化学薬品に高い耐性を有するポリフッ化ビニリデン（PVDF）に着目し、独自の技術により多孔膜の開発を行ってきた。現在世界のトレンドはこの PVDF 製ＭＦ膜に追従する方向に向っている。

大学の取り組みに関しては、約 10 年前までは、膜の透過機構の解明や膜を用いたアプリケーションの探索が中心であった。しかし、数年前から革新的な膜そのものの開発に焦点が置かれるようになってきた。例えば、タンパク質を用いた超高速ろ過膜やナノカーボンを用いた分離膜、あるいは、正浸透膜（FO 膜）として用いる水チャネル導入脂質二分子膜などである。

世界には膜開発の研究拠点が数多く設立されているが、最近まで日本にはそのような拠点は形成されていなかった。日本における基礎研究から実用化に至る開発の基盤形成が望まれていたが、2007 年神戸大学に日本初となる先端膜工学センターが設置された。また最近では信州大学にアクア・イノベーション拠点が形成されている。

米国では膜素材に関する研究から膜の工業化に至る幅の広い研究が行われている。コロラド大学には 20 年以上の歴史を持つ膜センターが設置されている。この他イェール大

学、テキサス大学、ペンシルバニア州立大学、トレド大学などで研究が活発である。また高濃度塩溶液の浸透圧を駆動力とする FO 膜に最近特に関心が高まっているが、米国ではこの FO 膜に関して Hydration Technology Innovation 社、Oasys Water 社、Porifera 社等のベンチャー企業が多く設立されている。

欧州では、伝統的に基礎研究が盛んである。オランダのトウェンテ大学には世界を代表する研究グループがあり、ドイツではアーヘン工科大学やエッセン大学、フランスではモンペリエ大学、英国ではインペリアルロンドン大学、ベルギーではルーベン大学で研究が盛んである。

中国は基礎研究から産業化まで急速にレベルが向上している。排水基準の厳格化が応用研究を後押ししている。浙江大学や南京工業大学には大規模の膜センターが設置されており、また産業界では 100 社をはるかに超える膜メーカーが設立されている。

韓国の動向としては、RO 膜に関する大型のプロジェクト（seaHERO）や水処理に関する大型プロジェクト（Eco-Smart Waterworks System）の影響もあり、膜の研究が非常に活発である。2014 年 7 月に中国で開催された世界膜学会（ICOM2014)において、中国の次ぎに参加者が多かった国は韓国であった（日本は 3 番目）。

シンガポールでは、National University of Singapore（NUS）及び Nanyang Technological University （NTU）において、研究が非常に活発である。特に NTU には大規模な膜センターが設置されている。NUS では特徴的な中空糸膜や FO 膜の開発に注力しており、NTU では、バイオファウリングに関する基礎研究も盛んである。産業界では、Hyflux 社を中心に、海外プラントの受注が盛んである。

現在水処理膜分野での日本の膜メーカーは高い競争力を維持している。しかしながら中国，韓国、シンガポールなどのアジア勢の追い上げも激しく，引き続き日本が世界の水処理技術をリードするためには、この分野の研究開発をさらに活発化させる必要がある。

［今後必要となる取組み］

膜を用いた水処理の最大の問題の 1 つは、膜操作中に孔の目詰まり等により膜性能が低下する現象（膜ファウリング）である。膜ファウリングの抑制についてはこれまで数多くの研究がなされてきたが、ファウリング機構の解明や抑制については、現在でも完全には達成されているとは言い難い。これは、膜ファウリングに影響を与える因子が非常に多いことに起因する。膜側の因子（膜の親水・疎水性、孔径、多孔度、膜表面粗さ、膜表面ゼータ電位等）と処理水側の因子（ファウラントの種類、ファウラント濃度、ファウラントサイズ等）のかけ算によりファウリングが決定されるため、影響を与える因子は無数に存在する。そのため、ある水質の処理水に対してファウリングを有効に抑制していた膜が、他の水質の処理水に対しても有効とは限らない。これまでのファウリングの検討では、市販の膜を用いて、単一の処理水について検討を行うといったケーススタディ的な研究が数多く行なわれてきている。しかし、ケーススタディの積み上げだけでは本質的な解明には至らない。今後は膜ファウリングに関して数多くの系統的なデータを蓄積し、どのような成分の処理水に関しては、どのような材質や構造の膜が最適であるかといった設計指針の確立が重要である。そのためには、１研究室の規模を超えた

より大きな組織による総合的な実験的検討と、ファウリング現象のシミュレーションといった理論的検討をさらに強化する必要がある。低ファウリング膜の開発を成功させた国が、世界において次の水ビジネスをリードすると言っても過言ではない。

これまでは、多孔膜は主に高分子溶液の相分離法により、また RO 膜は界面縮重合法に作製されてきた。今後は、膜性能（透水量、シャープな分画性、高強度等）の更なる向上を目指して、新たな膜材料の導入や膜作製方法の確立に向けた開発を精力的に推進していく必要がある。例えば、ナノカーボンや金属有機構造体（MOF）といった空間空隙制御材料や、アクアポリンに代表される水チャネル（タンパク質）を導入した膜の開発に、今まで以上に取り組む必要がある。これらの膜では、現状の膜の透過性と比較して、2 桁以上優れた透過性を達成できる可能性を秘めている。またオイルサンドやシェールガスの採取に伴って排出される廃水には高濃度の油分が含まれており、浄化に必要なコストはエネルギーコストにも影響を及ぼすと想定されることから、このような廃水にも対応できる疎水性物質耐性のある水処理分離膜の開発が重要である。日本においては、この様な有機溶剤に耐える膜の開発にはあまり焦点が当てられていなかったが、今後は無機膜（ダイヤモンド様カーボン膜等）や有機―無機ハイブリッド膜の開発を通して、高いロバスト性を達成する必要がある。

最近、次世代の水処理技術として FO 膜法が注目されている。海水淡水化において現在主流である RO 膜法では、水流束の駆動力として浸透圧よりも高い圧力を海水側に負荷させる必要がある。一方 FO 膜法では、海水よりも高い浸透圧を有する高浸透圧溶液（駆動溶液：Draw Solution, DS）を用いれば、海水側から DS 溶液側に自発的な水透過が起こるため、究極の省エネルギー海水淡水化プロセスが可能となる。また海水など高濃度塩水と河川水などの淡水間の浸透圧差を利用した浸透圧発電の研究も進められている。このような FO 膜プロセスの実現には、FO 膜プロセスに特化した高性能の膜の開発が重要である。従来の市販 RO 膜を FO 膜プロセスに適用した場合は、高い透水量は得られない。これは、RO 膜があくまで RO 操作に最適な膜に設計されているためであり、今後 FO 膜プロセスのための膜の開発をさらに活性化する必要がある。FO 膜プロセスの実現に不可欠なもう一つの開発要素は、DS 物質の開発である。現状は世界各国がしのぎを削ってこの DS 物資の開発に注力している。FO 膜プロセスの鍵を握るとも言える DS 開発に関しては、世界において日本が一歩出遅れた状態にある。今後 FO 膜プロセスの実現に向けて、我が国においても DS の開発に早急に取り組む必要がある。FO 膜を用いた水処理プロセスは，従来の RO 膜プロセスとは全く概念の異なる革新プロセスである。日本の先導的な技術推進のもとで、革新プロセスの実現を目指すことが望まれる。

（３）科学技術的・政策的課題

分離膜材料は、実プロセスで性能と耐久性を示す必要がある。従って有望な材料に対してこのようなプロセスでの評価を行いつつ、同時により基礎的な、素材の選択や構造の制御あるいは革新的な製造手法の開発を行う必要がある。このような基礎と応用の連携研究は、JST 等でも実用化研究として実施されているが、通常、実用化に結びつかない開発案件が圧倒的に多くなっている。本研究開発領域においてこのような状況を改善するためには、目的分野に応じた分離膜材料の工学的性能（分離性能、水透過速度、強

度、加工性、安定性）を明確にし、それを達成する材料を創製するとともに、目的分野における実証試験を繰り返す必要がある。

膜材料をはじめとする高分子材料の分野は、化学産業界との連携を強め始めてはいるが、高分子教育、特に物性物理学や化学工学の教育が十分に行われていない。高分子物性は、高度な基礎科学の一つであるが、材料科学としての重要性が十分に認知されておらず、その教育を企業に依存しているのが実状である。大学における高分子研究がサイエンスの先端研究に偏っており、技術の空洞化が起こりつつある。また、応用研究を担う人材が不足しているため、米国のように製品化と結びついた基礎研究も展開しづらい。高分子の基礎教育と同じく、実用化も企業まかせという風土を変える必要があり、従来のサイエンスに重点を置いた研究プロジェクトのみならず、実用化を見据えたプロジェクトを立ち上げる必要がある。

分離膜による水処理の研究開発では、基礎から応用まで広範な学術領域、技術領域からの知見をもって総合的に取り組む必要があり、このような取り組みを可能とする研究拠点の形成が不可欠である。世界では、そのような研究拠点の形成が急速に進んでおり、日本においても研究拠点の形成と整備が急務である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

従来の分離膜に代わる新しい分離膜として、我が国においてフェリチンを用いた超高速ろ過膜、ダイヤモンド様カーボン膜、あるいはグラミシジン A を水チャネルとして用いた脂質二分子膜の開発が行われている。特に水チャネル導入脂質二分子膜の開発では、これまで高い阻止率が得られていなかったが、最近非常に高い塩の阻止率を示しながら、市販膜と比べて 2 桁程度高い水透過性を示す膜の開発が報告された。

ＦＯ膜の開発については、中空糸形状の膜を中心に非常に活発に報告がなされている。この分野では特にシンガポールが精力的であり、前述の NUS や NTU では、競うように、高い水透過性と高強度を有する膜の開発を報告している。我が国においても FO 膜に用いる支持体構造を有効に制御した膜が開発されている。FO 膜プロセスで用いる DS 物質の開発についても多くの新材料が創出されている。例えば感温性高分子、磁性体微粒子、あるいは Switchable polarity solvent（CO_2/Air 吹き込みによる再利用）等である。このような FO 膜や DS 物質の今後の研究開発の動向が注目される。

［注目すべきプロジェクト］

JST の CREST では 2009 年度に研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」が発足し、多くの水処理プロジェクトが進行中である。文部科学省の革新的イノベーション創出プログラム（COI）では、「アクア・イノベーション拠点」が 2013 年度に採択され、信州大学、長野県、企業との共同で、ナノカーボンなどを用いた耐久性のある水分離膜の開発、分離膜などのモジュール化、プラント量産化、ビジネス化などに取り組んでいる。また、地域イノベーション戦略支援プログラムとして、神戸大学や兵庫県を中心に「革新的膜工学を核として水ビジネスにおけるグリーンイノベーションの創出」のプロジェクトが進行中である。

さらにNEDOの省水型・環境調和型水循環プロジェクトにおいて、膜透過加圧エネルギー等の削減を目指したRO膜、NF膜の研究開発が行われている。また国土交通省ではMBR（メンブレン・バイオリアクター）の国内での本格的な普及や海外への展開を図るため、A-JUMP プロジェクトを実施した。さらに下水道施設のコストを大幅に削減し、省エネルギー・創エネルギー効果の増大に寄与する革新的MBR（膜分離活性汚泥法）技術について、実規模レベルの施設を設置して実証を行うB-DASHプロジェクトが進行中である。さらに2013度に終了したものの、内閣府の最先端研究開発支援プログラムの1つとして「Mega-ton Water System」の研究プロジェクトが実施されてきた。

世界の動向としては「Desalination and Water Purification Research Project」（約5億円、米国）、「National Centre of Excellence in Desalination Australia (NCEDA)」（約40億円、オーストラリア）、「Eco-Smart Waterworks System」（約75億円、韓国）等、大規模プロジェクトが多く実施されている。またシンガポールでは水不足の高い危機感を反映して、特に数多くのプロジェクトが進行中である。

（５）キーワード

逆浸透膜、限外ろ過膜、精密ろ過膜、正浸透膜、多孔性材料、ナノ細孔、ファウリング、メンブレン・バイオリアクター、水チャネル、脂質二分子膜、ドローソリューション

（６）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	○	↗	ナノテクを活用した新素材や革新膜の研究が次第に増えてきている。FO膜やDSの研究は最近やや活性化の兆しが見える。ファウリングの低減や水質評価に関する研究が、大学を中心に盛んになってきている。
	応用研究・開発	○	→	RO膜、ナノフィルター(NF)膜、MF膜、UF膜の技術課発水準は依然として高い。MF膜、UF膜は韓国、中国に押されつつある。FO膜については国内企業では実用化されていない。
	産業化	○	→	RO膜、NF膜は産業としても優位を保っているが、MF膜、UF膜は、性能及び品質では優れているものの、安価な韓国製、中国製にビジネスで押されている。国内の膜利用水処理施設の建設が活発ではないため、アジア各国に進出しているが、採算面は厳しいと思われる。またMF、UF膜では浄水処理やMBRに関して米国への進出も活発である。
米国	基礎研究	◎	↗	膜素材に関する研究に参入する大学・研究機関の数が益々増えている。CNTやアクアポリンを応用した膜だけでなく、ナノファイバー上に界面重合でポリアミドを形成するという研究や耐塩素性を高めたRO膜の開発も発表されている。また、RO膜内部の透過現象のシミュレーション研究など米国ならではの研究も行われている。
	応用研究・開発	○	↗	FO膜の開発について、Hydration Technology Innovation社、Oasys Water社、Porifera社等のベンチャー企業が多く設立されている。
	産業化	◎	↗	Dow Chemical社は、傘下に収めたOmexellのUF膜を前処理にしたRO膜とのIMS提案で市場に攻勢をかけている。NanoH2O社がポリアミド複合RO品・乳製品・飲料など特殊用途を中心に事業を進めている。GEは産業用水処理に軸足を置いている模様。米国では、海水淡水化は環境問題を理由に進展が止まっているが、下水再利用は益々盛んである。
欧州	基礎研究	◎	↗	MEDINAプロジェクトを中心にEU全域において、分離膜及び分離プロセス及び脱塩技術の価値評価等の研究が盛んに行われている。オランダやドイツでは、特殊パターン形状膜の研究やファウリングの研究が盛んである。

	応用研究・開発	○	↗	RO膜、NF膜の技術開発は弱いが、UF膜、MF膜の技術開発は盛んであり、新たな膜及びモジュールが開発されている。
	産業化	◎	↗	BASF社がInge社を、Pentair社がNorit社を傘下に収め、巨大資本を背景にした水処理事業を展開し始めており、Siemens社を追っている。Lanxess社がRO膜エレメントの工場を建設しており、Dow社同様、イオン交換樹脂事業とのシナジー効果を狙っている模様。
中国	基礎研究	○	↗	膜研究の実力が上がってきている。水処理においては、原水の汚染が激しいため、AOP等の分解技術の研究レベルが向上している。
	応用研究・開発	○	↗	排水基準の厳格化に伴い、下水・産業廃水再利用の技術開発が盛ん。各開発区で、官学産の連携が進んでいる。
	産業化	○	↗	ヴォントロン社など、RO膜、NF膜の性能は向上しているものの、海外勢に追いつくところまでではない。UF膜、MF膜については国内に100社以上の会社があり、低価格を背景に事業拡大をしている。膜天、立昇、美能は、膜性能も悪くなく、シェアを伸ばしている。下水再利用プラントが特に多く、海水淡水化プラントも増えてきている。
韓国	基礎研究	○	↗	SeaHEROプロジェクトを元に、多くの大学が膜素材から水処理の研究をしているが、レベルはまだ高くない。最近大型プロジェクト(Eco-Smart Waterworks System)がスタートしている。FO膜研究、ファウリング研究など精力的に行っている。
	応用研究・開発	△	↗	技術導入が多く、自社開発は少ない。SeaHEROの海水淡水化デモプラント計画は、漁業者の反対により、うまくいっていない様子。MBRによる廃水処理施設が多く建設されている。
	産業化	○	↗	Woojing Chemical社が低価格を背景にシェアを伸ばしているが、東レが買収。Koolon社などがUF膜で市場に参入開始。大手エンジニアリング会社Doosan社は、中東を中心に海水淡水化大型プラントを受注、急速に拡大している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

３．３．３ 高温超伝導送電

（１）研究開発領域の簡潔な説明

高温超伝導ケーブルによる安定した無損失送電の実現を目指す研究開発領域である。高温超伝導材料の結晶性や化学組成、電子状態と臨界電流特性の関係など、安定利用の基本となる超伝導現象の分野横断的な理解に加え、これらの設計や制御、および通常電力供給システムとの効率的で安全な接続を可能とする要素技術、長距離のケーブルを長期間効率的に冷却するシステム技術の確立などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

エネルギー分野における現在の課題は、電力供給の増大をエネルギー効率の向上と電力の脱炭素化を同時並行的に可能とする技術開発である。発電－変電－送電－配電－需要家に至る電力供給の中で、我が国における送配電ロスは約 5%であり膨大な電力が熱となって失われている。世界平均は約 8%であるが、発電量が急伸している途上国（インドなど）では 20%以上損失している国もあり、発送電システムの拡大と同時に送配電効率の改善が切望されている。

超伝導ケーブルは、ロス零で送配電可能な技術を提供できる。また、従来の金属導体（銅やアルミニウム）を用いる送配電技術では断面積当たりの通電電流密度は約 1A/mm^2 にとどまり、大電力の供給には高電圧化が必要であったが、超伝導ケーブルにより低電圧・大電流化の方向が可能となる。導電材料・電気絶縁材料・金属製保護材料で構成される電力ケーブルの導電材料部分を超伝導線にすることにより従来の 1/100～1/200 へと断面積を減少させ、低電圧化により電気絶縁材料も薄くすることで、ケーブル断面積を格段に減少できる。このため、直径が 15cm 程度の管路に敷設することができる。また、超伝導ケーブルは同容量の同ケーブルに比べ、重量が約 1/4 となり、省資源という意味でも効果が大きい。さらに、中間変電所を削減することで、変換ロスを削減するとともに電力システムの簡素化が図れる。これらより、超伝導ケーブルによる送電は総合的に経済性に優れる。

超伝導ケーブルは常時冷却が必要であるが、電流容量が多く設備利用率の大きなケーブルほど冷却の負担が相対的に小さくなる。このため、将来は各国の動脈的な役割を持つ長距離幹線ケーブルを超伝導化することが考えられる。また、電力大量消費地域である大都市の電力需要増への対応にも超伝導ケーブルが適している。このほか、日本では鉄道の直流電化区間における電線の超伝導化の検討も重要である。

［これまでの取組み］

超伝導に関して、その現象の基本的な機構は理解されているが、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子については未解明な点が多く、超伝導現象の発見以後 100 年を経た今日でさえも、これらの物性を予測して新超伝導体を設計することができていない。高温超伝導の研究は基礎・工学両面とも 1986 年以降の銅酸化物高温超伝導体の発見以降、一気に新しいフェーズに入り、新規高温超伝導体創出、新高温超伝導材料の開発に向けての研究が中心となった。その後の四半世紀の間に日本では、ビスマス系銅酸化物

（1988 年）、二ホウ化マグネシウム（2001 年）、鉄ニクタイド（2008 年）など学術的にも工学的にも世界的に大いに注目される超伝導物質が発見されてきた。銅酸化物高温超伝導材料に関しては、基本特性や超伝導現象の理解などの基礎研究、長尺超伝導線の製造技術の開発、超伝導ケーブルの基本構造の開発などについて、2000 年代初頭までに大まかな輪郭が得られた。この銅酸化物高温超伝導材料の開発において日本は世界を今なおリードし続けており、特に線材を中心に材料特性、量産性の改善がこの数年顕著である。

超伝導ケーブルに用いられる長尺高温超伝導線材として、ビスマス系線材（臨界温度：~110 K）が日本の住友電工社で、イットリウム系線材（臨界温度：~90 K）が米国 AMSC 社、日本のフジクラ社、古河電工社傘下の SuperPower 社で製造されており、これらがケーブル製作に用いられてきた。本格的な高温超伝導ケーブルの試験は 2001 年に日本で始まり、日米欧および中国、韓国でも実施されているが、一部を除いて変電所内や工場内でのプロジェクトであった。2006 年には米国、Albany 市において初めて実系統に接続する試験が行われた。日本初の実系統連係試験は NEDO プロジェクト「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、東京電力、住友電工、前川製作所が参加して、東京電力・旭変電所で 2012 年 10 月 29 日に長さ 240 m のケーブルを実系統に接続した系統連係送電が開始され、計画通り 2013 年 12 月 25 日まで 1 年以上の長期安定運転が検証された。さらに、これまでは交流ケーブル応用であったが、直流ケーブル応用開発がここ数年世界で開始された。2009 年度に開始された JST/S-イノベにおける「鉄道用超電導ケーブルの開発」、平成 24 年度の補正予算でスタートした「高温超電導直流送電システムの実証研究」（経済産業省）が我が国おける代表的なものである。

［今後必要となる取組み］

高温超伝導線の性能向上は継続的に進展しているが、材料自体は現状の 5～10 倍以上の能力を持っている。さらなる向上には、高温超伝導材料特有の課題である結晶粒界の組成的・微細組織的・電磁的特性の基礎的な理解進展が不可欠である。例えば、ビスマス系超電導線は、Bi、Pb、Sr、Ca、Cu、O と 6 元素系で 3 つの超伝導相、10 以上の非超伝導相が出現して複雑な粒界を構成するが、超伝導電流を制限している粒界の特性は十分には分かっていない。

高温超伝導ケーブルは超伝導状態を保つために液体窒素で冷却するが、液体窒素温度領域における冷凍機の効率を高める必要がある。現状の冷凍機は、理想的なカルノー効率に比べて高いもので 30%程度（COP： 0.1 程度）であり、運転時の経済性向上のため、冷凍機の基礎的な研究を基に 40%以上を目指すことが望まれる。

これまでの高温超伝導ケーブル試験を通じて、超伝導ケーブル自体の通電特性は設計値通りの良好なものであることが明らかになっており、超伝導ケーブル間の接続技術もほぼ確立され、大容量化、長尺化に一定の目処が立っている。しかし、冷却技術についてはシステム効率が低いことに加え、長期運転に対する実績や数 km 以上の長距離ケーブルの冷却の実証が不足しており、断熱技術を含めた冷却技術の向上、信頼性の確保が今後の重要な取り組みとなる。また、事故対応も含めた安全性の検討、実適用箇所の検討などの取り組みが必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

実用的な高温超伝導材料・ケーブルや超伝導送電技術の確立に向けて、材料物性の支配因子を基礎的な超伝導現象にまで遡って理解する努力が必要であり、あらゆる専門領域の研究者を産学から集結させ交流させる場（横断的研究組織）を設けることにより、学術分野間や基礎研究－材料開発技術間の垣根を取り除くことが重要である。別々に育まれてきた技術・知見の融合は双方の研究を加速させ、新規高機能超伝導物質の創製や、高機能超伝導材料・機器の開発につながることが期待される。

鉄道用超伝導ケーブルが注目を浴びているが、応用分野としては従来の電力分野を超えて進展しており、文部科学省、経済産業省にとどまらず国土交通省などの所管領域にも関係してきており、省庁間の連携が重要になる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

直流ケーブル技術の開発が日本、米国、中国、韓国、EU、ロシアなどで進められており、石狩（計 2.5 km）、サンクトペテルブルグ（2.5 km）、鉄道き電線などでの直流超伝導ケーブルのプロジェクト割合が増えてきている。また、米国や日本において、限流機能付き超伝導ケーブルの提案がなされた。

数 kW～20kW 級超伝導ケーブル用の冷凍機の開発が日本やフランスで進められており、液体窒素冷却で高効率を示す冷凍機の設計・開発が進み、近くケーブル試験にて COP=0.1 が実証される予定である。

［注目すべきプロジェクト］

東京電力－住友電工－前川製作所による NEDO プロジェクト「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」において 1 年以上にわたる送電実績が得られたが、冷凍機冷却技術には課題が残った。これに対し、最近決定した後継プロジェクト（2014～2016 年度）では新しいブレイトンタイプの冷凍機を用いるなど、システム全体の長期安定性、信頼性を高める試験が実系統接続の形で実施される。

また、中部大学が実施してきた 200 m 長直流超伝導送電試験実績をベースに、石狩新港地区にて 2000 m＋500 m の 2 条の直流超伝導ケーブルを設ける経済産業省プロジェクト（2014～2015 年度）が進行中である。これは民間から提案されたプロジェクトであり、直流の電力を大量に使用するデータセンターへの給電を目的にしている。

一方、長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる研究開発とあわせて超伝導応用の学術的・技術的基盤の着実な構築を目指す JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム（S－イノベ）「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」において、鉄道総研が中心となって「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」課題が実施されている。直流区間の鉄道き電線超伝導化では現在 300 m 長まで実証試験が行われたところであり、今後は長距離システムへの展開方法、鉄道電力システムの効率改善やエネルギー面での効果が検討・実証がなされる。

海外では、ドイツのエッセンで運転が始まったばかりの 1 km 交流超伝導送電ケーブ

ルシステムの運転状況・実績には、大都市域低圧交流送電の超伝導化の有効性の観点から注目が集まっている。その他にも、ドイツの AmpaCity プロジェクト、ロシアの St. Petersburg プロジェクト、中国科学院のアルミ精錬直流ケーブルプロジェクト、韓国の済州島プロジェクト、オーストラリアの Queensland プロジェクト、米国のシカゴプロジェクトなどが行われている。

（５）キーワード

・超伝導、高温超伝導、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度
・超伝導材料、超伝導ケーブル、超電導ケーブル
・超伝導技術インターフェース、再生可能エネルギー、蓄電技術、エネルギーインフラ
・超伝導送電、直流送電、冷却システム、液体窒素

（６）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	◎	→	大学や研究独立法人を中心に新規超伝導物質の探索、超伝導現象の理解、高温超伝導線の応用基礎物性の評価など継続して研究が進んでいる。既に工業製品化されたビスマス系超電導線は500MPa以上の高強度化に進展が見られ、超伝導ケーブル以外にもマグネット応用への道が開けつつある。YBCO超伝導線は引き続き国プロでの性能向上が実施されている。ビスマス系線材（1G線材）、イットリウム系線材（2G線材）ともに線材作製、特性評価技術など全般的に高いレベルにあり、多くの産学の研究者がいる。1G線材の住友電工社、2G線材のフジクラ社はともに独自の製造技術を高めることによる性能改善に成功しており、古河電工傘下のSuperPower社では意図的にピンニングセンターを導入した長尺2G線材を開発し販売している。
	応用研究・開発	◎	↗	1G線材はAlbany市や旭変電所でのプロジェクトで実績を挙げたことに加え、エッセン、サンクトペテルブルグ、石狩など1 km以上のプロジェクトでも使用されるなど、着々と実績を蓄えている。また、2G線材を用いた交流ケーブルでは最高の275 kVの高圧応用試験や大容量通電と低損失化に成功する[5]など、超伝導ケーブル応用の幅を広げる試験に利用されている。また、鉄道用超伝導ケーブル、直流送電システムの実証研究、2014年度から新規にスタートした交流ケーブルの安全性・信頼性実証研究など、実用化へ向けたプロトタイプ開発と実証、実用化へのネックとなる項目を検証するプロジェクトが進んでいる。鉄道用超伝導ケーブルの開発では、試験線で超伝導ケーブルによる給電による電車の走行試験も実施されている。
	産業化	○	→	現状では長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。超伝導送電技術の導入は基幹インフラに関わるものであり、産業化に至るかどうかは電力会社や国策によるところが大きい。外国向けのケーブル用線材、またはケーブルそのものの出荷形態での産業化のほうが早い可能性がある。なお、データセンターや工場内、港湾施設などインフラと関わらない局所的な直流送電応用も有望であり、石狩プロジェクトが成功すれば同様なプロジェクト提案が続く可能性が高い。ケーブルは超伝導磁石よりも多量の線材を必要とすることから、ニーズに応じて線材の生産設備が拡充されていくことが考えられる。
米国	基礎研究	◎	→	大学を中心に超伝導線の応用基礎物性研究は継続して進められている。国立研究所としては、DOE Energy Frontier Research Centerの一つとしてBrookhaven National Laboratoryに設置されているCenter for Emergent Superconductivityが高温超伝導の基礎研究を今後も4年間継続することが決まった。2010年頃より国からの研究費が大幅に削減されたが、企業、国立研究所にはそれまで15年間の莫大な基礎研究成果の蓄積があり、長尺2G線材の量産化や高機能化がAMSC、SuperPowerの2企業で進められている。
	応用研究・開発	○	→	1990年代後半より超伝導ケーブル試験が始まっており、2006年に世界初の実系統接続試験を行うなど、実績が最も多い。現在もLIPAプロジェクトにおいて実系統600 mの運転が続けられている。Dept. of Homeland Securityが支援する新しいケーブルプロジェクトがAMSCとシカゴのCommonwealth Edisonでスタートした。これは限流機能付きの超伝導ケーブルで複数の変電所を結び電力の安定供給を目指すものでありが。この限流機能付き超伝導ケーブルについては、その実現性に多くの研究者が疑問符を付けており、帰趨が注目される。
	産業化	○	→	日本同様に長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。ニューメキシコ州にある3大電力網の接点での超伝導ケーブル接続が検討されており、これが着手されれば長尺超伝導ケーブル開発の技術が進展する。YBCO超伝導線はベンチャー2社が引き続き製造・販売中である。

欧州	基礎研究	◎	→	2G線材について線材性能を高めるための基礎研究は大学や国立研究所を中心に根強く続けられており、新規ピンニングセンターの導入方法の開発や、その効果に関する緻密な研究も盛んで、長尺線材開発を視野に入れたプロジェクトEUROTAPESが進行中である。概ね大学を中心としたプロジェクトが進行中であるが、長尺線材開発への展開は日米に遅れをとっている。
	応用研究・開発	◎	↗	欧州のメーカーでは1G線材はほとんど開発の対象になっておらず、また2G線材については長尺線材開発・量産の実績がほとんどない。ケーブル製造はNexans社が実績を挙げている。ドイツのエッセンではAmpaCityプロジェクトとして世界最長の1km超伝導ケーブルの系統連係試験が2014.4.30に2年間の予定でスタートした。またロシアのサンクトペテルブルグで系統連係予定の2.5km直流超伝導ケーブルの製造が2014年に終了予定であり、その後二つの変電所を直流で結ぶ予定である。欧州では、MgB_2超伝導線材の応用が最も活発であり、これまでは超伝導磁石開発が主体であったが、巨大加速器への電力供給用大容量給電線への採用が決まったほか、ヘリウムガスもしくは液体水素冷却下でのケーブルの応用が検討されている。
	産業化	△	↗	ビスマス系超電導線、YBCO超伝導線ともに工業製品として出荷できるメーカーは未だ育っていない。しかし、欧州初のエッセンの実系統プロジェクトが順調にスタートし、新しい局面を迎えている。また、アフリカで電力生産し欧州へ送電する計画では、直流送電でMgB_2線材を使うことも検討されている。
中国	基礎研究	△	→	大学や国立研究所を中心に高温超伝導線の応用基礎特性に関する研究は継続されている。しかし、新物質探索以外の超伝導に関わる基礎研究は活発でなく、1G、2G線材についても実績に乏しい。産学協同でInnost社が1G線材を開発しているが、特性面で見劣り国内で試用されたのみである。
	応用研究・開発	○	→	長尺1G線材についてはInnost社が開発を行っているが、未だ特性面で住友電工社製品に劣る。また、長尺2G線材の開発実績は無い。ケーブルについては短距離ではあるが工場内や変電所内での運転実績を持ち、中国科学院が実施しているアルミ精錬工場への10kA直流超伝導ケーブルの運転は継続中である。
	産業化	△	→	YBCO超伝導線のベンチャーが上海などに設立されたが、工業製品化には至っていない。中北部の白銀市にこれまでに開発してきた超伝導送電関連の設備を集約しているが稼動実績は不明である。また、西方から東方への送電計画があるが、超伝導技術が採用される可能性は低いと考えられる。国内のケーブル製造技術に乏しく、日欧米の技術に頼らざるを得ないのが現状である。
韓国	基礎研究	△	→	大学や国立研究所を中心に高温超伝導線の応用基礎特性に関する研究は継続されているが、1G線材に関する基礎研究は活発でなく成果もほとんどない。また、2G線材については独自の手法での開発が行われており、高速生産プロセスの確立が産学共同研究で進められている。
	応用研究・開発	○	↗	上記産学共同研究を経て、SuNAM社が長尺線材開発にようやく成功してきたところであるが長尺線材の歩留まりが不十分で、ケーブルは他国製の1Gまはた2G線材を用いLS社が製造している。国プロなどでケーブル試験が続けられており変電所内で500 mケーブルが試験運転されていた（2013年4月終了）。韓国電力が中心に済州島における80kV直流超伝導ケーブル（500m）が敷設され、今年中に試験が開始される予定（半年間）である。これに引き続き、154kV交流ケーブルの試験も予定されている。
	産業化	△	→	YBCO超伝導線のベンチャーが存在するが、工業製品として出荷できるところまでは至っていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) JST 戦略的イノベーション創出推進“超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出”：http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h21theme04.html
2) NEDO イットリウム系超電導電力機器技術開発：http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00018.html
3) NEDO 高温超電導ケーブル実証プロジェクト：http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00155.html
4) 石狩超電導直流送電プロジェクト:http://www.city.ishikari.hokkaido.jp/content/000038804.pdf
5) NEDO イットリウム系超電導電力機器技術開発：http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00018.html
6) 超伝導送電に関する最新のレビュー：　下山淳一、パリティ 28 (2013) pp.46-50.
7) http://www.rtri.or.jp/press/2013/20130724.html
8) http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/saishin/54.pdf
9) http://www.nedo.go.jp/koubo/DA2_100062.html
10) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), M. Stemmle et al.: Paper No. 4LOr3B-01
11) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), S. I. Kopylov et al.: Paper No. 4LOr3B-05
12) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Dong Zhang: Paper No. 4LPo1H-06
13) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Byeongmo Yang et al.: Paper No. 1LOr2C-05
14) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Richard Taylor et al.: Paper No. 2LPo2N-04
15) http://www.utilitydive.com/news/comed-to-install-worlds-largest-superconductor-cable-in-chicago/291362/
16) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), T. Nakashima et al.: Paper No. 1MOr2A-02
17) 超電導 Web21, http://www.istec.or.jp/web21/web21.html, 2014.3.3, p.3
18) http://www.bnl.gov/energy/ces/news.asp?a=1651&t=pr

３．３．４　センシングデバイス・システム

（１）研究開発領域の簡潔な説明

自然・環境のモニタリング、エネルギー消費の削減、健康管理、利便性が高く安心・安全な生活の維持などを目的に、各種のセンシングデバイス（センサ）とこれらを用いたセンシングシステムの実現を目指す研究開発領域である。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、およびその電源供給、通信方法、制御方法を含めたシステム設計などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

最近は省エネルギーに対する社会の意識も高まってきており、使用していない電気機器の電源を落とすことや、無駄の少ない製造・生産プロセスを実現するための各種センサの搭載・利用が必要になってきている。また、健康な生活を維持していくためには、体の異常や病気の早期発見が不可欠であり、体の組織や体内物質の日々の検査・モニタリングが望まれ、これが超高齢化に対応する予防医療促進とそれによる医療費削減にも資することが期待される。一方、自然環境を保全し、自然災害から地域や生活を安全に守るためには、CO_2 濃度やオゾン層破壊のフロン物質濃度、有害汚染物質濃度、温度、気圧、風力、地震、地殻変動などの各種情報をきめ細かくモニタリングすることが望まれる。人間が入ることが難しいインフラの保全、放射線強度の高い原子力施設や高温の火事現場などでは、その状態を監視できる特殊な観測装置も重要である。

一方、近年では生活における利便性向上、使い易さの向上、安全性の向上などが求められ、スマートフォンのような携帯情報機器や自動車などに多くのセンシングデバイスが搭載されるようになっており、生活の場においてセンサの使用量は爆発的に増大している。例えば、スマートフォンにおいては、3 個程度の MEMS マイクロフォン、3 軸加速度センサ、3 軸ジャイロスコープ、3 軸地磁気センサ、圧力センサ、タッチセンサ（タッチパネル)、複数個のイメージセンサ（カメラ）など多数のセンサが搭載されている。2006 年に 1 千万個以下だった世界の年間センサ使用量は 2012 年には 35 億個を超え、2020 年には 1 兆個を超えることが見込まれる。このような大量のセンサの普及は、従来 IT 機器とのみつながっていたインターネットに、実世界の様々なモノを直接つなぐ「モノのインターネット（IoT、Internet of Things)」の発展と相俟って、すべてのものをつなぐ IoE(Internet of Everything)として新しい世界を切り開こうとしている。

そのような社会の実現には、これまでのセンサの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化などに加え、新しい概念のセンサ、センサの応用技術、そして研究開発用の高価なセンサを一般に普及させるための桁違いの低コスト化技術が求められる。また、今後の発展が期待される自動運転自動車、介護・家事ロボット、ドローン（無人飛翔体）などの実用化でも、多くのセンサが使われると考えられ、ともに、システムとしての安定性や信頼性が必須であり、これら用途へのセンサへの要求はさらも厳しいものになる。

［これまでの取組み］

センサネットワークとビッグデータの活用による社会的課題の解決を目指す研究開発

の潮流が本格化しつつあり、環境や人工物のモニタリングなどへの応用が検討されている。

物理現象を利用したセンサ（物理センサ）に関する研究のほとんどは MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を用いたものである（電気学会主催のセンサー・シンポジウムでの報告）。スマートフォンに用いられているセンサの多くも MEMS 技術によるものであり、また、今後必要になるセンサネットワーク用の多量のセンサにも、低コストで大量生産性に優れる MEMS 技術が重要になることは疑いなく、この分野の研究開発が益々活性化すると思われる。MEMS 技術を応用して小型で無線機能を有するセンサ端末を利用したセンサネットワーク技術の開発が進んできている。

米国では代表的なベンチャー企業である MEMSIC や InvenSense などが、センシングデバイス・システムのビジネスで成功を収めている。欧州では学と公的研究機関とが場所的にも人材的にも近くにあるため、デバイス・システムの組織的な研究開発力が高く、ゼロから実用化開発までを組織的に一気通貫で行える体制になっている。公的研究機関は公的資金だけに頼らず、市場原理によって自立して発展することができており、IMEC（ベルギー）、CEA-LETI Minatec（仏）、Fraunhofer Institute（独）、CSEM（スイス）などがその典型例としてある。センシングデバイス・システム分野でのベンチャー企業やスピンオフ企業（EnOcean など）の活動も、日本より活発である。

化学反応を利用した化学センサとしては、ガスセンサ、pH 等溶液センサ、バイオセンサなどがあり、これらのセンサについては、触媒、吸着剤、官能膜、バイオマテリアルなどの材料技術の研究開発が活発に行われている。

一方、携帯端末に搭載される生体のセンサとしては、小型低コストで使い勝手（消費電力、安定性）の良いものであることを前提として、非侵襲あるいは低侵襲の検出手段を用いる必要があり、光を含む電磁波を用いたセンシングの研究開発も進められている。生体分子間相互作用をセンシングするシリコンフォトニクスを用いた表面プラズモンセンサ、生体物質の検出のための皮膚や衣服に対してある程度透明な赤外光やテラヘルツ波を用いたセンサなどの研究開発が各国で行われている。さらに波長が長いマイクロ波についても、近接場の利用により波長よりも小さな空間分解能で人体を検出する研究や、メタマテリアルを用いてオンチップでのマイクロ波による生体医療解析を目指した研究も行われている。

［今後必要となる取組み］

新しい構造・材料・製造法の採用によってセンサの性能／コスト比を飛躍的に上げることが求められる。性能向上、コスト低減のどちらに重点が置かれるかは応用に依存する。コスト低減は主に企業の改善努力によるものと考えられ、科学技術政策上の優先度は低くなりがちであるが、注意が必要である。例えば、ウプサラ大学とフラウンホーファー研究機構で開発された低コスト MEMS 製造法が欧州で実用化され、スマートフォン用慣性センサの 8 割のシェアを獲得し、日本のメーカーはほぼ撤退に追い込まれたことや、実装を低コスト化できる MEMS マイクロフォンが旧来のエレクトレットコンデンサマイクロフォン（ECM）を駆逐したことなどが挙げられる。

インフラの保全等に利用するセンサでは、使用が非常に長期に渡るため安定性と信頼

性が重要である。このセンサの安定性や信頼性はセンサそのものだけではなく、実装や取付け法によるところが大きいため注意が必要である。このような課題は、具体的な問題の把握が難しく解決策を見つけるまでに長期間を要することもあるが、研究開発の必要性は高い。また、高温や腐食といった過酷な環境で利用されるセンサにたいしては、新たな材料の利用や新たなセンシング方法などのブレークスルーが必要である。

日本においては今後これを用いた高齢化社会の福祉に利用することが有用であると考えられる。健康管理デバイスに関しては先進各国においてそれらの検討は進んでいる。高齢化社会の到来と国民福祉の維持発展を両立するために、センサデバイスを用いた健康管理や日常活動のモニタリングを行うことは、一部で試行が行われているが、大規模な実証試験などは検討段階にとどまっている。健康状態や環境をモニタリングするために各種の化学センサが研究されているが、長期間測定に供する化学センサとしては、既存の触媒燃焼式ガスセンサのように表面の清浄性が保てるもの以外はほとんど実用化されていない。多くの基礎研究例を実用化に繋げるためには、このような問題を避けて通らずに解決する必要がある。使い捨てのセンサや毎回校正できるセンサでは、安定性の問題は回避できるが、普及には低コスト化が課題になる。

（３）科学技術的・政策的課題

センサの研究開発には、微細加工施設や観察・分析施設が必要になる。これらの整備と維持には大きなコストがかかる上、ノウハウが必要である。我が国では既にいくつかの大学と公的研究機関にそのような施設が整備されており、それらを有効利用して多様な研究開発が実施されることが国全体の投資効率上望ましい。現在、文部科学省が進めているナノテクノロジープラットフォーム事業はまさに上記動機に基づく事業であり、今後、主旨に沿った運営が行われているか点検の上、予算の拡大や設備の充実など事業の充実を図るべきである。また、センサの研究開発拠点を作る必要があり、施設と実績のある機関にその役割を担わせることが期待される。我が国においては、センシングデバイス・システムの出口は大手企業が担うことが多いため、公的研究機関がこれら企業の研究開発リスクを下げて、実用化へのハードルを下げる役割をより一層担う必要がある。さらに、ビジネスの実現や規格の設定においては、これまでのガラパゴス化の轍を踏まないように注意しかつ速やかに動く必要があり、研究開発におけるグローバルな活動を推進する必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

年間に出荷されるセンサの数が現在の 100 倍の 1 兆個になるような社会を 10 年後に実現しようという「Trillion Sensors」という動きが米国を発信地として世界に広がりつつある。米国の産業界が旗振り役となり（代表は Fairchild Semiconductor の Janusz Bryzek 氏）、センサの新規応用発掘、センサの研究開発の促進、政府への働きかけ、産産・産学の連携などがロードマップに沿って進められる。

［注目すべきプロジェクト］

米国 DARPA では、小形ジャイロスコープを画期的に高性能化、あるいは 1 M$もするような高性能ジャイロスコープを画期的に小形化・低コスト化するプロジェクト（MRIG Program）が推進され、10 の大学・研究機関が参画している。ジャイロスコープは位置制御（ナビゲーション）や姿勢制御に用いられるセンサであるが、パーソナルナビゲーション、ロボット、自動運転車、ドローン（小形飛翔体）などに必須であるため、デュアルユース技術として研究されている。

NSF の ASSIST（Advanced Self-Powered Systems of Integrated Sensors and Technologies）では、無電源のヘルスモニタリングシステム研究開発が韓国（KAIST）や日本（東工大）も参加して行われている。特に、ウェアラブルなセンサとアクチュエータを組み合わせて、センサからの電気信号を感覚代行プロセスで人間の既存の感覚系にマッピングする技術が注目される。神経可塑性のおかげで、超感覚刺激は脳において本来の感覚と同じレベルで知覚できるようになる可能性が示唆されている。

（５）キーワード

・センサ、センシング、センシングデバイス、センシングシステム、ジャイロスコープ
・MEMS、NEMS、集積回路、強誘電体、磁性体、圧電材料、ナノ材料、極限計測、実装
・光材料、ナノフォトニクス、シリコンフォトニクス、近接場、メタマテリアル
・状態計測、モニタリング、環境モニタリング、生体内計測
・IoT、 Trillion Sensor

（６）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	◎	↘	論文数の多さから国際会議での存在感は大きいが、日本の企業の貢献は少ない。国内会議でも企業からの発表は低調であり、かつてと比べて研究者の層が薄くなっているとすると心配である。 高度な光計測技術、および測定のための近接場光分野において、トップレベルの研究が行われており、１分子検出の基礎研究にも優れている。
	応用研究・開発	○	→	実用化を想定した試作品の開発等を行える施設として、TIAやLC Netが整備されており、大学や公的研究機関の開発環境は向上している。 産学連携に力を入れている学側から見ると、講演会等では見えないものの開発は継続的に行われている。
	産業化	○	→	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの世界市場は大きく、依然として成長しているが、我が国のエレクトロニクスメーカーが回復しておらず、シェアは低い。自動車用途のように高信頼性を要求されるセンサ、自社製品に組み込むセンサ、イメージセンサなどでは実力を維持している。
米国	基礎研究	◎	→	DARPAによる助成等によってダブルユースの研究が活発かつ高水準に行われている。複雑かつ高度な開発を要するジャイロスコープについては基礎研究で抜きんでている。 磁気センシングによるGPSを超える位置検出への取り組みは注目される。

	応用研究・開発	◎	→	大学等の研究成果がベンチャー企業で実用化される流れが堅調で継続的に成功例が出ている。公的施設（たとえば、NNIN）と民間ファンドリ（たとえば、SVTC（Silicon Valley Technology Center））が、そのようなベンチャー企業を支えている。
	産業化	◎	→	ベンチャー企業がスマートフォン用ジャイロスコープで約2割のシェアを獲得するなど（日本企業のシェアは1%未満）、アメリカンドリームは顕在である。MEMSマイクロフォンの最大手は米国の企業であり、その事業で成功するまでは小さな補聴器メーカであった。航空宇宙用等のハイエンド品は米国の独壇場である。
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とは一体である。一見地味な研究が多いため、国際会議での採択数は米国に及ばないが、本質を捉えた基礎研究はそれがわかっていない者にはしばしば地味に見えるため注意が必要である。
	応用研究・開発	◎	→	MEMSセンサの覇者であるボッシュやSTMicroelectronicsでは、公的研究機関も巻き込んで活発な研究開発が行われている。大学より公的研究機関の貢献が大きい。 マイクロ波センシングに独自のアプローチがある。
	産業化	◎	↗	MEMSセンサのシェアの多くがボッシュやSTMicroelectronicsのような欧州企業に握られている。市場は継続的に年率20%近く成長している。
中国	基礎研究	○	↗	数年前まで中国からの研究発表に目立つものは少なかったが、最近は優れた研究成果が報告されている。センサ応用に関する学生コンテスト（iCAN）には10000人もの学生が参加するそうで（日本では50人程度）、若者の関心が高いことがうかがわれ、今後も研究活動は活発化すると思われる。
	応用研究・開発	△	↗	センサやMEMSの研究開発の歴史が浅いことがあり、研究開発は初めから応用志向である。まだ中国発の新しいセンサは顕在化していない。
	産業化	△	↗	MEMSマイクロフォンの急速な普及を受けて、その工場が中国で稼働している。これを足掛かりに中国発のセンサが産業化される可能性はある。
韓国	基礎研究	○	→	センサに関する大学等の研究開発に積極的な政府投資が行われているとは聞いていない。国際会議での存在感では台湾に追い抜かれたと思われる。
	応用研究・開発	△	→	サムソングループ等でも研究開発を行っているが、技術的蓄積に乏しく、必ずしも順調に開発が進んでいるとは言えない。海外のベンチャー企業の買収やそこへの出資で技術を取り込もうとはしている。
	産業化	△	→	サムソンやLGでは、現状、センサ類は海外から調達している。巨大企業の内で部品事業は行いにくいと推測される。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）TSensors Summit Abstracts for trillion sensor roadmap, October 23-25, 2013, http://www.tsensorssummit.org/Resources/TSensors%20Summit%20Abstracts.pdf
2）シスコシステムズ合同会社 IoT インキュベーションラボ:「Internet of Everything の衝撃」、インプレス R&D、2013 年 12 月 6 日

3) http://genalyte.com/
4) http://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ja&user=IoPkLrYAAAAJ&cstart=140&citation_for_view=IoPkLrYAAAAJ:Z5m8FVwuT1cC
5) Margarita Puentes Vargas: Planar Metamaterial Based Microwave Sensor Arrays for Biomedical Analysis and Treatment, Springer, 2014.
6) S. Guan et al., Wireless Powered Implantable Biosensor tag System-on-chip for 2011 IEEE Continuous Glucose Monitoring, Biomedical Circuits and Systems Conference.
7) Arati Prabhakar: Statement, May 14, 2014 http://www.appropriations.senate.gov/sites/default/files/hearings/Dr%20Prab-hakar%20Statement.pdf.
8) Patric Tucker: Four DARPA Projects That Could Be Bigger Than The Internet http://www.defenseone.com/technology/2014/05/four-darpa-projects-could-be-bigger-in-ternet/84856/
9) http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Quantum-Assisted_Sensing_and_Read out_(QuASAR).aspx
10) http://assist.ncsu.edu/
11) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503353
12) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13362
13) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=501025

３．３．５　放射性物質の除染・減容化など基盤的技術

（１）研究開発領域の簡潔な説明

福島第一原発事故後 3 年半が過ぎた 2014 年現在、汚染地域の除染・減容化を一層進めるには、除染作業に伴って発生する膨大な汚染物質を保管する仮置き場の安全性の確保、中間貯蔵施設の放射性物質の安全な処理・処分・管理が求められている。さらに、原発敷地内での汚染水処理対策と除染に伴う廃棄物の安全な処理・処分・減容化も必要である。

これらに対応するためには。放射性物質の検出方法、各種汚染物質、特に放射性 Cs の各種環境媒体中での挙動の検証等のナノテク・材料科学に基づいた基礎的研究とともに、それらを組み合わせた除染・減容化技術に関する研究開発が必須とされる。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

福島第一原発事故により環境中に広範囲に放出された放射性物質による環境の汚染が生じており、人の健康や生活環境に及ぼす影響を速やかに低減するには、汚染地域の除染を早急に行うことが喫緊の課題となっている。その放射線量と半減期の観点から Cs-137（半減期：約 30 年）、Cs-134（半減期：約 2 年）が主な除染対象放射性物質である。そのために放射性 Cs の吸着材の最適化が材料科学分野では進められてきた。

農地土壌、グランド等の除染に際しては、表土の剥ぎ取りといった既存技術で対応しているが、剥ぎ取った汚染土の仮置き場所の確保とともにそこに保管されている汚染物の安定性が問題となっている。

また、海水を含む多量の汚染水の処理・処分も大きな問題となっている。福島第一原発敷地内および原子炉建屋内では、燃料溶融に伴って放射性核分裂生成物（FP: fission products）が冷却水中に放出された。事故後汚染水中の放射性 Cs は、米国キュリオン社のゼオライト吸着塔、フランスアレバ社の化合物によるセシウム吸着塔、さらに東芝製 SARRY（第二セシウム吸着塔）の稼働により、Cs-137 等の FP の放射能は減少した。その後、放射性 Cs の他に放射性 Sr、Ni、Co など 62 種類の放射性核種の除去装置「ALPS（Advanced Liquid Processing System）」も設置され、トラブルはあるもののこれらの汚染水処理システムは機能している。汚染水問題の根本的な対策は、格納容器の封水、地下水等からの流れ込みにもよる汚染水送料の低減と封じ込め、効果的な浄化システムである。上記除染システムでは、62 種の放射性核種の除去は可能であるが、トリチウムは除去できない。さらに汚染水浄化に使った放射性 Cs を吸着したゼオライト吸着塔や汚泥が敷地内に大量に一時保管されているが、それらの根本的な処理方法はいまだ未確立である。

仮仮置き場

仮置き場

［これまでの取組み］

内閣府平成 23 年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」により、農林水産省農林水産技術会議を中心に、関係各府省・研究機関などが参画し、農地土壌除染研究が実施された。物理的・化学的・生物学的除染技術を用いた農業再生を目指して進められた。

内閣府による「除染モデル実証事業」において、日本原子力研究開発機構（JAEA）福島環境安全センターは、「農地・森林・宅地・道路等の除染、除染に伴う廃棄物の仮仮置き場・仮置き場での処理・処分を検討した。その際には除染技術の効率化、コストの低減、廃棄物の減容・再利用が重要となる。特に減容に際しては、廃棄物の安定性の確保、３R（reuse、recycle、reduce）の観点および今後設置される中間貯蔵施設での貯蔵・処理・処分等の考慮が必須である。そのためには、放射線量の変化の推定・移動抑制の有効な技術、さらには減容化の重要な技術の一つである焼却処理の際のセシウムの挙動の解明研究が必要となる。

環境省は、「中間貯蔵施設安全対策検討会及び環境安全保全対策検討会」において、除染廃棄物の貯蔵・処分の指針を検討した。この指針では、除染廃棄物はまず仮置き場に保管されるか事前に焼却される。さらに仮置き場に保管された廃棄物は必要に応じて減容化（基本的には可燃物の焼却）される。処理により生じた焼却灰は放射線線量に応じて保管される。一方で、除染や汚染廃棄物の処理の加速化・除染作業効率化等のために「除染技術実証事業」を JAEA の協力（技術選定・評価業務等の受託）で取り組んでいる。今後活用できる除染、廃棄物処理、さらには中間貯蔵の技術等の実証試験の実施と共に、その効果・安全性・経済性が検討される。汚染土壌の減容化に関しては、分級・熱処理・化学処理等が検討された。ため池等の対策としては、水中分級・底土除去・拡散防止が検討された。廃棄物処理については、洗浄。炭化・焼却法とそれに伴う焼却灰の安全性の確保が検討された。本実証事業は、平成 23 年度から継続して行われ、平成 26 年度においても「土壌等除染除去物の減容化」、「汚染廃棄物の処理」、「除去物の運搬や一時保管、中間貯蔵等関連」の有効な技術開発が進められている。

平成 24 年度から開始された JAEA 運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」は、JAEA を中心として大学・独立行政法人研究機関・財団法人からなるオールジャパンの体制で取り組み中である。今後の除染・減容化に対しての科学的根拠を明確にしつつあり、安全・安心な処理・処分への貢献が大いに期待される（詳細は (4) 注

目動向を参照)。

日本学術会議東日本復興支援委員会放射能対策分科会による第二次提言において、府省横断的・領域横断的な調査・研究体制の構築の必要性が指摘された。この提言に対する一つの試みとして、「福島第一原子力発電所事故由来放射性物質調査研究　分野横断ワークショップ」が 2014 年 3 月に開催された。放射性物質の環境中での動態や影響の評価、廃棄物処理や除染といった対応策などに関する調査研究は、大学や国立研究機関など数多くの機関・関連する学術分野・関連する学会などにおいて個別に進められてきたが、このワークショップを契機に、

・大規模な研究プロジェクトの実施
・複数の機関による新たな研究体制の構築
・関係省庁における対応策の検討への参画などを通じた専門家のネットワークの構築
・機関や学会の壁にとらわれない情報の共有と整理を集中的実施

が行われ、今後の中長期的な的確な対応につなげるために、個別に進められてきた調査研究を俯瞰する簡潔なレポートが作成され、社会に広く公開された。

海外に関しては、米国スリーマイル島の原発事故（1979 年 3 月)、チェルノブイリ原発事故（1986 年 4 月）への対応に基づく基礎研究はある。しかし、事故に伴う除染の経験は皆無に近く、農地や住居地を積極的に除染・復興するための技術開発もなされていない。特に今回の事故では放射性セシウムが日本の土壌中に多く含まれている粘土鉱物に固定されていることがこれまでの海外の経験と大きく異なっている。海外研究機関においては、福島問題へのアプローチが進み、各種国際会議（たとえば、ゴールドシュミット会議（米国地球化学会と欧州地球化学連合が主催する地球化学分野での国際会議)、国際鉱物学連合会議（IMA)、国際粘土研究連合（ICC)、アジア粘土会議（Asian Clay)、欧州粘土会議（Euroclay）など）で活発に議論・討論されている。JAEA も積極的に海外機関・研究者との意見交換・情報交換を進めており、2013 年より Cs-workshop と称して、放射性 Cs と粘土鉱物の相互作用・空間分布・モニタリング等に関して貴重な議論を行う機会を作り出している。

［今後必要となる取組み］

福島県内で除染により生じる除去土壌は、2 千万 m^3 を超える膨大な量となっている。その他にも大量の放射能汚染廃棄物も存在する。これらをいかに仮置き場・中間貯蔵施設で処理・管理し、さらには最終的に県外での処分に際して、いかに減容化するかが重要な課題となる。従って、除染や減容化・長期安定化のために必要な材料・技術の研究開発は、重要な課題である。研究開発では、放射性 Cs と土壌・粘土・粘土鉱物との相互作用、さらには放射性 Cs の粘土鉱物中での安定性を踏まえた対応が必要となる。

減容化技術としては、熱処理（焼却・溶融・焼成など)、機械的処理（分別・選別・分級など）がある。減容化技術は、中間処理施設への搬入量の低減する事前減容化と、中間処理施設から最終処分場への移転量を低減する減容化に適用されることを考慮する必要がある。特に不燃系廃棄物（汚染土壌など）の減容化は、中間貯蔵施設の負荷量低減等の観点から極めて重要であり、一層の減容化率向上、コスト低減が必要である。減容化処理後の濃縮物の貯蔵期間、維持管理も考慮しなければならない。さらに、浄化土の

有効利用・再利用の観点も重要であり、浄化土の管理された有効再利用（たとえば中間貯蔵施設造成の資材など）も考慮に入れるべきである。

基礎研究による粘土鉱物 - 放射性 Cs 相互作用に関する研究成果（(4) 注目動向参照）は、放射性 Cs の土壌中での安定性や土壌分別・分級法などの減容化処理において必須と考えられる。汚染土壌に対しては、分級洗浄の前処理として、選別・分別が必須となる。焼却処理に関しては、焼却灰への対応が重用となる。焼却灰の内、主灰に対してはスラグ・焼成物としての取り扱いで、セラミックス・セメント分野等からの貢献が大いに期待される。

飛灰については、従来のセメント固化に加えて、効率的な減容化に際しての濃縮・回収、新たな吸着材の開発が必要となる。さらに、減容・中間処理施設への負担軽減の観点から、処理後の浄化土壌の限定的再利用・リサイクルを考える必要がある。小規模・分散利用は避け長期間の履歴管理可能な公共工事への適用等が考えられる。これらの除染・減容化技術を現場で活用可能なものにするため、分野横断・府省横断的対応をさらに推し進めることが必須と考える。

福島第一原発敷地内では、今も汚染水が発生し、SARRY や KURION などのセシウム除去システムや ALPS による多核種除去システムにより、放射性 Cs・Sr 等の放射性核分裂生成物の除去対策が進められているが、水と同じような挙動をするトリチウムはこれらのシステムでは除去できない。トリチウムの分離法は、技術的には比較的よく検討されており、安全性・安心性の確保と共に、設備・コスト・処理期間を考慮した適切な処分方法の選択（再利用・金属貯蔵・固化埋設・大気放出・海洋放出等）が、科学的裏付けを踏まえ中長期的に開発することが期待される。

（３）科学技術的・政策的課題

原発事故・放射線対策に対する政府の対応体制の中、除染、廃棄物対策、モニタリング及び放射性物質汚染に関する安心・安全の確保（環境リスクに係るリスクコミュニケーションを含む）は環境省が総括責任を負い、科学技術面は文部科学省が日本原子力研究開発機構を中心に全面的に支援する体制となっている。農林水産業の再生、農地などの除染は、農林水産省が分担しており、研究開発の成果を現地で実証し、拡大している。これらの対応には、関係府省の緊密な連携と共に、地元自治体の協力も継続して必要となってくる。

除染・減容化に関しては、除去土壌、汚染廃棄物の性状や放射能レベルを考慮し、いかに中間処理施設において安全に保管・処理・処分するかが最も重要な課題となる。これまでの政策的対応は、安全対策の基に推進されてきたが、今後は、社会的要素（ゼロリスクの偏重、被害者意識）と技術合理的対応（低環境負荷、適正コスト）とのバランスを考慮しながら現実的で合理性のある政策への転換が必要と考えられる。

技術合理的対応をより有効に進めるには、化学・物理、無機材料、資源等の研究分野に加えて、地球科学、建設・農業土木、土壌肥料等の研究分野も含んだ分野横断型・産官学横断型・府省横断型の体制の構築、関連機関の連携による「オールジャパンと国際連携による取り組み」が今後さらに必要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・SPring8 放射光施設の広域 X 線吸収微細構造法（EXAFS）や X 線光電子分光分析を用いて、粘土鉱物バーミキュライトに収着した Cs の原子レベルでの局所構造や化学状態を評価した。その結果、バーミキュライト中の Cs に特異な共有結合を見出し、その収着の強さを裏付けた（JAEA）。

・第一原理分子動力学法による粘土鉱物への Cs 収着挙動の解析を進め、放射性 Cs の特異な吸着位置、いわゆるフライドエッジサイトへの収着、溶液環境の違いによる Cs 収着強度の違いを明らにした（JAEA・NIMS）。

・イメージングプレートを使用して、ラジオオートグラフィによる放射能を有する微粒子の特定と、高分解能電子顕微鏡による鉱物分析法との組合せた手法の開発とその適用により、放射能を有する微粒子として風化の度合いが進んだ黒雲母が最有力候補である報告されている（東大・JAEA）。

・実汚染土壌からの放射性 Cs の脱離挙動特性に関して溶液化学的検討を進め、汚染土壌からの放射性セシウムの脱離挙動を検討した。放射性 Cs がバーミキュライトや雲母粘土鉱物等の層電荷の高い粘土鉱物に収着し、その強さは雲母粘土鉱物中の K と同等であることから、固定されている放射性 Cs の大半は、一般的な環境下では長期に安定であると推察した（電力中央研究所）。

・Cs 可視化検出法として、ポータブルガンマカメラ（東芝）や超広角コンプトンカメラとガンマープロッター（JAEA）が報告されているが、共に高価で空間分解能に難点があった。蛍光強度や電気化学的特性の違いを利用する蛍光プローブ（カチオンセンサー：Cesium Green）を開発し、紫外線を照射により固体表面に分布する Cs の可視化に成功している（NIMS）。

・汚染土壌の減容化の方法として、高温処理による放射性 Cs の揮発除去がある。しかし、1300 ℃での熱処理では、土壌が溶融ガラス化するために、Cs の拡散が阻止され、処理物中に残留することが報告されている。この問題に対して、CaO/SiO_2 比の調整・塩素源の添加により溶融ガラス化を阻害し、Cs の揮発率を大幅に向上させる処理法の可能性が示された。特に安定 Cs を吸着させたベントナイトでは、揮発率 99%であった。さらに実汚染土壌（数万 Bq/kg の放射性 Cs を含む）の処理では、クリアランスレベル（100 Bq/kg）以下まで低減できることが報告されている。今後は、セメント産業で用いられている回転式昇華装置（ロータリーキルン炉など）による減容化技術の検討とともに、スラグ焼成物の再利用・今後の知見の収集に向けた更なる検討が期待されている。

・除染で生じた廃棄物の内、可燃性のもの、特に植物に関しては現在焼却による減容化が想定されている。焼却灰では、主灰中の放射性 Cs の溶出性は低く、飛灰中の放射性 Cs は溶出性が高いことが知られている。飛灰より水で抽出可能な放射性 Cs をプルシアンブルーを用いた吸着剤で濃縮回収し減容化する技術が検討されている。これら焼却灰の性状による汚染物の処理フローのさらなる検討が進められている。

・汚染土壌中の Cs 吸着特性に注目した高度湿式分級による汚染土壌の減容化が検討されている。湿式土壌分級洗浄法は、土木・地盤工学分野において広く用いられる重

金属土壌汚染対策技術である。土壌中で汚染物質を選択的に多く含む細粒分を物理的に分離し、汚染土壌の減容化を行う技術である。汚染土壌中の放射性 Cs を細粒分に集め、土壌分級洗浄により汚染土壌を減容できる可能性が示された。ただし、土壌の種類により分級の効率は異なることから、さらに検討が必要である。

・福島県の一大産業である森林業では間伐等の森林作業は必須である。間伐作業にともなう作業道路の設置等により土砂流出が促進される。土砂流出時に放射性 Cs を固定している粘土鉱物粒子だけを捕獲できれば、有効な除染対策となる。さらに、除染した平地の再汚染を防止する対策にもなる。除染には、現在進められている薬剤・電力・人力等を使い日常的メンテナンスを必要とするアクティブな除染と、これらをできる限り必要としないメンテナンスフリーに近いパッシブな除染がある。里山・森林の除染に対しては、流水泥水中の放射性 Cs を固定した懸濁粘土鉱物粒子を捕獲する吸着材を設置するだけのパッシブな除染が望ましいと考えられる。このような用途への最適な吸着材としてメソポアを有するジオマテリアル・珪藻土に注目し、その除染現場への適用・汚染土壌の減容化への検討が進められ、天然メソポア材料・珪藻土の有効性が示された。

［注目すべきプロジェクト］

日本原子力研究開発機構（JAEA）運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」：日本原子力研究開発機構を中心に、オールジャパンの体制（参画機関：物質・材料研究機構、国際農林水産業研究センター、産業技術総合研究所、電力技術中央研究所、北海道大学、東北大学、金沢大学、金沢工業大学、東京大学、首都大学東京、岡山大学、宮崎大学）で取り組み中である。SPring8 放射光施設の広域 X 線吸収微細構造法（EXAFS）や X 線光電子分光分析、第一原理分子動力学法による解析、ラジオオートグラフィーと高分解能電子顕微鏡法との組合せた手法、高度湿式分級法、高度湿式分級法、実汚染土壌からの放射性 Cs の脱離挙動特性の解明等は、本プロジェクトの成果である。これらの新しい知見により除染・減容化を一気に高度化できる可能性が大きい。放射性 Cs の土壌・粘土・粘土鉱物などとの結合・離脱メカニズム解明により、除染・減容化技術に対して科学的裏付けのある安全性の高い効率のよい手法が指針として示されることが期待される。

（５）キーワード

放射性 Cs、汚染物の除染・減容化、放射性廃棄物の長期安定化、土壌、粘土鉱物、分別・分級、焼却、吸着材料

（６）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	△	↗	最先端的基礎研究による粘土鉱物 - 放射性Cs相互作用に関すにより、粘土鉱物中での放射性Csの安定性・不溶出性が解明されつつある。JAEAを中心にオールジャパン体制での注目成果であり、その応用・除染実施研究への大きな展開が期待される。
	応用研究・開発	△	↗	基礎研究の成果を踏まえた除染・減容化への対応が進められている。環境省が除染・廃棄物対策・モニタリング・リスクマネイジメントに対して総括責任を取り、文部科学省のJAEA・NIMA等が科学技術面を支援する体制がある。農業再生については、農水省が中心となり対応が進んでいる。
	産業化	△/○	↗	環境省が、除染技術実証事業をJAEAの技術選定・評価への協力で進めている。除染実施・減容化実施、さらには仮置き場・中間貯蔵施設での処理。処分、安全性の確保への検討が進みつつある。
米国	基礎研究	△	↘	スリーマイル島の原発事故対応での記録有り。
	応用研究・開発	△	↘	同上。
	産業化	○	↘	福島現地での汚染水の除染にキュリオン社の水浄化システムが利用された。
欧州	基礎研究	△	↘	チェルノブイリの原発事故対応での記録有り。基本的に封鎖・隔離での対応が中心であったため、生物学的な手法による農作物への放射性物質の移行防止などの受動的な対応策が中心であった。
	応用研究・開発	△	↘	同上。
	産業化	○	↘	福島現地での汚染水の除染にアレバ社の水浄化システムが当初利用された。
中国	基礎研究	×	→	－
	応用研究・開発	×	→	－
	産業化	×	→	－
韓国	基礎研究	×	→	－
	応用研究・開発	×	→	－
	産業化	×	→	－

（註 1）フェーズ
　基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
　応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
　産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
　※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
　◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
　△：他国に比べて顕著な活動・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

3.4 情報通信・エレクトロニクス

ナノテク・材料は、IoT（Internet of Things）、ビッグデータ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。これからのエレクトロニクスデバイスは、将来の様々なアプリケーションを睨みながら、さらなる高性能化・高機能化とともに、従来よりも桁違いの超低消費電力化が強く求められ、世界的に競争が激化している分野である。

現状の CMOS デバイスは、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大、素子の消費電力増大などが見え始めており、この限界を突破する方策の一つは、ナノ CMOS とスピンデバイス、フォトニックデバイス、MEMS/NEMS、バイオセンサ（デバイス）、パワーデバイスなどを組み合わせて融合した、ハイブリッドナノデバイスの実現である。そこでは異種機能三次元集積化技術が鍵となる。

それとともに、新しいアプリケーションやサービスを生み出す革新的なナノエレクトロニクス基盤を創成するためには、基本デバイスの改善だけのアプローチでは限界があり、集積回路レベルからシステムレベルへのアプローチが重要となる。さらに、従来の材料にはない新しい機能の活用も考える必要がある。例えば、既存の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やトポロジカル絶縁体のような二次元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が期待される。

以上の観点から、今後のナノエレクトロニクスの研究開発には、システムを見据えた、技術レイヤー間の融合が不可欠になると予測される。ナノ CMOS 融合技術は、将来の IoT 社会の実現に不可欠な超高速・超高性能のコンピュータ技術の開発に資するとともに、MEMS/NEMS、無線デバイス、有機エレクトロニクス素子、マイクロエネルギーデバイスなどとの融合を経て、トリリオンセンサー時代の基盤となるナノセンサーネットワークの実現につながると期待される。また、パワーデバイスと各種エレクトロニクスの融合で、将来の低炭素社会実現の鍵となるスーパースマートグリッドの実現へとつながっていく。

３．４．１　超低消費電力ナノエレクトロニクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

従来よりも桁違いの超低消費電力を可能とするナノエレクトロニクスデバイスを実現し、集積回路への適用を目指す。新材料の特性を理論的・実験的に確認し、システム最適設計によるデバイス試作で超低消費電力動作、超高速動作、超大容量、超長期保存などの優位性を確認するなどの研究開発が課題である。また、飛躍的な消費電力削減と超高速演算を可能にする、従来の CMOS を超える新動作原理のデバイスや新回路アーキテクチャなどのデバイスレベルからシステムレベルにまたがる研究開発課題が存在する。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

エネルギーとして大きな割合を占めるようになっている電気エネルギーについては、電気機器の低消費電力化技術の開発による、さらなるエネルギー消費の低減が求められている。その中でも各分野において使用量が増加している情報通信機器の省エネルギー化はモーターや照明器具の高効率化とともに重要であり、エレクトロニクスデバイスの低消費電力化が強く求められている。

情報通信機器の心臓部に当たるのがマイクロプロセッサー、メモリ、高周波回路などの集積回路であるが、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おり、現在のトランジスタ（MOSFET）の微細化限界を超える新しい動作原理と省低消費電力化を同時に進めるためには、トランジスタの材料・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、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メモリや不揮発ロジック、光通信デバイスの小型・集積化、使っていない回路ブロックのきめ細かな電力供給制御、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）新規デバイスや量子情報処理など新規アーキテクチャなどの検討が必要である。これらの技術が実現できれば、オフィスにおけるパソコンやサーバーの未使用時の機器停止と瞬時起動、データセンター等における大幅な電力削減、家庭における家電の待機電力削減、携帯機器の長時間使用など、消費電力化と利便性の向上とにつながる。

また、消費電力を抑えながら高度な情報処理が可能になれば、従来の計算機では事実上解くことが不可能であった問題を解くことで、様々な分野における科学技術の発展を支えることが期待される。特に、量子力学に関わる物理・化学・バイオなどの一般的に多くの計算量を必要とする問題へのアプローチが期待される。さらには、我が国の産業競争力の源泉となってきた半導体集積エレクトロニクス産業の国際的な競争力回復につながることも期待される。

国際半導体技術ロードマップ（ITRS）で示されている基本素子（トランジスタ）としての３次元構造デバイスは、ロジック分野ではインテルや TSMC が、メモリ分野では東芝やサムソンがその研究開発を加速している。

［これまでの取組み］

・ロジック素子

米国ではNRI(ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ）が中心になって研究開発を推進している。従来はNRI主導で４つの地域の大学で、トンネルデバイス、スピンデバイス、グラフェンなどのテーマに対して集中的な研究を行っていたが、2013年に刷新され、3つのNRI研究センター（CNFD、INDEX、SWAN）と3つのSTARnet（Semiconductor Technology Advanced Research network）研究センター（FAME、 C-SPIN、 LEAST）になった。このSTARnetが米国DARPAと協力して運営されることは注目される。これらの研究センターでは、エネルギー効率の高い原理としてナノ磁性のスイッチング素子、サブスレッショールドスロープの急峻な素子として III-V のトンネルトランジスタ（TFET）を超えるデバイスなどを研究開発していく。また、新デバイスのコンセプトは新たな材料が基盤となるとしている。

・不揮発性メモリ

日本における主な研究開発プロジェクトとしては、2010年経済産業省でスタートして2011年にNEDOに移管された「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト（LEAP)」があり、LSIの配線層に集積を可能とする磁性変化デバイス、相変化デバイス、原子移動型スイッチの開発が進められている。また、最先端研究開発支援プログラム（FIRST)の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」(2010-2013)において、スピントロニクス素子を用いた待機時電力ゼロのロジック混載用不揮発性メモリ実用化技術の開発が進められてきた。

・カーボン材料

新たなトランジスタチャネル材料の有力候補として考えられているカーボンナノチューブやグラフェンなどについては、Si-CMOSをベースとする従来からの集積・微細化技術開発の中に組み込まれる形でNEDOのMIRAIプロジェクトにおけるナノシリコンインテグレーション（NSI）やJST CRESTの次世代エレクトロニクスデバイスなどで取り組みがなされてきた。また、2013年より科研費新学術領域「原子層科学」、2014年より「π造形科学：電子と構造のダイナミズム制御による新機能創出」が開始された。さらに2013年度からはJSTで「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」と題するCRESTとさきがけが、2014年度には、「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」と題するCRESTが開始され、ナノエレクトロニクス・材料関係の国家プロジェクトが少しずつ整ってきた。しかし、これらのプロジェクトは、その予算規模からいっても要素技術の基礎検討と一部デバイス試作による技術実証に留まっており、他の材料とは異なる物性を活かしつつ産業的なインテグレーションを見据えた研究開発にどうつなげていくかが今後の課題である。

一方、IBMは「C（カーボン）の生態系を構築する」との理念を掲げ、情報処理デバイスを含む様々なアプリケーションを提案し、一部は実際に試作まで行っている。世界中をキャラバンして参画者を（資金的面も含めて）募っている。サムソンは、Graphene spintronicsを対象とした研究部署を設立している。米国SRC/NRIはグラフェンとスピ

ントロニクスをともに次世代ロジックデバイスの主要技術と見なしてロードマップを提案している。

・スピントロニクス

理論から応用研究まで、多くの先駆的研究が日本から生まれてきた分野であるが、大型国プロやメジャー企業の大型投資により、急速に海外での研究が活発化してきている。米国では、スピン利用の情報処理（メモリ、ロジック、コンピューティング）に対し、DARPA, NRI, NSF などの予算がついている。また、様々なスピン利用ロジックデバイスがアーキテクチャを含めて提案・検討されている。日本では、科研費特定領域研究「スピン流」（2007~2010）の中で関連する基礎研究が行われた他、FIRST の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」の中で MTJ（magnetic tunnel junction）を用いた不揮発性ロジックの検討が行われた。

・脳型演算回路

超低消費電力を目指すナノエレクトロニクスの新たなアーキテクチャの研究開発の一つである脳型演算回路においては、脳型動作をする固体素子および脳型回路を実現するアーキテクチャに関する基礎研究で日本もトップ集団にいるが、応用では遅れを取っている。米国では国家プロジェクトを既に始動させており、それらを融合して脳型コンピュータを開発しようとしている。

・量子情報関係

複数の量子ビットを組み合わせた回路で、数ビット規模の量子演算が実現している。目下の課題は、このような回路で量子誤り訂正アルゴリズムを実現し、最終的に誤り耐性をもつ演算回路を実現することである。それに向けたアーキテクチャの研究が進められている一方で、これらの量子状態制御技術の進展を他の量子系の制御・観測に応用する研究も進んできている。国内では、量子情報科学におけるまとまった研究支援が 2003 年から JST の CREST・さきがけ、2008 年から FIRST を通じて行われてきており、国内の多くの研究チームが参加している。また、新学術領域研究「量子サイバネティクス」も 2008 年から 5 年間の計画で実施されてきたが、2014 年 3 月を持って終了した。

［今後必要となる取組み］

・ロジック用デバイス

トランジスタの高移動度チャネル材料として化合物半導体やナノカーボン材料（グラフェン、カーボンナノチューブ）などの実用化を目指した研究開発も進めていく必要があり、さらには電源電圧を大幅に減らすことができる急峻なサブスレッショルド特性（S 値<60mV/dec）を実現するトンネル・トランジスタの研究開発にも材料の視点を加えることが重要である。さらに、ロジック素子の低消費電力化と低発熱化は今まで以上に重要になるため、発熱をいかに抑制するかも鍵になる。将来の集積回路における熱の問題を解決するためには、熱に関するナノレベルの理解に基づいて、熱エネルギーの効率的な制御や利用技術を創成するフォノンエンジニアリングの研究開発に取り組む必要がある。

・メモリデバイス

DRAM や NAND フラッシュメモリの微細化限界が迫っていることもあり、抵抗変化型メモリ（ReRAM)、相変化メモリ（PRAM）など不揮発メモリの研究開発を加速していく必要がある。また、従来の視点にはなかった、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の研究開発も必要になろう。このメモリの候補としては、MONOS、ReRAM、CNT を使った RAM、現在の Flash メモリの改造などが候補に挙がっている。

・カーボン材料

大面積化や結晶性・層数・配向等の制御など集積化を前提とした工学的なアプローチで、産・学の連携が必要になる。具体例としては、グラフェン関係では、原子レベルでのナノ構造制御（欠陥導入、グラフェンナノリボン（GNR）のエッジ制御など)、化学吸着による物性変化、プロセス誘起ダメージの回避、グラフェン内電子伝導挙動の解析、散乱の制御などが必要であり、また、デバイス構造にするためのプロセスインテグレーションの研究開発も進めていく必要がある。さらに広い意味での二次元機能性原子薄膜であるトポロジカル絶縁体の電子デバイスへの応用研究も今後進めていく必要があろう。

・スピントロニクス

基盤技術となるスピントロニクスデバイス技術、集積プロセス技術、回路技術の確立や、不揮発性ロジックなどの待機電力ゼロを実現する高度エネルギーマネージメント技術の確立も必要になる。また、現在、主流の電流注入による磁化反転（スピン注入磁化反転）では、書き込み（磁化反転）に大きな電力、エネルギーを消費するため、低消費電力動作のためには電圧駆動（電界）による磁化反転（スイッチング）技術の研究開発も期待される。

・脳型演算回路

個々の要素技術の開発（その基本的な理解を含む)、その動作を実現し得る固体素子の開発、およびその特徴を活かした回路アーキテクチャの構築が必要である。材料・デバイス・回路関係者に加え、数学者、脳科学者などとの連携も重要になってくる。

・量子情報

デコヒーレンス要因の理解とコヒーレンスの改善、より堅固な人工量子系の探索、量子制御のための周辺エレクトロニクスの開発、人工量子系を用いた大規模量子演算回路へ向けたアーキテクチャの最適化、有用な量子アルゴリズムの開発、様々な量子系との融合などが必要である。量子シミュレーションなどへの中期的な出口戦略も求められている。実験と理論の両面から協力して研究を進めることが必須である。

（３）科学技術的・政策的課題

今後の超低消費電力ナノエレクトロニクスの目指すべき方向は、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次元で）混載し、両方の特徴を生かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システム（回路）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（系統的・網羅的な材料探索は産業界、メモリ機構の深い理解に基づく従来の延長線では考えにくい新材料の提案・実証は大学）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目指していくことが望ましい。

デバイス試作のファウンドリ機能の強化が望まれ、このファウンドリ機能を基軸にした産学連携の仕組みについてもさらに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である。

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-nano 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で大変重要であり、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量子計算を実用化するためには、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（特に材料技術、回路製造技術など）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。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

上述の米国 NRI では、今後探求すべき研究テーマとして、①「磁化の向き」とは異なる状態変数（スピン状態、光の状態、電子の位相状態など）、②新しい物理に基づく省エ

ネロジック（スピン波、光波、音波など)、③古典的なものと量子の境に位置するような計算（量子状態の僅かな重なりを古典的計算に取り入れたものなど)、④ブール代数とは異なる計算（有用なデータ変換を高エネルギー効率・高性能に行うダイナミックなシステム：アクセラレータ的)、などを検討している。

しかしながら、基本素子だけでのアプローチには限界があり、集積回路レベルからの回路ネットワークの革新と情報アルゴリズムの革新の融合による新しいアプローチも今後必要となる。実際、萌芽的レベルながらこの種の研究も世界中で行われ始めている。また、「Memory on Logic」は世界的な動向になりつつある。ロジックとメモリのデバイス・システムレベルでの協調設計（デバイスの性能や信頼性にまで配慮した設計）が重要になる。

・ロジック関係では発熱・消費電力を十分に抑える必要があるため、ナノワイヤトランジスタや FinFET などの 3 次元構造トランジスタの開発とともに、TFET（Tunneling FET、トンネル・トランジスタ）などの急峻なサブスレッショルド特性を持つデバイスの開発が引き続き盛んに行われている。
・スピントロニクス関係では、強磁性体から Si へのスピン注入、スピン蓄積、及びスピン伝導が室温で確認されつつある。強磁性体から Si に高効率にスピン注入するために必要な界面構造・材料・バンドギャップエンジニアリングが具体化してきた。また、スピン注入源となる高スピン分極率の材料（ハーフメタル）が、CMOS プロセスと親和性のある製法を含めて実用化検討が進められている。
・ナノカーボン関係では、グラフェンに制御された欠陥を導入することで磁化が発現することが理論・シミュレーションにより示されている。単原子(C)欠陥、線状欠陥（zigzag edge）が有効であることが示され、高密度磁気記録媒体への応用などが提案されている。また、Samsung は韓国内の多数の大学と連携し、大学側からの発表の形態でグラフェンや CNT の集積的な機能実証についての報告を始めている。グラフェンの大面積合成と転写による大面積の透明導電膜（2010 年の Nature）等の例のように、大面積化や大面積のロールベースでの転写プロセスなどのプロセス課題を含む取り組みで、ナノカーボン材料デバイスインテグレーションを意識している。
・脳型演算回路関係では、シナプスに対する医学・生理学的理解の深耕と、抵抗変化型メモリや相変化型メモリの登場が上手くマッチしていることから、人間の脳情報処理に習った密結合型の 3 次元ネットワークを有する高密度メモリ技術とその集積プロセス技術、高効率な情報処理アルゴリズムとそれを具現化する回路技術などの研究開発が盛んになってきている。人間の脳では、「記憶」と「忘却」を繰り返すことで重要な情報のみ「経験」として蓄積し、新たな判断に利用しているが、この「記憶」と「忘却」を自律的に行う固体素子の動作も、最近、国内で実証された。スピントロニクス素子を用いたシナプス動作の研究なども進みつつあり、脳の情報処理の本質をまねたコンピュータの開発も視野に入れつつある。

  最近では IBM が人間の脳のように同時並行的に情報処理するコンピュータチップを開発して注目されている。これは「ニューロシナプティック・コンピューティング・チップ」と呼ばれ、高度なアルゴリズムとシリコン電子回路を使用している。このチップが実用化すれば、多くの画像や音声から特定の顔や声を識別したり、膨大な情報（ビ

ッグデータ）から目的の情報を精度良く見つけたりする機能を、ロボットや自動車、家電などに組み込むことが可能になる。

・量子情報関係では、超伝導量子ビットのコヒーレンスの改善が進み、100 μs 超のコヒーレンス時間を実現している空洞共振器中の量子ビットのみならず、基板上の平面型共振器と結合した量子ビットでも 50 μs 近くのコヒーレンス時間が実現している。この進展を受けて、量子ビットの制御・観測の精度が飛躍的に高まり、今年に入り表面符号型誤り耐性量子計算コードの実現に必要とされるような 99%超の精度を持つ量子ゲート制御や量子ビット読み出しの報告がなされている。同時に量子フィードバックに関する実験も複数報告されている。これらは量子エラー訂正アルゴリズムの本格的な実証につながる動きであり、実際大規模な量子誤り耐性アーキテクチャを目指した研究が始まっている。一方で、2013 年にカナダの D-Wave 社は 512 量子ビットで構成された量子アニーリングに基づく量子コンピュータ 2 号機を Google、NASA および USRA に納入し、Google らはこれを核として量子人工知能研究所を設立し、研究を開始している。D-Wave 計算機の古典計算に関する優位性には激しい議論が続いているが、まだ収束には至っていない。

［注目すべきプロジェクト］

2013 年 1 月に始まった EU Flagship グラフェンプロジェクトは「20 世紀の驚異の材料がプラスチックなら 21 世紀はグラフェンであろう」との標語の下に EU の参加国が総力を上げて取り組む 10 億ユーロの 10 年プロジェクトで、多くのグラフェン応用が生まれてくると期待される。

米国では、新規な素子を用いたコンピューターシステムの開発に関する大型の国家プロジェクトが進んでいる。また、米国や欧州では Neuromorphic Computing に関するプロジェクトが新たに立ち上がりつつある。米国におけるマグネティック・コンピューティング研究の一環と思われる電歪と磁歪を組み合わせた磁気異方性制御手法が U.C.Berkeley から発表されている。同プログラムには DARPA、NRI、NSF などの予算がついているようである。

日本では 2014 年から始まった革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の中に「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」というプログラムが採択され、電流を流さず、電圧のみで磁気メモリ素子を記録し、IT 機器の電力使用量を劇的に削減することを目的としている。

量子計算関係においては米国が圧倒的な層の厚さをもっており、軍事予算を通した研究サポートもある。現在、超伝導量子ビットや半導体量子ドット、イオントラップなどいくつかの系については大きなプロジェクトが走っている。IARPA を中心に集中的な活動が行われ、2009 年より 5 年間の大規模プロジェクトである Advanced Materials and Fabrication for Coherent Superconducting Qubits Program では超伝導量子ビットのコヒーレンス時間を向上するための材料・プロセスの研究に集中している。また並行して走っている Multi-Qubit Coherent Operations (MQCO) Program ではひとつのテーマとして超伝導量子ビット集積回路が取り上げられ、IBM と BBN Technology が共同で受託している。また上記のように Google が参入したということで、産業界の注目も集

