

# エグゼクティブサマリー

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



図0 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図 (2021年)

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

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

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

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

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

日本は材料・素材分野で基礎・応用ともに高いポテンシャルを有している。これは、長年、物質・材料研究を積極的に進めてきたことに起因しており、磁石、リチウムイオン電池、青色LED、光触媒、炭素繊維などのように、日本で発明、産業化された事例も多い。また、1980年から90年代に日本の電機産業が世界を席巻した背景には、それらの機器に使われた安価で高品質な部品・素材を供給する国内の大企業から中小企業までの部素材産業や製造装置産業企業群の存在があった。それらの企業群が提供する機能性材料・部品・装置の多くは、電機産業の多くが昔の勢いを失った現在でも世界的に大きなシェアを持ち続けている。個々の部素材においてわが国が占める市場の規模はそれほど大きくないが、部素材産業全体を面で見ただけの場合にはわが国は大きな市場を有し、競争力を維持しているといえる。しかし、一方で、リチウムイオン電池の電極材料、液晶製造用フォトレジストやカラーフィルムなど一部の液晶ディスプレイ材料、パワートランジスタといった、売り上げ規模や今後の市場成長が見込めるために新規参入/投資インセンティブの高い分野では、諸外国の急迫によってシェアの低下傾向が見て取れることには注意が必要である。これまでの材料開発では、1つの新材料を生み出すために10年以上の開発期間がかかることもまれではなかったが、このようなグローバル競争の下ではこれまで以上に材料開発のスピードを上げることが課題である。

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

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

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

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