まっている。Microsoft も以前から UCSB に研究所を運営しているが、D-Wave を成功例に、今後さらに民間の資金が投入されると予想される。欧州では SCALEQIT という超伝導量子ビット集積化と量子情報処理に向けたプロジェクトが 2013 年より開始されている。日本においては、革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」において継続して研究開発が行われる。

（５）キーワード

・待機電力、リーク電流、低消費電力、不揮発性メモリ、不揮発ロジック、不揮発性トランジスタ、待機電力ゼロ、リーク電流
・インスタント・オン、ロジック・イン・メモリ、集積半導体、More Moore、More than Moore 、Beyond CMOS
・抵抗変化メモリ、立体構造トランジスタ、トンネル・トランジスタ
・スピントロニクス、磁化反転、スピン、電圧駆動、電界誘起、スピン MOSFET、スピン伝導、スピン流、スピン注入、スピン蓄積、スピンデバイス、スピンロジック
・CNT、グラフェン（Graphene）、GNR、単原子欠陥、トポロジカル絶縁体
・脳型コンピュータ、脳型素子、自律的学習、非ノイマン型、ニューロン、シナプス
・量子情報処理，量子計算，量子通信，量子光学，量子計測，量子シミュレーション
・原子物理学、超伝導、シリコン、原子レベル計算

（６）国際比較

（ロジック、メモリ関係）

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、Steep Subthresholdを目指したデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの研究開発など、重要な研究領域にしっかりとした投資が行われ、深い学術的理解に基づく研究開発が行われている。 メモリ関係では、従来の電荷蓄積型に代わり、状態変化（抵抗変化など）を動作原理とする不揮発メモリの基礎研究が盛んであり、材料、プロセスなどの分野で世界をリードする結果が報告されている。スピントロニクス関係の評価では若手を中心に多くの成果が出ている。
	応用研究・開発	○	→	ロジック関係のデバイス技術が日本の差別化技術にならなくなりつつある。 メモリ関係では、DRAMやNANDフラッシュメモリの微細化限界が迫っており、これに代わる不揮発メモリの開発が活発に行われている。NANDフラッシュメモリを製造している東芝は、DRAM代替としてスピンRAMを使うことを目指した開発を、韓国のSK-Hynixと技術的な補完関係を構築しながら共同で進めている。また、ソニーは米国のMicronと共同で、ReRAMの研究開発を行っており、次世代メモリ開発では海外メーカーとの共同開発が一般化している。 産官学連携の研究開発として、つくばTIA-nanoを活用し、産業技術総合研究所の300mmウエハ試作ラインを用いて集積化検証を行う試作環境が整備された。これは、不揮発メモリを配線工程として埋め込むための試作環境であり、新材料を用いたデバイスの検証を行うことができる。しかし、これは時限的なプロジェクトして推進されてきたものであり、プロジェクトが終了する2015年以降の活用が課題である。 デバイス技術以外では、スピントロニクスによる磁気メモリや不揮発性論理回路への応用研究・開発などに国からの集中投資がなされ研究が活発化している。
	産業化	○	→	汎用のロジックデバイスでは日本企業として儲かる道筋が描けていない。 高集積メモリの分野では、19nm技術を用いたNANDフラッシュメモリが製品化されている。15nm技術を用いたNANDフラッシュメモリの量産化も始まっており、従来の浮遊ゲート構造を用いたフラッシュメモリの微細化路線が続いている。DRAMでは、旧エルピーダメモリが20nm技術を用いた8GbDRAMの製造やそれ以降のDRAMの開発を行っており、Micronに買収された後も、高い技術力が評価されている。 マイコンに混載されるフラッシュメモリの分野では、ルネサスエレクトロニクスが28nm技術を用いたマイコン内蔵用フラッシュメモリを開発したと発表している。これは、40nm技術を用いた製品の次世代を担う製品であり、マイコン業界では群を抜く製品である。しかし、製造は海外ファウンドリとの提携を想定しており、デバイス製造という観点での技術力の維持が懸念されている。
米国	基礎研究	○	→	トポロジカル絶縁体の研究など、新研究領域の取りかかり・立ち上がりが早い。 メモリ分野においては、新しい材料やデバイス・プロセス研究の萌芽は見られない。
	応用研究・開発	◎	↗	シリコンフォトニクスの研究開発は猛烈なスピードで進んでいる。 HPが2008年に第4の素子として発表したmemristorは、メモリ適用を目指してSK-Hynixと共同開発を行ってきたが、2014年6月に、memristorを活用し、さらにはphotonicsを組み込んだチップを2016年までに作ると発表した。 抵抗変化メモリの分野では、積み重ねたCNTが作る膜に電圧を印加することで発生する抵抗の違いを利用するメモリ（Nantero）や、金属が電解質膜中に作る金属架橋を利用したメモリ（Adesto）に関して、量産化可能であることを示すデータが出されており、ベンチャーキャピタルなどの資金を活用した製品化に向けた開発が行われている。

米国	産業化	○	→	ロジックではIntel、メモリではMicronなど米国内で各分野１社あるいは数社が生き残り、未だこの分野での産業化の意欲も高い。 MRAMの分野では、最初に製品化したEverspinからSTTを用いた64Mbのサンプルが出荷された。これは、現在研究開発が盛んに行われている垂直磁化を利用したSTT-MRAMではなく、平面磁化を用いたものであり微細化の観点では劣るが、量産技術に仕上げるだけの高い技術を有していることを示している。垂直磁化STT-MRAMでは、8Mbであるが完全動作するものを試作したという発表があり（TDK Headway）、STT-MRAMも集積化に関する初めての成果であり、量産化技術でも進んでいることをアピールした。 一方で、マイクロンは相変化メモリ（PCM）の生産を中止すると発表しており、新メモリビジネスの難しさを示している。
欧州	基礎研究	○	→	2014年から2020年の7年間で実施されるHorizon2020において、ICTは重要なテーマと位置づけられており、ナノエレクトロニクスやフォトニクス技術を含む技術開発が新世代システム開発として実施される。
	応用研究・開発	○	→	日米の企業からの発表減少もあり、IMEC（ベルギー）からの論文発表数が目立って多い（2013年6月VLSI Technology Symposium：9件、2013年12月　IEDM：15件、2014年6月　VLSI Technology Symposium；10件）。メモリ関係テーマとしては、ReRAMの発表が多い。CEA-Leti（仏）はメモリデバイスの研究にも注力しており、従来型の電荷蓄積型メモリから抵抗変化型まで、幅広く研究開発を行っている。イタリアの大学は、抵抗変化型メモリの動作機構や信頼性の基礎を、シミュレーションで検討する研究を継続的に行っている。 Infineonが自動車用途を目的に、MRAMの開発を行っていることを2014年のVLSI Technology Symposiumで発表しており、MRAMの技術的な進歩に伴い、混載不揮発メモリとして再び注目する会社が出てきたことを示している。
	産業化	△	→	基本的には、メモリメーカーがほとんど無いため、メモリに関する産業化の勢いは感じられない。マイクロンのPCMが新規の受注をストップしたことは、PCMを担当してきた欧州部門には大きな打撃である。
中国	基礎研究	○	→	メモリ関係では目立った発表はない。
	応用研究・開発	○	→	精華大学、北京大学などからの発表が増えており（IEDM2013；9件、VLSI2014；4件、ただし、海外との共同研究と思われる発表を含む）、成果が出つつあると思われる。発表にはReRAM関係も含まれている。 中国はPC分野では世界一であり、通信機器でも大きな飛躍を見せている。これらの製品開発を通して、メモリなどの分野でも発言力を増す可能性が高い。デバイスメーカーが育てば、応用研究・開発のアクティビティも高まるものと思われる。
	産業化	○	→	スマートフォンやタブレット用のMPU、BBチップの最大のメーカーであるQualcomが、28nmの技術でSMICと提携したと報道されており、この分野では、中国の巨大市場を狙った戦略的な提携が増えて行くと思われる。それに伴って製品開発や産業化の力も付いてくるのではないかと予想される。VLSI2014では、そのSMICからRRAMの報告があり、開発にも力を入れていると思われる。
韓国	基礎研究	○	→	基礎研究重視の政策による予算の増加を反映して、Nature誌に掲載された論文数が2013年増加したという報告がある。また、サムソンが2013年に、大学における基礎研究支援プログラム（1500億円）を発表しており（10年間）、大学を通した基礎研究促進にも力を入れていることがよくわかる。サムソンのグラフェンセンターは、大きな規模でグラフェンを成長させる技術を発表している。また、サムソンは最近、SiGeやナノワイヤの発表を行っており、FinFET以降を見据えたトランジスタの開発を行っていると思われる。
	応用研究・開発	○	↗	メモリに関して活発な開発を行っているのがSK-Hynixである。HPとはReRAMの共同開発を行い、東芝とはDRAM代替を狙ったMRAMの研究開発を行っている。また、PCRAMに関してはIBMと共同開発することを発表した。サムソンもMRAMなどに多くの人数を投入して研究開発を行っている。

	産業化	◎	↗	微細化限界を迎えつつあるNANDフラッシュメモリにおいて、更なる集積度向上策として注目されてきたのが、メモリ領域を積層する3次元構造のメモリセルである。東芝のBiCSを先駆けとして、サムソン、SK-Hynixも同種のメモリセルを発表し、2014年が量産化の年としてきた。サムソンは2014年7月に、32層を積層したメモリを作り、それをSSDに実装したと発表し、量産化の先頭に立った。
台湾	基礎研究	○	→	メモリ関係では目立った発表はない。
	応用研究・開発	○	→	台湾におけるメモリ分野での応用研究・開発ではMacronixがコンスタントに学会発表を行っている。PCMに関してIBMと共同研究を行っていが、最近では、ReRAMや3次元のNANDフラッシュなどに関する発表も行っている。
	産業化	○	→	メモリ分野では、台湾のメーカーが先頭を切って量産化をしているような製品はみあたらない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（量子情報関係）

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	◎	→	最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」、新学術領域研究「量子サイバネティクス」の支援を中心に研究が行われてきた。超伝導量子ビットに関しては、NEC / 理研、NTT の2グループが主になって研究を行ってきた。前者では近年超伝導量子ビットを人工原子として用いたマイクロ波量子光学の研究や、新しいタイプの量子ビットであるコヒーレント位相スリップ量子ビットの実証で成果を挙げている。後者ではダイヤモンド中の NV 中心の持つスピンと超伝導量子ビットを結合したハイブリッド量子系の研究を行っている。東大にも新しいチームが発足し、超伝導量子回路およびハイブリッド量子系の研究が立ち上がりつつある。 電子スピンを用いた量子ビットに関しては、半導体量子ドット、半導体中のドナー電子、ダイヤモンドNV中心などを用いた研究が、東大・慶応大・阪大などを中心になされている。 大学における研究チームが少なく、海外に比べて学生・若手研究者の育成に遅れがある。 理論面では理研チームが、海外研究者と活発に交流し成果を挙げている。ただし国内他のチームへの広がりが少ない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

米国	基礎研究	◎	↗	UC Santa Barbara (UCSB) チームと Yale 大学のチームなどにより、この10年間に急速な発展を見せている。UCSB では位相量子ビットと超伝導共振回路を用いた量子計算のための集積化アーキテクチャを提案し、2011年に4ビット＋5共振器の回路で Shor のアルゴリズムの実証を行った。Yale 大学は2004年に回路量子電磁力学のアイデアを実証するとともに2007年に transmon 型量子ビットを発明した。2011年には空洞共振器中の transmon 量子ビットが非常によいコヒーレンスを示すことを実証した。2014年にはUCSBが、5量子ビット回路上で99%超の量子ゲート演算精度を実証し、誤り耐性量子計算へ向けた研究が行われている。Boulder の NIST と JILA では超伝導量子回路を用いたナノメカニクスの量子力学的振る舞いの制御と観測が行われ、さらにオプトナノメカニクスとの融合が図られ、マイクロ波と光の間の量子インターフェースの実現を目指している。JILA 同様、UC Berkeley (UCB)、Princeton、Chicago、Wisconsin などの各大学に続々と UCSB、Yale の卒業生がグループを立ち上げそれぞれ新たな成果を挙げている。APS March Meeting でも発表件数がますます増加している。 企業では IBM が UCSB や Yale 大学の OB を中心に20名近くのチームを構成し、研究を進めている。IBM はBBN Technology と一緒に IARPA の Multi-qubit project を受けて超伝導量子計算回路のスケールアップを目指している。他にNorthlop-Grumann も低電力消費型の単一磁束量子論理回路を量子ビット回路の制御に用いる研究を行っている。 IARPA は別のプロジェクト Coherent superconducting qubits も走らせていて、UCSB を中心として超伝導量子ビットのコヒーレンスを改善するための材料・プロセス研究を大規模に進めている。こちらは5年のプロジェクトの後半にかかっているが、当初15ぐらいあった研究チームが現在は3つ (UCSB、 Yale、 UCB) に絞り込まれている。理論研究では Yale 大学の他に、UC Riverside、Northwestern、カナダの McGill、Sherbrooke などのチームが活躍している。また IBM では量子情報理論のチームと超伝導回路のグループが密接に連携している。
	応用研究・開発	◎	↗	カナダのベンチャー企業 D-wave が、断熱量子アニーリングマシンを開発し、2011年に米国 Lockheed-Martin 社に128量子ビットモデルの1号機を販売した。U. South California (USC) に運営を委託し研究に供している。また D-wave では Web 上で詳細を公開し、外部からの試用も推奨している。さらに2013年に512ビットモデルの2号機をGoogle、NASAらが購入し、量子人工知能研究所を設立して研究に供している。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
欧州	基礎研究	◎	→	EU のプロジェクトおよび各国独自のプログラム、また European Research Council の研究者個人対象のプロジェクトなどでサポートされている。世代交代が進み、40才以下の比較的若い研究リーダーが中心的役割を担うようになってきている。基礎物理的な研究が主流であり、原子物理や量子光学などとの交流も多い。2013年からEUのSCALE-QITという超伝導量子ビット集積回路を目指したプロジェクトが発足した。資金面では英国で、量子情報研究全体に300億円という政府予算がついたということが話題になっている。 スイスの ETH Zurich にも Yale 大学 OB が研究室を構え、30名近くの大きなグループで精力的に研究を行い、回路量子電磁力学の研究で多くの成果を挙げている。オランダの Delft 工科大学にも Yale 大学の OB が着任し、量子フィードバックや量子エラー訂正の研究を進めている。同大学では新たに量子計算研究センターを設立し、電気工学科も巻き込んで大規模化を目指している。フランスの CEA Saclay 研究所はこの分野の草分け的存在であり、固体中のスピン集団を用いた量子メモリの研究など現在も高いレベルの研究を行っている。Ecole Normale Superieure にも新しいチームが立ち上がりマイクロ波量子光学、量子フィードバック などの研究が行われている。スウェーデンのChalmers工科大学ではマイクロ波量子光学に関する成果として、理研の理論グループとの共同研究によるdynamical Casimir 効果の観測が報告された。フィンランドの Aalto 大学は現在超伝導ナノメカニクスの量子的振る舞いの研究に力を入れている。ドイツでは Erlangen、Aachen 大学に強力な理論のグループがある。実験では Karlsruhe およびMunchen工科大学が力を入れている。

	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
中国	基礎研究	△	↗	清華大学、中国科学技術院などに活発な理論グループがあり、理研との交流が多い。 実験グループは清華大学、南京大学、浙江大学などで米国帰りの研究者が立ち上げているが、まだ独自の優れた成果を出すには至っていない。しかし北京に計算科学研究センター、上海に超伝導研究センターが設立され新しいグループが立ちあがるなど、相変わらずふんだんな資金が投入されている。 学生層は厚く、欧米、日本へ留学している学生・ポスドクも多い。今後の伸びが予想される。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
韓国	基礎研究	×	→	目に見える活動はない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

（ロジック・メモリ関係）

1）http://www.nature.com/news/2011/110308/full/news.2011.143.html
2）http://spectrum.ieee.org/robotics/artificial-intelligence/moneta-a-mind-made-from-memristors/
3）C. Yoshida et. al. "Demonstration of non-volatile working memory through interface engineering in STT-MRAM ,"　2012 Symposium on VLSI Technology, p. 59, 2012.
4）J. Tominaga et. al., "The first principle computer simulation and real device characteristics of superlattice phase-change memory," 2010 IEEE International Electron Devices Meeting, p. 22.3.1, 2010.
5）http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_07/pr_j1306.htm.
6）http://www.elpida.com/pdfs/pr/2012-02-27j.pdf.
7）http://www.elpida.com/ja/news/2012/01-24r.html.
8）http://www.leap.or.jp/index.html.
9）http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120515-1/jn120515-1.html#1.
10）http://japan.renesas.com/edge_ol/special/01/index.jsp.
11）http://eetimes.jp/ee/articles/1202/01/news020.html.

12) http://www.kavlifoundation.org/science-spotlights/how-atomic-scale-devices-are-transforming-electronics.
13) http://www.rambus.com/us/news/press_releases/2012/120206.html.
14) http://eetimes.jp/ee/articles/1205/10/news089.html.
15) http://investors.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=692563.
16) http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imeciedm12papers.html.
17) http://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20120615_01.pdf.
18) http://thegadgetsite.com/2011/05/innovative-silicon-closing-doors-for-good/.
19) http://www.nanoctr.cn/.
20) http://www.kaist.edu/edu.html.
21) http://www.skhynix.com/en/pr_room/news-data-view.jsp?search.seq=2072&search.gubun=0014.
22) http://jp.reuters.com/article/technologyNews/idJPTYE83105F20120402.
23) http://www.itri.org.tw/eng/econtent/research/research03_01.aspx?SItem=1.
24) W. C. Chien et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, P.153.
25) F. M. Lee et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, p.67.
26) http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20120501/215675/?P=2.

（量子情報関係）

1) Quantum computing: An IBM perspective, M. Steffen *et al.*, IBM J. Res. & Dev. **55**, 13 (2011).
2) Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook: M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, Science **339**, 1169 (2013).
3) http://www.chalmers.se/mc2/scaleqit-en
4) http://qurope.eu/projects/qute-europe
5) European Research Council　http://erc.europa.eu/
6) D-wave http://www.dwavesys.com/en/dw_homepage.html
7) http://www.nas.nasa.gov/quantum/
8) Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance: R. Barends *et al.*, Nature **508**, 500 (2014).

３．４．２　二次元機能性原子薄膜（グラフェンなど）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

従来のバルク材料や単なる薄膜材料とは異なる特性・構造を持ち、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可能な、原子の二次元的結合構造、あるいはそれと等価な二次元的電子状態を表面・界面などに有する機能性を持った原子薄膜材料を研究開発の対象とする領域である。次世代の電子デバイス・システムに求められる大幅な低消費電力化、小型化およびそこに付加される新機能の創出などが期待される。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

1947 年のトランジスタの誕生以来、半導体集積デバイス（LSI）の低消費電力化・高速化はスケーリング則に従う微細化・高集積化により達成されてきた。しかし、近年、物理的並びに経済的に微細化の限界が近づき、新材料・新原理に基づく新規デバイス、あるいはデバイスの三次元化や超並列化へと研究開発の指向性はより多面的な広がりを見せている。一方、光通信産業を中心とするナノフォトニクスデバイス分野では化合物半導体からシリコンフォトニクスへの代替が、また、ディスプレイ、太陽電池、燃料電池、蓄電池等の分野では、レアメタルフリー化が大きな潮流となっている。グラフェンを中心とする二次元機能性原子薄膜は、それらいずれの分野においても新材料、新原理の導入をもたらしうる大きなポテンシャルを秘めている。

グラフェンは、2004 年、Manchester 大学の A. Geim と K. Novoselov が炭素一原子層のシートであるグラフェンの単離に成功し､その電子構造が質量のない相対論的 Dirac 電子としての特徴を有することを解明したことで急速に脚光を浴びた。この歴史的な研究成果により､両氏は 2010 年ノーベル物理学賞を受賞した。グラフェンのもつ質量の無い電子、究極の二次元機能性原子薄膜、炭素原子間の強い結合力、エッジの電子的・化学的活性といった特徴は、基礎科学の興味深い研究対象であるとともに、高速電子、スピン自由度、格子自由度はエレクトロニクス/スピントロニクスデバイスへの応用、力学的に強い二次元原子薄膜は力学材料､透明電極材料として､化学的活性は触媒応用へと、様々な応用への発展の可能性を秘めており、多くの産業応用が期待されている。

このような背景のもと、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、産業実用化までを目指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。また、研究交流の場として、欧州を中心に Graphene 20XX、Graphene Week、アジアを中心として、International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR 20XX)等の大きな国際会議が開催されている。

［これまでの取組み］

日本でのグラフェンや関連二次元原子膜系の研究は、従来、科学研究費等による個人研究への財政的支援が主体であり、その中で多様な研究が物理、化学、材料科学の分野で展開されてきた。この中で、一部、JST の CREST や科学研究費特別推進研究等の大型研究の推進も行われてきた。

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、化学技術戦略推進機構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。

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」(H23 年度)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」(H24 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」(H24□H26 年度)、2013 年文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(H25-29 年度)、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」(H26 - H28 年度)、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」(H26-33 年度)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始めている。

一方、海外に目を向けると、世界の主要国では、EU が Graphene Flagship(1300 億円)、韓国が 350 億円、シンガポールが 150 億円、英国 100 億円、米国が 50 億円/年と競って、グラフェンと関連物質の産業化を目指して大型の研究プロジェクトを走らせている。グラフェン製膜技術では、韓国 Samsung Electronics と Sung Kyunkwan 大の共同による大面積グラフェンシートの Roll-to-Roll 製膜技術の開発(2012 年)は透明電極材料として ITO を駆逐しうるポテンシャルを示した 1 つの画期的な成果であった。しかし、透明性と低抵抗性（高導電率性）を性能指標として、現状では ITO を凌駕するには至っていない。グラフェン製膜技術の改良は CVD 法においては米国テキサス大、SiC 熱分解法では米国ジョージア工科大等の外国勢が先導してきたが、我が国の技術水準は高く、CVD 法によるエピタキシャルグラフェン製膜（九大）や Si 基板上ヘテロエピグラフェン製膜（東北大）などで先導している。

グラフェンを中心とする二次元機能性原子薄膜のテラヘルツデバイス応用は、ノーベル賞受賞のマンチェスター大 K. Novoselov らのプラズモニック応用に関する論文[A.N. Grigorenko et al., Nature Photonics. 6, 749 (2012)]を 1 つの契機として、世界的に研究が過熱している。

グラフェン関連ベンチャー企業数は米国が圧倒的にリードしている（少なく見積もっても 29 社以上ある。第二位は英国および中国の 8 社。日本は 2 社である)。したがって、グラフェンの実用化研究が最も進んでいるのは米国であると言える。これは米国の公的資金によるベンチャー企業スタートアップの仕組みによるところが大きい。

ＩＰから見た動向は、2013 年の調査資料によると、公開件数のランキングは中国(2204 件)、米国（1754 件)、韓国（1160 件)、英国（54 件）である。企業別には Samsung（400 件以上)、IBM（<140 件）となっている（日本の企業、研究機関はトップ 10 に入っていない)。

グラフェン実用化の動向

グラフェンの実用化研究開発の進捗状況を推し量るうえで、世界的なグラフェンの大規模プロジェクトでの用途開発に実質的にどこから材料供給がなされているかがもう一つの指標となる。現在までに数多くのグラフェンの製造方法が開発されてきた。このうち、商業ベースで材料供給までたどり着いたのは、酸化グラフェンを基本技術とするグラフェン分散溶液（さらに紛体）、および CVD によるグラフェン原子層膜の二種類である。

グラフェン分散溶液を供給する企業として重要なのは、Angstron Materials、Vorbeck Materials Corporation、XG Sciences の三社であり、全て米国である。すでに年間数トンから数十トン（さらに 100 トンという話しもある）の供給能力があり、複合材料、バッテリー、スーパキャパシタ、導電性インク、などの用途開発を実施している。グラフェン分散溶液を原料として多岐にわたる用途が期待されているが、これまでのところ実用化が公になったのはテニスのラケットのみである。テニスラケット一本に使用するグラフェンは数ｍｇと極少量であるため、現在のところ上記 3 社からは供給過多にあると言わざるを得ない。より大口の用途を見つけるためには、グラフェン分散溶液の導電性を如何に高めるかにかかっている。酸化グラフェンを出発材料とする手法では、どうしても導電性に劣るため、最近は酸化グラフェンを経ないグラフェン分散溶液の製造方法が開発されてきている。その中で最近特に注目されるのは、Thomas Swan 社（英国）の回転ホモジナイザーを用いた黒鉛の剥離方法である（Trinity College Dublin の Coleman 教授が開発した手法）。同社はこの手法を用いて、ある程度の導電性を有するグラフェン分散溶液の供給をまもなく開始すると思われる。

CVD で製造するグラフェン原子層膜の供給は、用途開発に供するという観点では実質的に米国の Bluestone　Global Tech のみである。同社は可視光透過率 97%以上(ほぼ単層グラフェン)でシート抵抗 300～600Ω(ドーピングなし)のグラフェンを販売している。CVD の基材である銅箔から転写してドーピングなしの状態で移動度 2000～4000 cm^2/Vs を保証している。性能としては高いレベルにあると言えるが、課題は価格である。同社の HP では、24 インチ×300 インチの銅箔基材に積層したグラフェンを 80,000USD で販売している。A4 サイズに換算して約 11 万円と高価格であり、例えば ITO 透明導電フィルムと価格では全く競争にならない。スループットの低い熱 CVD による製造が高価格の原因である。

以上のように、現在、グラフェンの材料供給に関して、用途開発に資するという観点で重要な企業は、米国の 4 社（および英国の 1 社）である。いずれにしても現状において、用途開発に資する高品質グラフェン材料の大量生産法が確立されているとは言えない状況にある。このため用途開発を試行錯誤するための材料供給が不十分であり、グラフェンのキラーアプリケーション確立の大きな障害となっていると言える。

［今後必要となる取組み］

表面・界面しか存在しない二次元物質グラフェンを導入して機能性デバイスを構成するためには絶縁体、半導体、金属との接合が不可欠であり、 h-BN（ヘクサゴナルボロンナイトライド）や DLC（ダイヤモンドライクカーボン）などの絶縁材料と、MoS_2 や WS_2

をはじめとするダイカルコゲナイド系半導体材料が半金属のグラフェンとのヘテロ接合に適する相補的二次元材料として注目され、シリコン二次元原子膜シリセンやトポロジカル絶縁体を含めて、グラフェン単体の研究から Beyond Graphene の研究へと世の中の潮流がシフトしている状況にある。

デバイスへの応用としての具体的な取り組みとしては、新規な物理現象、化学現象を信号処理機能としてデバイスに応用するための基礎基盤研究の強化、二次元原子・分子薄膜ヘテロ接合材料としての超高品質ヘテロエピタキシー製膜技術および工業的量産化高品質成膜技術、In-Situ およびデバイス実動作状態下での材料・界面の物性評価解析技術、デバイスプロセス技術、デバイス応用に関する研究開発力向上のための人材育成、研究開発施策などが重要である。

（３）科学技術的・政策的課題

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、大きく水をあけられている。一方、日本では従来から裾野の広い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しており、大きな優位性を持っている。このことを生かして、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進め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、我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。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

新しい材料としてトポロジカル絶縁体などの研究も盛んに行われている。原子層オーダーで膜厚が制御されたグラフェン、h-BN、ダイカルコゲナイド半導体二次元機能性原子膜を連続的にヘテロエピ成長する製膜技術と材料構造・物性評価技術のリンケージ開発が新たな技術動向として注目されている。

2011 年頃まで加速度的に拡大・進展したグラフェンのトランジスタチャネル材料応用研究は、今や完全に MoS_2、WSe_2 等のダイカルコゲナイド系原子薄膜をチャネル材料とする FET デバイス研究にシフトしている（2014 年 6 月米国開催の第 72 回 Device Research Conference では全 74 件のオーラル講演のうち 18%が二次元原子薄膜デバイスであった）。

素材の産業応用としては、大面積量産化グラフェン製膜技術によるグリーンエネルギー応用のタッチパネル・太陽電池用透明電極、および蓄電池応用が先行し、MoS_2 や WS_2 等の二次元ダイカルコゲナイド半導体によるフレキシブル TFT の量産化がさらに続くであろう。

機能デバイス応用研究では、グラフェン単体の各種物性応用から、グラフェン（G）/h-

BN/グラフェン（G）ヘテロ接合を介した共鳴トンネリングやスピン注入など、二次元機能性原子薄膜ヘテロ接合に発現する物性機能応用へと研究動向が進化している。

超高周波ミリ波・テラヘルツ波・光波領域の光電子デバイス分野では、光検出器・変調器・フィルタ・ミキサ等のメタマテリアル・フォトニック結晶を含むプラズモニックデバイス開発が進展し、その後増幅器、レーザー光源、スピントロニクス等の能動デバイス開発が続く。

利得媒質としてのテラヘルツレーザー応用は日本発の理論提案で我が国（東北大）が実験検証も先行しているが、独 Max Plank Institute, ベルリン工科大、米 Columbia 大、Cornell 大等が、研究開発に本格参入し、国際競争が過熱してきている。

また、グラフェンの重要な国際会議 RPGR 2013 が日本で開催され、世界各国から 420 名の参加者があった。RPGR 2013 は日本で最初のグラフェンに関する大型国際会議である。

［注目すべきプロジェクト］

2013 年以降、日本においてもグラフェンと関連分野の研究での急速な進展が出てきている。2013 年度にグラフェン関連領域：文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(H25-29 年度)が採択され、さらに、2014 年度に NEDO の「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」（H26-28 年度）、JST の CREST 新領域として、「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」(H26-33 年度)が発足するに至り、ようやく、国家規模での研究開発投資体制が整ってきた。2013 年に企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として産総研グラフェンコンソーシアムが設立された。

EU では Graphene Flagship（2013 年 10 月発足、約 1300 億円、74 研究機関、17 ヶ国）の他、グラフェンの CVD 合成技術開発での遅れを取り戻すべく GLADIATOR（2013.11.15～、３.5 年、173 億円、民間企業 8、大学・研究機関 6）で大面積合成、製造コスト低減、デバイス開発に取り組み、さらに GRAFOL（2011.10.1- 2015.9.30、15 億円）で CVD の合成温度の低温化、ロール・ツー・ロール合成技術、デバイス開発などに取り組んでいる。

Flagship では、16 分野中 1 分野が beyond graphene を含む基礎科学、5 分野がデバイスに関連（高周波/光電子/スピントロニクス/センサ/フレキシブルエレクトロニクス/エネルギーデバイス）している。デバイス研究では、Beyond graphene ヘテロ接合デバイス応用のマンチェスター大、オプトエレクトロニックデバイス応用のケンブリッジ大等が先導している。

これらに加えて英国では独自に Graphene Hub（2012～、104 億円、マンチェスター大）、Print Graphene Technology（2014～、43 億円、ケンブリッジ大）でフレキシブルエレクトロニクス、バッテリー、キャパシタ、高速通信デバイスなどの応用技術開発を進めている。

米国からは上記のような大規模プロジェクトの話は聞こえてこないが、Beyond CMOS（2013/5/8 発表、5 年間、5MUSD、SUNY’S College of Nanoscale Science、the University of Nebraska-Lincoln、University of Texas at Austin の 3 大学に配分、マルチ

大学ネットワーク（34 大学、17 州が参画）: NRI(Nanoelectronics Research Initiative: : 半導体、ナノテク関連の連携組織；GLOBAL FOUNDRIES, IBM, Intel, Micron Technology and Texas Instruments))、グラフェン導電性インク工場建設計画（2013/2/14～、NSF から Volbeck Materials Corporation への助成、グラフェン導電性インク(年 40 トン超までの生産能力の拡大)、応用製品：導電性塗料、電池材料など、導電性インクは、フレキシブルエレクトロニクスの量産化に向けて使用されている（同社のコア技術はプリンストン大が開発したプロセスを用いた導電性インクの製造)）という、大きくはないが的をしぼった公的資金による応用開発を実施中である。

さらに NRI が主導するプロジェクトとしては、AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) が支援する基礎科学研究 10 課題の 1 つとして"2D Materials and Devices beyond Graphene"（代表 Prof. Ajayan, at Rice Univ.）を 10 億円規模で推進中である。CVD による MoS2 原子膜の SiO2/Si 基板上直接成膜やグラフェン/h-BN/グラフェンナノキャパシタの製膜・解析を報告するなど、二次元原子薄膜ヘテロ接合構造体の製膜とデバイス応用で先導している。

韓国では Korea Graphene Hub project（2012～、6 年、210 億円）でタッチパネル、有機 LED、エレクトロクロミック窓、2 次電池、スーパキャパシタ、コンポジット、などの開発を実施中である。

中国は 2013 年 12 月に「重慶グラフェン産業パーク」建設の計画を発表した[1]。【以下発表資料より：重慶グラフェン産業パークはグラフェンタッチスクリーン、グラフェン製電子チップ用ラジエーター(放熱材)、グラフェンリチウム電池用電極材料、グラフェン半導体管などの産業方向を巡って、グラフェン産業上下流の応用技術の研究開発と応用製品模範拡販を通して、応用企業を主体とし、産学研をコンビナートした産業チェーン集団を構築する。産業パークは約 5 年間をかけてグラフェン応用研究開発企業を 20 社以上培養し、上下流の応用生産企業 100 余社を招致し、発展させ、生産値 1000 億元（1 兆 6690 億円規模）の国家級グラフェン産業化模範基地を目指す計画をしている。】

（５）キーワード

グラフェン、二次元機能性原子薄膜、相対論的 Dirac 電子、h-BN、ダイカルコゲナイド、トポロジカル絶縁体、機能デバイス、エレクトロニクス/スピントロニクスデバイス、透明電極、力学材料

1 http://jp.cq.gov.cn/government/OfficialRelease/2013/12/31/1171842.shtml

（６）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	○	↗	従来から日本はグラフェンや二次元薄膜の研究では、先導的な多くの業績があった。電子顕微鏡を始め原子オーダーの構造解析では世界最先端と言える。h-BNは日本のオリジナルであり、シリセンでもエピ製膜で最先端の位置を確保している。2013年科学研究費新学術領域「原子層科学」プロジェクトがスタートし、化学、物理、材料科学分野の研究者が連携して研究を推進する基礎ができた。
	応用研究・開発	○	↗	Si上ヘテロエピグラフェン製膜と光電子デバイス応用、グラフェンバンドギャップエンジニアリングと電子デバイス応用、グラフェン金属の界面化学・物理と電子デバイス応用、スピン注入制御、バイオセンシング応用等の分野で日本は世界のトップレベルである。Beyond Graphene材料のデバイス応用も層が厚い。2014年、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」がスタートし、基礎的研究から応用研究への展開が推進されてきている。また2014年から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」（H26‐H28年度）も開始され、実用化に向けたプロジェクトがようやく軌道に乗りつつある。
	産業化	○	↗	2013年、産総研グラフェンコンソーシアムが立ち上げられ、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。グラフェンRoll-to-roll製膜技術は韓国に並び世界トップレベルにある。タッチパネルディスプレイ・太陽電池電極応用、LSI配線応用で産業化へ展開をはかっている。グラフェン製膜・装置ベンチャーGraphene Platform Corp.が国内大手LSI-CAD, プリンティングメーカと連携するなど、産業応用が多面的に展開されつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	光電子量子スピン基礎物性、非平衡キャリア緩和と多岐にわたり、欧州とならんで基礎研究に強い。グラフェン、二次元原子膜の物理、化学、材料科学等で伝統的に優れた研究成果を生み出しており、裾野は広い。個人研究が主体であり、プロジェクト的な研究は行われていない。研究費総額は基礎、応用を含めて、およそ50億円/年程度である。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究から応用研究まで、研究の展開が行われており、優れた研究成果を生み出している。研究費総額は基礎、応用を含めて、およそ50億円/年程度である。トランジスタデバイス応用はIBM が先駆的成果を上げ、多くの大学・民間研究機関が世界を先導している。NRI(Nanoelectronics Research Initiative)が主導する半導体・ナノテク関連のFunding AgencyとしてAFOSR (Air Force Office of Scientific Research) が支援する基礎科学研究10課題の１つとして”2D Materials and Devices beyond Graphene”を10億円規模で推進中。MoS2等ダイカルコゲナイド半導体二次元製膜技術とそのトランジスタ応用、G/h-BN/Gナノキャパシタを中心とする二次元原子膜ヘテロ接合形成でも最先端をいっている。
	産業化	○	↗	グラフェンの産業化等、企業活動は活発に行われており、特許登録数も中国に次いでいるが、グラフェンデバイス研究を牽引していたIBMに産業化の兆しはまだ見えない。CVDグラフェン、MoS2, WS2等を製膜・販売するGraphene Supermarket Inc.や3Dプリンタ技術でグラフェンコンポジット材料の商用化を開始したGraphene-3D-Lab Inc. のように、ベンチャー企業による産業化が活発で今後も増大傾向にある。
欧州	基礎研究	◎	↗	基礎物性ではノーベル物理学賞受賞者を輩出した英国、応用光電子物性ではドイツ、スピントロニクス・製膜ではフランス、プラズモニクスでは英国・スペインと世界トップの実績を出している。各国が特色ある強みを持っている。 Graphene Flagshipのプロジェクトは、基礎研究を応用展開に結びつける役割を果たすと期待されている。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	2013年にEUでの大型プロジェクトGraphene Flagship (2013-2022、総額1300億円)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。 Flagshipでは16分野中1分野がbeyond grapheneを含む基礎科学、5分野がデバイスに関連（高周波/光電子/スピントロニクス/センサ/フレキシブルエレクトロニクス/エネルギーデバイス）している。これら6分野を毎年50億円規模で10年間に亘り支援する。デバイス研究では、Beyond graphene ヘテロ接合デバイス応用のマンチェスター大、オプトエレクトロニックデバイス応用のケンブリッジ大等が先導している。
	産業化	◎	↗	Graphene FlagshipにはAirbus、NOKIA等、様々な企業が参加、参加予定をしており、応用研究での成果の産業化、商品化への展開が今後期待される。Manchester大からのSpinoutによるGraphene Research Com.や２-DTECHをはじめ、ベンチャー企業化が活発である。
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、徐々に大きくなってきている。2011年より第12次5か年計画において、戦略的振興産業（全7産業）として「新素材」を指定。重大科学研究計画で 「ナノ研究」を指定。基礎研究も規模・質ともに向上している。
	応用研究・開発	○	↗	応用研究も活発に行われており、今後も強まる傾向にある。グラフェン関連の学術論文出版数では第5位であった2008年から年間で世界第一に飛躍した。
	産業化	○	↗	グラフェンの産業化も活発に進められており、特許登録数も世界でトップとなっている。The Sixth Element社および Ningbo Marsh社がグラフェン材料製膜・サプライヤとして主要企業とされるが品質は欧米日に劣るとの評価。デバイス関連での産業化の兆しはまだ見えない。
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盛んに行われており、KIASで2009年アジアで最初の大規模なグラフェンの国際会議が開催された。Institute of basic science program(2013-2022、総額90億円)がスタートし、この中では、外国の著名な研究者も参加している。欧米の研究機関との共同によって、基礎研究レベルを向上させる戦略を取っている。
	応用研究・開発	◎	↗	Global Frontier Program：Soft electronics (2011-2020、総額81億円)のプロジェクトがスタートし、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目指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。KAIST, National Seoul大もグラフェン・二次元薄膜デバイス応用の研究拠点になっている。
	産業化	○	↗	R&D strategic program (2013 ~ 2019、総額110億円)のプロジェクトが行われ、タッチパネル、OLED、エネルギーデバイス等のグラフェン応用の商品化に向けた研究が行われている。Samsungを中心に精力的な技術開発が行われているが、この1社しか産業化推進企業が存在しないので、裾野の広がりが見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) Technical Digest of the 72th Annual Device Research Conference.
2) NRI (Nanoelectronics Research Initiative) Home Page Web Site
https://www.src.org/program/nri/
3) NNI (National Nanotechnology Initiative), USA, Home Page Web Site
http://www.nano.gov/
4) AFOSR (US Air Force Office of Scientific Research) Basic Research Initiative Fact Sheet
http://www.wpafb.af.mil/library/factsheets
5) Graphene Flagship Home Page Web Site
http://graphene-flagship.eu/
6) Lux Research, “Fishing for Carbon Gems in a Vast Sea of Oversupply: Assessing China’s Carbon Nanotube and Graphene Landscape,”
https://portal.luxresearchinc.com/research/report_excerpt/15397

３．４．３　スピントロニクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

電子のもつ 2 つの性質である電荷とスピンの両者を利用するエレクトロニクスの分野を「スピントロニクス」と呼ぶ。以下では、(a) 磁性半導体と光スピントロニクス、(b) スピントロニクスデバイス、(c) スピン流の３つに分けて記載する。

スピントロニクスの領域の中で最近急浮上してきたのがスピン角運動量の流れ、すなわち、スピン流の考え方である。純粋スピン流は電荷の移動に伴うジュール熱の発生を伴わないため、情報の伝送にエネルギーを要しない、また、磁界中でのスピンの歳差運動の回転方向が決まっていることから、量子整流効果に基づくスピンゼーベック効果などなど新しい現象が見いだされるなど発展途上の分野である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

磁性半導体は、半導体ベース構造やデバイスに磁性やスピンを持ち込み、半導体技術（光や電場）で磁性を制御するために必須となる基幹材料として位置づけられる。

(b) スピントロニクスデバイス

現在のコンピュータ・IT 機器の基盤であるメモリ（DRAM、SRAM など）やトランジスタ（CMOS）は、全て動作時あるいは待機時の消費電力が大きく、省電力化には本質的な限界がある。その結果、スマートフォンなどのモバイル IT 機器は頻繁な充電が必要となり、電力消費の増加と利便性の低下を引き起こしている。これらの問題を根本的に解決するために、スピントロニクス技術によるメモリや情報処理の不揮発化・超省電力化、無充電で長期間使用できる IT 機器および分散型 IT システムの実現などが望まれている。

(c) スピン流

電子は電荷とスピンを持っていることから、電流のスピン版ともいうべきスピン流（電子スピン角運動量の流れ）を考えることができる。しかし、スピン流は物質中ではごく短い距離（スピン拡散長）で減衰してしまうため、最近までスピン流による物理現象は知られていなかった。スピン流は基本的な対称性が電流と異なり、散逸の機構が電流と大きく異なることから、電流駆動のエレクトロニクスでは実現不可能だった超低消費電力の電子デバイス・量子情報伝送を実現できる可能性を秘めている。最近ではスピンが有する量子力学的な整流作用を利用した熱電変換なども実証されており、新原理のエネルギーデバイス技術としての研究開発も始まっている。

［これまでの取組み］

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

1960 年代以来研究が進められ、20 世紀末に我が国の研究者によって開発された III-V 族化合物半導体をベースとする磁性半導体は、遍歴電子系と局在電子系の境界領域における磁性の探索および制御という学術的意義のもとに研究が進められた。(Ga,Mn)As を中心として室温強磁性を目指す研究が 2000－2010 年にかけて世界的に展開されてきた。

現在は、キュリー温度は 210 K くらいで飽和しており、新たなブレークスルーを模索する研究が欧州と日本で継続されているが、以前の勢いは見られない。米国陣営はこの分野からほとんど撤退し、多くはトポロジカル絶縁体やマルチフェロイック材料開発に向かった。日本で見いだされた Co 添加 TiO_2 に代表される酸化物系薄膜の室温強磁性は実験的に確立しているが、応用出口が明確でないため広く認知されていない。欧州陣はバランス良く進めている。

一方、光スピントロニクスは、「光と物質の角運動量を互換にするためデバイス創出」という側面と、電磁波、特に、超高周波である可視光による「秩序スピンの超高速制御」の追究という２つの側面をもつ。前者は、キラル合成化学，３次元ディスプレイ、量子通信などへの応用が控えており「スピン緩和のエンジニアリング」という学術的意義をもつ。後者は、光演算、超高速スピントロニクス、超高密度記録への応用が控えており、「非平衡状態における電子軌道・格子・スピン相互作用の体系的理解」という学術的意義をもつ。

金属系材料を中心に、磁化の光励起超高速現象の追究が、欧州（オランダ，ドイツ，その共同研究先）ならびに米国主導で進んでいる。彼らの主たる実験手法は超高速 X 線分光であるが、新規材料・構造は，日本とロシアの研究者が提供している場合が多い。先鋭的研究は、フランス，オランダ、日本において進行中で、日本では、磁性半導体ならびに金属系多層膜で弱励起での超高速磁気現象の探究と応用研究を進めている。電磁波あるいはプラズモンによる秩序スピンの操作研究も米国 Kwan が大型予算を使ったプロジェクトを展開中である。2000 年以降の半導体スピン注入の研究に隠れているが、円偏光発光・受光デバイスの創出が連綿と続いており、最近では、光デバイス研究者らにもその重要性と新規性が認知され始めている。

新潮流としては、新たなフォトニック材料開発をめざして、磁性絶縁体（磁性ガーネット）の薄膜化研究が、中国、ロシア、ポーランド、日本で盛んになり始めている。

（b）スピントロニクスデバイス

磁性／非磁性金属多層構造膜における巨大磁気抵抗効果(GMR)、磁性金属／絶縁体／磁性金属におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)は、ハードディスクの高密度化に寄与したほか、不揮発性磁気記録素子 MRAM などのスピントロニクスデバイスとして実用化された。さらにスピン移行トルク(STT)が見出され、STT-MRAM として高密度不揮発記録素子のみならず、ロジック素子に組み込みメモリとして導入されつつある。これには、酸化物を障壁層とする TMR 素子をベースとする不揮発性記録素子をロジック回路に持ち込んだ新たなスピントロニクスデバイスが大きく貢献している。さらに、最近になって、これまでの電流によるスピン制御から、電圧印加によるスピン制御のできるスピントロニクスデバイスが見いだされ、さらなる省電力化の道筋が拓かれつつある。

スピントロニクス技術の応用研究開発に関する日本のこれまでの大きな取り組みとしては、(i)「NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(2006-2010)および「NEDO ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」(2011-2015)、(ii)FIRST プログラム「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」(2010-2013)、(iii)JST の研究成果展開事業（S-イノベ）の「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」(2011-現在）などが行われてきた。これらの取り組みによって、日本は基

礎研究のみならず、基盤技術を産業界に橋渡しする応用研究でも世界をリードするに至っている。特に、産業応用の中核となる高性能 MgO-MTJ 素子および垂直磁化 STT-MRAM は日本発の技術であり、橋渡し応用研究でも日本が世界をリードしている。

また、スピン移行トルクを利用したスピントルク振動子、スピンダイスなど、新たなスピントロニクスデバイスが生まれている。

Datta, Das の提案したスピントランジスタは、スピン注入の困難さから実現してこなかったが、最近の研究により、シリコン、ゲルマニウム、グラフェンなどにスピン偏極した電子を注入し、ゲートに印加した電圧によってスピン蓄積を制御する技術が確立し、実現に向かって一歩進展した。ここでも日本の研究者の寄与が大きい。

（c）スピン流

近年のナノテクノロジーの進展によって、スピン流の減衰長よりも短いスケールの物性が探索され、スピン流のもたらす現象が次々と発見された。特に 2000 年頃以降、スピン流による磁化反転現象の実験が世界中で報告されるようになり、室温で安定動作する磁気メモリの書き込み原理として瞬く間に実用化レベルに到達した。これによりスピン流の概念の有用性が示され、スピン流の物性研究が本格的に開始された。

スピン流に関する物性研究の初期段階では、電流について知られている現象のスピン流版を探す研究が行われた。2006 年には、逆スピンホール効果と呼ばれるスピン流の電気的測定方法が日本及び米国のグループによりほぼ同時に発見された。この現象は、2004 年に発見されたスピンホール効果の逆効果であり、アンペールの法則のスピン流版と見做すことができる。逆スピンホール効果の発見によってスピン流が定量的な実験科学の対象となり、この測定方法を用いてスピン流の新現象が次々に発見された。

スピン流の生成原理としては、スピンポンピングと呼ばれる、磁化ダイナミクスからスピン流が誘起される現象が見出された。また、非一様な磁化運動からスピン流が作られることも明らかになり、これはファラデーの電磁誘導のスピン版に相当していることが日本の研究グループによって示された。現在は物質中の電磁気学に組み込む研究も行われている。磁壁や磁気ボルテックスがスピン偏極電流で動く現象も観測されており、磁壁を（磁場を用いずに）電気的に高速に動かせるため、情報記憶素子への応用が期待されている。

電気だけでなく、熱、光、音などからスピン流が作られる現象も続々と発見されている。代表的な例がスピンゼーベック効果であり、磁性体/金属界面に温度勾配を加えるとスピン流が生成されることが 2008 年に我が国の研究者によって見出され、理論構築においても日本の研究者が重要な役割を果たした。スピンゼーベック効果を利用した新しい熱電変換技術に関する応用研究も始まっている。スピンゼーベック効果の原理を応用することで、熱のみならず音や光など自然界の様々な揺らぎを整流できる可能性が生まれ、実証実験が進められている。

以上のように、スピン流の概念を足掛かりに新しい現象が次々に発見された。スピンホール効果に関する考察から、トポロジカル絶縁体などの新しい展開も生まれている。更には従来から知られていたスピントロニクス現象の多くもスピン流の概念を用いて見通し良く整理されることがわかり、スピン流は物性物理において重要な概念となっている。

スピントロニクス（特にスピン流）に関する研究開発においては、基礎・応用の両面において日本の研究グループが多大な功績を挙げており、我が国で発見されたスピン流の電磁現象も多い。我が国の研究者が世界をリードしているスピントロニクス分野の更なる発展により、日本の産業競争力の源泉となってきたエレクトロニクスの国際的な競争力回復・強化に繋がることも期待される。

［今後必要となる取組み］

（a）磁性半導体・光スピントロニクス

新規な発想・目標による材料創出（例えば，光感受性の高い反強磁性半導体薄膜の創出、制御された磁性金属界面を豊富に内包する複合ナノ構造の創出と界面磁性の電子制御、半導体基板ならびにガラス基板上での酸化物系磁性半導体・絶縁体結晶薄膜の作製法の追究）が必要である。このような発想に基づく研究は、半導体を母体とする系だけでなく、金属系や絶縁体系を母体とする材料系でも広く展開する価値のあるものである。

III-V 族強磁性半導体の研究の深化のための材料開発（例えば、n 型強磁性半導体、発光する機能を備えた磁性半導体や磁性絶縁体、光波長としては、分子選別として有用な赤外光から医療・生物応用までを網羅する紫外光領域まで)。このような材料研究では、重点的な研究費投入よりは、細くても長期的な研究費投入（極端に言えば、経験を積んだ研究者１，２名による先端的な研究）を行うべき領域と考える。

このほか、光スピントロニクスの分野では、高機能な円偏光発光・受光デバイスの創出（室温化を含む)、スピン交換相互作用、ならびに，スピン軌道相互作用の光励起制御の学理構築、磁化の不揮発性を光励起で生じる非平衡状態で動的に制御することで生じる新機能を応用する研究．例えば，偏光による光信号変調・遅延や一時的記憶などが挙げられる。

（b）スピントロニクスデバイス

スピントルク(STT)書き込みの次に来る究極の省電力書き込み技術として、電界誘起磁気異方性変化現象を用いた「電圧トルク」書き込みが期待されている。これは 2012 年に大阪大学のグループが初めて実現した日本発の技術である [1)]。このような日本初の技術を世界に先駆けて実用化に結びつけるには、早い段階から橋渡し応用研究に投資することが重要となるが、電圧トルク書き込みの応用研究については、2014 年度後半から開始する ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」（プログラムマネージャ：佐橋政司）の最重要テーマとなっており、日本が世界に先駆けて産学官連携の研究開発をスタートする体制が整っている。

（c）スピン流

スピントロニクスの有効理論の建設が必要である。エレクトロニクスは電磁気学の基礎の上に成り立っており、物質中の電磁場の性質を記述する膨大なパラメータの中から少数の本質となる情報を抽出した有効理論「物質の電磁気学」を用いて、応用の学理やテクノロジーの体系が構築されてきた。スピン流科学の幅広い応用を推し進めるためには、このような簡便で扱いやすい有効理論の建設が重要である。

（３）科学技術的・政策的課題

（a）磁性半導体・光スピントロニクス

新規な発想・目標による材料創出、高機能な円偏光発光・受光デバイスの創出を支える仕組みとして、熟練研究者と若手研究者を組み合わせた、新しい視点を有する細くても息の長い材料・物性研究のサポートが必要である。また、III-V 族強磁性半導体研究のさらなる深化、光スピントロニクスのさらなる展開を支える仕組みとして、光デバイス研究者とスピン物性研究者の交流フォーラムの構築（たとえば、小規模で息の長い国際シンポジウム）があるとよい。

（b）スピントロニクスデバイス

不揮発性メモリ MRAM や HDD 再生磁気ヘッドの中核技術である磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR 効果)は、1995 年に東北大の宮崎照宣教授が世界で初めて室温で実現した技術である。しかし、MRAM は航空宇宙・軍事技術として DARPA の支援を受けていち早く実用化に取り組んだフリースケール社（現 Everspin Technologies 社）が世界に先駆けて実用化に成功し、現在もニッチマーケットではあるが世界をリードしている。一方、日本企業は民生品と大規模市場に重きを置いているため、未成熟な基礎研究の段階では実用化を見据えた本腰を入れた研究開発に取り組みにくい環境がある。また、先ずはニッチマーケットを目指した製品開発の手法としてベンチャー企業が有効であるが、日本がベンチャー企業に不向きな環境であることは周知の通りである。このため、折角の日本発の革新的技術であっても、製品化で米国の後塵を拝することがよくある。日本においても、挑戦的なベンチャー企業を育成するための規制改革、税制改革が求められる。

（c）スピン流

エレクトロニクスの単なる焼き直しではなく、電流では不可能なスピンならではの機能の実現が最も重要である。スピン流が有する新機能を利用することで、飛躍的な消費電力削減や高効率なエネルギー変換、超高速演算などを実現できる可能性があり、原理実証のみならず、デバイスレベルからシステムレベルにまたがる研究開発やプロジェクトが必要であろう。

日本のスピントロニクス分野には厚い技術・人材蓄積があり、若手研究者が世界的に注目を集める研究成果を挙げた例も多い。一方で、スピン流に関する研究の大半は物性物理分野の研究者によって行われているのが現状であり、萌芽的段階にあるスピン流の応用研究については、産学官での十分な研究・人材交流が行われていない。スピン流が有する特徴を生かしたデバイスアーキテクチャを構築するためには、システム（回路）・デバイスの専門家との協調や産学連携の強化が不可欠であり、このような場を提供するプロジェクトを策定しなくてはならない。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・電圧誘起磁化反転を用いた電圧トルク MRAM

電流(スピントルク STT)を書き込みに用いる STT-MRAM は磁界書き込み型のトグル MRAM に比べて格段に低消費電力であるが、それでも書き込み電流に伴うジュール熱

によるエネルギー浪費は避けられない。これに対して、電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧誘起トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧トルクMRAM」は、電流をほとんど流さずに電圧のみで書き込みができるため、理論的にはSTT-MRAMよりもさらに2桁小さなエネルギーでの書き込みが可能となる。ただし、電圧トルク書き込みは原理実証実験に成功したばかりの未成熟な技術であるため、電圧トルクMRAMの実用化に向けて解決すべき課題が山積している。純粋な電圧トルクMRAMに移行する前の第一段階として、スピントルクと電圧トルクの併用型MRAMの実用化が期待される。

・ハーディスクの瓦記録(Shingled Magnetic Recording: SMR)と二次元磁気記録(Two Dimentional Magnetic Recording: TDMR)

現在のHDDは、MgO-MTJ素子を用いたTMR再生磁気ヘッド、垂直磁気記録媒体、および単磁極型の記録ヘッドによって構成されており、その面記録密度は750 Gbit/inch^{2}を超えている。現在の記録方式では、記録媒体上のトラック幅≒記録・再生ヘッドの横幅となっている。現在、トラック幅が30 nmまで微細化しており、これ以上トラック幅が狭まると(i)微細な記録ヘッドでは十分な書き込み磁界が発生できない、(ii)微細な記録ビットからの微弱な磁界信号を高S/N比で再生することが困難になる、という問題が生じるため、これ以上の高記録密度化は困難な状況にある。これらの問題の早急な解決策として、瓦記録(Shingled Magnetic Recording: SMR)と二次元磁気記録(Two Dimentional Magnetic Recording: TDMR)の近い将来の実用化が見込まれている。瓦記録SMRでは、トラック幅よりも横幅の広い単磁極記録ヘッドを用いて大きな書き込み磁界を発生させ、記録ヘッドをトラック幅分だけ横にずらしながら記録を行うことにより、記録ヘッドの片側の角だけを用いて書き込みを行う技術である。屋根瓦を重ねるように記録ビットを書き込んでいくことから、瓦記録と呼ばれる。一方、二次元磁気記録TDMRは、再生ヘッド中に複数のTMRヘッド用MTJ素子を近接させてトラックをまたぐように配置し、記録トラックからの信号磁界を差動読み出しすることによって、狭トラックからの微弱な磁界信号を高S/N比で読み出す技術である。SMRもTDMRも既存の素子技術に基づいているため、実用化に向けた障壁は比較的低く、近い将来の実用化が見込まれる。これらの技術によって、HDDの記録密度は1 Tbit/inch^{2}を超えるものと期待される。

・HDDの熱アシスト磁気記録(Heat-Assisted Magnetic Recording: HAMR)、マイクロ波アシスト書き込み(Microwave-Assisted Magnetic Recording: MAMR)

SMR・TDMRの次の新技術として、熱アシスト書き込み(HAMR)の実用化が期待されている。HAMRは、書き込み瞬間だけ記録媒体の記録箇所にレーザーを照射して加熱し、書き込みにくい高磁気異方性媒体に書き込みを行う技術である。これにより、超微細化しても長期間の記録保持が可能な高磁気異方性媒体への書き込みが可能となり、さらなる高記録密度化が可能となる。すでに米シーゲイト社はHAMRを用いたHDD試作品のデモを行っており、長期耐久性などの残された問題が解決されれば実用化可能な技術である。一方、熱の代わりにマイクロ波を照射することで高磁気異方性媒体に書き込みを行う技術がマイクロ波アシスト書き込みMAMRである。MAMRはHAMRに比べて理論的にはメリットが多いが、まだ基礎研究段階にあるため、実用化の目処はま

だ立っていない。

2010年に、スピン流が金属や半導体のみならず、絶縁体においても存在できることが明らかになった。これは、スピン波やマグノンと呼ばれる準粒子にスピン角運動量を輸送させることによって実現され、絶縁体中のスピン波スピン流を介した電気信号伝送や、絶縁体におけるスピンゼーベック効果およびこれを用いた熱電変換などの新機能が実証されている。絶縁体中のスピン流には基本的にジュール損失も存在しない。これらは、電流に基づくエレクトロニクスでは実現できない機能であり、今後の展開が期待される。

・マグノニクスの新展開

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目指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飛躍的な進展を遂げている。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。

［注目すべきプロジェクト］

・科学研究費新学術領域「スピン変換科学」（H26.9 月発足）
・ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」（プログラムマネージャ：佐橋政司）
・NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発 [3] 参照）」
・科研費特定領域研究「スピン流」（2007-2010）および 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」（2007-2013）：これらを通じて、スピン流物理の基盤が構築された。
・JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO :「齊藤スピン磁気整流」領域(2014-2020)がスタートし、本格的なスピン流の研究が開始された。
・FIRST の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」（2010-2013）
・JST 研究成果展開事業 S-イノベ「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」（2011-）この事業では、実際にはスピン流に直接関連したテーマは採択されていない。

海外の状況

・IMEC STT-MRAM プロジェクト
IMEC が中心となった産官学連携の STT-MRAM 基盤技術開発プログラム。IMEC の・300mm ファブを拠点に、民間企業（Qualcomm、Global Foundries、キヤノンアネルバ、東京エレクトロン）、ベルギーおよびフランスの大学などが参画。
・シンガポール A*STAR と Global Foundries の連携
シンガポールの国立研究機関 A*ASTAR の Institute of Microelectronics (IME)内に半導体ファウンドリ大手 Global Foundries との共同ラボを設立し、STT-MRAM の共同開発を行う計画。これに、現在唯一の MRAM メーカーである米 Everspin Technologies と Global Foundries の共同研究開発 [4]が連携し、300mm ウェハ、

28 nm および 40 nm プロセスを用いた STT-MRAM 技術開発が行われる模様。

・スピン流と熱の融合研究

欧州や米国では、スピン流と熱の融合研究、特にスピンゼーベック効果に関する研究プロジェクトも立ち上がっている。2010 年には、ドイツで大型プロジェクト「SpinCaT」が立ち上がり、現在ドイツやオランダのスピントロニクス研究者のかなりの割合がスピンゼーベック効果の研究に参入している。米国でもこの分野の大きな予算が組まれ始めている。

（５）キーワード

スピントロニクス、光スピントロニクス、磁性半導体、スピン偏極、スピン流、スピン伝導、スピン注入、スピン蓄積、スピン軌道相互作用、スピン波、マグノン、マグノニクス、スピンホール効果、逆スピンホール効果、スピンゼーベック効果、スピンポンピング、熱電変換、熱揺らぎ、磁化反転、不揮発性メモリ、スピンロジック、磁気抵抗効果、スピン移行トルク、磁壁、磁気ボルテックス、強磁性体、フェリ磁性体、絶縁体、薄膜、電圧トルク、MRAM、STTMRAM、HDD、HAMR、MAMR

（６）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	◎	→	**磁性半導体・光スピントロニクス**：現状維持だが，磁性金属・絶縁体系における光・マイクロ波関連現象の研究は活発化していくと思われる。 **スピントロニクスデバイス：**大阪大学グループによる世界初の「電圧による双方向磁化反転の実現」[1)]、産総研、NIMS、東北大グループなどによる新材料開発など、MRAM・磁気記録関連の基盤技術の研究開発で顕著な成果が創出されている。 **スピン流：**科研費特定領域研究「スピン流」（2007-2010）の中で関連する基礎研究が行われた他、JST-ERATO「齊藤スピン量子磁気整流」が新たに展開
	応用研究・開発	◎	↗	**磁性半導体・光スピントロニクス**：円偏光発光・受光素子，光・マイクロ波アシスト磁気記録ならびにマグノニクス（既存フェライトエレクトロニクスのナノ版）への展開 **スピントロニクスデバイス：**NEDOノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発、ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」など、基礎研究成果の産業界への橋渡しを目指した産学官連携プロジェクトが盛んに行われている。 **スピン流：**JST研究成果展開事業（S-イノベ）の「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」（2011-）の中でスピン流の新たな革新的応用可能性を探ることを目的とした研究が行われている。電機・材料メーカーを中心に、スピン流効果（特にスピンゼーベック効果）を研究している企業は多い。国からの産学連携に向けた支援は今のところ得られていない。
	産業化	◎	→	**光スピントロニクス：**企業における光・マイクロ波アシスト磁気記録 **スピントロニクスデバイス：**不揮発性メモリに関しては、東芝ーハイニクス連合のSTT-MRAM開発は世界をリードしている。HDD新技術の事業化に関しては個々の部品メーカーの活動が中心で、目立った動きは見られない。MRAM、HDD関連の製造装置開発は、世界トップレベル。 **スピン流：**かつての勢いは見られないものの、数多のデバイスメーカーが存在するため、産業化を行う潜在能力は極めて高い。しかし、現時点で産業化に向けた具体的アクションを起こしている企業は少ない。

米国	基礎研究	◎	→	**磁性半導体・光スピントロニクス：**半導体系研究者がトポロジカル絶縁体研究に移行した．希土類添加の半導体発光素子が面白くなる可能性はある． **スピントロニクスデバイス：**Cornell大学を中心としたスピントルク(STT)やスピンホール効果の基礎研究、カリフォルニア大学を中心としたSTT誘起のスピンダイナミクスの基礎研究など、世界をリードする基礎研究が進められている。 **スピン流：**米国国立科学財団（National Science Foundation: NSF），米国合衆国エネルギー省（The U.S. Department of Energy: DOE）、DOE傘下のNational Energy Research Scientific Computing Center（NERSC）、さらには米国海軍研究事務所（Office of Naval Research: ONR）からの手厚い支援のもと、純スピン流および巨大スピン熱流変換現象の基礎研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	△	↘	**磁性半導体・光スピントロニクス：**シリコンスピンエレクトロニクスもやや下火 **スピントロニクスデバイス：**STT-MRAM関連のDARPAプロジェクトが終了し、最近は目立った動きは見られない。一方、MRAM関連のベンチャー企業が盛んに設立されており、米国における応用研究開発はベンチャー企業を中心に大学・産業界が連携する形で進められている。 **スピン流：**現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。
	産業化	◎	↗	**スピントロニクスデバイス：**現在唯一のMRAMメーカーであるEverspin Technologiesによる次世代型STT-MRAM開発、MRAM研究の老舗であるIBMとマイクロン・サムソンとの連携、混載メモリ応用を狙ったIntelやQualcommの参入など、産業化に向けた動きが目立ってきている。また、HDD新技術の産業化を目指した活動が、米国大手HDDメーカーによって精力的に進められている。 **スピン流：**現時点でスピン流デバイスの産業化に関する情報は無いが、同国内にはIntel、Micron、IBM、Motorolaなど世界的なデバイスメーカーが割拠しており、一旦産業化の目処がつけば、一気呵成に市場を支配する潜在能力を有している。
欧州	基礎研究	○	↗	**光スピントロニクス：**X線分光学と超高速分光学の融合が進みつつあって極めて元気 **スピントロニクスデバイス：**不揮発性メモリ・磁気記録関連の基礎研究はフランスの国立研究機関を中心に進められている。また、最近、米IBMの著名研究者が独MPI-Halleにディレクターとして赴任し、これから大きなグループを設立するため、今後の動向が注目される。
	応用研究・開発	○	↗	**磁性半導体・光スピントロニクス：**既存フェライトエレクトロニクスの研究者が，マグノニクスへの展開を模索中．要監視対象と思われる． **スピントロニクスデバイス：**仏グルノーブルのSpintec(Letiの下部組織)を中心とした熱アシスト型MRAMや高周波発振器の研究開発、ベルギーIMECを中心にしたSTT-MRAMプロジェクトなどが進められている。
	産業化	○	↘	IMECのSTT-MRAMプロジェクトには欧州域内の企業はほとんど関わっていない。産業化に関しては、前出のSpintecとCrocus社（ベンチャー企業）の連携が中心。
中国	基礎研究	△	↗	**磁性半導体：**個別研究レベルでは酸化物磁性絶縁体薄膜の研究に着目 **スピントロニクスデバイス：**これまでのところ顕著な成果は出ていないが、米国で活動する中国系研究者との連携が増加傾向にあり、研究者人口も増えている。 **スピン流：**グラフェン中のスピン流に関する理論研究などが見受けられる程度である。しかし、大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究を行っているため、潜在能力は高い。
	応用研究・開発	△	↗	**スピントロニクスデバイス：**表だった動きは特に見られないが、米国のMRAM関連ベンチャーと中国の半導体ファウンドリとの連携が進められている模様。 **スピン流：**現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。しかし、ひとたび宇宙・軍事用途に関わる重要なデバイスが提案されれば、国家的事業として重厚な支援のもと一気にアクティビティが高まる可能性がある。

	産業化	○	↗	**スピントロニクスデバイス：** HDD部品および完成品の世界的な生産拠点。 **スピン流：**現時点でスピン流デバイスの産業化に関する情報は無い。また、世界的に競争力のあるデバイスメーカーが無い。ただし、簡便な作製手法が適用可能なスピン流デバイスの場合、これは問題とならない。従って、かつて太陽電池メーカーが乱立したように、参入する企業が急速に増える可能性はある。
韓国	基礎研究	○	→	**磁性半導体：**個別研究レベルでは半導体スピントロニクスで秀逸な研究が存在する **スピントロニクスデバイス：**これまでのところ実験研究では顕著な成果は出されていないが、理論・シミュレーション研究では高麗大学グループが世界的に見ても高水準の研究を行っている。 **スピン流：**現時点でスピン流に関する研究例はまだ少なく、プレーヤーはKIST（Korea Institute of Science and Technology）や、大学の一部に限られている。しかし、大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究しているため、潜在能力は高い。
	応用研究・開発	△	↘	**スピントロニクスデバイス：**MRAMに関する国家プロジェクトが終了した以降、目立った動きはない。学術界と産業界の隔たりが大きく、産学連携があまり上手くいっていない模様。 **スピン流：**現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無いが、財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う素地はある。
	産業化	◎	↗	**スピントロニクスデバイス：**サムソンによるSTT-MRAM事業化を目指した積極投資、ハイニクスー東芝連合によるMRAM開発専用300mmファブ設立など、製品化に向けた動きは日本よりも活発。 **スピン流：**現時点でスピン流デバイスの産業化に関する情報は無いが、デバイスメーカーの国際競争力が高いため、産業化の道筋が見えた場合の爆発力は侮れない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h23theme06/h23theme06_PO.pdf
2) http://jpn.nec.com/techrep/journal/g13/n01/pdf/130109.pdf
3) Y. Shiota *et al.*, Nature Materials **11**, 39 (2012).
4) http://www.jst.go.jp/impact/program04.html
5) http://noff-pj.jp/
6) http://www.everspin.com/PDF/press/PR1_Global_Foundries_Everspin_FINAL_20141027.pdf
7) http://grantome.com/grant/NSF/DMR-1262253 ,
http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1231598 ,
http://grantome.com/grant/NSF/CBET-1133589 ,
http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1305586 ,
http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1305574
8) http://researchnews.osu.edu/archive/thermospin.htm ,

http://researchnews.osu.edu/archive/giantseebeck.htm
9) http://www.jst.go.jp/inter/sicp/country/uk.html ,
http://www.jst.go.jp/report/2009/100225.html
10) http://www.spincat.info/
11) http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-BLAN-1011
http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-BS10-0003
http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-13-BS10-0005
http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-13-BS10-0016
http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-NANO-0016

（８）参考資料（磁性半導体・光スピントロニクス関係）

・ Proceedings of MORIS 2013 (Dec.2-5, 2013) at Omiya, Japan
・ Proceedings of Moscow International Symposium on Magnetism (June 30 - July 3, 2014) at Moscow, Russia
・ Proceedings of Ultrafast Conferece 2013 (Nov.1-5, 2013) at Strasburg, France
・ Proceedings of Novel Trend in Physics of Ferroics (July 4-6, 2014) at St. Petersburg, Russia
・ Proceedings of Spintronics VI (Aug.25-29, 2013) at San Diego, USA
・ Proceedings of SSDM 2013 (Sept. 24-27, 20143) at Fukuoka, Japan
・ Proceedings of SSDM 2014 (Sept. 8-11, 2014) at Tsukuba, Japan
・ Proceedings of Spintronics VII (Aug.17-21) at San Diego, USA

３．４．４　フォトニクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

光の持つ多様な機能を利用して、高性能／高機能なデバイスや装置・システムを実現する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とさらなる高性能化が注目されるが、用いる材料の高品質化、デバイス構造の最適化、光デバイスの小型化・集積化、低消費電力化、超短パルス化、超精密計測、分解能の向上などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

光技術は幅広い応用分野で多岐にわたって利用されており、不可欠な技術領域となっている。現代の情報社会を支えるインターネットには高性能の光ファイバーを用いた光通信技術が必要不可欠であり、高機能通信用レーザーにより高速・大容量な情報通信が可能となっている。また、レーザーは半導体基板の切断や 3D プリンタなど加工にも利用されるほか、医療機器にも多く利用されている。近年は照明の LED 化により節電が進んでいるほか、太陽電池による発電は家庭への普及も進んでいる。今後もこれらはさらに発展し、光技術に対してはさらなる高性能化・低消費電力化などの要求が高まっていくと考えられる。このように光技術の応用範囲はかなり広いが、ここでは少し範囲を絞り、「フォトニクス」として電子機器や電子デバイス（エレクトロニクス）との関わりが強い光通信技術、コンピュータやサーバーの光配線技術、これらの高速化、大容量化、低消費電力化、小型化などを支える新たな光デバイス技術・材料技術を中心に述べる。

ネットワークをバックボーンとして支える光通信技術においては、スマートフォンやタブレットに代表される高機能ブロードバンド携帯端末の急速な普及、クラウドサービスの進展、さらに近い将来予想されるビッグデータ時代の到来により、ネットワークを行き交うデータトラフィックは今後ますます増加の一途を遂げるものと考えられる。光通信の伝送容量は、光ファイバーや光増幅器の物理的制約により急速に限界に近づきつつあり、現状の光ファイバー１本で伝送可能な容量は 100 Tbit/s と言われている [1)]。その一方で、インターネットトラフィックは年率約 40%の速度で増大しており [2)]、2030 年頃には 1 Pbit/s （10^{15} bit）の伝送速度が予測されている。その結果、ネットワーク流通する情報量は 20 年以内に光通信の最大伝送容量を超えてしまうことになり、対策が必要である。また、容量限界の克服に加え、ネットワーク機器における消費電力の抑制も重要な課題として浮かび上がってきている。今後 20 年の間に IT 機器の電力消費量は 1000 億 kWhr 近く増大すると言われており [3)]、これは発電所の年間発電量 10 基分以上に相当する。以上の課題を踏まえ、消費電力を抑えつつ、増大する通信容量を収容するために、次世代の光通信ネットワークには量的・質的な技術革新が強く求められている。

一方、デバイスレベルにおいては、通信用のトランシーバ/レシーバを中心に光技術の集積化が進められており、2000 年頃から光集積技術は急激に立ち上がり、現在ほぼトランジスタにおけるムーアの法則と同じレートで集積度が増加している。しかし、現在の光集積は従来型のデバイスを集積する形で進んでいるため、光集積度は既に光デバイスそのもののサイズに起因する限界に近づきつつある。光集積技術が今後もこのレートを

維持するためには、電子集積技術と同様に継続的に新たなブレークスルー技術の導入が必須である。

データセンター等で処理・伝送される情報量も爆発的増大が継続すると予測され、LSIチップ間やチップ内のような比較的短距離の配線でも電気配線の代わりに光配線を使うことが検討されており、光配線の小型化・低コスト化が望まれている。巨大なシリコン電子デバイス産業のリソースを活用することができるシリコンフォトニクスは、チップ間やチップ内光配線に適用できるほど小型化・低コスト化が出来る技術として期待されている。

光デバイスの小型化や高性能化に向けては、ミクロン以下の微細構造で光を制御するナノフォトニクス技術が重要になっている。ナノフォトニックス技術は、微細加工技術の進展によって、2000 年頃から急激に立ち上がり、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、シリコンナノフォトニクスといった分野に分かれて、主に基礎物理的な研究として立ち上がってきたが、近年は様々なデバイスに適用されつつあり、次世代の光集積技術の候補として期待されている。

波動としての光には、波長・強度・帯域・偏光・位相といった多様な自由度があるが、これらを制御する技術を更に高め、高効率化・小型化を実現することにより、上で述べたような広範な分野におけるインパクトのみならず、新たな応用分野の出現も期待できる。また、スクイーズド光やもつれ光子源など量子としての光が簡便に利用可能となれば、量子通信など既存技術と異なる原理に基づく応用の開拓や、光から電気・磁気・熱・機械振動・化学反応など他の自由度への変換技術の向上・開拓により更なる応用分野の広がりも期待できる。

［これまでの取組み］

・光通信技術

光ファイバー増幅器（EDFA）や波長多重技術（WDM）、デジタルコヒーレント伝送技術などの数々の技術革新を経て、過去 30 年の間に 3 桁以上の大容量化を達成してきた。光通信技術の動向をネットワークのレイヤーごとにみると、幹線系においては、デジタルコヒーレント伝送装置の商用化により、100G システムの導入が世界各国で急ピッチに進められている。100 Gbit/s 伝送用デジタル信号処理 LSI は、我が国が総力を挙げて世界に先駆け実用化に成功し、ITU、OIF などの国際標準を獲得し世界的な市場展開を達成した [4]。既に世界各国の幹線系や光海底ケーブル網に採用され、世界市場の半分ほどのシェアを占めている。100G の実用化を受け、次世代の伝送システムとして 400G/1T に向けた研究開発がスタートしている。メトロ系においては、光ノードである ROADM の多機能化(C/D/C: Colorless, Directionless, Contentionless)、WSS の大規模化、小型・集積化が進展し、ネットワークの高機能化とフレキシブル化が図られている。最近ではスペクトル資源の有効活用を目的としてフレキシブルグリッドの導入が積極的に検討されている [5]。また加入者系に関しては、40~100 Gbit/s への大容量化に向けた取り組みが始まっている。さらにデータコム分野においても、現状の電気伝送の限界を克服するために光インターコネクトが浸透しつつあり、データセンターにおける機器間の接続からボード内、チップ間の接続に至るまで幅広いスケールにわたる用途への適用が本格化し

ている。

・ナノフォトニクス

近年、様々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レーザーが様々なシステムで実現されている。極小体積の活性層を埋め込んだ化合物半導体フォトニック結晶に横方向 pin 接合を形成したナノ共振器構造を用いて、極低閾値での室温連続電流注入レーザー発振が達成されている。また、シリコンフォトニック結晶中のナノ共振器を用いてラマン利得を用いたシリコンラマンレーザが光励起によって室温で極低閾値で発振している。近年プラズモニクス構造のレーザーへの適用の研究も活発に行われており、波長よりもはるかに小さいサイズのレーザー発振動作が報告されている。光受光器としては、特にプラズモニクスをベースとした様々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が図られている。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様々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発表されて、注目を集めている。光スイッチとしては、フォトニック結晶ナノ共振器を利用した素子でアトジュール領域でのスイッチング動作が達成されている。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザー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。このようにナノフォトニクス技術により、従来の技術では不可能な超小型サイズと超低消費電力動作が達成され始めているが、いずれも単一素子の性能達成にとどまっている。日本ではフォトニック結晶技術がいくつかのバルク型光部品に応用されて商品化されているが、それ以外ではまだ技術は研究段階にあり、特に集積化応用に関しては基礎研究段階にあると言える。

・シリコンフォトニクス

1985 年頃の Soref らの研究に起源があると思われるが、2000 年前半に電気配線の限界を打破する技術として注目され始め、Intel や IBM 等の北米の半導体メーカーや大学を中心に光導波路、光変調器、受光器等の性能向上が報告されるようになった。欧州では、EU の FP6 の中で、2004～2008 年に実施された ePIXnet プロジェクトにおいて、IMEC および LETI の半導体ファブを使ったシリコンフォトニクスのシャトルサービスが構築され、現在では後継の ePIXfab[43]の中で光変調器や受光器などのアクティブデバイスも製造可能になり、光源以外のほぼ全てのデバイス要素が揃いつつある。同様のシャトルサービスはシンガポールの IME でも行われている。日本では、2010～2014 年に最先端研究開発支援プログラム（FIRST）で実施された「フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発（PECST)」プロジェクト [45]で、光源も含めた全ての光要素をシリコン基板上に集積したシリコン光インターポーザにおいて、30Tbps/cm^2 の世界最高の伝送密度を実証した。ここで開発した技術は、2012 年から開始された NEDO の「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（光エレ実装)」プロジェクト [46]に引き継がれ、シリコンフォトニクスの事業化に向けた活動が継続されている。

・フォトニクス応用に関連するナノ材料

これまで中心的な役割を果たしてきたのは無機半導体のナノワイヤや量子ドットなどであり、化学合成や自己組織化の手法により多種多様な半導体のナノ発光材料が実現している。半導体基板上に形成される自己組織化量子ドットはデバイス化に適しており、フォトニック結晶など光構造との融合や、ゲート電界制御などが報告されており、低温での量子光学実験が数多く行われてきた。また、ダイヤモンド中の NV 欠陥の発光特性を利用した量子情報・磁気検出の研究がここ 10 年ほど集中的に進められてきた。NV 中心をリング共振器やフォトニック結晶と結合させる試みも行われてきた。カーボンナノチューブやグラフェンといったナノカーボンも材料の質の向上に伴い、光物性・フォトニクス研究が進められてきた。グラフェンでは伝導度による光検出や強い非線形光学効果などが報告されており、ナノチューブでは pn 接合形成による発光や複数キャリア生成の報告がある。グラフェンやナノチューブを飽和吸収体としたパルスレーザーの開発も進んでいる。

［今後必要となる取組］

無線通信システムが高効率で且つスマートなネットワークへと進化を遂げていく中で、今後の光ネットワークにはさらにグリーンでかつ高信頼性まで含めた高度化が社会的要請として強く求められている。そのためには、光のもつ潜在能力として、電気信号を凌駕する「高速」、「広帯域」、「低遅延」などの優れた特性を最大限に引き出すことのできるシステム・デバイスの創出が一層求められる。その一方で、デジタルコヒーレント光伝送技術の急速な進展に伴い、光がマイクロ波と同じコヒーレントな電磁波として扱えるようになりつつある今日、今後の光伝送システムは広いレイヤーにわたってデジタル信号処理・ソフトウェアとの親和性を高め、光・電気の互いの弱点を補い合い、シームレスに一体化したスマートな ICT システムへ発展していくことが強く期待される。

光ネットワークにおいては、CDC ROADM やフレキシブルグリッド等の要素技術が今後本格的に導入されるのに伴い、それらの性能を最大限に発現するために SDN (Software Defined Network)の適用が検討され始めている [5]。SDN によりネットワークの仮想化を推し進め、柔軟性をさらに高めていく必要がある。加入者系においては、3.9 世代のブロードバンド無線アクセスが FTTH の契約数を上回っており、今後は急増する無線のトラフィックをバックホール回線（基地局とコア網をつなぐ光回線）に効率よく収容するための光と無線のシームレスな融合が大きな課題である [7]。WDM-PON のような大容量加入者網をこのような用途にいかに発展させていくかに注目が集まっている。現状の情報通信網では光ネットワーク（固定系）と無線ネットワーク（移動系）がそれぞれ独立に構成されているため、ネットワーク全体とすれば柔軟性や回復力さらには経済性の観点からも最適化されているとは言い難く、今後は光か無線かの媒体依存から脱却し、ネットワーク一体として仮想化していくことが極めて重要である。

ナノフォトニクスを応用した単体素子に関しては、近年多くの成果が得られており、劇的な小型化と低消費電力化が達成されているが、集積化に関してはまだ本格的な試みは少ない。MIT でシリコンフォトニクス技術を駆使して大規模な集積型フェーズドアレイを実現し、NTT で波長の異なるナノ共振器を 100 個以上集積することにより 100 ビ

ット超える光 RAM の集積に成功している例はあるが、今後は集積化の本格的な取り組みが必要である。インターコネクト機能に限れば、シリコンフォトニクスの各要素デバイスの研究開発では、光源の集積化の取り組みが重要である。高集積化の観点からは、光源はモノリシック集積されることが望ましいが、モノリシック集積光源は格子不整合の問題があり実用レベルに達するにはまだ長期間の研究開発が必要である。現時点で実用化に近いものは化合物半導体レーザーのハイブリッド集積であるが、電気から光へのエネルギー変換効率は高々20%程度で投入電力の約 80%が発熱に費やされており、高密度集積した場合には排熱が問題になり、レーザーのエネルギー変換効率の抜本的な改善が必要になる。また、スイッチングやルーティング機能で重要な光信号を電気信号に変換せずに処理できる光スイッチや光ルータをシリコンフォトニクスで実現する取り組みも重要になる。さらに、インターコネクト機能やルーティング機能を統合したネットワーク・システムをシリコンチップ上に集積するいわゆるネットワーク・オン・チップ（NoC）に向けたネットワーク・アーキティクチャの研究も重要になる。このようなシステムを実現するためには、エレクトロニクス・フォトニクス・パッケージング等が一体となった設計ツール、製造ファブ、評価ツール等の整備が重要であり、幅広い分野の連携を組織的に行う必要がある。

光技術を用いた量子情報デバイスの研究開発には、GaAs 系などの自己組織化量子ドットを用いたプロトタイプとしての高度な量子情報操作の実証実験が必要であり、また、室温での動作を目指した窒化物半導体やダイヤモンドの NV センターなどでの研究も期待される。

光技術の新たな材料としての原子層・ナノカーボンでは、バンドギャップがないグラフェンでは難しいデバイスを、ギャップを持つ遷移金属ダイカルコゲナイドやナノチューブで実現していくことなども重要である。また、光とスピン・熱・機械振動といったほかの自由度との結合が強いナノデバイスによる、新たな変換原理の開拓に向けた取り組みも重要と考えられる。

（３）科学技術的・政策的課題

フォトニックネットワーク技術は「グリーンイノベーションの推進」をけん引していくうえで「ICT そのものの省エネルギー化・低炭素化」のための中核技術の一つと位置づけられており（総務省の研究開発戦略マップ）[6]、2020 年を目指して「CO_2 排出量削減目標 688 万 t」、「現在の 10 倍（毎秒 100 ギガビット）の伝送を現状技術の 1/3 以下の低消費電力で動作する設備の実現」、「現在の電気通信ネットワークから光信号のままで伝送・交換を行うネットワーク（オール光ネットワーク）への抜本的な転換」、「通信機器の 1 端子あたり毎秒 10 テラビットの超大容量化と超低消費電力化の実現」等が政策目標として掲げられている。さらに、2030 年頃に予想されるペタビット級のトラフィック需要に対応するためには、現状の光通信技術におけるハードウェア的な限界（ファイバーへの挿入パワーの増大に伴う非線形光学効果やファイバそのものが損傷するファイバフューズ現象、光増幅器の帯域限界など）をいかにして打破するかが挑戦的な課題となっている[1]。これらの課題に対し、政策的に有効な手段を明確にし、早期に取り組むことが重要である。

ナノフォトニクスデバイス作製には微細加工が必須であり、日本ではナノテクノロジープラットフォームなどにより支援され状況は改善しつつあるものの、米国の NNIN などと比較するとまだ十分とは言い難い。特に、シリコンフォトニクスの試作に関しては、EU には ePIXfab[43]（ファブは IMEC/LETI）、シンガポールには IME、米国には OpSIS[44]（ファブは IME）というファウンドリ（シャトル）サービスがあるが、日本には対応するものが無い。このようなファブには世界中から人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能をもつため、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、更にはナノテク全般で国の競争力を強化するために重要である。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賄える程度の多数の参加者を世界中の多様な分野から集める必要があり、国・学会・業界等のリーダーシップが重要になる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

光通信システム・デバイス技術の革新として期待されるものが 3 つの Multi 技術であり、超多値変調(Multi-level)、マルチコア(Multi-core)ファイバー、多モード(Multi-mode)制御技術）である[1)]。特に後者の２つは「空間分割多重」(SDM: Space Division Multiplexing)と称されて、SDM 用の新たなデバイスが次々に生み出されており、世界各国で研究開発が急速に進展している。

シリコンフォトニクスで扱う信号のシンボルレートは、実用レベルで 28Gbps、研究レベルでは 56Gbps 程度となっており、周辺電子回路の能力や消費電力も勘案するとこの辺で限界になると予測される。そのため、更なる高速化・広帯域化のために、波長多重、空間多重、偏波多重、モード多重等の多重化技術や位相変調を含めた多値化技術の適用が検討されている。また、光回路と電子回路それぞれに最適なテクノロジーノードを適用するために、光回路と電子回路は別のウエハで作製し、3 次元または 2.5 次元実装を用いてモジュール化するハイブリッド集積が今後の主流になっていくと予測される。シリコンフォトニクスの個別デバイスについては、これまでは CMOS 互換性が最重視されていたため、新しい材料の導入には消極的な面があったが、光材料としてのシリコンの限界が顕在化しつつあり、新しい材料への関心が高まりつつある。従来からヘテロエピ成長または接合による化合物半導体の導入の研究は盛んであるが、新しい動向として、シリコンと同じ IV 族であるグラフェンの導入が検討され始めた。まだ基礎研究の段階ではあるが、シリコンに比べて高い移動度を持つグラフェンを用いて光変調器や受光器をより小型化・低消費電力化しようとする研究報告が増えつつある。

グラフェン、カーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤなどのナノ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増加している。代表的なものとして、グラフェンとシリコンフォトニクス、フォトニック結晶を組み合わせた超高速光変調器や光受光器の研究が米国の大学や IBM において開発されている。また、グラフェン、MoS2, WSe¬2 など遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層の材料は、単層にすることで間接遷移半導体から直接遷移へと変化して発光効率が 4 桁も上がることや、スピンとバレー自由度が結合している特殊なバンド構造を持つこと、光学遷移の選択則によりバレー選択励

起が可能なことなどが相次いで報告され、原子層材料によるフォトニクス・オプトエレクトロニクスの研究のみならず、量子コヒーレンスの研究も進められている。

量子情報デバイスの研究においては、SiC における欠陥で NV と類似の性質を持つものが報告されており、量子制御の研究が進んでいる。SiC は工業利用がすでに進んでいるため、インチスケールの基板が市販されており、集積化への期待も大きい。

［注目すべきプロジェクト］

幹線系におけるデジタルコヒーレント伝送技術の高度化として、総務省の委託研究「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」において 400 Gbit/s 級光伝送技術の実現を目指した研究開発がスタートしている[9]。従来の QPSK から QAM への変調多値度の拡大に加え、ナイキストフィルタリングやスーパーチャネルによる周波数利用効率の向上、さらには適応変復調技術による省電力化・柔軟性の向上が検討されている。これにより、現在の情報通信に要する電力の 1/3 に相当する 78 億 kWh の消費電力削減を目指している[10]。

次世代の光通信インフラ構築に向けた動きとしては、EXAT 研究会の活動を受けて、国内では情報通信研究機構が 2010 年度から委託研究を順次立ち上げている（「革新的光ファイバー技術の研究開発(i-FREE)」[12]「革新的光通信インフラの研究開発(i-Action)」[13]「革新的光ファイバーの実用化に関する研究開発(i-FREE2)」[14]）。EXAT を通じて産学官連携体制がいち早く構築されたことにより、日本がこの分野を牽引する立場にある。欧州においても欧州第 7 次フレームワークプログラム(EU FP7)において ModeGap と呼ばれる産学連携プロジェクトが推進されている[15]。米国においては Alcatel Lucent（旧ベル研）およびファイバメーカが中心的役割を果たしており、世界中で競争が激化している。

光ネットワークの高度化・省電力化に関しては、総務省の委託研究「フォトニックネットワーク技術に関する研究開発」において、高速光スイッチや光バッファなど、光信号のままノード処理を行うオール光ネットワークのための開発が推進されている[10]。また、産業技術総合研究所を拠点とする「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」（文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成」プログラム）において産学連携の研究体制が構築されている[11]。

シリコンフォトニクスに関しては、日本では「技術組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）[36]」をベースに、超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術（光エレ実装）[46]を目指した 2022 年までの大型国家プロジェクトが進行中である。このプロジェクトでは、シリコンフォトニクスのデバイス技術および集積化技術は 2014 年 3 月に終了した「フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発（PECST）」プロジェクト[45]で開発した技術を引き継ぎ、更に光ファイバーや LSI との実装技術等を追加で開発し、光トランシーバや光インターポーザ等の事業化を目指している。欧州では IMEC および Eindhoven 工科大学を中心に複数のＥＵプロジェクトが進行しており、特にシリコンと化合物半導体を融合したナノフォトニクスプラットフォームに関する研究が活発化している。また、2014～2020 年で実施される研究プログラム Horizon 2020 の中で、Photonics PPP (Public-Private Partnerships)が全体で 8 つの PPP の内の一つに

なり、約 7 億ユーロ（2014～2015 年で 1.8 億ユーロ）の資金が供給される予定である。現時点でまだ詳細は発表されていないが、この中にシリコンフォトニクス関係の研究開発も含まれると予想される。米国では、2013～2015 年で DARPA の Photonically Optimized Embedded Microprocessor （POEM）プロジェクト[47]が活動中である。このプロジェクトでは MPU-DRAM 間をシリコンフォトニクスで接続することを目指しており、Micron、MIT、IBM、Oracle 等が参加している。また、先進製造（NNMI : National Network for Manufacturing Innovation）の一つの Institute として Integrated Photonics Manufacturing Institute の設立されることになった。米国でのフォトニクスのエコシステム構築を目指し、国内ファウンダリへのアクセス、集積設計ツール、パッケージング・組立・テストの自動化、技術者育成などが含まれる。予算規模は$200M 以上（政府が$100M 出資のマッチングファンド）である。

ナノフォトニクスに向けたナノ材料に関しては、欧州では「Graphene Flagship」が立ち上がっており、グラフェンのみならず BN やダイカルコゲナイドも含む原子層材料の研究が進められている。日本では新学術領域研究として「原子層科学」が立ち上がっている。

（５）キーワード

・デジタルコヒーレント、多値変調、空間多重、SDN、オール光ネットワーク、モバイル光ネットワーク、量子暗号通信
・インターコネクト、光電子融合、光配線、光インターポーザ、光トランシーバ、光スイッチ、ハイブリッド集積、3 次元実装
・レーザー、フォトダイオード、光検出器、光変調器、光合分波器、光導波路、微小共振器
・LED、太陽電池
・ナノフォトニクス、シリコンフォトニクス、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、大規模光集積、コンピュータコム、フォトニックネットワークオンチップ
・ナノマテリアル、ナノカーボン、カーボンナノチューブ、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド、MoS_2、$MoSe_2$、WS_2、WSe_2、原子層、原子欠陥、NV 中心

（６）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	○	→	次世代光通信技術の基礎研究が活性化しており、デジタルコヒーレント、光QAM、マルチコアファイバ、光パケット・パス統合ノードなど、日本発のオリジナルな技術が創出されている。 ナノフォトニクスの研究チームの数は多くないが、高い国際的競争力を持つ強力なチームが活発に活動し、存在感をはなっている。東大、東工大を中心にシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大を中心にフォトニック結晶を用いた高性能光デバイス等の研究開発で世界をリードしている。ただし、プラズモニクス分野では出遅れ感がある。 量子情報関連、ナノカーボン材料では有力グループが複数存在する。
	応用研究・開発	○	→	光通信では、100G DSP-LSI開発の成功を受け、400Gへの高速化、さらにその先を見据えた研究開発が、総務省、経済産業省が主導する強固な産学官連携体制のもと推進されており、高い国際競争力を維持。主要な国際会議の発表件数から見ても存在感を示している。 PECSTプロジェクトが2014年3月に終了。30Tbps/cm2の世界最高伝送密度や125℃の最高温動作を実証。開発した技術はNEDO光エレ実装プロジェクトに引き継がれ、PETRAにて事業化を目指している。AISTの液浸ArFを用いた光導波路加工技術は世界トップレベルの低損失と均一性を実証している。 ナノカーボン材料では産総研がナノチューブなどの国際会議でも強い存在感を発揮している。
	産業化	○	→	100G伝送装置では世界市場を獲得し、国内生産額が大幅に増加している。一方、これまでFTTHが牽引してきた加入者系は固定回線離れの影響が大きく市場は飽和傾向にある。光ノードも市場シェアの巻き返しを狙っている。 ナノフォトニクスの単体素子では、近年商品化が進んでおり、世界的に見ても先行している。ただし、集積ナノフォトニクスに関してはまだ産業化の段階ではない。PETRAが100/400GbE向けにシリコンフォトニクストランシーバ等の標準化活動中である。フジクラが長距離通信用光変調器を発表している。全体的に、米国と比べると産業化が遅れている。
米国	基礎研究	◎	↗	ナノフォトニクスの基礎研究に関しては、MIT、 Stanford、UCSB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。特に近年プラズモニクスの研究が活発化している。2013～2015年で実施中のDARPAのPOEMプロジェクトでは MPU-DRAM間をシリコンフォトニクスで接続することを目指しており、MIT、Micron、IBM, Oracle等が参加している。 遷移金属ダイカルコゲナイドなど新しい分野における進展が目覚ましい。特に、U. Washingtonのグループが数多くの重要な成果を上げており、フォトニック結晶との融合ではStanfordとの共同研究も見られる。光物性ではColumbiaやUCB、ナノデバイスではCornellが存在感を発揮している。 単一欠陥準位の研究では Chicago大のグループがSiCで新しい方向性を打ち出している。
	応用研究・開発	◎	→	Alcatel-Lucent（旧ベル研）の存在感が依然大きく、他社の追随を許さない。なおSDMに関しては日本がマルチコアで強みを有するのに対し、欧米はモード多重に注力している点が大きく異なる。 ナノフォトニクスのバイオ、センサおよび太陽エネルギー応用に関しては活発な活動があるが、大規模集積化をベースにした情報処理応用に関しては停滞気味である。 IBMは90nm世代の技術を用いて、スパコン応用と見られる電子回路と光回路のモノリシック集積を実現している。また、Intelがシリコンフォトニクスのトランシーバと Corning製のマルチモードファイバの組み合わせで、データセンター応用と見られる25Gbps、820mの伝送を実現している。 ナノ材料に関しては、Northwesternからのスピンオフである NanoIntegrisが分離ナノチューブやグラフェンを市販し、Rice大のスピンオフがナノチューブ評価装置などを開発している。

米国	産業化	◎	↗	OTN用伝送機器・スイッチでAlcatel-Lucent、Ciena、Infinera、Cisco等が世界市場の上位を占める。Google、IBMなどデータセンター向けへも市場拡大の兆しがある。 光集積を駆使した素子を商品とする有力な会社が存在し、IBMやIntelは光インターコネクトを本格的に研究開発しているが、ナノフォトニクスに限定するとまだ産業化への道筋は明確ではない。 Freescaleの130nm、200mmラインではLuxteraの光トランシーバ等が量産されている。先行していたLuxtera、Lightwire、Kotura等のベンチャーがそれぞれMolex、Cisco、Mellanox等の大手企業に買収され、新たにAcacia、Aurrion他の多数のベンチャーが創業した。
欧州	基礎研究	◎	→	ModeGapのような大規模なEUプロジェクトが推進されており、厚い研究者層を誇るとともに、研究領域もシステムからデバイスまでバランスがとれており裾野も広い。ただし、ModeGapは2014年度で終了し、Holizon2020への継続性・発展性は不透明である。 Imperial College等でメタマテリアル、プラズモニクス関連の純粋基礎研究に関しては伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。 ベルギーのGhent大、IMEC、英国のSouthampton大、フランスのLETI等を中心に幅広い研究が行われている。 NV中心ではシュツットガルト大のグループが中心的な役割を果たしている。
	応用研究・開発	○	→	FP7の後継フレームワークプログラムであるHolizon2020が2014年より開始し、将来ネットワークに関する大規模な産学連携が予想される。IMEC、Eindhoven工科大、LETI等にナノファブリケーションの技術が結集し、特にシリコンフォトニクスと化合物半導体ナノフォトニクスの融合をベースとしたデバイス応用研究が進んでいる。FP7の中で2008～2012年に実施されたPhotonics electronics functional integration on CMOS（Helios）プロジェクトでは、シリコンフォトニクスの主要なコンポーネントの開発が行われた。引き続き2012年に開始されたPhotonic Libraries And Technology for Manufacturing（PLAT4M）プロジェクトでは、CMOSプロセスによる製造方法の標準化を目指している。
	産業化	△	→	研究開発の活発さと比べると、産業化に関しての動きは控えめであり、100Gへの動きも日本・米国ほど活発ではない。特に加入者系の固定網は遅れをとっているが、2020年にかけてモバイルバックホールを意識した新たなアクセス網の構築を計画するなど、今後EUが得意とする無線分野との連携が注目される。 ナノフォトニクス関係では、企業の研究活動が少なく、直接産業化を目指した動きは見えない。 Ghent大とIMECのシリコンフォトニクスの技術を用いた光トランシーバの製品化を目指してスピンオフしたCaliopa社は中国のHuawei社に買収された。STMicroelectronicsの65nm,300mmラインではLuxteraの光インターポーザ等の量産準備が進んでいる。
中国	基礎研究	△	↗	海外の技術に依存しているのが現状である。 近年、学会・学術雑誌等での発表件数が増加しているが（特にプラズモニクス、メタマテリアル関係）、数値計算の論文が主体でレベルの高い論文は少なく、ISCASの高速光変調器等の少数を除いて他国に比べて顕著な成果は見えていない。一方、Chinese Academy of Science（CAS）を中心に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。
	応用研究・開発	△	↗	欧米から帰国した研究者を中心に応用を目指した研究も立ち上がりつつあるが、まだ目立った成果は見られていない。 Huawei、ZTEからの成果発表が増大しており、近年国際会議で徐々に頭角を現しつつある。
	産業化	△	→	HuaweiがOTN伝送用機器の世界市場で急成長している。中国国内でも40G/100Gの導入が加速し、加入者系も光化が進み、モバイルバックホールも含めて今後大きな発展が見込まれる。 Huawei等の中国系企業はナノフォトニクス、シリコンフォトニクス研究開発にも力を入れつつあるようだが、当該の分野に関しては目立った活動は見られない。

韓国	基礎研究	△	→	KAIST, ETRIが基礎研究を牽引し、研究のレベルは高いものの、研究者数が少ないのが現状であり、学会でのプレゼンスはまだ高いとは言えない。また、産業化に繋がるような成果は見られない。
	応用研究・開発	○	→	光通信のデジタルコヒーレントやSDMなどの革新技術のスタートにやや遅れをとっているが、近年キャッチアップしつつある。 Samsungを中心にナノフォトニクスの応用研究が活発に行われている。特にディスプレイ、発光素子の分野での応用例が目立つ。また、CPUとメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発を行っており、2016年頃の実用化を目指している。グラフェンデバイス開発も行われている。
	産業化	△	→	加入者系は日本と同じくGE-PONがいち早く導入され、高いブロードバンド普及率に貢献したが、その他の領域に関しては目立った動きは見られない。 ひと段落しつつあるディスプレイ用を除くと、その後の産業化の動きは不透明である。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) 中沢正隆, 鈴木正敏, 盛岡敏夫(編)「光通信技術の飛躍的高度化」オプトロニクス社 (2012)
2) 総務省「我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算」
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000077.html
3) 株式会社 NTT データ経営研究所「平成 24 年度 我が国情報経済社会における基盤整備（IT 機器のエネルギー消費量に係る調査事業）報告書」
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002741.pdf
4) 鈴木扇太ほか「光通信ネットワークの大容量化に向けたディジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発」電子情報通信学会誌, vol. 95, no. 12, pp. 1100-1116 (2012).
5) テレコム先端技術研究支援センター「最近のフォトニックネットワーク技術の進展」
http://www.scat.or.jp/research/SCAT_research1303.pdf
6) 総務省「研究開発戦略マップ」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000125084.pdf
7) 谷口友宏, 飯田大輔, 可児淳一, 桑野茂, 寺田純, 吉本直人「将来無線アクセス・モバイル光ネットワークを支える光アクセスシステムに求められる技術要件」信学技報, vol. 113, no. 397, MWP2013-88, pp. 209-214, 2014 年 1 月.
8) 「我が国基礎・基盤研究の現状～NICT EXAT 研究会～」ITU ジャーナル, vol. 39, no. 5, pp. 3-25 (2009).
9) 「世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術実用化に向けた共同研究開発に着手」
http://www.ntt.co.jp/news2012/1212/121211a.html
10) 総務省「ICT による成長戦略について」　http://www.kiai.gr.jp/PDF/ict_2012/1.pdf

11) 光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点　http://www.aist-victories.org/
12) 「革新的光ファイバ技術の研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h22/146_keikaku.pdf
13) 「革新的光通信インフラの研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h23/150_keikaku.pdf
14) 「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h25/170_keikaku.pdf
15) ModeGap, http://modegap.eu/
16) M. Smit et al. “Moore’s law in photonics”, Laser Photonics Rev. 6, 1 (2012).
17) D. A. B. Miller, “Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips”, Proc. IEEE 97, 1166 (2009).
18) B. G. Lee et al. “High-Performance Modulators and Switches for Silicon Photonic Networks-on-Chip”, J. Lightwave Technol. 16, 6, (2010).
19) K. Takeda et al., “Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers”, Nature Photonics 7, 569 (2013).
20) Y. Takahashi et al. “A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold”, Nature 498, 470 (2013).
21) M. Khajavikhan et al. “Thresholdless nanoscale coaxial lasers”, Nature 482, 204 (2012).
22) Yu-Jung Lu et al., “Plasmonic Nanolaser Using Epitaxially Grown Silver Film”, Science 337, 450 (2012).
23) M. W. Knight et al. “Photodetection with Active Optical Antennas”, Science 332, 702 (2012).
24) L. Cao et al. “Resonant Germanium nanoantenna Photodetectors”, Nano Letters 10, 1229 (2010).
25) A. Melikyan et al., “High-speed plasmonic phase modulators”, Nature Photonics 8, 229 (2014) .
26) K. Nozaki et al., “Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity”, Nature Photonics 4, 477 (2010).
27) L. Liu et al. “An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip”, Nature Photonics 4, 182 (2010).
28) K. Nozaki et al., “Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities”, Nature Photonics 6, 248 (2012).
29) 株式会社フォトニックラティス　http://www.photonic-lattice.com/
30) 浜松ホトニクスプレスリリース「フォトニック結晶レーザ」
http://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products/20130926000000.html
31) J. Sun, “Large-scale nanophotonic phased array“, Nature 493, 195 (2013).
32) E. Kuramochi et al. “Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip”, Nature Photonics 8, 474 (2014).
33) M. Liu et al. “Graphene-based broadband optical modulator”, Nature 474, 64 (2011).

34）A. Pospischil et al. “CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands”, Nature Photonics 7, 892 (2013).
35）M. D. Birowosuto et al. “Movable high-Q nanoresonators realized by semiconductor nanowires on a Si photonic crystal platform”, Nature Materials 13, 279 (2014).
36）技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）http://www.petra-jp.org/outline.html
37）The Past, Present, and Future of Silicon Photonics, http://tera.yonsei.ac.kr/class/2011_1_STOC/lecture/20110307_STOC_M.-J.%20Lee_R.%20Soref_Si%20Photonics.pdf
38）White Paper: Introducing Intel's Advances in Silicon Photonics, http://www.intel.la/content/dam/www/public/us/en/documents/intel-research/Intel_Advances_Silicon_Photonics.pdf
39）Demonstration of a High Speed 4-Channel Integrated Silicon Photonics WDM Link with Hybrid Silicon Lasers, http://www.hotchips.org/wp-content/uploads/hc_archives/hc22/HC22.23.330-1-Alduino-Intel-SiP-Link.pdf
40）Silicon CMOS-Integrated Nanophotonics Technology, http://www.semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/docs/SW2013_Wilfried%20Haensch_IBM.pdf
41）Competing for the Future: Unlocking Small Wonders for Tomorrow's Nanoelectronic Uses, http://www.atp.nist.gov/iteo/nanoenan_final.pdf
42）Integrated High-Complexity Systems in Silicon Photonics, https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/387970
43）ePIXfab, http://www.epixfab.eu/
44）OpSIS, http://opsisfoundry.org/
45）フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発, http://www.pecst.org/
46）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, http://www.petra-jp.org/pj_pecjs/
47）Photonically Optimized Embedded Microprocessors (POEM), http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/Photonically_Optimized_Embedded_Microprocessors_(POEM).aspx
48）Funding opportunities for photonics in Horizon 2020 work programme 2014-15, http://www.photonics21.org/download/Photonics_Information_Event/T.Skordas-Introduction-16JAN2014.pdf
49）Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC)
50）European Conference on Optical Communications (ECOC)
51）Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)
52）International Conference on Group IV Photonics (GFP)
53）電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ・シリコンフォトニクス研究会（siph）
54）IEEE Optical Interconnects Conference (OI Conference)
55）International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC)

３．４．５　有機エレクトロニクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

有機材料を用いて高性能でフレキシブルなエレクトロニクスデバイスを実現する研究開発領域である。プラスチック基板などの利用による大面積化・フレキシブル化・軽量化、塗布や印刷プロセスなどにより安価な作製が可能な有機トランジスタ回路、有機 EL ディスプレイ、有機 EL 照明、有機太陽電池などが注目されているが、実用化のためには移動度向上、発光効率向上、特性のばらつき改善、長期安定性の確保、低温プロセス、塗布・印刷プロセスの再現性・安定性向上、パターンの高精細化などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

有機分子を半導体材料として用いる有機エレクトロニクスは、従来の半導体では難しいガラスやプラスチックなどの基板にもデバイス作製が可能で、軽量化、超薄膜化、大面積化、フレキシブル化、低コスト化などが期待できる技術として注目を集めている。特に、従来の半導体製造プロセスとは異なり印刷法などの溶液プロセスを適用して素子の作製が可能であり、素子の大面積化に加え製造プロセスの飛躍的な省エネ化・低コスト化の実現が期待される。これらの優れた特徴から、将来的に世界規模で広く普及し、大きな市場の形成が期待される分野である。

また、有機固体の弱い凝集力を利して低温・低エネルギープロセスで製造できることが特徴であり、有機材料ならではの無限の分子設計の可能性を秘めており、各種のエレクトロニクス分野への適用が可能である。主な研究開発ターゲットとしては、有機 EL（Electro Luminescence）、有機トランジスタ、有機太陽電池の三分野があるが、近年の、モバイルを前提とした多様なパーソナル電子デバイスの隆盛により、薄く・軽く・安いといった特徴を持つ有機デバイスの実用化が期待されている。2030 年の有機エレクトロニクスの世界市場は、ディスプレイや照明の拡大と、有機系の太陽電池や半導体などが本格化し、約 7 兆円と予測されている。

［これまでの取組み］

実用化に成功した有機 EL ディスプレイ、実用化に向けて本格始動した有機 EL 照明、実用化を指向した有機太陽電池など、有機エレクトロニクスの分野でも実用化が現実のものとなってきている。このような動向の背景には、単に有機半導体材料による従前のシリコンエレクトロニクスの代替ではなく、有機エレクトロニクス特有の機能性を最大限に活かしたデバイス開発があると言える。有機エレクトロニクスの中核的デバイスである有機 EL は、他の用途に先駆けて実用化が進み、市場が拡大しつつある。有機エレクトロニクスの発展・普及には、既存製品とのコスト競争や更なる技術課題の克服が求められるが、近年の大幅な効率や素子寿命の改善等により普及への道筋も見えてきている。

有機 EL 分野では、継続的な材料開発により着実に性能および信頼性の向上が見られ、照明用途ではコニカミノルタが世界最高発光効率となる 131 lm/W の白色パネルを開発

し[1]（2014 年 3 月）、本格的な事業化を発表している（2014 年 7 月）。また、東芝、三菱化学なども商品ブランドを立ち上げ実用化に向けて動き出している。ディスプレイ用途については、産業化において韓国・台湾に遅れを取っているが、ソニーとパナソニックが共同で JOLED 社の設立を発表し[2]（2014 年 7 月）、産業化に向けて巻き返しを図っている。

有機トランジスタ分野では、日本に端を発する材料と成膜技術により、塗布膜の方が蒸着膜よりも高移動度となることが半ば常識化してきている。米ネブラスカ大学らのグループからは塗布膜の有機 FET で移動度 43 cm^2/Vs が報告されるなど[3]、有機半導体材料のポテンシャルがかなり高いものであることが示されてきている。実用化面においては、より広い領域をカバーする「プリンテッド・エレクトロニクス」分野との融合により、電極や封止層などを含めて「オール印刷で」作製する技術が確立されてきている[4]。

有機薄膜太陽電池の分野では、東芝が単層セルで 11.2%、5cm 角モジュールで 9.9%を達成し[5]（2014 年 7 月）、実用化に向けたテストも行われている。学術研究においては、ここ数年続いた劇的な性能向上は一段落し、性能制限因子の解明や新系統材料の探索など、裾野を拡げる研究が中心になってきている。

海外において、有機 EL ディスプレイ分野では韓国および台湾勢が強く産業化が進んでいる。一方、欧州においては、EU 圏全体にまたがる有機エレクトロニクスプロジェクトが継続して走っており、大学・企業・ベンチャーが密接に連携してさまざまな実用化の試みが行われている。欧州では、有機エレクトロニクス分野からプリンテッド・エレクトロニクスへとターゲットを広げて、新たな産業として実用化に結びつけようという強い姿勢がうかがえる。

［今後必要となる取組］

今後の有機エレクトロニクスの研究開発は、従来以上に開発スピードが上がると考えられ、早期の戦略的な取組みが極めて重要となる。本格的な市場形成を志向する場合、新たな枠組みでの産官学連携による取組みが必要であり、技術力の高い日本だからこそ創造できる新しい社会や市場を見据えたトータルシステムとして捉えていくことが重要である。

有機 EL ディスプレイをはじめとした有機エレクトロニクス技術が産業化し「ダーウィンの海」を越えるためには、材料面および製造面での革新的技術を創出して、大幅なコスト削減を行い、低価格化を実現することも必要である。有機 EL のディスプレイでは大型基板への製造に対応するため、照明では LED 照明に対抗して決定的にコストを下げるために、いずれも本格的に塗布プロセスへのシフトが必要である。有機トランジスタ分野については、フレキシブル・プリンタブルを武器に、本当に有機半導体回路でしか実現できないようなキラーアプリケーションを探索する必要がある。有機薄膜太陽電池については、ペロブスカイト系太陽電池の勃興も踏まえ、実用的太陽電池のベンチマークである変換効率 20%を実現する新たな取り組み（励起子拡散長の増大、電荷分離に伴う電圧損失の低減など）が必要と考えられる。

一方、有機 EL、有機太陽電池、有機トランジスタ等の直近の実用化を指向した研究とは別に、将来を見据えた息の長いシーズ志向型の有機エレクトロニクス研究を推進する

ことも必要と考えられる。国家プロジェクト等の施策や企業連携等の総合的な取組みで競争力を涵養する試みが求められる。具体的には有機半導体を用いたタッチパネルなどのデバイス、電子ペーパー、デジタルサイネージ、RFID やセンサなどが考えられている。また、有機エレクトロニクスの特徴である薄さや柔軟性を活かし、曲面に設置できる意匠性に優れた太陽電池や人体に沿う形状の医療用センサなど、これまでにない製品の実現やアプリケーションの創出が期待される。

技術的には、分子集合体の制御に取組む必要がある。単一分子レベルの物性はシミュレーション技術の向上によりかなり予測可能となり、高精度な分子設計が行えるようになってきているが、薄膜などの分子集合体の構造制御については、適用範囲がまだ限られている。有機エレクトロニクスで使われるπ共役電子系は平面的で本質的に異方性が強いことから、この分子集合体の制御こそが、今後の性能向上のブレークスルーに必要となってきている。

（３）科学技術的・政策的課題

さまざまな分野での応用への期待から、有機エレクトロニクスのグローバル競争が近年激化している。国を挙げての研究開発支援も活発化しており、日本では経済産業省が有機 EL やプリンテッド・エレクトロニクス技術に、米国ではエネルギー省が有機 EL に、欧州では欧州委員会の研究助成制度においてディスプレイ、電子ペーパー、RFID に、韓国では知識経済部が有機 EL に大規模な研究投資を行ってきた経緯がある。このような状況の中で、日本の強みである材料・素材開発を核として、どのようにして優位性や独自性を保ちつつ市場形成を行っていくかが、今後グローバル競争で勝利する鍵となる。また、次世代有機エレクトロニクスの特長を活かした新規アプリケーションの開発による、新規需要の創出も同時に進めていくことが強く求められる。

国内においては、個々の研究グループ及び企業は高い技術を有しているものの、実用化、産業化に舵を切るためには「オールジャパン体制」を実現するための強い求心力が必要である。EU のような巨大水平連携、韓国のような強力な垂直統合に太刀打ちできる政策が必要であり、基礎研究から実用化研究まで、プレイヤーを増やして研究の裾野を広げ、実用化に向けた産学連携の仕組みの構築や拠点形成、ベンチャー企業創出の支援などが必要不可欠と考えられる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

有機 EL の分野では、九大の安達グループによって報告された熱活性型遅延蛍光（TADF）現象[6]に基づいた発光材料の研究が裾野を広げ、燐光を使わない新たな高性能材料群を形成し始めている。また、低コスト生産にむけて本格的に塗布積層型の高効率有機 EL の研究が山形大の城戸らグループで進められており、素子レベルの効率で見た場合、蒸着系との差は縮まってきている。また、有機 EL 照明において、住友化学は 2014 年に、高分子材料を基にした 2 色を発光できる照明用パネルの量産技術の確立を発表した。コニカミノルタは 2014 年にフレキシブルな有機 EL 照明パネルの量産を発表した。同じく、三菱化学とパイオニアが、発光層を製造コストの低い塗布法で作製する有機 EL

照明パネルの量産を発表している。

有機トランジスタ分野では東大の染谷グループを中心に、フレキシブル回路の概念を究極的に推し進めることにより、「しわくちゃにしても壊れない」「身につけても気付かない」というレベルにまで昇華できることが実証されてきている[7]。これにより、生体適合回路やバイオセンサなどの新たな応用分野が見えてきている。

有機太陽電池分野に関しては、これまでフラーレン系誘導体一辺倒であったアクセプタ（n型半導体）材料について、非フラーレン材料の探索が急速に進み新たな材料開発の可能性が開かれつつある。

［注目すべきプロジェクト］

国内では、JST の「戦略的イノベーションプログラム」において、有機 EL 照明、有機薄膜太陽電池、有機トランジスタを用いた印刷回路のプロジェクトが走っており、学術研究の牽引役となっている。また、JST の ERATO「染谷生体調和エレクトロニクスプロジェクト」では有機半導体回路の柔らかさを活かした新たな応用に向けて、「安達分子エキシトン工学プロジェクト」では TADF に基づくさらなる有機 EL の飛躍に向けた取り組みが進められている。

欧州においては、EU の第 7 フレームワークプログラム（FP7）に基づき、有機 EL 照明に関する IMOLA（Intelligent Light Management for OLED on foil Applications）プロジェクト（2011 年～）や、本格的な実用化研究を行う COLAE（Commercialisation of Organic and Large Area Electronics）プロジェクト（2014 年～）がスタートし、EU 圏全体を巻き込んで、有機エレクトロニクスおよびその周辺分野の実用化を強力に推進している。

（５）キーワード

・有機 EL、有機トランジスタ、有機半導体、有機太陽電池
・プリンテッド・エレクトロニクス、フレキシブルデバイス

（６）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	◎	↗	日本の有機エレクトロニクス分野の基礎研究は、これまで個別の研究機関や企業の継続的な努力によって高い水準を維持しており、現在も活発である。有機EL分野においては、九州大学と山形大学が基礎から応用研究までを牽引してきている。九大のグループは熱活性化型遅延蛍光という新概念を提案し、新しい材料の潮流を作っている。有機トランジスタ材料およびプロセスに関しては、広島大・理研のグループによる世界最高の材料と、阪大や産総研による新たな成膜技術により、塗布膜で移動度10 cm^2/Vs以上が実現されている。有機太陽電池に関しては材料分野が強く、基礎的な物性や解析などについてはやや後れを取っている。フレキシブルエレクトロニクス関連では、産総研や東京大学がリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	有機EL照明に関しては、産官学での応用研究・開発に対する取組が活発である。塗布型有機EL照明を実現するための新しい材料群と、高性能化には必要不可欠な塗布積層膜の作製技術の提案が山形大のグループで行われている。有機トランジスタ分野については、東大のグループを中心に、極薄、超フレキシブルな回路の開発が行われており、生体適合回路への展開が検討されている。また、山形大ではプリンテッド・エレクトロニクスとの融合を本格的に進めて、オール印刷回路を実現している。有機薄膜太陽電池においても企業（三菱化学、東レ、東芝など）を中心とした精力的な応用研究が進められ、世界最高水準の10%以上の変換効率が得られてきている。これらの優れた基礎・応用研究成果を産業化へと結びつけていく国家的な取組みや施策が望まれる。
	産業化	△	↗	基礎研究では高い優位性を有しているが、技術開発成果が出始めた頃に日本企業は相次いで有機ELディスプレイ事業から撤退した経緯もあり、有機エレクトロニクス分野全般に対して日本勢は実用化に対しては慎重姿勢である。 有機ELディスプレイについては、大型有機ELテレビの実用化は遅れているが、モバイルを中心とした中小型ディスプレイをターゲットとしてJOLEDが設立されるなど、産業化に向けての準備が整いつつある。有機EL照明についてはコニカミノルタが産業化に向けて先行している。有機太陽電池については、各社が興味を示しているが、産業化については様子見の状況にある。有機トランジスタについては、具体的な応用ターゲットを模索している段階にある。
米国	基礎研究	◎	→	有機EL分野においては、1998年にリン光材料先駆けて開発し、大幅な発光効率の向上を実現しており、着実に技術開発を進めている（プリンストン大、UDC（Universal Display Corporation））。 有機薄膜太陽電池の研究開発も非常に活発であり、特に高分子系ではカリフォルニア大学バークレー校、ロサンゼルス校などが中心となって基礎研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	→	米国エネルギー省（DOE）の予算で、「Solid State Lighting（固体照明）」が、2020年までの長期目標で進行中であり、有機EL照明の研究開発が進められている。有機太陽電池の研究開発では、バルクヘテロ素子のルーツであるUCSBやUCLAなどのグループが、近年の急速な高効率化の中心となっている。また、産業化に直結するわけではないが、新しい展開を生み出すような挑戦的な応用研究も多数行われている。例えば、Stanford大のグループは有機結晶薄膜を作製するさまざまな手法を提案している。また、大学における基礎研究成果を活用してベンチャー企業（Solarmerなど）が活躍している。
	産業化	○	→	塗布型有機薄膜太陽電池を実用化した米国ベンチャー企業Konarkaは、2012年に倒産している。 産業化を行っている米国をベースとする当該分野の大企業は少ない。ベンチャー企業としては、有機EL材料を提供するUDC、有機半導体材料を提供するPolyEra、有機太陽電池を製造するSolamerなどが挙げられる。

欧州	基礎研究	◎	→	有機EL、有機トランジスタ、有機太陽電池、いずれの分野においても、大学を中心としたけ主要な拠点が複数有り、先端技術の裾野を広げるような基礎研究が盛んである。特に、デバイスの基礎物性や理論的な解析などに強い。ドイツのザクセン州には20の研究施設および約40社の企業を含む、欧州最大規模の有機エレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスのクラスターが形成されている。英国では、ロンドン大学、マンチェスター大学、ケンブリッジ大学などに、プリンテッド・エレクトロニクスCOE拠点（Center of Excellence）が設けられている。フランスでも仏CNRSなどを中心として拠点形成が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	EUの国際競争力強化プロジェクトであるFP7 （2007年～2013年）において、「有機材料と大面積エレクトロニクス、表示およびディスプレイシステム（Organic and large area electronics, visualization and display systems）」の技術開発が進められた。EU全体にまたがるプロジェクトを通じて、Fraunhofer InstituteやIMECのような実用化研究拠点と大学が密接な連携を取る体制ができている。産業化がまだ進んでいない有機トランジスタ分野などにおいてもハイレベルなプロトタイピングが行われており、それらの技術が無理なくベンチャー企業などへとつながっている。また、大手エレクトロニクス企業（フィリップスなど）がプリンテッド・エレクトロニクスの技術開発に力を入れている。
	産業化	○	↗	EU圏全体にまたがるプロジェクトにより、材料から生産プロセスに至るまで、各工程に対応するベンチャー企業が多数立ち上げられており、産業化に向けて極めて具体的で実践的な検討が進んでいる。大手メーカーとしては、独Osramや独Siemensなどが有機EL照明を中心に製品化を行っている。 ドイツの化学系企業BASFは有機系材料を重視しており、有機EL（OLED）、有機薄膜太陽電池（OPV）、プリンテッド・エレクトロニクスの3つを重点技術開発テーマに掲げている。EU加盟27カ国は「2012年までの白熱電球廃止に合意」しており、有機EL照明にも力を入れている。
中国	基礎研究	○	↗	現段階では、海外の研究機関などの追跡研究が主体であり、新しい潮流を生み出すものや独創的な研究成果は限定的である。しかし、材料関係を中心に研究の裾野は広がってきており、研究水準は着実に上昇している。今後、大規模な研究資金の投入などによって猛烈な研究水準の進歩が予想される。現在は、多くの大学や研究所において有機EL技術の研究が展開されている。
	応用研究・開発	○	↗	中国はこれまでに有機EL分野（ディスプレイパネルおよび照明）に対して様々な支援を行ってきており、研究対象の中心は有機ELディスプレイパネルであったが、最近では照明分野への展開に向けての支援も拡大している。また、有機EL材料および有機太陽電池材料を中心に、バリエーションを増やす研究は非常に盛んである。
	産業化	○	↗	中国では有機EL照明分野はまだ立ち上がったばかりであるが、ディスプレイパネル分野では活発な動きを見せている。2011年に国内有機EL企業関連企業が参画し「中国有機EL産業連盟」を設置しており、今後有機EL用材料の開発にさらに注力し、政府もサポートを強化すると考えられている。
韓国	基礎研究	○	→	韓国は、ディスプレイ業界における地位高めるための国家的戦略に基づいて特に有機EL分野の研究開発を強く推進してきた経緯がある。サムソン、LGなどの財閥系大手企業が、垂直統合で基礎研究まで行う傾向が強いため、応用研究を補完するような基礎研究が多く、根本的に新しい研究は少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	サムソン、LGやその系列会社による、有機EL用の高効率・長寿命材料の開発、有機トランジスタを用いたバックプレーンの開発、フレキシブル回路の開発など、実用化に直結する応用研究が非常に盛んである。サムソンは中小型の高精細ディスプレイや大型テレビ、LGは湾曲型や半透明ディスプレイなどの高付加価値製品の開発を指向している。大学においても有機ELディスプレイおよび照明に関する多数のプロジェクトが進められている。

韓国	産業化	◎	↗	日欧米の有機ELの基礎技術開発の成果をテコにして、有機ELディスプレイ事業における産業技術の集積化、巨額投資により、現在のところ独占状態を誇っており、サムスンとLGの争いという構図になっている。サムソンは有機ELディスプレイを自社のスマートフォンへ採用することにより事業化に成功しており、LGは77インチ4Kの湾曲型有機ELテレビを発売開始（2014年9月）するとしている。また、次世代照明の開発と普及／促進も進めており、有機EL照明の実用化も着実に進んでいる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) 「世界最高発光効率 131 lm/W を達成した白色有機 EL 照明パネルを開発」 http://www.konicaminolta.jp/about/release/2014/0304_02_01.html
2) 「有機 EL ディスプレイパネルに関する統合新会社（会社名：株式会社 JOLED）設立について」 http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201407/14-0731/
3) "Ultra-high mobility transparent organic thin film transistors grown by an off-centre spin-coating method", Nature Communications, **5**, 3005 (2014).
4) "Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films", Nature Communications, 5, 4147 (2014).
5) 「有機薄膜太陽電池モジュールで世界最高効率 9.9%を達成」 http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1407_02.htm
6) "Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence", Nature, **492**, 234 (2013).
7) "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics", Nature **499**, 458 (2013).

３．４．６　MEMS／NEMS

（１）研究開発領域の簡潔な説明

半導体微細加工技術を基盤にし、深掘りエッチング技術に代表される立体加工技術や接合技術を利用して、マイクロ・ナノ構造を形成し、センシングを行ったり化学反応や光を制御したりする各種デバイスを実現する総合技術である。LSI との複合化によって“More than Moore”のためのキーテクノロジーとしても期待されている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景、意義］

MEMS/NEMS 技術は、半導体微細加工技術に基づいて、ウェハ上に様々な材料で様々な微細構造（システム）を作り込む技術であり、情報通信機器、自動車、産業機器、医療機器など幅広く応用先で様々なセンサ・アクチュエータを実現する。微細構造で発現する特性を活かし、超小形かつ高性能なデバイスが実現できるだけではなく、それらをウェハ上に一括して大量生産できることが MEMS 技術の特長であり、それゆえに新しい応用に広く展開・普及して、世の中を変える可能性を有する。

現在、社会の安全安心やエネルギーの見える化、健康モニタリングなど社会の安定化にとって重要な課題解決型技術として、センサに自立電源と通信機能を持たせて分散配置するセンサネットワーク技術が期待されている。このような技術が進展すると、社会のすみずみでセンサが使われることになるが、そのようなセンサの大部分は大量生産性に優れる MEMS になると考えられる。また、自動車の自動運転システム、介護用ロボット、ドローン、バーチャルリアリティシステムなどのイノベーション起すと期待される機器には、高性能かつ消費者に受け入れられる価格のセンサが求められており、MEMS に期待が集まっている。

［これまでの取組み］

MEMS は成長著しい産業であり、主たる製品はスマートフォン・携帯電話用のマイクロフォンと慣性センサ、自動車用の慣性センサや圧力センサ、プロジェクタに用いられるマイクロミラーデバイス、インクジェットプリンタヘッド、無線通信用周波数制御デバイス（フィルタやクロック共振子)、赤外線センサなどである。その中でマイクロフォンは 2013 年に 24 億個出荷され、20%程度と高い市場成長率を示している。また、高度な実装技術によって複数のセンサが 1 つのパッケージングに入れられたコンボセンサがスマートフォンなどに広く普及しており、異要素集積化技術や高度なウェハレベルパッケージング技術によって、さらに高度かつ小形なセンサが実現される方向に研究開発が進んでいる。

我が国には、MEMS/NEMS に関する多くの研究資産が蓄積されており、技術的実力は高いにもかかわらず、産業化のための仕組みの構築は欧米に比べて遅れていた。しかし、最近では東北大学に見られるように、企業が大学の拠点と研究室を活用して効率良く製品開発から小規模生産までを行う例が出てきており、これは日本型の産学連携の好例と言える。

一方、最近、メインストリームとなっている MEMS、あるいは新規 MEMS の開発と

実用化は、ほとんど欧米で行われている。欧州では、MEMS 分野の覇者である STMicroelectronics と Bosch が、大規模研究拠点（IMEC、CEA-LETI Minatec、Fraunhofer Institute など）も活用して活発に研究開発に投資している。米国では、本分野を牽引するのはベンチャー企業で、スマートフォン・タブレット用ジャイロスコープで 2 割のシェア（残り 8 割は STMicroelectronics）を有する InvenSense、小さな補聴器メーカーから MEMS マイクロフォンのトップ企業となった Knowles などが成功例として挙げられる（現在、Knowles のマイクロフォンはソニーが受託生産している）。

アジアでは、台湾が学術分野とファウンドリ産業で成長目覚ましく、一方、韓国は産学とも停滞ぎみである。中国では、トップレベルの研究機関から世界水準の成果が出始めており、今後、ファウンドリを中心に産業化も進むと思われる。

［今後必要となる取組み］

新技術の産業化では、米国では大学のトップ研究成果をいち早く市場トライアルにつなげるベンチャー企業とファウンドリの存在が大きく、また、欧州では大学、公的研究機関および企業が拠点を形成して密接な連携を可能にするシステムがうまく機能している。このような現状を見るに、今後、我が国にある研究開発拠点を強化し、企業の研究開発リスクを下げて、実用化へのハードルを下げる役割を大学と公的研究機関が担う必要性は一層高まっている。たとえば、前述の東北大学のような日本型の産学連携システムをより発展させることが有効であろう。産業技術総合研究所には、TIA、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）、BEANS プロジェクト、グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクトなどの資金が集中し、8 インチの MEMS ラインが整備されている。一連の設備は、集積マイクロシステム研究センターによって研究開発に利用される他、マイクロ・ナノ・オープンイノベーションセンター（MNOIC）として外部共用に供されている。大規模な施設整備が一段落したこれからが重要であり、産業界のニーズにあった運営方法の改革を大胆に行うことが期待される。

（３）科学技術的・政策的課題

日本の企業でも、欧米のベンチャー企業買収や海外研究機関へのまとまった研究開発委託が増えており、その結果、国内の基礎研究が孤立・空洞化する恐れがある。これを防ぎ、さらに基礎研究を実用化に繋げるためには、我が国の研究開発拠点の継続的な強化が欠かせない。一方、MEMS/NEMS の基礎研究では、多様な研究機関の参加も重要である。これは、MEMS/NEMS の応用分野と利用技術が多岐にわたり、多様なアイデアの試行錯誤が欠かせないからである。このような多様性を担保するためには、研究開発環境に恵まれない研究室でも自らのアイデアを実証できる環境が必要であり、東北大学の試作コインランドリやそれを支援する国家プロジェクト（ナノテクノロジープラットフォーム事業）の役割が大きい。この事業を維持・発展させることは、有力拠点の研究開発力強化とともに重要な政策的課題の 1 つである。

MEMS/NEMS 分野に限らないが、産業界からの学会や講演会への参加が減少し、学会への新規加入が伸び悩んでいるという状況がある。特に、MEMS 分野は基礎と応用とが一体化しており、企業の研究開発の委縮は分野全体に大きな負の影響を及ぼす。電気学

会・日本機械学会・応用物理学会の連合による MEMS・センサ・マイクロナノ技術に関するシンポジウムの開催、日本機械学会でのマイクロ・ナノ工学部門の発足などがあるが、こうしたアカデミアセクターの主体的な活動は極めて重要で、産官学がこれに積極的に参画する必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

年間に出荷されるセンサの数が現在の 100 倍、1 兆個になるような社会を 10 年後に実現しようという「Trillion Sensors」と呼ばれる動きが米国を発信地として世界に広がりつつある。米国の産業界が旗振り役となり（代表は Fairchild Semiconductor の Janusz Bryzek 氏）、センサの新規応用発掘、センサの研究開発の促進、政府への働きかけ、産産・産学の連携などがロードマップに沿って進められるという。センサネットワーク、ビッグデータなどと組み合わせ、大きなイノベーションに繋がりうる技術的動きである。1 兆個ものセンサは MEMS 技術を駆使しなければ製造不可能であり、MEMS 技術に関連する動向として注目される。

MEMS/NEMS に関する技術動向・産業動向としては、次のような事項を押さえておく必要がある。

- MEMS マイクロフォンが市場成長し、スマートフォンの機能拡張や音声認識システムの応用拡大によって今後も高い成長が望めること。
- 屋内ナビゲーションの登場で気圧センサがスマートフォンに組み込まれ、センシング機能が 10 軸（加速度 3 軸、回転 3 軸、地磁気 3 軸、圧力）に高度化し、それにともない集積化が進むこと。
- 自動車の情報表示がヘッドアップディスプレイ化され、MEMS ミラーデバイスが使われること。ヘルスモニタリングシステムが普及し、活動量計を中心に MEMS が使われること。
- キャリアアグリゲーションやコグニティブ無線などの高度な通信技術が登場し、また、3.5 GHz 帯が供用され、高度な周波数制御デバイスに MEMS 技術が使われること。

（５）キーワード

センサ、センサネットワーク、ヘルスモニタリング、マイクロフォン、集積化

（６）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に関する国際学会などでの日本のプレゼンスは高く、採択率が1/3程度の高水準の国際学会で日本からの発表数が首位の米国に次いでいる。主要な大学の基礎研究用研究設備について、我が国が他国に劣っていることはない。バイオ関連MEMSの研究者が最大多数勢力であることは他の国（特にアジア諸国）と同様であるが、米国で活発に研究されている高性能慣性センサの研究がほとんどないなど、メインストリームに手薄なところがある。
	応用研究・開発	○	→	いくつかのプロジェクトによって、実用化を想定した試作品の開発などを行える施設としてみた大学や公的研究機関の開発環境は向上した。今後、これらの拠点が継続的に強化、活用されれば、実用化に繋がる成果が出ると期待される。大学や公的研究機関の産学連携力の強化とともに、拠点の活用に関して企業の意識改革が必要である。
	産業化	○	→	スマートフォンや携帯電話用のMEMSセンサの世界市場は大きく、成長を続けているが、我が国のシェアは低い。受託製造分を含むマイクロフォンのシェアは大きい。また、インクジェットプリンタヘッド、自動車用MEMSセンサなどでは実力を維持している。振動ジャイロ、インクジェットプリンタヘッドなどで用いられるPZT MEMSは我が国の成功例の1つである。ニッチながら、医療関係のMEMSも実用化例が出てきた。MEMSファウンドリのビジネスは全体的には低調であり、ベンチャー企業の育成も進んでいない。
米国	基礎研究	◎	→	MEMSに関する国際学会などでの米国のプレゼンスは、引き続き他国を寄せ付けない。バイオ関連MEMSが最も多くの研究者の興味を引き付けているが、その他のセンサ、たとえば、航空宇宙用・軍事用のMEMSもダブルユースとして広く研究されている。特に、自動運転、ロボット制御、高精度ナビゲーションなどに利用される高性能慣性センサの研究は、DARPAプロジェクトとして強力に実施され、圧倒的優位にある。
	応用研究・開発	◎	→	大学や公的研究機関の研究成果がベンチャー企業に移管され、実用化を目指した研究開発が行われるという流れがうまく働いている。公的施設と民間ファウンドリ（米国内とは限らない）が、そのようなベンチャー企業を支えている。さらに、大学の共用設備を使って研究開発の受託サービスを行っているベンチャー企業もある。
	産業化	◎	→	ファブレスのベンチャー企業などが、国内外のファウンドリを使って開発と生産を行うビジネスモデルが定着している。FBARフィルタのAvago、MEMS慣性センサのMEMSICやInvenSense、MEMSタイミング発振器のSiTime、MEMSマイクロフォンのKnowles、マイクロミラーデバイスのMicro Visionなどが新しいMEMS市場を拓いたが、ベンチャー企業を中心に成功例が継続的に出ている。新しいデバイスの実用化は米国発であることが多い。TIやAnalog Devicesといった大手企業も実力を維持しているが、従来の成功デバイスから撤退する例もある。
欧州	基礎研究	○	→	一見地味だが、堅実でよく考えられた研究開発が多い。欧州では、1人の教授やリーダーのもとに多くの研究者や技術者がヒエラルキーを作って組織されていることが多く、米国のように玉石混合の新しいアイデアで次々と論文が出るわけではないので、国際学会などでの論文数だけで比較すると、基礎研究力を見誤る。
	応用研究・開発	◎	→	大学、公的研究所も上記のように組織されており、目標をはっきりさせ、デバイスやシステム、あるいは製造技術を開発するとき、その速度と完成度は非常に高い。TSVのようにLSIに取り入れるMEMS的技術、LSI上に集積化するMEMSなど、大規模な研究開発については、組織力のある欧州の公的研究所が実力を発揮している。

	産業化	◎	↗	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの最大手は、仏伊合同のSTMicroelectronicsであり、ドイツのBoschが続く。市場が成長しているため、両社のMEMS事業も拡大している。両社とも欧州発の共通技術を用いており、両社でシェアの7割程度を占める。この技術は大学と公的研究機関との共同で開発され、Boschが実用化したものであるが、上記の研究開発システムがうまく働いている実例である。MEMS用製造機器では、Boschの特許に基づきエッチング装置を実用化したSTS（現SPTS）、SussMicrotecなどの技術力のある企業が世界的に活躍している。
中国	基礎研究	○	↗	トップ研究機関を中心に研究水準の向上は目覚ましく、そこだけを見れば、日欧米と同じ土俵で競争している。中国からのジャーナルや国際学会への論文投稿量は多い。その半数以上は採択に至らないものであり、全体レベルは発展途上であるが、採択の絶対数は多く、また、注目すべき論文もある。高水準の国際会議が中国で開催されることも多くなっている。
	応用研究・開発	△	↗	後発の中国は最初から応用開発志向であり、トップ研究機関の研究水準の向上、および下記の産業化の動きによって、今後、産業化に繋がる中国発の成果が出る可能性がある。
	産業化	△	↗	MEMSマイクロフォンの工場が中国で操業され、今後も生産量は増える。このようなことを足掛かりに、MEMS産業が育つ可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↘	国際学会などでの論文数を見ると、韓国は米国、日本、欧州に続く位置にいたが、最近は台湾や中国に追いつかれ、抜かれつつある。韓国国内で、この分野への政府投資が細っていると思われる。
	応用研究・開発	△	→	国家の集中的な投資によって、実用化開発に利用できる大規模な研究施設が整備されているが、産業化に繋がった顕著な成功例は聞かない。サムソンをはじめとする巨大企業は、MEMSを大量に利用しているものの、外部調達すればよい部品の1つと捉えており、韓国内での産学連携に影を落とす。
	産業化	△	→	MEMSに関して独自技術が実用化された例は目立たない。市場規模が大きくなり、さらなる発展が予想されるスマートフォン用等のMEMSには、大手企業が子会社を通じて興味を示すが、技術蓄積がなく、独自開発は難しい。ただし、今後、海外の技術を導入して、産業化とビジネスで成功する可能性はある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

３．４．７　異種機能三次元集積チップ

（１）研究開発領域の簡潔な説明

異なる機能を持つエレクトロニクス回路を効果的に集積し、集積回路チップの高機能化・小型化・低消費電力化を実現し、エレクトロニクス機器への適用を目指す領域である。三次元的な集積を可能にするウェハの薄膜化、高信頼のウェハボンディング（接合）、熱設計などの要素レベルの研究開発課題や、低電圧ロジック、メモリ、イメージセンサ、シリコンフォトニクスなどの異なる機能を持つエレクトロニクス回路を三次元集積して特性向上の確認を行うなど原理実証、システムレベルの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

家電製品の一層の低消費電力化、スマートフォン、タブレットなど誰もが使いやすい情報端末、安全性と省燃費を両立する自動車など、半導体集積回路の機能性と情報処理能力向上に対する要望はますます強くなっており、増え続ける用途に対応した多品種の集積回路（LSI）を適切に社会に供給していく技術の開発が今後の課題のひとつである。これまでは、ゲート長縮小に代表される 2 次元的なスケーリングによりトランジスタの微細化、高速化、低消費電力化を実現し、LSI の高集積化・高機能化を進めてきた。しかし、最近になって微細加工技術の困難さが増大し、トランジスタの性能向上の物理的限界が見え始めてきている。これに対し、III-V 族半導体や Ge などの新材料チャネル、三次元構造トランジスタ、ナノワイヤトランジスタなど新構造導入により性能向上を図る等価的な 2 次元スケーリングとともに、異なる機能をもつ半導体あるいは異種材料でできた複数のチップを複合して一つのチップ状に加工する異種機能三次元集積回路技術が注目されている。

異種機能・異種材料を有する複数のチップを積層する三次元集積化において、例えば、メモリとロジックを積層できれば、チップ面積が縮小するだけでなく、メモリ／ロジック間の通信速度を劇的に上げることが可能となり、低消費電力と高速性の両方が実現する。また、高周波の通信機能やイメージセンサ、加速度センサなどの異なる機能を積層することによって、チップの小型化、携帯機器の小型化による新たな応用展開も期待できる。このように、従来技術の延長では今後の社会要求に応えることが困難と予想される中、異種機能三次元集積回路が今後の新しいサービスの原動力になると期待される。

［これまでの取組み］

国内では、三次元集積化の中核要素技術であるシリコンウェハの薄化、シリコンウェハ貫通ビア配線（TSV）、マイクロバンプによる相互接続技術については、技術組合超先端電子技術開発機構（ASET）で実施した電子 SI プロジェクト（1998 ～2002 年）およびドリームチッププロジェクト（2008 ～2012 年）で先駆的な研究が進められ、プロセスインテグレーション、ディジタル・アナログ混載技術など、多くの成果を出した。2013 年からは、これらの成果を受けた製品開発が民間企業によって進められている。その他、九州でのコンソーシアム研究開発事業（2005～2007 年）、民間企業を含むアライアンスによる研究、大学等による研究などが進められ、オリジナリティの高い技術が開発され

てきた。例えば、東北大学がスーパーチップと称する異種三次元集積のコンセプトを提案し、CMOS デバイス上に化合物半導体、フォトニックデバイス、スピンデバイスを三次元集積したチップの試作に成功している。

日本を追うように米国、欧州、韓国、台湾でプロジェクト研究が行われた。米国では、IBM や Intel がナノ材料技術、ナノデバイス技術、3D IC 形成技術、LSI 設計技術、システム設計技術を手掛け、また、ベンチャー企業が積極的に投資を行っている。例えば、Maxim Integrated 社がウェハレベルでキャパシタやオプティカルセンサを三次元集積したアナログ向けチップの試作に成功しており、ハイパフォーマンスを実証している。また、Monolithic 3D Inc がプログラマブルロジックの開発を目的にモノリシック三次元 LSI の開発を目指してしている。欧州の IMEC や LETI などは自分自身で高い CMOS 技術を持ちながら、光ー電子融合分野でも研究を行っており、次を見据えて三次元集積化に対して精力的に活動している。韓国では、Samsung がメモリのトップメーカーとして DRAM、NAND フラッシュメモリの積層に取り組んでいる他、Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）でも TSV 技術開発が進められている。シンガポールでは Institute of Microelectronics（IME）、Nanyang 工科大学でアクティビティが認められる。台湾では、Taiwan Semiconductor Manufacturing Company（TSMC）と Industrial Technology Research Institute of Taiwan（ITRI）にて TSV に関する技術開発が進められている他、National Nano Device Laboratories が SRAM とロジック回路のモノリシック三次元チップの試作に成功している。

国内外ともにそれぞれに特徴を有する一連の要素技術を確立し、製造装置、デバイス、材料ともに競争段階に入っていると見られる。それを反映して、国際電子デバイス会議（IEDM）などの電子デバイス全般を扱う会議での基礎研究の発表は減っている。メモリ応用では、三次元化の効果の大きな NAND フラッシュメモリについて、Samsung および東芝が三次元 NAND フラッシュメモリの量産開始を 2013 年 8 月に相次いで発表した。一方、DRAM は三次元化技術を使って入出力インターフェースを広帯域化（Wide I/O、ワイドアイオー）することで大容量化と低電力化を強力に進めることができ、TSV を利用したワイドアイオーの世界標準規格が JEDEC により 2012 年に定められたが、従来技術の改良による LPDDR 方式の登場で 1 ビット当たりの転送エネルギーが 1/3 に下がった（約 15pJ⇒約 5pJ）ことで三次元化は進んでいない。三次元集積回路が普及するには、三次元化に伴うコスト増を補償する三次元化による効用を生み出す必要があり、その方法としては、(1)従来技術では達成できない機能を集積化する、(2)三次元化によりそれぞれのチップ面積を縮小しチップの良品率（歩留まり）を向上させ三次元化によるコスト増を補償する、ことなどが考えられる。後者の考え方を行ったのが、Xilinx 社の FPGA（再構成可能論理集積回路）である。同社は TSV 技術を使ってシリコンの再配線基板（インターポーザ）を作製し、マイクロバンプによる接続技術を使ってシリコンインターポーザ上に FPGA チップを複数個集積するという方法（「2.5 次元技術」と呼ばれる）を提案した。チップの歩留まりはチップ面積の増大にともない指数関数的に減少するため、良品の小さなチップを複数個集積することで、シリコンインターポーザによるコスト増大（25%程度）を含めてもコスト的な効果がある。

［今後必要となる取組み］

シリコンの三次元集積化については、基礎技術開発の第一ステージは終わりを迎え、応用開発のステージに移ったと言える。今後は、化合物半導体とシリコン CMOS、MEMS とシリコン CMOS などの異種基板・異種機能の集積化が新たな価値を生み出すことが期待されており、ナノ材料技術、ナノデバイス技術、ウェハの常温接合や新たな封止材、真空封止法など基礎・基盤的な研究や装置開発も含め新たな技術開発が必要になってくる。また、3D LSI 設計技術、システム設計技術、さらにそれらの融合分野の科学的知識を統合する必要がある。そのため、異種基板という大きなプラットフォームの中で、LSI プロセス関係、光関係、MEMS 関係、回路関係などの人が集まって技術開発を進めることが必要である。

新たな産業として期待できる応用領域としては、車載、ウェアラブルデバイス、健康医療、社会システムなどがあり、各種のセンサを集積したチップが重要になると考えられる。今後は、このような応用を念頭の置き、それらに最適な機能の組み合わせを考慮した技術開発・知の集積、デザイン環境の構築、少量多品種に対応可能な生産技術（可変量生産技術）の研究開発などを併せて進めることが重要である。

（３）科学技術的・政策的課題

日本における異種機能三次元集積チップの研究を進める上での課題としては、国内に最先端の CMOS 加工技術をラインとして有している研究開発用クリーンルームがないことや、つくばイノベーションアリーナ（TIA）のコアインフラには、三次元積層を可能にするプロセス装置が十分整備されていないことがある。欧米の協力で進んでいる「3DIC Multi-Project Wafer Service」の様な異種機能三次元集積化デバイスの開発を手助けするファウンドリや CEA-LETI の「Open 3D™ Initiative」にあるような研究機関の構築が日本でも必要である。産業界はすでに開発が進められている三次元実装の研究開発成果やその分野における研究開発人材を自社に抱えることなく研究開発拠点に集約し、大学あるいは研究開発独法等の中立的機関を中核として国際競争に負けない体制を構築する必要がある

一方、異種機能三次元集積化チップは、多様な電子機能を創り出すことが可能である。そこでは、個人の発想が大きな事業に発展することが多いに期待される。大量生産、大量消費を前提とする事業とは一線を画するため、新事業の創生には極めて有効な立ち位置を提供していると言え、地方創生にも多いに利用できる可能性がある。そのためには、大学等に小型の試作ラインを構築し、誰もが利用できる環境を整備することが有効であろう。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

International Electron Device Meeting（IEDM）、VLSI Symposium に代表される電子デバイス・回路に関する主要国際会議において、三次元集積に関するセッションが設けられ、カーボンナノチューブ等を用いたチップ間配線技術、光 TSV、チップ間を容量結合や誘導結合を用いた無線通信方式による三次元集積化技術などが発表されている。

産業技術総合研究所グリーンナノエレクトロニクスセンター（GNC）がⅢ-Ⅴ族の n 型 MOSFET と Ge の p 型 MOSFET をウェハスケールで三次元に積層した CMOS インバータの実証に成功し、注目を集めている。また、バックエンドプロセス（BEOL）に埋め込まれるロジックおよびメモリ開発に進展が認められ、超低電圧デバイス技術研究組合（LEAP）が原子移動スイッチを利用した再構成可能な不揮発プログラマブルロジックの開発に成功している。

ウェハボンディング技術、マイクロバンプなどを使って三次元集積をしていくという三次元貼り付け技術といわれるものが注目されている。シンガポール Nanyang 工科大学などの研究チームは、TSV を用いることなく、face-to-face の直接メタルボンディングによって MEMS 上に CMOS 回路の積層を実証している。

可変量生産を可能にする上で注目されるのが、経済産業省プロジェクトして産総研で推進しているミニマルファブシステムである。このファブシステムと異種機能三次元集積チップは相性が良く、従来型のいわゆるメガファブによる生産も取り込んで新たなサプライチェーンを創り出すことによって、半導体産業の新たな展開が図れると期待できる。

［注目すべきプロジェクト］

三次元集積化技術の実用化に向けて、日本の GINTI（Global Integration Initiative）が進めるチップからウェハまでの三次元集積化技術開発と試作サービスが注目される。フランスの CEA-LETI やベルギーの IMEC が進めるオープンパートナーシップによる技術･装置開発の成果も注目される。IMEC では CMORE プラットフォームが整備され、200mm ウェハの 0.13μm CMOS プロセスを用いて、MEMS やイメージャー、フォトニクス集積のサービスを開始している。

異種機能集積化では今後、光と電子の融合が進むと期待できることから、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）が平成 24 年度より 10 年間の予定で進めている経済産業省プロジェクト「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」の成果も注目される。一方、この種の技術の応用として有力なセンサ関連では、Trillion Sensor Initiative と呼ばれるセンサ応用をオープンに議論する会議が米国主導で発足し、活動を活発化している。新たな社会サービスが発掘される可能性があり、注目すべき動きの一つである。

（５）キーワード

- 三次元集積、異種機能集積、More than Moore、三次元実装、3D chip stack、3D-IC 設計技術
- ロジック、メモリ、高周波回路、パワーデバイス
- 光電融合、シリコンフォトニクス、MEMS、イメージセンサ
- シリコン貫通ビア（TSV）、ウェハボンディング、プラズマ表面処理、熱設計

（６）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	◎	→	異種機能三次元集積チップ製造の基礎技術について日本は高い技術水準にある。低コスト化をねらって、例えば従来のめっき法に代わり液体金属の埋込によってTSVを形成する技術や触媒エッチング技術、高速ウェットエッチング技術などの新しい技術が装置メーカーやベンチャー企業および大学などから相次いで発表されている。集積化技術については、自己組織化を利用した新しい位置整合技術等の話題性の高い技術が東北大等から発信されている。MEMS等の部品技術については、大学を中心に新型センサ、製造技術に関する先端研究が続けられている。製造技術研究の進展に牽引されるように、三次元回路の設計技術についても大学を中心に研究が活発化している。スパコンのアーキテクチャ研究者も三次元集積チップの熱問題などに取り組み始めるなど、基礎的研究の裾野は広がっている。
	応用研究・開発	○	↗	ドリームチッププロジェクトの技術開発成果を活用した応用デバイスの開発プロジェクトが開始した(2013年～)。東北のGINTIによるオープンな試作検証環境が整い、大口径シリコンウェハを用いての応用開発が加速されると見込まれる。TSVを使ったインターポーザ技術も民間企業を中心に開発成果の発表が増えている。ガラス製のインターポーザ技術についても国内ガラスメーカが米国メーカーの積極的な動きを追随している。 産総研GNCがIII-V族n型MOSFETとGe p型MOSFETをウェハスケールで三次元に積層したCMOSインバータの実証に成功している他、超低電圧デバイス技術研究組合（LEAP）がアトムスイッチを利用した再構成可能な不揮発プログラマブルロジックの開発に成功している。 高度集積を目指して異種機能集積の協調設計・試作・検証が一体で行える体制を整備して応用研究を加速する時期にある。しかし、国内に最先端のCMOS加工技術をラインとして有している研究開発用クリーンルームがないことや、つくばイノベーションアリーナ（TIA）のコアインフラには、三次元積層を可能にするプロセス装置が十分整備されていないといった課題がある。
	産業化	△	↗	三次元集積チップでは、東芝が2013年夏に三次元NANDフラッシュメモリの量産を発表した。異種機能混載技術によるヘルスケア製品を東芝が上市するなど、三次元集積化を牽引する動きも活発化しつつある。
米国	基礎研究	◎	→	引き続きSEMATECH、IBMを中心に薄化ウェハの三次元集積化に関して先端的位置を堅持している。例えばIBMは、Controlled Spallingと呼ぶ独創的なシリコンウェハ薄化技術を発表し、回路層移載に適用できることをデモしている。大学では、ノースカロライナ州立大、スタンフォード大、ジョージア工科大などがそれぞれの得意なところを活かしながら、設計から信頼性まで実用化を強く意識した研究を進めている。 欧州FP7の下、Compound Semiconductors for 3D integrationプロジェクト、通称COMPOSE3がスタートしている。IBMが主導し、STマイクロエレクトロニクス、LETI、グラスゴー大学、Tyndall National Instituteなどが参加して、シリコンに代わる新材料を三次元積層する技術を開発し、製造可能なレベルまで高める取り組みがスタートしている。
	応用研究・開発	◎	→	IBM社の三次元ロジックや三次元メモリ、XilinxやAltera社の積層型再構成型ゲートアレイ(FPGA)など、応用デバイスの研究が盛んである。加えて、コーニング社がガラスインターポーザの開発と応用に多くの資源を投入し始めている。
	産業化	◎	↗	Xilinx社の最新FPGA製品にはTSVを使った2.5次元集積化技術が有効に使われていること、JEDECのワイドアイオー規格の標準化を受けてMicron Technology社などがモバイル機器向けメモリ開発に三次元技術を用いるなど、事業化に関する競争が一段と活発化している。一方で、Maxim Integrated社がウェハレベルでアナログ向け三次元集積チップの試作に成功している他、Monolithic 3D Incがモノリシック三次元LSIをディレクションしており、ベンチャー企業の存在感が増している。

欧州	基礎研究	◎	→	Fraunhofer IZMやIMEC、CEA-LETIを中心として、三次元集積化要素技術の研究が引き続き活発に行われている。最近では、信頼性に関わる研究が比重を増してきている。
	応用研究・開発	◎	→	IMEC、CEA-LETI では、300ｍｍの三次元集積化技術研究開発ラインが構築され、試作サービスも含むオープンコンソーシアムで実用化開発を加速している。IMECでは、CMOREプラットフォームの整備を終え、200mm 0.13μm CMOSプロセスを用いて、MEMSやイメージャー、フォトニクス集積のサービスを開始している。
	産業化	○	↗	MEMSセンサなどの競争力の高い製品を保有するST Microが、健康、医療、自動車、社会システム向けに製品化意欲が旺盛である。
中国	基礎研究	×	→	北京大学などがTSVに関する研究を行っているが、オリジナルな技術発信はない。
	応用研究・開発	×	→	目立った情報はない。
	産業化	×	→	産業化事例は見えない。
韓国	基礎研究	△	↘	KAISTなどでTSV技術の研究を行っているが、オリジナリティの高い技術発信はない。Samsung社等の民間企業は基礎研究についての情報発信は最近ではほとんどない。
	応用研究・開発	○	↗	Samusug、Hynix社等のメモリメーカーに加えて、Amkor Korea社がTSVを使ったインターポーザ技術、三次元集積化技術の開発に多くの資源を投入し始めている。
	産業化	○	↗	Samsung社が2013年夏に三次元NANDフラッシュメモリの量産化を発表したのに続き、2014年夏にはTSVを使った64GBのDDR4型DRAM(速度／電力比が従来の4倍)の量産を発表するなど、メモリに関する三次元化集積化で他国に先行している。
台湾	基礎研究	○	↗	2008年、ITRI （Industrial Technology Research Institute：工業技術研究院）が国際的三次元集積化技術のコンソーシアム（Sd-STAC）を設立し、ウェハレベルの積層技術を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	TSMCがチップ・オン・ウェーハ技術を軸に研究開発を進めており、相次いでTSV技術を発表している。高アスペクト比三次元TSV技術、および極薄インターポーザーを用いた三次元TSV技術を開発した。今後ますます研究機関やファウンドリ、OSAT（後工程請負）が一体となった開発体制が強化・加速されるものと思われる。National Nano Device LaboratoriesがSRAMとロジック回路のモノリシック三次元チップの試作に成功している。
	産業化	○	↗	TSMC社のTSVを入れたプロセスインテグレーション技術の完成度は高い（2010年IEDM発表）。また、XilinxやAlteraと共同で、異種機デバイスの開発を行なっており、OSATも量産化を目標に開発を進めている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) M. Koyanagi, “Heterogeneous 3D Integration - Technology Enabler toward Future Super-Chip”, *IEDM*, 8 (2013).
2) H. Kubo, et al., “High Performance Closed-Channel Cooling System Using Multi-channel Electro-osmotic Flow pumps for 3D-ICs”, *IEDM*, 735 (2013).
3) S. L. Chua, et al., “3D CMOS-MEMS Stacking with TSV-less and Face-to-Face Direct Metal Bonding”, *Symposium on VLSI Technology*, 148 (2014).
4) C.-H Shen, et al., “Monolithic 3D Chip Integrated with 500ns NVM, 3ps Logic Circuits and SRAM”, *IEDM*, 232 (2013).
5) T. Irisawa, et al., “Demonstration of InGaAs/Ge Dual Channel CMOS Inverters with High Electron and Hole Mobility Using Staked 3D Integration”, Symposium on VLSI Technology, 56 (2013).
6) T. Irisawa, et al., “Demonstration of Ultimate CMOS based on 3D Stacked InGaAs-OI/SGOI Wire Channel MOSFETs with Independent Back Gate”, *Symposium on VLSI Technology*, 118 (2014).
7) M. Miyamura, et al., “First Demonstration of Logic Mapping on Nonvolatile Programmable Cell Using Complementary Atom Switch”, *IEDM*, 247 (2012).
8) S. Okamoto, et al., “Bidirectional TaO-Diode-selected, Complementary Atom Switch (DCAS) for Area-efficient, Nonvolatile Crossbar Switch Block” *Symposium on VLSI Technology*, 242 (2013).
9) A. V. Samoilov, et al., “3D Heterogeneous Integration for Analog”, *IEDM*, 609 (2013).
10) 米国 Monolithic 3D Inc.：http://www.monolithic3d.com/
11) 欧州 IMEC Heterogeneous integration and Prototyping サービス：http://www2.imec.be/be_en/services-and-solutions/prototyping-serviceheterogeneous.html
12) 欧州 FP7 COMPOSE3 プロジェクト：http://compose3.eu/index.html
13) Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2012, 2014.
14) Proceedings of　IEEE 2013 Three Dimensional System Integration Conference (3DIC).
15) Proceedings of IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2013, 2014.
16) http://www.tsensorssummit.org/　トリリオンセンサーに関するホームページ
17) http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/news-events/press-releases/detail?newsId=1 Samsung 社の TSV 採用 DDR4 型 DRAM 量産のニュースリリース(2014 年 8 月 28 日)

3.5 基盤科学技術

応用分野を支えるとともに、それぞれの分野の最先端研究を牽引する「共通基盤技術」として、先端的な「加工・合成」、「計測・解析」、および「理論・計算科学」がある。

「加工・合成」については、トップダウン型プロセスの典型である超 LSI 微細加工技術に対して、ボトムアップ型プロセスの典型として、スループットの視点からは欠かすことのできない自己組織化がある。原子・分子から出発して材料やデバイスを逐次積み上げていくことを想定した場合、生体は自律的かつ階層的に構造形成が進む点で「階層的自己組織化」が実現されており、このプロセスの理解と応用がボトムアップアプローチの究極の目的の一つとなる。新しい材料として、ナノ・マクロの空間を制御した超分子材料、機能性ゲル、DNA 折り紙などが研究されてきたが、ナノテクノロジーとしてその成果を総体的に見ると、応用への展開は未熟である。自己集合の階層的発展の理論、非平衡開放系における時間・空間上の散逸構造の解明、平衡論と速度論の使い分け、ゆらぎの効果などサイエンスを巻きこんだ基本課題について出口からの位置付けが必須となる。

「計測・解析」については、選択したナノ領域を直接見る電子顕微鏡や SPM に加え、放射光･X 線、中性子、ミュオン、陽電子などの粒子線ビームが用いられる。放射光は構造解析や光電子分光、元素分析をはじめとする種々の用途に、中性子は重元素と軽元素が混在している結晶の解析や中性子の持つスピンを利用した磁気散乱による磁気構造の同定などに用いられる。ミュオンは磁性秩序や電子状態の測定あるいは元素分析などに、陽電子は格子欠陥の検出や空孔サイズの測定、あるいは結晶表面の解析などに用いられる。今後のナノサイエンスには、これらによる三次元計測、動的・リアルタイム計測、界面および内部計測などが必須であり、また、プロセスの微視的解明のためには、使用環境下でのその場計測技術に高いニーズが存在する。例えば、生体の細胞表面や細胞内部の三次元的観測、触媒や燃料電池の内部反応状態の解明に必要である。他にも高温、ガス環境、電場、磁場、応力などの「環境下」の問題がある。

「計算科学」も、今後、ナノテクノロジーの基盤的技術として本質的に重要な役割を果たす。特に目的機能を持つ新材料を創成するために必要となる動的過程のシミュレーション技術などには不可欠の武器である。特に、量子力学を考慮した第一原理計算による分子動力学は、原子数が数十万個程度の系を対象にできるようになり、存在感が急激に増している。今後は、理論モデルと計算を合わせたハイブリッドな方法で現実の複雑な系を追い込んでいくこと、特に非平衡開放系の現象をどう表現するかが重要な課題となる。データベースやインフォマティクスと結合したマクロ複雑系のシミュレーションによる現象解析に向けて、計算科学への期待は益々高まりつつある。

上記の共通基盤技術群の上位レイヤーとして、ナノテクノロジー・材料全体に関与する特有の「設計・制御概念・技術」がある。具体的には、「マテリアルズ・インフォマティクス」、「元素戦略」、「分子技術」、「空間制御」や「界面制御」、「バイオミメティクス」等であり、これらはいずれも目的とする機能を実現させるための構造の設計・制御手法として、サイエンスの新局面を拓くことによって社会・産業に貢献しうる領域である。

－ マテリアルズ・インフォマティクス：計算科学による特性予測、それを実証するハイスループット材料合成と評価、それらのデータを統合管理する材料データベースや機

械学習などを統合的に活用した物質・材料探索・設計の取り組み全般を指す。実験、計算で得られた物質・材料に関する知識とデータに加えて、統計的手法を駆使して、新物質、新材料の「発見」を加速し、物質・材料の機能を制御する規則を探る。究極には、理論研究者の参画により、規則の背景にある材料特性を支配する法則を「理解」し、自在な材料「設計」を可能とする系統的アプローチを構築することを目指すものである。これにより新機能材料の開発速度の加速、およびコストの大幅低減が可能となり、我が国の産業競争力強化にもつながることが期待されている。

－ 元素戦略：比較的豊富に存在する元素や有機材料などを用いて、目的とする機能を備えた材料を開発するために、電子状態、原子配列、分子構造などの微視的な観点から目的機能を如何に発現させるかを検討し、計測技術や計算科学を活用して構造・機能・反応をデザインするものである。

－ 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群を指し、設計・創成、変換・プロセス、電子状態制御、形状・構造制御、集合体・複合体の制御、輸送・移動制御から成る。

－ 空間制御：物質・材料中の微細な空間構造や空隙構造の次元、形状、大きさ、組成、規則性、結晶性および界面をナノ～メソ～マイクロメートルで設計・制御・階層組織化することによって、従来の空間利用の常識を超える機能を発現する材料を開発するものである。

－ 界面制御：理論解析と精密な分子設計や構造制御による界面の創成、および計測法の開発やモデリングに基づく界面の特性解析を行い、界面が関与する新奇現象・物性を解明するとともに、界面の特性を活かした新たな機能材料、デバイスの開発を対象とする領域である。今後特に、細胞のような生体物質と半導体のような人工物の間の制御が重要になる。

－ バイオミメティクス：生物の構造と機能に関する知見を、材料、デバイス、システムの設計・製造に系統的に活用するための研究開発である。生物に学ぶことにより、製造・使用時のエネルギー消費が少なく、環境適合性の高い材料、デバイス、システムを実現することを目指すものである。

３．５．１　界面制御

（１）研究開発領域の簡潔な説明

理論解析と精密な分子設計や構造制御による界面の創成、および計測法の開発やモデリングに基づく界面の特性解析を行い、界面が関与する新奇現象・物性を解明するとともに、界面の特性を活かした新たな機能材料、デバイスの開発を対象とする研究領域である。本領域で得られた知見は、金属、粒子などのハードマテリアルをはじめ、高分子、分子集合体、ゲル、バイオ由来物質などのソフトマテリアルや無機－有機ハイブリッド材料による新規界面の構築に利用される。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

材料のマクロ物性やデバイス特性は、結晶粒界、焼結体界面、ナノ・メソ構造の接合部分など、物質の複雑な界面構造に大きく左右される。それは界面ではバルク固体にはない特異な電子状態を生じるため、結果として新たな物性・機能が生まれる可能性をもつからである。特にナノマテリアルにおいては、構成原子・分子ならびに電子数すべてが有限な、いわば「界面に囲まれた状況」とも言える。このことが新規な物性・反応性・外場応答性等を生じる理由にもなることから、ナノマテリアルの物性制御・新機能の発現には、界面状態・構造の解析・解明・制御が不可欠となる。

界面の状態・構造を原子・分子レベルで精確に計測・評価する技術としてアトムプローブ、走査型電子顕微鏡、高輝度放射光などが着実に進歩してきた。ただし、結晶性が悪く不純物の析出が伴うような複雑な界面状態・構造の特定と物性理解はなかなか進んでいない現状もある。複雑な界面における複合的な構造・反応機構をその場で観測・解析しうる先端計測法の開発が当然必要である。さらには、多様な電子・原子配列による機能発現を多量データの統計的解析により整理・理解して新規材料の設計・開発につなげる「マテリアルズ・インフォマティックス」の視点での研究開発が求められている。

本研究開発領域の進展によって永久磁石や高強度構造材料などナノ・メソスケールの微細組織が重要な材料の特性改善、ナノ構造デバイスの特性と安定性の改善、ナノ材料による巨大面積・精密加工のための基盤技術の確立、太陽電池・燃料電池・二次電池といったエネルギー変換デバイスの効率や寿命の向上などが期待できる。

［これまでの取り組み］

二次電池、燃料電池、色素増感太陽電池など、直接的な電子移動が起こる固体と液体の界面は、エネルギー変換の効率化に重要な役割をなす心臓部とも言え、効率や寿命の向上を目指す研究が各国で活発に行われている。これらの反応過程を如何に正確に把握するかが重要となるが、それらは固液、固々界面などの埋もれた界面で起こっており、そのような界面を動的にプローブすること自体が非常に困難である。水平分解能が非常に高い走査プローブ顕微鏡は主として最外層の情報のみが得られ、また時間分解能が低い。さらに固々界面に適用することはできない。埋もれた界面幾何構造の観察という観点からはシンクロトロン放射光（X 線）や中性子を用いた計測法などに代表されるように、構造を反応が起こっているその場で実時間追跡する技術の開発が進んでいる。一方、

界面の電子構造や分子構造の測定には非線形分光法が有効であるが、水平分解能と時間分解能が低く、それらの向上のための装置開発が行われている。

このような界面の局所構造情報を得る方法は、X 線などの放射光を用いる方法、レーザーを用いた非線形効果による界面選択的分光など、面垂直方向の分解能は高いものの、面内分解能が低いものに限られてきた。固体／固体の界面については透過電子顕微鏡という極めて有効な手法があるが、液体／固体界面、とくに液体側の構造解析は困難である。液中周波数変調方式の AFM (FM-AFM)は、原子スケールの面内分解能をもちながら、界面近傍の液体の情報まで得られるため、数少ない有効な手法として発展が期待される。これまでは無機固体や有機薄膜についての測定に限られていたが、最近、電池が動作するような条件で、界面付近の電解質イオンの濃度が変化することによって、水和構造ネットワークが変化することが報告されている。さらに、例えばタンパク質が機能発現するために必要と考えられている強く水素結合した水和水の位置や吸着の強さを評価できる可能性もあり得る。

液中での電子移動反応の速度については、第一原理計算と分子動力学計算を組み合わせた手法によって、溶液内での分子間の電子移動はかなり正確に記述できるようになった。電極界面においても、対称性の高い金属単結晶電極については、Pt 上で電極電位に応じた水和水の配向変化や水の解離に関する計算がなされて、実験と対応する結果が得られている。

しかし、今日に至ってもなお、電子移動（酸化・還元）によって固体電極に生じる絶対的な電位と理論計算によって得られるエネルギーの比較には合理的な基準がない。

表面・界面における計測技術として最近注目されているのがスピン分解電子分光装置、先端的走査プローブ装置（超低温超強磁場中で動作可能、パルス電圧印加可能、フェムトレーザー照射可能、複数プローブ型など)、低速電子顕微鏡などである。これらは日欧が技術開発に伝統的に強く、産業化も進んでいる。米国は、研究室レベルでの開発能力は極めて高いが、それを産業化する企業がないのが実情である。超高感度検出器については、日本が大学での研究レベルであるのに対し、欧州ではメーカーによる初期段階の製品に近い試作レベルに達しており、かなり先行している。これらの電子線、X 線、光を用いた光学系の研究開発は、日本が強い分野であったにも関わらず、ここ 20 年ほどは常に欧州に先行されている。

［今後必要となる取組み］

機能性材料の創製には、固相法、スパッタ・PLD・CVD などのドライプロセスによる成膜法、共沈法・ゾルゲル法・水熱法のようなウェットプロセスなどの従来型合成法と、自己組織化のように分子の特異性、物質の界面特性、非平衡場などを利用する合成法が考えられる。界面制御は、これまでは応用ごとにプロセス技術の改良として主に行われており、分子材料と粉体（μm～mm）の加工技術の延長で理解されている。ナノテクノロジー・材料分野で直面している課題のひとつとして、ナノ材料の特性を活かしたままでナノ材料間をつなぐ界面層の開発がある。例えば有機デバイス（有機 EL や太陽電池など）の場合、微結晶中での電子およびホールの移動度もさることながら、微結晶バウンダリー（界面）特性がバルク電子物性を決めることから、材料の特性を活かしながら

材料間をつなぎ、バルク特性として優れたものを得るための研究をさまざまな材料で横断的に行い、統一した指針を立てることが求められる。物質の界面に関する第一原理シミュレーション手法の高度化や探索アルゴリズムの開発も必要となろう。

電池などで特に重要な液体の中の固体やその外側の電気二重層、超伝導など新たな物性を示す新規物質層ともみなせる示す固体－固体界面などの埋もれた界面の非破壊解析技術の開発も引き続き必要である。一方、近年、界面選択的な分光手法、界面近傍の顕微画像化手法は発展を続けているものの、分子の動きまで含めた空間・時間分解能をもたせることは原理的に困難で、計算科学的手法に頼るところも大きい。物質と電子の移動が起こる固体電極と液体の界面の液体側を含む局所構造は、電池等の変換効率を左右する重要な要素であるが、その理解は未だ十分ではない。

高機能を求めると、ソフトマテリアル/ハードマテリアルからなるハイブリッド材料が今後重要な選択肢となることから、そのための評価技術の整備が必要である。既存の複合材料は有機成分と金属を含めた無機成分をただ混合したものが多く、機能を担う成分を配列制御して革新的な新機能を創製する研究の進展が望まれる。金属（無機）成分の空間配置は従来の顕微鏡技術で解析できるが、今後は界面における特徴的な相の存在や相互作用を可視化・分析する技術開発が必要となる。解析・評価技術としては、反応が進展するまさにその瞬間をとらえるための In-situ やデバイス等の実際の使用環境下での測定を行う Operando 解析など、真のその場解析の技術を着実に進めるとともに、実用的な表面・界面の理解を深めて行く必要がある。

界面創成と密接に関連する計測・評価技術の課題として以下のものが挙げられる。

・溶媒を含む状態での微細構造の観察技術

ナノスケールイメージングの代表的な装置である電子顕微鏡は、試料を超高真空状態に置く。しかし、ソフトマテリアルなどの材料、生物、医学分野の多くの試料は含水状態である。したがって溶媒を含む状態での微細構造の観察技術が実現できれば、応用分野は非常に広い。含水試料に対しては極低温で試料を固定（固化）し、その状態で観察する技術はすでにあるが、特殊で使いにくい。試料の構造を変化させない急速固定化の新技術が必要である。電子顕微鏡の場合、試料室のサイズが小さく、電子の透過力も小さいため、超薄膜の観察は可能であるが、変形、その他の試料環境を構築するのが難しい。高温、ガス下、低真空状態、力印加状態での電子顕微鏡法（環境 TEM）の開発が行われているが、３次元的な構造観察は実現していない。

・資料損傷の回避

電子や X 線などのプローブによる試料損傷が問題である。試料損傷の理論とそれを裏付ける基礎的実験が不備である。試料損傷を防げないのであれば、超高感度検出器を開発し、試料が損傷する前に画像を撮影する必要がある。プローブとして電子や X 線以外の可能性として、例えば He イオンあるいはその他の低ダメージのイオンビームの利用も検討する必要がある。

・イメージング技術

X 線の場合は超高速でダイナミックレンジの大きな二次元検出器が必要である。また得られた大容量の画像を高速度で転送し、3 次元（立体的に見える）あるいは 4 次元（変形、時間などの外部条件を次元と考えると 4 次元）化するイメージング技術を開発する必要がある。ここではイメージングと計算機科学の連携・融合が重要となる。

・ソフトマテリアルに適用できる原子分解能観察技術

ソフトマテリアルとハードマテリアルの界面構造・機能を原子～メゾスケールの空間領域でシームレスに観察できる顕微鏡が必要である。また、高圧下、溶媒中あるいは変形下などの外部条件を試料に加えた状態で観察ができる顕微鏡あるいは微細領域の高感度分光技術が必要である。

（3）科学技術的・政策的課題

物質の界面の問題は、様々な材料（鉄鋼、非鉄金属、セラミックス、半導体、有機材料）やデバイスに共通するテーマであるが、関連研究者は各分野に細分化されており連携が難しい。また、これまでの研究は特定の材料に関するもので、散発的という印象がある。関連研究者を専門分野の壁を越えて連携させ、複合的な手法開発を行うことが求められる。

日本には多くの優れた界面科学研究者がおり、また優れたナノ材料を扱う企業があり、環境は整っている。まずは、計算物質科学研究者、理論研究者、高度な計測技術を持つ実験研究者、および材料開発を行う研究者（企業を含む）の連携協力を促す仕組みが必要である。

さまざまなナノ材料、デバイスを網羅する意味で、複数の大学研究者と複数の企業との連携体制で、基礎から出口への一貫した研究を実施することが望ましい。産業界のニーズに基づき、主として大学・国研の研究者が理論や原理、手法開発を行い、開発された手法を用いた実際の材料開発、装置試作は、主として産業界が担当する。ただし、材料開発は競争的分野でもあり、知財が絡むため、企業間の連携は難しい面がある。

埋もれた界面の計測は、信号強度がある程度落ちることが避けられないため、放射光施設を用いて手法開発を進める必要がある。現状の個人的関係をもとにした開発のみに頼ることなく、統括者のもとに公募によりチームを作って予算を投入するような仕組みが試みられても良いと思われる。

国内のスパコンの利用については、昨年度より「京」の一般利用が一部公募開始されるなど、界面へ応用する環境面では整いつつある。また、CREST や燃料電池関連のいくつかの研究プロジェクトにおいても、電極界面での電子移動に関わる計算機シミュレーションに関する研究投資は行われている。また、実験的な界面の解析は今後ますます重要となるはずであるが、常に計算手法とのリンクを意識して取り組むことが重要になる。

（4）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

走査型透過電顕（STEM）、アトムプローブ（STM、 AFM など）による原子レベルで

の実空間観察の解像度が向上している。

位相差顕微鏡法により、軽元素からなる物質（生体組織なども含む）に対するコントラストが増大している。

多次元空間の探査手法の開発は世界的に多くの試みがあり、日本からも複数の研究者が強力な手法を提案している。とくに日本発のレプリカ交換法は世界的に広く使われている手法である。複雑な界面構造の探査については、シリコン表面酸化膜（SiO2/Si）の構造シミュレーションの試みが IBM から報告されている。日本では比較的簡単な金属粒界の界面構造について、実験研究、理論研究が進められている。

真空中で真の原子分解能を有する AFM 手法として 1995 年に発表された周波数変調方式の AFM（FM-AFM)を、徹底的なノイズ低減を行うことで液中動作可能とした液中 FM-AFM 手法は、従来の AFM とは大きく異なり、液と接する固体の構造だけでなく、その近傍にある液体側の構造まで画像化することを可能とした。例えば 2010 年以降、水溶液中で、固体表面の構造に対してどの位置に水和水が構造化しやすいかという情報が界面近傍の 3 次元情報として得られるようになった。液中 FM-AFM の技術開発は、日本が圧倒的なリードを保って進んでおり、JST 先端計測分析技術・機器開発事業に採択され、製品化まで至っている。また、世界に先駆けて 2010 年には電気化学反応が起こる界面に本手法を応用する開発も行われ、現在は世界で 5 グループほどが同手法を用いた電気化学界面の局所構造解析に着手している。

［注目すべきプロジェクト］

インクジェットを用いるナノプリンティングが産学で研究され、銀粒子を用いる回路描画技術の実用化を目指している。

元素戦略プロジェクトでは、二成分ナノ粒子の混合系を用いて、代替元素を創出するという成果が出ており、材料に新しい可能性を示すものとして注目される。また、界面制御によりジスプロシウム使用量を減らしたネオジム磁石など、ナノ界面制御に関連する成果が得られている。

JST/CREST「エネルギー高効率利用のための相界面科学」とさきがけ「エネルギー高効率利用と相界面」(いずれも平成 23 年度開始)では、ナノテクノロジーを環境・エネルギー技術に用いるプロジェクトが推進され、界面が大きな技術要素となっている。また、JST/CREST「二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開」(平成 26 年度開始)ではカルコゲン化合物やトポロジカル絶縁体で新しい量子物理現象の室温での発現や電場でのスピン制御を可能にするデバイス開発や絶縁性脂質二分子膜に基づくイオン・電子ナノチャネルの創成など、界面での制御が最も顕著に現れる課題が採択された。

SPring-8 の高輝度放射光や X 線自由電子レーザー（XFEL:SACLA)、J-PARC の強力な中性子源、熱ミュオニウムなど、大規模実験施設の整備も進んでいる。

2012 年には国内においてナノテクノロジー・プラットフォームが発足した。つくばにおける TIA とあわせ、国内の研究の牽引が期待される。

（５）キーワード

自己組織化、自己修復、電気二重層界面、Operando 解析手法、第一原理分子動力学計算、高分解能電子顕微鏡、ナノ材料、フレキシブル、インプリンティング、ハイブリッド界面、もれた界面、界面伝導、トポロジカルマテリアル、界面電子移動、エネルギー変換、溶媒和層

（６）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	◎	↗	基礎研究は活発で、国際的にリードしている分野が多い。しかし、分野間の共同研究はまだまだ不十分である。 SPring8においてもＸ線回析・散乱・EXAFSなどの表面・界面を見る技術が進んでいる。 シリコンLSI 分野では、研究-基礎技術レベルでは、日本が界面現象の物理的理解において一歩リードしており、米韓は新材料界面開発で世界をリードしている。 有機デバイスについては日本が高い技術的競争力を有する。有機低分子の存在下でグラフェンを焼結すると、接合部位の欠陥を有機分子から提供されたカーボン原子が補い、導電性を保った接合が可能である。それ以外（特にグラフェンなど新規材料）については米国に大きく立ち後れている。 半導体を中心とする真空中の研究に加え、固－液界面の研究が、評価手法の進歩と産業界の材料ならびに製造プロセスに関するニーズから活発になっており、世界的に研究水準は上昇している。
	応用研究・開発	◎	→	全体としてのレベルは高いが、分野間また産学間の連携が不十分であり、研究の展開がやや硬直的である。 材料分野の製品・技術開発において界面・表面の課題の解決は必須であるとの認識が高まっている。例えば、ナノインプリント技術には、広範なナノ材料基盤技術が関わっている。アカデミックな研究の成果が生かされてきている。 企業の官学の基礎研究のナノテクノロジー基盤を活用するという期待は以前にも増して高まっている。化学プロセスや材料の構造の精密化から表面・界面の吸着など、現象の解明と機能・特性制御への期待が大きい。例えば、SPring8での高分子に関するフロンティアソフトマター開発産学連合ビームライン（2010年竣工）、JST産学共創基礎基盤研究プログラムの中の「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」、燃料電池開発のための先端構造触媒反応「リアルタイム計測ビームライン」（2012年）が関連分野の基礎研究の成果を踏まえ実現した。 基礎研究により開発された装置が市販されるなど、基礎から応用への橋渡しがされているが、官学で開発した装置の普及には時間がかかる状況であり、ナノテクプラットフォームでの活用など工夫が必要である。
	産業化	○	→	JST先端計測プログラムの推進もあり、計測装置メーカーにおける先端機器の発売は増えており、特にAFM（高速AFM、液体構造観察用AFM）や電子顕微鏡関係が目立つ。 ナノフルイディクスのためのナノデバイスの製造技術の開発が進展しており、低コストで高品質のデバイス開発が実現されつつある。トライボロジー分野では固体潤滑膜や硬質膜を形成する製膜技術や製膜装置の開発に関して、DLC （ダイヤモンドライクカーボン）を中心として国内メーカーが積極的に取り組んでいる。また、添加剤開発に関するポテンシャルも高い。ナノプリンティング技術が活発に研究され（JST ERATO、コンソーシアムなど） 、解像度が上がり、実用化へ期待が高まっている。ナノフルディクスを用いるバイオセンサ、単一細胞センサなど、創薬研究への実用が試みられている。

米国	基礎研究	◎	↗	研究者層が厚く、境界領域の研究に積極的に参入する傾向がある。特にSEMATECH などのコンソーシアムが材料科学分野を牽引し、グラフェン、トポロジカル絶縁体表面等の研究が爆発的に広がりを見せている。デバイスに向けた基礎研究も大学や企業の研究所でも活発に行われており、応用技術への展開が主要なモチベーションになっている。 ・米国化学会は雑誌の発刊に意欲的で、2009年にジャーナル“Applied Materials and Interfaces”、2011年にはACS Catalysisが発刊され、それぞれ2014年時点でImpact Factorが5.0を超えるなど、短期間で主要な雑誌の仲間入りをしている。化学・工学・物理・生物の融合研究領域をカバーする雑誌、界面に関する学術雑誌としては他にNano-Letters, ACS Nanoもあり、それぞれ12および9.5以上と非常に高いImpact Factorを得ている。 ・ハーバード大学、スタンフォード大学、UCLA、ノースウェスタン大学など多くの大学で、ナノ構造を用いたバイオ応用、センサを目指した研究開発が進んでいる。また、エバネッセント光を用いたナノ光学、さらに、ナノフルイディクスによる流体ダイオード開発のような新展開も見られる。トライボロジー分野では、SFA（表面間力測定装置）やSPMを用いた研究は盛んで、基板上の原子や分子を操作する研究が行われている。また、コンピュータシミュレーションでは、第一原理計算やMD(分子動力学)を用いた研究で世界一のレベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。デバイスに向けた基礎研究も大学や企業の研究所でも活発に行われており、応用技術への展開が主要なモチベーションになっている。電子顕微鏡および先端的走査トンネル顕微鏡（超低温超強磁場中やパルス電圧型）など先端的装置の開発が継続的に行われている。半導体分野では、SEMATECHなどのコンソーシアムが材料科学分野を牽引しており、応用技術への展開が図られている。ナノ流体研究では、多くのベンチャー企業が、大学の基礎研究に基づいて、バイオ・医療応用、バイオテロ対策などを目指した研究開発が進んでいる。トライボロジー研究では、計測機器の開発をきっかけとしたベンチャー企業の設立が行われている。
	産業化	◎	→	大学などの技術をベースにしたベンチャー企業が次々と生まれ力となっている。Intel、IBMなどの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上が認められる。人材の流動性により、複数の企業の共同研究が行われるなど機動力がある。 新しいインプリンティング技術などが多く開発され、低コストで高品質のデバイス製造技術が開発されている。ナノマテリアルなどの素材開発などで、技術力の高さが推察される。
欧州	基礎研究	◎	↗	・表面界面の研究は、ドイツを中心に伝統的に強い。金属表面での触媒作用に関する研究など根強いものがある。グラフェンなど新しい話題も欧州に端を発している。先端的な計測機器の開発も継続的に試みられている。欧州連合も基礎から応用までの研究支援に注力しており、IMEC・LETIなどのコンソーシアムを始めとして基礎研究の十分な支援がある。 ・基礎研究については、各国に特徴的な分野や中心になる研究機関があり、世界をリードしている。例えばドイツは、マックスプランク研究所がコロイド界面研究所、高分子研究所など複数の専門の研究所を有し、ミュンヘン大学などの大学のセンター、ミュンスターのCeNTechなどもある。トライボロジーはロンドンとリヨンに拠点がある。放射光施設などの国際的な存在感の大きい核になる研究機関が複数存在し、大型施設を用いる計測も含め欧州全体での研究交流・共同研究、人材育成も活発である。デンマークなどの小国でも理論（計算）科学の表面・界面への展開などユニークな国際レベルの研究が見られる。 ・英国王立化学会（RSC）や民間の出版社による関連分野の雑誌の出版も続いている。例えばRSCではLab on a Chip （2001～）、Soft Matter（2005～）、Nanoscale（2009～）、民間では、Small（2005～、Wiley）、Nature Nanotechnology（2006～、NPG）、Particles（2012～、Elsevier） などがある。 ・ナノフルイディクス分野では、オランダ・トウェンテ大学、フランス・CNRS、スウェーデン・カロリンスカ大学・ルンド大学などの大学で基礎研究が進んでいる。

欧州	応用研究・開発	◎	→	特色のある技術開発は一部に見られるが、全面展開の状況にはいたっていない。 ドイツの低速電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡、スウェーデンの高分解能電子分光器など表面界面に関する計測機器の開発力は高い。半導体界面に関しては、IMEC、LETIを中心に高い技術開発力を誇る。官学と企業の研究の間のバリアが低く、連携がはかられている。英国においてはロンドン大学とインペリアルカレッジの連携するナノテクノロジーセンターが材料ナノテクノロジーの応用をはかり10程度のスピンオフ企業が生まれている。 ナノフルイディクスに関し、いくつかのベンチャー・大企業において、研究開発が行われている。
	産業化	○	→	触媒など化学分野で伝統的に強い。表面界面に関する最先端計測機器メーカーの活躍が目立つ。産学連携により高い産業技術力を維持している。 化学や医療分野は国際化が進んでいるが欧州をベースとするトップ企業の産業技術力は高く、新しい展開に対しての関心も高い。研究開発の世界展開が図られ、日本に研究所がある企業も多い。 ナノ微細加工の製造技術は進んでいるが、低コスト化の点で日米に遅れている。トライボロジーに関しては、製膜装置メーカー、真空機器メーカー、計測機器メーカーが伝統的に強く、産業技術力の下支えをしている。
中国	基礎研究	○	↗	表面界面の多くのトピックスに関して、質・量ともに上昇している。国家政策として大規模な支援を受ける清華大学などの中核大学が世界的な成果を出し続け、存在感が急速に増しており、今後も継続する見込み。 研究拠点は大都市に集中しているがその研究設備は充実しており、条件探索などが活発に行われている。特に材料分野では、海外（欧米、日本）での経験を持つレベルの高い研究者が帰国しており、研究水準が急激に向上してきた。材料関連の多くの分野で国別発表論文数の1位となっている。ただし、その多くが既存概念の延長上の研究でもある。表面科学、固液界面、自己組織化単分子層といった分野で存在感が高まっている。 ナノフルイディクスにおいては、北京大学、南京大学などいくつかの大学において基礎研究が開始されているものの、国際的に注目に値する研究はまだ少ない。トライボロジーにおいては、経済的な発展を背景に研究開発力が急速に向上している。
	応用研究・開発	△	↗	半導体分野においては国策として大学を中心とした研究開発の躍進がめざましい。独自の技術開発を生み出すためには、今しばらく時間が必要と思われるが、半導体デバイス分野の研究開発水準の指標とされるIEDMにおいても存在感を急速に増すなど、進展速度が大きい。ナノフルイディクスにおいては、大学発ベンチャーにおいて、研究開発が開始されているが、日米には遅れており、トライボロジーについては、企業における研究開発は低調である。
	産業化	△	↗	大学発ベンチャーなどが出てきているが、世界的な水準まで達していないのが現状。中国にある国外のナノテク企業が高い技術を持ち込んできている結果、人材の集積が進み、トップ企業の産業技術力は国際的レベルに到達している。全体としての産業技術力も向上しており、規模を考えるとそのポテンシャルは無視できない。

韓国	基礎研究	○	→	半導体界面の研究を中心に小数ながら世界的に高水準の研究成果が継続的に出ている。しかし、 米国での研究経験者が多く、ナノバイオでも学際的、融合的研究が進んでいる。ナノテクに関する学科、学生数、および自国研究者による論文数はKNIが立ち上がった2001年から増加し続けており、今後も順調に増加していくと思われる。ナノテク特にナノバイオ関連のセンターが大学に国の支援によりいくつか設置されている。さらに引き続きエネルギー関連での研究機関（例えばGIST）の増強が進んでいる。近年の主な研究対象は、半導体、コーティング、ナノインプリントである。一方で、先端機器を用いる基礎研究のレベルは欧米に劣るが、放射光施設も浦項に開設されるなど進展も見られる。 ナノフルイディクスにおいては、ソウル大学、KAISTを中心としたナノテクセンター構築など基礎研究でも日米を猛追しようとしている。 トライボロジーにおいては、キャッチアップ的なテーマが多く、大学や公的研究機関のポストが少ないためか、優秀な人材が海外流出する傾向にある。
	応用研究・開発	◎	→	世界最先端の技術開発が行われた例は認められないが、多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われており、今後発展期を迎える可能性がある。 多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われつつある。特に、燃料電池、二次電池、バイオセンサなどで産学連携研究が活発に行われている。 ナノフルイディクスにおいては、大企業を中心に、バイオ応用のための研究開発が進展している。また戦略的に研究資源を投資する土壌があるため、今後ポテンシャルが向上していく可能性が高い。SPMの草分け的なメーカーが米国から韓国に本拠地を移し、レベルの高い機器開発を行っており、関連計測機器の研究開発が活発化しつつある。
	産業化	◎	↗	サムスンを中心に、グラフェンデバイス実用化のための研究が盛んに行われている。基礎研究より実用化志向の技術開発が盛んであるが、2014に入って半導体産業の経済的な打撃を受けて、イノベーション進展速度の低下も考えられる。 ナノフルイディクスにおいては、製造技術について、新たな低コスト・高精度技術開発を行い、日米を急追している。トライボロジーにおいては、自動車産業をはじめ、電子情報機器などの製造業を支えるのに必要十分な技術を保有していると推察される。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（7）参考資料

1）元素戦略：H. Kobayashi、H. Morita、M. Yamauchi、R. Ikeda、 H. Kitagawa、Y. Kubota、 K. Kato、M. Takata、S. Toh、S. Matsumura、*J. Am. Chem. Soc.*、2012. 134、 12390
2）高速 AFM： T. Ando、*Nanotechnology* 、2012、 23、 062001
3）固-液界面観察 AFM：
T. Fukuma、K. Kobayashi、K. Matsushige、H. Yamada、*Appl. Phys. Lett.*、2005、86、193108
4）ナノインプリンティング: JST / y ERATO　下田ナノ液体プロセス:
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/snp_PJ.html

３．５．２　空間・空隙構造制御

（１）研究開発領域の簡単な説明

物質・材料中の微細な空間構造や空隙構造の次元、形状、大きさ、組成、規則性、結晶性および界面をナノ～メソ～マイクロメートルで設計・制御・階層組織化することによって、従来の空間利用の常識を超える機能を発現する材料を開発する研究開発領域である。空間・空隙構造制御が可能な材料の代表格としては、主にゼオライト、メソポーラス材料（シリカ、アルミナ、金属酸化物など)、ポーラスカーボン、多孔性金属錯体（PCP: porous coordination polymer、あるいは MOF: metal-organic framework)などがある。

多様な空間・空隙構造制御材料は、構造の特長と設計の自由度、そこから生まれる機能の観点から、透過・分離・吸着・変換・貯蔵材料、触媒・反応性制御、構造材料、電池材料、エネルギー変換材料、ドラッグデリバリーシステム、生体適合材料、分子認識材料、電子材料など様々な応用の可能性をもつ。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

21 世紀になり世界の関心が「もの」から「機能」に変わってきた。新たなトレンドに対応する機能を発現する材料の探求と機能の追求が課題となっている。シェール革命や地球温暖化などへの対応がメガトレンドとなり、たとえば化学産業の石油化学からガス化学工業への変移や CO_2 排出量の削減・回収に向けた取り組みが空間・空隙構造を制御できる材料の研究開発に拍車をかけた。

日本学術会議や日本化学会のロードマップでは、気体補足積層分子の設計、CO_2 の有用物質変換、代替エネルギー、人工光合成の実現、量子ドット太陽電池などのテーマが将来有望視されている。2014 年 6 月に発表された資源エネルギー庁の研究支援の考え方には、ガス化、C1 化学（炭素数 1 の一酸化炭素やメタノールなどの単純な分子を原料に、炭素数の多い有機化合物をつくること）が盛り込まれた「分解高付加価値化技術」のなかに、革新的ガス化技術を利用したコンビナート連携、新技術によるメタノール直接合成、新メタン活性化触媒によるトルエンへのメタン付加によるキシレンの製造、新フィッシャー・トロプシュ（Fischer-Tropsch）触媒とプロセス、酸素透過膜を利用したコンパクト合成ガス製造技術、プロパン/プロピレンの分離などのテーマが挙げられており、さらに「環境・省エネ技術」のなかに、酸素富化燃焼技術、二酸化炭素の化学品への転換技術などのテーマも盛り込まれている [1)]。空間・空隙構造制御が可能な多孔性材料の特性を生かした課題解決が期待できる。

［これまでの取組み］

多孔性材料としては、産業利用の観点ではゼオライトが、学術的な研究の傾向として、メガトレンドであるシェール革命や地球温暖化に関連するテーマが多くなっている。シェール革命によりアップストリームの分離（CO_2/メタン、窒素/メタンなど）やダウンストリームの分離（エタン/エチレン、プロパン/プロピレン、水素/CO_2 など）の報告が増えている。地球温暖化関連では、CO_2/窒素分離や蒸留から多孔性膜分離への転換を報告する傾向が現れている。またメソポーラス材料から多孔性金属錯体の研究へ転向する研究

が目立っている。国際学会としては、ゼオライトが 1967 年以来、International Zeolite Conference（IZC）、多孔性金属錯体が 2008 年以来、International Conference on Metal-Organic Frameworks and Open Framework Compounds をそれぞれ開催している。多孔性金属錯体は 2007 年以降 IZC のセッションに加わり、2013 年には Metal Organic Frameworks の委員会が設置された。

・ゼオライト

ゼオライトは 1756 年に Axel F. Cronstedt（スウェーデン）により天然のゼオライトが発見されてから、Richard M. Barrer によるモルデナイトの合成、1972 年 Mobil のグループの構造規定剤（SDA）を用いた ZSM-5 の合成、1988 年に黒田一幸（早稲田大学）によるメソポーラスシリカの発見を経て、現在 218 個のゼオライト構造が作られ[2)]、既に脱水剤、吸着材、触媒などの用途に広く産業利用されている。研究開発は、基礎研究で合成、膜、構造、物性が中心であり、SDA を用いないゼオライトの合成、メタノール/水分離膜などが注目される。応用研究で、石油/ガス化学触媒、環境触媒、吸着/分離材が中心であり、天然ガス関連の触媒、分離が注目される。

各国の施策では、欧州の EU FP-7（第 7 次研究枠組み計画）で 3 つのプロジェクト、スペインの農業向けゼオライト（プロジェクト名：ECO-ZEO、266 万ユーロ）、ノルウェーで触媒用ゼオライト（プロジェクト名：ZEOMORPH、152 万ユーロ）、ドイツで有機ゼオライト（プロジェクト名：ERC-SG、152 万ユーロ）が進められている。米国エネルギー省（DOE）では触媒の基礎研究に 48 万ドル、また NSF では 3 のプロジェクト、タールのクラッキング（プロジェクト名：Turning Tars into Energy、19 万ドル）、ゼオライトの Cu、Fe 活性点（プロジェクト名：Chemical Catalysis、53 万ドル）、オレフィン/パラフィン分離（プロジェクト名：SBIR Phase II、64 万ドル）が進行している。

・メソポーラスシリカ

メソポーラスシリカは日本では産業利用の段階に入っている。日本化成はメソピュア®の商品名で、シートに加工して結露防止、調湿、防曇用に、メソポーラスシリカ粉体として触媒担体、ガス吸着、吸着物の放除用に販売している。大手架装メーカーがトラックの荷台部の結露防止用に採用している。また太陽化学は世界初のメソポーラスシリカの実証プラントを建設し、調湿材料や、Low-k 材料、触媒材料への用途開拓を行っている。クラレと NIMS は共同で反射防止膜への利用を検討している。

施策としては、EU FP-7 でイタリアの医療用プローブ（プロジェクト名：FP7-PEOPLE、19 万ユーロ）が進められている。NSF では 3 つのプロジェクト、バイオメディカルへの応用（プロジェクト名：SBIR Phase I、18 万ドル）、大細孔/ナノ細孔材料（プロジェクト名：CERAMICS、30 万ドル）、MRI 造影剤（プロジェクト名：RUI、14 万ドル）が進行している。

・多孔性金属錯体

多孔性金属錯体は有機配位子を金属イオンによって配位結合を介して連結することで作られる無限骨格構造をもつ錯体で、1959 年に銅(I)アジポニトリル錯体が世界で初めて

そのフレームワーク構造が示された。その後 Omar M. Yaghi（UC Berkeley）が MOF という呼称をつけ精力的に展開した。1997 年に北川進（京都大学）らが溶媒を含むクラスレート構造ではなく、室温でポロシティをもつ安定なフレームワークを発表し、多孔性の金属錯体の概念が世界で初めて提唱された。その後現在までに 6,000 もの構造が発表されている[3)]。

応用面では多孔性金属錯体の試薬販売を除くとおそらく世界で初めての上市になるのが、米国の NuMat 社の産業ガスの貯蔵ボンベへの利用である。毒性の高い半導体製造用ガスを多孔性金属錯体に吸着させてシリンダーに充填したもので、通常のボンベでは容器内が高圧のため、リーク時に高い圧力のまま外部へガスが放出されるのに対して、多孔性金属錯体に吸着させた場合、ボンベ内の圧力が高くならず、ガスが外部との圧力差で拡散していくためリーク時の安全性が高められる特長がある。産業用途として規模の大きいものは BASF 社の車両用ボンベへの利用である。BASF 社は長年多孔性金属錯体の研究開発を行い、2014 年～2015 年にかけて米国で多孔性金属錯体を充填したシリンダーを自動車用燃料タンクとして販売することを計画している。既に 2013 年にはアトランタで多孔性金属錯体を充填したシリンダー搭載のトレーラーを展示発表している。使用予定の多孔性金属錯体も公表しており、欧州の工場で製造を計画している。米国ではシェールガスの台頭で天然ガスの価格がガソリンの価格より低く、燃費で約半分程度となっている。しかも家庭にきている都市ガスを昇圧して充填できることから、天然ガス自動車の普及が進んでいる。

仏石油企業の TOTAL は 2009 年～2013 年の 4 年間の EU のプロジェクト、MACADEMIA (MOFs as Catalysts and Adsorbents: Discovery and Engineering of Materials for Industrial Applications)で、多孔性金属錯体による分離に関する研究開発を報告している。プロピレンの重合で未反応プロピレンを回収する窒素/プロピレンの分離の回収条件を求める検討を行った。その他、PSA による CO_2/硫化水素、プロパン/プロピレン、フィシャートロプシュ反応、メタノール製造に関連する水素/CO_2/一酸化炭素の分離の検討も行っている。また TOTAL を含む MACADEMIA のパートナーは後継の M4CO2 プロジェクトで CO_2 の回収の検討を開始した。

［今後必要となる取組み］

空間空隙の本質的役割の理解と既存物質にはない本質的な機能の追求が大きな取り組みとなり、そこから新たな特性が発現されてくる。空間空隙を極めるなかで、改めて新たな材料の設計と合成方法が生まれてくる。そこには計算科学や超高分解能電子顕微鏡による解析などの力も必要になり異分野の研究者間の協業が重要になってくる。新興国の科学技術の猛追を躱す上でも本質的な機能の追求が今後重要になる。

産業面では今後の世界の潮流に対応した技術と製品の設計が重要になる。原燃料は可採年数と相対的な扱いやすさからみてもシェールガス、シェールオイルが中心となっていくと考えられる。一方安価な石炭の利用も進み、原燃料が多様化していくことが予測される。それら新しい原燃料に向けた分離、貯蔵、触媒を担う新たな空間空隙材料が求められるであろうし、またシェールガス、シェールオイルでは、それらからつくることができない基礎化学品の新しい製造方法の探索に向けた新たな空間空隙材料も必要にな

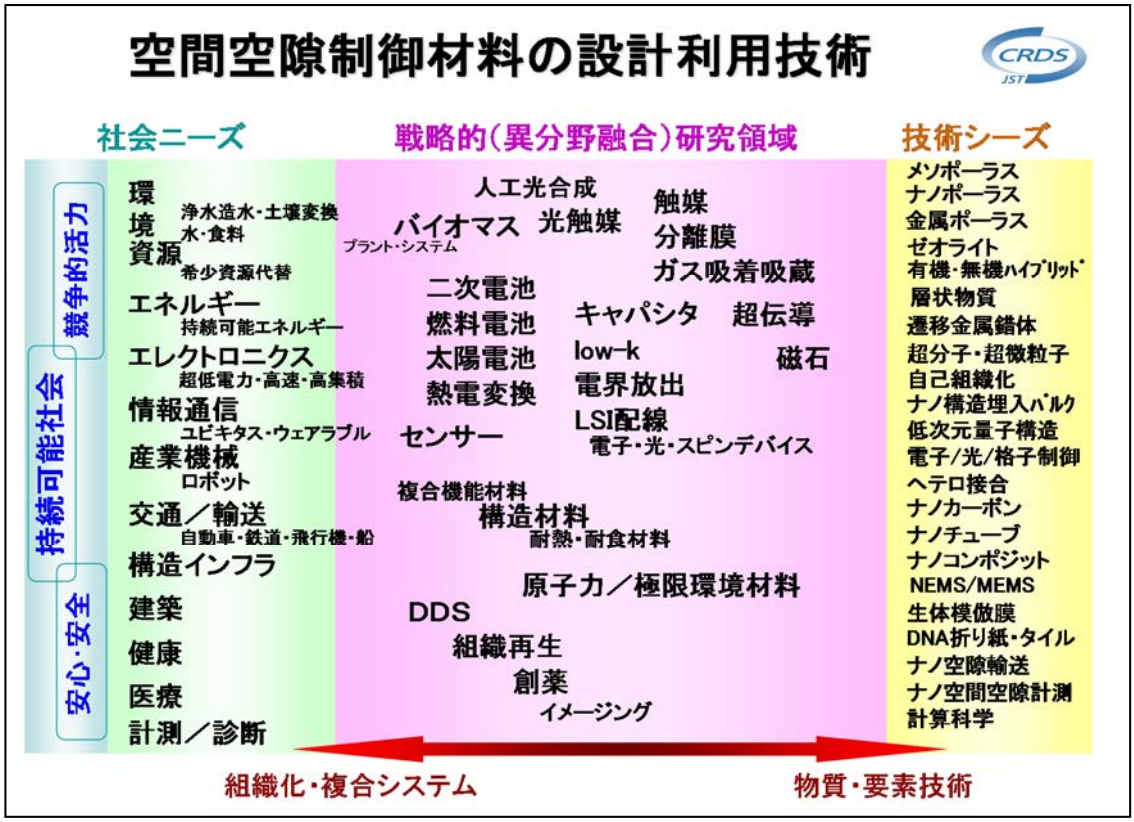
ってくる。また新たな原燃料の使用により CO_2 の排出量が逓増することは必至である。空間空隙材料を利用した CO_2 回収システム、エネルギーを大量に使うプロセスから転換するために必要な材料の開発は、今以上に重要視される。日本の製造業が戦後成し遂げたイノベーションは主として新生産方法の開発であり、日本はプロセス改良が得意である。今後の世界の潮流に対応し、日本に向いた技術と製品の設計が求められる。

以下に研究課題例を掲げる。下図に示す空間空隙制御材料技術のマッピング [16]を元に、想定される社会ニーズから、その実現に必要とされる機能要素を分解抽出し、さらにそれらを、物質技術におけるシーズ的要素へと翻訳することで課題が見えてくる。たとえば、「環境」というキーワードから、「浄化」「改質」「センシング」などの各機能項目が抽出され、それに対する技術要素として、「選択的分離」「吸着・吸蔵」、「分解」「触媒」などの機能要素が挙げられる。原子･分子の選択分離には、対象となる分子がやっと通過できるほどの径を有する細孔による分子フィルタが必要である。また、触媒には、分子が１つ入れるほどの寸法の細孔空間の中で所望の化学反応を誘起する原子およびイオンを配した格子構造を有するゼオライトなどの細孔物質が使われる。これら典型的な空間空隙制御材料である、「ゼオライト」「メソポーラス」「規則性細孔ポリマー」「ナノチューブ」などの多孔性物質／材料群が機能を発現する原理を摘出すると、「細孔や層間の寸法、形状、次元、極性、規則性」による物理的･化学的相互作用の制御や、空間空隙制御材料と物質との相互作用性を象徴する「ホスト／ゲスト」、「鍵と鍵穴」の概念、構造形成の基本原理として「自己組織化」などを抽出することができる。

一方、技術要素の「分解」とは逆の過程として、要素技術群を統合して実用技術へ適用しようとする際には、「統合」を志向するキー概念として、ナノからマクロへの「規模拡大」、統合して拡大しても全体調和が崩れない「高強度化」、現実的な時間と資源などのリソースに適応する「高速大量合成」「低コスト化」などの要素を挙げることができる。これら、社会ニーズへの適応を志向する技術要素を、科学的原理に翻訳し、各シーズ技術の基本原理との関連性を明確化しておくことが重要である。それによって、ある要素技術の学術的深掘基礎研究であっても、その成果を再び水平統合、再構築して実用技術へ接続することが容易になり、従来滞りがちであった社会ニーズと技術シーズの間を自由自在に往来することを可能とする技術開発体制が確立される。このような考えにもとづく研究開発課題は、以下のように構成される。

1. 空間空隙制御材料の設計と合成
   （1－1）空間空隙制御材料における構造および相互作用の設計と機能発現
   （1－2）空間空隙構造を有する物質の新規合成技術開拓
      ・自己組織化などビルドアップメカニズムによる空間空隙構造形成技術
      ・トップダウン手法による空間空隙構造形成技術
2. 空間空隙インプリメンテーション技術
      ・ナノからマクロへの規模拡大、高強度化、高速合成、低コスト化
3. 共通基盤技術
   （3－1） 空間空隙制御材料における物理的諸現象（物質輸送・貯蔵および物質・エ

ネルギー変換など）の観測・解析技術
（3－2） 計算機シミュレーションおよびマルチスケール・モデリングによる空間空隙構造の合成プロセスおよび構造と機能の設計・解析技術



（３）科学技術的・政策的課題

欧米のプロジェクトは基礎研究と応用研究をバランスよく進めている。欧州は、応用研究で MACADEMIA プロジェクトの後継として M4CO2 プロジェクトがスタートするような継続的な進展が見られる。日本の基礎研究の大型プロジェクトは、戦略的創造研究推進事業の CREST およびさきがけの「超空間」領域、ACT-C（低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出）、ACCEL（PCP ナノ空間による分子制御科学と応用展開）、特別推進（階層的配位空間の化学）などがスタートしている。ところが、日本の応用研究のプロジェクトは、NEDO のグリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発事業で、ゼオライト、多孔性金属錯体の研究が 2013 年度に終了し、後継のプロジェクトが育っていない。

欧州では CO_2 対策とガス化学工業への経済性を踏まえた将来展望、米国ではシェールガスへの確実な展望を掲げたプロジェクトを進めているのに対して、日本の政策で掲げる重点課題は素晴らしいものの、産業要請上のタイムスケールとは乖離して著名な研究者のテーマが優先実施されることがあり、現実的に実用困難な採択課題も散見される。テーマ毎の目標設定と、進捗に応じた軌道修正を図るとともに、研究者の能力を可視化して分かり易くする工夫が必要となる。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

・ゼオライト

従来の有機のテンプレートを使った合成方法（ボトムアップ式）から、親のゼオライトを分解して新たなゼオライトをつくる合成方法（トップダウン式）が開発された。親ゼオライトから生成した層状の前駆体に別のピラー分子を再結合させ焼結したもので、ポテンシャルの高い複雑なゼオライトのフレームワークをつくる画期的な方法である。J. Čejka (J.Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Czech)らにより始められADOR（Assembly, Dis-assembly, Organization and Re-assembly）法と名付けられている[4]。ゼオライト合成の従来の方法では設計の自由度が低いことが欠点とされていたが、ADOR 法により、多孔性金属錯体並みの合成の自由度が出てきたといわれている。

・多孔性金属錯体

近藤篤（東京農工大学）、Thomas E. Mallouk (Penn State)らは多孔性金属錯体を鋳型としてチタンイソプロポオキサイドから多孔性結晶の酸化チタンを合成した。親の多孔性金属錯体のモルフォロジーを転写しており、結晶も珍しいブルッカイトである[5]。向吉恵（京都大学）らは多孔性金属錯体の熱分解により、簡便に Ni ナノ粒子/多孔性金属錯体複合体を作製する方法を見出した[6]。多孔性金属錯体触媒へつながる可能性があり興味深い。植村一広（京都大学）らは、多孔性金属錯体内部に規則的に並ぶ有機配位子をモノマーとし、構造規則性を保ちながら重合することにより規則的な有機ポリマーを得、この手法によりこれまで難しかった有機ポリマーの高次構造制御の道を開いた[7]。堀毛悟史（京都大学）らは、多孔性金属錯体の骨格、およびそれらの規則的な内部空間にプロトンを輸送できる部位を導入することにより、結晶のみで湿度ゼロの環境で非常に高いプロトン伝導機能（10^{-2} S/cm 以上）を見出した。100～200℃でこの高伝導特性は発現し、燃料電池の電解質としての応用が強く期待される[8]。小林浩和（京都大学）らは、パラジウム金属のナノ結晶を多孔性金属錯体で覆うことにより、水素吸蔵量と吸蔵速度が単体のパラジウムナノ結晶よりも増進することを見出した。特に水素吸蔵量はパラジウムナノ結晶の 2 倍となる[9]。松田亮太郎（京都大学）らは、銅イオンが配置された細孔を持つ多孔性金属錯体を合成し、CO ガスのみを選択的に吸着、分離できることを見出した。CO の銅イオン近傍への吸着機構も X 線で明らかにし、様々な排出ガスに含まれる CO 分離に期待される[10]。

・多孔性高分子膜

Easan Sivaniah（京都大学）らはマイクロポーラスポリマーと呼ばれる材料に熱処理を施し、架橋構造を形成することでガス分離膜材料を作成した。ガス分離能は市販のガス分離ポリマー膜に比べてガス透過速度が約 100 倍、ガス選択分離度が約 2 倍という極めて優れた性能を有している[11]。

・3 次元多孔性グラフェンナノシート

伊藤良一（東北大学）らと Franklin Kim （京都大学）ら 2 つのグループが独立に従来の 2 次元グラフェンナノシートにない層方向に細孔をもつシートを作成した。伊藤らは多孔質の鋳型表面に CVD でグラフェンを成長させてから鋳型を除去する方法 [12]を用いた。Kim らはグラフェンオキサイドと分岐ポリエチレンイミンとのポリイオンコンプレックスを利用して、ポリエチレンイミンがグラフェンオキサイドに拡散し乍ら多孔性酸化グラフェン積層膜を形成することを利用した。3 次元多孔性グラフェンナノシートは積層膜の熱処理で作成した。Kim らは彼らの方法を拡散誘起多層構造法（dd-LbL）と名付けられた [13]。

［注目すべきプロジェクト］

DOE のエネルギー高等研究計画局（ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy）が、採択したプロジェクトに、自動車用天然ガス（Methane Opportunities for Vehicular Energy）があり、3 億ドルの予算で、「天然ガスを燃料とする輸送機械のための経済性に優れた走行システムのプロジェクト」を 2012 年に開始した。それには充填剤として多孔性金属錯体を用いる研究があり、Texas A&M 大学が 300 万ドルの予算で、低圧の天然ガスを貯蔵する低コストの多孔性金属錯体の研究を行っている。その他、光関連に 36 万ドル、スピンクロスオーバー理論研究に 24 万ドル、細孔空間工学に 67 万ドル、量子効果に 37 万ドル、ヒドロゲナーゼのバイオミミックに 72 万ドル、触媒研究に 32 万ドル、無機のクラスレート研究に 39 万ドル、分子吸着相互作用に 108 万ドル、CO_2 の光還元に 27 万ドルの研究が進められている。

NSF では 14 のプロジェクト、エネルギー貯蔵（プロジェクト名：SusChem、27 万ドル）、電子材料用産業ガス（プロジェクト名：SBIR Phase II、75 万ドル）、太陽光エネルギー（プロジェクト名：SOLID STATE & MATERIALS CHEMIS、47 万ドル）、触媒設計（プロジェクト名：DMREF、120 万ドル）、触媒開発（プロジェクト名：Chemical Catalysis、45 万ドル）、液体分離（プロジェクト名：CHEMICAL & BIOLOGICAL SEPAR、32 万ドル）、CO_2 分離（プロジェクト名：CHEMICAL & BIOLOGICAL SEPAR、32 万ドル）、オレフィン/パラフィン分離（プロジェクト名：CHEMICAL & BIOLOGICAL SEPAR、28 万ドル）、CO_2/天然ガス分離（プロジェクト名：SBIR Phase I、15 万ドル）、空気中 CO_2 の分離（プロジェクト名：SusChEM、91 万ドル）、MOF の熱特性（プロジェクト名：THERMAL TRANSPORT PROCESSES、30 万ドル）、一酸化窒素の医療利用（プロジェクト名：CAREER、20 万ドル）、熱特性（プロジェクト名：THERMAL TRANSPORT PROCESSES、30 万ドル）、不斉触媒（プロジェクト名：Chemical Catalysis、33 万ドル）が進められている。

欧州では 2014 年 1 月から 8 カ国から 16 の企業と大学が集まって CO_2 を捕集するプロジェクト M4CO2（Energy efficient MOF-based Mixed Matrix Membranes for CO_2 Capture）がスタートした。多孔性金属錯体と樹脂との複合化膜で、燃焼前分離（Pre-Combustion、CO_2/H_2 分離）、燃焼後分離（Post-Combustion、CO_2/N_2 分離）を行うプロジェクトで、MOF/樹脂膜を用い、CO_2 回収コストをアミン法よりも低い 15 ユーロ/トン程度まで下げることを目標にしている。16 の参加企業と大学は、Technische Universiteit

Delft（オランダ、Coordinator）、DECHEMA e.V.（ドイツ）、TOTAL（フランス）、Johnson Matthey（英国）、Polymem（フランス）、HyGear（オランダ）、Tecnalia（スペイン）、Universidad de Zaragoza（スペイン）、University of Edinburgh（英国）、Université de Mons（ベルギー）、Consiglio Nazionale delle Ricerche ITM（イタリア）、Universität Leipzig（ドイツ）、Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover（ドイツ）、University of St Andrews（英国）、Bulgarian Academy of Sciences（ブルガリア）、Centre National de la Recherché Scientifique (CNRS)（フランス）である。各国の施策としては、EU FP-7 で 9 つのプロジェクト、スペインのエタノール/エチレン分離（プロジェクト名：MOF-ET-WORK、17 万ユーロ）、多機能ナノミクロ構造体（プロジェクト名：INANOMOF、194 万ユーロ）、工業プロセス材料（プロジェクト名：RASPA、137 万ユーロ）、英国の蛍光増幅（プロジェクト名：FP7-PEOPLE、23 万ユーロ）、光学異性体分離（プロジェクト名：CHIRAL-MOF、7.5 万ユーロ）、オランダで分離膜（プロジェクト名：CRYSTENG-MOF-MMM、147 万ユーロ）、ノルウェーで CO_2 吸着（プロジェクト名：MATESA、571 万ユーロ）、ドイツでヘリウム/メタン分離（プロジェクト名：GA MOF、16 万ユーロ）、オランダで CO_2 捕集（プロジェクト名：M4CO2、1050 万ユーロ）、フランスで CO_2 捕集（プロジェクト名：CAPZEO、22 万ユーロ）が進められている。

現在、日本は産業化に向けた大型プロジェクトはないが、基礎科学プロジェクトは充実している。平成 25 年から JST の 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」、およびさきがけ「超空間制御と革新的機能創成」が開始された。前者は選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製を戦略目標に掲げ、物質変換・エネルギー変換、貯蔵・分離・輸送、構造材料、ライフサイエンスの 4 分野で日本の新しい産業創生に貢献するとしている。後者は選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製を戦略目標に掲げている。環境・エネルギー、医療・健康など社会ニーズに応える新物質・材料の創製に向けて、従来の空間利用の常識を超える革新的機能の創出を目指している。

（５）キーワード

空間空隙、超空間、微小空間、微細空間、PCP（porous coordination polymer）、MOF（metal-organic framework）、ゼオライト、メソポーラスシリカ、メソポーラスアルミナ、メソポーラス金属酸化物、ポーラスカーボン、多孔性金属錯体、超分子

（６）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	◎	↗	ゼオライトは大久保らにより構造規定剤を利用しない合成方法が検討されている。メソポーラスシリカは1988年に黒田が世界で初めて発見したが論文数では中国、米国に抜かれている。 多孔性金属錯体は、北川進を初めとした第一線の研究者が多い。論文数では5位と低いが、インパクトファクターの高い論文への掲載が多く、独創的な研究が進められている。 多孔性材料関連の大型プロジェクトは、戦略的創造研究推進事業のCRESTとさきがけ、ACT-C（低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出）、ACCEL（PCPナノ空間による分子制御科学と応用展開）、特別推進（階層的配位空間の化学）がスタートしており、基礎研究重視の考え方が示されている。
	応用研究・開発	○	↗	特許出願では出願数の増加から多孔性材料への研究開発が盛んであることが伺える。企業の姿勢が従来の選択と集中から成長と拡大に変わってきたこともあり、企業と大学との連携による研究開発が進んでいる。 大型プロジェクトはNEDOのグリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発の成果として、新規ゼオライトによるメタノール/水分離膜が実証試験の段階に入っている。
	産業化	○	↗	メソポーラスシリカが日本では産業利用の段階に入っている。日本化成はメソピュア®の商品名で、結露防止、調湿、防曇用、触媒担体、ガス吸着、吸着物の放除用に販売している。太陽化学は世界初のメソポーラスシリカの実証プラントを建設した。クラレとNIMSは共同で反射防止膜を検討している。 他の多孔性材料はゼオライトを除いて産業化には至っていない。
米国	基礎研究	◎	↗	メソポーラス材料は、触媒やバイオ医学へ展開が進められている。NSFで３つのプロジェクト、バイオメディカルへの応用、大細孔/ナノ細孔材料、MRI造影剤が進められている。 ゼオライトのプロジェクトは、DOEによる触媒の基礎研究とNSFによる3つのプロジェクト、タールのクラッキング、ゼオライトのCu、Fe活性、オレフィン/パラフィン分離が進められている。 多孔性金属錯体はYaghi、Longらを中心として独創的な研究がなされている。両者ともCO_2回収の実条件を想定した研究結果の発表が目立っている。特にLongは多成分ガス吸着分析器で、CO_2、N_2、H_2O、O_2、SO_2を含み混合気体を独立して28サンプル同時測定できる装置を使って多孔性金属錯体の新たな展開を始めた。 プロジェクトは、NSFで14のプロジェクト、エネルギー貯蔵、電子材料用産業ガス、太陽光エネルギー、触媒設計、触媒開発、液体分離、CO_2分離、オレフィン/パラフィン分離、CO_2/天然ガス分離、空気中CO_2の分離、MOFの熱特性、一酸化窒素の医療利用、熱特性、不斉触媒が進められている。DOEからは、光関連、スピンクロスオーバー理論研究、細孔空間工学、量子効果、ヒドロゲナーゼのバイオミミック、触媒、無機のクラスレート、分子吸着相互作用、CO_2の光還元の研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	DOEのARPA-Eで、天然ガス自動車（Methane Opportunities for Vehicular Energy）があり、3億ドルの予算で、天然ガスを燃料とする輸送機械システムのプロジェクトが2012年より開始した。充填剤として多孔性金属錯体を用いた研究をTexas A&M大学が分担している。
	産業化	◎	↗	おそらく世界で初めての上市になるのが、米国のNuMat社の産業ガスの貯蔵ボンベへの利用で、毒性の高い半導体製造用ガスを多孔性金属錯体に吸着させて充填したシリンダーの販売を開始した。 産業用途として規模の大きいものはBASF社の車両用タンクへの利用である。2014年～2015年にかけて、米国で多孔性金属錯体を充填したシリンダーを自動車用燃料タンクとして販売することを計画している。機を見るに敏で、米国のシェールガスの台頭を狙ったものとなった。

欧州	基礎研究	◎	↗	ゼオライトでは、従来の有機のテンプレートを使った合成（ボトムアップ式）から、親のゼオライトを分解して層状の前駆体にし、再結合させた後、焼結する新たな方法（トップダウン式）が開発された。ポテンシャルの高い新しいゼオライトのフレームワークをつくる方法で、J. Čejkaらにより始められ、ADOR（Assembly, Dis-assembly, Organization and Re-assembly）法と名付けられている。多孔性金属錯体のような設計の自由度があることが特長となっている。プロジェクトは、EU FP-7で３つのプロジェクト、農業向けゼオライト、触媒用ゼオライト、有機ゼオライトが進められている。メソポーラスシリカのプロジェクトは、医療用プローブが進められている。 多孔性金属錯体はドイツ、フランス、英国を中心にEUのプロジェクトに参加して盛んに研究が進んでいる。プロジェクトは、EU FP-7で９つのプロジェクト、エタノール/エチレン分離、蛍光増幅、光学異性体分離、分離膜、CO_2吸着、工業プロセス材料、ヘリウム/メタン分離、CO_2捕集、多機能ナノミクロ構造体などが進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	欧州では2014年1月から8カ国から16の企業と大学が集まってCO_2を捕集するプロジェクトM4CO2（Energy efficient MOF-based Mixed Matrix Membranes for CO_2 Capture）がスタートした。16の参加企業と大学から構成される。 TOTALは2009年～2013年の４年間のEUのプロジェクト、MACADEMIAで、多孔性金属錯体による窒素/プロピレンの分離、PSAによるCO_2/硫化水素の分離を行った。
	産業化	◎	↗	BASFは販売の拠点を米国にしているが､多孔性金属錯体の製造は欧州としている。アルミと亜鉛の錯体を2ヶ所で製造する。また引き続き商品名Basoliteの名で試薬販売をしている。
中国	基礎研究	○	↗	ゼオライト、メソポーラスシリカ、多孔性金属錯体何れの研究も中国が発表論文数では世界でトップである。特にメソポーラスシリカ、多孔性材料は全体の3割以上を占める。しかし乍ら世界をリードする先駆的な研究では欧米日の後塵を拝している。
	応用研究・開発	△	→	メソポーラス材料では復旦大学のZhaoが精力的に応用研究を進めている。太陽電池、光触媒、触媒担体、センサ、リチウムイオン電池などへの展開を進めている。
	産業化	△	→	多孔性金属錯体はベンチャーの試薬メーカーが現れ、配位子、錯体の販売を開始した。
韓国	基礎研究	△	→	メソポーラス材料、メソポーラスカーボンは、KAIST のR. Ryooを中心に基礎から応用研究に到るまで開発が進活発にめられている。特にメソポーラス材料では、遺伝子導入試薬、分離、触媒、メソポーラスカーボンのテンプレート能などについて、メソポーラスカーボンは、触媒、水素貯蔵などについて研究がなされている。 多孔性金属錯体ではソウル国立大学のグループがCO_2分離、水素貯蔵を、KAIST、浦項工科大学のグループが分離、触媒の研究を行っている。
	応用研究・開発	△	→	韓国科学技術省によるプロジェクト「21th Frontier Hydrogen Energy R&D Center Program」のなかで、多孔性金属錯体による水素関連の応用開発が進められている。
	産業化	△	→	産業への応用は報じられていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) 資源エネルギー庁、石油産業における研究開発の現状と課題について (6/2014)から一般財団石油エネルギー技術センター「次世代石油エネルギー研究会」報告書
2) J. Yu, et al., Chem. Rev., 114, 7268 (2014)
3) M. Yaghi, et al., Science, 341, 1230444 (2013)
4) J. Čejka, et al., Nature Chem., 5, 628 (2013)
5) E. Mallouk, et al., J. Am. Chem. Soc. 135, 16276 (2013)
6) 向吉恵ら、ナノ学会第１１回大会(2013)
7) T. Uemura, et al., Chem. Materials, 25, 3772 (2013)
8) S. Horike, et al., J. Am. Chem. Soc. 135, 11345 (2013)
9) H. Kobayashi, et al., Nature Mater. 13, 802 (2014)
10) R. Matsuda, et al., Science, 343, 167 (2014)
11) S. Sivaniah, et al., Nat. Commun., DOI: 10.1038/ncomms5813, (2014)
12) Y. Ito, et al., Angew. Chem. Int. Ed., 53, 4822 (2014)
13) F. Kim, et al., Nat. Commun., DOI: 10.1038/ncomms6254, (2014)
14) 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」
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-3.html
15) JST-さきがけ「超空間制御と革新的機能創成」
http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/107space.html
16) CRDS-FY2009-SP-05 戦略プログラム「空間空隙制御材料の設計利用技術」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/SP/CRDS-FY2009-SP-05.pdf
17) CRDS-FY2009-WR-05 科学技術未来戦略ワークショップ「空間空隙制御・利用技術」報告書
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/WR/CRDS-FY2009-WR-05.pdf

３．５．３　分子技術

（１）研究開発領域の簡潔な説明

「分子技術」は、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、「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つの横断的技術概念で捉えなおして研究開発を推進する領域である。これは日本発の新しい研究開発コンセプトである。それぞれの技術概念は今後、それぞれの分子技術の研究進展に伴い、新しい独立した個別の研究領域を構成するが、６つの研究領域は互いに密接な関係を持ち続ける。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

環境・エネルギー、医療・健康などに関する社会的課題の解決に貢献し、持続性社会の実現に資するために分子科学の成果を活用するためには、課題解決に必要とされる機能をもった分子を創出し、それを自在に制御できることが望まれる。

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、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・物性を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。解決すべき多様な課題に対し、問題点を分子レベルまで掘り下げ、所望の機能を持つ分子を設計・合成・操作・制御・集積することで、革新的かつ精密な分子や分子集合体を創出できれば、効果的な課題解決が可能になるとともに、課題解決の技術が産業化された際には圧倒的な競争力の獲得につながる。一方、従前の化学は自然の神秘を解き明かすことに、営々と挑戦し続けてきた。健康・医療分野や環境・エネルギー分野に関わる重要課題解決のに向けて、制限された条件の下に最適・最善の解を求めるという工学の手法を化学の領域に取り入れるには、従前の自然の神秘を解き明かす化学から、課題追求型の化学へと、非常に大きなパラダイムシフトが要求される。分子技術はこうしたパラダイムシフトの実現のキーテクノロジーであるといえる。

［これまでの取組み］

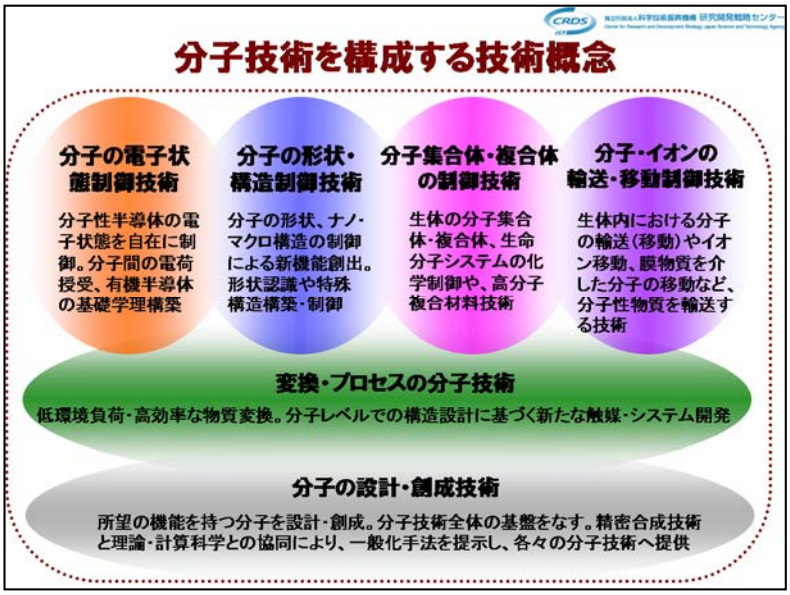
従来、様々な分野で分子の設計・合成が行われてきたが、普遍的な技術として分子技術が明確に意識されることはほとんどなかった。例えば、医薬、農薬、物質・材料などの研究開発において、最適・最善の化合物に到達するまで研究開発されることは稀で、一定の機能が得られた段階で商品開発のフェーズに移行するのが普通である。分子設計が比較的進んでいる医薬品開発ですら、薬効や副作用の点で最適、最善といえるような新規分子設計まで行うことは珍しい。次善の分子でも十分に利潤があげられてきたからである。しかし、今後、医薬品開発のプロセスは、急激な投資金額の激増により、先進国から開発途上国にゆるやかに移行することで、肌理の細かい開発が難しく、その結果、緻密な分子技術に至ることが一層難しくなっている。

新規分子の設計と合成に至らない段階で開発が進んでしまった場合には、採用された分子技術は未成熟で比較的模倣されやすい。また、特許対策も十分とは言えないので、市場での成功例が明らかになる段階で、開発途上国で，様々な後発品が上市されるようになる。オンリーワン分子の設計と合成を進めるためには、高い分子技術力が必要となるが、この基盤技術の育成に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、分子技術の重要性に対する認識が十分に浸透していないこと、および分子技術は多岐にわたる応用分野をもつことから、目に見える末端の結果は比較できるものの、その比較が分子技術自体の比較には必ずしもつながらないことから、他の研究領域と同様の国際的な比較を行うのは困難である面がある。

［今後必要となる研究課題］

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繋げる「形状・構造制御の分子技術」、分子レベルでの構造設計に基づく新たな触媒・システム開発に繋げる「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」の６つの横断的技術概念からなるものとして捉えることができる。しかし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から，今後さらに社会の要請課題にそって新しい研究課題が出現してゆくことが予想される。



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[2]。

1)「分子の設計・創成技術」
・機能から分子を創出するための理論創成とシミュレーション技術の開発
・分子構造の予測を可能にする分子デザイン手法の開拓
・機能設計・予測に基づく精密合成法の開発
・分子性物質の高純度精製法の開発

2)「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
・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

3)「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

4)「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

5)「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

6)「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

上記の他、JST-CREST「新機能創出を目指した分子技術の創出」領域のアドバイザーを中心に検討がおこなわれた「革新的分子技術リスト」として以下のような課題が挙げ

[2] CRDS 戦略イニシアティブ「分子技術」(CRDS-FY2009-SP-06)

られている[3]。

・革新的分子技術の例 –分子技術とその分野–

（※(P)記号は、未だ十分に分子技術の基礎が確立されていない新分野を指す）

【分子技術、触媒】

〈重合〉

・モノマー・オリゴマーを自在にかつ可逆的に高分子量化する技術

・ビニルハライドやジビニルハライドの立体選択的ラジカル重合触媒開発

・ポリオレフィン分岐構造の精密制御反応: PP をベースとするブロックコポリマーの製造: エンプラ/ポリオレフィンブロックコポリマーの製造

・ポリマーからモノマーへの完全分解触媒反応(P)

・シーケンスや分子量が厳密に制御された共役系共重合体の構築技術（触媒、C-H 活性化）

〈酸化〉

・官能基なしの CH 自在活性化:CH 活性化によるハロゲン原子の自在の位置選択的導入反応開発:単純アルキル基の位置特異的酸化反応（例えば、エタノールから 1 工程でエチレングリコールを合成、プロピレンから 1 工程で 1，3－プロパンジオールを合成する）:アルカンの触媒的官能基化反応:水酸化酵素 P450 の高活性化: ブタンからブタジエンの製造: シェールガスからオレフィン類の製造: エタン、プロパン等アルカンからポリオレフィンの製造(P)

・タンパク中の任意の位置（アミノ基、カルボキシル基）に様々な置換基を導入する。

・ベンゼンから直接フェノール製造（微生物、固体触媒）

〈C-C 合成〉

・二酸化炭素からハロゲン化ビニルへの合成系の開発 (P)

・ハロゲン化物や、ホウ素化合物を用いない炭素ー炭素カップリング反応、メタンから芳香族化合物、オレフィン類の製造

・アルコールを触媒的に活性化（ハロゲン化、スルホナート化を経ない）し、アルキル化やシリル化する。

〈還元〉

・重金属を用いない NO_X や CO_X の還元法(P)

・炭化水素を用いない水素製造法

・新規なアンモニア合成法：常温・定圧での触媒的窒素固定化反応(P)

・炭酸ガス固定化による発酵生産性向上

・水素と炭酸ガスからメタノール合成触媒

〈分解〉

・NO の直接分解（還元剤を使わない）: 様々な気体が共存する中で特定の気体(NO や SO）のみを選択的に捕捉し還元や酸化する原理の探求

・セルロースから直接エタノール製造

〈触媒〉

[3] CREST 革新的分子技術リスト http://mt.jst.go.jp/outline/list.html より引用

・セルフアセンブリーが能動的に働いて成り立つ触媒反応の創出
・汎用ラセミ化法(P)
・任意の原子クラスターを合成するための複核錯体分子

【マテリアル】

〈デバイス〉

・Si に匹敵する性能を有する Printable 有機材料からデバイスまで、シリコン化学を脱した新しい元素化学のデバイス(P)
・低分子でπ共役軸方向の電導を活かした電子デバイス
・単分子・単分子鎖トランジスタとロジック回路の構築技術
・劣化した機能分子を刺激による固相・液相の相転移等によって置換できる自己修復型機能デバイス創生の分子技術

〈膜〉

・有機単結晶薄膜の溶液からの成膜技術(P)
・人工的に制御された分子配列を持つ自己組織化膜
・分子デバイスのオーミック接触の革新
・欠陥を極小化（欠陥フリーならベスト）する薄膜界面制御技術
・圧倒的に薄く均一な導電、半導電、絶縁層を容易に形成する技術
・高分子有機 EL や高分子有機薄膜太陽電池等の半導体物理では理解できない現象の物性理論体系の構築に基づく分子技術

〈光〉

・光合成の原理を模倣した高効率（>50%）な太陽電池：大幅に変換効率を向上させた人工光合成
・超効率な有機太陽電池を目指した、一重項・三重項変換（分裂、融合）が高効率で可能な材料の設計技術：超高効率光電変換システムの分子論的解析と人工光合成系の設計
・大腸菌、枯草菌による光合成

〈ナノより上の階層分子制御〉

・分子からナノではなく、それよりも上の階層構造（実用領域）までの自在制御
・高効率熱電変換材料　ZT>4　の開発
・室温で電気抵抗ゼロの超伝導物質の設計　Tc>400K

〈自己修復〉

・熱・紫外線等で切断されても自己修復する分子；自己修復機能をもつやわらかい物質のデザイン

〈高分子、樹脂材料〉

・リングポリマーなどトポロジー的拘束のある超高分子の物性論の体系化に基づく分子技術による新たな機能発現
・電荷注入機能、電荷輸送機能、発光機能の有機 EL 機能を一つに融合した高分子の創生分子技術（例えば、クロスカップリングによるデンドリマー型高分子創生や有機触媒による手法等）
・非晶（ポリマー、溶液中）の分子構造解析、特に溶媒に溶けない高分子の構造解析

など
・低濃度水溶液から目的イオンを選択吸着、脱離できる分子技術(海洋資源濃縮)
・様々な気体が共存する中で特定の気体（NO や SO）のみを選択的に捕捉し還元や酸化する原理の探求

【医薬】
・老化メカニズムの更なる解明とアンチエイジング・再生技術
・人工アミノ酸（例えば含フッ素アミノ酸）を含むペプチドやタンパクの合成（人工アミノ酸に対応する mRNA, tRNA を用いる）
・組織（細胞）再生誘導化薬（例えば腎不全状態まで行った腎臓が再生し、腎機能を取り戻す)、医療材との融合でも可
・低分子触媒医薬(P)
・医薬品包摂、移動、細胞膜通過、放出を可能とするバクテリオファージのような分子ロボット設計(P)
・診断、計測への画期的化学、巨視的なケミカルバイオロジー

【計算科学】
・計算科学は様々な分野に対して幅広い寄与をすることが期待される。
・望む変換反応（多段階も含む）を手書き入力すれば、おすすめ反応剤、反応条件を文献つきで 10 件だすソフト(P)
・分子パッキング状態の計算による予想
・理論の裏打ちのある機能から最適分子構造を予測

【その他】
・多重の刺激（情報）を検出・判断し、その重要度から行うべきタクスの優先順位をきめ、機能する人口知能的刺激応答機能材料: 触感を再現する（温度、湿度、圧力等を同時にセンシング可能な）デバイス分子技術(医療用ロボット、パートナーロボットにおける人体との接触インターフェース)
・用途→機能→構造→反応というターゲットドリブン型の分子技術において、出口サイドからできるだけ川上に踏み込んだニーズの開示できる人材・仕組み（製薬、化学では既に進んでいるが、機械、電機、制御通信、システムの領域では不足）: 機能物質、材料の逆問題的設計・開発手法の開発
・上記の手段としての高速材料スクリーニング手法や機能予測データベースや計算解析手法の開発
・50 年で半減するリン元素の枯渇問題解決に資する化学イノベーション（農業化学）
・均一系（有機合成など）と不均一系（排ガス、FC 触媒、電池など）の相互理解と補完関係の構築

【2014 年 3 月追加】
・DNA やタンパクの高次構造、たとえば DNA の 3 次構造、タンパクのβシートなどを工業材料として使える分子骨格に置き換えて構築
・毎年、1 兆個のセンサが使われていく世の中を想定したプロジェクトで、以下の課題等への挑戦
  - 各種センサ：薄く、軽く、小型、高感度、超低消費電力で、大量に製造可能な

各種センサ、特にバイオ系のセンサ 。

- Energy Harvesting 素子/材料：大量のセンサネットワークに必須の、Energy Harvesting 。EH は、センサの役目と重なったら、なお好都合。世の中に充満している微少エネルギーを回収する素材、素子を、分子技術により、同じように、薄く、軽く、小型、高効率で、大量に製造可能な技術の創成。
- 二次電池：EH デバイスに向けての二次電池が必要。１）最低でも 10 年以上の寿命、２）10～20 万回以上のサイクルで、薄く、軽く、小型、高容量で、大量に製造可能な二次電池の開発。

（３）科学技術的・政策的課題

今後必要となる取り組みとして、将来を見据えたニーズと分子技術との間をシームレスに結びつける必要がある。社会的ニーズに沿って、現在の技術レベルでは達成できない「夢の目標」を掲げ、それぞれの研究テーマにおいて、従前の研究の延長とは一線を画した、まったく新規な研究プランを提案し、それを達成す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。これには、アカデミアと産業界の双方で分子技術の重要性を認識し、化学に対する姿勢を根本的に変えて行く必要がある。

すなわち、これらの課題を分子レベルで解決するためには、課題解決を目標とする分子技術の重要性を認識した上で、以前にも増して学際的な研究推進が必須であり、また、研究チーム間の連携や共同研究が求められる。多岐にわたる応用分野、専門分野で各々活躍している比較的接点の少ない研究者が「分子技術」という共通の土台に立って互いの研究・技術を見つめ直し、新たな展開を生み出せる。例えば、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すために、それを強く意識した分野貫通型チームが、意欲的かつ挑戦的な研究課題で、数年おきに、次々と生まれることが望ましく、今後は文部科学省と経済産業省の連携が求められる。

（４）注目動向

［新たな技術動向］

すでに、今日様々な部品や機器が、既存の半導体や金属から、分子素材である「ソフトマテリアル」に移行しつつある。これは低環境負荷、資源制約への対応、高い生体親和性といった人間社会全体の課題に対する解決策、そして低コスト化を「ソフトマテリアル」や、それを実現する分子技術が提供することを示唆している。すなわち、健康・医療分野と環境・エネルギー分野に関わる様々な革新的成果を創出するためには、個別応用課題の研究開発とは別に、多様な分野への展開が可能な分子技術を確固たる土台として築いておくことが必須であり、これによって一層異分野融合が加速され、真に有効なライフ・イノベーションおよびグリーンイノベーションが達成できる。

［注目すべきプロジェクト］

平成 24 年より JST で CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」、およびさきがけ「分子技術と新機能創出」が開始された。また、平成 26 年より JST 国際科学技術

共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）において日本－フランス共同研究課題の募集が開始された（日本側 JST、フランス側 ANR)。

（５）キーワード

ソフトマテリアル設計、医薬品設計、農薬設計、設計・創成の分子技術、形状・構造制御の分子技術、変換・プロセスの分子技術、電子状態制御の分子技術、集合体・複合体制御の分子技術、輸送・移動制御の分子技術

（６）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	◎	↗	分子技術に着目し、その重要性が社会的に認知されたのは、ここ数年のことである。しかし、その重要性が世界で初めて日本で明確に認知されたことは極めて重要なことであり、今後、すでに高いレベルの研究基盤を持つが、分子技術間の連携が一層進めば、我が国がこの分野を世界的に牽引すると考えられる。既に日仏の２国間国際共同研究プロジェクトが開始されている。
	応用研究・開発	◎	→	ナノテクノロジー、環境、エネルギー、ものづくり、ライフサイエンスなど、分子技術が鍵となる応用分野は多岐にわたる。我が国は、それぞれの分野での、末端技術では問題があっても、基盤となる分子技術の部分は高いレベルを維持している。
	産業化	○	→	上記のナノテクノロジー他いくつかの特定の分野で産業化が進んでいる。例えば、ナノテク材料分野では、非常に高いレベルにある。しかし、平均的には米国などに較べて、必ずしも十分な競争力がなく、韓国、中国などに追い上げられている。
米国	基礎研究	◎	↘	米国でも、ここ数年分子工学の重要性が認識され始めているが、バイオ、マテリアルなどの非常に応用末端の分野に研究が集中している。つまり、化学という側面より工学の面が正面にでているので、分子レベルまで掘り下げた設計・合成へ注目した研究は極端に少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究とは異なり、応用研究は非常に進んでいる。特に資金の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。
	産業化	◎	→	ベンチャーが牽引する部門は極めて迅速に諸課題に対応している。特にライフサイエンスの分野では積極的に次々と新しい投資部門に展開している。巨大な製薬会社が成功したベンチャーを買い上げることで投資の危険分散を行っている。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツでは、大学改革に成功し、分子科学基礎研究は高いレベルにあり、分子技術に於いても世界的にトップクラスである。一方、英国はライスサイエンス部門の分子技術は進んでいるが、これは米国に影響されていると思われる。フランスはフッ素化学などの限定的な分野では優れているが、一般には低調である。
	応用研究・開発	○	→	ドイツ、英国のライフサイエンス部門では、非常に優れているが、他は全般的には平均的レベルにある。
	産業化	○	→	一般にライフサイエンス部門は堅調であり、特に産業化を促進する制度的バックアップが優れている。しかし、特に分子技術という面からはすこし手薄い。
中国	基礎研究	○	↗	分子技術の面では、現時点では欧米を追う仕事が目立つ。しかし、ウミガメ政策以来、欧米で成功した研究者が多くの資金を持って次々と本国に招聘されており、彼らの活躍が目立つ。しかし、中国国内で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非常に限られているのが現状であるが、この状況は近年中に変わる可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	急速に成長している。特に多くの研究費が大学や研究所に流れている。

	産業化	○	↗	米国と似た制度の下でベンチャー企業が誕生しやすい体制を取っている。
韓国	基礎研究	△	→	日本よりは米国型の研究スタイルであり、欧米からの帰国者を優遇している。そ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の遅れ。しかし、最近、大学や政府研究機関で外国人研究者の雇用を打ち切る現象が見られる。
	応用研究・開発	○	→	萌芽的な応用研究が進んでおり、今後の発展が見込まれる。
	産業化	○	→	比較的ダイナミックに産業化を進めている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）http://molecularengineering.uchicago.edu/
2）http://provost.uchicago.edu/Pritzker%20Director%20of%20the%20Institute%20for%20Molecular%20Engineering.pdf
3）文部科学省（戦略目標）環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/24/02/attach/1316324.htm
4）CRDS-FY2009-SP-06 戦略イニシアティブ「分子技術」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/SP/CRDS-FY2009-SP-06.pdf
5）CRDS-FY2009-WR-07 科学技術未来戦略ワークショップ「分子技術」報告書
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/WR/CRDS-FY2009-WR-07.pdf
6）応用物理学会・JST 共同特別公開シンポジウム「分子技術、新ステージへの胎動」
http://www.jst.go.jp/crds/sympo/20100916/bunshi100916summary.pdf
7）CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」
http://mt.jst.go.jp/
8）CREST 革新的分子技術リスト
http://mt.jst.go.jp/outline/list.html
9）さきがけ「分子技術と新機能創出」
http://www.jst.go.jp/presto/moltech/
10）化学と工業「分子技術 貫通型研究領域誕生への挑戦 - 日本化学会」
http://www.chemistry.or.jp/opinion/doc/ronsetsu1310-1.pdf

３.５.４　バイオミメティクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

生物の構造と機能、さらには生態系に関する知見を、材料、デバイス、システムの設計･製造に系統的に活用するための研究開発領域である。生物の構成原理に学ぶことで、製造・使用時のエネルギー消費が少なく、持続可能性を意識したプロセス技術、材料、デバイス、システムの開発など、幅広い研究開発が対象となる。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

生物は進化の過程で、様々な試行錯誤や淘汰を経た結果、極めて理にかなった構造や機能を有するものが多い。例えば、昆虫の体表面や植物の葉表面に形成されるナノ・マイクロ構造は、機械的強度による内部器官の保護、保湿、超撥水性などの特徴的な機能を有しているが、その形成過程と機能発現機構は人工的に設計・製造されたものとは異なる原理に基づいている。また、生物は化石燃料や多量の希少元素を使わずに、常温・常圧にて再生可能エネルギーと再生可能資源を利用し、環境に負荷をかけずに自然と調和をしながら生存している。したがって、生物の構造・機能を解明・解析して得られる知識は、持続可能な社会に必要となる新たな技術体系を構築する上で重要な指針になると期待される。

［これまでの取組み］

生物の構造・機能に学ぶことは、材料科学からロボット工学に至るまで、ものづくりの規範のひとつとなってきた。今世紀になって、高性能の走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡ならびに走査プローブ顕微鏡が普及したことにより、これまで未開拓であった細胞内部や表面に形成される数百ナノメータから数マイクロメータの自己組織化構造とその機能が明らかにされるようになった。さらに、精密な合成・加工や自己組織化を含めた構造制御などのプロセス技術の大幅な進歩とも相まって、それらを模倣するナノテクノロジー・材料の開発が行われている。特に生物の表面構造の解明ならびに模倣を行う研究開発が盛んに行われており、古くは面ファスナー（マジックテープ、ベルクロ）の開発に始まり、ハスの葉を模倣した超撥水表面、超親水表面、低騒音新幹線パンタグラフ、新幹線車体、鮫肌水着、構造色繊維、ガの眼を模倣したモスアイフィルム、ゲッコーテープ、無痛注射器など、商業化まで展開された事例も見られる。

多岐にわたる科学技術分野に関して、画像データや専門用語について分野横断型のデータベースプラットフォームに関する研究が日本で先行して進められている。また、生物学および工学の画像をデータベース化する発想支援型のデータベースや分野専門用語を階層化するオントロジーの取り組みが行なわれている。

諸外国の取り組みについては、米国では 2008 年に全米アカデミーズが、科学技術政策の提言書においてバイオミメティクスを強力に推進すべき課題として取り上げた。欧州ではこれに先立ち英国において 1990 年代より「生物学から工学への体系的技術移転」として、バイオミメティックス研究が積極的に進められてきた。ドイツは政府主催のもと、産学連携および産業化を目指した本格的な国際見本市 “International Industrial

Convention on Biomimetics”を開催するなどバイオミメティクスの振興に積極的に取り組んでいるとともに、2012 年には国際標準化を提案し ISO TC266 が発足した。フランスでは 2013 年に、Centre Européen d’Excellence en Biomimétisme de Senlis（CEEBIOS）というバイオミメティクスの産学連携センターを設立している。

一方、我が国でも研究開発としては、平成 11 年度に日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業の生物模倣型材料開発として「バイオミメティック材料プロセシングの開発」(名古屋大学)が採択された。また文部科学省の 21 世紀 COE には、平成 14 年度工学分野における生物模倣型モノつくりとして「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」(名古屋大学)と平成 16 年度農学分野の生物資源の新しい利用として「昆虫科学が拓く未来型食科環境学の創生」(京都大学)に関する大学院教育プログラムがそれぞれ採択されている。また、平成 24 年度より科研費新学術領域研究として「生物多様性を規範とする革新的材料技術」が採択された。

情報プラットフォームの整備だけでなく、バイオミメティックスの国際標準化に関する技術委員会である ISO/TC266 にメンバー参加し、政策提案も視野に入れた活動を開始しており、今後、産業化の加速が予想される。

バイオミメティックスに関する国際学術誌としては、Elsevier 社より “Journal of Bionic Engineering”が 2004 年より、IOP publishing 社より、“Bioinspiration & Biomimetics”が 2006 年より、それぞれ刊行されている。またバイオミメティックス関連の論文は、材料、化学、バイオマテリアル、バイオメディカル等の学術誌に掲載されており、現在約 3,000 の論文が年に掲載され、その数は世界的に急速に増加している。このうち中国は、材料分野を中心にバイオミメティクス関連の論文数が著しい増加傾向にあり、近年では米国に次ぐ論文数となっている。また上述の “Journal of Bionic Engineering” のスポンサーになるなど、国際的な貢献も行うようになっており、その動向に注意する必要がある。

［今後必要となる取組み］

バイオミメティクスをさらに深化させて、次世代の技術体系の一部として組み込んでいくには、構造と機能の相関、構造形成の原理を系統的に整理し、人間が工学的に設計・製造したものとは異なる原理の解明を飛躍的に進展させる必要がある。このためには、観察･分析･解析技術をより高度化した上で、生物学、農学、材料科学、機械工学、電子工学、環境科学、航空工学、医学、歯学、自然史学などの幅広い分野との連携・融合が必要である。

また膨大な生物学情報から工学的に有用な知識に“技術移転”するためには、オントロジーや画像検索技術により発想支援を可能とする情報技術も必要となる。生物模倣の基盤は生物多様性にあることを認識し、膨大な生物学データから工学的発想を導きだすための基盤を整備する必要がある。科研費の新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」では、生物学データベースと材料データベースを統合化した多分野統合化データベースの構築が進められつつある。

（３）科学技術的・政策的課題

欧米におけるバイオミメティックスでは、分類学、形態学といった生物学分野が先導的役割を果たしてきたものの、ロボティクス、機械工学、航空工学、電子工学、情報工学、医学、歯学、農学など幅広い分野でも研究が進展してきた。電子顕微鏡写真なども含むデータベースを基に、それらの分野の研究者と材料・デバイスの研究者との連携や産学連携が積極的に進められている。

生物を工学的な視点から理解するためには、生物学を主とする理学と材料科学を中心とした工学の連携融合が不可欠である。しかし、これまで国内では両者が議論する場が少なく、研究を発展させる上で障害となっていた。近年ようやく新学術領域研究や国際会議等を通して、生物学、自然史学などの研究者と材料科学、機械学、環境科学、医学などの研究者との連携が始まったが、産学連携や産学官連携については未だ不十分な状況にある。今後、バイオミメティック関連の拠点形成などを通じて、バイオミメティックス自体の研究を促進させるとともに、将来を担う人材の育成にも注力する必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

今世紀になって、ロータス効果やゲッコーテープなどの表面ナノ・マイクロ構造制御を特徴とする材料開発がバイオミメティクス研究の新しい潮流として注目されている。

ナノ・マイクロ構造制御では、ナノとミクロ・マクロとをつなぐ技術が重要であり、3D プリント技術の飛躍的な発展に伴い材料の高次構造化が図られている。海洋生物に学ぶ防汚材料は、流体抵抗低減効果もあることから船舶のみならず航空機や自動車への展開が見られる。さらに、各種植物や昆虫、さらに菌類のさまざまな機能に着目した技術が発展する。

国内の注目研究動向としては、生物の電子顕微鏡観察について従来用いられてきた凍結乾燥や組織固定などの特有の前処理に対し、生きたままの生物の構造を観察するナノスーツ法が開発され、今後、バイオミメティクスに関する生体研究に加えて、医薬･医療分野での革新的な発展につながる可能性がある。

［注目すべきプロジェクト］

国際光工学会（SPIE）や Material Research Society（MRS）など欧米を中心とする国際会議で、バイオミメティクスに関するセッションが常設されている。米国では Bioinspired Materials に関するゴードン会議が 2012 年、2014 年と開催されている。また、Biomimicry 3.8 Institute（米国 NPO）、サンディエゴ動物園、BioTRIZ 社（英国）、BIOKON International （ドイツ NPO、ドイツ政府支援を受けたバイオミメティクス専門家のネットワーク）などの活動も注目される。

欧州では、EU の 7th Framework Programme（FP7、2007～2013 年）において “Bio-inspired Hierarchical Super Nanomaterials”、“Biomimetic Approaches of Natural Functional Surfaces with hierarchical micro & nano structure and the extreme Wettability” などバイオミメティクス関連のプロジェクトが多数採択されており、FP7 の後継フレームワークプログラムである Horizon 2020 での展開が注目される。

ドイツの標準化機関であるドイツ規格協会（DIN）から国際標準化機構（ISO）に対し、

バイオミメティクスに関する技術委員会（TC）の設立提案が行われ、2012 年 10 月から「ISO/TC266 Biomimetics」として活動が開始されている。事務局は DIN が担当し、我が国を含む 24 カ国の参画のもと、WG1 “Terminology, concepts and methodology”、WG2 “Biomimetic materials, structures and components”、WG3 “Biomimetic structural optimization”の審議が始まった。我が国では 2012 年に高分子学会の研究会として発足したバイオミメティクス研究会が国内審議機関となり、2013 年には WG4 “Biomimetics –The knowledge infrastructure for biomimetics”の幹事国になった。

一方、日本、韓国、中国を初めとしたアジアにおいても、バイオミメティックスに関連した国際会議や学術集会が定期的に開催されるようになっており、バイオミメティックスの学術的な注目度は全世界的に増え続けている。国内では、平成 24 年度から文部科学省科学研究費新学術領域において、「生物多様性を規範とする革新的材料技術（生物規範工学)」が開始されている。細胞内部や表面に見られる数百ナノメータから数マイクロメータの構造を「サブセルラー・サイズ構造」と位置づけ、この構造のもつ機能の解明を通じて、新たな技術体系の確立を目指し、データベースの構築も行っている。

（５）キーワード

生体模倣材料、自己組織化、生物多様性、機能形態学、バイオニクス

（６）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	◎	↗	自己組織化材料や表面ナノテクノロジー、ソフトマテリアル等の材料技術は世界的に高く評価されており、Biomimetic Materials Processingの国際会議は14回、Engineering Neo-Biomimeticsの国際会議も5回開催された。2012年に高分子学会にバイオミメティックス研究会が設けられて、バイオミメティクスの国際標準化（TC266）に対応する国内審議機関として活動している。2012年に文部科学省科学研究費新学術領域として「生物多様性を規範とする革新的材料技術(生物規範工学)」がスタートし、異分野連携に基づく横断的研究組織の形成による基礎研究加速が期待されている。
	応用研究・開発	○	↗	材料分野における応用・開発トレンドは、撥水・親水材料や反射防止光学材料などを中心に建材、繊維、紙、エレクトロニクスなど多岐にわたる。生物多様性に基づく豊富な機能の理解は不十分である。一部企業は関心を示し、異業種間研究会の開催などがされているが様子見的な状況である。
	産業化	○	↗	構造色繊維モルフォテックス(帝人)、防汚船底塗料(日本ペイントマリン)、モスアイフィルム(三菱レイヨン、大日本印刷)、ゲッコーテープ(日東電工)、セルフクリーニング建材(LIXIL)、超はっ水ナノ分子ペーパー(竹田印刷)、ヨーグルトが付着しないふた(森永乳業・東洋アルミ)など､材料分野での商品開発が進んだ｡生物模倣の家電製品(シャープ)、痛くない注射針(ライトニックス)、低騒音パンタグラフや車体デザイン、自動車の自動運行システムなどの開発も実用化した。ロボティックスを中心とした機械系、システム系の開発も進みつつあり、各種産業分野での発展が期待される。特定非営利活動法人バイオミメティクス推進協議会が発足した。

米国	基礎研究	◎	↗	環境・エネルギー問題の解決策としての視点に立つ研究、ホームランドセキュリティーや軍事研究をニーズとする研究、古くからあるBiomimetic Chemistryの研究、バイオマテリアルに直結する研究などがある。前者はbiomimicryという言葉を生み出し、中者はロボットやセンサ技術と材料技術の融合が図られつつあり、後者はDNA origamiを象徴とするself-assembly nanotechnologyを中心とするbio-inspired materialsの再展開である。生ハーバード大学、ワシントン大学、パデュー大学、ノースウエスタン大学、ダートマス大学、スタンフォード大学、南カリフォルニア大学、ローレンスバークレー研究所など多くの機関が基礎研究を行っている。Bioinspired Materialsに関するゴードン会議も開かれている。
	応用研究・開発	◎	↗	Biomimicryの提唱者であるJ.Benyusを中心にしたBiomimicry Groupがコンサルティングや教育啓蒙活動を積極的に展開してきた。これに関連し、Biomimicry San Diedoもバイオミメティックスに関する教育およびコンサルティングを展開している。2013年にはApplied Biomimeticという会社がデンマークと米国で新たに設立されるなど、バイオミメティクスの概念に基づく応用研究・開発を目的とする企業活動が行われている。2010年11月には“Global Bimimicry Reports -An Economic Game Changer-”という経済的影響に関する報告書を刊行し、生物模倣技術の大きな経済効果について記述している。2012年以降、ハーバードビジネススクールとも共同して活動を行うなど、今後の展開に注目する必要がある。
	産業化	◎	↗	最近では、イガイに真似た水中接着剤、ヤモリテープを持つ垂直歩行ロボット、鮫肌模倣の防汚材料、くじらのひれ模倣の風力発電翼、自己修復力を増した絆創膏など多岐の分野において活発な商品開発がなされている。
欧州	基礎研究	◎	↗	Biomimetic Chemistryの提唱とその研究、Lotus Effect（ボン大学の商標）の超はっ水加工に関する研究、またゲッコーテープ、モスアイ構造、構造色、鮫肌リブレットなど、英国、ドイツ、フランスなど欧州では現在も多くの基礎研究がなされている。欧州では、ナノ材料から機械、航空機まで幅広く、政策的な異分野連携を強く推進している。FP7等のEU全体の大型プロジェクトでは、Biomimetic Bioartificial Liver (Re-Liver (Bottom-up Reconstitution of a)が2012年より行われており、PF7の後継のHorizon2020でも関連プロジェクトが見込まれている。
	応用研究・開発	◎	↗	英国のBioTRIZ、スウェーデンのSWEDISH BIOMIMETICS 3000など、生物模倣技術のコンサルティングやファンディングなど、基礎研究から産業化への橋渡しが着実におこなわれている。ドイツが国内コンソーシアムであったBIOKON(Bionics Competence Network)をBIOKON Internationalにするなど、欧州では一歩先んじた感がある。ただし、2013年にフランスがCEEBIOSというバイオミメティクスの産学連携センターを設立した上、Biomimicry Europeに参画する国数も増加している現状から、欧州全体での切磋琢磨が暫く続く状況とも言える。また、欧州宇宙機関(ESA)も、先進概念チームを設けてバイオセンサなどバイオミメティックス関連の応用研究を進めている。
	産業化	◎	↗	2007年に発刊した“National Strategy on Biological Diversity”においてBMUは“Biological diversity and its innovation potential”という項目でバイオミメティクスの産業化に言及していた。2008年5月にボンで開催された国連生物多様性条約第9回締約国会議(COP9)において、ドイツ連邦環境･自然保護・原子炉安全省(BMU)は、ビジネス・民間部門による生物多様性保全への貢献を目的として“Biodiversity in Good Company”を設立した。さらに、2011年3月にBIOKON Internationalはドイツ政府支援のもと、世界最初の“International Industrial Convention on Biomimetics”を開催した。また、ドイツ規格協会(DIN)はドイツ技術者協会(VDI)との共催で国際標準化活動へ向けた事前イベント”ISO BIONIK”を開催した。DINからの提案で、2012年に国際標準化機構(ISO)のバイオミメティクスに関する技術委員会ISO/TC266 Biomimeticsが発足し、欧州を中心に活動を進めている。このように欧州はバイオミメティックス分野での産業化において国際標準化を先導している。トンボの羽に着想した飛行ロボット”BioniCopter”やサメの肌を模倣した機体塗料など先駆的な産業化を含め、基礎研究の項に記載したように、各種製品が開発、販売されている。 メルセデスベンツやルノー、エアバス社やルフトハンザなどの大企業がバイオミメティクス・デザインを積極的に取り入れつつあり、関心度は年年高まっている。

中国	基礎研究	◎	↗	撥水材料に関しては中国科学院の江雷教授のグループが論文数では世界トップになりつつある。材料系と機械系の研究潮流が交わること無く独自展開している感があったが、英国との連携が切っ掛けになって生物学の寄与が見られるようになった。吉林大学はJournal of Bionic Engineeringのスポンサーになり、バイオミメティックス分野に力を入れている。この国際誌を刊行するIntenationa Society of Bionic Engineeringは中国を中心とするメンバーから構成されている。ロボットなど機械分野から材料開発まで、広い分野の基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	上海を中心にロボティクスの研究が活発である。吉林大学は英国のNottingam大学とUK-China biomimetics research initiativeを締結している。中国科学院化学研究所、吉林大学などを中心に、応用研究・開発も積極的に行われている。Intenationa Society of Bionic Engineeringは、2013年にThe 4th International Conference on Bionic Engineering(ICBE 2013)を開催し、基礎研究に加えて応用研究が発表された。また、吉林大学がスポンサーのJournal of Bionic EngineeringはElsevierと共同で、2011年にInternational Bionic Engineering Conference 2011を米国ボストンで開催し、バイオミメティック分野での応用研究および企業における研究開発の重要性を強調している。
	産業化	○	↗	撥水加工技術は衣料や印刷製版へ応用されている。撥水加工ネクタイ、光触媒商品などは発売されているが、バイオミメティックス関連の産業化はまだ不十分である。国際標準化ではオブザーバとして登録されている。
韓国	基礎研究	◎	↗	材料、ロボティクス、センサ、メディカルなど幅広いテーマを扱うInternational Symposium on Nature-inspired Technology（ISNIT）を2006年以来定期的に開催している。ソウル大学、KAIST、浦項工科大学、韓国機械・材料研究所(KIMM)を中心にヤモリ模倣の接着、ハスの歯模倣のはっ水、昆虫模倣のナノセンサなどの基礎研究が進んでいる。ドイツとのコネクションも強く、最近は米国で学位をとった若手教授が水中接剤やオプティクスの分野などで活躍している。生物学の寄与はほとんど無い。
	応用研究・開発	○	↗	KISTやKIMM、ソウル大学など複数の研究組織がタイアップして基礎から応用に向けての活動を積極的に展開しているように思われる。
	産業化	○	↗	10回目を向かえた2012年のNANO KOREAでもバイオミメティクス関連の発表が増えてきており、化粧品、接着剤、センサ、ロボットなどに企業の関心は高くなっているが、まだ産業化は進んでいない。ISOのTC266のメンバーに参加するなど積極的な動きが見える。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1) Lepora, N.F.; Verschure, P.; Prescott, T.J. The State of the Art in Biomimetics. 2013, Bioinspir. Biomim. 8, 013001, doi:10.1088/1748-3182/8/1/013001
2) 高井治.「生物に学ぶ材料開発」特集号に寄せて. 2012, 材料の科学と工学 49(4), p.147-166.
3) 香西博明.「自然から学ぶものづくり」特集号に寄せて. 2013, 材料の科学と工学 50(1), p.1-25.
4) 下村正嗣. 生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流. 2010, 科学技術動向 110(5), p.9-25.

5) 下村正嗣ほか. 【特集】バイオミメティクスと材料開発. 2013, 工業材料 61(11), p.17-68 (2013)
6) 科学研究費補助金新学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」 http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/
7) 阿多誠文. 国際標準化 ISO/TC266 Biomimetics が発足. 2012, PEN News Letter 3(1), p.3-5.
8) 李仁植. 韓国におけるバイオミメティクス. 2011, PEN News Letter 2(6), p.21-23.
9) 学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」. http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html
10) BIOKON International. http://www.biokon-international.com/index.html
11) Biodiversity in Good Company. http://www.business-and-biodiversity.de/jp/the-initiative.htm
12) BioTRIZ. http://www.biotriz.com/
13) Interdisciplinary collaboration for biomimetic bioartificial liver design. http://www.reliver.eu/
14) The Biologically Inspired Materials Institute （BIMat）. http://www.bimat.org/index.cfm
15) Gordon Research Conferences. Conference Program. Bioinspired Materials. Newry, 2014-06-22/27. http://www.grc.org/programs.aspx?year=2012&program=bioinsp
16) Biomimicry Group. http://biomimicry.net/

17) San Diego Zoo Global.
http://www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/
18) International Symposium on Biomimetic Materials Processing (BMMP)
http://bmmp.numse.nagoya-u.ac.jp/
19) Bioinspiration & Biomimetics
http://iopscience.iop.org/1748-3190/
20) Journal of Bionic Engineering
http://www.journals.elsevier.com/journal-of-bionic-engineering/
21) International Society of Bionic Engineering
http://www.isbe-online.org/
22) 公益社団法人高分子学会バイオミメティックス研究会
http://main.spsj.or.jp/c12/gyoji/biomimetics.php
23) ISO/TC266 国内審議委員会ニューズレター Issue 1 (2012)
http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL1.pdf
24) ISO/TC266 国内審議委員会ニューズレター Issue 2 (2013)
http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL2.pdf
25) ISO/TC266 国内審議委員会ニューズレター Issue 3 (2014)
http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL3.pdf
26) International Industrial Convention on Biomimetics. Berlin, 2011-03-16/17.
http://www.biomimetics-convention.com/
27) BIOKON
http://www.biokon.de/
28) Dept. of Biomaterials and Biomimetics, New York University College of Dentistry (NYUCD)
http://www.nyu.edu/gsas/program/biomaterials/index.htm
29) Biomimicry Institute
http://biomimicry.org/
30) Biomimicry 3.8
http://biomimicry.net/
31) Center for Bioinspiration, San Diego Zoo Global
http://bioinspiration.sandiegozoo.org/
32) Fermanian Business & Economic Institute. Global Bimimicry Reports -An Economic Game Changer-. 2010.
http://bioinspiration.sandiegozoo.org/sites/default/files/BiomimicryEconomicImpactStudy.pdf
33) Biomimicry San Diego
http://biomimicrysandiego.org/
34) Applied Biomimetic
http://www.appliedbiomimetic.com/

35) EU Seventh Framework Programme (FP7)
http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
36) Center for Bio-Inspires Technology, Imperial College London
http://www3.imperial.ac.uk/bioinspiredtechnology
37) Festo. BionicOpter ― Inspired by dragonfly flight
http://www.festo.com/cms/en_corp/13165.htm
38) Lufthansa Technik. Like a shark in the water
http://www.lufthansa-technik.com/en/multifunctional-coating
39) 2013 International Symposium on Nature-inspired Technology (ISNIT 2013), Gangwon-do, 2013-01-06/09.
http://www.isnit.org/main/

３.５.５　分子ロボティクス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

プログラム可能な分子の自己組織化によって、原子分解能をもつ人工物を作り上げることを目的とした研究開発領域である。外界からの信号を受け取る「感覚」と、受け取った信号を判断する「知能」を備え、自律的に動作する人工物を分子レベルの精度で構築できれば、生体機能を人工的に再構成できるだけでなく、分子レベルの自己修復、自己改変といったことが可能となり、医療、食料、エネルギーをはじめ、さまざまな分野への波及効果が期待される。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

近年、分子合成技術の進歩により、新規かつ高度な機能をもつ分子デバイス・材料が続々とつくられ、さまざまな産業に応用されている。また、ヒトゲノム配列解析プロジェクト以降、核酸、タンパク質、脂質、糖などさまざまな生体分子の構成および構造が解明され、これらの情報を活用した生体分子のエンジニアリングも可能になってきている。しかし、これらの新しい分子デバイスおよび材料を組み合わせて「分子システム」を構成することはいまだに難しい問題である。なぜならそのような分子システムでは、多種類の化学反応が同じ時空間を占め、相互に密接に関連している中で、望みの反応だけを起こさなければならないからである。

分子ロボティクスでは、そのような分子システムとして、感覚と知能を備えた分子システム、すなわち「分子ロボット」を想定し、それを構築するための方法論の創成を目的とする。後述の DNA ナノテクノロジーなどを基盤技術として、様々な機能を実現する汎用的な分子部品を開発するとともに、分子部品のインターフェースを統一することにより、より高次の機能を発現し、様々な分野に応用可能な分子ロボットの構築を目指している。

複雑な分子システムを自在に構築する技術は、学術的に極めて重要な研究対象であると同時に、医療、環境、食糧等、我々人類が直面している諸問題を解決するためのキーテクノロジーになりうるものである。

［これまでの取組み］

分子ロボティクスの技術的系譜は、1994 年に発表された DNA コンピューティングおよびその後継である分子プログラミングおよび DNA ナノ技術に源流を持つ。

DNA コンピューティングは多数の DNA 配列断片を用いて DNA ハイブリダイゼーションを用いて相補配列を検索すれば、分子の数だけの超並列処理が可能となり、原理的には通常の電子計算機の計算能力を凌駕できることを示した。その後、日本では文部科学省科学研究費特定領域研究の「分子プログラミング（研究代表萩谷昌己、2002 年度-2007 年度）」、米国では NSF の「The Molecular Programming Project (E. Winfree ら、2008 年度-2012 年度)」などにおいて研究が進められ、DNA 論理ゲートなど新しい計算原理に基づくプログラミング技術について、生化学者と計算科学研究者による共同研究が進められた。

DNA ナノテクノロジーは 1980 年代に M. Caruthers によって開発されたオリゴ核酸合成技術から始まった。1984 年に、N. Seeman は、人工的に合成した DNA でナノ構造をつくり、DNA 結合性タンパク質の構造解析にこれを応用するという着想を得た。その後、小規模なナノ構造から DNA タイルなどの大規模で複雑なナノ構造が作られるようになった。さらに、2006 年に P. Rothemund が DNA Origami を発表したことから DNA の自己組織化によるナノ構造生成技術の研究が大きく発展した。DNA Origami 設計ソフトウェアも開発され、様々な 2 次元構造やフタ付の箱などの 3 次元構造を比較的簡単に作ることが可能になっている。近年では、可動部分を持つ DNA 配列や光応答性の分子などを組み合わせることにより、センサ機能やチャネル機能を持つ DNA ナノ構造の設計が可能となっている。また、DNA 以外の生体分子（RNA-タンパク質など）を用いたナノ構造形成も試みられている。

なお、2014 年 6 月に米国化学学会は The Accounts of Chemical Research 誌において DNA ナノ構造特集を刊行した [2)]。掲載された報文の内訳は、米国が 11 報、EU が 9 報（ドイツ 3 報、イスラエル 3 報、デンマーク 2 報、フランス 1 報）、日本が 4 報、中国が 4 報、インドが 1 報であった。分子ロボティクス関連技術の国際的状況をある程度反映しているとみることができる。

［今後必要となる取組み］

分子ロボティクスを実用化するために必要な取り組みとして、分子ロボティクスの多細胞化・リアルタイム性の実現など分子ロボティクスの高度化と応用分野の開拓が急務である。

・分子ロボティクスの高度化

分子ロボティクスの研究は、まだ、端緒についたばかりであり、最終目標となる「感覚と知能を備えた分子システム」の実現に向けて越えねばならないハードルがいくつもあるが、生命が単細胞生物から多細胞生物へと進化したように、分子ロボット進化シナリオにおいても、多細胞化は必須である。特に高度なシステムを実現するためには、非対称性階層構造の実現が不可欠である。すなわち、単細胞型分子ロボットがいくつかのヘテロな機能をもつものに分化し、さらにそれらが自律的に集合して高度な機能をもつ多細胞型分子ロボットを形成するしくみを創り出すことが必要になる。

さらに、分子ロボティクスを新産業に結び付けるためには、リアルタイム性の実現が不可欠である。高等生物の神経細胞は、環境に対するすばやい応答性を実現するために電気信号を活用している。分子ロボットに電気信号を伝達する電子部品や電子回路を融合し、化学的相互作用に基づく分子ロボットと既存の電子機械式ロボットの両方の性質を兼ね備えたハイブリッドシステムの構築も視野に入れた研究開発も必要となる。

・応用分野の開拓

「感覚と知能を備えた分子ロボット」は、化学、情報、生命に関連する先端テクノロジー群が、いずれひとつの大きなテクノロジーに収斂してゆくという大きな構想に基づいている。しかし、応用の立場からは部分的な機能だけでも十分役立つ分子ロボットが

考えられる。分子ロボットのための基盤技術開発と応用開発は卵と鶏のような関係であり、分子ロボットの研究で得られた知見や経験はただちに応用へ展開していくことが望ましい。特に医学薬学分野においては基礎研究から実用化まで膨大な労力と期間を有するため、早急なプロトタイプの実現と基本特許の取得を優先すべきである。たとえば、DNA ナノ構造やリポソームはそれ自体がセンサやアクチュエータとしても機能しうる。このような多機能性 DNA ナノ構造や多機能性リポソームについては、それ自体の応用可能性についても早急に検討し、分子ロボティクスのコンセプトの有用性をアピールしなければならない。

（３）科学技術的・政策的課題

分子ロボティクスは日本がコンセプトの提唱にはじまり、研究としての先鞭をつけた研究領域であるが、今後、研究の重要性が認識されるにつれ、研究者の流動性が高い欧米や、米国において活躍している中国系若手研究者を積極的にリクルートしている中国を中心に研究開発が活発化するものと予想される。この中で日本の優位性を確保していくためには、人材育成、共用の研究インフラの整備、知識・技術・ノウハウの集積・交換、知的財産の取得、産学連携など戦略的に進めていく必要がある。

分子ロボティクスに関わる研究分野は、化学、生化学、生物物理、制御工学、計算科学と多岐にわたることから、一人の研究者がすべての分野に精通することは不可能であり、異分野の背景知識を持つ研究者が共同作業により目標を達成する仕組みとして、研究コミュニティを束ねる中核的な研究拠点の形成を早い段階で具体化する必要がある。研究拠点では、研究インフラを整備し、常勤および非常勤研究員の雇用、国内外からの客員研究員の招聘を行い、研究開発を加速するとともに、長短期の学生指導を進めることで人材育成にあたる。

分子ロボティクスは、現状コンセプトの実証を目指すフェーズにあるが、品質および生産コストを含めた生産技術の確立など産業化に必要な技術開発も視野に入れておく必要がある。上述の研究開発拠点は、分子ロボットアーキテクチャの策定、基本部品ライブラリの整備、自動設計システムの開発、核酸合成技術のスケールアップ等にも将来的に対応できる組織である必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

DNA ナノ技術を中心に基礎的検討から応用を目指した技術開発まで、以下のように様々な展開が行われている。

- 空間的分子計算技術：反応拡散系によるパターン生成の分子実装など、DNA 計算デバイスを空間的に分布させて機能を発現させる研究が活発化している。
- DNA Origami をもちいた超高分解能光学計測：蛍光標識の 3 次元配置と画像処理技術の組み合わせによる新しいタイプのバイオマーカーの開発が盛んになってきている。
- DNA ロジックゲートの大規模化：簡単なニューラルネットワークなど、数百ゲート規模の回路を実装できるレベルに達している。

- DNA ブリック技術：任意の 3 次元 DNA ナノ構造を既存のパーツライブラリの組み合わせだけて作る技術が開発されている。
- DNA Origami を用いた一分子計測技術：DNA Origami をプラットフォームにした各種の生体分子の機能や力学特性の計測が行われている。
- DNA デバイスの生体内利用：DNA 論理素子による遺伝子発現計測、DNA ナノ構造によるドラッグキャリアなどの研究が継続的に蓄積されており、応用へ突破口が探られている。
- 大規模な DNA ナノ構造・デバイスシミュレーション技術：DNA Origami の形成過程やブランチマイグレーションなど重要な反応がシミュレーション可能になりつつある。

［注目すべきプロジェクト］

文部科学省科研費新学術領域研究「分子ロボティクス：感覚と知能を備えた分子ロボットの創生（萩谷昌己領域代表、2012 年度-2016 年度）」が発足し、分子プログラミング技術および DNA ナノ構造技術に加え、光応答性 DNA 素子、細胞サイズの巨大リポソーム構築技術、分子モータ技術、機能性高分子ゲル技術などを導入することにより、感覚と知能を備えたアメーバ型分子ロボットおよびスライム型分子ロボットの創出を目指している。現在、化学、生物物理、情報制御系を中心に、50 名を超える研究者が参画し、分子ロボティクスの研究開発が精力的に推進されている [3)]。

米国では、The Molecular Programing Project の後継プロジェクトとして、NSF の研究プロジェクト「Molecular Programming Architectures, Abstractions, Algorithms, and Applications(Lead PI、E. Winfree、2013-2017)」が発足しており、分子プログラミングと DNA ナノ構造を中心とした研究開発が進められている。

研究開発プロジェクトではないが、ハーバード大学の Wyss Institute が主催する BIOMOD（International Bio-molecular Design Competition）は、若手育成の試みとして注目に値する。BIOMOD は 2011 年から毎年開催されている国際競技会で、学部生がチームを構成して生体分子をナノスケールで制御するための技術を習得し，その成果を競うものである。BIOMOD 開催に先立ち BIOMOD 日本大会も開催されている。2014 年日本大会には中国の天津大学も参加している。このような試みは、分子ロボティクスのような学際領域において高い教育効果がある。

（５）キーワード

リポソーム、DNA Origami、DNA 論理素子

（６）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	◎	↗	科研費特定領域「分子プログラミング」(2002年度～2006年度)に参加した研究者を中心に、計測自動制御学会システム情報部門の調査研究会として「分子ロボティクス研究会（主査村田智）」が発足している。2012年度より科学研究費新学術領域「分子ロボティクス：感覚と知能を備えた分子ロボットの創生」が始動し、世界的にも注目を集めている。
	応用研究・開発	×	→	—
	産業化	×	→	—
米国	基礎研究	◎	↗	DNAナノ技術の研究において20年以上の歴史と新コンセプトを次々に生み出す豊富な人的資源を持つ。2008年にはNSFの:Expeditions in ComputingにMolecular Programming Project (2008-2013)が採択された。DNAやRNAを用いた分子コンピュータの開発を目的として、DNAナノテク、制御、ロボティクスの研究者が結集した。日本で分子ロボティクスの研究プロジェクトが始動したことを受け、2013年10月より、後継プロジェクトが発足している。
	応用研究・開発	○	↗	ハーバード大のWyss Instituteにおいて、ベンチャーを起こすにはリスクが大きい研究テーマの一つとしてDNAナノ構造（基本特許取得済み）を中心とした研究が進められている。ハーバード大学を中心にボストン近郊の病院、大学が地域コンソーシアムを設立し、製薬企業およびITベンチャーとも産学連携を進めている。
	産業化	×	→	—
欧州	基礎研究	○	↗	新材料および新デバイス開発が多く、システム化の研究はあまり始まっていない。
	応用研究・開発	△	→	DNAナノ技術の応用研究を目的として、2007年にCenter for DNA Nanotechnology がデンマークのAarhus大学に政府の支援でCOEとして設立されている。
	産業化	×	→	—
中国	基礎研究	△	↗	現状ではナノ構造およびナノデバイス関連の研究が多い。米国などから中国系のDNAナノ構造の研究者を積極的に国内に呼び戻している。現状ではまだ研究室単位の研究体制であるが、Wyss研究所からも関連研究者が帰国しており、今後急速に研究体制を整えることが予想される。
	応用研究・開発	×	→	—
	産業化	×	→	—
韓国	基礎研究	×	→	サムソンの研究所にバイオナノ構造の研究者がいる程度であり、目立った動きはみられない。
	応用研究・開発	×	→	—
	産業化	×	→	—

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）Ingber, Donald E. The Wyss Institute at Harvard University. IEEE PULSE July/August 2011, p.43-46
2）Nucleic Acid Nanotechnology special issue. 2014, Acc. Chem. Res. 47(6), p.1643−1922.
3）分子ロボティクス. 感覚と知能を備えた分子ロボットの創製 新学術領域「分子ロボティクス」.
http://www.molecular-robotics.org/
4）California Institute of Technology. Molecular Programming Project.
http://molecular-programming.org/
5）Wyss Institute at Harvard University.
http://biomod.net
6）Aarhus University. Centere for DNA Nanotechnology
http://cdna.au.dk/

３．５．６　元素戦略・希少元素代替技術

（１）研究開発領域の簡潔な説明

レアメタル・レアアースなどの希少元素に依存することなく、比較的豊富に存在する元素や有機材料などを用いて、目的の機能を備えた材料を創出する研究領域である。

物質中の元素機能の理論的解明から、新機能の創出、新材料の創製、特性評価等の諸課題がある。多様な元素の特性に着目し、「電子状態」「原子配列」「分子構造」「欠陥配置」などの微視的な観点から目的機能を如何に発現させるかを検討し、計測技術や計算科学も活用して構造・機能・反応をデザインする。資源の有効活用の観点から、希少元素を循環的に利用するシステムの確立に向けた技術開発や規制戦略も重要となる。天然資源に乏しいわが国が世界に先駆けて開始した研究施策の代表例でもある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

スマートフォンやハイブリッド自動車を始めとした我々の日常生活を支え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。これら希少元素はもともとの存在量が少ない上に年々需要が増加傾向にあり、さらには産出国が偏在している。このため希少元素を用いた製品開発を行う各国はそれぞれの実情に合わせて、世界的な供給量不安定化や価格沸騰を含めた資源問題に対応するための戦略が求められるようになった。

この問題は、資源を持たない産業立国である我が国にとって特に切実であり、1980 年代には少生産量で市場的に不安定な特殊金属のうち、日本の産業に欠かせないという政策的観点から「レアメタル」の名称で 31 鉱種が指定され、それらの資源開発促進や備蓄を行ってきた。しかし 21 世紀に入って、透明電極に用いられる In や永久磁石に必要な Dy の高騰・供給不足を始めとした各種レアメタルの価格の乱高下や供給の不安定が顕著になり、リーマンショック直前の 2007 年には多くのレアメタルの価格が数倍にも高騰するなど、資源開発や備蓄のみでは対応しきれない事態に発展する懸念が生じた。さらに、資源メジャーの M&A や占有化や国家資本の積極的参入が続く最中に、中国の希土類輸出制限に端を発した 30 倍以上の希土類価格の暴騰が世界を襲った。これにより資源問題は一過的な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った。

［これまでの取組み］

このような中、日本政府が入念に準備を進めていたのが元素戦略・希少元素代替に関する戦略である。これは、従来の資源は供給されうるものという捉え方を脱して、資源を素材化し、それらをデバイス・部材の中で如何に効率よく使うかという視点に立ちながら、資源の持続可能な利用や高付加価値製品の安定生産を目指すものであり、“減量化”、“代替”、“循環”の 3 つを柱として取り組まれてきた。この戦略が 2007 年より施策として具現化されたのが、文部科学省「元素戦略プロジェクト」と経済産業省「希少金属代替材料開発プロジェクト」である。前者が長期的視点からの基礎研究で学術的基盤を構築するのに対して、後者は 5 年を目処とする短期的取り組みで実用化のステップに載せうるテーマを推進する省庁連携で取り組んだ国家プロジェクトであり、提案の募集の際

にも相互の役割分担に見合ったテーマを交換して審査するなど、従来にはなかった協力体制で取り組まれている。

元素戦略・希少金属代替に関連した成果として挙げられるのが、磁石材料におけるジスプロシウム(Dy)減量化・フリー化であり、結晶粒合径を磁区サイズより微細化して Dy の担っていた保磁力の低下を防ぐ技術と結晶粒界面の制御で逆磁区の核生成を抑制して保磁力を確保する技術からなっている。前者には微細で清浄な結晶粒制御のプロセス技術、後者は原子配置を三次元観察できる最新の解析技術といったいずれもナノテクノロジーの発展がもたらした成果であることを見逃すことはできない。また研磨材料における酸化セリウム CeO2 の減量化技術でも優れた成果を上げている。これは研磨剤としての CeO2 の使用環境を見直しコントロールすることで従来の数割程度の量でも液晶ディスプレイなどの機能硝子の精密研磨を可能としたもので、材料開発とプロセス開発とが一体となって取り組んだ成果と言える。これらはすでに実用化の段階に進みつつあり、一時は数十倍にまで高騰したレアアース価格を鎮静化させる要因の一つともなった。また、リチウムイオン二次電池の正極活物質に使用されるコバルト酸化物は安全性や供給の面で懸念があり、それを代替する目的で有機二次電池が日本から提案されている。競争の激しい太陽電池においても、化合物太陽電池に使用されるインジウムやガリウムなどの元素機能を代替するための有機太陽電池の研究開発が進んでいる。

米国では日本に追随する形で、DOE が 2010 年に“Critical Materials Strategy”を発表し、2011 年版も合わせて 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戦略的に供給の安定と代替技術、循環技術を確立すべき対象とした上で、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。またその一環として、2012 年から Innovation Hub for Critical Materials Research という拠点形成も進めている。一方、欧州では 2007 年から 2013 年にわたる FP7(第 7 次研究枠組み計画)において Critical Materials として Li, Co, Ga, Ge, Y, Ru, Pd, In, Te, Ta, Pt および希土類を定め、2014 年より開始された後継プログラムである Horizon2020 の中でも原材料の持続可能な供給の促進、資源効率の向上等を目的とした積極的なテーマの拾い上げを進めている。

なお、2011 年、2012 年、2013 年に続き 2014 年 9 月にも Annual Trilateral U.S. – EU – Japan Conference on Critical Materials for a Clean Energy Future 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、レアアース産業の現状、物質のライフサイクル、代替方策のロードマップ、低コスト材料開発への定量的取組、リサイクル技術、分離･抽出技術などの最新状況に加えて、カナダや韓国の施策としての取組などが紹介されている。

中国、韓国でも資源制約へのアプローチが行われているが、中国は資源国としての強みを活かした輸出制限などによるアプローチ、韓国は最終製品の競争力を活かした部材開発力の強化を睨んだ戦略を取っている。

［今後必要となる取組み］

これまで我が国における元素戦略・希少金属代替の優れた成果は、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開発により、現在使われているものを代替する

形で行われてきた。

今後はよりありふれた元素（earth-abundant elements)で同様の機能発現をさせていく創成型の抜本的代替が求められる。そのためには、既存の元素がなぜそこで機能を発揮しているのかを科学的に理解した上で、ナノ構造、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・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・材料科学の確立が必要であり、さらには元素を組み合わせて、物質化、材料化するための設計指針の確立も求められている。

なお現在日本は、材料開発に注力しているが、採掘・生成・回収技術面での技術力が欠けている。今後の元素戦略・希少元素代替の取組には、物質材料の開発の継続に加えて、再利用技術の開発、再利用システムの構築が持続可能な豊かな社会の実現には必要不可欠である。そのため、今後は元素毎のマテリアルフローの追及に尽力することも必要になるであろう。

資源の乏しい我が国の現状を鑑みるに、今後の元素戦略は多様な電子・原子配列による機能発現を多量データの統計的解析により整理・理解した上で新規材料の設計・開発につなげるマテリアルズ・インフォマティックスの視点を踏まえたものとなって行くべきであろう。

（３）科学技術的・政策的課題

こうした課題を推進する上でのポイントは、異分野の力を結集することである。元素機能の発現機構は、物理、化学、材料などにまたがる境界領域に位置し、既存の学問領域が単独で解決できるものではない。従来は経験則に基づいた材料設計指針が多かったが、これにサイエンスの視点による原理原則の指針を加えることが必要とされており、物理や化学の視点による元素機能の解明は、まさに材料挙動の原理に直結するものであり、材料の革新につながる可能性が高い。しかし、この異分野融合は、自然発生的に進むことは一般的に期待できず、したがって、政策的に誘導される必要がある。また、この課題が「元素戦略」と呼ばれるように、元素種ごとのリスク分析を綿密に行い、優先順位と数値目標を明確に掲げた上で、効率的な取り組みを進めることが肝要である。さらには、都市鉱山などで指摘されるリサイクル技術の開発においては、製品の回収方法のシステム化などの要素も含まれており、科学技術行政のみならず、環境、総務行政とも連携が必要である。希少元素を循環的に利用するシステムの確立に向けた技術開発や規制戦略も重要であり、これは我が国を希少元素大国へと変貌させうる可能性も持つ。

元素戦略・希少金属代替戦略の確立・達成には人材育成も含めて産学官の密接な連携を通したオールジャパン体制を整えることが必須であろう。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

原子炉や加速器などの莫大なエネルギーを用いずに元素種を変える元素変換する技術が報告されており、マイクログラム単位での変換も確認されている。数十 nm の厚さの Pd ナノ薄膜と数 nm の酸化カルシウムナノ薄膜を数回積み重ねた多層膜に変換したい金属を吸着させ、そこに重水素を透過させる。現在セシウムからプラセオジム、ストロ

ンチウムからモリブデン、バリウムからサマリウム、タングステンから白金などの元素変換にも成功したとの報告もある。

一方、従来存在しなかった面心立方(fcc)構造を有するルテニウムナノ粒子の開発の成功も報告されている。ルテニウムは全温度領域で六方細密(hcp)構造の金属である。構造が異なれば同種の元素でも電子状態・触媒活性は異なり、CO 酸化反応において fcc-Ru は hcp-Ru とは全く異なる触媒活性を示す。また、Pt、Pd、Rh、Ir と白金族金属のほとんどが開発された Ru と同じ fcc 構造であり、これらは工業的に非常に重要な触媒反応活性を有する。その反応性はこれら金属の電子状態・表面結晶構造と密接に関わっているため、fcc 構造を有する Ru は従来の hcp 構造では活性に乏しかった反応においても、他の白金族金属と同等、ひいてはそれを凌駕する活性を示す潜在能力を秘めており、より安価なルテニウムが白金などの代替材料となり得ることが期待される。

$12CaO \cdot 7Al_2O_3$エレクトライドに Ru ナノ粒子を固定化してなる触媒が、100 年以上にわたってアンモニア合成を工業的に担ってきたハーバー・ボッシュ法を大幅に凌駕するのはもとより、近年工業化されたルテニウム触媒よりも 10 倍高い触媒活性を示すことが 2012 年に報告されている。

CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」では、多孔性金属錯体がパラジウムの水素吸蔵量・吸蔵速度が 2 倍に向上させる研究、微生物が作る酸化鉄で電池の特性が向上し、高機能・低コスト・エコな次世代材料に期待できること、高い磁気転移温度を持つハーフメタル新材料の合成に成功し、超高密度磁気メモリなどスピントロニクスデバイスへ応用可能であること、酸窒化物で初めて強誘電体的挙動の観察に成功したこと、ダイヤモンド電極を用いて CO_2 と海水を原料とした有機物合成が可能となったことを始めとして、様々な興味深い成果が得られている。

［注目すべきプロジェクト］

文部科学省の「元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞」として磁石材料、触媒・電池材料、電子材料、構造材料の各研究開発を課題とする 4 拠点が 2012 年から 10 年間の事業として動いている。これらは材料創成、解析評価、理論のいずれかを主軸とする主拠点にそれ以外を担当する二つの副拠点から構成されている。これらの拠点は Spring-8 や J-PARC、京コンピュータなどの基礎的・大型ファシリティーと積極的に結びついて、物質の本性を理解することで抜本的代替材料開発への道を開こうとしている。磁石材料では磁力発生原理を理論的に解明し、希少元素を全く使わない磁性材料を、触媒・電池材料では反応機構を電子レベルで解明し、高い触媒・電池特性をもたらす代替材料を、電子材料では電子状態の理論設計を精緻化し、汎用元素のみからなる電子部材を、そして構造材料では、原子結合・格子欠陥を理論的に解明し、日本における希少元素の総使用量を抜本的に削減できる構造部材を、それぞれ試作段階まで持って行くことを目指した研究開発が進んでいる。構造材料の中でも、特に主要社会インフラ分野である都市建築、交通 （輸送機器)、産業機器、環境・エネルギー、資源、航空・宇宙で使用される、いわゆる社会インフラ材料に関する研究開発が重要であり、その主要課題は“耐震化”、“軽量化”、“低温化”、“高温化”、“過酷環境化”、“長寿命化”である。

一方、経済産業省・NEDO は比較的短期間での実用化を目指すプロジェクトを中心に

希少金属代替材料開発プロジェクトを進めてきている。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、希土類磁石向けジスプロシウム、超硬工具向けタングステン、排ガス浄化向け白金族・セリウム、精密研磨向けセリウム、蛍光体向けテルビウム・ユーロピウム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ている。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ている。これら研究開発を推進するプロジェクトに加えて、それらに関する研究開発の最新動向の調査、事前検討、中長期戦略立案に関する検討などに関する事業など幅広い取組を行って来ている。

2012 年に経済産業省が開始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を 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始まった。レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発、モーター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ー設計の開発を行い、次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモーターの省エネ化を図り、競争力を確保し、我が国産業全体の活性化に寄与することを目標としており、米国が志向するようなシステム全体を考慮した取り組みに対応する長期戦略といえる。

他にも、科研費の新学術領域研究として、「元素ブロック高分子材料の創出」、「ナノ構造情報のフロンティア開拓－材料科学の新展開」、「π造形科学: 電子と構造のダイナミズム制御による新機能創出」、「３Ｄ活性サイト科学」など、元素戦略と関連するものが 2012 年以降から開始されている。他にも内閣府の SIP「革新的構造材料」、JST の CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」、さきがけ「新物質科学と元素戦略」、「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」などの関連プロジェクトも推進されている。

米国では Energy Innovation Hub for Critical Materials が活動しており、さらに 2011 年に発表された “Materials Genome Initiative”を受けて、計算、計測、データベースを組み合わせた次世代材料開発が進行している。

欧州では FP7 の後継プログラムとして Horizon2020 が 2014 年より始動している。ドイツが伝統的にこの分野に強く、米国同様、計算科学を積極的に活用している。アジアでは、産業界、学術界ともに、中国、韓国などの追い上げが著しい。

注目すべき研究機関として、米国：Oak Ridge National Laboratory （ORNL）、 National Institute of Standards and Technology （NIST）、 ドイツ：Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH （MPIE）、Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung （BAM）、 Darmstadt University of Technology、 スイス：Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt （EMPA）、 英国：Imperial College、 韓国：Korea Institute of Material Science （KIMS）、 Pohang University of Science and Technology （POSTECH）、 中国：Chinese Academy of Sciences （CAS）傘下 Institute

of Metal Research （IMR）、 Shanghai Institute of Ceramics （SIC）が挙げられる。

（５）キーワード

Critical material、EAE（earth abundant elements）、Materials Genome Initiative、レアメタル、レアアース、循環、減量、代替、材料設計、組織制御、高耐震化、軽量化、長寿命化

（６）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	◎	↗	これまでの元素戦略プロジェクトを進化させた拠点形成型の10年プロジェクトも進展しており、SPring-8をはじめとする基礎物性の解析・理論とを結びつけた取り組みも進んでいる。元素戦略に関するCRESTやさきがけの採択課題から新たな触媒や磁性材料に関する成果が出てきている。
	応用研究・開発	◎	↗	希少金属代替技術開発で既に多くの実用化に向けた研究進捗がみられ、「レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業」においても、レアアース磁石やタンタルコンデンサのリサイクルに関する研究開発で成果が出ている。
	産業化	◎	↗	材料開発では世界をリードしており、脱/消Dyや省CeO_2など世界に先んじて実用化されたものもある。元素戦略によって初めて実用化された画期的新製品の登場には知的所有権の問題から少し時間が必要かもしれない。リサイクル技術は依然欧州が追いかけている段階にあるものの、研究開発は着実に進んでいる。
米国	基礎研究	◎	↗	DOE主体でCritical Materials Strategyが行われ、希少元素に関する関心が高く開発も活発である。Ames National Laboratoryを代表にしてCritical Materials Hubと呼ばれる研究体が作られている。日米欧による国際会議であるConference on Critical Materials for a Clean Energy Futureも2011年以降で4回を数えるなど、諸外国からの情報収集も積極的に進めている。
	応用研究・開発	◎	→	DOEが主導して2010年、2011年に発表されたCritical Metal Strategyに続くものは出ておらず、省庁横断プログラムであるMaterial Genome Initiativeに集約された形となっている。2011年以降、材料開発、計算、計測、データベースの統合的アプローチが継続しており、各大学、研究機関で活発な研究活動が行われている。2011年以降、多数のレアース関連法案が提出・審議され、国内のサプライチェーンを復活させようとする動きもみられる。
	産業化	○	→	代替材料開発よりも特定の元素に頼らない代替システムの開発に重点を置き、材料への依存度を低めようとする動きが先行しているが、希少元素依存度を下げる試みも行われている模様。軍事産業に支えられた開発が進んでおり、非常時用の備蓄対策が行われている。
欧州	基礎研究	○	↗	日本と希少金属代替に関して戦略的国際共同プログラムが実施されているほか、独国、英国等では元素回収技術の発展等が目覚ましい。磁石、二次電池、触媒などターゲットを絞り込んだ取り組みが行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	Scientific & Technological Report として“Critical Metals in Strategic Energy Technologies”を例年まとめており、SET-plan（Strategic Energy Technology plan）の中で開発対象を位置づけ、積極的な動きを見せている。2014年よりスタートしたHorizon2020では優れたアイデアを市場に繋げるための中小企業に対する資金的な補助が強化されている。

	産業化	○	→	モーターなどの設計技術が強く、米国と同様に特定の元素に依存しない設計技術で対応しようとの動きが強い。多国籍企業化を進め、また、アジアへの進出を図る。EU全体で希少金属問題に取り組んでおり、各国連携が活発。
中国	基礎研究	△	→	特に目立った動きはないものの、学術面では日本の元素戦略プロジェクトチームの結果をフォローした論文が増えつつある。
	応用研究・開発	○	↗	原料国としての強みをもつことから、代替、減量化よりは新機能開発に重きをおいた材料・出口製品の開発に注力している模様。特に磁性材料の研究が活発である。技術的には未熟ではあるものの電気自動車が実用化された例も少なからずあり、そのためにレアメタル、レアアースに関する研究開発が進められる可能性は高い。ナノコンポジット磁石等の日本の元素戦略研究のキャッチアップも多数行われている。
	産業化	△	→	代替、減量化にかんする動きはなく、むしろ用途開発、環境対応などに主眼がいっている様子。2014年WTOが日米欧が主張した中国のレアアース輸出規制の解除を全面的に認めたことで国際的に不利な立場となった。
韓国	基礎研究	○	→	学術面では日本の元素戦略プロジェクトチームの結果をフォローした論文が増えつつあり、応用を意識した研究が多い。
	応用研究・開発	○	→	素材一般に「部品・素材競争力総合対策」を策定して企業と研究機関の結びつきを強めている。また、出口製品から素材・部品力の強化を目指した産学連携も見られる。韓国機械・材料研究所（Korea Institute of Machinery and Materials, KIMM）の材料部門が2007年に独立した材料科学研究所（KIMS）が複合材料利用技術の開発をおこなっている。
	産業化	○	→	大手鉄鋼会社のPOSCOが18年までに2兆8千億ウォンを投じてれレアメタル、非鉄金属などの素材事業に進出する計画を出すなど、政府が2018年までに液晶ディスプレーやハイブリッド車のモーターなどの原材料として、リチウムやインジウムなど10種類の需要が高まっているレアメタルの自給率を80%に引き上げる方針を出して取り組んでいる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）DOE “Critical Materials Strategy 2011”,
2）JRC Scientific & Technological Report “Critical Metals in Strategic Energy Technologies” 2011,
3）JST-CRDS 戦略イニシアティブ「元素戦略」CRDS-FY2007-SP-04
4）Nature
http://www.nature.com/nature/journal/v501/n7467/full/nature12509.html

３．５．７　データ駆動型材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

計算科学による特性予測、それを実証するハイスループット材料合成と評価、それらのデータを統合管理する材料データベースや機械学習などを統合的に活用した物質・材料探索・設計の取り組み全般を指す研究開発領域である。実験、計算で得られた物質・材料に関する知識とデータを駆使して、統計的手法により物質・材料の機能を制御する規則を探り、それを通して具体的に新物質、新材料の「発見」を加速する。究極的には、理論研究者の参画により、規則の背景にある材料特性を支配する法則を「発見」し、自在な材料「設計」を可能とする系統的アプローチを構築することを目指すものである。

（２） 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

計算科学に基づいたマテリアルズ・インフォマティクスの概念は 2000 年頃から提唱されていたが、当時は取り扱える原子数や精度にも限界があった。また大量のデータを統合し材料科学の問題をマイニングする手法も未開拓であり、そのアイデアの実現は限定的であった。しかし、ここ数年の計算機の進歩と大量なデータを取り扱える環境が、この状況を劇的に変えつつある。2011 年、米国で Materials Genome Initiative が発表されて以来、計算科学、データマイニングを融合させたデータ駆動型の材料設計（ハイスループットスクリーニング）が再注目されている。

つまり、計算機、アルゴリズムの発展により、実験、理論と鼎立する第３の科学としての「計算科学」が、物質・材料研究においても解析や予測の手段として、重要な位置を占めるようになった。さらに、近年それら３本の柱を束ねる第４の科学として「データ科学」の重要性が認識されつつある。そのような時代背景において、１）検索エンジンに代表される情報科学・技術の深化、２）第一原理計算による物質データベースの構築、３）大型施設や高度実験装置を用いた効率的合成・評価技術の深化と相俟って、物質・材料研究においてもシミュレーション技術が関連する実験的手法やデータベースと融合させ、「データ科学」を取り込むことにより、新機能材料のスクリーニングなどにおける開発コストを大幅に下げることができ、日本の産業競争力強化にもつながることが期待されている。

［これまでの取組み］

主たるアクティビティは米国にあり、①NREL，Colorado 大 Boulder 校(UCB)，Northwestern 大(NWU)などで構成される Center for Inverse Design のチーム、②Duke 大の AFLOWLIB に基づいた共同研究、③MIT の Materials Project に基づいた共同研究、④その他に分類される。現状は、第一原理計算データベースおよびコンビナトリアル実験に基づいたハイスループットスクリーニングという色彩が強い。

Center for Inverse Design

元 NREL、現 UCB の Zunger らは、材料デザインに３つの必要な modalities (sub-tasks)が必要と主張している。modality1 は、inverse band structure に代表されるよう

に、バンドギャップなど決められた特性を与える物質を、第一原理計算に基づいて膨大な化学・構造スペースの中から探し出すことを指す。例として、光学ギャップと遷移強度を向上させるための Si-Ge 超格子の積層デザインを挙げている。modality2 は、ICSD などのデータベースに登録されている構造既知の物質を対象に、新しい機能を見つけ出すハイスループットスクリーニングを目指すものを指す。具体的には、網羅的な第一原理計算結果をもとに、たとえば太陽光の吸収率に関してスクリーニングを実施し、Fe2SiS4 などの優位性を見出している。modality3 は、第一原理計算に基づいて未知化合物を系統的に探索することを指す。A2BX4 系では 39 種類の結晶構造を持つ 80000 通りの化合物について第一原理計算し、熱力学的安定性でスクリーニング。同様の計算を ABX 系化合物についても実施し、多数の安定な未知化合物を見出している。そのなかから、TaCoSn や TaIrGe のような新しい有用な半導体化合物を見出したと主張している。上記の理論計算による探索結果に基づいて、このチームでは、コンビナトリアル手法で網羅的な合成実験を大規模に実施している。

Materials Project

マサチューセッツ大学の Ceder らは、以前から計算科学によるハイスループット材料探索とデータマイニングに関する Materials Project 研究を行ってきた。これは、ＷＥＢ検索できる第一原理計算データベース Materials Explorer を起動し、知りたい化合物名をいれるとその物質の結晶構造、第一原理計算で求めた電子状態、X 線回折データなどが表示される仕組みになっている。現在、このサイトでは約５万件のデータが保存されており、実際に物質合成をする際の参考になっている。同じグループの Persson(LBL)は、Materials Project の中で Open materials design environment という観点でデータベースを公開しており、すでに登録ユーザが 5000 人を超え、様々な共同研究が進んでいることを強調している。また水溶液系での合成指針を得るために、第一原理計算による電位―pH 図データベースを最近公開した。近い将来に弾性定数データベースも公開する予定とのことである。

Ceder らは、東工大菅野グループが 2011 年に実験により発見した LGPS 系硫化物 Li イオン伝導固体電解質について、①Materials Explorer を利用して第一原理熱力学的スクリーニングを実施し、②短時間第一原理 MD 計算に基づいてベイズ推定することでイオン伝導度を的確に予測する手法を開発し、新しい固体電解質材料を設計と報告している。1 年間の研究で大幅な進歩があり、マテリアルゲノムの謳い文句である accelerated materials design ができていると主張している。

AFLOWLIB

デューク大学の Curtarolo は、Materials Explorer と同様の第一原理計算データベースである aflowlib.org を開発・運用している。すでに、これに基づいて太陽電池、トポロジカル絶縁体、二元合金、熱電変換材料などに関するハイスループットスクリーニングを行っている。また大量のスペクトル解析から新材料を見つけ出す手法も提案している。

Aflowlib を活用して共同研究を実施している竹内(Maryland 大)は、希土類フリーの永

久磁石をターゲットに、Mn-Ni-Ga 系などでハイスループットスクリーニングしている。放射光を利用したコンビナトリアル X 線回折実験の手法を確立させた結果、放射光側から XMCD や ARPES といった最新分光設備におけるビームタイムが提供されるようになり、さらなる発展を期待されている。

Montana(仏 Grenoble)は、Curtarolo と共同し、低熱伝導度の半導体を材料設計するために Half Heusler 型化合物のデータマイニングを行っている。第一原理計算に基づいた熱力学的安定性のスクリーニングを実施し、機械学習手法に基づいて熱伝導度を決める記述子を探索する。これによって、熱伝導度そのものを第一原理計算するというコスト高い計算をすることなしに、比較的簡単な第一原理計算に基づいて材料探索ができたと報告。合成実験を実施中ということであった。Nardelli(North Texas 大)は、Curtarolo と共同し、密度汎関数法の一つである DFT+U 法を使って計算した酸化物などの状態図を計算している。現在では 600 種以上の状態図が自動計算されており、これらの結果はすでに公開されている。また、AFLOWLIB/ONR-MURI の枠組みで AFLOWLIB に第一原理計算 Quantum Espresso コードによる phonon 計算結果を掲載する予定とのことである。

物質・材料研究機構が提供している”MatNavi”では金属、無機材料、ポリマー、拡散、相図など多くのデータから構成されており、一般に無料公開されていることから、世界中で利用されている。しかし、データのデジタル活用の観点では構築されていないことから、事典的な活用にとどまっており、今後の改善が期待される。

化学でいえば、例えば Chemical Abstract（CAS）などの物質データは他の分野には類を見ないくらいのビッグデータとなっている。合成する前に物質をスクリーニングし、最も効率的な物質を合目的的に探索することは、化学反応の解析と同じくらい重要である。実験研究者がそれらを有効活用するには、物質データと第一原理計算の有機的な融合による予測の推進が必須である。情報科学の手法を用いて、有機化合物の構造と生物学あるいは薬学的活性との相関を定量的に予測する試みは、定量的構造活性相関(QSAR)と呼ばれ、以前より研究が盛んに行われている。特に直線自由エネルギー関係を用いたモデリングは、分子の部分構造の情報を主パラメータとし、共鳴効果や立体効果などを補正として取り入れることで、有機化合物/水の分配係数や水溶解度の問題などにも適用されてきた。また、このような分割モデルの組み合わせにより、NMR の化学シフト、分極率、振動スペクトルなどの物性量もある程度記述出来る様になってきている。しかし複雑な構造を有し、高精度計算が要求される分子の設計は一般的に困難であり、情報学的な手法と量子化学に基づく分子設計のハイブリッド計算手法を確立することが望まれている。

［今後必要となる取組み］

将来的には、必要とされる特性を持つ物質・材料を、多種多様な元素や分子種の組み合わせの中から選択し、設計することが可能となるレベルまで技術が進化すると想定され、世界の趨勢は確実にそれを志向している。これを可能とするために、今後の研究の方向性としては、データマイニング、データ同化など情報科学的手法の取込みなどが重

要になっている。その過程の中で、理論計算や実験によるビッグデータを取り扱いつつも、人の直観を利用することができるように、視覚的にその結果を表示しようとする機能を持つことも必要である。また第一原理計算とひとくくりにしても、現状で充分に実験を再現できる物性値から、粗っぽい近似を置かなければ計算できないものまでバラエティがあり、そのことについて正しい知識を持つことは重要である。しかし、それではやはり人の判断が介在する必要があり、自動計算を達成するには課題といえる。今後、このような課題が克服され、多元系を含む多様な物性値についての大きなデータベースとなるとその価値が飛躍的に高まると考えられるので、第一原理計算そのものの技術革新は、地道な努力であるが重要である。

また、多機関で集められたデータを統合し、誰でもが使えるデータベースに再構築することは望ましいが、それには課題が山積している。計算科学とハイスループット材料合成の手法が発展し、多くの材料の結晶構造、電子構造、特性などを羅列したデータセットが各機関に蓄積されても、共有化の段階では課題が残る。現時点ではそれぞれの機関、組織が独自のデータ形式を例えば SQL などの形式を設定し、リレーショナル・データベース形式で材料情報蓄積している。そのため、将来、多機関で連携して材料データを統合する場合には汎用性のある共通のデータ形式を決める必要がある。例えば、メタデータの表現方法の一つである RDF の活用により、情報の分類や検索などの自動化・効率化を図ることができる。このような汎用で広く普及しているデータ形式を採用することで、互いのデータの不足分を補完し、他機関のデータを効率的に使うことが可能になると期待される。

実験技術が発展してきた今こそ、実験研究と計算研究が融合した新たな材料研究体制を確立していくときである。わが国は、この分野の初動において、米国に少し遅れを取っている懸念があるが、①実験的な材料研究において世界を主導してきたこと、②学際的な連携に大きな盛り上がりが見られること、③放射光など大型施設や電子顕微鏡のような高度実験設備が整備されていること、④MatNavi を代表とするデータベースを持っていること、などを考えると、これから充分に世界の主導権を取った研究を行うことが可能と期待している。しかし、数学と材料科学の連携や、第一原理計算手法の技術革新など、長期的な取組みが必要な課題も多い。

このような観点から、今後、日本国内に長期的視点にたつマテリアルズ・インフォマティックスのための中心的拠点を設置することが望まれる。研究拠点では最先端の研究を実施して世界に向けて発信するのはもちろんのこと、マテリアルズ・インフォマティックスを使った材料開発事例や実際に材料を合成する場を提供する。データの標準化に関して我が国も積極的に発言し、国際化を推進するなどの取組みが必要となる。

（３）科学技術的・政策的課題

我が国ではこれまでの経験に裏打ちされた研究の蓄積が多い一方で、必ずしも異分野研究者との連携・融合が十分行われているとはいえない状況である。実験研究・計算研究・理論研究・企業等での開発研究が融合した、"風通しのよい" 材料研究体制を確立する必要がある。

政策的な課題は明らかに人材育成である。米国のマテリアルゲノムイニシアチブ

(MGI)プロジェクトに関連して、現在、欧米において、計算科学、データ科学の各種手法を教育する環境整備が多くの主要大学に展開されているようである。最新鋭の材料計算解析技術を日常的な大学カリキュラム内で演習し、パッケージ化された第一原理計算、状態図計算、フェーズフィールド組織シミュレーション、また材料スクリーニング用の大量の材料データベース操作法、機械学習など、当たり前のように操ることのできる学生の連続的輩出を狙っている。材料開発の圧倒的スピードアップには、結局、それを遂行できる人材を効率的に増やすことが最も確実である。わが国でも、CMSI（計算物質科学イニシアティブ）や各学協会、大学院において各種セミナーや講義のＷＥＢ発信など様々な教育プログラムが開始されている。これらがプロジェクトに付随した一過性のもので終わってしまわないように、不退転の決意が必要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

コンビナトリアル合成は 10 年ほど前にブームがあったが一旦下火になった。最近は、第一原理計算に基づいて抽出された候補物質のコンビナトリアル合成を行い、それを放射光でコンビナトリアル評価を行うという一連の流れで成果がでるようになり、Materials Genome や Center for Inverse Design などの funding に基づいて、大きなブームになりつつある。たとえば、2014 年 5 月に開催された OSTP 主催の会議では、マテリアルズ・インフォマティクスとハイスループット材料合成に関する議論が行われ、米国のコンビナトリアル材料科学をけん引してきた研究者が多く参加した。世界最大の半導体製造機器企業である Applied Materials 社、コンビナトリアル材料手法と得られたデータを管理しデータマイニングする手法をセットでサービスしている Intermolecular 社、ジェットエンジンや発電用タービンを製造している GE 社が重役や研究開発のマネージャーを参加させていた。これらの企業から、たとえば、多様な材料開発を先導するような研究、薄膜材料に関する材料データの蓄積、多元系特に 7、8 元系のデータの蓄積に関する要望が出ていた。これらの要求は現時点ですでにある Materials Project や aflowlib に対して、企業からみた課題を明らかにしている。

［注目すべきプロジェクト］

2011 年に米国で計画が公表され、2012 年からスタートした “Materials Genome Initiative” の下では、2014 年、NIST が、“The Center for Hierarchical Materials Design(Northwestern, U. Chicago, Argonne)”の支援を開始。今後も NIST 主導で、大規模大容量の物質データ処理分野への資金投入が予定されている。特に計算科学分野においては、プログラム開発やデータベースの基盤整備、およびその普及など、基礎研究への支援も手厚く行われているようである。本年度は MGI の３年目にあたり、各種学会や業界団体における白書の提出や、５大学（ノースウェスタン大学、南カルフォルニア大学、ライス大学、ジョージア工科大学、イリノイ大学）が産学官連携のための地域別会議を開催するなど、期間の後半に向けて出口戦略を模索している段階であると思われる。

中国でも米国の MGI の提案を受けて、Chinese Materials Genome Initiative が始まろうとしている。詳細は不明であるが、計算科学を使って多くの材料の探索を進めると予想されている。予算規模は 100 億円規模ともいわれ、人海戦術で網羅的に材料探索を

進め、その材料の知的財産の確保を目指していると思われ、今後、注視すべき研究である。

韓国では、米国の MGI の動きに触発されて、2015 年度より 10 年計画として Creative Materials Discovery Project が計画されているようである。

（５）キーワード

物質探索・材料設計（マテリアルデザイン)、データベース

（６）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	△	↗	基礎研究に注力している例として、科研費新学術領域のスパースモデリング（代表者東大岡田真人）とナノ構造情報（代表者京大田中功）が挙げられる。東北大ＷＰＩ（代表者小谷元子）が数学連携による基礎研究を開始しているほか、学際的・萌芽的な試みが始まっている。日本金属学会では公募シンポジウムが開催され、セラミックス協会ほか学協会誌特集号の企画もはじまっている。しかし、国際会議で発表するレベルの研究者数は、米国、欧州に比べて未だ少ない。
	応用研究・開発	△	↗	物質・材料研究機構グループによる3元コンビナトリアル材料合成手法の開発とそれを使ったゲート絶縁膜やメタルゲート材料開発への応用などを基に、スタートアップ企業、株式会社COMETが2007年に設立され、産学官における材料の開発支援などを行っている。特に一定の膜厚を保ちつつ組成だけが変化できる方式では、非常に狭い組成領域しかない特異的な材料も見つけだすことができる。また、移動するマスクの穴の形状を変えることで3元コンビナトリアル材料合成の手法をさらに発展させたコンビナトリアルパルスレーザ堆積装置、コンビナトリアルスパッタ装置が市販され、材料開発を加速している。
	産業化	△	↗	電気、自動車、重工、素材メーカーなどで、効率的な材料探索・開発への期待が大きく膨らんでいる。計算科学が主導し新材料を発見した好例として、シャープと京大の産学連携による長サイクル寿命を示すLiイオン電池用正極材料の開発が挙げられる。ハイスループット材料合成やデータ解析を受注するような企業は育っていない。
米国	基礎研究	○	↗	プロジェクトが材料開発の効率アップを目指し工学的色彩が強いため、基礎研究としての進捗は十分とは言えない。しかし、数学や情報研究者と材料科学との連携は開始しており、学会シンポジウムや国際会議も頻繁に行われている。参考書や専門雑誌の発刊計画も米国の主導で進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	NISTではノースウェスタン大学、シカゴ大学、アルゴンヌ国立研究所などと連携して、“Center for Hierarchical Materials Design：CHiMaD”を設立し、計算科学を使ったマルチスケールでの材料特性、相図、熱力学データなどの情報を提供している。
	産業化	△	↗	米国では、ハイスループット材料合成やそのデータ解析に関するスタートアップ企業が存在する。代表的なものは電池材料の開発を行うWildcat社、半導体デバイス関連の材料開発を専門に進めるIntermolecular社などである。この会社は材料のデサインコンセプトの提案、300mmのSi基板を使ったハイスループット材用合成、得られたデータを管理しその中から新材料を見つけだす、データ解析ソフトまでを統合したプラットフォームを提供している。バイオから触媒まで幅広くマテリアルインフォマティクスを展開したSymyx社は1994年に設立され急成長した会社だが、2010年には一部がハイスループット材料合成を専門に行うFreeslate社となり、データ解析などのソフト部門はAccelys社に移り、現在でも積極的な材料開発を行っている。
欧州	基礎研究	○	↗	欧州は、第一原理計算の理論構築やソフトウェア開発において独擅場であり、近年になってそれをinformaticsにつなげようという意気込みが強い。たとえばドイツBerinのFritz Haber研のScheffler教授のグループや、DusseldorfのMax Planck研のNeugebauer教授のグループは、高い基礎研究のポテンシャルを持ち、研究体制を整えつつある。欧州内で国際会議やワークショップも数多く実施されている。
	応用研究・開発	△	↗	例えば、オランダのEindhoven 大学のSchubert教授 らは、Dutch Polymer Institute(DPI)を立ち上げ、コンビナトリアル手法によるポリマー研究を精力的に行っている。また、スウェーデンのMaterials Evolutionのプロジェクトはハイスループット材料開発を目的としたプロジェクトであり、材料開発を加速するものである。

	産業化	△	↗	企業ではhte社（ドイツ）やflamac社（ベルギー）、それにiilka社（英国）などが活動している。hte社では“virtual library”という計算科学によるスクリーニング手法を用いている。また、彼らは、“MatInformatics”を提唱し、データマイニングに関する環境整備、およびソフト開発を行っている。
中国	基礎研究	×	↗	特筆すべき活動・成果が見えていないが、国際会議などではテーマとして取り上げられている。
	応用研究・開発	△	↗	中国マテリアルゲノムイニシアティブ(CMGI)は、中央政府や上海地方政府から日本円で総額100億円近い予算を受け、米国から帰国した中国人研究者をリーダーとして応用研究を加速させる計画らしい。
	産業化	×	→	特筆すべき活動・成果が見えていない。
韓国	基礎研究	×	↗	特筆すべき活動・成果が見えていないが、国際会議などではテーマとして取り上げられている。
	応用研究・開発	△	↗	2015年より10年計画としてCreative Materials Discovery Projectが計画されているようである。
	産業化	×	→	特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）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）」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/SP/CRDS-FY2013-SP-01.pdf

2）科学技術未来戦略ワークショップ「データを活用した設計型物質・材料研究（マテリアルズ・インフォマティクス）ワークショップ報告書」
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/WR/CRDS-FY2013-WR-03.pdf

３．５．８　トップダウン型プロセス（半導体超微細加工）

（１）研究開発領域の簡潔な説明

シングルナノメートルレベルまでの微細加工プロセスの高度化実現を目指す研究開発領域である。ナノインプリントやブロックコポリマー (block copolymer)の自己組織化パターン形成などの利用による従来リソグラフィ技術の限界を超え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と加工技術、およびこれらのトランジスタ・配線作製への適用性検証などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

現在の情報化社会を支える電子機器・通信機器の高性能化・高速化は、トランジスタなどの素子や配線の微細化による大規模集積回路（LSI）の高集積化により実現されてきた。デジタル家電、パソコン、携帯電話・携帯端末などの小型化・高性能化による利便性の向上や、スーパーコンピュータを用いたシミュレーションによる新薬開発、天気予報や地球温暖化の予測精度向上などが図られている。一方、世界的な環境・エネルギー問題の顕在化により、多量の電力を消費するデータセンターなどの電力使用量の削減要求が近年高まっている。このため、より低電圧・低消費電力で動作できるようにさらなる微細化および回路機能の高集積化が望まれている。

このような高集積化による LSI の高性能化や低消費電力化を可能にするのが微細加工技術である。微細加工技術の中心となる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（CMP）、ダブルパターニング技術など様々な技術を取り入れてきた。これらの合わせ技により、現在では波長 193nm のフッ化アルゴン（ArF）エキシマレーザー光を用いて、20nm を切る回路パターンの LSI の大量生産が実現されている。さらに、波長の短い次世代のリソグラフィ技術として波長 13.5nm の極端紫外光（EUV）リソグラフィの開発も進められている。しかし、加工寸法の微細化に伴い、装置や材料のコストが急上昇しており、新たなリソグラフィ技術の検討が必要になっている。具体的には、ナノスケールの微細構造を形成したモールド（鋳型）をスタンプのように押し付けてパターンを形成するナノインプリント、ナノレベルの規則的な相分離構造を自己組織的に形成するブロックコポリマーを用いるリソグラフィ、ナノスケールの粒子の自己凝集性を利用して 規則格子構造を作製するナノ粒子リソグラフィ、アルミナの陽極酸化で形成される規則的な細孔構造を利用するアルミナ陽極酸化法、基板表面に分子が吸着する際に細密充填する現象を利用した Self-Assembled Monolayer （SAM）法などが候補としてあり、これらの手法について素子作製への適応が可能かどうかも含め研究開発を進めていくことが重要になる。

これらのリソグラフィ手法は、微細パターン形成に高価な露光装置を必要としないため、これまでのリソグラフィ関連産業構造に変革をもたらす可能性がある。 そのため、先端デバイスの開発と生産技術力の確立に成功すれば、圏内リソグラフィ関連産業（LSI メーカー、装置・材料メーカー）が技術優位性を確保し、その結果、雇用創出および新規ビジネス開発が期待される。

［これまでの取組み］

2000年代初頭には、波長193nmのArFエキシマレーザー光の後継として、波長157nmのF2レーザーが候補となっていたが、光学系や材料開発の難しさの割に、ArFに比べ2割程度しか縮小メリットがないため開発が中断された。レンズとウエハの間に水をいれてNAを向上させる液浸技術が導入され、ArF光を継続利用して40nm程度のパターンを作製できるようになった。さらには、2回露光もしくはパターンの側壁を利用しピッチを半分にするダブル・パターニング（SADP）の利用により、20nmを切る回路パターンが得られ、LSIの大量生産に使われている。

次世代露光装置には、波長13.5nmの極端紫外光（EUV）リソグラフィの開発が進められている。EUV光に対しては透過型のレンズがなく反射光学系を用いる必要があるが、鏡面反射率が68%しかないため、6枚の鏡の光学系でも照度が1/10になってしまう。このため強力なEUV光源が必要とされるが、開発も難航している。実用的にはEUV光源として500W程度が必要になるが、現状の量産用として出荷されているEUV露光装置では40W程度となっている。EUVリソグラフィシステムにおける基盤技術であるマスク技術とレジスト技術の課題解決に向けて、国内の半導体デバイスメーカー、マスク関連メーカー、レジスト関連メーカー11社の出資および経済産業省の支援を受けて、EUVL基盤技術開発プロジェクトを推進するコンソーシアム企業として2011年1月に、㈱EUVL基盤開発センター（EIDEC）が設立された。更に、2013年4月には国内半導体製造装置メーカー2社が新たに株主として参加、DSA(自己組織化)技術の研究を開始し、EUVLとの組み合わせによってサブ10nmの技術の実用化を目指す研究開発を行っている。

ブロックコポリマーは、1980年代に主にバルクのモルフォロジーが研究されてきたが、1990年代に原子間力顕微鏡（AFM）の普及により、薄膜でもモルフォロジーの観察が容易になり、リソグラフィへの応用が始まった。ブロックコポリマーのミクロ相分離パターンをテンプレートとして基板を加工するパイオニア的研究は、米国プリンストン大から発表されている。初期の応用ターゲットは、ハードディスク用パターンドメディアの磁性粒子配列用テンプレート作製であり、東芝が2002年にデモを行っている。その後、ナノメートルの規則構造が簡単にできるため、光学とバイオ用の超微細構造作製に応用が広がっていった。2003年にウィスコンシン大から、従来のリソグラフィ手法で作製したパターンをガイドにしてブロックコポリマーの自己組織化パターンを配列させ、任意の場所にミクロ相分離パターンを得る誘導自己組織化（DSA）が発表され、半導体パターニングへの応用が注目されるようになった。

2007年の国際半導体技術ロードマップ（ITRS）でDSAが次世代パターニング手段の候補にあげられてから、米国のSEMATECHや欧州のIMECなどが、組織的にこれに取り組むようになってきた。また、韓国でもKAISTなどが、本格的に取り組んでいる。ブロックコポリマーリソグラフィは既存のリソグラフィとの親和性が良く、ITRSにも記載がある通り、ArF液浸+DSA、EUV+DSA、NIL+DSAのような形で使われる可能性が高い。特に装置導入コストが低いと考えられるため、産業界からも大きく注目されている。

NILは、1995年にミネソタ大学から10nmレベルのパターン形成が発表されて以来、

ナノレベルの新たなリソグラフィ技術として注目され、継続的に研究されてきた。特に、2003 年の ITRS で NIL がリソグラフィ技術の候補となったことにより、その検討が本格化した。LSI 向けの NIL 装置については、米国のモレキュラ・インプリント社（MII）における開発が最も進んでいたが、2014 年 2 月にキャノンが MII の先端半導体ナノインプリント製造装置部門を買収し、東芝と共に先端フラシュメモリ製造適用検討を開始している。

［今後必要となる取組］

国際半導体技術ロードマップ（ITRS） 2013 年度版によると、2020 年には、MPU で 18nm、DRAM で 15nm、フラッシュで 12nm のハーフピッチ（hp）が必要である。これに対応可能なリソグラフィ技術候補は、EUV リソグラフィのダブルパターニング、NA を上げた EUV リソグラフィ、DSA、電子ビーム直描などのマスクレスリソグラフィ（ML2）、NIL が挙げられている。今後、絞り込んでいくことになるが、将来のリソグラフィ技術候補のうちどれが本命であるか見極めが難しい。

EUV リソグラフィの技術的な課題としては、EUV 光源の高出力化、光学系の改善、無欠陥マスク製造技術の確立およびインフラ整備が挙げられている。ML2 については、複数の電子ビームを用いることで処理能力を改善できるが、特に全ビームの均一性を確保することに課題がある。NIL ではパターン欠陥低減と処理能力確保が大きな課題である。DSA で最も懸念される課題はパターンの精度と欠陥であり、ここ数年大きく改善されたが、まだ十分なレベルに達していない。これら候補技術のポテンシャルは高いと考えられるが、生産に用いられるためには、実用的な水準までコストを下げる必要がある。また一度導入すると、数世代に渡って適応が可能であることが必要である。ML2、NIL、EUV リソグラフィ、DSA についても、どれが本命ともいえないのが現状である。

このように、どのリソグラフィ技術が本命になるか見極めるのが難しい状況であるので、個々の技術について、原理に基づいて可能性や限界を明確にし、基本的な特性を詳細に分析するなどの基礎・基盤的な研究とスループット向上、パターン精度向上、欠陥除去などの実用面での研究開発を同時に行うことが必要である。例えば、NIL においては高価な露光装置を必要としないものの、モールドの耐久性やその扱い方法、重ね合わせ精度の確保など、これまでの光リソグラフィとは異なるノウハウを必要とする。

リソグラフィ技術分野における日本の強みは、リソグラフィ用材料、塗布現像プロセス装置、検査・測定器、マスク技術、光源などにある。今後も、このような強みを維持できるような取組みが必要である。一方、日本の弱みは、リソグラフィシミュレーション技術、計算機リソグラフィ技術、OPC（Optical Proximity Correction、光近接効果補正）技術、リソグラフィに最適なパターンレイアウト技術などがあり、次世代のリソグラフィの研究開発ではこれらもあわせて強化していく必要がある。

（３）科学技術的・政策的課題

リソグラフィ開発は技術的な困難さが増し研究開発期間が長期になって多くの開発コストが必要となってきている。また、国内ロジック系 LSI メーカの多くは自社工場による先端 SoC デバイス製造から撤退し、外部ファンダリへの委託を進めており、リソグラ

フィ等の最先端製造プロセス開発に関する研究開発への参加意欲が衰退してきている。そのため、単独企業による研究開発が困難になってきており、世界的にコンソーシアムにおける研究開発が不可欠になっている。

日本においては伝統的に材料分野の研究開発が強いため、大学や研究機関におけるDSAやNILの研究開発も多く行われ、レベルも欧米に続く力を持つ。EIDECのプログラムの１つとしてDSAが立ち上がってはいるものの、シングルナノメートルLSI向けリソグラフィ技術を幅広く扱うコンソーシアム等の研究拠点は存在しないため、特に実用化を目指した研究開発領域においては欧米企業、コンソーシアムに参加している韓国・台湾企業に先行されてしまう恐れがある。シングルナノメートル領域は未踏の領域であり、基礎研究がきわめて重要であるが、現状では大学研究者の科研費による個別興味による研究が散見されるのみである。横断的かつ総括的な研究が行われていないために、シングルナノ研究の基礎となる物理や化学には未解決の問題が多い。シングルナノ研究の学術的学理を確立しつつコンソーシアム等の研究拠点で応用技術に結びつけることにより、世界をリードする学術的成果と技術イノベーションを生み出すことが期待される。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

EUVリソグラフィ技術開発が、露光装置ユーザである半導体メーカーが求める光源出力が「少なくとも450-500W」であるのに対して、2014年2月のSPIE国際会議でEUVL装置メーカーのASMLが発表した光源出力は70Wに留まり、またその発光持続時間は6分にすぎなかった。12月には出力100Wの光源の動作を実証したとの報告もあり、出力は徐々には上がっている。ただし、ユーザが求めるレベルとの間のギャップはまだ大きい。この現状から、台湾の大手ファンドリーメーカであるTSMCでは、EUV露光装置技術開発が遅れていることから、40nm世代で導入したArF液浸露光技術を、マルチパターニング技術と組み合わせて、28nm,20nm,16nm,10nm世代に渡って利用することを明言している。また、米国インテルも「EUVなしで7nm実現」に向けた検討を開始した。さらに、2014年からIBMが7nm先端デバイス開発プロジェクトを開始した。これらの状況から、ArF液浸技術の延命と共に、ナノインプリント、DSA等の新リソグラフィ技術、シングルナノメートルに適した 新デバイス開発が加速されると考えられる。2014年のSPIEやEIPBN (Electron, Ion, Photon Beam and Nanofabrication)でもDSAのセッションが設けられ、実用化にむけた活発な議論がされた。

［注目すべきプロジェクト］

日本では㈱EUVL研究開発センター（EIDEC）がEUVLプロジェクトと共に、サブ10nmパターニングの研究として誘導自己組織化（DSA）研究プログラムが追加された。

米国では、2014年からIBMが7nmの先端半導体開発のために5年間で300億円の研究プロジェクトをスタートさせた。欧州では、2014年から3年間のEU研究プロジェクト” Single Nanometer Manufacturing for Beyond CMOS devices“がスタートした。中国では、2014 年から 2 兆円の投資を先端半導体研究開発に対して行う。韓国では、2014年から5年計画で、50億円投資する「先端半導体素子プロジェクト」を開始した。

（５）キーワード

・微細加工、リソグラフィ、レジスト、露光装置、シングルナノメートル、サブ 10nm
・EUV、ArF、液浸、ダブルパターニング(SADP)
・電子ビーム直描、マスクレスリソグラフィ（ML2）
・ナノインプリントリソグラフィ（NIL）
・自己組織化、誘導自己組織化材料、DSA（Directed Self Assembly）、ブロックコポリマー

（６）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	◎	↘	大学や研究機関(東大、京大、東工大、東北大、早大、大阪府立大、兵庫県 立大、AIST など)において自己誘導組織化（DSA）やナノインプリントリソグラフィ（NIL）の基礎研究が行われており、基礎研究は世界的なレベルある。NILについて、CRESTプロジェクト「超高速ナノインプリントリソグラフィ技術のプロセス科学と制御技術の開発」(H20-H25年度)では20nmレベルのCMOSリソグラフィに対する研究成果が出ている。しかし、このCREST終了はNIL、DSA等のサブ10nmパターン形成研究の国家プロジェクトはなく、応用物理学会の「シングルナノパターニング新領域研究グループ」（2012年1月設立）で自主的な産学連携情報交換活動が行われているのみである。
	応用研究・開発	○	↗	DSAに関しては、複数の装置・材料メーカー （JSR、東京応化、東京エレクトロン応用研究など）、デバイスメーカー（東芝） において研究開発が行われている。また、NEDOの「超高密度ナノピット磁気記録の研究開発（グリーンＩＴプロジェクト）により、周期12nmのドットパターン形成に成功している。2013年からは、EIDEC内にDSA材料・プロセス研究を行うDSAプログラム追加され、急速に応用研究の機運が高まっている。
	産業化	○	→	半導体リソグラフィとしては、極端紫外線リソグラフィ（(EUVL)が1Xnmの有力候補として国家プロジェクトで推進されており、産業化が期待されるが、低い光源パワー等の問題により当初の2015年からの量産展開が遅れる状況になっている。DSAによるシングルナノパターン研究が急務であり、デバイスメーカー（東芝）では、ビアシュリンクプロセスにDSAの適用を目指した開発が進んでいる。複数の企業から、自己組織化ナノ加工を用いた製品のデモが発表されているが、まだ市場が小さく本格的な立ち上がりとはいえない。NILについては、キャノンが2014年2月に米国のベンチャー会社であるMolecular Imprint（MII）の半導体製造ナノインプリント装置部門を回収し、東芝と共に20nm以下のフラシュメモリ製造へのナノインプリント適用検討を開始した。
米国	基礎研究	◎	↗	ブロックコポリマーを用いたリソグラフィの概念は1997年にプリンストン大から提案、DSAの概念は2003年にウィスコンシン大から提案されたものであり、現在もウィスコンシン大、テキサス大、スタンフォード大、NIST、MITなどで世界をリードする精力的なDSAの基礎研究が進められている。ている。従来のPMMA-b-PSを用いたDSAではサブ10nmパターン形成を行うことが困難であり、新規のDSA材料開発研究が行われている。 さらに、DSAを用いた回路パターン形成プロセス研究も行われている。また、ミネソタ大で発明されたNILは、現在はテキサス大やプリンストン大で研究が進められている

	応用研究・開発	◎	↗	半導体生産用NIL装置は、モレキュラ・インプリントが開発をリードしている。IBM がナノインプリントでFinトランジスタ試作している。DSA に関しては、複数の装置材料メーカー（アプライド ・マテリアル、ダウ・ケミカルなど）、デバイスメーカー（IBM、グローバルファンドリなど）からの学会発表があり、特にIBMを中心に研究開発が盛んである。IBMは2014年7月に、ビッグデータやクラウド対応の機器に使う最先端の回路線幅7nm半導体開発のために、5年間で約3000億円の投資を行うことを発表している。電子デバイス、光学部品、バイオ応用に関しては大学で盛んに研究されており、NSFからかなりのファンドが投入されている。
	産業化	◎	↗	ニューヨーク州立大学（SUNY）ナノスケール理工学部（CNSE）において、2011年9月から次世代半導体技術開発を世界の半導体大手5社（米Intel、IBM、Glob-alfoundries、台湾TSMC、韓国Sumsung電子）が約3500億円を共同出資して「Global 450 Consortium(G450C)」行っている。IBMを中心とする次々世代の14nm微細化先端半導体開発とIntelを中心とする450mmウエハによる半導体デバイス製造の実用化の２つの研究開発テーマからなるプロジェクトであり、５年以内の目標達成を目指している。2015年から450mmプロセス試作が開始される予定である。 SEMATECHが中心となり、EUVLと共にNIL、DSAの半導体リソグラフィ応用研究が進んでいる。IBMを中心に、材料・レジストメーカー（ダウ・ケミカル）、装置メーカー（アプライドマテリアルズ）が協力し、トップダクンのリソグラフィとブロックコポリマーを組み合わせたDSAリソグラブイの実用化が現実的になってきており、パターン欠陥評価結果や位置精度、シミュレーション技術などの実用化に即した検討結果が多く発表されている。
欧州	基礎研究	○	↗	複数の大学や研究機関(ドイツ、オーストリア、フランス、スペインなど)において、LSI応用分野に限らないDSAやNIL材料の研究が行われている。また、NILによるブロックコポリマーへの直接パターニングなどの研究が行われている。” Single Nanometer Manufacturing for beyond CMOS devices“のEUプロジェクトが2013年1月から2016年12月までの3年プロジェクトとして進められており、研究の中心は大学であるが、IBM、IMEC、EVG、oxford Instruments等のEU企業も参画している。ナノインプリント等によるサブ10nmプロセス研究、グラフェン等の新材料による先端デバイス等を研究開発目標としている。
	応用研究・開発	◎	↗	450mmウエハに対応する製造ラインを欧州に構築することと、サブ10nmのプロセス技術の開発の可能性を探ることを目的とした「Enable450」3年プロジェクトが2013年4月に発足。ASML、IMEC、LETI、フラウンホーファー研究機構等が参加する。米国の G450Cとの連携も目指している。 コンソーシアム（IMEC、CEA-LETI）においてDSA応用研究の研究開発が盛んである。IMECは、東京エレクトロン、AZエレクトニックマテリアルス、ウィスコンシン大学との提携により、300mmファブ互換DSAプロセス研究開発を行っており、LETIもArFリソグラフィおよびNILによるガイドパターンを用いたDSA研究を進めている。
	産業化	○	→	ASMLが 2X, 1Xnmリソグラフィツールとして半導体量産用EUV装置を生産しているが、量産に必要とされる光源出力が450-500Wであるのに対して2014年2月のSPIE国際会議での発表では70W（発光持続時間は6分）に留まっている。また、STマイクロやインフィニオンはコンソーシアムに参加しているが、まだデバイスメーカーによる研究開発成果や有力な応用デバイスのデモはない。
中国	基礎研究	×	→	微細加工の国際会議（米国EIPBN、欧州MNE、日本MNC）での発表件数はきわめて少なく、LSI以外の用途（ロール・ツー・ロールなど）向けの発表はあるものの、LSI 向けの基礎研究に関する目立った発表はない。
	応用研究・開発	×	→	目立った活動は見られない。
	産業化	△	↗	2014年の政府からの半導体補助金約2兆円と推定されており、先端半導体製造装置・プロセス・技術研究開発へ精力的に投資している。サムソンが西安に建設したNAND工場が稼働し、半導体国産化を国策としていることから、いずれ技術移転が起こると考えられ、今後急速に成長することが予想される。

韓国	基礎研究	○	→	KAIST、POSTECH、ソウル大で 2000年代前半から、主に米国帰りの研究者によって自己組織化を利用したナノ加工の研究がなされている。ナノインプリントでは、国立機械研究所（KIMM）およびソウル大学などにおいて、基礎研究が行われている。DSA研究については、ハンヤン大学、 KAISTなどで基礎研究が行われている。国際会議（米国EIPBN、欧州MNE、日本MNC）での発表件数は2013年度から減少している。
	応用研究・開発	○	↗	超微細構造を利用した、半導体、光学、バイオ応用に関して、盛んに発表がなされていて、近年の学会動向をみると、多くの研究機関の参入がある。サムソンが、モレキュラ・インプリントの半導体装置を導入し、フラシュメモリ用パターンの試作などリソグラフィへの適用研究開発を行っている。2014年から5年計画で、「先端半導体素子開発プロジェクト」を政府と産業界との共同出資（約50億円）で開始。産官学共同研究により、半導体装置および材料の基礎技術開発を目指す。
	産業化	○	↗	韓国特許の出願状況を見る限り、サムソンがこの分野で多くの研究開発を行っていると考えられ、また、大学などへの資金提供もなされている。サムソンがASMLのEUVリソグラフィ装置を導入し、半導体への適用研究を継続している。特許出願状況をみると、次世代リソグラフィに対しては欧米日の動向を注視しながら、あらゆる方向への対応に準備をしている。
台湾	基礎研究	○	↗	国立台湾大などで、基礎的な検討がなされていて、DSA関係のプロジェクトが立ち上がっている。
	応用研究・開発	○	↗	半導体応用を目指した研究が散見される。
	産業化	○	↗	TSMCにおけるシングルナノメーター対応のリソグラフィ技術について、EUVを第一候補として開発を加速している。また、NIL、DSAについても、半導体リソグラフィへの応用分野に興味を示している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（7）参考資料

1）ITRS 2013 Lithography, http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/2013Chapters/2013Litho.pdf
2）IMEC, http://www2.imec.be/
3）LETI, http://www-leti.cea.fr/en
4）SEMATECH, http://www.sematech.org/research/litho/
5）EIDEC, http://www.eidec.co.jp/
6）SPIE Advanced Lithography, http://spie.org/advanced-lithography.xml
7）EIPBN, http://eipbn.org/.
8）Abstract of the 58th EIPBN, Washington, DC , May 27-30, 2014.
9）次世代リソグラフィワークショップ予稿集、平成 26 年 7 月 17～18 日、東京工業大学　蔵前会館　主催　応用物理学会　次世代リソグラフィ研究会
10）http://cordis.europa.eu/project/rcn/104931_en.html
11）http://www.nikkei.com/article/DGXNASGM1000V_Q4A710C1MM0000/

12）http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NED/20140325/341956/
13）http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20130628/290463/?ST=SCR
14）http://eetimes.jp/ee/articles/1408/06/news059.html
15）http://www.sangyo-times.jp/article.aspx?ID=1077
16）http://www.sangyo-times.jp/article.aspx?ID=1156
17）http://eetimes.jp/ee/articles/1304/02/news035.html

３.５.９　ボトムアップ型プロセス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

ある条件下でナノスケールの構造が自発的に形成する自己組織化をはじめとして、二つ以上の分子がさまざまな相互作用で集まって作られるボトムアップ型プロセスを利用し、個々の原子や分子から設計・制御して構造体を作り上げ、革新的な機能を持つ新材料や新デバイスの創出を目指す研究開発領域である。原子・分子制御手法の向上、ナノ粒子の集合状態の理解と制御・作製手法の確立、設計手法の確立、自己組織化機構の理解と構造制御性の向上などの研究開発課題がある。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

トップダウン型プロセスによる微細加工技術の進展と共にデバイスの微小化が実現されてきたが、その限界が見え始めた現在、ボトムアップ的に原子・分子をパーツとして組みあげる自己組織化などのプロセスを活用して形成された新しい材料・デバイスが注目されている。ボトムアップ型プロセスの意義は、分子・ナノ物質などの自己集合・自己組織化過程によるもので、トップダウン型プロセスでは通常なしえないような、原子・分子・ナノレベルでの機能構造作製法を確立することにある。加えて、空間の狙いの位置に狙いの構造を形成する技術へと発展するポテンシャルも秘めている。人為的な構造作製技術が及ばないスケール領域をカバーするとともに、自発的な省エネルギープロセスで構造作成がなされるという利点もある。十分に発展しているトップダウン型プロセス（マイクロファブリケーションなど）を補うもの、あるいはこれと融合して新技術を生み出すという意義もある。

［これまでの取組み］

ボトムアップ型プロセスに関する研究は、自然界において営まれている自己組織化プロセスに関する研究に端を発し、それらの原理を人工的に展開し、狙いの分子ナノ構造を形成する研究へと発展してきている。自己組織化、超分子による研究は大変盛んで多くの研究成果を生み出してきた。それらは、分子、ナノ、メソの分野で様々な成果を上げ、科学的に評価されている。分子の自己組織化に向けたアプローチとしてさまざまなものがあるが、中でも「静電相互作用による自己組織化（交互積層法）」および「自己組織化膜（SAM：Self-Assembled Monolayer）」という 2 つが注目 を集めてきた。

例えば、有機化学の分野では、藤田誠（東京大学）らが、自然界では生体分子が活用している弱い分子間相互作用に着目し、それらを人工的に設計することで高次の一義的な超分子ナノ構造体が形成されることを発見している。材料科学の分野では、空間の狙った位置に単結晶成長が可能な金属触媒を活用したナノワイヤ構造体に関する自己組織化研究が盛んである。また、ナノ構造形成に留まらず、これらのナノ構造特有の機能・物性を発現させ、多種多様なデバイスへと展開されるに至っている。

一方で、自己組織化やそれに関連する研究は、純粋な科学的観点からすでに幅広くなされており、一部の例外を除いて、これまでの研究の先鋭化に留まり、ボトムアップで作られる分子系・物質系の新しい類例を増やしているに過ぎない面も見受けられる。プ

ロセス開発・技術開発への新たな取組みがそれらの従来研究の成果に埋没しがちであり、技術としての展開の焦点が絞りきれていない面もある。

ボトムアップ型プロセスの真の意義を問うため、自己組織化構造作製に関する学術的研究だけでなく、ボトムアップ型プロセスの現存技術の問題点と動向をマクロスコッピックな材料やシステムへの反映という観点から典型的な例を示す。ボトムアップ型プロセスが、実用技術となりうるためには、

(a) ナノレベルでの精密な構造作製ができるか、
(b) 単純ナノ構造ではなく意図したような複雑な構造を作ることができるか、
(c) マクロスコッピックな規模で簡易・安価に作ることができるか、

という条件が満たされなければならない。これらの観点から、現在アクティブに研究されている以下の例を検証する。

例１：規則性多孔性物質

メソポーラス物質、MOF (Metal Organic Framework)本技術は、わが国が強い分野であり、非常に単純な手順の組み合わせで、精密なナノ空間構造が得られ、量も大量に得られる。一部の企業の協力によるプラント化（太陽化学関連、BASF 関連）も試みられている。これは上記条件の (a), (c) を満たすことができる。一方で、得られる構造は正確ではあるが非常に単純なナノポア構造であり、(b) の条件を満たすように微細構造を複雑に組み立てられるわけではない。

例２：DNA Origami

本技術は DNA の相補的な塩基対形成による自己組織化によってボトムアップ的に任意の構造体を作り出すものである。2006年P. W. K. Rothemundの発表（Nature 2006, 440, 297-302.）以来多数の研究者により精力的に研究されてきた。DNA の作成技術および DNA Origami の設計技術が確立されている現状では、ナノレベルで正確な構造を思いのままに作り出せるということで (a), (b) の用件を満たすものである。しかしながら方法に致命的にかけているのが、(c) の観点であり、これを克服するのはきわめて困難であり、本技術が純科学的な研究に終始してしまう最大の要因である。

例３：交互積層膜

親水処理（あるいは疎水処理）した基盤上に、正負の電解質ポリマーを交互に吸着させ、自己組織化させることにより有機超薄膜を製膜する技術であり、本技術は、(a) の構造作製の精度を層の厚さ方向のみに限定し、(b) と (c) の条件を満たすものである。非常に簡単な操作でナノメートルオーダーの薄膜を任意の順序で積層しうる技術である。これまでは、ビーカーレベルでの自動積層装置などのプロセス化がなされてきたが、近年スプレイ法によるナノ薄膜作成技術が開発され、大掛かりなナノ積層膜の作成が可能になった。例えば、白鳥（慶應大学）らのベンチャー企業による試みでは、洗車機にスプレイ法を取り入れことにより、車の車体をナノ薄膜でコーティングする例も実証されている。本法では、一層の膜面内のナノ構造制御がなされればすべての条件を満たしうることになる。

いずれの技術にも欠けている部分があり、また課題も浮き彫りになっており、この課題を解決できないとボトムアップ技術として展開できない。

これらは、科学研究費補助金・特定領域研究「フォトクロミズムの攻究とメカニカル機能の創出（代表：立教大学特任教授　入江正浩）平成 19～22 年度」や新学術領域研究「分子ナノシステムの創発化学（代表：大阪大学特任教授　川合知二）平成 20～24 年度」、JST CREST プロセスインテグレーションに関する２つの領域で推進されてきた。ボトムアッププロセスの行き着き先の一つであるトップダウン技術との融合を示すはずであるが、各論研究に終わっている感も強い。

ここでは詳しく取り上げないが、ボトムアップ型プロセスには、SPM を用いる原子レベルの制御や結晶成長技術も含まれる。前者は、歴史的には Eigler らによる STM 原子操作に遡るが、その後、AFM による原子操作、シリコン・化合物半導体陽極酸化、チップアレイを用いた加工スループット向上、ディップペン・リソグラフィー、STM 電界放出電子によるレジスト露光、インデンテーション、スクラッチ、熱機械加工、自己組織化単分子膜（Self-Assembled Monolayer, SAM）加工、IBM Millipede、電界蒸着、STM/AFM CVD、SNOM リソグラフィ、SNOM アブレーション、SNOM CVD などの技術が提案・実証されてきた。後者は、ナノ化・集積化・ヘテロ化・異種材料融合化が要求される領域について、有機材料・無機材料のナノスケール単結晶材料の学術研究が従来の単結晶試料の限界を打ち破りつつある。異なる種類・機能の単結晶ナノスケール試料を同一のプラットフォーム上でインテグレーションすることが可能となる。

［今後必要となる取組み］

ボトムアップによるアプローチの本来の意義は、ただ単に集合系・複合系の研究例を積み重ねることではなく、分子やナノ物質から出発してマクロの世界につなげることにある。ボトムアップ型プロセスを介して形成される新奇機能性ナノ構造体を“新しい機能”を生み出す材料・デバイスへと展開することが求められている。これまでにも、プロトタイプは多く示されてきたが、真の意味で応用展開された材料・デバイスは未だ存在していない。その要因の代表的なものとして、デバイス中の狙った位置へのナノ構造体のアライメントが難しい点と統計的なバラツキ等が挙げられる。トップダウンによる微細加工技術により形成されるデバイス群は極めてバラツキの小さな特性と空間の狙った位置へ所望のデバイス構造を形成する事を可能にしている。この両技術の差異が、現在自己組織化ナノ材料をデバイス群へと展開する大きな阻害要因となっている。従って、この問題点を解決する方策としては、統計的なバラツキの小さなデバイスを自己組織化プロセスで組み上げる革新的な手法を創出するか、若しくは統計的なバラツキを許容しながら逆にそれらを活用したデバイスへと展開する方向がある。更に、生体に倣ったより高次なナノ構造体の形成という観点では、3 次元の狙った位置への原子・分子の選択性に関する科学技術を更に深化させる必要がある。

世界に先んじ国際的競争に打ち勝つためにも、現在、ボトムアップ型プロセスの真の意義を問うべき岐路に立っているといえる。

（３）科学技術的・政策的課題

ボトムアップ型プロセスを用いた機能性ナノ構造形成・物性・デバイスに関する研究分野は、本質的に分野横断的な分野であるために、物理的な視点と化学的な視点の両方に関する科学的知識が必要不可欠である。また材料によらない普遍的なナノ構造形成のメカニズムの解明、形成されたナノ構造が生み出す物性機能、更にはそれら構造・物性を活用した新奇機能デバイスの提唱に至る幅広い議論を行えるコンソーシアム等をトップダウン的に形成して、産官学連携による学術研究の推進が望まれる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

ボトムアップ型プロセスを用いて形成されたナノ構造に外部刺激（電場・磁場）を加えることでさらに構造内に階層構造を形成し、機能を発現する報告が出始めているが、ここ数年の研究動向で目を引くのは、力学的（メカニカルな）動作と機能分子材料のカップリングである。これまで、印加刺激は、電気・電子的あるいは光学的であることが多かったが、より汎用技術に通じる力学応答が研究対象として考えられてきている点は、ボトムアップ型プロセスで作製された機能材料がより汎用に使われるという観点から注目すべき動向である。この動向は、(a) ボトムアップ型の機能集積による力学応答の発現と (b) 力学的刺激による分子系のコントロールの二つに大別される。

(a) ボトムアップ型の機能集積による力学応答の発現（化学→力学）

分子の異性化や分子認識などの分子機能を集積化・組織化させて、目に見える力学的な事象（物体の変形など）に反映させるものである。海外のいくつかの例では、DNAの二本鎖形成、分子シャトルの動きなどを微細チップの動きに反映させたものがある。日本でも、フォトクロミック分子を利用した先駆的かつ顕著な研究成果が報告されている。アゾベンゼンの光異性化（池田・東工大ら）、ジアリルエテンの光異性化（入江・立教大ら）、シクロデキストリン包接体の形成やその光異性化（原田・大阪大ら）を可視レベルの物体の変形や会合に反映させたものがある。このような研究動向は、国際的に活発になってきており、ボトムアップ的に機能を集積するというコンセプトが実現されつつある。ただし、多くの例は現象のデモンストレーションにとどまっている。

(b) 力学的刺激による分子系のコントロール（力学→化学）

メカノケミストリーとして近年注目されている分野であり、材料を力学的に変形させると、分子の異性化や二次結合（水素結合など）の形成などを制御できるものである。イリノイ大学のグループにより報告されたメカノクロミズム特性（力学的な刺激により色が変化する）を有する高分子材料が脚光を浴びた。自己修復材料などへの応用が提案されている。問題点は、マクロな力学的動きと分子レベルの構造との関連が必ずしも明確ではないことが多く、機能は出るがその精密なメカニズムはブラックボックス化している傾向がある。その欠点は、ボトムアップ型による組織体形成と組み合わせることによって回避できる。有賀(NIMS)らの例では、界面に分子マシンを集積させ界面の一方向から力学的摂動を加えることによって、合目的的に分子マシン変形を制御できることを報告している。本方法によれば、手の動きのような基本動作で所

望の分子を捕捉・開放したり、レセプター構造の微調節による生体物質の高度センシングが可能になることが示されている。後者のボトムアップ構造に立脚した力学的なマクロな動きによる分子機能の制御は、いわば「手で分子を操る技術」であり、類似例を見ない革新技術であるが、世の中を動かすためには時間がまだ必要である。

(c) 生物機能に学んだデバイスの構築

既に撥水効果や構造色などの物性において、バイオミメティックな材料を作るという研究はなされているが、これらはあくまで微細加工レベルでの話であり、本来生物が有している分子レベルでの機能性を実現している訳ではない。生物が本来持っている真の物質制御系である分子レベルでの生体系機能を模倣し、改造することが出来るようになった場合、その効果はさらに大きなものになる。

(d)ナノスケール単結晶科学

多結晶形態の有機材料においては電子移動度が無機材料と比較して圧倒的に低いことが問題であったが、単結晶有機ナノ材料によりこの問題点は克服されつつある。同様の事例は、グラフェン研究でも見られ、粒界の存在しない単結晶グラフェンを空間の狙いの位置に制御することがその応用展開において最も重要な課題となっている。シリコンにおいても、単結晶シリコンナノワイヤを用いることによって、従来はアモルファスシリコンのみが展開不可能と考えられていた低温プロセスへの展開が可能になりつつある。加えて、ナノスケール単結晶試料の極めて大きな降伏応力を活用して、無機材料の適用が不可能であると信じられてきたフレキシブルなデバイスへの展開が始まっている。

［注目すべきプロジェクト］

- WPI（世界トップレベル研究拠点プロジェクト)において、物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス（MANA）が、ナノテクノロジーからナノアーキテクトニクス（ナノ建築）へのステップアップを具現化する試みを行っている。
- JST　ACCEL において、「自己組織化技術に立脚した革新的分子構造解析プロジェクト」が開始された。
- 米国では、ハーバードを中心とした研究グループがナノスケール単結晶材料の有用性を実証しつつあり、その研究開発プロジェクトも超高効率なエネルギー変換素子（太陽電池・色素増感太陽電池・水の電気分解・熱電変換素子等）から生体分子分析（一分子解析技術）に至るまで幅広いものが展開されている。

（５）キーワード

自己組織化、超分子化学、ナノワイヤ、機能集積・材料化、光メカニカル機能、メカノケミストリー、選択性、マクロとのカップリング、トップダウンとの融合

（６）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	◎	↗	藤田（東大）グループが金属錯体の自己組織化により形成されたナノ空間に有機化合物を配列させ、結晶構造解析を行える画期的な結果を報告している。 基礎研究レベルで被引用数が高いものは、原田、山口（大阪大学）らによるPhotoswitchable gel assembly based on molecular recognition (Yamaguchi et al., Nat. Commun. 2012)、有賀G（NIMS）と北川G（京大）によるDirect Carbonization of Al-Based Porous Coordination Polymer for Synthesis of Nanoporous Carbon (Hu et al. J. Am. Chem. Soc., 2012).が挙げられる。
	応用研究・開発	○	→	様々な研究分野で自発的に形成される自己組織化構造に対する関心は極めて高いが、産と学が共同で取り組む例は多くない。
	産業化	○	→	素材産業等では経験的に既に利用しているケースも多々あるが、意識的に自己組織化プロセスを取り入れ、成功している例は決して多くない。
米国	基礎研究	○	↗	自己組織化・自己集合の原理的な基礎研究と異分野との融合は極めてスピーディーに行われている。
	応用研究・開発	○	↗	多様な価値観に基づいた社会であるので取り組みにバラエティがあり、結果としてバランスが取れた展開を見せている。特に、得られた機能物質のエネルギー系・バイオ系への応用研究に力を入れていることが論文動向からもうかがえる。 米国の多くの教授は、自身の開発した自己組織化科学技術を基にベンチャー等を興しており、目的型基礎研究の進展が強く感じられる。
	産業化	○	↗	多くの教授が研究室で開発した技術を基に会社を興しており、基礎研究と結びついた産業技術力は柔軟性に富んでおり、将来性を感じさせる。 IBMは、ブロック共重合体のミクロ相分離を利用したエア・ギャップやDNA折り紙構造を集積化した足場とする微細加工など、自己集合現象と現行のトップダウン･プロセスを組み合わせ、低コストで高精度微細化を実現しようとしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	欧州には、基礎研究に力をおく社会的基盤と学術的余裕がある。自己組織化ナノワイヤに関しては、Sweden Lund大のSamuelson教授を中心としてグループが精力的な研究活動を行っている。
	応用研究・開発	○	→	欧州全体としては、必ずしも応用研究がうまく展開しているとは思えないが、ドイツのMax-Plank研究所等が精力的な応用研究開発を進めている。
	産業化	○	↗	米国と比較すると大手企業が自己組織化技術を応用展開する傾向が強い。BASF 社の MOF 材料への投資がよい牽引例となる可能性もある。
中国	基礎研究	△	↗	中国の自己組織化研究は、米国帰りの数多くの新進気鋭の研究者によって非常にアクティブに進められている。
	応用研究・開発	○	↗	基礎がおろそかでも、人員的な強みで産業化してくる可能性がある。成果主義を徹底しており、応用研究の発展と基礎研究の衰退も予想される。ボトムアップで材料を作ってくる研究者の層が厚い（応用への即効性が予想される）。
	産業化	○	↗	自己組織化研究の成果を産業へと発展させる気配はあるが、未だそのステージにまで達していない。

韓国	基礎研究	○	→	ソウル大・KAIST等の多くの研究室で自己組織化に関する研究が行われており、著名な学術論文への掲載が多々見受けられる。
	応用研究・開発	○	↗	論文投稿状況などを見ると、韓国はデバイス化が圧倒的に強い。それらは既成技術に立脚した応用研究である。
	産業化	○	→	自己組織化研究の成果を産業へと発展させる気配はあるが、未だそのステージにまで達していない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

３．５．10　ナノ計測

物質や材料の物性は、ナノスケールの構造に起因する。さらには、複雑な現象（生命現象を含む）も、ナノスケールの領域における原子または分子間の相互作用によって理解できる場合が多い。したがって、材料（無機、有機、生体を含む）の物性や諸現象の起源を明らかにするには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を、できればin-situ(その場)で､直接計測できるナノ計測技術が求められている｡ナノ計測技術は、物性や現象の起源を理解し、それを制御するための方針を立て、そして実現するための手段を確立する一連の過程において重要な役割を担うものであり、幅広い学術・産業分野・医療の発展にとって欠かせないものとなっている。

ナノ領域の計測・解析においては、例えば、選択したナノ領域を実空間で直接見る技術に加え、回折・干渉現象を使って逆格子空間で観測しフーリエ解析によって実空間像を得る手法がある。探針を用いて対象物の構造や物性を直接観察する走査型プローブ顕微鏡(SPM)は実空間の直接観察であるが、電子線、中性子線、ミュオン、陽電子などの粒子線ビーム、および光・X 線・ガンマ線などの電磁波を使ったものでは、実空間・逆格子空間の情報を得ることができる。また、超短パルス光はそれ自身、あるいは、他の計測手法と組み合わせることにより、物質の動的な応答を見ることができる。

以下では、3.5.10.1 で走査型プローブ顕微鏡、3.5.10.2 で電子顕微鏡、3.5.10.3 で放射光・X 線によるナノ計測、粒子線のうち陽電子を用いた顕微計測、3.5.10.4 では超短パルス光を用いたナノ計測を取り上げた。

本報告書では、3.4.3 の記述のように、スピントロニクスが急速な進展を見ていることに鑑み､スピントロニクス計測に関連する磁気力顕微鏡(MFM)､スピン偏極電子顕微鏡、放射光によるナノ磁気計測につきより詳細な記述を行った。中性子は、そのスピンを利用した磁気散乱が磁性体のスピン構造の同定などに用いられる。ミュオンは磁性秩序や電子状態の測定あるいは元素分析などに、有力な計測手段である。しかし現状でこれらの測定法は、ナノスケール物性の評価手段としては力不足の感があり、本報告書では割愛した。

本報告書では、環境下のナノ計測にも重点を置いて記述した。第 2 章で紹介しているように、特に生命科学やエネルギー・環境用途の材料においては、水中や大気中、表面ナノ形状や異種界面の接合、摩擦の状態など、多様な環境場における“その場ナノスケール計測”へのニーズが増大しており、環境下での計測のニーズが多いことから、溶液中 SPM および環境制御電子顕微鏡(E-TEM)に詳しい記述をおこなった。

以上のように、取り上げた項目以外にもさまざまなナノ計測手法が開発され、実用に供せられている。しかし、限られた紙面の中でナノ計測のすべてを網羅することは不可能であるため、近年のトレンドとして重要なものに絞った。

３．５.10.１　走査型プローブ顕微鏡（SPM）

（１）研究開発領域の簡単な説明

尖鋭なプローブと試料の間に働くさまざまな近接相互作用を感度よく検出することにより、レンズを使わずにナノスケールの形状や物性を計測する顕微鏡を用いた研究開発領域である。これには走査型トンネル顕微鏡(STM)、原子間力顕微鏡(AFM)、走査型近接場光顕微鏡(SNOM) 、磁気力顕微鏡(MFM)をはじめ、さまざまな相互作用を使った多種類のプローブ顕微鏡が開発されている。

今後の開発課題としては、SPM をナノスケールの形状観測にとどまらず、ナノスケールの物性測定や特性評価、さらには微細加工技術に積極的に利用することが望まれており、特に、様々な環境下での計測を可能にするプローブおよびシステムの開発が望まれている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

SPM は先端が尖鋭な（先端の曲率半径が小さい）プローブと試料の間の近接場相互作用を感度よく検出することでナノスケールの形状や物性を計測するレンズを使わない顕微鏡で、原子分解能での計測も可能である [1)]。レンズを使う顕微鏡では波長と開口数で決まる回折限界で分解能が制限されるのに対して、SPM では距離とともに急峻に変化する近接場相互作用を利用することにより高い分解能を実現している。SPM には表面の構造に非常に敏感であるという特徴があり、透過電子顕微鏡(TEM)では難しい表面の情報を得ることができる。また、TEM や SEM では、特殊な装置を用いない限り真空中での試料の観察しかできないのに対して、SPM では真空中のみならず、大気中、液中での観察も可能である。また、低温・極低温、高温、強磁場中といった極限環境下での観察例も報告されている。SPM で計測する近接相互作用の種類はトンネル電流、原子間力、交換相互作用、エバネッセント光、摩擦力、キャパシタンス、熱、コンダクタンスなどと豊富で、これらの選択によりさまざまな物性量を測定することができるのもその特長である。

SPM 分野の開発課題は、さらなる高速化、安定性・信頼性の向上、さらには、異種の SPM 間の複合、あるいは、SPM と電子顕微鏡との複合によって、さらに深化したナノスケールの形状と物性の情報を得ることである。

［これまでの取り組み］

1981 年に IBM チューリヒ研究所の G. Binnig, H. Rohrer らが走査型トンネル顕微鏡(STM) を発明 [2)] して以来、AFM[3)]、SNOM[4)]をはじめとする初期の重要発明が次々と行われた。これらのうち、トンネル電流を用いる STM は、極めて簡単な原理と装置によって原子分解能観察を可能とし、ナノ計測分野に大きな革新をもたらした。しかし、STM には、導電性の試料しか計測できないという制約もあった。この問題を解決したのが AFM である。

・AFM

探針を試料表面に近づけた時に探針と試料の間に働く相互作用力（ファンデアワールス力）を検出する。そして、この相互作用力が一定となるように、探針―試料間距離を制

御する。この状態で、探針を試料に対して水平方向に走査すると、探針は試料表面の凹凸をなぞるように上下するため、その際の探針の軌跡から表面形状を知ることができる。AFM は、半導体、金属、絶縁体を含む幅広い試料の観察や、液中、大気中、真空中を含む様々な動作環境での観察に用いることができるため、STM に比べて格段に汎用性が向上している。また、AFM は、表面構造計測だけでなく、表面物性計測、表面形状制御・操作、表面間力（原子間力、分子間力など）の計測にも用いられ、幅広い学術・産業分野における研究を支える基盤技術となっている。

1986 年に AFM が発明され[3]、その後の約 5 年間にわたる初期の AFM 技術開発は、IBM 社の研究所が中心となり、いくつかの大学と共同で行われた。この間に、現在用いられている主な AFM 動作モードの原型も発明された。具体的には、コンタクトモード AFM[2]、振幅変調 AFM（AM-AFM、タッピングモード AFM とも呼ぶ）[5]、周波数変調 AFM（FM-AFM、非接触 AFM とも呼ばれる）[6]などの動作モードが挙げられる。その後、AFM 技術が世界中に広まり、米国、欧州、日本を中心として今日に至るまで技術開発が進められている。1990 年代から 2000 年代前半にかけて開発された技術は、AM-AFM もしくは FM-AFM を用いた 2 つの大きな基本技術体系と、各応用分野に特化して発展した多数の応用技術体系に分類できる。米国が中心となって開発された AM-AFM 技術は、高分子・生体分子試料などの比較的柔らかい試料の表面構造や力学的物性をナノスケールの分解能で、大気および液中で非破壊計測することを可能とした。欧州・日本が中心となって開発された FM-AFM 技術は、無機材料や低分子薄膜などの比較的平坦な試料の表面構造や電子物性を原子・分子スケールの分解能で、超高真空中で計測することを可能とした。一方で、半導体、生体試料、強誘電体、磁性体などの構造および物性をナノスケールで評価するための AFM 技術の開発も、米国、欧州、日本を中心として進められた。

・MFM

磁気力顕微鏡（MFM）は、1986 年の米国の IBM の研究所等による原子間力顕微鏡（AFM）の開発の翌年に、同じく米国の IBM の研究所等が AFM 探針に磁性体探針を用いることで磁気力を検出する顕微鏡として開発し、直ちに当時の光磁気媒体や長手磁気記録媒体、磁気記録ヘッドの磁区観察に応用された。その後 AFM 技術の進歩を取り入れ、MFM では計測感度向上のために探針の機械的共振を利用することが一般的になり、検出物理量は探針のバネ定数の実効的変化を引き起こす磁気力勾配となった。

遠距離力である磁気力を測定するために、観察試料の表面近傍に働く近距離の原子間力（ファンデルワールス力）と区別するため、磁気力が主となる距離まで探針を試料表面から離して行う必要がある。この制約条件の下で欧州では AFM で培った探針振動制御技術を積極的に MFM に応用し、探針振動検出器の検出感度向上や MFM 探針の小振幅励振等により磁気力計測の高分解能化・高感度化が図られてきた。しかし、高密度磁気記録媒体やナノ磁性体、磁性ナノ粒子等のナノ磁気計測には分解能や感度が不足する問題がある。MFM 計測には、AFM の場合と同様に、探針加振周波数一定の下での探針振動の振幅または位相を検出する振幅・位相検出方式の MFM が開発され、次いで共振周波数を検出しその変化量を一定にする周波数検出方式の MFM が開発された。これら

MFM の技術的進歩は主に欧米でなされた。

以上を背景として米国、欧州、日本等で多くの特色ある走査型プローブ顕微鏡（SPM）メーカーが生まれ、用途に応じ種々の MFM（大気雰囲気型、真空雰囲気型、大型試料ステージ型、等）が商品化され、現在では MFM は汎用の磁区観察装置として広く利用されている。同時に米国、欧州、日本等で SPM 用の探針メーカーが生まれ、MFM 探針として Si 探針等の先鋭探針に種々の磁性薄膜を成膜したものが商品化され現在に至っている。

・近接場顕微鏡(SNOM)

波長以下の微少な散乱体をプローブとして、その周りにできる伝搬しない光の場であるエバネセント場中に置かれた微小物体からの散乱光を検出することにより光の回折限界以下の構造の観測を可能にした顕微鏡である。実用的な SNOM の原型は 1984 年に Pohl らによって提示され [4]、最初のイメージングは 1985 年に行われた。その後、プローブとして細く伸ばしたマイクロピペットを用いる方法が開発され、ついで、細く引き伸ばした光ファイバーを用いる方法が開発された。大津らは、プローブの形状を工夫することによって高効率で近接場を得る技術を確立した。短針の先端部にプローブ光を照射して近接場を生み出すアパーチャレス SNOM も研究された。

これまでに出版されてきた SPM 関係の研究論文 29,000 報 [7] の内訳を世界地域別に分析すると、米国（7,406 報）、欧州（ドイツ、英国、フランス、スイスの合計、6,296 報）、日本（4,748 報）、中国（4,068 報）、韓国（1407 報）、台湾（875 報）、オーストラリア（751 報）の順となっている。特許出願数の比較では日本、米国、欧州、韓国、中国の順となるが、基本特許と重要特許の多くが米国から出願されていて、日本・欧州がそれに次いでいる。

市販 SPM 装置は日米欧での販売台数は飽和（一部減少）傾向であるのに対して、近年は中国を中心に日本以外のアジア・オセアニア地域での販売台数が伸びてきている。上述の世界地域別論文・特許件数に見られる通り、日本が SPM 技術の開発期に活発な活動を行ってきたことの甲斐があって日本製の SPM 装置の性能は優れている。国内においてはそれなりのシェアを維持しているが、海外では必ずしもあまり売れていない。需要地域が中国などの日本以外のアジア・オセアニア地域にシフトしてきていることが日本の SPM 装置メーカーの販売不振の原因となっている。

［今後必要となる取り組み］

SPM 装置を導入する側の産業分野や SPM 応用分野の研究者の立場になると、装置の基本性能はもちろん重要であるが、自分たちの用途に向いた機能と操作性、ユーザーインターフェースの実装が機種選定の際に重要となる。

・近年、SPM を含むナノ計測技術をグリーンサイエンスやライフサイエンスにおける研究課題の解決へと役立てることが強く求められている。これを推進するためには、固液界面における動的な物理・化学現象を原子・分子スケールで可視化できる AFM 技術の開発が望まれる。現在の AFM の再現性、安定性、分解能、定量性などの根本的な

限界は、主に探針先端の構造や化学状態で決まっている。したがって、これらの基本性能の向上させるために、原子・分子レベルで探針先端の状態を制御する方法の開発が望まれる。過去数年間で FPGA を用いた高速デジタル信号処理技術は長足の進歩を遂げた。この技術を用いたインテリジェントなリアルタイム制御法を AFM 計測に応用できれば、AFM の基本性能と機能性を格段に向上させられる可能性がある。

・MFM 装置においては、より高感度・高分解能な高周波磁場計測方法の検討や、試料磁化の交流磁場応答の非線形性を含めた評価手法の検討が上げられる。高周波領域では磁気力と電気力の識別、磁場と電場の識別が困難となるので、磁場と電場を識別できる計測方法の検討も今後必要と考えられる。

・SNOM 装置においては、スピン注入・蓄積の磁気光学的イメージングなど円偏光が関係する物性量の測定の学理と技術開発の必要性が挙げられる。

（３）科学技術的・政策的課題

SPM 技術は成熟し普及期に入っているため、産業界や各研究分野の SPM ユーザーと SPM 装置メーカーのマッチングを通じて一層の発展を実現することが求められる。

米国の国立科学財団（NSF）が進めてきた「国家ナノテクノロジー基盤ネットワーク（National Nanotechnology Infrastructure Network, NNIN）」では、全米の 14 大学がナノテクノロジー・ユーザー・ファシリティーのネットワークを形成している[8]。これらの大学には全米のみならず世界の研究者・技術者に向けて開かれていて、研究者・技術者は自分たちの研究テーマ実施のための利用申し込みを行い、施設を利用している。一方、SPM 装置メーカーはこうした大学に最先端の SPM 装置を納品してユーザーの利用に供するとともに、大学は SPM 装置メーカー技術者によるユーザー向けの先端 SPM 技術紹介セミナーを開催[9]して、ユーザーに最先端の装置技術を知る機会を与えるとともに、装置メーカー側にユーザーニーズを把握する機会を与える。こうした、ユーザーとメーカーのコミュニケーションが、ユーザーニーズに適合した SPM 装置開発に貢献していると考えられる。またナノエレクトロニクス・半導体技術分野を中心として IMEC などの国際的な研究開発拠点もまた SPM 装置メーカーとユーザーニーズのマッチングの場としての役割を担っている。

わが国では「ナノテクノロジープラットフォーム事業」[10]が米国の NNIN に相当し、その一環として実施している「走査型プローブ顕微鏡(SPM)実践セミナー」[11]とそのための教科書「走査型プローブ顕微鏡入門」[1]が功を奏して、広くさまざまな分野の利用者の必要を満たす日本の SPM 装置が開発されて、今後日本の SPM 技術が利用しやすい技術として世界をリードするようになることが望まれる。なお、ナノテクノロジープラットフォームの実施機関には SPM 装置の操作に習熟した高度専門支援スタッフがいて利用者の研究開発目的に適合した支援を提供することを通じて幅広い分野の研究者・技術者に SPM 技術の利用を広めている。

SPM がこれだけ広く普及すると、「A 社製の SPM で求めた値と、B 社製の SPM で求めた値は一致するか、もし一致しない場合どちらが正しいか、また、それは何故か」といった議論が浮上する。これに応えるため、国際標準化機構（ISO）の中で日本が幹事国を務める「ISO/TC 201 Surface chemical analysis」[12] で 2004 年に SPM を所掌する小

委員会（Sub-Committee）として「SC9 Scanning probe microscopy」を設置するなどして国際標準化活動を展開している[13)]。

AFM 技術の急速な進歩に比較して、その機能を十分に活用できる人材の育成は遅れている。AFM が幅広い学術・産業分野の研究開発現場で活用されるためには、AFM 装置のユーザビリティの向上に努める一方で、人材の育成を支援する方策も検討する必要がある。

MFM によるナノ磁気計測は、我が国が得意分野としてきた磁性材料や磁気デバイスの研究開発で国際的に優位に立つための基盤技術であるが、ナノ磁気計測に係わる市場は評価対象である磁性材料や磁気デバイスの市場と比較して小さいので、企業活動として大きな設備投資は困難であり大きな利益を上げることは容易ではない。このため我が国では近年、MFM を扱う国内の SPM メーカーの数が減少しており、国外の競争力のある SPM メーカーの進出が進んでいる。このため大学や国立研究所がリーダーシップを発揮して国際競争力のあるナノ磁気計測技術を国内の SPM メーカーと共同で開発し、必要とする産業分野へ利用を広く働きかけ、SPM メーカーが実用化する体制の構築が急務と考えられる。ナノ磁気計測の応用分野としては研究開発機器以外に、より市場の大きな製品検査装置への展開を図り直接生産活動に貢献することもナノ磁気計測が目指すべき方向と考えられる。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

現在の SPM 応用分野は多岐にわたり、半導体ナノエレクトロニクス、エネルギー・環境技術、バイオナノサイエンス、ナノテクノロジー・材料技術などでの研究展開が進んでいる。

- 半導体製造技術分野では、高精度な平坦度測定、寸法測長 critical-dimension AFM（CD-AFM），あるいは異物検査などで，破壊検査のできるインライン評価手法として 300 mm 径ウェハ対応装置の導入が進んでいる[14,15)]。
- トランジスタの微細化が進んで AFM による表面平坦性評価に加えて、ドーピング不純物やキャリア濃度の分布計測の手法が注目されている。走査型静電容量顕微鏡（Scanning Capacitance Microscope, SCM）や走査型拡がり抵抗顕微鏡（Scanning Spread Resistance Microscope, SSRM）を中心に、ナノエレクトロニクス研究開発コンソーシアム IMEC（Interuniversity Microelectronics. Centre）などで確立された後、各社で実用されてきた[16,17)]。
- 将来のデバイス技術を目指す先端的な研究分野でも、単一ドーパント原子トランジスタの実証に STM が用いられ[16)]、酸化グラフェンの還元と電気特性評価に AFM が用いられ[19)]、また、ナノデバイスの電子分光の研究に低温 STM/AFM が用いられる[20)]など SPM が中心的な技術として採用されている。
- エネルギーエレクトロニクス分野においても、米国国立標準技術研究所(NIST)、コロラド大学、米国再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory, NREL）のグループが $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS)薄膜多結晶太陽電池評価用の走査型マイクロ波近接場顕微鏡を報告[21)]するなど幅広く活用されている。

・SPM 型フォトマスクリペア装置 , EUV マスクリペア装置などは SPM によるマスク修正加工装置である。
・マルチプローブ SPM では，独立に駆動可能な SPM 探針を複数備えた機構によって，微細デバイスの直接電気特性評価、ナノワイヤ、カーボンナノチューブ（CNT）、グラフェンを始めとする新材料、あるいは単電子トランジスタに代表される新探求デバイスに対する各種物性評価に活用され、また、SPM による加工の高スループット化に用いられる技術として重要である。
・液中 AFM 技術には目覚ましい発展があった。AM-AFM の高速化によりタンパク質分子の動態を分子スケールで直接可視化できるようになった [22]。また、FM-AFM の低ノイズ化により液中での原子スケール計測が可能となった [23]。
・AFM による 3 次元計測法の開発と応用が活発化している。コンタクトモード AFM によるフォースカーブ測定を高速化したピークフォースタッピングなどにより表面の粘弾性分布計測が可能となっている [24]。一方、FM-AFM によるフォースカーブ測定を 3 次元化した方法により、固液界面における 3 次元水和構造の計測が可能となっている [25]。
・AFM で得る情報を増やして、物性の定量計測を目指す動きも盛んになっている。3 次元走査や、電圧・周波数スイープにより、情報を多次元化する方法や [26,27]、カンチレバーの振幅・位相を複数の周波数で検出し、情報を多チャンネル化する方法 [28]が提案されている。
・極低温・超高真空環境下での極限分解能計測技術も大きな進展を見せている。qPlus センサと呼ばれるクオーツ製の力検出器と、CO 分子探針を用いることで、分子内の構造を原子スケールの分解能で観察できるようになってきた [29]。
・MFM の計測方法の分野では、磁場強度が大きい試料表面近傍で磁気力のみを検出する計測方法が進展しており [30,31]、直流磁場勾配および交流磁場勾配の計測において 10 nm 以下の高い空間分解能が得られている [30]。この手法には磁性探針にその共振周波数と異なる非共振の交番磁気力を印加した際に発生する探針振動の周波数変調現象が利用されており、交番磁気力顕微鏡（Alternating Magnetic Force Microscope; A-MFM）と命名されている。さらに、観察試料から発生する交流磁場の発生場所の時間変化を計測できるストロボ磁場計測方法や、任意の観察方向の直流磁場の勾配を計測できるベクトル磁場計測方法も A-MFM の手法を応用して開発されている。さらに、本手法は原子分解能をもつスピン計測方法である超高真空雰囲気下での磁気交換力顕微鏡にも応用されている [31]。ここでは交番磁気力の発生に、低い周波数で変調したマイクロ波照射による探針磁化の強磁性共鳴による励磁が用いられている。
・直流磁場の値を計測する計測方法が A-MFM を応用して提案されている [32]。ここでは外部磁場がゼロのときに探針磁化がゼロになる探針を用いて、外部から直流磁場を印加して観察試料からの磁場を打ち消す零位法が用いられている。直流磁場と直流電場の同時計測方法が A-MFM の技術を拡張して開発されている。これらの研究は日本が中心になって進められており、プロトタイプ機の開発を行う産学間連携も行われている。MFM の磁性探針の分野では、永久磁石等を観察するために保磁力が 15 kOe 以上の高保磁力探針が開発されている。この研究は日本や欧州で主に進められている。

・高周波磁気デバイスへの応用の観点から、GHz 以上の高周波数領域での交流磁場の検出や強磁性共鳴を含めた試料磁化の交流磁場応答の計測に対するニーズがある。これに答えるため米国 NIST で開発された強磁性共鳴力顕微鏡（Ferromagnetic Resonance Force Microscope; FMRFM）の今後の展開にも注目したい。

［注目すべきプロジェクト］

・JST の先端計測技術・機器開発プログラムの中で、SPM 関係を含む研究開発から製品化への橋渡しが進められ成果を上げている。MFM については、試料表面近傍で磁気力のみを検出する計測方法である交番磁気力顕微鏡が秋田大学の齊藤らにより開発され、先駆的な成果を上げている。多機能な MFM 装置と高分解能 MFM 探針の開発を両輪とした研究開発が行われ、秋田大学、日立ハイテクサイエンス、日東光器、秋田県産業技術センターからなる産学連携チームで展開している。
・ナノテクノロジープラットフォーム事業の中では、SPM を含む先端機器の産学官研究者への共用と高度な技能を有する専任技術者による技術支援が遂行され、SPM 技術の応用展開推進に役立っているだけでなく、SPM ユーザーニーズと SPM 装置産業の先端技術のすり合わせ効果により実用性の高い製品開発に威力を発揮することが期待されている。米国では、ユーザーファシリティーが NSF の NNIN の他、DOE の各研究所や NIST で大々的に展開しているほか、DARPA グラント他により SPM 関連技術の開発が進められてきた。また NIST の物理計測部門では、半導体業界・コンソーシアムと連携して SPM を用いた表面粗さ、形状、長さなど表面ナノ計測分野の国際標準化活動をリードしている。
・日本学術振興会のナノプローブテクノロジー第 167 委員会において、AFM 技術に関する産学連携を推進する活動が行われている。
・金沢大学のバイオ AFM 先端研究センターでは、液中高速・超解像 AFM 技術の開発と、そのバイオ研究応用を推進している。バイオ AFM を名前に冠した研究センターは世界でも類を見ず、極めて特徴的である。

（５）キーワード

ナノ計測、ナノエレクトロニクス、ナノバイオ、ナノテクノロジー、近接場、トンネル電流、原子間力、ナノプローブ、カンチレバー、光てこ、ピエゾメカニカル駆動、フィードバック制御、共振周波数、原子分解能、原子分子操作、電気・磁気力、AM 変調、FM 変調、コンタクトモード、ノンコンタクトモード、液中観察、気中観察

（６）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	◎	→	日本では、海外でのSTMの発明が報じられてから早い時期にボトムアップの産学官共同開発体制を組んで追試に成功して以来、欧米と肩を並べる世界的レベルの研究グループが複数発展してきている。液中FM-AFMによる原子分解能計測[23]や3次元水和構造計測[22]、液中高速AFMによるタンパク質動態計測5など、世界をリードする研究成果が報告されている。超高真空AFMによる原子識別・操作についても、世界トップレベルの成果が報告されている[34,35]。MFMのベースとなる原子間力顕微鏡AFMの研究水準は高いが、MFMに応用して高分解能化・多機能化を進める研究グループは少ない。交流磁場計測では、MFMを用いて探針磁化の強磁性共鳴以下のGHz域の周波数で、磁気記録ヘッド[33]やストリップ線路[36]の交流磁場勾配の計測に成果が出ている。
	応用研究・開発	◎	↗	SPM関係の特許出願数が多い。ナノテクノロジープラットフォームなどユーザーファシリティーを拠点として次世代ナノエレクトロニクス、環境・エネルギー、ライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料などの各分野の研究者がSPMを自分たちの研究ツールとして利用し、応用研究の力強い展開を進めている。生体分子研究所から市販されている液中高速AFM装置の開発・応用研究が金沢大学との共同研究で進められている。島津製作所から市販されている液中FM-AFM装置の開発・応用研究が京都大学や神戸大学との共同研究で行われている。MFMについては産学間共同研究により、新たな顕微鏡や磁性探針の開発が国プロ等の支援でいくつか進められている。
	産業化	○	→	拡大する海外新市場でのシェアを確保できずに苦戦しているが、国内のユーザーニーズに応える製品改良を進めることによる今後の健闘に期待できる可能性がある。産学共同開発プロジェクト成果のハイエンドSPMが最近市場投入された。生体分子研究所から販売されている液中高速AFMは、国際的に競争力のある商品であり、世界的に販売実績をあげつつある。島津製作所から市販されている液中FM-AFMも、世界的な競争力を持つ製品である。数社が大気型および真空型のMFMを販売している。中でも日立ハイテクサイエンスが垂直/水平/回転磁場印加機構、Q値自動制御ソフト等の多数のMFMオプションを提供している。磁性探針では日東光器が高保磁力探針を実用化している。MFMの検査装置への展開が、磁気記録素子を対象として日立ファインシステムズにより進められている
米国	基礎研究	◎	→	早い時期からこの分野の基礎研究をリードしてきた米国では、今後も堅実な活動が継続される。低温超高真空STMの研究者が、qPlusセンサとCO探針を用いたAFM計測に取り組み始め、数多くの基礎研究成果が報告している[29]。一方、Band excitationやMulti-frequency AFMなどの新規技術により、定量的な物性計測技術の開発も進められている[27]。ＭＦＭによる磁性ナノ粒子の評価計測が、医療や創薬、磁気記録デバイスへの応用を目指して盛んに行われている。FMRFM の開発と微小磁性体の強磁性共鳴の画像化の研究でも顕著な成果が出ている[37]。
	応用研究・開発	◎	↗	NNINをはじめとするユーザーファシリティーの利用によるナノテクノロジー関係の応用研究が旺盛に進められている。また、エネルギー技術関係の応用研究はエネルギー省（DOE）のユーザーファシリティーで活発に進められている。NISTを中心にSPM技術を用いたナノ計測の国際標準化活動を早い時期から手がけて世界をリードしている。旧Asylum Research社が英国のOxford Instruments社に買収されたが、その開発拠点は依然米国にある。また、ドイツのBruker社SPM部門の開発拠点も米国にある。これらのメーカーでは、大学と同等レベルの研究開発が行われている。また、大学との共同研究も盛んである。その他、Agilent Technology社やRHK社などのメーカでも開発活動が活発に行われている。大手のハードディスクメーカー（Western Degital、Seageat等）が磁気記録ヘッド開発のためにMFMを高周波記録磁場の検出に利用している。

米国	産業化	◎	↗	米国はSPMを最初に製品化した国である。システム開発力、ソフトウェア開発力を駆使して、ユーザーニーズに応える製品群をそろえて拡大する海外新市場でのシェアを伸ばしている。アジア新市場各国では米国帰りの研究者がSPM応用研究に取り組むことも追い風となっている。Asylum Research社が英国のOxford Instruments社に買収されたが、これにより販売力は向上するものと考えられている。超高真空AFMについては、RHK社から販売されているが、最近ではドイツのメーカに比べて、やや競争力が劣る印象がある。MFMについては走査型プローブ顕微鏡（SPM）で実績のある複数のメーカー（Asylum社等）が販売している。
欧州	基礎研究	◎	→	STM発祥の地である欧州は現在もSPM全般についての高い基礎研究レベルを維持している。ドイツ、スイス、英国を中心として、超高真空STM/AFMに関する基礎研究において多くの成果があがっている。また、オーストリア、フランス、ドイツ、スペインを中心として、液中AFMを用いた生体分子計測の成果も多数報告されている。大学を中心にMFM全般で研究水準は高い。研究対象は米国と似た状況である。AFMで培った探針振動制御技術を積極的にMFMに利用した磁気力検出の高感度化に成果が見られる[38]。特に、2共振（Bimodal）励振や捩じりモード励振[39]、水晶振動子を用いた小振幅励振等[40]が顕著である。FMRFMの研究でも米国と同様に理論・実験の両面で多くの成果が出ている。
	応用研究・開発	◎	→	ドイツ、英国、フランスを中心に応用研究が継続している。ナノエレクトロニクス半導体分野の応用研究はベルギーのIMECの影響力が強い。ドイツのOmicron社は英国のOxford Instruments社に買収されたが、その開発拠点はドイツにある。このメーカから市販されているqPlusセンサの改良が大学と共同で進められている。現行の高密度磁気記録に係る研究は、欧州メーカーが少なくなったので下火である。替って、医療や創薬への応用を目指した磁性ナノ粒子の評価計測が盛んに行われている。
	産業化	◎	→	SPMプローブをリードするナノワールド社（スイス）、SPMコントローラをリードするSPECS社（ドイツ）など高い技術力を持つ企業が存在する。欧州に拠点を持つブルカー社はSPM事業を米国のビーコ・インスツルメンツ社より2010年に買収した。ドイツのSPECS社は、高性能なAFMコントローラを、ドイツのJPK Instruments社は、倒立型顕微鏡との複合化に適したAFMを、英国のOxford Instruments社（旧Omicron社（ドイツ））は、極低温・超高真空AFMを、それぞれ世界的に販売している。また、スイスのZurich Instruments社は、AFM計測に多用されるロックインアンプと、高度な信号解析機能を統合させた装置を販売しており、世界的に多数の販売実績をあげている。世界的なシェアを持つ、MFMに有効な汎用性に優れ高性能な計測器、制御器を有する優れたSPMメーカー（SPECS社等）が多数ありMFMも販売している。また、MFM用カンチレバーメーカも多い。
中国	基礎研究	×	→	SPM基礎研究についての特筆すべき活動が見えていない。いくつかの研究グループから、極低温超高真空STM/AFMを用いて行った分子内構造計測の結果が報告されている。
	応用研究・開発	○	↗	SPMを利用した研究成果の論文発表数が増加中。蘇州ナノテク国際イノベーションパークには巨額の研究開発投資が行われている。
	産業化	×	→	現在までのところ産業化についての特筆すべき活動が見えないが、今後の動向を注視する必要がある。
韓国	基礎研究	△	↘	韓国のSPM技術は米国からの輸入技術で、韓国発という意味では他国に比べて特に顕著な基礎研究成果は見えていない。MFMを用いた標準的な磁区観察が主である。
	応用研究・開発	○	→	National Nano Fab Center (NNFC)、Korea Advanced Nano Fab Center (KANC)などのナノテクノロジー拠点を中心に応用研究を進めている。特許件数では中国に勝っているが、論文数は中国の3分の1程度に過ぎない。Park Systems社において、SICM機能の付いた生細胞観察用のバイオAFMが開発され、市販化されている。

	産業化	○	→	1997年にカリフォルニアから移転して設立したPark Systems社から市販されている大型の走査範囲を持ち、高精度な距離・凹凸・粗さ計測を可能とするメトロロジー向けのAFMは、国際的な競争力を持つ製品であり、世界的な販売実績をあげている。また、上記のSICM機能付きのバイオAFMも着実に販売実績をあげている。Park SYSTEMSは大気型のMFMを販売している。また、ハードディスク基板の生産検査用AFMも販売している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) 「走査型プローブ顕微鏡入門」（オーム社, 2013）ISBN 4274214133.
2) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
3) G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986).
4) D.W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: Appl. Phys. Lett. 44, 651 (1984).
5) Y. Martin, C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, J. Appl. Phys. 61 (1987) 4723.
6) T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, D. Ruger, J. Appl. Phys. 69 (1991) 668.
7) Web of Science.
8) http://www.nnin.org/
9) 例えば、 http://www.asylumresearch.com/Events/Harvard/index.shtml
10) http://www.jst.go.jp/nanotechpf/
11) http://nsn.kyoto-u.ac.jp/topic/25.html
12) http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=54618
13) http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=354756
14) http://digital.hitachihyoron.com/pdf/2007/04/2007_04_05.pdf
15) http://www.veeco.com/pdfs/webinar-slides/Introduction-to-CD-Metrology-in-the-Semiconductor-Industry-webinar-slides.pdf
16) P. De Wolf, M. Geva, T. Hantschel, W. Vandervorst, and R. B. Bylsma, Appl. Phys. Lett. 73, 2155 (1998).
17) L. Zhang, K. Ohuchi, K. Adachi, K. Ishimaru, M. Takayanagi, and A. Nishiyama, Appl. Phys. Lett. 90, 192103 (2007).
18) Martin Fuechsle, et al., Nature Nanotechnology 7, 242 (2012).
19) Cristina Go´ mez-Navarro, et al., Nano Letters 7, 3499 (2007).
20) T. Quaglio, et al., Rev. Sci. Instr. **83**, 123702 (2012).
21) J. C. Weber, et al., Rev. Sci. Instr. **83**, 083702 (2012).
22) N. Kodera, D. Yamamoto, R. Ishikawa, T. Ando, Nature 468 (2010) 72.

23) T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 034101.
24) C. Su, Microsc. Microanal. 16 (2010) 364.
25) T. Fukuma, Y. Ueda, S. Yoshioka, H. Asakawa, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 016101.
26) B. J. Albers, T. C. Schwendemann, M. Z. Baykara, N. Pilet, M. Liebmann, E. I. Altman, U. Schwarz, Nat. Nanotechnol. 4 (2009) 307.
27) S. Jesse, S. V. Kalinin, R. Proksch, A. P. Baddorf, B. J. Rodriguez, Nanotechnol. 18 (2007) 435503.
28) T. R. Rodriguez, R. Garcia, Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 449.
29) L. Gross, F. Mohn, N. Moll, P. Liljeroth, G. Meyer, Science 325 (2009) 1110.
30) H. Saito, R. Ito, G. Egawa, Z. Li, and S. Yoshimura, J. Appl. Phys. 109, 07E330 (2011)
31) 有馬英司，磯山季歩，徳田郁美，内藤賀公，李艶君，菅原康弘，第 61 回応用物理学会春季学術講演会 19a-D5-7 (2014)
32) 木下幸則，江川元太，吉村哲，野村光，中谷亮一，齊藤準，第 37 回日本磁気学会学術講演概要集, 3pF-10(2013)
33) 木下幸則，江川元太，吉村哲，齊藤準，第 37 回日本磁気学会学術講演概要集, 3pF-9(2013)
34) Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Perez, S. Morita, O. Custance, Nature 446 (2007) 64.
35) Y. Sugimoto, P. Pou, O. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Perez, S. Morita, ience 322 (2008) 413.
36) Y. Endo, M. Fukushima, K. Arai, K. Yanagi, Y. Shimada and M. Yamaguchi, J. Appl. Phys. 115, 17D120 (2014)
37) I. Lee, Y. Obukhov, G. Xiang, A. Hauser, F. Yang, P. Banerjee, D. V. Pelekhov and P. C. Hammel, Nature, 466, 845 (2010)
38) C. Dietz, E. T Herruzo, J. R. Lozano and R. Garcia, Nanotechnology, 22 125708(2011)
39) A. Kaidatzis and J. M. Garcıa-Martın, Nanotechnology, 24, 165704(2013)
40) M. Schneiderbauer, D. Wastl and F. J. Giessibl, Beilstein J. Nanotechnol. 3, 174(2012)

３．５．10．２　電子顕微鏡

（１）研究開発領域の簡潔な説明

電子顕微鏡は、材料の特性に決定的な役割をもつ界面や表面などの局所構造を直接観測できるという特徴をもつ。この局所構造におけるエネルギー変換や輸送現象、破壊、疲労、あるいは化学反応などの理解は、新規のナノ材料の設計に重要な指針を与える。

この項では、電子顕微鏡の研究開発領域として、電池の動作時の電気化学反応のその場観察や、生体材料の生きたままの観察などを可能にする「環境制御透過電子顕微鏡(E-TEM)」技術、および、急速に進展しつつあるスピントロニクスを支える「スピン偏極電子顕微鏡」技術にの課題に絞って報告する。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

・環境制御透過電子顕微鏡

電子顕微鏡は高真空を必要とする観測装置である。このため最近になるまで低真空環境でのガス反応過程や液中での化学反応などについての観察は不可能であった。しかし、生命現象の解明やリチウムイオン電池や燃料電池の性能向上等の社会的ニーズが高まってきたことから、試料周りの環境を制御して、数 Pa 程度の低真空条件や溶液中の試料の電子顕微鏡観察が必要になってきた。

低真空条件や溶液中の試料を電子顕微鏡で観察するための方法は、環境制御電子顕微鏡(Tnvironmental Transmission electron microscoy :E-TEM)と呼ばれている。E-TEM は、大きく 2 つに分類される。１つは、電子顕微鏡本体の排気系を改造し、試料近傍の圧力が上昇した際に、電顕本体の圧力上昇を防ぐような真空排気機構を持つ開放型と呼ばれるもの、もう１つは、密閉型の小部屋(環境セル)を準備し、このセル内に試料を配して、構造観察をする密閉型と呼ばれるものである。密閉型では、セルの上下に電子が透過できる隔壁と呼ばれる非常に薄い窓を配することで、観察と圧力制御を両立させており、隔壁型とも呼ばれている。

E-TEM の開発のニーズは非常に高いが、現在のところ環境制御条件や、測定可能な試料サイズに制約があり、測定可能な試料は限られており、利用者のニーズに合致した E-TEM の開発が求められている。

・スピン偏極電子顕微鏡

マイクロマグネティクス、および、スピントロニクスにおいては、物質・材料中のスピン磁気モーメントの分布を原子分解能で観測することが求められる。このための顕微鏡技術としては、スピン偏極走査電子顕微鏡（SEM)、スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)および低エネルギー電子回折(LEED)、スピン偏極透過電子顕微鏡(TEM)がある。スピン偏極 SEM は、入射電子としてはスピンを区別しない通常の電子ビームを使う。スピン偏極 LEEM とスピン偏極 TEM は入射電子にもスピン偏極電子を用い、入射偏極電子と観察試料の磁気モーメントとの相互作用がアップスピン電子とダウンスピン電子の入射で何らかの差があることを利用する。

スピン偏極電子顕微鏡は、結像理論として従来のローレンツ力ではなく、量子力学の

根幹にかかわる試料中の磁気モーメントと電子のスピンの相互作用を受けた電子の散乱断面積や位相ずれを根本的に考え直さざるを得ず、基礎物理学に寄与する新しい情報が提供されると期待される。

［これまでの取組み］

物質の究極粒子の一つである電子の波動的性質を使った電子顕微鏡には 1931 年のルスカによる発明以来 80 余年の歴史がある[1)]。1940 年代には光学顕微鏡の分解能を僅か上まわる程度であったが、1970 年台には重い単原子の観察が可能になり[2)]、21 世紀には分解能は 0.05nm に到達し[3,4)]、結晶中の水素原子のコラムも可視化できるようになった[5)]。またローレンツ電子顕微鏡モードやホログラフィーモードを使って磁性体の磁壁構造や磁場ベクトルも観察できるようになった[6)]。電子顕微鏡技術には、20 世紀末に非常に大きな革命的なブレークスルーがあった。それが「収差補正技術」であり、残念ながらこの技術は日本発ではなく、ドイツ、米国を中心に開発が進んできた。これによって 2000 年を越えたあたりから空間分解能が飛躍的に向上し、TEM による原子分解能観察が日常的に可能になった。日本は、超高圧電子顕微鏡技術に注力したため、収差補正技術開発の初期こそ欧米の後塵を拝したが、現在の技術力はドイツ、米国とも勝負できるレベルに達している。

・走査型 TEM(STEM)

STEM は、像コントラスト特性および他の分析装置とのマッチングの良さから、原子分解能解析装置の主流となりつつある。特に最近では STEM 像検出器、X 線分光装置、電子線エネルギー分光装置、カソードルミネセンス(CL)検出器などの検出系に大きな進展があり、原子 1 個レベルの観察や分析が可能になっている。日本においては、いくつかの国家プロジェクトを経て、国産の収差補正技術が確立され、日本の電子顕微鏡メーカーから製品として世界市場に投入されている。電子顕微鏡本体性能および電子光学系における日本の技術レベルは世界的に引けを取らないが、新技術の開拓や周辺機器開発においては常に欧米先行傾向が否めない。

・環境電子顕微鏡(E-TEM)

生体試料や電池試料など低真空や溶液など高真空環境を用いない試料観察に対するニーズが高まっている。環境電子顕微鏡(E-TEM)実現の試みは、透過電子顕微鏡の発明直後の 1940 年代から始まり、2000 年前後からナノテク分野の発展を背景に、幾つかのメーカーにより E-TEM 用の装置の開発が進んだ。国内の E-TEM 用の装置としては、開放型の試料ホルダーが日立によって開発され、その後、同社で環境セル試料ホルダーと差動排気システムを備えた H-9500 が開発された。日本電子では、既存の TEM に取り付けられる環境セルタイプの試料ホルダーの開発を行っている。複数の環境セルがあり、ガスの還流に加えて、溶液中の試料観察も可能である。近年では、幾つかの大学の研究室レベルで、隔壁タイプのホルダーを用いた応用データの報告や、独自に開発した環境セルの報告が行われている。国内いくつかの研究グループの開発努力によって、現時点では世界で唯一の装置が多数我が国に設置されている状況である。ほぼ実用に耐えるまで

技術が向上したのはこれにはJSPSやJSTの研究資金によるところが大きい。

欧米でも、研究室レベルでE-TEM装置の開発が行われてきた。特に、米国では、TEAMプロジェクトの中で差動排気システムを有する電子顕微鏡の開発が行われ、球面収差補正装置を搭載した装置の1つのオプションとしてTITAN ETEMがFEI社から販売されている。複数のベンチャー企業から試料ホルダーや研究に必要な環境セルが開発・販売され、様々な研究グループが、これらを使った応用実験を進めている。特に、電池の動作中の構造変化のその場観察が幅広く行われている。球面収差補正装置を組み込んだ高分解能装置に環境制御機能を加えることで非常に質の高いデータの収集が可能になっている。欧州でも、E-TEMを用いての研究は進んでいるが、日米に比べると、それほど多くのグループが進めているとは言えない。欧州に電子顕微鏡メーカーがないことが関係していると考えられる。

生物試料を対象とした研究は、米国でも日本でもまだ多くない。これは、生物試料が、電子線照射ダメージに弱いため、非常に限られた条件での観察しかできないことが1つの原因で、トモグラフィーや位相板など、結像法の改良との組み合わせなどによる対策が今後の研究課題になる。

・スピン偏極電子顕微鏡

スピントロニクスの急速な進展にともなって、ナノ領域の磁性を観察するためのスピン偏極電子顕微鏡に対するニーズが高まっている。以下では、スピン偏極SEM、スピン偏極LEEM、スピン偏極TEMなどについて述べる。

スピン偏極SEMは、通常のSEMと同様に収束電子線を試料上で走査し、入射電子に誘起されて試料内からでてくる二次電子が磁性体試料中の電子のエネルギーバンド上のスピン状態を保持している現象を利用したものである。この二次電子のスピン偏極方向は、従来モット散乱検出器によって検出され、偏極ベクトルの x,y 成分を決定して、それぞれを2次元像としてマッピングすることが、1984年に日立中央研究所の小池、早川らによって案出され[7]、現在、商品化レベルにまで成熟した技術となっている。素粒子の散乱実験に使用されたモット散乱器を走査電子顕微鏡に適用し実用化までなしとげたことは日立中央研究所のグループの功績である。この装置は我が国における1984年の発明以来、現在では米国、ドイツ、スイスなどの国でも稼働している。

一方、スピン偏極LEEM、スピン偏極LEED、および、スピン偏極TEMでは、上記スピン偏極SEMと異なって、スピン偏極電子銃を用いており、磁気偏向と静電偏向によって任意の方向にスピン軸を向けることもできるという大きな特徴がある。偏極電子を取り出す材料としては、アルカリ金属（1972年）[8]からはじまり、タングステンチップ（1981年）[9]が検討されたがいずれも偏極率は数%で偏極電子源として使えるものではなかった。歪み半導体に円偏光を照射して選択的に偏極スピンを取り出す試みが日本で1980年代から行われ電子源としての実用化に成功した[10]が、冷却が必要だった[11]。その後、半導体歪格子を使うことで偏極率90%以上、量子効率0.5%を達成、透明な半導体超格子を用いた後方光入射技術[12]の実現によって電子の輝度は4×10^8A/sr.cm^{2}に達し、熱電界放射電子銃に近づく値を示した[13]。これによって低エネルギースピン偏極電子顕

微鏡(SPLEEM)や、世界初のスピン偏極透過電子顕微鏡(SP-TEM)が我が国で実現した[13]。

LEEM の電子銃をスピン偏極電子銃に交換することによりスピン偏極 SEM と同様、磁性体表面の磁区構造を観察することができる[15]。SPLEEM では表面形状の情報と磁性状態の情報が同時に得られるため表面磁性の成因について研究することができる。背面レーザー照射半導体歪起格子を用いたスピン偏極電子銃の採用により、スピン偏極 LEEM でもビデオレートでのその場観察ができるようになった[16]。最近、高輝度スピン偏極電子源を用い、前方散乱電子波を用いて結像するスピン偏極 TEM が世界で初めて完成した。試料の結像レンズ系は 3 段拡大系であるため通常の制限視野電子回折図形も得ることができる[17]。この装置は、スピン偏極電子によるホログラフィーも可能である。スピン偏極電子銃の励起用レーザー光としてパルスレーザーを用いることで、パルス電子顕微鏡にも転用でき、すでに、パルス幅 10psec 以下の電子線パルスでの試料観察もできている[18]。また、電子線版「ポンプ・プローブ実験」も可能である。このようなスピン偏極電子を用いた TEM は世界に前例がなく、すでに公刊した論文[13,17,18]によって米国やイタリアの大学の研究者により注目され、共同研究をおこなっている。

本研究領域のような未開の測定抜術の開拓には、日立中央研究所、名古屋大学の支援が必要で、今後、少しずつでも支援を継続して、実験者にとっての良い研究環境を我が国の中に温存しなければならない。

［今後必要となる取組み］

現在、日本が優位な立場にある本体開発、収差補正技術開発、分析技術・検出器開発に関しては更なる研究強化を行い、世界をリードしつづけることが科学技術分野全体にとって重要である。一方、今後日本が新たに力を入れるべき分野（時間分解 TEM、量子ビーム制御、環境・その場手法開発など）に関しては基礎研究のレベルを上げて世界にキャッチアップし、産業化にもつなげていく必要がある。また、全体的には大学・研究所での基礎研究フェーズのレベルを高めることが極めて重要であるが、そのためには若手研究者の育成環境の整備が急務である。

・E-TEM

試料環境制御という観点だけでなく、試料から構造に加えて付加的な情報を引き出すことも重要である。したがって、環境制御技術の開発にとどまらず、構造観察に加えて、分光を行うための光学系の改良や分光法の開発、あるいはトモグラフィーや位相板などと組み合わせた装置開発が今後必要になってくると考えられる。環境 TEM とそれを支えるための装置開発は、メーカーのレベルでも一定の開発が進んでいる。しかしながら、幾つかの課題がある。1 つは、なるべくユーザーフレンドリーなシステムにすることである。電顕本体の差動排気システムやホルダーのガス還流システムの自動化に加え、なるべく単純な構造にすることで、ユーザーが使用しやすく、場合によっては改造しやすいシステムへと改良することが必要である。また、環境セルを使用する場合、高い分解能の獲得にはセルの厚みを自在に制御することが必要であるが、使用に慣れないユーザーには、この点が障壁となっている点も挙げられる。高分解能のニーズに対応したものも研究室レベルでは開発されているが、利用しやすいシステムを構築することが必須で

ある。また、ユーザーの具体的なニーズに対応できるよう、新規開発・改造を援助するために、企業と大学、研究所の連携を進める仕組みの構築も必要と思われる。

・スピン偏極電子顕微鏡

大阪電通大学の LEEM と名大エコトピア科学研究所の TEM として、我が国がユニークさを持っている。前者については電子銃の小型化、商用化のための JST のグラント研究が現在進行中であり、その到達度合を中間評価によって正しく認識することが必要である。後者については、この電子銃が TEM 用に十分使えるための輝度を出すことは十分実証されたが、電子スピンと試料中の磁気モーメントの交換相互作用の精密な検出は今後の実験の進展を待つ段階である。この観察のための装置には最高度の安定度が求められるが、現在の実験装置は 1980 年代の装置を基礎としているため、高圧やレンズの安定度が精密な測定に耐えうるか不明な点もある。最新の電子顕微鏡(可能ならレンズの球面・色収差補正装置付き)をグループに提供し、その上でスピン偏極電子による電子回折実験、ローレンツ電子顕微鏡観察実験および電子線ホログラフィー実験がなされるような措置が望まれる。

（３）科学技術的・政策的課題

日本には電子顕微鏡開発メーカーが存在し、その製品は世界中で極めて高い評価を受けている。これは電子顕微鏡開発の黎明期から産学官を挙げて国家的に取り組んできた成果であると考えられる。しかし現在は、電子顕微鏡の新しい分野、技術を切り開く研究者層が薄いのが大きな問題となっている。これは、一つには電子顕微鏡開発のような骨太の大型プロジェクト、チャレンジングなプロジェクトに若手研究者が参画する機会が少なく、次世代を担う人材が育ちにくい環境があるためである。電子顕微鏡は様々な要素から構成されるため、個々の要素研究としての開発は様々な制度下で可能であるが、それを纏め上げ、電子顕微鏡本体として開発する制度には乏しい。また、このような大型プロジェクトが 40 代、30 代の次代を担う研究者に託されることは極めて稀であり、そのことがプロジェクトの躍動感・チャレンジ精神を削ぐことも念頭に置く必要がある。

二つ目には、先端ナノ計測研究者の置かれている現在の環境にもある。現在、電子顕微鏡研究者に強く求められていることは、材料・デバイスなどの出口に直結する応用研究や他研究者のサポート（共用化）であり、純粋な計測開発研究で予算をとることは難しい。このような環境下では優秀な若手計測研究者は育ちにくく、若手研究者は他分野へと研究領域をシフトせざるを得ない。最先端ナノ計測はその装置オペレーションもさることながら、データ解釈にも高い知識と豊富な経験が必須であり、そのような人材を一朝一夕に育成することは非常に難しいことを念頭におくべきである。世界的に見ると欧米や中国では電子顕微鏡分野における若手研究者の活躍が非常に目立つが日本では人材不足に陥っていることを危惧する。現在、日本は間違いなく世界トップクラスの研究力を有しているが、今後も日本の優位性を維持するためには、若手研究者を育成することが急務である。

研究の専門化が進み、ナノ構造計測技術を開発・研究するグループと、それを使って材料や試料の計測を進めるグループの連携が必要であり、これを支援する取り組みも求

められる。

我が国の問題として、電子のスピンと磁気モーメントの交換相互作用を数値までのレベルで検討できる理論物理学者がほとんどいないことがある。素粒子の実験を解説する理論家、計算家は多数おられるが、素粒子(電子のスピン量子数)と物性の境界領域の理論を確実に共同研究して下さる人材がほとんどいないことは、我が国の理論家養成に問題点を感じざるを得ない。米国および EU に理論家を探索し、現在複数人の共同研究者を得て、研究を進めているのが現状である。

近年、電子顕微鏡自身が複雑化し、高コスト化しているため、大学で装置開発を中心的に進めるグループが減少している傾向がある。実際、電子顕微鏡を用いて材料科学の研究を進める大学研究室の多くは、学部、学科に所属せず、大学共通のセンターに所属するケースが増えている。この状況が進むと、我が国が維持してきた、高い電子顕微鏡技術を進化・発展させるための人材育成が困難になってくる。したがって、人材育成の仕組みも検討する必要がある。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

米国（LLNL, CALTEC, PNNL など）を中心として開発が進められている時間分解能 TEM に大きな注目が集まっている。また、高次収差補正、色収差補正、モノクロメーターなどの開発・高度化も順調に進展しており、これらを高度に応用した研究開発が期待されている。液中での観察やガス環境下での観察を可能にするその場手法への期待も大きく、世界中で鋭意開発が進められている。

封じ込め式の環境セルの window 材料として graphene の利用が注目されている[1]。Window を使用する場合、その存在により、分解能に制約を与えるという点が問題であったが、Graphene は究極の薄さであることから、高分解能観察には適しており、今後、graphene や graphene を応用した材料を用いたセルの開発は活発化すると予想される。

スピン偏極電子顕微鏡はいずれも、円偏光レーザーによって電子の放出が行われるため、パルスレーザーを用いれば容易に「パルス電子顕微鏡」ができる。通常の光電子放出現象や熱電子放出現象を使ったパルス電子顕微鏡については米国で研究が急速に進んでおり、「単一パルスモード」と「繰り返しパルスモード」で観察がおこなわれている。前者は金属チタンの相変態現象の研究に[19]、後者は炭素ナノチューブの光励起プラスモン[20]の研究に使われている。ここでスピン偏極電子顕微鏡をパルス化する意義は言うまでもなく、ナノレベルの磁気モーメントの過渡現象を定量的にとらえることである。

パルス電子線は生物試料の電子顕微鏡観察にも新しい可能性を提供する。すなわち、パルス電子線のパルス数と１バンチ当たりの電子数を調整することにより、従来の TEM より高精度で照射ドーズ量を制御し、生物試料へのダメージを減らし、これまで観察できていなかったバイオ・ソフトマテリアルの高分解能観察が可能になることである。

レーザー光で駆動されるスピン偏極パルス電子銃が実用化されることによって、レーザー光学で長年おこなわれている「ポンプ・プローブ分光」の電子線版[18]が通常の研究室で実現することになり、我が国の最も得意とする電子線分析技術とレーザー分光技術が完全に統合する―　(エネルギー)と　(波数ベクトル)に関わる物性測定に広い地平を

与える―可能性をも示している。

我が国の内田・外村が発見した電子らせん波[21]の研究も注目される。これは電子がもつ角運動量の量子数($\boldsymbol{l}$)を積極的につかったものであるが、スピン偏極電子顕微鏡のもつスピン量子数($\boldsymbol{s}$)との結合をさせれば、$\boldsymbol{j}=\boldsymbol{l}+\boldsymbol{s}$を使った新しい電子線分析器が構築できることになる。このらせん波の実験的研究はベルギー(Vebeeck)[22]と名古屋大学(齋藤晃)[23]のみによって行われており、スピン偏極電子顕微鏡とこの電子らせん波発生装置が名古屋大学内で統合すれば、新しい物理学の探索ができると考えられる。この電子らせん波ビームを用いた電子顕微鏡法が、現在欧州（アントワープ大、ウィーン工科大など）を中心として盛んに研究開発が行われており、画期的な成果が数多く報告されている。主に、磁性材料解析への応用が期待されている。

（５）キーワード

環境制御電子顕微鏡法（E-TEM)、その場観察、実環境、スピン偏極 SEM、スピン偏極 STM、スピン偏極 LEEM、スピン偏極 TEM、スピン検出器、スピン散乱、磁性体観察、時間分解（パルス）電子顕微鏡観察

（６）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	◎	→	収差補正技術や電子光学系の開発は主にメーカー主導で行われている。他の新技術に関しては、分析装置や検出器開発などのハード開発を行う大学・研究所の研究室はわずかである。しかし、新顕微鏡手法開発に関しての国際的な評価・レベルは高い。E-TEMを利用した研究としては、Auを始め、ナノ粒子のガス反応過程における触媒化学反応の研究を独自装置や、メーカーの装置を利用して進めている例が多い。多くは、材料科学が研究対象であり、生物分野の利用は少ないが、生物試料の液中その観察の例は世界で初めて報告されている[24]。スピン偏極電顕については、日本の研究が世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	原子レベルの観察、分析を高度に応用した研究において、世界的な成果が多数報告されている。また、ナノテクノロジープラットフォーム事業などを通じて多くの異分野研究者にも最新電子顕微鏡技術が活用されている。燃料電池を中心としたガスの触媒反応について、市販E-TEMを用いた研究成果が多い。溶液中の反応や生物試料への適応例は少ない。スピン偏極TEMは名古屋大学と大阪電気通信大学で磁性試料や磁性体表面観察への応用が始まっている。
	産業化	◎	↗	代表的な顕微鏡メーカーである日立と日本電子が、自社開発の収差補正技術を用いた最先端透過型電子顕微鏡の販売を開始している。これらの装置は世界中に広く普及している。E-TEMについては、日立と日本電子が、ガス反応過程の観察が可能な装置の販売を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	TEAMプロジェクト遂行時ほどの勢いはないが、このプロジェクト期間中に最前線で活躍した若手研究者が独立して研究室を率いており、原子分解能顕微鏡像、スペクトル定量化において高いレベルの研究を進めている。また、時間分解能TEM開発においては世界を頭一つリードしている、E-TEMについては、カーボンナノチューブの成長過程の触媒反応など、ナノ粒子のガス環境中の触媒反応過程のその場観察の報告が多くなされ、最近は、電界セルを使ったLiイオンセルなどの研究成果が多数報告されている。2012年には、グラフェンを使ったセルによる原子分解能観察例も報告された[25]走査型のTEM(STEM)を使った生物試料の観察結果も報告されている[26]。
	応用研究・開発	◎	→	国立研究所を中心としてユーザーファシリティーが充実しており、最新鋭収差補正付電子顕微鏡を用いた応用研究が数多く進行している。EI社の差動排気システムを有するE-TEMや、ベンチャー企業の環境制御用ホルダーを用いて、燃料電池やリチウムイオン電池の動作時の構造変化やナノチューブの成長過程など、触媒反応に関する研究例が多く発表されている。
	産業化	◎	↗	Nion社開発のSTEM専用機が市場投入され、世界各国で高い評価を受けている。また、中規模・ベンチャー企業などがカメラ、特殊環境ホルダー等の開発・販売に参入しており、活況を呈している。EI社が差動排気システムを有する環境制御用のTEMの販売を、Protochip,Hammingbird社といったベンチャー企業が、環境制御用ホルダーの販売を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	Voltex beam、収差補正技術、環境制御など、世界をリードする基礎研究がすすめられている。E-TEMについては、独自開発の環境セルを用いた研究成果は、Delft工科大学から報告されている程度である。スピンTEMについてはドイツ、ユーリッヒ研究所に興味をもっている研究者がいる。
	応用研究・開発	◎	→	基礎研究と応用研究が高度に融合しており、最先端基礎研究で培った新技術を即応用研究に用いることに長けている。そのため、応用研究でも極めて高いレベルの成果が多数報告されている。E-TEMについては、主に米国のグループとの共同研究の形で、電池など触媒反応の研究が行われている。
	産業化	◎	→	FEI社、CEOS社を中心として、最先端電子顕微鏡、高度収差補正システム、モノクロメーターなどがすでに市場投入されており、世界中で販売されている。

中国	基礎研究	△	↗	電子顕微鏡手法開発は他国の技術を利用することにより、より応用研究に重点をおいた研究がおこなわれている。E-TEMについては、既存の装置を利用した研究例が報告され始めた。
	応用研究・開発	◎	↗	最新鋭収差補正付電子顕微鏡が多くの大学、研究所に導入され、活発に応用されている。また、欧米で活躍する中国出身のスター研究者や留学中の若手研究者を積極的に登用し、電子顕微鏡研究に従事させているため、非常に勢いがある。
	産業化	×	－	特に目立った活動は無い。
韓国	基礎研究	△	→	電子顕微鏡法そのものの開発よりも応用研究への主眼が強い傾向がある。
	応用研究・開発	△	↗	半導体企業等ではすでに多くの最新鋭収差補正付電子顕微鏡が導入されていたが、昨今では大学、研究所などにも相次いで導入が始まっており、今後応用研究が加速すると考えられる。
	産業化	×	－	特に目立った活動は無い。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1) M. Knoll and E. Ruska, Z. Tech. Phys., 12 (1931) 389.
2) A.V. Crewe et al., Science., 168 (1970) 1338.
3) R. Erni et al., Phys. Rev. Lett., 102 (2009) 096101.
4) H. Sawada et al., J. Electron Microsc., 58 (2009) 357.
5) R. Ishikawa et al., Nature Mater., 10 (2011) 178.
6) A. Tonomura, “Electron Holography”, (North-Holland, 1995)
7) K. Koike and K. Hayakawa, Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) L187.
8) V. Heinzmann et al., Z. Phys. 251 (1972) 354.
9) J. Kirshner et al., Phys. Rev. Lett., 47 (1981) 614.
10) T. Nakanishi et al., Phys. Lett., A158 (1991) 345.
11) D. T. Pierce et al., Phys. Lett., A51 (1975) 465.
12) N. Yamamoto et al., J. Appl. Phys., 103 (2008) 064905.
13) M. Kuwahara et al., J. Phys. Conf. Series, 298 (2011) 012016
14) E. Bauer et al., Rep. Prog. Phys., 57 (1994), 895.
15) T. Duden and E. Bauer, Rev. Sci. Inst., 66 (1995) 2861.
16) M. Suzuki et al., Appl. Phys. Express., 3 (2010) 026601.
17) M. Kuwahara et al., Appl. Phys. Lett., 101 (2012) 033102.
18) M. Kuwahara et al., Microscopy., 62 (2013) 607.
19) T. LaGrange et al., Acta Matter., 55 (2007) 5211.
20) P. Baum and A. H. Zewail, Nature, 462 (2009) 902.

21) M. Uchida and A. Tonomura, Narure, 464 (2010) 737.
22) J. Verbeeck et al., Nature, 467 (2010) 301.
23) K. Saitoh et al., J. Electron Microsc., 61 (2012) 171.
24) H. Minoda, T. Okabe, Y. Inayoshi, T. Miyakawa, Y. Miyauchi, M. Tanokura, E. Katayama , T. Wakabayashi, T. Akimoto and H. Sugi, Biochem. Biophys. Res. Commun. 405 (2011) 651-656.
25) Jong Min Yuk, Jungwon Park, Peter Ercius, Kwanpyo Kim, Daniel J. Hellebusch, Michael F. Crommie, Jeong Yong Lee, A. Zettl, A. Paul Alivisatos, Science 336 (2012) 61-64
26) N.de Jong, D.B.Peckys, G.J.Kremers, D.W.Piston, PNAS 106 (2009) 2159-64.

３．５.10.３　放射光・X 線・粒子線

（１）研究開発領域の簡単な説明

放射光 X 線や X 線自由電子レーザー、陽電子の利用において、半値全幅 100 nm 以下に集光したナノビームを用いた局所領域の観察技術、および、100 nm より高空間分解能を有するイメージング技術などを研究開発する領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

（a）放射光・X 線

放射光実験は、「物質と光の相互作用」に起因する現象を捉える解析プローブであり、電子顕微鏡や SPM 等と補い合うナノ計測技術と位置づけられる。まず、原子配列の解析に着目すると、電子顕微鏡や SPM は選択したナノ領域を直接見る観察技術であるが、X 線回折や X 線吸収微細構造(XAFS)では、X 線の照射領域に含まれる全てのナノ領域の平均的な原子配列の情報を逆格子空間の点や線として得る。また、光電子分光や磁気吸収などの放射光分光実験で得る物性値も、一般的には、照射領域平均の電子状態や磁気状態を与えるものである。このように、物質と光の相互作用という微視的な観測であるにも関わらず、照射領域の平均的な状態を解析することは、物質が巨視的に示す物性の理解に重要な知見を与えている。

一方、ナノ微粒子や表面・界面ナノ構造など、材料にナノスケールの不連続性を与えると新しい機能が生まれる。放射光実験はこれらのナノ解析課題に対しても X 線回折条件の制御や共鳴吸収条件を用いた元素選択性などを利用できる。例えば、斜入射 X 線回折による表面ナノ構造解析 [1]、X 線反射実験による多層膜積層構造解析 [2]などの技術がある。さらに、基板表面に単原子層に満たない厚さで形成された金属ナノ構造の磁性 [3]や、超格子ヘテロ構造の界面 1 原子層に生じた磁気分極 [4]についても、元素選択性を有する XMCD 分光によって明らかにされた。測定できる対象は、ますます広範になっており、さらなる高感度化、高精度化が求められる。

さらに、スピントロニクスをはじめとする材料研究分野からは、100 nm 以下の領域を選択した構造・物性の解析や、高解像度の X 線イメージングの開発が要請され、放射光による先端計測技術の中心的な動向となっている。このほか、永久磁石材料、誘電体材料、電池材料、さらには、構造材料に至るまで、幅広い材料で材料機能を決定づけているナノ～メソスコピックなスケールでの不連続性および不均一性を計測しなければならない。100 nm の領域の端面の観測には 10 nm 以下の分解能が求められ、さらには、1nm をめざす空間分解能を有する計測技術の開発が必要とされている。

（b）陽電子消滅法

結晶性材料中の原子空孔・空孔クラスター・マイクロボイド、あるいは非晶質材料中の分子間空隙・自由体積は、さまざまな材特特性（力学特性・電気的特性・分離特性・吸蔵特性等）に影響を及ぼす主要因となることが多く、それ故、ナノテク材料の開発や機能劣化の研究では、これらの極微小な空隙の評価が重要である。一般にこれら極微小空隙の評価は困難とされているが、陽電子やポジトロニウム（陽電子と電子の結合状態）をプローブとして、高感度での解析が可能である.

陽電子は、自然界にはほとんど存在しないが、放射性同位元素や加速器等を用いて生成し、材料評価に利用できる。材料中に入射した陽電子は、電子と対消滅して高エネルギーの光（消滅γ線）を放出するが、陽電子が消滅するまでの時間（陽電子寿命）や消滅する際に放出されるγ線のエネルギー分布は微小空隙のサイズや濃度と関係する。これらの原理に基づいた材料分析手法は，陽電子寿命測定法，ドップラー広がり測定法などと呼ばれるが，一括りに陽電子消滅法とも呼ばれている。なお、陽電子消滅法は、微小空隙だけでなく電子状態や不純物状態の評価にも頻繁に用いられている。

［これまでの取り組み］

（a）放射光・X 線

我が国の放射光施設は、1974 年に完成した田無の SOR-RING（第一世代）に始まり、1982 年に KEK の Photon Factory（第二世代）、1983 年の UVSOR（第二世代）、1997 年の SPring-8（第三世代）へと発展してきた。放射光X線の集光技術は、当初、主にイメージングや局所領域のX線蛍光分析を目的として開発された。軟X線では 1980 年代に 100 nm のナノビーム集光が達成されたが、軟 X 線の集光で広く用いられるフレネルゾーンプレート（FZP）を製作する微細加工技術の進歩に応じて徐々に発展し、現在は最小ビーム径 10 nm が得られている。また、硬X線の集光については、1990 年頃に 1 μm 以下のサブマイクロビームが生成できるようになると [5]、1994 年にはガラスキャピラリを用いて 50 nm [6]、2009 年には SPring-8 において、当時、世界最小の X 線ビームとなる 7 nm を達成した [7]。2013 年にはドイツのグループが最小ビーム径を 5 nm に更新している [8]。このような 10 nm を切る X 線ナノビーム形成は、放射光の光源性能の向上、および、その光源性能を活かす光学素子の技術進歩によってもたらされた。

一方、ナノ計測にとってビーム径の微小化とともに特筆すべき進歩は、集光ビーム強度の向上であり、ナノビームを計測に応用する際に重要な技術要件である。例えば、1984 年において 300 nm の軟 X 線集光ビームに対する光量は毎秒 10^6 フォトン程度であったが、最近の第三世代光源では約 100 nm に対して約 10^9 フォトンが得られるようになった。これは、1984 年に比べて実効的に 1,000 倍以上も明るい軟 X 線ナノビームを意味し、分光実験などの幅広いナノ計測への応用が可能となったことを示している。このようにナノビームの応用計測を展開する取り組みとして、SPring-8 では 2010 年に文部科学省「低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワーク整備事業」のグリーン・ナノ放射光分析評価拠点の支援を得て、2 本の共用 X 線ビームライン（BL37XU、 BL39XU）に K-B ミラーを集光光学系に採用した硬 X 線ナノビーム利用環境を整備した [9]。これらのビームラインでは、前述の 7 nm ビームを形成した集光光学系で培った基盤技術を用いつつも、安定に生成可能なビームサイズとして 50～100 nm の硬 X 線ナノビームを分光実験等に利用することを目指したもので、X 線蛍光分析や X 線磁気円二色性（XMCD)を含む吸収分光実験に利用されている。一方、VUV～低エネルギー側の軟 X 線領域では、2012 年に第三世代放射光源へのアップグレードが完了した UVSOR において、透過型軟 X 線顕微鏡である STXM 装置（Bruker 製）が導入された [10]。また、PF においても STXM が開発され、ビーム径約 100 nm で実施したイメージングの結果が発表されている [11]。SPring-8 の軟 X 線では、東京大学アウトステーション(BL07LSU)において、軟 X 線ナ

ノビーム（~70 nm）を利用した光電子分光実験装置が開発され、ナノ ESCA が測定できるようになった[12]。さらに、2012 年度よりスタートした文部科学省「元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）」の磁性材料研究拠点において、永久磁石材料の組織別ナノ解析が要請されたことに対応し、BL25SU に全面的な改造を施してナノビームの利用基盤が整備された[13]。

ここまでは FZP や K-B 集光素子を用いて生成したビーム径 100 nm 以下のナノビームを利用する場合について述べたが、放射光ビームを直接集光することなく 100 nm より高空間分解能を有するイメージング技術の開発も進んでいる。まず、X 線コヒーレンスを利用した X 線コヒーレントイメージングは、コヒーレント X 線を試料に照射した際に遠方で観測される回折パターンに位相回復計算を実行して試料像を得る手法である[14]。X 線によるイメージング技術としては、最高空間分解能 2 nm が、SPring-8 の BL29XUL で得られている[15]。透過配置では、試料電子密度分布が再構成され、反射配置では、歪み分布が再構成される[16),17]。また、X 線コヒーレント回折に、位相情報を与える参照光を組み合わせた X 線フーリエ変換ホログラフィーがある[18),19]。この方法では、軟 X 線を十分に遮光することが可能な金属膜（たとえば、Au：約 2μm）に、高アスペクト比で加工した参照光源生成用のピンホールを必要とする。このピンホール径が参照光源サイズに相当し、最終的なイメージング像の空間分解能の支配因子となっている。また、参照光が小さすぎるとホログラフィー像が暗くなるため、実際の実験では空間分解能 40 nm 程度が報告されている[20]。さらなる空間分解能を目指すには、光源の光強度と光の質の向上が望まれる。

一方、導電性のあるバルク表面を高空間分解能で観察するナノ計測として、光電子顕微鏡がある[21]。光電子励起に放射光 X 線を用いれば、その吸収分光を利用した元素コントラストイメージや、円偏光を用いて XMCD による元素別磁気イメージングが可能となる。空間分解能は、静電レンズを用いた簡易タイプで約 100 nm[22]、磁場レンズやエネルギーフィルターを有する高性能タイプで約 20 nm が目安である[23]。光電子顕微鏡としては、更に高空間分解能の収差補正型もあるが、放射光での応用には至っていない。

また、これまで放射光と SPM を融合したナノ計測の試みも行われている[24-28]。これらの方法は、放射光 X 線を試料上の比較的広域に照射しつつも、情報を取り出す領域を SPM の探針で限定し、高空間分解能のイメージングを行う方法である。主な目的は元素コントラストのイメージングであり、最高で 4 nm の空間分解能が得られている。さらに、SPM 探針付近に照射する軟 X 線としてナノビームを用いたシステムがスイスの放射光施設(SLS)の HP で紹介されている[29]。結果は示されていないが、その活用に興味が持たれる。日本での SPM と放射光の融合の取り組みは、まだ緒に就いたばかりであり、今後の研究開発課題である。

以上、これまでの放射光ナノ計測を、X 線ナノビームによるナノ計測、結像等による高空間分解イメージング、放射光と SPM の組み合わせによるナノ計測、と 3 つに分類して概観した。放射光によるナノ計測については、参考文献も加えつつ[30-34]、表にまとめた。

計測手法 (略称)	空間分解能		光学系など	検出配置/観察対象	三次元観察法	特徴など	文献
	現在の最高値	一般的な値					
X線ビーム集光技術	**~5 nm**	50 ~ 100 nm	K-B ミラー※6	―	―	X線光学としての挑戦的研究であり、近い将来にナノ計測への利用が期待される。	9) Mimura_Nature Phys (2009) 30) Ruhlandt_AIPAd (2012) 8) Döring_OptExp(2013)
走査X線顕微鏡 (SXM※9)	**10 nm**	30 ~ 100 nm	走査型	透過	CT※15	FZP※9（軟X線、硬X線）、または、K-Bミラー（主に、硬X線）により、X線ナノビームを生成。走査型イメージング以外に、局所分光や回折への応用が重要である。検出配置のうち、全電子収量法は主に軟X線ナノビームで、また、X線回折は硬X線ナノビームを使用する。	31) Raabe_RSI(2008) 32) Chao_OptEx(2012)
	―	~ 100 nm (予想値※10)		蛍光X線	―		-
	―	~ 100 nm		全電子収量			33) Nolle_RSI(2012)
	―	~ 70 nm		光電子分光			12) Horiba_RSI(2011) 34) Nagamura_APL (2013)
	―	~ 100 nm (予想値※10)		X線回折			-
透過型X線顕微鏡(TXM※10)	**10 nm**	30 - 100 nm	結像型	透過	CT	透過実験に適した試料にしか適用できないが、拡大レンズを通して検出器上に二次元像を結像するため、走査型に比べ100倍程度の高効率イメージングが可能。	31) Chao_OptEx(2012)
X線コヒーレントイメージング (CDI※11)	**2 nm**	20 ~ 100 nm	透過配置の回折	コヒーレントX線回折	CT	コヒーレントX線を試料に照射した際に遠方で観測される回折パターンに位相回復計算を実行して試料像を得る。透過配置では、試料電子密度分布が再構成され、反射配置では、歪み分布が再構成される。	14) Miao_Nature(1999) 15) Takahashi_PRB(2010)
	~ 20nm	40 ~ 100 nm	反射配置の回折		ロッキング		16) Pfeifer_Nature(2006) 17) Hruszkewycz_Nano-Lett(2012)
X線フーリエ変換ホログラフィー (X-ray FTH※12)	**~ 40 nm**	50 ~ 100 nm	透過配置	透過	―	空間分解能は参照光用ピンホールの有効径で決まる。投影された二次元像をフーリエ変換するだけで実像が得られる。Lense less イメージングとも呼ぶ。	18) Aoki_JJAP(1974) 19) Eisebitt_Nature(2004) 20) Awaji_APEX(2010)
X線光電子顕微鏡 (X-PEEM※13)	**~20 nm**	40 - 80 nm	静電・磁場レンズによる電子顕微鏡	試料表面	―	X線照射によって表面から放出された光電子を電子レンズで拡大投影。円偏光X線と組み合わせた元素別磁区観察やその時分割実験に応用されている。	21) Anders_RSI(1999) 22) Yasuhara_APL(2009)
放射光走査型トンネル顕微鏡 (SR-STM※14)	**4 nm**	30 - 100 nm	トンネル電流	試料表面	―	原子スケールの分解能を有するSTMと放射光X線吸収を組み合わせた手法。	25) Eguchi_APL(2006) 26) Okuda_PRL(2009) 27) Saito_JJAP(2006) 28) Saito_JSR(2006)

・X線自由電子レーザー

SACLA(SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser) [35] は、2012年3月に共用が開始され、現在、世界最短波長のXFELとして利用されている。SACLAでは強力な短パルスX線の照射が試料に対して破壊的ダメージを与えるが、破壊前の情報が散乱されたX線によって検出されるため、放射光や電子顕微鏡などで従来から行われている長時間照射による観察方法と異なり、ダメージを受けていない構造や物性を明らかにできる。SACLAのX線レーザーは、最短10 fs以下のパルスで、かつ、コヒーレントなX線であり、1パルスの光子数は10^{11}個に達する。高精度のK-Bミラーにより、~1 μmの集光ビームが標準的に利用され、さらに、約50 nmのナノビーム生成が報告されている [36]。XFELは、ビーム集光によるナノ観察の他に、XFELがコヒーレントであることを活用したX線コヒーレント回折法によるイメージングに有利である。最近では大阪大学の高橋らによって、空間分解能10 nmより詳細な像が得られている [37]。SACLAの中心エネルギーは約10 keVであり、 範囲として4～15 keVが利用されている。現在は、硬X線のみの利用であるが、SACLAでは軟X線ビームライン(BL1)の計画が進められている。従来、材料分野において放射光を利用してきた研究者にも、材料の構造や物性を解明する上でSACLAの利用を考える機会が増えた。まだ世界的で2機しか稼働していないXFELを先導的に利用する好機と考えられる。

(b) 陽電子消滅法

結晶性材料中の原子空孔・空孔クラスター・マイクロボイド、あるいは非晶質材料中の分子間空隙・自由体積は、さまざまな材特特性（力学特性・電気的特性・分離特性・吸蔵特性等）に影響を及ぼす主要因となることが多く、それ故、ナノテク材料の開発や機能劣化の研究では、これらの極微小な空隙の評価が重要である。一般にこれら極微小空隙の評価は困難とされているが、陽電子やポジトロニウム（陽電子と電子の結合状態）をプローブとして、高感度での解析が可能である.

陽電子は、自然界にはほとんど存在しないが、放射性同位元素や加速器等を用いて生成し、材料評価に利用できる。材料中に入射した陽電子は、電子と対消滅して高エネルギーの光（消滅γ線）を放出するが、陽電子が消滅するまでの時間（陽電子寿命）や消滅する際に放出されるγ線のエネルギー分布は微小空隙のサイズや濃度と関係する。これらの原理に基づいた材料分析手法は，陽電子寿命測定法，ドップラー広がり測定法などと呼ばれるが，一括りに陽電子消滅法とも呼ばれている。なお、陽電子消滅法は、微小空隙だけでなく電子状態や不純物状態の評価にも頻繁に用いられている。

【国内外の施設の状況】

わが国には、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー、SPring-8、自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設、広島大学放射光科学研究センターをはじめいくつかの放射光実験施設があり、種々の研究に利用されている。SPring-8のX線自由電子レーザーSACLAでは世界最短波長のX線レーザーの発振に成功し、利用研究がスタートしている。他に産業利用を主眼とした佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターが運用されている。また、新たに中部シンクロトロン光利用施設が建設されている。放射光以外では、中性子源、ミュオン源がJ-PARCにおいて稼働開始している。

J-PARC のミュオンビームは世界トップクラスの大強度を誇る。現在、正ミュオンをエネルギー可変の超低速ビームとして取り出す装置の開発が進んでいる。

陽電子は放射線管理区域さえあれば大学の研究室や企業の研究所でも使用可能で、陽電子寿命測定、2 光子角相関測定、ドップラー広がり測定、低速陽電子ビームを用いた測定などが行われている。しかし高強低速陽電子ビームを生成するためは、加速器や原子炉を用いた施設が必要である。加速器を利用した施設は、産業技術総合研究所や高エネルギー加速器研究機構で稼働している。高エネルギー加速器研究機構では反射高速陽電子線回折が実用的なレベルで実現され、物質表面の解析方法として注目されている。原子炉を用いる高強度低速陽電子ビームは現時点ではわが国には存在しない。

国外においては、欧米を中心に高輝度化のための第 3 世代の放射光施設が稼働開始、あるいはその建設が進んでいる。次のような施設がある。

- スペイン ALBA（試運転中）
- ドイツ ANKA（2002 年から稼働）
- デンマーク ASTRID/ASTRID2（ASTRID は稼働中、ASTRID2 は建設中）
- イタリア DAΦNE（1998 年から稼働）
- 英国 Diamond（2007 年から稼働中）
- ドイツ DORIS・（1993 年から稼働中）
- イタリア Eletta（稼働中）
- フランス ESRF（欧州最大強度、稼働中）
- スウェーデン MAXIV（稼働中、新たな施設が 2015 年から稼働予定）
- スイス SLS（稼働中）
- ポーランド SOLARIS（建設中）
- フランス SOLEIL（稼働中）
- 米国 Argonne, Advanced Photon Source（稼働中）
- 米国 Brookhaven, NSLS（稼働中）
- 米国 Brookhaven, NSLS－II（2015 年稼働予定）
- 上海放射光施設 SSRF
- 台湾 TLS（1993 年から稼働、2005 年にアップグレード）
- 台湾 TPS（2013 年稼働開始予定）
- 韓国 PLS（1995 年稼働開始）

現在､稼働中の XFEL として､SACLA の他に米国のスタンフォードの SLAC がある。また、ドイツ、韓国、スイスで建設中であり、中国では計画中となっている。軟 X 線では、ドイツにおいて FLASH II が波長 0.8 nm （1 keV）を設計値として建設中である。なお、FLASH-I に相当する FLASH は、EUV 領域（波長 10 ~ 40 nm）の光源であり、理化学研究所が建設した XFEL の試験機（SCSS）と同様の波長帯である。

ミュオンビームは英国のラザフォード研究所やカナダのトライアンフで利用が可能である。陽電子ビームとして世界最大強度を持つのはミュンヘン工科大学に設置された原子炉を利用するものである。それ以外に、米国のアルゴンヌで高強度低速陽電子ビームが生成されている。カナダのマクマスター大学では、原子炉を用いた高強度低速陽電子ビームが建設中である。

［今後必要となる取り組み］

SPring-8 の共用開始から約 17 年が経過した現在、各国の放射光建設ラッシュを迎えており、光源の国際情勢に対してより注視が必要になっている。台湾に建設中の放射光施設（TPS: Taiwan Photon Source）が、極低エミッタンスの先端光源になる予定であるなど、アジア圏だけ概観しても我が国の放射光軟X線の優位性は失われつつある。我が国には、3 GeV クラスの第 3.5 世代軟 X 線リングが無く、高エネルギーの SPring-8 と、低エネルギーの UVSOR-II の間にあるべき高輝度光源が欠落している。より高いレベルの先端計測を産業イノベーションに活かすためにも、3 GeV クラスの中型高輝度放射光の実現が求められる。さらに、SPring-8 についても、現在よりも格段に低エミッタンスのリングへの改造が準備・検討されている。放射光によるナノ計測の重要性が増すなか、「他国で見えるものが国内放射光施設では見えない」という事態に陥ることは、材料評価技術の低迷から材料開発速度の低下や、産業イノベーションへのヒントを見逃すなどの深刻な弊害をもたらすと懸念されるため、放射光ナノ計測の一層の技術開発と利用が重要である。

既存の技術を越える野心的な開発も必要である。材料の特徴サイズのスケールダウンに関するロードマップを参照しつつ、「観たいときに観ることが可能なナノ計測技術」の開発を先取りする取り組みが求められる。さらに、放射光ナノ計測と、SPM や電子顕微鏡など、他のナノ解析とのベンチマークを行いながら放射光ナノ計測の位置づけと役割を明確化した利活用と開発が肝要である。

陽電子消滅については、バルク法やビーム法の市販化装置の開発や普及がいっそう進むと予測される。一方で、陽電子消滅法の測定データから、材料分析情報を正しく得るためには、経験を要す場面も多いため、講習会等を通して正しいデータ解析法・解釈法の習得機会の確保、陽電子消滅の専門家（研究者）の継続的な育成が重要である。なお、日本国内では、日本陽電子科学会等が学会誌発行や研究交流会等を通して、ユーザーのすそ野を広げる取り組みを行っている。ナノテク材料の性能と、微小空隙との関連性を明らかにするためには、陽電子消滅法と他手法との複合解析や、材料開発および材料評価それぞれの専門家（研究者）との共同研究を促進することが有効である。

（３）科学技術的・政策的課題

放射光によるナノ計測は、今後とも分光・回折と組み合わせた物質材料解析手法として、空間分解能と精度向上が見込まれる。特に、XFEL をはじめとして、高いコヒーレンスを利用したイメージングに分光を組み合わせた計測技の発展が期待される。一方、これまでの発展に光源性能の向上が欠かせなかったように、今後のナノ計測の発展過程においても光源性能の進歩が大きく関与すると予想される。従って、先端的な放射光施設が世界各所に建設されて光源性能の国際競争が激化するなかで、計測技術開発と合わせて我が国の放射光の光源性能のアップグレードが不可欠である。

陽電子消滅法であるが、現在までのところ、原子空孔を高感度に評価可能な手法は、陽電子消滅法だけであり、また計測法の進化も相まって、今後いっそうナノテク材料評価への利用ニーズが高まることが予想される。国内には、低速陽電子ビームや陽電子マ

イクロビームを用いた測定装置が数台あるもの、外部ユーザーのニーズには既に十分応えきれていない状況にある。このため、測定装置の性能強化、および、測定データ量産体制の構築、を支援することが望ましい。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

まず、国内ではSPring-8の共用BLでは、硬X線、および、軟X線のナノビーム化が急ピッチで進められていることが挙げられる。材料研究者がかなり標準的なナノ計測技術としてX線ナノビームを利用できるようになりつつある。「元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞磁性材料研究拠点」では、希少元素フリーの革新的永久磁石を創製するための解析ツールとして軟X線ナノビームの利用を必須とするなど、今後は大型プロジェクトのなかでの放射光ナノビームや高空間分解イメージング技術利用の重要性が増していくと予想される。

次に陽電子消滅法の動向について述べる。

(a) 市販化装置の開発および普及：数年前に低速陽電子ビーム法の測定装置が開発された。また、バルク法の測定装置（産総研）が開発中である。今後、これら装置の普及がすすむと予測される。

(b) 高強度ビーム利用施設の外部公開：電子リニアック（産総研・高エネ研）、原子炉（京大原子炉研究所）を用いての高強度低速陽電子ビームの発生、利用技術の高度化、および外部ユーザーへの利用がいっそうすすむと予期される。

(c) 陽電子マイクロビーム計測法：原子空孔のマクロスケール分布解析をシームレスに行うことで、材料劣化やメカニズムの解明がすすむと考えられる。（産総研・日本原研機構・千葉大）。ただし、データ量産体制の構築が重要である。

(d) その場計測法：一般に低速陽電子ビームは、真空中でのみで利用可能である。最近、マイクロビームを薄膜の真空窓を通して大気中で利用する技術が開発された。これにより、ナノテク材料を、実用環境を模擬した環境下にて評価（その場測定）することが可能となりつつある（産総研）。ただし、データ量産体制の構築が重要である。

(e) 新技術の開発：表面回折法による構造解析（KEK・日本原研機構）、偏極ビームによるスピントロニクス・磁性材料への応用（日本原研機構）が、新評価技術とし発展しつつある。

（５）キーワード

陽電子消滅、微小空隙、格子欠陥、点欠陥、原子空孔、空孔クラスター、ナノボイド、マイクロボイド、自由体積、分子間空隙、電子運動量分布、不純物析出、機能性材料、先端材料、電子デバイス、磁性材料、表面回折、表面・界面・薄膜分析、陽電子マイクロビーム、陽電子スピン偏極ビーム

（６）国際比較

放射光

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	◎	→	欧米と同様に基礎研究分野は物質、生命分野の多岐にわたり、ハイインパクトジャーナルにも多数掲載されている。基礎研究は、SPring-8、Photon Factory, UVSOR, HiSOR、さらに、SACLAなどで活発である。立命館など大学付置の放射光施設では、学生教育での利用も重視されている。一方、国内の軟X線ビームラインは、各国で建設ラッシュとなっている中型放射光施設と比較してハード面での競争力を失いつつある。そのため、新たな中型放射光建設の必要性を含め、将来計画が議論されている[38, 39]。
	応用研究・開発	◎	↗	SPring-8では、ナノビーム計測が推進され、その利用基盤整備が進んでいる。これらの整備が、グリーンナノイノベーションプロジェクトや元素戦略プロジェクトなど、社会要請に基づき進展したことからも、ナノビーム計測の重要性が確認される。また、ナノ計測の更なる性能向上を可能にするアップグレード(SPring-8 II)が計画されている[40]。SACLAでは、利用技術開発の面でも斬新でハイインパクトの成果が著名誌から数多く発表されている。
	産業化	◎	↗	SPring-8の産業利用率は約20%であり、大型放射光施設のなかでも高い水準を保っている。また、自動車部品、食品、健康製品など幅広い産業にわたり利用され製品開発への貢献が認められる点や、さらに、複数の企業または企業共同体が専用ビームラインを有する点で欧米との差異が認められる。佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターでは産業利用の割合が50%を越え、また、あいちシンクロトロン光センターの稼働で産業界の利用機会が増えたにも関わらず、SPring-8の産業利用は成果占有課題を中心に利用が伸びている。
米国	基礎研究	◎	→	生命、環境、材料など、多分野に渡り活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	ALSでは軟X線のナノ計測が重点化され、その開発と利用研究が盛んである。硬X線領域では大型放射光施設であるAPSが利用されている、また、3 GeVの低エミッタンス中型放射光 NSLS-IIの建設が進んでおり、2015年からの運転が予定されている。一方、XFEL施設SLACが稼働している。
	産業化	○	→	欧州と同様に創薬企業によるタンパク質結晶の構造解析での利用が顕著である。例として、APSにおける課題のうち、生物・ライフサイエンス系の課題の割合は36%であり、２番目に多い材料科学の19%と比較しても差は顕著である。産業分野での利用は比較的少なく、APSにおいても12%であるが[41]、この値は企業から大学等への委託研究の場合が含まれていない可能性もある。
欧州	基礎研究	◎	↗	ナノ計測、および、時分割実験によるダイナミクス研究などで高いレベルの基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	長らく大型放射光ESRFやBESSY-IIが欧州の放射光研究を牽引してきたが、近年はSLS, SOLEIL, DIAMONDなどの中型施設の性能と成果が際立っている。このような中型リングは、ESRF等の大型施設に比べて建設・運転コストが低いため、各国が独自の放射光を所有することが可能になったと分析される。特記すべきは、中型放射光であるにも関わらず、軟Ｘ線～硬Ｘ線領域の高輝度放射光を利用することを可能にしたのは、日本の真空封止アンジュレーターの技術である。また、建設中のMAX-IVにおけるリングのエミッタンス特性は0.33 nmradと桁違いに高性能である。低エミッタンスであることは、ナノ計測に極めて重要な性能であり、今後のビーム性能や研究成果が注目される。また、ハンブルグに建設中のEuro-XFELは2017年に利用が予定されており、日・米のXFEL利用研究に対するキャッチアップが始まることになる。
	産業化	○	→	米国と同様に創薬企業によるタンパク質結晶の構造解析での利用が中心である。産業利用をプロモートしようとする政策についての情報もあるが、欧州全体をみれば多数の放射光があるので、一概に傾向を評価することは難しい。

中国	基礎研究	○	↗	中国の放射光施設（SSRF、BSRF、NSRL、SSRL）に関しては、放射光施設HPの英語コンテンツが希薄であり、成果や技術情報の詳細を知ることは難しいが、上海放射光施設（SSRF）ではハイインパクトジャーナルへの掲載数にも確実な伸びが見られる。
	応用研究・開発	△	↗	SSRFでは、ナノイメージング技術であるSTXMを重点技術と位置づけていると。また、XFELの建設計画がある。
	産業化	△	→	主として医薬品業界の利用が中心とされているが、産業利用の割合は採択課題の2%前後である。
韓国	基礎研究	△	↗	放射光施設PLS-IIを有しているPALにおける論文発表数は確実に延びている。2011年にPLSを閉鎖し、アップグレード施設としてPLS-IIを供用したなかで、課題数や利用者数に延びが見られることから、アップグレードが順調に進んだ効果と考えられる。各年、Nature Comm. や Nature Physicsなど、ハイインパクトの論文が５本程度発表されており、化学、物理、材料などの研究が中心。
	応用研究・開発	○	↗	2013年現在、PLS-IIにおいて研究者66名に対して技術者52名と、SPring-8に比べて技術者の割合が多い組織が特徴である。計画どおりであれば、2013年末から軟X線ナノ計測ステーション(BL-10A)の運用が開始されている。市販のSTXM装置が導入され20～100 nmのナノ計測が予定されている。XFELについては、加速電圧10 GeV, 全長1100 m のPAL-XFELの建設が2013年から始まっている。
	産業化	×	↘	PALの産業利用者の絶対数は横ばいであり、2012年の産業利用者数は総数に対して約3%にまで低下している。

陽電子

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	◎	→	高強度陽電子ビーム発生、マイクロビーム法、スピン偏極ビーム法、表面回折分析法、計測装置開発。
	応用研究・開発	◎	↗	機能性材料・先端材料への応用が増加。陽電子寿命値の標準物質の開発。バルク法の市販化装置を開発中。
	産業化	○	↗	ビーム法の寿命測定装置が市販化され、分析会社にて評価が実施されている。
米国	基礎研究	○	→	高強度陽電子ビーム発生、マイクロビーム法。
	応用研究・開発	△	→	目立った活動は無い。
	産業化	△		陽電子ビーム発生装置、陽電子蓄積装置が市販化され、日・豪・欧・米・中で導入利用されている。
欧州	基礎研究	◎	→	高強度陽電子ビーム発生、マイクロビーム法、計測装置。
	応用研究・開発	◎	↗	機能性材料・先端材料への応用が増加。
	産業化	×	→	目立った活動は無い。
中国	基礎研究	○	↗	高強度陽電子ビーム発生法、マイクロビーム発生法、計測装置。
	応用研究・開発	○	↗	機能性材料・先端材料への応用が増加。
	産業化	×	→	目立った活動は無い。
韓国	基礎研究	×	→	目立った活動は無い。
	応用研究・開発	×	→	目立った活動は無い。
	産業化	×	→	目立った活動は無い。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料・参考資料

引用資料

1) 桜井健次, ぶんせき 第 2 号, 86 (2010)
2) N. Awaji, S. Ozaki, J. Nishino, S. Noguchi, T. Yamamoto, T. Syoji, M. Yamagami, A. Kobayashi, Y. Hirai, M. Shibata, K. Yamaguchi, K.Y. Liu, S. Kawado, M. Takahashi, S. Yasuami, I. Konomi, S. Kimura, Y. Hirai, M. Hasegawa, S. Komiya, T. Hirose, and T. Okajima, Jpn. J. Appl. Phys. 39, L1252 (200 0).
3) P. Gambardella, A. Dallmeyer, K. Maiti, M. C. Malagoli, W. Eberhardt, K. Kern, and C. Carbone, Nature 416, 301 (200 2).
4) J. Garcia-Barriocanal, J. C. Cezar, F. Y. Bruno, P. Thakur, N. B. Brookes, C. Utfeld, A. Rivera-Calzada,　S. R. Giblin, J. W. Taylor, J. A. Duffy, S. B. Dugdale, T. Nakamura, K. Kodama, C. Leon, S. Okamoto and J. Santamaria, Nature Communications **1**, 82 (2010).
5) 竹中久貴, 放射光 **23**, 164 (2010).
6) D. H. Bilderback, S. A. Hoffman, and D. J. Thiel, Science **263**, 201 (1994).
7) H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Nature Physics, Nature Physics **6**, 122 (2010).
8) F. Döring, A. L. Robisch, C. Eberl, M. Osterhoff, A. Ruhlandt, T. Liese, F. Schlenkrich, S. Hoffmann, M. Bartels, T. Salditt, and H. U. Krebs, Optics Express **21**, 19311 (2013).
9) 文部科学省「低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワーク整備事業」グリーン・ナノ放射光分析評価拠点（独立行政法人理化学研究所、研究グループリーダー 石川哲也）
10) https://www.uvsor.ims.ac.jp/beamlines/4U/bl4u.html
11) Y. Takeichi, N. Inami, H. Suga, K. Ono, and Y. Takahashi, Chemistry Letters **43**, 373 (2014).
12) K. Horiba, Y. Nakamura, N. Nagamura, S. Toyoda, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Amemiya, Y. Senba, and H. Ohashi, Rev. Sci. Instrum. **82**, 113701 (2011).
13) 中村哲也, 小谷佳範, 高田昌樹, 仙波泰徳, 大橋治彦, 後藤俊治, SPring-8 利用者情報誌 **19**, 102 (2014).
14) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz, and D. Sayre, Nature (London) **400**, 342 (1999).
15) Y. Takahashi, Y. Nishino, R. Tsutsumi, H. Kubo, H. Furukawa, H. Mimura, S. Matsuyama, N. Zettsu, E. Matsubara, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Phys. Rev. B **80**, 054103 (2009).

16) Mark A. Pfeifer, Garth J. Williams, Ivan A. Vartanyants, Ross Harder, and Ian K. Robinson, Nature **442**, 63 (2006).
17) S. O. Hruszkewycz, M. V. Holt, C. E. Murray, J. Bruley, J. Holt, A. Tripathi, O. G. Shpyrko, I. McNulty, M. J. Highland, and P. H. Fuoss, Nano Lett. **12**, 5148 (2012).
18) S. Aoki and S. Kikuta, Jpn. J. Appl. Phys. **13**, 1385 (1974).
19) S. Eisebitt, J. Lüning, W. F. Schlotter, M. Lörgen, O. Hellwig, W. Eberhardt, and J. Stöhr, Nature (London) **432**, 885 (2004).
20) N. Awaji, K. Nomura, S. Doi, S. Isogami, M. Tsunoda, K. Kodama, M. Suzuki, and T. Nakamura, APEX **3**, 085201 (2010).
21) S. Anders, H. A. Padmore, R. M. Duarte, T. Renner, T. Stammler, A. Scholl, M. R. Scheinfein, J. Stöhr, L. Séve, and B. Sinkovic, Rev. Sci. Instrum. **70**, 3973 (1999).
22) BL25SU, http://www.spring8.or.jp/.
23) R. Yasuhara, K. Fujiwara, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Kotsugi, M. Oshima, and H. Takagi, Appl. Phys. Lett. **95**, 012110 (2009); BL17SU, http://www.spring8.or.jp/.
24) T. Matsushima, T. Okuda, T. Eguchi, M. Ono, A. Harasawa, T. Wakita, A. Kataoka, M. Hamada, A. Kamoshida, Y. Hasegawa and T. Kinoshita, Review of Scientific Instruments, **75**, 2149 (2004).
25) T. Eguchi, T. Okuda, T. Matsushima, A. Kataoka, A. Harasawa, K. Akiyama, T. Kinoshita and Y. Hasegawa, Appl. Phys. Lett. **89**, 243119 (2006).
26) T. Okuda, T. Eguchi, K. Akiyama, A. Harasawa, T. Kinoshita, Y. Hasegawa, M. Kawamori, Y. Haruyama and S. Matsui , Phys. Rev. Lett. **102**, 105503 (2009).
27) A. Saito, J. Maruyama, K. Manabe, K. Kitamoto, K. Takahashi, K. Takami, S. Hirotsune, Y. Takagi, Y. Tanaka, D. Miwa, M. Yabashi, M. Ishii, M. Akai-Kasaya, S. Shin, T. Ishikawa, Y. Kuwahara, and M. Aono, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 1913 (2006).
28) A. Saito, J. Maruyama, K. Manabe, K. Kitamoto, K. Takahashi, K. Takami, M. Yabashi, Y. Tanaka, D. Miwa, M. Ishii, Y. Takagi, M. Akai-Kasaya, S. Shin, T. Ishikawa, Y. Kuwahara, and M. Aono, J. Synchrotron Rad. **13**, 216 (2006).
29) Swiss Light Source (http://www.psi.ch/sls/).
30) A. Ruhlandt, T. Liese, V. Radisch, S. P. Kr ¨ uger, M. Osterhoff, K. Giewekemeyer,H. U. Krebs, and T. Salditt, AIP Advances **2**, 012175 (2012).
31) J. Raabe, G. Tzvetkov, U. Flechsig, M. Böge, A. Jaggi, B. Sarafimov, M. G. C. Vernooij, T. Huthwelker, H. Ade, D. Kilcoyne, T. Tyliszczak, R. H. Fink, and C. Quitmann, Rev. Sci. Instrum. **79**, 113704 (2008).
32) W. Chao, P. Fischer, T. Tyliszczak, S. Rekawa, E. Anderson, and P. Naulleau, Optics Express **20**, 9777 (2012).
33) D. Nolle, M. Weigand, P. Audehm, E. Goering, U. Wiesemann, C. Wolter, E. Nolle, and G. Schütz, Rev. Sci. Instrum. **83**, 046112 (2012).
34) N. Nagamura, K. Horiba, S. Toyoda, S. Kurosumi, T. Shinohara, M. Oshima, H. Fukidome, M. Suemitsu, K. Nagashio, and A. Toriumi. Appl. Phys. Lett. **102**, 241604 (2013).
35) http://xfel.riken.jp/

36) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Koyama, K. Tono, Y. Inubushi, T. Togashi, T. Sato, J. Kim, R. Fukui, Y. Sano, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Nature Communications 4539 (2014).
37) Y. Takahashi, A. Suzuki, N. Zettsu, T. Oroguchi, Y. Takayama, Y. Sekiguchi, A. Kobayashi, M. Yamamoto, and M. Nakasako, Nano Letters **13**, 6028 (2013).
38) SPRUC 放射光科学将来ビジョン白書・中間報告, SPring-8 ユーザー協同体(SPRUC), 2014 年 4 月, (http://www.spring8.or.jp/ext/ja/spruc).
39) X 線吸収微細構造(XAFS)分光の将来展望, 日本 XAFS 研究会, 2014 年 9 月 29 日
40) SPring-8-II Conceptual Design Report, RIKEN SPring-8 Center, Sep., 2014, (http://rsc.riken.jp/).
41) http://www.aps.anl.gov/Science/Reports/

参考資料（陽電子に関するもの）

1) 過去１０年程の国際会議アブストラクト集 （対象とした国際会議は次の通り（全会議は３年おきに開催）
・International Conference on Positron Annihilation (ICPA)
・International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS)
・The International Workshop on Positron Studies of Defects (PSD)
・International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC)
2) 陽電子科学会会報「陽電子科学」: 2013 年 9 月号、2014 年 2 月号、2014 年 9 月号

３．５.10.４　超高速時間分解分光

（１）研究開発領域の簡潔な説明

超短パルス光を用いた計測は、フェムト秒パルスに代表される時間的に短いパルス光を用いて物質中の電子や原子核の動きに伴う光学的性質の超高速の時間変化を分光計測するものであり、一般的に超高速時間分解分光と呼ばれる計測法である。動いている物体をストロボ撮影するのと同様に、超短パルス光の持続時間の間で、時々刻々の変化を止めてコマ撮り写真を撮るような手法といえる。紫外～可視～赤外光領域で行われる物質の電子状態と振動状態についての分光計測を元に、テラヘルツやX 線など、広範な波長領域の計測へと分光計測は拡大している。分光計測技術は、光科学の基盤であると同時にフロンティアであり続けている研究開発領域であり、生体イメージングやレーザー加工などの応用にも波及している。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

超高速時間分解分光は元来、主に光照射によって誘起される物質変化のメカニズムを解明しようとする学術的な研究領域として発展してきた分野である。

時間分解計測の分解能は、モード同期パルスレーザーの発明とその短パルス化に伴って、時代とともに著しく向上してきた。特に、1990 年代初頭に極めて安定にフェムト秒パルスを発生するモード同期チタンサファイアレーザーが発明されたことによって、超短パルス光は分光研究を専門としない研究者にも広く普及するようになった。モード同期チタンサファイアレーザーおよび、その出力を増幅する再生増幅器の技術的進歩によって、基礎学問としての時間分解分光を実用技術に押し上げたといえよう。

超短パルス光を用いる利点は、時間分解能が向上しただけにとどまらず、光電場強度の尖頭出力が著しく増大したことも挙げられる。尖頭出力の増大により光電場強度のベキ乗に比例する非線形光学効果が効果的に発現し、光の波長変換も容易となった。この波長変換技術を活用して、紫外から可視域さらには赤外にいたる波長領域において、物質の電子状態や振動状態についての分光計測が可能となった。さらに今日では、テラヘルツやX線など、広範な波長領域へと分光計測の範囲が拡大している。

実用の光波長領域の拡大に伴って、その時代で得られる最先端光源を適用できる測定対象を選ぶという研究スタイルから、測りたいものに合わせて光源を選ぶという時代に転換している。レーザー技術、特に超短パルス光源技術の発展に呼応して、光科学という分野横断的な学際分野が形成されたといって過言ではない。光科学のフロンティアとして新しい技術が常に生み出されており、光検出技術、顕微技術、生体イメージング、レーザー加工などの応用分野へも波及している。

［これまでの取組み］

分子の振動モードや固体の光学フォノンを時間軸上で観察する振動分光が物質の構造情報を得るために多く適用されてきた。歴史的にレーザー光が可視及び近赤外域から実現されてきたことから、振動スペクトルの時間変化として物質変化を追跡する超高速振動分光は、可視領域の光のみを用いて測定できるラマン分光として発展してきた。ラマ

ン分光と相補的な関係にある赤外分光は、非線形光学過程によって波長変換された中赤外パルス光が安定して得られるようになってから実用的になってきた。

この振動分光法を紫外～可視域の超短パルス光で励起した過渡的な状態のプローブとして用いて、現在では、生体分子を含む複雑な分子系を対象に分光計測が行われている。例えば、励起状態のダイナミクス、結合の切断、分子内及び溶媒への振動エネルギー再分配、コンフォーメーション変化などを追跡することが可能となっている。

近年では、中赤外域よりも低周波側にあるテラヘルツ領域（遠赤外領域）でも、短パルス発生が行われ、テラヘルツ光が観測のみならず物質の光励起にも使えるようになってきた。中赤外からテラヘルツ域は、分子の振動・回転や結晶格子のフォノンなど、物質の構造に関わる情報を豊富に含んでいる。それだけでなく、モノサイクルのテラヘルツパルスを用いた時間分解計測は、電荷キャリアの輸送特性といった固体などの凝縮系物質の基本的性質を調べるためにも有用であり、さらには、そのような電荷キャリアの集団運動を直接光で駆動することもできる。さらには、キャリアのスピンダイナミクスを解明したり、コヒーレントスピンを操作したりすることも可能になってきた。

深紫外領域においてもチタンサファイア再生増幅器と非線形光学効果を利用して 10 フェムト秒級の光パルスが生成され、光電子分光法の励起光源に用いられる。紫外光電子分光法では、金属の仕事関数や半導体のイオン化ポテンシャルの測定が可能である。

さらに短波長であるＸ線領域の時間分解Ｘ線計測は、物質の電子状態と構造動力学の最も敏感なプローブである。時間分解Ｘ線計測には、大別して吸収分光法と回折法とがある。吸収分光法では、電荷分布やスピン状態の変化に関する情報を得ることができ、回折法は、タンパク質などの時間的構造変化を直接的に観測することができる。Ｘ線パルスを得るには、フェムト秒レーザー光を金属に集光させて発生させる方法の他、電子線ビームを加速させて放射させる方法もある。

フェムト秒よりさらに短いアト秒パルスの発生、それを用いたアト秒の超高速時間分解分光の試みも進んできた。アト秒パルスは、強力なレーザー光を原子・分子に照射することによって軟Ｘ線領域で発生させる。電磁波が伝搬するには、原理的に半サイクルを超える光電場振動が必要であるため、パルスの時間幅をアト秒領域とするには、必然的に光電場周期もアト秒台になる軟Ｘ線領域となる。

［今後必要となる取組み］

超短パルス光を用いたナノ計測においては、時間分解能と空間分解能と両立させることが必須課題となる。エレクトロニクスおよびオプトエレクトロニクスの多くの新たなナノテクノロジーにとっては、ナノ構造中での電荷キャリアの運動を詳細に理解することが非常に重要である。たとえば、太陽エネルギー変換及び貯蔵、光増感および光触媒作用は、電荷キャリア（電子および正孔）の移動度や寿命といった特性に大きく依存する。それゆえ、ナノ材料における光励起された電荷分布の空間-時間変化を測定するために、フェムト秒の時間分解能とナノメートルの空間分解能を同時に実現する技術開発が今後優先度の高い取組みとなる。

（３）科学技術的・政策的課題

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

「今後必要となる取組み」の項で述べた通り、他のナノ計測手段との組み合わせによって、空間分解能と時間分解能を両立させた計測の報告例が顕著に見られている。以下では、主に顕微鏡の方式で分類して、最近の技術動向を述べる。

【電子顕微鏡】

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（UEM）が鋭意開発されている。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。フェムト秒パルスで放出された光電子は、電子パルスの時間幅としてもサブピコ秒にとどまり、試料励起用のフェムト秒ポンプパルスと組み合わせて時間分解計測に用いることができる。実空間イメージングやブラッグ回折、あるいは電子エネルギー損失分光など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。

特に、この超高速電子顕微鏡法のプローブ電子の生成技術も日々改良が重ねられている。時間分解能の観点からは、プローブ電子の時間幅を 15 fs（FWHM）まで圧縮した報告がある。また、光電子放出のためのレーザーパルスと同時にテラヘルツパルスを照射して、テラヘルツ電磁波の電場波形により、電子パルスを制御するという技術も報告されている。

外部からプローブとして電子線を当てるのではなく、試料に直接レーザーパルスを当て、そこから放出される光電子を検出する光電子放出型電子顕微鏡についても、サブピコ秒の時間分解能を実現した。GaAs 表面においてフェムト秒レーザーで励起された電子の再結合と外場によって駆動された電子輸送を撮像することに成功した。電子ドリフト速度と電場勾配との線形関係が確認され、それによって移動度を推定することができた。サブピコ秒の時間分解能およびサブミクロンの空間分解能で電荷キャリアの輸送を直接測定することができるため、微細な電子輸送と巨視的なデバイス性能との関係を定量化することによって、多種多様な電子デバイス及び光学デバイスを評価するのに用いることができる。

【走査型トンネル顕微鏡】

フェムト秒レーザーを走査型トンネル顕微鏡（STM）と組み合わせる試みでは、数百フェムト秒の時間分解能と数ナノメートルの空間分解能が同時に実現されている。従来の超高速 STM では、時間分解能は十ピコ秒程度が限界であった。最新の技術では、テラヘルツパルスを STM の走査プローブ先端に照射し、テラヘルツパルスが結合したサブピコ秒の間だけトンネル電流を取り出せる STM が実証されている。このテラヘルツ STM を用いて、単一 InAs ナノドット内のキャリアを近赤外レーザーパルス光で励起し、その直後からの超高速キャリア捕獲を直接撮像した報告がある。

【近接場光学顕微鏡】

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。散乱型近接場光学顕微鏡（Scattering-SNOM）を用いて、20nm の空間分解能を有するポンププローブ赤外分光法が実現されている。実施例として、剥離した単層グラフェンの中赤外域における局所的な光伝導度が測定されている。近赤外域の光パルスで励起すると、200 フェムト秒の時間スケールでグラフェンのプラズモン特性が変化し、これは電子温度の上昇を検出していることになる。超高速近接場光学顕微鏡は、ナノメートルの空間分解能とサブ 20 フェムト秒の時間分解能まで達成されている。パルス幅 12 フェムト秒の超短パルス光で、長さ 200nm の金ナノロッドを励起してプラズモンの定常波モードを２つ以上誘起する。２つのプラズモンモードの重ね合わせにより、プラズモン励起の空間的構造が時々刻々と変化する様子が近接場像として撮像できた。

【Ｘ線回折・Ｘ線吸収】

Ｘ線を用いた計測は、試料に含まれる特定の元素について、その電荷分布や周辺原子間の結合距離などの微視的な構造に関する情報が得られる。Ｘ線計測の最新の動向としては、Ｘ線自由電子レーザー(XFEL)を用いた成果が顕著に増えてきた。米国の Linac Coherent Light Source (LCLS)と日本の SPring-8 Angstrom Compact Laser(SACLA)の２カ所で、最先端研究を競っている。Ｘ線回折の実験では、パルス幅 50 fs 程度のポンプパルスで励起された結晶格子の歪みの動的変化を時間分解能 80 fs 程度で時間分解測定している例が LCLS から報告されている。試料としては、金ナノ粒子や電子相関の強い酸化物薄膜などが対象となっている。超高速の相変化などを追跡するのに、適した方法である。一方、Ｘ線吸収については、SACLA からの広帯域放射を活用したマルチチャンネル方式の直接 X 線吸収スペクトル一括測定が報告されている。主に金属錯体分子における中心金属の電荷分布や配位子との結合距離の測定に用いられている。

レーザーパルスを金属ターゲットに照射して発生させる方法については、硬Ｘ線フラックスを生成する工夫が求められている。フェムト秒の時間分解Ｘ線コヒーレント回折イメージング法により、粉末回折パターンから電子密度マップが測定されている。イオン性結晶における電荷分布やイオンの平行位置からの移動などが測定されている。

【コヒーレントラマン顕微鏡】

空間分解能という点からは光回折限界に留まっているが、コヒーレントラマン散乱による振動分光を顕微観察に活用している例が実用技術として定着してきた。コヒーレントラマン散乱は３次の非線形光学過程であるため、尖頭出力の高い超短パルス光のメリットを享受できる。広く普及している２光子蛍光顕微鏡と異なり、蛍光プローブを付けずに、物質固有の分子振動あるいは格子振動を指標として微視的構造の空間分布を画像化できる。また、時間分解測定により、振動寿命の異なるモードを分別することもできる。コヒーレントラマン顕微鏡は、多くの場合は生体関連分子の画像化に利用されるが、

半導体結晶の構造やキャリアドープ量などの材料評価にも有用である。

【超解像蛍光顕微鏡】

時間分解計測ではないが、光の回折限界を超える超解像度を実現した STED（STimulated Emission Depletion : 誘導放出制御）顕微鏡にも超短パルス光が用いられている。STED 顕微鏡では、蛍光顕微鏡像を撮影するのに、蛍光色素を励起するレーザーと同軸にドーナツ状のビーム断面を持つ誘導放出制御レーザーを重ねて照射する。ドーナツ形状の穴直径で決まる空間分解能は、光の回折限界で決まる分解能より数倍向上する。効率よく誘導放出を誘起するには、光の持続時間が短いパルス光の方が有利であり、フェムト秒パルスが実用的に使われる。

（５）キーワード

時間分解分光、パルスレーザー、紫外光、可視光、赤外光、テラヘルツ電磁波、X線、電子状態、振動状態、顕微技術、生体イメージング、レーザー加工、振動分光、ラマン分光、赤外分光、非線形光学過程、ダイナミクス、ピコ秒、フェムト秒、アト秒、時間分解能、高い尖頭出力、超高速電子顕微鏡、超高速近接場顕微鏡、時間分解回折、X線自由電子レーザー、コヒーレントラマン顕微鏡

（６）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	○	↗	優れた分野も多いが、最先端では米国・欧州に次ぐ２番手であることも多い。国際共同研究の比率が低い印象があり、日本単独で奮闘しているところもある。
	応用研究・開発	○	→	最先端の基礎研究と応用開発との間にまだギャップがある感触
	産業化	△	→	システム製品は市場に出せているが、構成部品は能動素子・受動素子ともに海外製品に頼るところも大きい。機構部品は強い印象
米国	基礎研究	◎	→	レーザーの発明以来、米国が常に第一線を維持しているが、欧州に比べて分野の流行り廃りに連動している印象がある。出版論文や国際会議発表等で欧州との共同も目立ってきた
	応用研究・開発	◎	→	最先端の成果を製品に結びつける力は安定している印象
	産業化	◎	→	個別部品からレーザー装置、システム製品に至るまでを網羅的に扱う総合メーカーが強い
欧州	基礎研究	◎	↗	近年、ドイツが底力を十分に発揮している。米国に比べて、基礎研究を地道に着実に進めている感がある。英仏も実力は安定している伊、オーストリア、スイスなども着実。出版論文や国際会議発表等の伸びが著しい
	応用研究・開発	◎	↗	最先端の成果を製品に結びつける力が最近特に強い印象
	産業化	◎	↗	総合システムメーカーよりも個別部品あるいはレーザーや検出器などの単体装置で、米国よりも進んだ製品を出すことも多い
中国	基礎研究	△	↗	論文数、発表数の伸びは著しいが、最先端分野では欧米発祥のアイデアを踏襲することも多い。
	応用研究・開発	○	→	非線形光学結晶など、中国が特に強いという分野がいくつかある
	産業化	△	→	特に強い分野では独占的に製品供給を行っているものもある
韓国	基礎研究	△	→	韓国独自というよりは、欧米の研究機関に所属することで研究を進めている事例もある
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	→	受動部品を扱っている印象しかない

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）参考資料

1）D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, Optics Letters, 16, 42-44 (1991)
2）T. Wilhelm, J. Piel, and E. Riedle, Optics Letters, 22, 1494-1496 (1997)

3) Bradley Ferguson and Xi-Cheng Zhang, Nature Materials 1, 26 - 33 (2002)
4) Ch. Spielmann, N. H. Burnett, S. Sartania, R. Koppitsch, M. Schnu ¨ rer, C. Kan, M. Lenzner, P. Wobrauschek, F. Krausz, Science 278, 661-664 (1997)
5) Ahmed H. Zewail, J. Phys. Chem. A, 104 (24), 5660–5694 (2000)
6) Philipp Kukura, David W. McCamant, Sangwoon Yoon, Daniel B. Wandschneider, Richard A. Mathies, Science 310, 1006-1009 (2005)
7) Robert A. Kaindl, Matthias Wurm, Klaus Reimann, Peter Hamm, Andrew M. Weiner, and Michael Woerner, JOSA B, 17, 2086-2094 (2000)
8) Iban Amenabar, Simon Poly, Wiwat Nuansing, Elmar H. Hubrich, Alexander A. Govyadinov, Florian Huth, Roman Krutokhvostov, Lianbing Zhang, Mato Knez, Joachim Heberle, Alexander M. Bittner and Rainer Hillenbrand, Nature Communications 4, 2890- (2013).
9) Masayoshi Tonouchi, Nature Photonics 1, 97 - 105 (2007)
10) Masaaki Sato, Takuya Higuchi, Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, Kosuke Yoshioka, Takayuki Suzuki, Kazuhiko Misawa and Makoto Kuwata-Gonokami, Nature Photonics 7, 724–731 (2013)
11) Albert Stolow, Arthur E. Bragg and Daniel M. Neumark, Chem. Rev., 104 (4), pp 1719–1758 (2004)
12) Ch. Bressler, C. Milne, V.-T. Pham, A. ElNahhas, R. M. van der Veen, W. Gawelda, S. Johnson, P. Beaud, D. Grolimund, M. Kaiser, C. N. Borca, G. Ingold, R. Abela, M. Chergui, Science 323, 489-492 (2009)
13) A. L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuka, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz and U. Heinzmann, Nature 449, 1029-1032 (2007)
14) A. H. Zewail, Science, 328, 187193 (2010)
15) S. Lüneburg, M. Müller, A. Paarmann, and R. Ernstorfer, Appl. Phys. Lett. 103, 213506 (2013).
16) R. M. vander Veen, O. -H. Kwon, A. Tissot, A. Hauser, and A. H. Zewail, Nature Chemistry, 5, 5, 395402 (2013)
17) F. O. Kirchner, S. Lahme, F. Krausz, P. Baum, New J. Phys. 15 (2013).
18) L. Wimmer, G. Herink, D. R. Solli, S. V. Yalunin, K. E. Echternkamp and C. Ropers, Nature Physics 10, 432–436 (2014)
19) K. Fukumoto, Y. Yamada, K. Onda, and S. Koshihara, Appl. Phys. Lett. 104, 53117-53121 (2014).
20) T. L. Cocker, V. Jelic, M. Gupta, S. J. Molesky, J. A. J. Burgess, G. De Los Reyes, L. V. Titova, Y. Y. Tsui, M. R. Freeman, and F. A. Hegmann, Nature Photon. 7, 620-625 (2013).
21) Martin Wagner, Zhe Fei, Alexander S. McLeod, Aleksandr S. Rodin, Wenzhong Bao, Eric G. Iwinski, Zeng Zhao, Michael Goldflam, Mengkun Liu, Gerardo Dominguez, Mark Thiemens, Michael M. Fogler, Antonio H. Castro Neto, Chun Ning Lau, Sergiu Amarie, Fritz Keilmann, and D. N. Basov, Nano Letters 14, 894–900 (2014)
22) H. J. Wu, Y. Nishiyama, T. Narushima, K. Imura, and H. Okamoto, Appl. Phys. Express

5(6), 062002 (2012).

23) J. N. Clark, L. Beitra, G. Xiong, A. Higginbotham, D. M. Fritz, H. T. Lemke, D. Zhu,3M. Chollet, G. J. Williams, M. Messerschmidt, B. Abbey, R. J. Harder, A. M. Korsunsky, J. S. Wark, I. K. Robinson, Science 341, 56 (2013)

24) C. I. Blaga, J. Xu, A. D. DiChiara, et al., Nature 483, 194 (2012).

25) Yuki Obara, Tetsuo Katayama, Yoshihiro Ogi, Takayuki Suzuki, Naoya Kurahashi, Shutaro Karashima, Yuhei Chiba, Yusuke Isokawa, Tadashi Togashi, Yuichi Inubushi, Makina Yabashi, Toshinori Suzuki, and Kazuhiko Misawa, Optics Express, 22, 1105-1113 (2014)

26) V. Juve, M. Holtz, F. Zamponi, M. Woerner, T. Elsaesser, and A. Borgschulte, Phys. Rev. Lett. 111, 217401 (2013).

27) Takayuki Suzuki and Kazuhiko Misawa, Opt. Express 19. 11463-11470 (2011)

28) B. Harke, J. Keller, C. K. Ullal, V. Westphal, A. Schonle, S. W. Hell, Opt. Express, 16, 4154–4162 (2008).

29) B.Hein, K. L. Willig, and S. W. Hell, Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) 105, 14271-14276 (2008).

３．５．11　物質・材料シミュレーション

（１）研究開発領域の簡潔な説明

量子力学の諸知見を生かし、物質の構造、物性、材料組織、特性などを高精度に解析・予測できる方法論、あるいは原子･電子レベルの現象がどのようにミクロな組織や材料特性に影響をあたえるのか、またメゾスコピックレベルの非線形現象がどのようにマクロ的な材料特性と結びついているのかを理解・予測する方法論を開発する。開発された密度汎関数法（DFT 法)、分子（動）力学法、分子軌道法、カルファド法、フェーズフィールド法などを解析手法として用い、これらの現象をどのように制御すべきか解明し、新しい機能や優れた特性をもつ材料の探索・設計指針（発見および最適化）を提供する研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

日本における喫緊の課題としてエネルギー問題があり、その解決の鍵を握るのは化学・電気・熱などのあらゆる形態のエネルギーの相互変換や貯蔵・輸送・利用であり、その技術を支えるのは物質科学的な総合知識基盤である。物質の性質はその電子状態をいかに制御するかに関わっており、構造自身の自由度に加えて電子状態における軌道自由度、電荷自由度、スピン自由度の４つの自由度を自在かつ同時に操る技術を確立することは、新規機能性物質を開発する上で極めて重要である。これら４つの自由度は、物質の反応性や構造特性、redox・導電性などの電気的性質、磁気的性質、光学的性質と密接に結びついている。また、光・圧力・熱などの外場との複合相関により、光導電性、非線形光学、光電変換、圧電変換、熱電変換など多彩な機能が発現する。

また材料設計・開発におけるキーテクノロジーは“材料組織”の制御にある。材料組織とは、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、そのパターンのサイズや形態が機械的・熱的・電気的・磁気的特性、そして各種機能の発現に決定的な影響を及ぼす。したがって、メゾスケールの現象を如何に正しく理解して制御するのかが、多くの材料開発・設計の現場における要諦となっている。

これまで実験分野では、実験的なスクリーニングや工学的技術に重きが置かれていたが、これまでにない機能分子の開拓には、より論理的・合理的な手法が不可欠である。そのような要請から、シミュレーション分野では、物質の性質を非経験的に極めて高い精度で予測し、その知見に基づき物質設計指針を導出することを目的とした研究の重要性が増している。また近年、分子シミュレーションや統計力学理論、連続体理論との融合によるマルチスケールモデリング研究が進展しており、研究対象や現象の幅が各段に広がってきている。しかしながら、単純なモデル計算には限界（精度・時間・空間）があり、これらを克服していかなければならない。

［これまでの取組み］

・固体系電子状態計算分野

日本の計算物性研究者のコミュニティにおいては、近年、プログラム開発が盛んに行われており、東京大学が主体となった xTAPP : 石橋（AIST）や RSDFT : 押山（東京大)、

大阪大学では複数のプログラム（Rspace：小野、AkaiKKR：赤井、Osaka2k：白井、ABCAP：浜田（東京理科大）、HiLAPW：小口など）、Phase（Advance Soft）、Open-MX：尾崎（東京大）などがある。これらは全て密度汎関数法に基づく平面波あるいは実空間基底擬ポテンシャル計算手法であり、主に基底状態の電子状態での構造や物性を計算することを得意としている。特に、岩田・押山（東京大）らは実空間密度汎関数（RSDFT）法に基づく電子状態計算法を開発し、京コンピュータを用いた 10 万原子のシリコンナノワイヤの計算において Gordon Bell 賞を受賞している。現在では RSDFT に基づく、第一原理分子動力学法を開発しており、化学反応の構造サンプリングを効率的に行う手法の研究を精力的に行っている。また、多体相関手法である GW 法として ecalj：小谷（鳥取大）や Downfolding：今田（東京大）、Transcorrelated 法として TC++:常行（東京大）なども開発中であり、固体の強相関電子系に対しても有効な研究手段が揃いつつある。超伝導体の転移温度の第一原理計算としては、有田（理研）らが密度汎関数法に基づく計算手法を確立してきている。

海外においては、商用ソフトウェアである VASP や Wien2k が非常に良く使われており、標準的なソフトウェアとなりつつある。オープンソースとしては、Car-Parrinello 分子動力学シミュレーションが主体の CPMD 4.0、Bethe-Salpeter 方程式に基づく固体の光学特性計算を特異とする Octopus や PW-SCF、伝導計算に関しては SIESTA（Transiesta/ATK）、Quantum-Espresso など様々なプログラムが整備されてきている。大規模計算に関しては STREP European project が支援してきた、ウェーブレット基底を用いる Big-DFT などが高並列効率なプログラムの代表例である。また、多体電子相関手法である GW 近似に関しては Yambo、BerkleyGW などのオープンソースも入手出来るようになってきている。これらの研究は欧州および米国が主体であり、日本以外のアジア各国における開発は進められていない。

・分子系電子状態計算分野

日本の分子科学研究者のコミュニティにおいては、長年にわたって理論開発、およびプログラム開発が行われてきており、現在でも世界的に非常に高い評価を得ている。

特に、多体電子相関をあらわに取り入れた高精度電子状態計算手法として、F12：天能（神戸大）、モデル空間量子モンテカルロ法：天能（神戸大）、SAC-CI：中辻（量子化学研究協会）、iExg：中辻（量子化学研究協会）、大規模系電子状態計算に向けたフラグメント分子軌道法として、FMO：北浦（理研 AICS）、Abinit-MP：田中（神戸大）、OpenFMO：稲富（九州大）、PAICS：石川（長崎大）や Divide & Conquer 法：小林（北海道大）、O(N)法のプログラムである CONQUEST：宮崎（NIMS）、Elongation 法：青木（九州大）、光励起状態計算が可能な多配置電子相関計算手法として、MR-MP2：平尾（理研 AISC）、MCQDPT：中野（九州大）、DMRG：柳井（分子研）、相対論効果を含む統合プログラムパッケージ NWChem：中嶋（理研 AICS）など、様々なソフトウェアが現在も開発中であり、この分野の研究者の潜在的な能力は極めて高い。

しかしながら、応用や産業化の面ではまだまだ改善の余地がある。これは、海外の商用ソフトウェアである Gaussian が多くの実験研究者に浸透しているため、高機能であるが後発である日本製のソフトウェアが普及しないことも一因と考えられる。海外では、

Molcas、Molpro、Jugar、TURBOMOLE などの有償のプログラムパッケージ、GAMESS、NWChem、Dalton、Orca などの無償のプログラムパッケージも充実している。それぞれのプログラムパッケージ毎に得意不得意な計算があり、近年では複数のプログラムパッケージを併用した応用計算論文なども数多く見られるようになってきている。2013 年ノーベル化学賞を受賞した Warshel らは QM/MM 法を開発してきたが [3]、現在ではこれらの計算手法も商用・無償のソフトウェアが豊富にあり、酵素の反応経路計算などで広く用いられている。以上の研究開発は欧州および米国が主体であり、日本以外のアジア各国における研究開発はほとんど進められていない。一方で、応用計算に関しては中国の研究者の活躍は目覚ましく、近年は数に加え質の改善も見られる。

・分子シミュレーション分野

分子動力学計算（MD）はこれまで主に水溶液やタンパク質など、物質材料科学よりはむしろ生命科学分野において大きく進展してきたが、現在では、固体や表面等の構造サンプリング、脂質膜やイオン液体などの複雑かつ構造柔軟な系の構造計算に適応されつつある。この分野においては、タンパク質フォールディング経路の問題や、その自由エネルギー変化、水和自由エネルギー計算などで日本の研究者の活躍が目覚ましい。例えば、マルチカノニカル MD として MuCAMD：岡本（名古屋大）やレプリカ交換 MD 法として REMD：杉田（理研）などは、構造サンプリングや自由エネルギー解析に対して、当該分野において標準的な研究手法となっている。また、分子動力学計算と統計力学理論を組み合わせたエネルギー表示法に基づく水和自由エネルギー計算法として ERMod：松林（大阪大）は短時間かつ高速に計算可能である。本手法は通常の水液体はもちろん、超臨界流体・イオン液体など広範な溶媒種への溶解度を決定することができる。また、長岡（名古屋大）や林（京都大学）によって、個々に電子状態計算と組み合わせた QM/MM MD 法による自由エネルギー勾配法などの開発も進められており、溶液中の化学反応ダイナミクスの自由エネルギー解析が可能となっている。この分野では、岡崎（名古屋大）らが京コンピュータを用いて 1000 万原子からなるウィルスの全原子分子シミュレーションを達成するなど、世界的に見ても非常に注目度の高い研究がなされている。一方で生命分野では、杉田（理研）により、細胞内の状況を模した分子混雑環境（複数のタンパク質や水以外の溶質も数多く溶けている系）の全原子分子動力学シミュレーションがなされている。また、粗視化分子動力学法として CafeMol：高田（京都大）を用いて、キネシンの動態、多剤排出トランスポーターの動態、DNA ヒストン複合系（ヌクレオソーム）等の巨大な系のダイナミクスの研究も進められており、タンパク質孤立系から、その複合系、さらには細胞環境へと、研究のトレンドがシフトしてきている。

海外においては、数多くのプログラム開発がなされている。これらはタンパク質や脂質膜、糖などをターゲットとしたプログラムパッケージ（Amber、CHARMM、Gromacs、NAMD）が主であるが、近年、固体や無機系なども視野に入れたプログラムパッケージ（LAMMPS）も公開されている。また、プログラムパッケージの開発もさることながら、専用計算機と組み合わせたプログラム開発が行われている。特に Shaw らの分子シミュレーションシステム ANTON は従来の常識を超え、タンパク質のミリ秒（msec）におよぶ分子シミュレーションを達成している。また、Baker および Hauk らは、量子化学的

に決定された遷移状態構造が、タンパク質内で安定になるように設計した人工酵素（theozyme）を計算機上でモデリングし、生化学者との共同研究によりその有効性を検証している。まだ、天然の活性には及ばないものの、計算酵素デザイン研究の一つの大きな方向性を示した上で非常に意義深い。また、前述のプログラムパッケージもグラフィックボード計算（GPGPU）やマルチコア加速器における計算が対応しつつあり、可能なシミュレーション時間も急速に長くなってきている。アルゴリズム開発としては、反応座標に沿った経路探索手法であるメタダイナミクス法の進展が著しい。プラグインプログラムである PLUMD が無償で入手可能であり、Amber や Gromacs などのプログラムパッケージと組み合わせて使用することができる他、自作のプログラムへの導入も極めて容易である。

・溶液の熱統計力学理論分野

日本では、溶液に対する積分方程式理論も大きく進展している。佐藤（京都大）や吉田（九州大）らは、参照サイト相互作用モデル（RISM）や分子 Ornstein-Zernike（MOZ）方程式を用いて、溶媒和構造の分布関数や溶媒和自由エネルギーを高速に計算できる計算プログラムの開発を行っている。この手法はまた、タンパク質の内部の水和構造やタンパク質表面やポケットにおける基質結合サイトの理論予想にも適応されており、材料分野ばかりでなく、生命分野・創薬分野へと波及する可能性が高い。また本手法は、第一原理計算との融合が既になされており、溶液中の化学反応解析やなどの応用計算例も数多くある。また、電極の効果を Green 関数により連続体としてモデル化した有効遮蔽体法として、ESM：杉野（東大）、大谷（AIST）により、電気化学反応の第一原理シミュレーションも、可能となってきている。海外においては、連続体モデルに立脚した Polarizable Continuum Model（PCM 法）や Conductor like Screening Model（COSMO 法）が主体であり、当該分野では日本独自の研究が数多くなされていることから、海外においても高く評価されている。

・固体のメゾ系理論分野

材料組織をシミュレートする手法として、フェーズフィールド法、モンテカルロ法、セルオートマトン法などがあり、その中でもフェーズフィールド法は原子レベルの計算では困難なサイズの構造モデリングを広範囲の現象に適用可能な強力な手法として 1990 年代頃から急速に発展している。この手法は、凝固、固相拡散相変態、マルテンサイト変態、結晶粒成長、再結晶、規則―不規則変態、クラック伝播（破壊）、転位ダイナミックス等、極めて広範囲の現象に適用されており、さらにプロセス別にみても、鋳造、熱処理、塑性加工、表面処理等々、多種のプロセスの解析に応用され、多くの研究者の興味を引いている。また、理論的にも第一原理からの導出やマルチスケールモデリングへの展開が期待されている。例えば、マルチスケール解析からスケールブリッジングへの切り替え、インフォマティクスを活用したコンビナトリアル計算、さらに非経験的な計算から、データ同化を援用した計算予測精度の向上など、現在の計算関連資源をいかに効果的に活用するかを念頭に置いた方法論が注目されてきている。日本においては、2011 年に東京工業大学のスーパーコンピューターTSUBAME2.0 を用いて、フェーズフ

ィールドによるデンドライトの成長シミュレーションに関する研究（青木（東工大）、高木（京都工芸繊維大）、山中（東京農工大））が Gordon Bell 賞・特別賞を受賞するなど、世界的にも高い評価を得ている。この分野も日本が世界をリードする分野となっている。

ACCESS e.V 社の商用ソフト MICRESS やルール大学のフリーソフト OpenPhase など、フェーズフィールド法のソフト開発がドイツで既に進められている

我が国における物質・材料分野は、実験・シミュレーション両分野において世界トップクラスの実力を兼ね備えており、新規機能性物質創成の土壌はすでにできているものと思われる。一方で、海外においては定期的にシミュレーションプロジェクトへの支援（Psi-k など [1]）や大型予算の措置、欧州においては CECAM（Center for European Calculation of Atoms and Molecules）[2]のような EU における物質科学分野の研究教育拠点があり、ワークショップやチュートリアルを通じ基礎研究の底支えとなっている。総合的な研究水準としては、米国・欧州・日本で大差はないと考えるが、開発結果をソフトウェアとして公開あるいは市販する技術力は、米国・欧州が進んでいる。ソフトの市販や公開という点では、日本を始めとしてアジアの国は弱い（言語の問題や、ソフトに対する考え方等に課題があると考えられる）。なおここ数年、中国からの投稿論文数が急速に増加しつつあり、長期的には中国の存在は注視していく必要がある。

［今後必要となる取組み］

今後の研究の方向性としては、既存の各分野の資産を統合する枠組みの確立であろう。個々の計算・シミュレーション分野がかなり高度化しており、かつブラックボックスとして扱えない場合が増加してきている。高度な資産が十分に運用できていない状況は早急に打破すべきである。科学技術面においては、構造探索手法の開発（高性能触媒設計のための「高精度化学反応予測」や「ソフトマテリアル・界面・結晶構造予測」）、機能探索手法の開発（ナノ・メゾ物質の「（超）伝導性・磁性・光学特性予測」）や、マテリアルインフォマティクス [3),4)]、政策面においては「普及事業」が重要と思われる。

・物質科学シミュレーション手法の開発、および、現実系への応用

これまでの取組みにより、計算の大規模化や計算対象が大きく広がってきているが、下記についてさらなる研究が必要である。

- 数十原子系を化学精度（1 kcal/mol）で高精度計算可能な電子状態計算法
- 強相関電子系における機能発現機構解析のための高精度周期系電子状態計算法
- スピントロニクス・磁性材料設計のための相対論効果計算手法
- 熱電・耐熱材料設計のためのフォノン計算手法
- 電子材料設計のための欠陥等を含む構造不規則系の大規模系計算手法
- 分子集合体や表面・固体界面・欠陥系（数千～数万原子系）電子構造解析のための密度汎関数に基づく電子状態計算法
- 複雑な反応経路予測の自動化
- 光化学反応（励起状態）の高精度計算・非断熱ダイナミクス
- 遷移金属や希土類を含む系のスピン軌道相互作用・相対論効果を高精度に取込んだ計

算手法
- ソフトマターの構造決定・自己組織化分子の構造形成過程制御
- タンパク質集合体（数千万～１億原子系）解析のための（粗視化）分子動力学法
- 酵素反応や固液界面化学反応（数千～1 万原子系）解析のための第一原理ダイナミクス計算法の開発

これらの計算に対して特に有効かつ効率的な構造探索・構造サンプリング法の開発も不可欠である。特に、膜などのソフトマテリアルは電池材料や生体材料において非常に重要な物質群であり、その構造特性の変化が機能の変化に大きく影響するが、このような系の構造機能相関の解析は極めて重要な問題である。また、自己組織化の問題は、タンパク質の折りたたみ問題から結晶成長、新規金属-有機構造体形成機構など、通常のシミュレーション時間では到達するのが困難なレアイベントであり、化学・物理・生命のあらゆる分野共通の課題である。レアイベントの問題を解決するための構造サンプリング手法の適用範囲は広い。さらに、光物性や光化学反応を解析するための新規励起電子状態計算手法や非断熱ダイナミクス計算手法は、基底状態の計算よりも格段に複雑であり非常にチャレンジングな課題である。また、膨大な物質・材料データと、第一原理計算や分子シミュレーションデータを融合し、物質設計に活かすマテリアルズ・インフォマティクスの分野も、今後、積極的に進めるべき課題である。

・材料開発研究に関連して、近未来的に重要となる内容

柱は３つあり、 (1)単相の物質定数の解析、(2)組織形成の解析、および(3)特性の解析である。(1)は第一原理計算および原子・分子シミュレーションを活用した、格子定数、弾性定数、界面エネルギー密度などの物質定数の推定、および平衡状態図の熱力学的データベース構築である（第一原理計算とカルファド法の融合による合金状態図の更なる詳細データ蓄積も含む)。(2)はフェーズフィールド法を軸足に、材料における各種の内部組織形成の定量的モデル化である（ここで"組織"とは、相変態組織、結晶粒組織、欠陥組織など種々の組織一般を意味している)。(3)は(1)と(2)にて集積された相と組織の情報を境界条件とした材料特性予測であり、例えばイメージベース解析の例として、力学特性では均質化法や改良型セカント法、また磁気特性ではマイクロマグネティクス解析などが該当する。上記(1)～(3)は、これまで各々の学術分野で個別に進展してきたが、これらを相互に連携させることが近未来的なステップであろう。学術的な観点からは、マルチスケール・マルチフィジックスにおける連成解析を提唱し、上記(1)～(3)を有機的に統合することを考えがちであるが、短期的にはこの方向性は効率的でないように思われる。短期的に目に見える成果が期待できるのは、"有機的統合"ではなく"ブリッジ的連携"であろう。すなわち上記(1)～(3)はすでに個別の分野を確立しているので、それぞれの手法のインプットおよびアウトプット部分のみの連携を模索する立場である。

以上は計算のみに重点を置いて説明したが、全ての計算結果を、実験データを用いて、データ同化することが肝要である。近年の材料測定技術の進展は著しく、かつ得られる実験データ量はまさにビッグデータとなりつつある。したがって、この大容量データを効率的に材料設計に関連付けるために、データ同化の手法を活用することが有効である。なお上記の個々の段階で得られるインプット・アウトプット情報は、実験データも含め

て、系統的にデータベース化していくことも大切である。

（３）科学技術的・政策的課題

物質・材料シミュレーションの分野における個々の日本の研究者の層は非常に厚い。さらに、第一原理に基づく分子シミュレーション、および統計力学理論（溶液論、フェイズフィールド法）との融合など、より高度なマルチスケールモデリング計算手法を達成することで、より現実の系に即したナノ構造体における反応や物性の制御が可能となる。そのためには、物性・分子・材料科学の諸分野の力を結集するばかりでなく、数学・化学工学・機械などの分野の研究との融合が研究の駆動力となりうる。わが国の材料教育カリキュラムの早期の見直しが必要である。

近年、電気自動車をはじめ、新材料開発・最適化が実際の製品開発に直結するようになり、企業での開発研究者・技術者も理論・計算解析の必要性を高く認識するようになってきている。しかし応用に必要な計算・解析は、研究用とは異なり、種々の手法を組み合わせる状況が頻発すること、さらに実際の複雑系に対応するため、実際の現象の適切なモデル化に多くのノウハウを必要とすること等によって、迅速な進展は難しい状況にある。基本的に学習環境の整備であると結論できるので、このあたりの改革が早急に必要である。

研究の独自性やプログラムの機能的には欧米に負けていないものの、研究のフォロワー、および、ユーザーが少ない（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、個々の研究を一つに束ねる核となる研究プロジェクトが必要である。また、研究開発はもちろんのこと、日本国内ばかりではなく、研究が立ち後れているアジア各国を含む、海外における普及や教育面にわたる細部までサポートすることで、当該分野の更なる進展、および成果の産業界への迅速なフィードバックが期待できる。そのためには、産官学の密接な共同研究体制、人材育成体制、人材活用体制の構築が望まれる。特にイノベーションの本質は人であることから、物質・材料シミュレーションのエキスパートが、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。

・教育・普及事業

現在、計算物質科学イニシアティブ（CMSI）でのハンズオン[5)]や、量子化学研究協会（NPO 団体）の量子化学計算の教育[6)]、量子化学探索研究所（NPO 法人）の反応経路探索手法の教育[7)]、大阪大学 CMD センターによる計算物性領域の教育[8)]が積極的に行われており、大学院生はもとより、企業からの参加者も多い。物質材料科学シミュレーション分野の進展においては、開発ばかりではなくプログラムのメンテナンス（マニュアル・チュートリアルの英語化、配付サーバーの管理）や普及（ワークショップ開催）に対する支援も重要である。そう言った意味において、2005 年に終了してから現在もソフトウェアの HP による公開を継続している、戦略的ソフトウェア基盤開発（文部科学省 IT プログラム）の取り組みは高く評価できる[9)]。しかしながら、普及と言う意味では、個人レベルでは限界があることから継続的な支援が必要である。前述の通り欧米各国におけるソフトウェア状況は、いわば飽和状態にあると言える。従って、今後は日本の産業界、

およびアジア各国でのソフトウェアの普及を視野に入れた戦略が必要と考えられる。

例えば、マルチスケール解析からスケールブリッジングへの切り替え、インフォマティクスを活用したコンビナトリアル計算、さらに非経験的な計算から、データ同化を援用した計算予測精度の向上など、現在の計算関連資源をいかに効果的に活用するかを念頭に置いた方法論が注目されてきている。このようなアプローチにおいては、人材育成がこれまでにも増して重要な課題となる。つまり、従来の枠を超えた知識と、その活用法（組み合わせ等）を自ら創造できる能力が必要となり、質・量ともに兼ね備えた分野俯瞰のエキスパートが不可欠となるからである。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- 日本では、スーパーコンピューター・京を用いたシリコンナノワイヤの第一原理計算 [13]やウィルスの全原子分子動力学計算、東京工業大学の TSUBAME2.0 を用いた、フェーズフィールドによるデンドライトの成長シミュレーションに関する研究が Gordon Bell 賞を受賞するなど革新的な成果を挙げており、世界的にも高い評価を得ている。
- D. E. Shaw Research によって開発されているアントンは、タンパク質など生体高分子の分子動力学シミュレーションに特化した超並列スーパーコンピュータシステムであり、多数の専用集積回路(ASIC)が、特殊な高速通信ネットワークにより接続することにより、汎用並列計算機の 100 倍程度の速度を実現している。今秋には ANTON2 が公開され、これまで以上の規模（サイズ、時間スケール）での分子シミュレーションを実践している。
- フェーズフィールド法における材料組織形成の解析では、従来、局所平衡を前提とした解析が進められてきたが、近年、非平衡状態も考慮した新手法が提案され、注目を集めている。この新手法は、これまでの局所平衡の解を自動的に含んでおり、かつ計算手法が従来のアルゴリズムに比較して、よりシンプルなものとなっているため、今後、大きく広がる可能性を秘めている。また化学反応を直接考慮した組織形成の計算手法も最近提案され、電池等、化学反応を含む現象も直接扱うことが出来るようになりつつある。一方、組織イメージを活用した特性計算法とフェーズフィールド法を組み合わせる解析手法が種々の分野で広まりつつある。特にイメージベースの特性計算に関しては、有限要素法ひいては均質化法をベースとした形態(トポロジー)最適化法が、最近大きく進展している。

［注目すべきプロジェクト］

・日本

文部科学省の科研費新学術領域研究としては、「コンピューティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」（代表：押山淳・東京大学 [10]）、「ナノ構造情報のフロンティア開拓-材料科学の新展開」（代表：田中功・京都大学 [11]）など計算物性物理学および計算材料科学分野への支援がなされている。

次世代スーパーコンピューター戦略プログラムの一環として、第 2 分野＜新物質・エ

ネルギー創成＞で、物性科学・分子科学・材料科学の 3 領域を母体とする計算物質科学イニシアティブ（CMSI）[12]が形成され、はや 5 年目（～平成 27 年度）となる。現在、5 つの部会において 7 件の重点課題、および 13 件の特別支援課題が推進中である。また、CMSI は当該分野の若手研究者の支援、および、スキルアップのため学生の教育活動も行っており、この分野を牽引する次世代の研究者の養成の一助となっている。

また、元素戦略プロジェクトにおいては、電子材料（東工大）、磁性材料（物質材料研究所）、構造材料（京都大学）、触媒・電池材料（京都大学）などの拠点型研究プロジェクトが現在進行中であり、計算物質科学イニシアティブ（CMSI）が、各拠点での計算物質科学研究を横串で結ぶ役割を果たしている。

・米国

2011 年に米国のオバマ大統領が「Materials Genome Initiative（MGI）」を立ち上げて以来、米国ではこの期間に物質・材料分野へ 5 年間で$150 million（150 億円程度）の巨額な資金投入が予定され、また、経済界からも物質デザインの分野への積極的投資が行われている。これまでの 3 年間では、「自己組織化バイオマテリアル」、「有機太陽電池」、「セラミクス」、「構造材料としての新奇高分子や合金」などの研究のため、国立標準技術研究所（NIST）の Center of Excellence プロジェクトとして Center for Hierarchical Materials Design（ノースウェスタン大学他[14]）の設立に$25 million、当該分野への DOD、DOE、NSF などの公的研究費の増額など様々な物質科学分野への支援がなされており、それに比例してシミュレーション分野にも研究費がついている。

他にもノースウェスタン大とアルゴンヌ国立研究所がリンクした材料研究開発環境設立(NAISE)などが挙げられる。また Integrated Computational Materials Engineering (ICME)においても、様々なシミュレーションソフトウェアをマルテスケールシミュレータとして統合し、材料の開発に活かしていく活動が活発に進展している。

・欧州

欧州科学財団(European Science Foundation: ESF)は 2009 年に Materials Science and Engineering Expert Committee (MatSEEC)を組織し、欧州各国において物質材料科学分野に集中的な支援を行ってきている。MatSEEC では第 4 部会（WG 4）として Computational Techniques, Methods and Materials Design が選定されている[15]。一方で、2012 年に Partnership for Advanced Computing in Europe（PRACE）が組織され、2020 年までの 9 年間にわたって、計算科学の諸分野への支援がなされる計画である。参加国は 25 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）の各国研究機関が担当する。PRACE では物質科学における研究動向調査が行われており、当該分野においての重点課題として「強相関電子系」、「ソフトマター」、「量子化学」、「光化学（励起状態）」、「第一原理に基づくデバイス設計」、「ナノ構造形成」を挙げ、2020 年までの達成目標としている[16]。また、欧州では Integrated Computational Materials Engineering expert group（ICMEg）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。

ドイツの DFG(German Research Foundation)で進められるプロジェクト(SFB761) “Steel –ab initio–”（第一期 2007-2011、第二期 2011-2015）では、第一原理計算、分子動力学法、フェーズフィールド法、有限要素法など異なるスケール・現象の計算専門家が集結し、鉄基合金の機能発現の解明と高強度化をターゲットとしながら、計算材料科学分野の連携強化と研究レベルの向上を目指したチーム研究が推進されている。

・アジア

日本を除くアジア各国の研究支援環境はそれほど整っていない。他方研究状況に関しては、中国において計算物質・材料科学研究に関する論文が極めて速いペースで増加しており、また、質の高い雑誌においても中国の研究者の活躍が目覚ましい。これは、論文に対して金銭的なインセンティブが支払われていることに起因しており、そのため、今後この勢いは益々増加して行く傾向にあると思われる。また、韓国、台湾やシンガポールでは当該分野への関心が高まっており、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ものと思われる。特に韓国では電気・電子材料に、シンガポールでは生命分野への投資が多くなされていることから、関連分野における計算物質科学研究に関する論文がそれに比例して増加している。なお韓国の材料研究としては、KIST におけるマルチスケールシミュレーションプラットフォームがある。台湾においては基礎研究が重要視されており、この分野においては特に海外からの研究者の積極的な獲得に乗り出している。

（５）キーワード

計算物質探索・材料設計（コンピュテーショナルマテリアルデザイン）、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、自由エネルギー解析法、誘電体モデル、マルチスケール・マルチフィジックス、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、データベース、データ同化

（６）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	◎	↗	科学技術的には、本分野における日本の研究者のレベルは非常に高い。特に電子状態理論手法の開発に関しては、物性物理系、分子科学系、材料系ともに米国や欧州と匹敵するレベルである。特に大規模計算手法であるFMO法や、高精度計算手法開発は世界トップレベルである。（日本のオリジナリティ：FMO、ONIOMM、SAC-CI、F12、iExg、モデル空間量子モンテカルロ法）また、分子シミュレーションに関しては、理論的方法や計算アルゴリズムの開発において顕著な業績を挙げている。（日本のオリジナリティ：MuCA MD、REMD、ERmod、RISM、MOZ、Cafemol） 材料組織形成のシミュレーション開発についても「元素戦略」やS-イノベ「ヘテロ構造制御」などにより、当該分野の活性化が計られている。 もともと、MD-Grapeなどの専用計算機の文化があるものの、近年、ANTONのようなハードウェア開発に押されている。また、GPGPUなどの演算加速器へのプログラム対応が完全に立ち後れている。 政策的には、近年、新規物質材料設計の社会的要請により、次世代スーパーコンピュータプロジェクト、元素戦略などの大型予算プロジェクトから、この分野への支援がある程度なされている。一方で、シミュレーション手法の公開、普及活動が非常に弱い。
	応用研究・開発	○	↗	これまで我が国の計算物質科学分野は、方法論開発を重視して来た伝統があるため、物質材料の探索設計への応用分野が弱かった。しかしながら、次世代スーパーコンピュータプロジェクト、元素戦略、CRESTなどの大型予算プロジェクトに参画する研究者の増加にともない、プロジェクトドリブンな応用研究も徐々に増えてきている。一方で、化学工学・機械などの異分野との融合研究は、我が国では立ち後れており、欧米に比べ層が薄い。 近年、アカデミック分野においては、実験科学者が理論研究の必要性を高く認識するようになっており、計算シミュレーションを実行する実験研究者も増えてきている。また、化学・物理系の新学術領域研究などの大型プロジェクトにおいて計画研究・公募研究等で参画し、各分野において実験と密な共同研究がなされてきている。 上述の様に、シミュレーション手法の公開、普及活動が非常に弱いことから、欧米各国で開発された商用プログラムを使う研究者が多い。
	産業化	○	↗	材料系・製薬系のメーカーにおいて、物質・材料シミュレーションの重要性は高く認識され、計算部門を単独で持つ企業や、実験と計算を掛け持ちする研究者も徐々に増えてきている。また、研究会やワークショップなどでも企業研究者の参加が増えているなど、企業側は積極的に基礎研究から応用研究までのリサーチを欠かさず行っているようである。 一方、企業の研究成果は基本非公開であり、アカデミックとの共同研究においても、特許に関わらない範囲でのみ論文や学会発表などで公表している。研究レベルに関しても質の高い論文に出版されている。

米国	基礎研究	◎	→	新しい研究手法、理論の開発に関しては、優秀な研究者が世界中から集まり、極めて活発に研究を行っている。電子状態理論では、DMRG法、DFT法の汎関数開発、大型計算プログラムの開発などが例として挙げられる。分子系の電子状態計算プログラム開発は極めて充実しており、商用ソフトウェアではGaussain、Schrödinger、Spartan、Q-Chem、ACES-III、Jagurなど、無償のソフォとウェアとしてはGAMESS、NWChemなどの主要プログラムが数多くの研究者によって開発されているだけでなく、個人グループでもBAGLEなど高機能なソフトウェア開発が進んでいる。また、LIBINT、Libxcなど、電子状態計算の要素技術のライブラリ化も進んでいる。GPGPU対応したプログラム（Terachem）も開発されている。一方、固体系の第一原理計算に関しては新しい計算理論の開発の最前線であるが、ソフトウェアはいくつか開発されているものの、パッケージ化されたものはあまり見られない。欧州主導の開発に参画している研究者もいる。 シミュレーション関係では、自由エネルギー解析手法の理論が、最近、MDシミュレーション専用計算機ANTONの開発により、ミリ秒程度のタンパク質の長時間計算が可能になり、様々なタンパク質のフォールディング過程が調べられている。また、今秋にはANTON2が発表されることから、さらなる長時間・大規模MDシミュレーションが可能となることが予想され、今後益々シミュレーション分野が活発になると思われる。商用ソフトウェアとしては、Amber、CharMMなどシミュレーション結果の解析までを一手に担うパッケージがある。無償ソフトウェアとしては、NAMD、PyMol、LAMMPSなど、GPGPU対応したソフトウェアも抱負にある。 政策的にはMaterials Genome Initiativeが、「自己組織化バイオマテリアル」、「有機太陽電池」、「セラミクス」、「構造材料としての新奇高分子や合金」などへの集中投資をしている。この流れに呼応するかの様に、DOD 、DOE、NSFなども物質・材料分野の基礎研究へ支援を増額している。
	応用研究・開発	◎	↗	応用研究や開発において、物質・材料シミュレーションが大きく寄与している。数多くの優れた研究者が活発に研究活動し、大きな成果を上げている。特に、実験化学者との共同研究も盛んであり、その成果が著名な雑誌にも数多く取り上げられている。これまで、主に手法開発に取り組んできた研究者が、最近は応用研究にも手を広げているケースが多い。特に、太陽電池などのエネルギー関係材料、有機ELなどの電子デバイス材料、セラミックスなどの構造材料分野においては、学会においてもシミュレーション分野が活発に発表を行っている印象である。 NISTにおける取り組みが、材料の応用分野を支えている。NIST も例外にもれず、MGI関連のPJの始動以降、マルチスケール・マルチフィジックス関連のインフラを精力的に整備している。
	産業化	○	↗	米国では物質・材料シミュレーションのソフトウェア開発自身が一つの産業として定着しており、Gaussian社、Q-Chem社など様々なソフトウェアメーカーが存在する。これらはもともと大学の研究者コミュニティや、グループが発祥なっている。一方で、製品開発にどのように役立っているか、までの詳細情報は明かされていないが、タミフルなどの薬剤設計等にシミュレーション分野が活かされていることから鑑みると、大きく貢献していることは間違いない。

欧州	基礎研究	◎	↗	欧州の特徴は、EU全体としてのプロジェクトを推進している点である。そのため、ドイツ以外は一国一国では我が国の水準に劣るものの、共同研究を通じて全体として非常に活発な印象である。特に、EU内では人材交流が盛んであり、様々な国籍の研究者がEU各地で活躍するなど、研究のグローバル化が顕著である。 分子系電子状態理論の分野では、多参照理論や高精度電子状態理論、溶媒和モデル（PCM法）など、欧州が中心となって開発してきた技術も多々ある。プログラム開発もGaussianを補完する機能を持つソフトウェアも開発され、多参照摂動法計算で定評のあるMOLCASの他、高速な大規模計算を特異とするTURBOMOL、その他、ADF、MOLPRO、ORCA、DALTON、Columbusなど商用・無償のソフトウェアが充実している。また、固体系の電子状態計算手法に関しては商用ソフトウェアであるVASPやWIEN2kが、今や標準的なソフトウェアとして定着しつつある。一方で、無償のソフトウェアであるQuantum Espresso、Octopus、ABINIT、PWscf、GPAW、BigDFT、SIESTA（商用版はATK）、CRYSTALなどが公開され、世界中で使われる様になってきている。 シミュレーション分野としては、ドイツを中心にMCTDHなどの量子ダイナミクスのプログラム開発がなされている点、分子シミュレーションに関しても、第一原理分子シミュレーション法（Carr-Parrinero（CP）MD法）を実装したプログラムである、CP2KやCPMDなどが普及している点が、他地域との大きな違いである。古典分子動力学シミュレーションについては、メタダイナミクス法などの反応サンプリングの方法などのアルゴリズム開発が活発であるが、プログラムパッケージに関しては、Gromacsなどの非常に優れたプログラムが開発され無償で公開されている。材料分野でもドイツの躍進が著しい。マルチフェーズフィールド法の開発に始まり、基礎から応用までの広範囲をカバーしている。大学・研究所の連携は秀逸であり、基礎研究の実用化の政策も、わが国としても学ぶべき点が多い。 政策的には、かつてPsi-kなどのEUにおける長期支援が定期的になされるなど、欧州においては基礎研究への投資が盛んである。また、Psi-kやCECAMなどを介した教育・普及活動（チュートリアル、ハンズオン・ワークショップ、奨学金）が活発であり、基礎研究の底支えとなっている。
	応用研究・開発	○	↗	欧州では伝統的に基礎研究が充実しており、出口指向の応用分野に関しては、従来それほど注力してこなかったものの、近年、様々な分野において力を入れてきているようである。研究者の層は米国に比べて厚いとは言えないが、個々の研究者の研究のレベルは高い。特に、分子系および固体系共に電子状態研究やダイナミクスの研究が応用分野に活かされており、今後、一層大きな発展を示すと考えられる。 相図の分野では、Thermo-Calcがスウェーデン王立工科大（KTH）で開発.され、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で、世界的に市販品として流通しているソフトウェアは、ドイツで開発されたMICRESSのみであり、現在、独占状態にある（もともと、ドイツ国内のACCESSプロジェクトによって開発されたシステムである）。さらに近年では、ルール大学に、The Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation (ICAMS)が設立され、当該分野を中心に、スケールブッリジングを念頭に、さらなる展開が計画的に進められている。 企業が、大学と連携して、開発研究を行っているようである。とくに、ナインシグマなど（ドイツ）、契約型の共同研究を世界各国で展開している。
	産業化	○	↗	米国と同様、欧州を中心に開発されたソフトウェアは有償で公開されているなど、ソフトウェア開発そのものが産業の一部となっている。企業における研究がどの様に産業化に繋がったかの情報はほとんど公開されていない。しかし、物質・材料シミュレーション分野への注目度は高く、将来的に産業に大きく貢献する可能性が高い。
中国	基礎研究	△	↗	電子状態、ＭＤ、材料関連のシミュレーションいずれも、中国発の方法論開発は乏しい。しかし研究者の数に関して、特に材料系では増加の一途をたどっており論文数拡大も著しい。近年、日欧米へ留学していた研究者を引き戻す努力をしていることから、若い世代の研究力は強化されることが考えられる。

	応用研究・開発	○	↗	ここ数年で物質・材料シミュレーション分野の研究の質も向上してきており、中には非常に著名な論文雑誌に掲載されている。また、論文の数も急速に多くなってきている。しかしながら、まだまだ玉石混合と言う印象も拭えない。応用分野も様々で、電子・デバイス材料分野などでの進展が目覚ましい。
	産業化	△	→	産業化についても、応用研究・開発と同様の状況である。我が国に比べて、物質・材料シミュレーション分野が中国の産業に貢献しているとは思えない。一方で、比較的安い労働力を活かして、米国などからの応用計算の下請けをしている企業もある。
韓国	基礎研究	△	↗	大学・公立研究機関などでの理論・計算研究状況を見ると、分子系・固体の電子状態、分子シミュレーション双方とも、韓国発の方法論開発は乏しく、欧米や日本へ留学して帰国した研究者が引き続き海外で開発しているプログラムへ貢献している程度であり、主体的な研究開発は見られない。フェーズフィールド法関連の基礎研究に対し韓国の貢献は大きいが、一部の著名な研究者に限定されている。一方で、研究所等において日本の研究者を積極的に雇用する向きもあり、研究力は強化されることが考えられる。
	応用研究・開発	○	↗	欧米などで開発され公開されている物質・材料シミュレーション手法を用いた物性予測や機構解明における応用研究が数多くなされておいる。特に、実験グループと共同でスピントロニクス、次世代ナノエレクトロニクス、エネルギー関連物質分野での応用研究においては、質の高い研究が見られる。一方で、全体的に独創性の高い研究開発はそれほど多くは無い。
	産業化	△	→	産業化についても、応用研究・開発と同様の状況である。しかしながら、一部の巨大企業を中心に、シミュレーション部門を強化している向きもあり、今後、産業化へ寄与する可能性がある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・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

（７）引用資料

1）Psi-k プロジェクト、http://www.psi-k.org
2）CECAM 、www.cecam.org/
3）科学技術動向 2013 年 11 月号 他
4）無機材料研究におけるマテリアルインフォマティックスの動向（知京豊裕）
5）計算物質科学イニシアティブ（CMSI）教育活動、http://www.cms-initiative.jp/ja/education
6）量子化学研究協会、http://www.qcri.or.jp
7）量子化学探索研究所、http://iqce.jp
8）大阪大学 CMD センターワークショップ、http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/CMD/
9）戦略的基盤ソフトウェアの開発、http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/fsis/
10）科研費新学術領域研究「コンピューティクス」、http://computics-material.jp
11）科研費新学術領域研究「ナノ構造材料フロンティア」、http://nanoinfo.mtl.kyoto-u.ac.jp
12）計算物質科学イニシアティブ（CMSI）、http://www.cms-initiative.jp/ja
13）スーパーコンピューター2011、http://sc11.supercomputing.org/?pg=awards.html
14）Center for Hierarchical Material Design、

http://chimad.northwestern.edu/about/index.html
15) 欧州化学財団、「Computational Techniques, Methods and Materials Design」、http://www.esf.org/fileadmin/Public_documents/Publications/ComputationalTechniquesMethods.pdf
16) PRACE プロジェクト、http://www.prace-project.eu/IMG/pdf/prace_-_the_scientific_case_-_full_text_-.pdf

３．５．12　ナノテクノロジーのリスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

（１）研究開発領域の簡潔な説明

ナノテクノロジー・材料科学技術の進展と、その工業化に伴って生み出される新規物質や新製品の健康・環境への影響、新規性に伴うリスクの評価・管理は、国際的課題として取り扱われている。ナノ材料に関する安全性研究は、従来の材料とは異なるナノ構造ゆえの新物性を持つものがあることから、大きなリソースを要し、必然的に国家の枠組みのもと取組まれている。リスク評価研究は公共福祉政策（環境・健康・安全面(EHS : Environment, Health and Safety)、倫理的・法的・社会的問題(ELSI : Ethical, Legal and Social Issues)）としての面が強かったが、近年は産業を意識したより戦略的な取り組みが重視されている。研究開発項目そのものとしては、リスク評価手法およびリスク管理手法の確立に関する科学的再現性の担保や医学的な評価、リスク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をおこなう仕組みの構築が求められており、また、それらの活用システムが重要となる。多くの国では国家計画レベルでのナノテク政策の役割を、将来の産業の要となる新市場の創出と雇用拡大と位置づけており、安全性評価・管理は社会の懸念を払拭し安寧を担保するための公共福祉政策の面があった。これが近年、欧米ではナノテクからもたらされる利益を確実に社会へ還元するために、ナノ安全性の国際標準を図り、自国利益を戦略的に最大化することが企図されている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

ナノテクノロジー・材料科学技術は、様々な分野のイノベーションを担うエンジンの技術になることを期待されている。その期待は、ナノテクノロジーを支えるナノ材料が従来の化学物質や材料とは異なる新奇で優れた特性を有していることに由来するが、このことは同時に、ナノ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を意味している。ナノ材料のリスクが適切に評価・管理されなければ、アスベストやPCBのように、ナノ材料の普及に伴い健康や環境への悪影響が顕在化することを懸念する声がある。また、食品における遺伝子組み換え技術のように、潜在的に有用な技術であるとされているにもかかわらず、リスクへの漠然とした不安から、社会が拒絶する可能性もある。そのため、事業者、消費者、行政が、それぞれの立場からナノ材料のリスクに関心を寄せ、検討が行われてきた。

ナノ材料の安全性に関する国際的な関心が高まって以降、各国および国際的な評価機関からは様々な意見や提言が公表されている。数年前までは、技術的な背景や推定される市場から予想されるリスクの概要が述べられ、将来的な課題解決に向けて分野横断的な技術開発や安全性データの蓄積が必要であるといった一般論に終始しているものがほとんどであった。しかし、近年は、欧州や米国の規制当局から、より具体的なリスク評価に関する指針などが公開されるようになってきており、最終製品としての規制や管理がより具体化しつつある状況にある。

2013 年 5 月に米国議会に提出された大統領連邦予算書付帯文書 [1]および National

Nanotechnology Initiative 2014[2]、および欧州 Nanosafety Cluster の年次報告[3]から、欧米がナノテク安全性評価を通商において戦略的に利用する意図が明らかになりつつある。このような動きは、欧州化学品規制 REACH（学物質の登録、評価、 認可及び制限に関する規則、欧州化学品規制）や RoHS 指令（特定有害物質使用制限）を発展させたものと考えられ、各国の化学物質の登録制度の中でナノ材料を扱う事例が増えてきている。そのために、まず、規制対象としての「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」として取り扱う対象とするかどうかに関するもので、2010 年に ISO（国際標準化機構）ナノテクノロジーの技術委員会（TC229）で策定された TS 80004-1 における規定[4]をベースとしている。例えば、2011 年に欧州委員会は「粒子（１つ以上の次元の外寸が 1 nm から 100nm の粒子が、個数として 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。」とする定義を示した[5]。その他、EU 各国、米国、カナダ、オーストラリア、中国、韓国において、各国の法制度等を想定した「ナノ材料」が定義されている。さらに、ナノ材料の定義を踏まえ、具体的な法規制での対応の動きも出てきている。例えば、フランスでは、2013 年から製造、輸入、流通量、用途を毎年申告することが義務化され、既に最初の結果が報告されている[6]。また、ベルギーでは、2016 年から登録制度を施行することを決定した。また、REACH（学物質の登録、評価、 認可及び制限に関する規則、欧州化学品規制）でもナノ材料の取り扱いについての議論が活発化している。EU では、全てのナノ材料は REACH に見合うものでなければならないとしている。

一方、米国では、TSCA（Toxic Substances Control Act）で、ナノ材料に対して、PMN（新規物質の製造前届出）を課したり、SNUR（重要新規用途ルール）を制定したりする運用を行なっている。ここでは、あるナノ材料を新規物質として扱うかどうかは、分子アイデンティティ（化学的な構造）に依拠することを原則としつつ、特に CNT については、ケースバイケースながらも、異なる製造業者やプロセスで製造されたものは異なる CNT であると見なすとされた[7]。国連の GHS（化学品の分類および表示に関する世界調和システム）においても、ナノ材料への適用可能性の議論が開始された[8]。

現在のナノテクはスマートフォン、ハイブリッドカーの鍵となるデバイスを生み、エネルギー資源の地図を塗り替え、食品･医薬品を始めとした工業製品を革新、消費者の便益を増すなど、より快適な暮らしを支えるに至り、すでに空気の様に日常生活に存在している。新技術とその安全性について、米国は新たに科学と社会の絆を深める橋渡し役として“Responsible Development”という概念を導入している。これは科学技術者にモノの研究開発と安全性研究を並行して行うことを課したものである。これに対して欧州は“Risk In Value Chain”という概念を導入している。これは製品のリスクをバリュー・チェーンの中で規定しようとする考え方で、RoHS 指令でも使われている。多くの企業は、安全性評価への投資に消極的で、規制強化につながる新しい安全性概念の導入には否定的であるが、これに対し、米国 NNI2014 や欧州 Nanosafety Cluster が産業と規制組織の協調による新産業の育成を提案するなど戦略的に省庁間の連携を促している。今後は貿易管理や独占禁止法などの考え方も見直される可能性がある。

日本では、毒性学を含めた安全性研究の体制は欧米に比較して脆弱であり、特に材料

研究との協力体制が不十分である。先進国と新興国が将来の発展の基礎として戦略的に位置付けるナノテクで競争優位性を維持するには、安全性研究の学術的基盤の整備が必要と考えられる。日本における安全性評価研究は、各省庁個別のプロジェクトで部分的に継続している状況であるが、行政的な活動では 2011 年に初期的な有害性および暴露調査が行われたのみで、リスク管理的な取り組みは殆ど行われていない。このような国内外の安全性管理に対する行政的な取り組みの違いは、国内外での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ことが想定される。

［これまでの取組み］

ナノテクノロジーおよびナノ材料安全性評価については 2013～14 年に大きな進展があった。2005 年にスタートした ISO/TC229 では、現在、JWG1：用語・命名法、JWG2：計量・計測、WG3：健康・安全・環境、WG4：材料規格、の 4 つのワーキンググループが活動している。この中で、WG3 では、1）作業環境での暴露管理方法、2）有害性の相対ポテンシャルの決定方法、3）有害性のスクリーニング方法、4）環境に優しい使用を保証する方法、5）安全性を保証する方法、6）一般的な健康・安全・環境に関する規格、という 6 つの分野で、多数の規格が審議されてきており、一部は既に出版されている。

OECD は 2006 年に WPMN（Working Party on Manufactured Nanomaterials：ナノ材料作業部会）を立ち上げた。WPMN は、産業用ナノマテリアルに関するヒト健康影響と環境保護という側面について国際協力を促進させることを目的とし、9 つのステアリンググループ（SG）が運営されてきた。これまで、SG3：工業ナノ材料の代表的セットの安全性試験、SG4：工業ナノ材料とテストガイドライン、SG7：ナノ毒性学における代替試験法の役割、SG8：暴露計測と暴露抑制に関する協力、の 4 つが中心的な役割を果たしてきた。とくに、SG3 の活動は、スポンサーシッププログラムと呼ばれ、カーボンナノチューブ（CNT）などの炭素系ナノ材料、二酸化チタン（TiO2）などの金属酸化物など、13 の代表的ナノ材料について、各国がスポンサーとなり、物理化学特性、環境挙動、生態毒性、ほ乳類毒性に関する網羅的なデータが収集されている。日本は、単層 CNT、多層 CNT、C60 の主スポンサーとしてデータ提供を実施してきた。ドシエ（情報を集約した文書）作成の進捗は材料により様々であるが、炭素系材料についてはドシエ公開に向けての作業に入るなど、スポンサーシッププログラムはほぼ終了を迎えている。現在、その成果を踏まえ、テストガイドラインの改訂議論へ反映させること目的とした材料横断的な検討が始まっている。具体的には、吸入毒性試験[9)]、生態毒性と環境運命[10)]、遺伝毒性、毒性動力学、物理化学特性[11)]、カテゴリー化[12)]に関するワークショップ/専門家会合が開催されてきた。最近、WPMN の SG は再編され、上記の SG3、4、7 は、SG-TA（Steering Group of Testing and Assessment）となり活動している。また、SG5（ボランタリー制度と規制プログラムに関する協力）と SG6（リスク評価に関する協力）は、SG-AP（Steering Group of Risk Assessment and Regulatory Programme）となっている。この SG-AP では、パイロットプロジェクトとして、1) 人健康リスク評価における種間変動要因、2) 規制のためのリスク評価における物理化学特性：表面化学の機能としての溶解性、3) 規制制度におけるナノ材料の物理化学的特性に基づいたグルーピング・同等性・類推の利用と開発に関する調査、4) 類推のための科学とリスク評価のガイダンス

の状況、が実施されている。また、従来の吸入暴露試験方法をナノ材料の試験に適合させるための改訂など、いくつかのテストガイドラインやガイダンス文書の改訂が進められている。

日本でも、ナノ材料のリスクや社会受容に関する研究・検討がおこなわれてきた。2005年度には、科学技術振興調整費「ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究」において、経済産業省、文部科学省、環境省、厚生労働省傘下の研究機関の連携により、幅広い分野にわたる検討が行われ、政策提言という形の報告書が出された[13]。また、ナノ材料のヒト健康影響に関する厚生労働科学研究は 2003 年度に開始され、現在まで複数の研究班により研究が進められている[14]。さらに、NEDO では、ナノ材料の試料調製・計測技術開発およびリスク評価の実施を目的とした「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」が、2006 年から 2011 年まで実施された[15]。引き続き、「低炭素社会を実現する超軽量・高強度革新的融合材料プロジェクト（NEDO 交付金以外分）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」で研究が進められている。国全体としては、第 3 期科学技術基本計画における 2007 年度から 2010 年度まで、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。

経済産業省が開催した「ナノ物質の管理に関する検討会」で示された「ナノ物質に係る今後の対応[16]」にもあるように、事業者による自主管理の役割は大きい。自主管理を想定した簡易・簡便な評価技術の研究開発の重要性は高いと言える。（独）産業技術総合研究所と複数の民間企業や大学から構成されている技術研究組合単層 CNT 融合新材料研究開発機構（TASC）は NEDO プロジェクト「低炭素化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」において、CNT の自主安全管理のための評価技術として、細胞試験の手順書と作業環境計測の手引きと公開した[17]。

日米欧中において戦略的に重要なナノ材料として重点的に毒性評価が推進されているカーボンナノチューブ(CNT)について、多層 CNT の腹腔内投与によって中皮腫などアスベストに類似した影響を観察したとする報告[18] [19]が 2008 年に相次いで出されると、日本では、厚生労働省通達「ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について」の発出を始めとする行政的な対応が取られた。その後、2010 - 2011 年頃には、CNT の有害性機序に関する仮説が提唱されるようになり[20] [21]、CNT を一括りにするのではなく、太さ、長さ、形状の違いによる有害性の違いが議論されるようになった。CNT の有害性機序の解明や、他の繊維状ナノ材料の有害性の確認は、現在も研究上の大きな関心事である。CNT については、ラットなどの齧歯類を用いた亜急性、亜慢性の吸入暴露試験の結果がいくつかあり、それらに基づいて、複数の機関から作業環境における許容暴露濃度が提案されている。例えば、NEDO により実施された「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」プロジェクト（P06041）から時限付きの許容暴露濃度として 0.03 mg/m^3 が提案され[22]、米国 National Institute for Occupational Safety & Health（NIOSH, 労働安全衛生研究所）から 0.001 mg/m^3 が提案された[23]。また、現在、IARC（国際がん研究機関）では、CNT の発がん性のクラス分類について検

討されている。CNT 以外にも、複数の機関により作業環境の許容暴露濃度の提案がなされてきている。二酸化チタンについては、上記 NEDO プロジェクトにて 0.6 mg/m^3 [24]、米国 NIOSH では 0.3 mg/m^3（サブミクロンからミクロンサイズ粒子については、2.4 mg/m^3）[25]、厚生労働省は二次評価値として 0.15 mg/m^3 [26]、日本産業衛生学会では暫定値として 0.3 mg/m^3 [27] が提案されている。許容暴露濃度の値が、提案する機関によって異なることは、採用する動物試験の違い、許容暴露濃度の導出に際して用いる仮定・計算方法の違いによる。この許容暴露濃度導出の方法について、現在、ISO/TC229 WG3 で、ナノ材料（ナノ物体及び凝集体）の作業環境での暴露限界の設定のための一般的枠組みに関する技術報告書が策定されつつある。

科学的知見の蓄積や国際機関での議論などを踏まえ、従来からの化学物質の枠組みに準じた形でナノ材料のリスクの規制や管理が可能であるとの合意が形成されつつある。代表的なナノ材料の一つと位置づけられる CNT の安全性について毒性学専門家の共通認識が徐々に形成され始めたことに加えて、二次電池以外で CNT の工業化技術開発が進展し始めたことが契機となり、ナノテクを確実に国家利益に結びつける手段の必要性が提唱され始めた（TechConnect 2013 の White House, Congress による基調講演、他）[23]。進捗の遅い OECD/ISO の枠外で、欧米間で具体的に産業化を視野に入れたナノ安全性に関する標準化を推進するプロジェクトが 2012 年より顕在化した [28]。特に米国は産業化目標を具体的に示して、原材料、加工品、成形品、最終製品、廃棄についてのナノ材料安全性評価を開始し、テーマ別に NanoXXX と称する Working Group を編成して活動している。この活動には、ナノ安全性評価という科学の枠組を超えて政策として検討を行おうという姿勢が反映されている。例えば、先進国の多くの地域で、微細粉塵の大きな割合を占めるタイヤからの粉塵を削減するためにカーボンブラックをナノ材料に転換する検討が行われている。このケースの場合、OECD/WPMN から OECD 名義で研究報告 [29]が発表されたが、実際には欧州(一部米国の参加)の産官学の連携プロジェクトの成果である。この研究報告の発展と見なされる欧米産官学連携の NanoRelease というプロジェクトでは、CNT 樹脂コンポジットとタイヤからの粉塵発生とその影響評価について検討を行っている。NanoRelease の目的は当該製品におけるナノ材料由来の Dust の安全性評価方法、およびプロトコール（評価材料、基準、手法）の標準化と規制方針の確立である。プロジェクトの成果は、米国は Environmental Protection Agency (EPA)管轄の TSCA、欧州は化学品規制の REACH に反映される事になる(NanoMile Workshop Oct. 2013 in Birmingham, UK)。この他にも多数の政府、欧州共同体が出資している欧米産官学共同プロジェクトが 2011 年より開始され、2013 年に活動が本格化している。また、成果の公表手段として主要科学論文誌を優先活用することが議論されている（前出 NanoMile）。

以上の動向から、ナノ材料応用の各分野における評価成果を既存の化学物質管理の中に繰り入れることにより、安全性評価に関わる事項の標準化と規制を行い、通商における実質的な優位性を確立する方向へ歩を進めていることが伺える。米国では NNI2014 に記述されているように National Institute of Standards and Technology (NIST)を実行

の核として、ナノテクをほぼ総ての科学技術の基盤とした研究技術開発を進める方針を明確にし、安全性はナノテクを支える科学技術としている。また、欧州は Nanosafety Cluster[28)]に記載されているように EC 主導でプロジェクトを推進している。米国、欧州とも、これまでのように毒性評価研究に留まるのではなく、毒性、バイオ、材料の研究者が協調して安全性評価を推進し、規制、通商、貿易、法務、知的財産分野と連携して国家・地域の利益を最大にすること目標として掲げている。さらに、安全性評価に関わる事項の標準化を OECD 等で国際標準にすることも目指している。このような手法の強制規格の制定は、WTO/TBT 協定（貿易の技術的生涯に関する協定）においても認められており、自由貿易における非関税障壁を導入することにもつながりうるもので、域外国の企業活動に不利になる可能性もある。このような各国・地域戦略の中核となる部分は公開文書に明確に記載されることが少なく Closed Meeting で議論されるので容易には把握できない。NNI2014, Nanosafety Cluster Compendium も全文を綿密に検討することで始めてこのような体系がおぼろげながら判る記載になっている。

2011 年以降は、それまでに国内外の安全性評価のために行われた多くのプロジェクトや研究補助金の成果が、学会や論文等に数多く発表されるようになり、知見の蓄積も進んできた。しかし、ナノ材料の生体影響という観点から最も懸念すべき慢性影響について、正面から取り組んだ研究は少ない。これは、慢性影響評価に必要な費用が高額であることだけではなく、化学物質全般に対して動物愛護等の観点から動物試験が行われにくくなっていることも影響している。しかし、過去に多くの知見の蓄積のある一般的な化学物質とは違い、新たな物質としてのナノ材料に対する知見が少ない状況で、in vitro（試験管内）試験だけで安全性を検証するのは困難であると想定される。そのため、類似の物性を持つナノ材料をカテゴリー化して、生体との反応の類似性を担保しながら、効率的に評価する手法が提唱されている。公表された研究成果は、一般的によく知られているナノ材料や、一般の化学物資として既にナノサイズであった酸化チタンや二酸化ケイ素、銀などの既存製品を対象としたものである。一方で各企業が実際に製品として市場に出すものについては、既に欧米では実質的な登録・審査システムが機能しており、それらの安全性データが欧米の規制当局に個別に提出されることとなり、公表はされない。したがって最新の物質に対する安全性データは、欧米当局だけが把握することとなり、日本は最新の安全性データを把握できない状況となっている。現に、2011 年頃までに欧米の規制当局がある程度の方針を出して以降は、規制当局からはナノ材料の評価に関するアナウンスは殆どなく、申請データが欧米の規制当局に蓄積している状況になっていると推察される。例えば、EPA と HealthCanada の規制当局の間で合同会議（RCC）において、定期的な情報交換が行われており、その中で物性等の類似性を基にしたカテゴリー化が提案されている。しかし、詳細なデータは申請データなので公表されるわけではなく、解析された結果としての評価方針が提案されるだけである。なお、この状況は米国国内でも安全性評価の透明性の問題点として指摘されている。

［今後必要となる取組み］

ナノ材料には、たとえ同じ組成であってもサイズや形状に無数にバリエーションが存

在する。また、現実に市場化・製品応用されるナノ材料の多くは、様々に表面修飾や複合化がなされている。その一つ一つについて詳細な有害性試験を実施して許容暴露濃度を設定することは現実的ではない。評価の戦略が重要となってくる。現在のところ、各機関がケースバイケースで対応しているが、合理的なナノ材料のリスク管理のためには、ナノ材料のグルーピングや有害性推定を可能にする評価技術の開発が必要となる。そのために、物理化学特性と有害性の関連性の理解、及び、細胞試験や簡易な動物試験の活用による統合試験戦略の構築、また、それらの基盤として、ナノ材料の有害性機序（AOP: Adverse Outcome Pathways 有害転機経路）の理解を進めていく必要がある。とくに、ナノ材料の表面修飾や複合化が有害性にもたらす影響について理解を進めることが重要である。

実験動物および細胞による評価方法の動向と展望：

ナノ材料を対象とした動物実験の論文数は著しく増加する傾向にあり、この背景には開発されるナノ材料自体の増加だけでなく、実際の利用における安全データシート作成等に必要であることも挙げられる。実験動物を使用したナノ材料に対する試験の目的には、体内動態（吸入後の呼吸器から循環器を経由しての移行など）、標的臓器における特異的な反応、慢性的な影響の評価といった、細胞を用いた in vitro 系では困難なエンドポイントであり、また、ナノ材料の hazard identification（有害性同定）に欠かせない評価として実施される。さらに、動物実験を通して得られる無毒性量（NOAEL）など量-反応関係における重要な parameter は、ヒトにおける知見の乏しいナノ材料において、管理濃度や環境基準の設定に直結するデータとなる点はとくに重要である。ナノ材料とその投与方法、病理組織学的評価の標準化に関する研究は、国際的な方向で進んでいくことに疑いがなく、日本がコンソーシアムに積極的参加し、役割を担う必要性があろう。

細胞を用いた評価方法は、動物を用いた方法に比べ簡便、安価で大量の検体を処理することが可能である。さらに、毒性の分子メカニズムも明らかになる場合もあり重要な評価方法である。しかし、検体の処理方法や濃度などが適性でない場合は擬陽性を示す場合があり、最終的には動物実験による検証が必要になる。動物細胞による評価方法で最も用いられている方法は細胞毒性を検出する方法である。中でも MTT-assay, MTS-assay, WST-1-assay が広く用いられている[30) 31) 32) 33)]。これらの方法は簡便に細胞に対して有害かどうかを判定できる。しかし、この方法ではなぜ検体が毒性を示すのか、そのメカニズムは分からない。そこで、メカニズムに基づく評価方法が検討されている。検体が炎症を誘発するか、DNA に対して毒性を示すか、タンパク質変性を誘導するかなどである。炎症に関しては炎症性サイトカインである IL-1b, IL-6, TNFa を ELISA という抗体を用いた分析方法で検出する方法が行われている[34) 35)]。また、あるナノ材料は DNA に対して毒性を示すことが知られている[36) 37) 38) 39)]。そこで、FACS を用いて DNA に対する毒性を検出する試みがなされている[40)]。さらに、DNA 変異を感知し修復する細胞自身が持っているシステムを使って DNA 変異を検出する方法が開発されている[41)]。また、熱ショックタンパク質の発現メカニズムを利用してタンパク質変性を高感度で検出する方法が検討されている[42)]。今後は新たな分析方法の開発と共に、既存の方法のプロトコル化を行い、国際的にプロトコルを統一する必要がある。細胞を用いた評価実験は動物

実験よりも再現性は取りやすい。しかし、細胞も生き物であり、場所（国・地域）や用いた試薬、培地などによって異なった結果が出る場合がある。そこで、国際的なラウンドロビン試験が行われている。日本の貢献には、検討の余地が大いにあろう。

特に材料、分散方法、粉塵発生方法、物性評価方法、生物学的評価方法の標準化が必要である。実際に CNT 分野では、信州大学と日米欧の主要安全性評価研究機関との連携により Mitsui MWNT-7 が多層 CNT の世界標準物質となり、CNT 自体の安全性はこれと同等の生物学的物性を持つ CNT を基準にして多くの報告がなされている。従って、応用開発もこの知見を基準とする事になる。粉塵発生方法はドイツ BASF、工場等における炭素系物質環境粉塵測定技術は厚労省系の労働安全衛生研究所法、環境暴露加速試験方法は米国 NIST 法が有力な方法と考えられている。

これまでは、主に、呼吸器を経由した暴露による有害性の検討が中心に進められてきた。これは、ナノ材料を直接取り扱う作業者では吸入暴露が主要な暴露経路と考えられることから妥当ではあるが、今後、ナノ材料が多様な分野で現実に利用されるようになることを想定した場合の社会受容の観点からは、経皮暴露や経口暴露での影響の評価手法や、有害性機序の理解が重要になってくると考えられる。また、環境中の運命や生態系影響については、OECD/WPMN での議論でも取り上げられてもいるが、いまのところ日本では目立った研究の動きはない。あわせて、製品のライフサイクルを意識して、製品からの排出・暴露に関して、計測手法の開発、データの蓄積、暴露シナリオの設定の必要性も高まると考えられる。

これまで、CNT や C60 といった炭素系素材、二酸化チタンや酸化亜鉛などの金属酸化物、金や銀などの金属のナノ材料を中心に有害性が試験されてきたが、最近、ナノセルロースファイバーの研究開発が進められるようになってきており[43]、新しいナノ材料の研究開発の動向と合わせて、試験・評価を進めていくことも必要であると考えられる。

その他、より詳細な安全性評価・管理研究については、本報告書の前作となる「俯瞰報告書 2013 版」[(5)]の同項目に記載しているので参照されたい。

以下では、ナノテク・材料に関する研究を行ううえで求められる戦略的視点について記載する。欧米がナノテクの重点を研究開発から工業化・商業化にシフトするためにナノ材料安全性を梃にする戦略を踏まえて、日本でも同等の対応が今後必要になるだろう。第一に Responsible Development を実践することが挙げられる。これは Oberdörster ら[44]が唱えた方法論の実践である。即ち、材料学と毒性学の協力によりナノ材料の研究開発及び応用開発と平行して毒性学的安全性評価研究プログラムを推進することである。NNI2014 では主に 10 年後を目処に実用化される技術について、材料の安全性と応用製品の流通と使用における環境と人への安全性を評価するプログラムを策定している。全分野を網羅的に扱うことはできないので重点市場と製品を定めてプロジェクト化するなどの検討が求められる。市場の観点から二酸化チタン、CNT の樹脂コンポジットに重点が置かれているが、前者は食品添加物としても注視されている。後者は電線・ワイヤハーネス等、電気電子部品分野でも大きな市場が予測されている。このようにナノ材料の安全性は広範囲の産業に影響を与えることから、安全性評価プログラムの推進にあたっては、科学技術と産業の両方を戦略的に見渡す司令塔が必要と考えられる。また、欧米

の安全性評価の行政･研究コミュニティでは、毒性研究の性質により、研究実績以上に人的ネットワーク力が重視されており、日本でもそのようなネットワーク力は考慮すべきであろう。

各企業から出される個別の安全性データの収集は、政府における政策的管理の立ち上げが必要であるが、公開されている情報をもとに評価基準の標準化を推進していくためには、現状では OECD や ISO における活動で日本がイニシアティブを発揮していくことが必要であると考えられる。その意味では、OECD スポンサーシッププログラムで公表された安全性データの評価作業への積極的な貢献が期待される。

（３）科学技術的・政策的課題

（課題の背景）

ナノテクを他の科学技術の共通基盤、また、安全性を共通基盤の重要な礎としてとして科学技術政策を構築することは、従来、欧州が標準化で優先権を獲得してきた哲学とは異なる。この背景を理解するには国家的投資と社会への説明責任、およびバリュー・チェーン/サプライチェーンの２点を科学技術振興と組み合わせて俯瞰する必要がある。

第一に、ナノ材料の安全性評価（毒性評価）には通常の化学物質に比べて多額の費用が必要となる。理由は、ナノスケールでは１分子ともバルクとも異なる新奇な物性が現れること、微細粉塵である場合が多いナノ材料は取り扱いが容易ではないことと、吸入暴露試験を行う必要あること、CNT など繊維状物質は従来の In Vitro 試験法が適用できないことによる。なお、バルクとナノの違いは無いとする意見も出ているが [45] 主流とはなっていない。主要ナノ材料のうち、ナノ酸化チタンは Degussa P25、多層 CNT では Mitsui MWNT-7 が日米欧試験用標準品となった。CNT について日本は有利なはずであるが、多くの重要な試験研究は欧米で実施されており、日本の企業が速やかに情報を入手することは容易ではない。欧米は安全性研究成果を国家アセットして厳しい管理を行っている。このような状況の中で、Mitsui MWNT-7 の毒性評価研究だけで日米欧の費やした研究費合計は 10 億円を超えている。必然的に各国で研究プロトコルの情報交換を行い、標準化して情報の共有化を図り研究を効率化していくことでデータが積み上げられてきた [23]。標準物質となることはビジネス上有利であることから、主導権を握るために標準物質選定について多くの意見が表明された。もちろん、各国とも多額の費用を１種類の材料に投じることについて議論があるが、信頼できる品質、供給、使い易さ、それと日本（信州大学と三井物産）の貢献の結果として Mitsui MWNT-7 が標準品となった。尚、Mitsui MWNT-7 はビジネス撤退により現在生産されていない。

欧米ではこれからもナノ安全性評価を重視することを公表している。米国の 2014 会計年度ナノ材料安全性評価研究費用は少なくとも 45 百万ドル [2]、欧州の NanoSafety Cluster は 2013 年（実質）から 10 年間で 10 億ユーロである [28]。欧米は、負担の大きいコストセンターであるナノ材料安全性研究を国民へのベネフィットとして還元するためにプロフィットセンターへ転換すること考えているように伺える。そのために、前述のように「国際合法的」な方法で非関税障壁を導入することで自国利益を最大化する方向へ向かうと考えられる。米国 NNI2014 は国内産業振興、特に各省庁が出口目標を示すことによって中小企業への振興策を策定し、商業化により国民へベネフィットをもたら

すということを打ち出している。当然、特許に加えて別の方法による中小企業の保護策が必要になる。また、安全性評価の各論では欧州と一致しない点を残しながらも、応用技術の安全性評価では企業の参加も含めて欧州との協力体制を構築している。これは、大企業でも採算の取れない、あるいは米国でも負担の重いナノ応用製品の安全性評価を欧米産官学共同で行いそれをツールにして利益の最大化を図る方策を戦略的に行うことである。公費が投入され、プロジェクトに参加する企業は利益を得ることになるが、協力する企業の貢献は先行者利益を認めることで補償しつつ情報公開（欧米企業を優先する）を前提とすることでバランスを取っている。なお、これらの情報は NanoXXX から得られる。

第二に、バリュー・チェーンにおける安全性の担保は欧州 REACH、RoHS 指令の考え方と同じであり、特に欧州域外の企業に取って大きな負担となる。米国も欧州 REACH 的な考え方の導入を示唆するようになってきている。米国は輸出入、製造について EPA 管轄の TSCA（化学品規制）における SNUR(重要新規利用規則)でナノ酸化チタンと CNT について細かい利用規制を設けている。一律の基準ではなく EPA と「話し合い」を行うことで決定されるので、EPA のさじ加減によりバリュー・チェーン規制（実態はサプライ・チェーン規制）を導入することは可能である（既に用途規制は申請毎に行っている）。サプライチェーンの各ステップにおける安全性規制が導入されると、原料調達、ナノ材料合成、一次・二次加工、部品、組み立て、輸送、使用、廃棄の各段階で安全性評価データが必要となるので、企業活動に大きな負担となる。米国内でも原料については企業集団で「標準的」なサンプルによる許可を求める活動が行われている[46]。化学物質と微細粉塵技術は兵站における人員の安全確保と能力の維持という観点から、米国と旧 NATO 諸国は政策として技術を安定継続的に維持してきた。最近の国際紛争やテロへの対応から NNI2014 や Nanosafety Cluster においても化学物質、バイオハザード検知センサは重要開発項目となっている。このように、歴史的・政治的背景から研究施設の数と規模で欧米は他の国々を圧倒している。米国ではナノ材料毒性評価を行える研究機関は少なくとも 10 カ所、同様に欧州は少なくとも 6 カ所ある。米国の場合、宇宙空間における生存環境維持研究のために NASA に継続した微細粉塵研究プログラムが存在することもポイントである。民間企業でこれらに匹敵する評価をできる会社は総て外資系である。我国では世界的に通用するデータを出せる機関は 2 カ所であるが、プロジェクト単位で運営されているので専用施設ではない。日米欧以外ではナノ粒子安全性評価を安定して行える吸入ばく露試験装置を保有していない。

欧米はナノ安全性評価を最終的には OECD および ISO で標準化しようと試みているが、前述のように実態は欧米の「ローカル・ルール」の国際化の可能性が高い。他方、日本は CNT に関していえば Mitsui MWNT-7 の供出元であり、他のナノカーボンについても信州大学から物性調整と Characterization を行ったサンプルを日米欧の主要研究機関に数々提供している。再現性と信頼性から世界的に未だ信州大学が規準となるナノカーボン材料の唯一の供給元となっている。また、ナノ毒性試験においても日本バイオアッセイ研究所（JBAR）の多層 CNT の長期連続吸入ばく露試験、国立医薬品食品衛生研究所(NIHS)のナノ粒子完全分散試験法（Taquann 法)、両研究所の病理評価などは世界的に高く評価されている。このように、日本の安全性評価科学技術は欧米に比べて遅れ

ている訳ではなく、むしろ毒性・バイオと材料科学の連携としての“Responsible Development”の観点からは他に先駆けて実践していると言ってよい。

（日本の課題）

日本の課題は、戦略的科学的観点の不足から、安全性に関する議論が特定対象の安全性の有無に集中しがちで、結果として体系的取り組みとそれを支える体制が脆弱なことである。対して欧米は、安全性評価技術研究の基盤が国家安全保障戦略（軍事、産業）とも並存している。運営面でも欧米では司令塔を明確にしている。米国は NNI2014 より National Science Foundation ではなく National Science & Technology Council の基で NIST が核になっている。欧州は EC DG Research の下に 2013 年からオランダの RIVM が核になっている。いずれも、科学系に加えて法律、社会学、経済、情報収集と分析の分野が糾合されている。日本はどうしても予算とともに省庁別なってしまい、一体感がないように海外から見られている。対応組織構造の検討も必要であろう。

また、日本企業は未だに安全性評価を付随的なもの、あるいはビジネスの妨げと捉える傾向があり、特に経営層の理解が乏しい。技術サービスとして東レ、旭化成、三菱化学が毒性評価分析サービスを提供しているが、BASF や DuPont のような安全性評価で世界的リーダーになれる組織、人材、設備、戦略を持つ企業が存在しない。例えば、自動車分野では内燃機関やタイヤからから排出される炭素微粒子の研究評価は大気汚染研究と規制として捉えられ、日本の産業全体から俯瞰したベネフィットとリスクという観点での検討は行われていない。対象が自動車産業に限定されるため、安全性評価の費用対効果評価が低く見積もられることから、安全性評価の進捗が阻まれ、結果的に欧州に頼る部分が多く、欧米の研究に遅れをとることになっている。今後は、通商にナノテク安全性の標準化が大きな影響を及ぼすという認識を、産業界のトップ・マネージメントは持たなくてはならないだろう。

日本には、化学・物理、生物学、医学に加えて倫理、法律、経済、社会学、政策を含めた包括的教育を行う大学や学問分野が存在していない。かろうじて日本毒性学会はその任を担っているが、予算・活動規模は十分とはいえない。対して米国 University of West Virginia、University of Montana、University of Rochester は、安全性に関する学科を有している。特に University of Rochester は世界で最大の、毒性、安全性学の学部を持ち世界的に重要な研究者を多数輩出している。

基礎研究では依然として先頭集団にいる日本のナノテクノロジー・材料科学技術からのベネフィットを社会が享受するためにも、ナノテク応用製品の通商戦略は欠かせない。しかし、上述のように材料産業としてみた場合、市場規模が小さく安全性評価費用を捻出することはビジネス合理性が無くなる。一方で、ナノの安全性評価とその標準化を全面的に海外に委ねることは、科学技術・政策的課題として諸外国と対等に交渉するすべを放棄することになる。安全性評価の基盤整備を行うことは必要であるが、特に人的リソースを考慮すると数年で質量ともに欧米の水準に達することは、容易ではない。今後、ナノテクノロジーは総ての産業分野に重要な影響を及ぼすことから、世界と伍して行くためにもナノテク材料の恩恵にあずかる産業及び社会全体へのベネフィットの観点からの政策的検討が必要であろう。また、急速に活動を展開させている新興国との協調・共

同の方策も求められる。

現在わが国では、OECD や ISO の活動を通した標準化の戦略も現時点では実効化できる体制がない。国際的に流通する商品を開発する際には安全性の確保された商品でなければ輸出できなくなるような状況も想定されることを考慮すると、国内政策としてナノ材料の安全性確保に関する政策や管理システムを構築し、さらにこの国内基準に合った安全性データを官民が共同して積極的に蓄積していくことで、日本で適合した製品を、自信を持って国際的に流通させることができるような体制に向けた取り組みを、早急に始めることが必要と考えられる。

（国際的な課題）

OECD や ISO といった国際機関での議論の進展や、各国の規制当局によるナノ材料の評価・管理が進められつつある状況を踏まえ、研究面で急務と考えられるのは、ナノ材料をグルーピングや有害性推定の枠組みの構築である。そのためには、ナノ材料の作用機序（AOP）の理解を深め、物理化学特性からの推定（QSAR：定量的構造活性相関）や、細胞試験や簡易な動物試験に基づいた推定（統合試験戦略）の手法が必要である。グルーピング（カテゴリー化）の議論は、例えば、2014 年には、OECD/WPMN の主催の専門家会合が開催され、物理化学的特性、人健康、環境運命、生態毒性、暴露といった様々な観点からのカテゴリー化が議論された [12]。そこでは、提言として、評価のための物理化学的特性評価手法の開発、カテゴリー化を支援する細胞試験や動物試験方法の開発の重要性が確認された。また、NIA（Nanotechnology Industrial Association ナノテクノロジー産業協会）は、ナノ材料のグルーピングと類推に関するシンポジウムを開催し、そこでは、ナノ材料の試験数を減らし、材料設計によって安全性を確保し、適切な材料同定情報を決定するためどのようにグルーピング（カテゴリー化）が可能なのか、どのような物理化学的パラメータが有用なのか、同じ組成のバルク材料からの類推は可能なのかが議論された [47]。米国とカナダの規制協力協議会（RCC: Regulatory Cooperation Council 規制協力評議会）のナノテクノロジーイニシアチブでは、主に材料の種類（炭素系や酸化金属など）に基づく分類が提案されている [48]。欧州化学品庁（ECHA）は、「ナノ材料のリスク評価における規制上の挑戦」と題する化学ワークショップにおいて、トピックの一つとして、カテゴリー化と類推の問題を掲げている [49]。

また、ナノ材料に関する計測技術の整備も重要である。それは、サイズやサイズ分布に基づく「ナノ材料」の定義を実際に運用するため、また、物理化学特性に基づくグルーピングや類推を行うためである。健康・環境・安全の観点からの計測の取り組みの重要性はこれまでも認識されており、OECD/WPMN は、ナノ材料の試験に際しての試料調製や計測に関するガイダンス文書を作成するとともに [26]、最近、ISO/TC229 JWG2（計量・計測）との協力のもとに、物理化学的特性に関する専門家会合を開催した [11]。欧州では、欧州委員会の「ナノ材料」の定義を運用するにあたって、JRC（Joint Research Center）が、主に粒子サイズの計測技術に関して、入手可能な手法とその得失等について論じたレポートを作成し [50]、さらに、欧州第 7 次研究枠組み計画（FP7）のプロジェクトとして「欧州委員会によるナノ材料の定義の実施を支援するための、有効性が確認され標準化された手法に基づく統合的アプローチの構築」（通称 NanoDefine）が開始さ

れた[51]。日本では、必ずしも健康・環境・安全の観点からのものではないが、「ナノ材料の産業利用を支える計測ソリューション開発コンソーシアム」が発足するなどしている[52]。このようにナノ材料の計測に関する取り組みは活発化しているものの、有害性の機序の理解、物理化学特性との関連性への理解が十分でない現状では、どの物理化学特性をどのような精度で測定すべきかを定めることはできない。また、OECD/WPMN のカテゴリー化に関する専門家会合での提言でも、物理化学特性の評価手法の重要性が確認されつつ、定義・用語の明確化と一貫した使用の必要性が特記された。計測分野と有害性・リスク分野との更なる連携が必要であるといえる。

海外では食品や環境中でのナノ材料の検出技術の検討が進められているが、わが国ではほとんどこの分野の研究者がいないことが懸念される。NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」は、カーボンナノチューブ、フラーレン、二酸化チタンの暫定 OEL の導出をもって一段落した。しかし実際には、ナノ材料の粒径、表面積、長さがハザードに及ぼす影響、体内動態(ADME)などは、多くが未知であり、しかもそれらの解明には長期の研究を要するものが多い。したがって、これまで以上に大学研究者が参画すべきであろう。また、これらは必ずしもネガティブな影響の評価とは限らず、ナノ材料の医療・バイオ利用に役立つ可能性も十分にある。毒性学に限定せず、ナノ材料の生体内の挙動という、より大きな枠組みで研究開発領域を設定して、幅広い活動の検討が必要と考えられる。さらに、ナノマテリアルの健康影響に限らず、環境影響や将来のナノマニュファクチャリングの安全性などにもスコープを広げるべきであろう。

リスクコミュニケーションや ELSI の観点では、将来実現されうるナノテクノロジーに関して、その社会的影響を評価するテクノロジーアセスメントが重要である。その具体的な活動は多様なステークホルダーによる討論、市民パネルなどである。これまでの活動では、既存の課題、特に医療、バイオ、食品、環境に関連するものが多かった。国内では 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」の終了後は目立った活動がなく、この活動を実際に活かす施策が存在しない。ナノテクノロジーに限らず、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ことが課題である。同時に人材（自然科学の素養も持つ社会科学者）の育成が必要であり、それには彼らのキャリアパスの確立も含まれる。日本は、リスクコミュニケーションについて情報発信力が強いとは言い難く、インタラクティブでもない。米国や欧州ではナノテクノロジーの社会受容の課題は、研究分野の融合によって成果をあげるという研究の性質から、早くから中核的な研究開発と並行して進められるべき分野として捉えられてきた。EHS や ELSI など関連の課題の研究が政策的に明確に位置づけられ、関連プログラムの実施により具体化されている。しかし、日本では高等教育機関における伝統的な区分がそのような形のプログラムの開発・実施にマイナスに働く。したがってナノテクノロジーの社会受容に関して継続的に取り組んでいるケースは極めて少ない。社会受容に関する人材育成を担う単位取得可能な講座として大阪大学ナノデザイン教育研究センターでの試みは注目される。また、ナノ材料を作製する事業者が自己の努力、見識でリスク評価をし、国民に伝える能力の獲

得と文化の醸成が必要である。その意味で、産総研ナノシステム研究部門の Web ジャーナル「PEN News Letter 」（PEN: Public Engagement Nano-Based Emerging Technologies）は、現地情報を含めた国際情勢の質の高い分析や系統的・定期的な総括があり、ナノリスクだけでなく各国の最新の政策情報も掲載されていて日本では特徴的な情報センターと見ることができる。米国ではアリゾナ州立大学、ウィスコンシン大学、カリフォルニア大学などでナノテクノロジーの社会受容について学ぶことのできるプログラムが提供されている。また、欧州では様々なナノテクノロジーの社会受容関連のプログラムが実施されている。

（４）注目動向

［新たな動向］

ナノテクノロジーの産業化と、これらに連動し、社会実装を行う方策の安全性評価プロジェクトは欧州 NanoSafety Cluster に網羅されている[28]。30 以上のプロジェクトが記載されているが NanoRelease など米国主導のもので記載されていないプロジェクトがある。この中で、全体を俯瞰するのは NanoMile であり OECD/WPMN プロジェクトとの連携がとられている。目標としてナノ材料安全性を毒性予測計算手法の QSAR[53]で演繹推定算出することを目指す[54]が、QSAR の実績はピレステロイド系農薬の一部にしか適用可能性が見いだされていない。QSAR を実用化するには膨大なデータ蓄積と ITC 処理が必要となるが、その情報とプロトコルを保有し EC 域内の企業へだけ情報提供することは通商上大きな脅威となるだろう。米国では TechConnect 2013 Exhibition において中小企業振興策として各省庁からターゲットを定めた技術開発助成策が開示され、プロジェクトが開始されている（次節参照）。

多様なナノ材料の有害性を効率的に評価するためには、物理化学特性からの推定や、細胞試験や簡便な動物試験による評価が可能になることが望まれる。しかし、ナノ材料の有害性の機序が必ずしも十分理解されていない現状においては、物理化学特性からの推定や細胞試験のみに依拠することは困難であり、簡易な動物試験も含めた階層的な評価体系（統合試験戦略）を想定することが必要である。欧州では、各種の細胞試験と簡易な動物試験を併用することで、生体反応と体内動態の知見を得て、それが更なる詳細な試験が必要かどうかを判断する枠組み[55]や、物理化学特性と用途（Tier 1）・基本的試験（Tier 2）・材料毎の詳細な試験（Tier 3）からなる枠組み[56]が提案されている。

また、我が国でも、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」では、Tier 0 として、既に有害性評価済みのナノ材料と同等とみなすことができるかどうかを判断、Tier 1 として、有害性のスクリーニング試験法としての気管内投与試験を実施、Tier 2 として、従来の亜急性/亜慢性の吸入暴露試験を行うことを提案している[57]。

上記のような評価体系を構築するには、簡易な動物試験方法の構築が重要となる。呼吸器系の暴露を想定した簡易な動物試験方法として、気管内投与試験[57]や 5 日間短期吸入試験[58]を用いるための研究開発が最近活発化している。また、吸入暴露試験をなるべく簡易に行うためのエアロゾル発生方法の開発もなされている[36]。

［注目すべきプロジェクト］

海外の大規模プロジェクトとしては、欧州の FP7 によるプロジェクトが目立つ。ナノ材料の行政的な評価での活用を想定したプロジェクトが複数進行している。米国では、ナノ材料応用製品からの排出・暴露の評価プロジェクトが進行中である。

MARINA プロジェクト： FP7 の NanoSafety Cluster は NanoValid と MARINA の主要プロジェクトを有し、その予算規模は、18.6 百万ユーロある [59]。MARINA（期間 2011 年～2015 年）は、主査を Lang Tran (IOM)とする EU のナノリスク評価プロジェクトであり、目的は、ナノ材料のリスクマネジメント方法の開発とその立証で、18 個の WP（Work Package）から成る。種々の EU プロジェクトと共同できるように MARINA が EU NanoSeftycluster をサポートしている。REACH の条件を満たすリスク削減戦略の検討を行っている。マテリアル、暴露、ハザード、リスクの 4 テーマを柱として、これらに関係する最先端のツールを開発し、それらを、人間と環境のための有用なリスク管理ツールとして構築することを目的としている [60]。リスク評価を、標準ナノマテリアルの作製、毒性評価、暴露評価、計測の標準化を柱として、EU を中心とする公的研究機関、大学、民間企業の参加によって進めるプロジェクトであり、EU から 44 機関と日本、中国、ロシアが参加している。日本は NIMS が代表機関であり、東京理科大学と相模女子大学も MARINA プロジェクトに参加している。NIMS は試験サンプルとしてフラーレンナノウィスカー(FNW)の合成を担当している。MARINA は、試験サンプルの均質化と安定化を達成し、ナノマテリアルの特性評価と分散についてのプロトコルを完成させ、標準サンプル（reference materials）とその評価方法についての論文の投稿と、標準サンプルの毒性評価研究を行った。また、NanoVALID にマテリアルと情報を供給した。今日まで、Ag、 ZnO、 TiO_2、 SiO_2、MWCNT、 C60、 fullerene nanowhisker（フラーレンナノウィスカー）についての研究成果が報告されている。OECD/WPMN においては、工業ナノ材料分散プロトコルについて OECD ワークショップ（2013 年ベルリン）で発表し、環境中への工業ナノ材料の分散についてもワークショップ(Vienna, 2014)の中で発表している。また、Joint Research Centre (JRC) of the European Commission において SiO_2 の物理化学的性質について報告している。また、MWCNT と TiO2 についてはレポートを準備中である（2014 年時点）。人間への暴露評価については、NanoREG、SUN、GuideNano などのデータベースと MARINA のデータを集めて、Exposure Scenario Database を更新した。最新の曝露評価モデルをレビューし、曝露露評価サーベイプロトコルを完成。環境中でのナノマテリアルの運命(fate)と曝露においては、環境毒性関連媒体（下水排水中や土壌中の動態）における評価を行った。顕微鏡を用いたナノマテリアルの様々な媒体中の検出技術が進み、ICP-MS を用いての単粒子のデータ新解析法について出版を行った。海水浴場における TiO_2 ナノ粒子についてのフィールド調査を行った。金属酸化物ナノ粒子一連についてのインビトロテストが終了し、MWCNT については継続中である。またインビボ、ex vivo テストについては、経口、吸入、静脈注入試験が進行中であり、最終段階にある。環境毒性学については、OECD test guidelines に沿って陸水におけるテストが求められている。システムトキシコロジーと作用機序に

ついて multi-omics analysis of transcriptomics, proteomics, and metabolomics data が進行中である。インビトロテスト方法についてまとめており、その結果をインビボテストの改善ガイドラインとしてまとめている。人間へのリスクアセスメントについては、工業ナノ材料の代替え品の探求、vitro―vivo 試験結果に基づいた vitro 試験結果の応用可能性の検討をしている。さらに環境リスクアセスメント戦略との統合を検討している。そしてリスク減少戦略を進めている。以上の他に、意図しない事情によって引き起こされたリスクについての対策検討、やモニタリングシステムも対象である。定期的に電話会議を行って、EU-US との間の情報交換を進めている。

ITS-NANO[61]: 工業ナノ材料の合理的な試験戦略（ITS: Intelligent Testing Strategy）を構築することを目的とする。そのために、短期的には、グルーピングやランキングを可能にするために物理化学特性・暴露・有害性の間の関連性を理解すること、長期的には、試験を削減するためのモデリングアプローチの構築、さらに将来には、特定の対象については追加情報を得る試験を行いつつもモデリングと外挿に基づくリスク評価を基本とする絵姿を描いた。プロジェクトの一環として知識ギャップ解析に基づく戦略的な研究優先順位付けを行った。2012 年から 2013 年。欧州の 10 機関が参画した。

NANOSOLUTIONS[62]：ナノ材料と生体との相互作用を、材料の特性に基づいて、分子・細胞・個体レベルで理解し、有害性ポテンシャルを決定する材料特性を同定すること、ひいてはナノ材料の安全性の分類を行うことを目的としている。ナノ材料の表面化学と生体分子コロナの役割に焦点を当てている。欧州の 36 機関（公的研究機関、大学、企業）が参画している。

NANoREG[63]:「ナノ材料の行政的な試験のための欧州の共通アプローチ」短期的には、規制当局に対してリスク評価のツールと意思決定の手段を与えること（いくつかの材料に対するデータの取得とリスク評価の試行による）、長期的には、多数のナノ材料に適用可能な新しい試験戦略の構築、さらに、当局間の協力体制や相互受け入れ可能なデータベースの構築を目指している。欧州の 59 機関（公的研究機関、大学、企業）が参画している。

NanoDefine[51]：「欧州委員会によるナノ材料の定義の実施を支援するための、有効性が確認され標準化された手法に基づく統合的アプローチの構築」。ナノ材料の定義を最も経済的に実施するための手法選択と物質分類のための半自動の意思決定ツール、入手可能な計測方法の技術文書、標準的操作手順、機器校正のための標準と参照物質、装置の試作品、技術移転を目的としている。2013 年から 2017 年。欧州 11 ヶ国の 29 機関が参画している。

Nano-Release[64]：ナノ材料応用製品からのナノ材料の排出を理解するための方法の構築、将来的には、研究ニーズの特定と研究実施及び手法の標準化を目的としている。フェーズ１：ナノ材料の選定、フェーズ２：方法の評価：フェーズ３：ラボ間比較という構成となっている。2011 に開始され、樹脂中の多層 CNT を対象として、フェーズ２、３の研究が進められている。米国とカナダの機関による。

TechConnect 2013 Exhibition の基礎となっている NNI2014 の内容を見ると、出口政

策の設定方法が今までと異なり、活動主体もベンチャー創出から中小企業育成にシフトしていることに加えて、科学技術政策の運営もこれまでの米国の標準とは異なっている。通常、米国では医療・バイオおよび安全関係は NIH が指令塔としてプロジェクトを束ね、それ以外は国立科学財団（NSF)が担当している。興味深いのは遺伝子治療や遺伝子改変技術などのバイオ分野をナノテクに繰り入れていることである。NNI2000 は通常通り NSF 主導であったが NNI2014 では実務中心を商務省傘下の NIST へ変更しており、既に NIST 研究所内に 2 グループを編成して活動を開始している。このことはナノテクに対する米国の姿勢を考える上で重要である。第一に、科学の中で別扱いであったバイオと医療分野を、ナノテクを軸とする体系に再編することである。ナノテクを共通基盤として異分野水平融合ではなく垂直の体系へ転換を図っているともとれる。また、NIST によって一括オペレーションにすることで活動上も安全性評価と材料研究を一体に掌握する形になっている。第二に、研究組織である NIST が司令塔になることである。NIST は研究範囲が広く、特許はいうに及ばず輸送や取引の基準（ASTM）作成にも関わる実務組織である。この運営母体の変更は、中間管理組織無しの実務直結になりプロジェクト推進がダイナミックになるだけではなく決定も早くなる。このように NNI2014 はテーマだけではなく実行手段も大きく変更されている。

その他の国・地域としては、台湾がアジアの中で最も早くナノ EHS に着手し、現在もアジアナノフォーラム(ANF)のリエゾンメンバーの立場を活かして、OECD-WPMN、ISO TC229 に関与している。台湾の経済部工業局からの委託を受けて工業技術研究院（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、政府の進めるナノテクノロジー研究開発戦略のもとで、ナノテクノロジーの産業化を支援・促進するものである。ナノマークは所定の規格を満たしたナノ製品に対して付与される。2014 年 9 月現在で有効なナノマークが付与された企業および製品は 37 社 1257 製品である。台湾国内で 13 カ所の認定試験機関が登録されている。

韓国は、2012 年からナノ融合産業に 8 年にわたって投資し、ナノテクノロジー起業を支援し、雇用を創出するナノ融合 2020 事業を進めている。環境部と国立環境科学院は、2013 年にナノマテリアルの安全性や有害性評価等に関する詳細な情報を提供する「ナノ安全性情報システム」を公開している。韓国版の REACH と呼ばれる「化学物質の登録および評価等に関する法律（化評法)」が 2015 年に施行される。

シンガポール、タイも積極的に関与している。タイでは、国立ナノテクノロジー研究センター（NANOTEC）が中心となり、ナノテクノロジーの研究開発および EHS、ELSI 問題にも大きい関心を寄せている。最近では、NanoQ と呼ばれるナノテクノロジー製品認証システムの運用を開始した。OECD WPMN へもオブザーバとして参加している。タイ政府はナノテクノロジー研究開発を経済の成長の原動力と位置づけている。社会受容に関連の様々な課題について政策 National Nano Safety and Ethics Strategic Plan 2012-2016 を定め、研究開発と並行して取り組むこととしている。また台湾に倣ってナノテクノロジー産業化の促進のために製品への認証付与制度が設けられている。

近年特に注目されるのはイランである。イラン・ナノテクノロジー・イニシアチブ・カウンシル（INIC）を設立し、タイや台湾に倣ってナノテクノロジー製品への認証に動

き出しており、ISO における標準化活動や EHS への取り組みや国際会議を主催するなど積極的に取り組んでいる。

また、ANF ではナノ安全に関する新たな定例シンポジウム「Asia Nano Safe（ANS）」を 2013 年から開始した。

国内では、以下に限られている。

NEDO プロジェクト「低炭素化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」研究開発項目③「ナノ材料簡易自主安全管理技術の構築」（2010-2014 年度）。事業者による自主安全管理技術の構築を目的とし、CNT 等について、細胞試験による簡易な有害性評価技術や、作業環境での勘弁な暴露計測手法を開発し、これらの手法を手順書・手引きとして公開している [17]。

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）。行政的な観点から、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（ナノ材料の同等性の判断基準を構築するとともに、初期有害性情報を取得するための低コスト・簡便な動物試験手法として気管内投与試験を位置づけるための検討が行われている [57]。経済産業省では 2008 年度よりナノマテリアルの製造事業者に対する調査「ナノマテリアル情報収集・発信プログラム」が継続されていおり、延べ 31 社が情報を提供している。欧州の REACH 規則の下で進められているナノマテリアルの届出・登録とは性質が異なるものの、国内で製造・流通するナノマテリアルについて把握することが可能である [65]。

（５）キーワード

ナノ材料安全性評価、ナノマテリアル、リスク評価、リスク管理、リスクマネジメント、リスクコミュニケーション、社会受容、国際標準、標準化、不確実性、毒性学、有害性、ハザード、ばく露（暴露）、吸入ばく露試験、作業環境、体内動態、ラベリング、テクノロジーアセスメント、アウトリーチ、教育、人材育成、サイエンスコミュニケーション、ナノカーボン、カーボンナノチューブ、フラーレン、ナノファイバー、二酸化チタン、工業ナノ材料、ナノ粒子、ナノ製品、EHS、ELSI、OECD WPMN、OECD WPN、ISO/TC229、REACH、ECHA、EFSA、FDA、EPA、PMN、SNUR、FSA、WHO、FAO、Nanosafe Cluster、Responsible Development

（６）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	○	→	国内ナノ安全性プロジェクトについては既報[17) 57) 66) 67)]参照。 中央労働災害防止協会日本バイオアッセイ研究センターの多層CNT長期吸入ばく露試験が2014年6月末で動物実験終了、詳細解析に入った。この２年の全身ばく露連続吸入ばく露試験は世界で唯一の試験であり欧米が注目している。 国立医薬品食品衛生研究所の開発した吸入ばく露試験装置と方法(Taquann法)は、ナノ粒子凝集体を容易に分散できる方法である。 信州大学は多層CNTの標準品、改質品を合成、Characterizationを行い、日米欧の主要研究機関に提供している。信州大学は米国NIOSH等と共同で安全なCNTのデザイン方法を構築するための研究を進めている。 呼吸器経由の暴露による有害性に関する研究活動は一定水準にあるものの、経口や経皮といった他経路の暴露による有害性、環境運命や生態毒性、ライフサイクルでの排出・暴露などについては研究が限られていて、全体として層が薄い。 安全性評価の戦略的な施策が実施されない。学際的なため「ナノ材料安全性評価研究と情報収集」のような項目がどこにも無い。
	実効性	×	→	ナノ材料合成技術、毒性評価技術では世界をリードする技術があるが、欧米のように総合的な戦略として確立されていないので研究者間の努力に委ねられている。 各々の省庁の職掌範囲で安全性評価、国際対応が行われているのでOECD等国際会議で日本として統一した意見の表明がなされていない。この状況は研究者間では知られていて改善を求める声が出されているが、進捗がほとんど無い。OECD WPMN、ISO/TC229には積極的に関与しある程度の主導権をとっており、この点が課題である。各企業からの安全性データは欧米への流出が進んでいる。 リスク評価に不可欠のISO文書として発行されたものが無い。 ナノテクノロジーの基盤として安全性研究と政策が捉えられておらず、継続的で戦略的な安全性評価プログラムと組織が無い。 政府・政府関係組織による企業幹部（及び社会全体）への安全性についての教育プログラムが皆無で、「安心」という情緒的な感情論に陥りがちで科学的知見を社会へ還元できていない。
米国	取り組み水準	◎	↗	NNI2014で安全性を総ての科学技術の横断的基盤技術とする戦略を建策し、実行プランを示している。 プロジェクト推進の中心機関をNIOSHとNISTとすることでより迅速で効率的な安全性評価研究を推進する体制を整えている。 欧州と協調してテーマ別にプロジェクトチームを編成して産官学で産業応用のための安全性評価を開始した。重点市場分野は、ドローン（無人機）、通信、半導体、タイヤ、インフラ材料、バイオ（ナノテクでバイオを実用化する）、センサ。総ての分野でナノカーボンが関係する。 EPAが中心となりOECD等国際標準検討プロジェクトのリーダーシップを掌握することを推進している。「国際的な標準」の確立を米国規準で押し進めようとしている。 ナノ材料産業化の規制を重要ナノ材料であるCNTとナノ酸化チタンで強めている。EPAが既存の法律の枠内で実効性を持たせることを進めていて、単なる規制強化ではなく国益に規準を置いた「指導」の形を強めている。
	実効性	◎	↗	OECD WPMNでは、議論をリードする役割を果たしている。OECD WPMN主催のナノ材料のカテゴリー化に関する専門家会合を誘致[11)]。今後の国際的な評価体系の作成に影響を及ぼす可能性がある。 ナノ材料のグルーピングやカテゴリー化に関心が高い。カナダの規制当局（ナノマテリアルの登録に関してはEPAとHealthCanada）との合同会議（RCC）において、物性等に基づいた評価のクラス分けスキーム（カテゴリゼーション）が提案された[48)]。

欧州	取り組み水準	◎	→	EU全体の主要研究機関及び規制官庁の共同による、統一したNanosafety Clusterを形成してプロジェクトを推進。中心になるのはEC DG Researchだが実効推進中心機関を2013年に独Helmholtz研究所から蘭RIVMに変更した。RIVMはエンジン排気微粒子研究では世界的な権威である。 欧州の主要論文誌にNanosafety Cluster成果を優先的に論文掲載することを行っている。国際標準化作業に影響を及ぼす。 FP7に基づく多数のプロジェクト、MARINA、ITS-NANO[61]、NANOSOLUTIONS[62]、NANoREG[63]、NanoDefine[51]、Q-Nano、NanoValid。 動物試験に制約があるのでin vitro試験方法とITC技術を活用した毒性評価方法の開発を10年以内に確立することを目指す。具体的にはQSARを使用する。 毒性評価技術は日米と同等であるが毒性研究は旧NATOの安全保障技術の一部であったので基盤が充実していて研究所、研究者の数は圧倒。Univ. Dublinのようなバイオに強い毒性研究所、仏・スイスのように大型放射光を使った毒性研究等、材料科学、バイオ、エネルギー、物理学が共同してプロジェクトを推進する体制がある。昨年から^{14}Cで作成したCNT合成を行っているが日本では実施が不可能であるようなテーマを持つ。 ナノ粒子の標準品は欧州メーカーの物がほとんどであるが、ナノカーボン科学は日本が優位にあるので標準化で牽制対応する傾向がある。
	実効性	◎	↗	Horizon 2020のNMP-30-2015 “Topic: Next generation tools for risk governance of nanomaterials”は、巨額予算（€148,370,000）。市場に投入されるナノマテリアルのリスクの評価、伝達、情報交換のためのツールを開発し、リスク管理のための基盤を構築するという明瞭な目標を設定。 Nanosafety Clusterは学際的枠を超えた組織でNNI2014同様、戦略的組織力を持つ。 FP7に基づくプロジェクトは、多くが産学官の連携によるものであり、基礎研究が行政ニーズをつなぐ役割を果たしている。BASFなどの企業の研究者の関与が大きい。 毒性評価の要である動物実験に厳しい社会状況があるのでPathologyとThreshold議論で弱みがあるが、ICTを活用した分析評価には研究者を100人以上投入して米国以上。 フランスやベルギーでの登録制度の開始の決定、REACHでのナノ材料の取り扱いの議論が活発化。 米国との協調により安全性に関する標準を確立することは、産業と貿易において、他国に影響する可能性が高い。
中国	取り組み水準	○	↗	毒性評価研究の基盤が無いので欧米に多くの研究者が派遣されているが欧米の研究所に留まる傾向。ISO等の提案と評価内容も急速に日米欧に追いつきつつある。 環境保全と安全性は中国の大きな課題なので2012年米国毒性学会に100人以上の研究者と政府関係者が参加。 欧州、日本のナノ安全性学会への参加は少ない。 台湾環境省は、ナノテクノロジーのEHSに関するデータベース（TaiNED）を公開した[68]。
	実効性	△	↗	ナノマテリアルの標準化、特に国家標準規格（GB）の策定においてはNCNSTを中心に活発な活動。 しばらくの間は欧州のREACHを採用してナノ応用製品への規制を進めるものと予想される。 近い将来、米国で学んだ研究者が帰国して実績を上げていく可能性がある。 台湾の労働安全衛生研究所がナノ材料の安全な使用に関するガイドラインを公開した。

韓国	取り組み水準	△	↗	2011年に国家化学物質管理基本計画が策定されナノ材料も優先順位が高い物質として位置づけられている。また、同年策定されたナノ製品安全性総合計画において、ナノ材料の安全性データベースや有害性の分析・評価手順の標準化を進めることになっている。 ナノ材料取り扱い作業所における作業者のばく露状況、健康調査データ提供では多くの貢献をしている。 環境部と国立環境科学院は、2013年にナノマテリアルの安全性や有害性評価等に関する詳細な情報を提供する「ナノ安全性情報システム」を公開している。なお、韓国版のREACHと呼ばれる「化学物質の登録および評価等に関する法律（化評法）」が2015年1月1日より施行されるが、現在明らかにされている範囲では既存の物質のナノスケール物質について別途の登録が必要とはされていない。 ISO/OECDにおいてはナノ銀についての報告、提案が出されている。銀ナノ粒子、カーボンナノチューブなどの工業ナノマテリアルについて多くの吸入曝露実験が行われている。
	実効性	○	→	・OECD WPMN主催の毒性動力学に関する専門家会合の誘致や、ISO/TC229への関与など、国際的議論において、一定のプレゼンス。

現状についての比較
各国の取り組みの現状についての見識による判断を記載してください。（※絶対評価）
◎　非常に進んでいる　　○　進んでいる　　△遅れている　　×　非常に遅れている
近年のトレンド
各国の取り組みが過去と比較してどのように変化してきているかについて、見識による判断を記載してください。
↗　上昇・積極傾向　　→　現状維持　　↘　下降傾向

（７）引用資料・参考資料

引用資料:

1) National Science and Technology Council, Supplement to The President's Budget for Fiscal Year 2014, The National Nanotech Initiative, May 2013.
2) National Science and Technology Council Committee on Technology, National Nanotechnology Initiative Strategic Plan, Feb., 2014.
3) Lynch, I (edit), Nanosafety Cluster, Compendium of Projects in the European Nanosafety Cluster, 2014 edition, University of Birmingham, UK., June 2014.
4) ISO (2010) ISO/TS 8004-1:2010 Nanotechnologies --Vocabulary -- Part 1: Core terms
5) What is a "nanomaterial"? European Commission breaks new ground with a common definition.
http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-1202_en.htm?locale=en
6) NIA (2013) France publishes Results from the first Round of its Mandatory Nano Reporting Scheme.
http://www.nanotechia.org/news/news-articles/france-publishes-results-first-round-its-mandatory-nano-reporting-scheme
7) EPA (2010) Multi-Walled Carbon Nanotubes and Single-Walled Carbon Nanotubes; Significant New Use Rules, Federal Register/Vol. 75, No. 180/Friday, September 17, 2010/Rules and Regulations.
8) NIA (2013) UN Expert Committee approves Nanomaterial Work Item.
http://www.nanotechia.co.uk/news/news-articles/un-expert-committee-approves-nanomaterial-work-item
9) OECD (2012) Inhalation Toxicity Testing: Expert Meeting on Potential Revisions to OECD Test Guidelines and Guidance Document. Series on the Safety of Manufactured

Nanomateriasl, No. 35, ENV/JM/MONO(2012)14.
10) OECD (2014) Ecotoxicology and Environmental Fate of Manufactured Nanomaterials: Test Guidelines. Expert Meeting Report. Series on the Safety of Manufactured Nanomateriasl, No. 40, ENV/JM/MONO(2014)1.
11) OECD (2014) Report of the OECD Expert Meeting on the Physical Chemical Properties of Manufactured Nanomaterials and Test Guidelines. Series on the Safety of Manufactured Nanomateriasl, No. 41, ENV/JM/MONO(2014)15.
12) 米国 EPA HP: September 17-19, 2014 OECD Expert Meeting on Categorization of Manufactured Nanomaterials. http://www.epa.gov/oppt/nano/oecdconf.html
13) ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究：報告書・政策提言 http://unit.aist.go.jp/nri/ci/nanotech_society/Si_portal_j/doc/doc_report/summary_j.pdf
14) 菅野純（2012）毒性試験と評価に関する新たな課題へのアプローチ:厚生労働科学ナノマテリアル研究の展開 http://www.nies.go.jp/risk/chemsympo/image/2-abstract_kanno.pdf
15) 「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」（事後評価）分科会 http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_23h_jigo_8_1_index.html.htm
16) 経済産業省（2013）「ナノ物質に係る今後の対応」、ナノ物質の管理に関する検討会（第 3 回） http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/nano-material_kanri/pdf/003_04_00.pdf
17) 産業技術総合研究所 HP : カーボンナノチューブの自主安全管理のための「安全性試験手順書」と「作業環境計測手引き」 http://www.aist-riss.jp/main/modules/product/nano_tasc.html
18) Takagi et al. (2008) Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. J Toxicol Sci 33:105–116.
19) Poland et al. (2008) Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. Nat Nanotechnol 3: 423–8.
20) Donaldson et al. (2010) Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma, Donaldson et al. Particle and Fibre Toxicology 2010, 7:5.
21) Nagai et al. (2011) Diameter and rigidity of multiwalled carbon nanotubes are critical factors in mesothelial injury and carcinogenesis, doi/10.1073/pnas.1110013108.
22) 中西準子 編（2011）ナノ材料リスク評価書 –カーボンナノチューブ（CNT)–,最終報告版: 2011.8.17, NEDO プロジェクト（P06041）「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」
23) NIOSH (2013) Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers, Current Intelligence Bulletin 65.
24) 蒲生昌志 編(2011)ナノ材料リスク評価書 –二酸化チタン(TiO2)–,最終報告版:2011.7.22, NEDO プロジェクト(P06041)「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」

25) NIOSH (2011) Occupational Exposure to Titanium Dioxide, Current Intelligence Bulletin 63.
26) 厚生労働省（2013） 初期リスク評価書 No.70 酸化チタン（ナノ粒子）、化学物質のリスク評価検討会、http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r985200000375tx.html
27) 日本産業衛生学会（2013）Recommendation of Occupational Exposure Limits, Journal of Occupational Health 55, 422-441.
28) NanoSafety Cluster, http://www.nanosafetycluster.eu.
29) OECD Nanotechnology and Tyres, ISBN 978-92-64-20915-2, (2014).
30) Tian FR, Cui DX, Schwarz H, Estrada GG, Kobayashi H. Cytotoxicity of single-wall carbon nanotubes on human fibroblasts. Toxicol In Vitro 2006; 20: 1202-1212.
31) Malich G, Markovic B, Winder C. The sensitivity and specificity of the MTS tetrazolium assay for detecting the in vitro cytotoxicity of 20 chemicals using human cell lines. Toxicology 1997; 124: 179-192.
32) Salem AK, Searson PC, Leong KW. Multifunctional nanorods for gene delivery. Nat Mater 2003; 2: 668-671.
33) Tominaga H, Ishiyama M, Ohseto F, Sasamoto K, Hanamoto T, Suzuki K, et al. A water-soluble tetrazolium salt useful for colorimetric cell viability assay. Anal Commun 1999; 36: 47-50.
34) Ley K. Physiology of Inflammation. Oxford University Press: New York, 2001.
35) Dinarello CA. Proinflammatory cytokines. Chest 2000; 188: 503-508.
36) Kostarelos K, Lacerda L, Pastorin G, Wu W, Kieckowski S, Luangsivilay J, et al. Cellular uptake of functionalized carbon nanotubes is independent of functional group and cell type. Nat Nanotech 2007; 2: 108-113.
37) Pantarotto D, Briand J, Prato M, Bianco A. Translocation of bioactive peptides across cell membranes by carbon nanotubes. Chem Commun 2004; 16-17.
38) Cui D, Tian F, Ozkan C, Wang M, Gao H. Effect of single wall carbon nanotubes on human HEK293 cells. Toxicol Lett 2005; 155: 73-85.
39) Kam N, Jessop T, Wender P, Dai H. Nanotube Molecular Transporters: Internalization of Carbon Nanotube-Protein Conjugates into Mammalian Cells. J Am Chem Soc 2004; 126: 6850-6851.
40) King MA. Detection of dead cells and measurement of cell killing by flow cytometry. J Immunol Meth 2000; 243: 155-166.
41) Chen P, Taniguchi A. Detection of DNA damage response by different forms of titanium dioxide nanoparticles using sensor cells.Journal of Biosensors & Bioelectronics, 3, 129 (2012).
42) Chen P, Kanehira K, Sonezaki S, Taniguchi A. Detection of cellular response to titanium dioxide nanoparticle agglomerates by sensor cells using heat shock protein promoter. Biotechnology and Bioengineering, 109, 3112-3118 (2012).
43) ナノセルロースフォーラム HP：https://unit.aist.go.jp/brrc/ncf/index.html
44) G. Oberdörster, A. Maynard, K. Donaldson, V. Castranova, J. Fitzpatrick, K. Ausman, J.

Carter, B. Larn, W. Kreyling, D. Lai, S. Olin, N. Moteiro-Riviere, D. Warhei, and H. Yang, A report form the ILSI Research Foundation/ Risk Science Institute Nanomaterial Toxicity Screening Working Group, *Particle and Fibre Toxicology*, 2:8, doi:10.1186/1743-8977-2-8 (2005).

45) Donaldson, K., Poland, C.A., Nanotoxicity; challenging the myth of nano-specific toxicity, Current Opinion in Biotechnology, 24, 723-734 (2013).

46) Monica, J., ハーラン・グロバルセミナー、東京、Oct. 31, 2012.

47) NIA (Nanotechnology Industrial Association) HP: Report and external Coverage on NIA Symposium on Grouping and Read-Across now Available. http://www.nanotechia.org/node/18824

48) SAFENANO HP: US and Canada develop Classification Scheme for Nanomaterials. http://www.iom-support.co.uk/KnowledgeBase/CurrentAwareness/ArticleView/tabid/168/ArticleId/416/US-and-Canada-develop-Classification-Scheme-for-Nanomaterials.aspx

49) ECHA (European Chemicals Agency) HP: Topical Scientific Workshop – Regulatory Challenges in Risk Assessment of Nanomaterials. http://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/topical-scientific-workshop-regulatory-challenges-in-risk-assessment-of-nanomaterials

50) Linsinger et al. (2012) Requirements on measurements for the implementation of the European Commission definition of the term "nanomaterial". JRC (Joint Research Center) Reference Report. ISSN 1831-9424, doi:10.2787/63490

51) NanoDefine project HP. http://www.nanodefine.eu

52) 産業技術総合研究所 HP :「ナノ材料の産業利用を支える計測ソリューション開発コンソーシアム」の発足 http://www.aist.go.jp/aist_j/news/pr20130531.html

53) Lapenna, S., Fuart-Gatnik, M., Worth A., Review of QSAR Models and Software Tools for Predicting Acute and Chronic Systemic Toxicity, JRC Scientific and Technical Reports, EUR24639 EN (2010).

54) Oksel, C., Wang, X.Z., Quantitative Structure-Activity Relationship (QSAR) Models, QualityNano, University of Leeds, Mar. 27, 2013.

55) Klein et al. (2012) Hazard identification of inhaled nanomaterials: making use of short-term inhalation studies, Arch Toxicol 86, 1137–1151.

56) Oomen et al. (2014) Concern-driven Integrated Approaches to Nanomaterial Testing and Assessment – Report of the NanoSafety Cluster Working Group 10, Nanotoxicology 8(3), 334–348.

57) 産業技術総合研究所 HP : 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、http://www.aist-riss.jp/projects/meti-nano/jp/

58) Ma-Hock et al. (2014) A short-term inhalation study protocol: designed for testing of toxicity and fate of nanomaterials. Methods Mol Biol 1199, 207-12.

59) FP7 NanoValid and MARINA, http://www.nanovalid.eu/index.php/news-archive/5-fp7-nanovalid-and-marina

60) Lang Tran, “Risk Management of Nanomaterials: The Results from FP7 MARINA”, Abstracts of The Third Workshop on The Risk Management of Engineered Nanomaterials, P.4, August 22nd, 2014, National Institute for Materials Science, WPI-MANA Bil. Auditorium, Tsukuba, Japan.
61) ITS-NANO HP: http://www.its-nano.eu
62) NANOSOLUTIONS HP: http://nanosolutionsfp7.com/project-aims-objectives/
63) NANoREG HP: http://nanoreg.eu
64) ILSI- NanoRelease Consumer Products. http://www.ilsi.org/ResearchFoundation/RSIA/Pages/NanoRelease1.aspx
65) 経済産業省化学物質管理課　ナノマテリアル情報収集・発信プログラム（各事業者のナノマテリアル情報提供シート） http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html
66) JST-CRDS FY2013-FR-05「研究開発の俯瞰報告書　ナノテクノロジー・材料分野 2013 年版」
67) 鶴岡秀志、ナノ炭素材料の安全性評価の現状と社会受容、50(12)(2012)（2013 年 7 月 1 日発行）
68) 台湾 EPA HP：Taiwan Nanotechnology EHS Database. http://ehs.epa.gov.tw/Home/EN_F_Home_Index

参考資料

1) The Royal Society (2004) Nanoscience and Nanotechnolgies: Opportunity and Uncertainty.
2) Eva Oberdörster (2004) Manufactured Nanomaterials (Fullerenes, C_{60}) Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass, Environmental Health Perspectives 112, 1058-1062.
3) OECD (2012) Guidance on sample preparation and dosimetry for the safety testing of manufactured nanomaterials. Series on the Safety of Manufactured Nanomateriasl, No. 36, ENV/JM/MONO(2012)40.
4) Taquahashi et al. (2013) Improved dispersion method of multi-wall carbon nanotube for inhalation toxicity studies of experimental animals. J Toxicol Sci. 38, 619-28.
5) National Science and Technology Council (2014) National Nanotechnology Initiative Strategic Plan.
6) Kasai T, Umeda Y, Ohnishi M, Kondo H, Takeuchi T, Aiso S, Nishizawa T, Matsumoto M, and Fukushima S:Thirteen-week study of toxicity of fiber-like multi-walled carbon nanotubes with whole-body inhalation exposure in rats. Nanotoxicology 2014: 1-10.
7) Nanosafety in Europe 2015-2025: Towards Safe and Sustainable Nanomaterials and Nanotechnology Innovations, http://www.ttl.fi/en/publications/electronic_publications/nanosafety_in_europe_2015-2025/pages/default.aspx
8) 厚生労働科学研究費補助金研究報告書 化学物質リスク研究事業 「ナノマテリアルの健康

影響評価手法の総合的開発および体内動態を含む基礎的有害性情報の集積に関する研究」平成 21 年度、22 年度、23 年度 総括･分担研究報告書 研究代表者 広瀬明彦 国立医薬品食品衛生研究所

9) 厚生労働科学研究費補助金研究報告書 化学物質リスク研究事業 「ナノマテリアル曝露による生体毒性の慢性移行及び遅発性に関わる評価手法の開発研究」 平成 22 年度 、25 年度 総括・分担研究報告書 研究代表者 広瀬明彦 国立医薬品食品衛生研究所
10) Nanosafety: http://www.nanosafety.jp/oecd/11-20112oecdwpmn
11) http://www.nanovalid.eu/
12) http://ec.europa.eu/research/horizon2020/pdf/press/horizon2020-presentation.pdf
13) JST-CRDS Horizon 2020 の概要
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf
14) Next generation tools for risk governance of nanomaterials (NMP-30-2015)
http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2510-nmp-30-2015.html
15) http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/int/reach.html
16) “The Third Workshop on the Risk Management of Engineered Nanomaterials（第３回工業用ナノマテリアルのリスク管理研究会）”, 2014 年 8 月 22 日, NIMS, つくば
17) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=53375
18) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=57084
19) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=55827
20) http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=63502
21) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=63698
22) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=63697
23) http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=63836
24) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=54315
25) ナノテク国際標準化サーキュラー(NTSC No.21、22、23、24) ナノテクノロジー標準化国内審議委員会
26) H.Cui, W.Wu, K.Okuhira, K.Miyazawa, T.Hattori, K.Sai, M.Naito, K.Suzuki, T. Nishimura, Y.Sakamoto, A.Ogata, T.Maeno, A.Inomata, D.Nakae, A.Hirose, T. Nishimaki-Mogami, “High-temperature calcined fullerene nanowhiskers as well as long needle-like multi-wall carbon nanotubes have abilities to induce NLRP3-mediated IL-1β secretion”, Biochem. Biophys. Res. Commun. (2014),
http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrc. 2014.08.118.
27) Interlaboratory evaluation of rodent pulmonary responses to engineered nanomaterials: the NIEHS Nano GO Consortium. Environ Health Perspect. 2013 Jun;121(6):676-82. doi: 10.1289/ehp.1205693.
28) Surface charge and cellular processing of covalently functionalized multiwall carbon nanotubes determine pulmonary toxicity. ACS Nano. 2013 Mar 26;7(3):2352-68. doi: 10.1021/nn305567s.
29) Use of coated silver nanoparticles to understand the relationship of particle dissolution

and bioavailability to cell and lung toxicological potential. Small. 2014 Jan 29;10(2):385-98. doi: 10.1002/smll.201301597.

30) Identifying the pulmonary hazard of high aspect ratio nanoparticles to enable their safety-by-design. Nanomedicine (Lond). 2011 Jan;6(1):143-56. doi: 10.2217/nnm.10.139.

31) The threshold length for fiber-induced acute pleural inflammation: shedding light on the early events in asbestos-induced mesothelioma. Toxicol Sci. 2012 Aug;128(2):461-70. doi: 10.1093/toxsci/kfs171.

32) Kasai T, Umeda Y, Ohnishi M, Kondo H, Takeuchi T, Aiso S, Nishizawa T, Matsumoto M, and Fukushima S:Thirteen-week study of toxicity of fiber-like multi-walled carbon nanotubes with whole-body inhalation exposure in rats. Nanotoxicology 2014: 1-10.

33) US-Canada Regulatory Cooperation Council（RCC）のステークホルダーミーティング http://www.trade.gov/rcc/rcc-stakeholder-dialogue-discussion-06202013.asp