

1 | 俯瞰対象分野の全体像

1.1 俯瞰の範囲と構造

本報告書では、人類の広範な活動を支える、材料（マテリアル）とデバイスに関する研究開発を中心に俯瞰をする。その際、ナノテクノロジー（以下ナノテクと略す）は最先端の材料・デバイスの設計や機能発現、製造における中核的技術の一つと位置付けられる。

ナノテクは、概ね1ナノメートルから100ナノメートルの領域における物質の構造を制御して合成、加工を行う技術であり、特に、そのスケールにおける内部空間・空隙などの三次元構造あるいは表面・界面などの二次元構造、および、その構造に深く関係する諸現象を原子レベルで観測、理解し、様々な要素と組み合わせることで、新しい機能と知識を創出する学術的・技術的領域のことを指す。人間が昔から利用してきた材料の持つ、様々な固有の機能は、それらの材料のナノスケールにおける構造に起因することも多い。人間はそれを、長い試行錯誤の上で発見し利用してきたが、20世紀初頭に登場してきた量子力学や、20世紀後半に急激に向上してきたナノテクの観察・加工手段が、材料やそれを利用したデバイスの改良、新規発見を加速している。

ナノテクには二つの対極的なアプローチがある。一つは、超LSI製造に代表されるような、微細加工により所望の構造を作る技術で、バルク材料や薄膜材料を削り込んだり付加したりしながら設計された通りの構造を得る「トップダウン型のナノ加工」である。技術の発展に伴って、形成できる最小パターンの縮小、設計に対する加工の正確さの向上、利用可能な材料種の拡大、形成されるパターンの複雑化、などが実現してきた。もう一つは、原子・分子あるいは、ナノ粒子などのナノ材料を出発原料に、それらよりも大きなスケールで所望の構造を自己組織的に形成する「ボトムアップ型のナノ形成」である。これが完全に成し遂げられれば、物質の最小構成要素からの構造形成が行われたことになるので、究極的なナノ形成技術となることが期待できる。現時点においてもトップダウン加工では到底形成することができない微細なナノ構造を実現している。

しかし、応用の面から、後者で実現できる物質全体の形状や、そこに使用できる材料などの点においては、前者ほどの設計に対する自由度を持っておらず、この点から前者の限界を後者の技術で補完することで突破する「融合的なアプローチ」も重要であり、実際に盛んに利用されている。

ナノメートルスケールの構造の具体例として、トップダウン・ナノ加工分野においては、最先端の微細加工技術により製造される先端Si LSI、異種機能の混載を含むナノフォトニクス、各種センシング用途、ナノバイオ用途などに活用されているMEMS（Microelectromechanical System）デバイスなどが、発展を続けている。また、ボトムアップ型ナノ形成分野においては、製法、サイズ、原料などの点で、多様なナノ構造が研究されている。例えば、量子ドットを含む、各種金属・半導体のナノ粒子や、クラウンエーテル・シクロデキストリンに始まり、カテナン、ロタキサンなどの絡まりあった複数分子、ミセルやリポソームのような疎水性相互作用による自己集合といった超分子構造、ゼオライトやMOF（金属有機構造体）のような三次元ナノ空間・空隙構造およびそれらを利用した材料、そして、零次元、一次元、二次元のカーボンナノ構造体であるフラーレン（C60）、カーボンナノチューブ（CNT）、グラフェンがある。また、医療応用として、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に対するワクチンとして絶大な効果を誇ったmRNAワクチンは、免疫機能を駆動するためのコロナウイルスのスパイクタンパク質をコードしたmRNAを、人工的な脂質膜で包み表面に修飾を施した人工ナノ粒子である。

ナノスケール物質の特異な性質の源は、①サイズに起因する量子効果、②原子より10～100倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③バルク内部の原子に比べ、表面・界面の原子の数が相

対的に増えることによるナノ界面・表面効果などであり、これらが通常の巨視的物質に見られる物性とは全く異なる「ナノ物性」を生み出す。たとえば、多様な触媒効果や、物質定数から解放されて自在に変化する電子的・磁氣的・光学的・機械的・熱的特性である。

このようなナノテクによって進歩を続けているのが材料である。材料（material）とは、何らかの有用な機能を有し、それを人類がなんらかの用途に使うことができる物質（matter/substance）である。

工業で用いられる材料には、出発原料による区分、

「金属材料」：ステンレスを含む鉄鋼、アルミニウム系、チタン系、ニッケル系などの各種機能を持った金属・合金など

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

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

「生物材料」：生物に由来する材料。木材、天然繊維、タンパク質や核酸、糖鎖など

「複合材料」：上記の材料を複数混合した材料。繊維強化プラスチック、珪瑯（ほうろう）、金属箔ラミネートフィルムなど

や、「磁性体材料」「蛍光材料」「誘電体材料」「耐熱材料」といった物理・化学的性質による区分、さらには材料を二分する「機能材料」「構造材料」という区分が存在する。分類学的な整理が目的ならば、同じ材料が複数の区分に分類されることは避けて、一つだけの区分法を用いるべきである。しかし、本報告書の目的は「重要な研究開発戦略立案に資するために、科学技術を広く俯瞰する」ことであるため、分類の整合性よりも、大きな研究開発の流れがつかみやすくなることを重視して、あえて複数の区分を併用した俯瞰を行っている。

今日において材料技術は、ナノメートルの領域にまで踏み込んだ組織制御技術、高分解能電子顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡などのサブナノメートルにおよぶ高精度計測、第一原理電子状態計算による構造および機能の予測、シミュレーションによる解析技術を柱として、さらに進化し続けている。本報告書では、材料・デバイスそのものの技術だけでなく、こうした材料・デバイスの、観察・評価、組織制御などの手段や、それらを予測するための理論的枠組みに関する研究開発も、材料・デバイス技術の周辺技術として取り上げる。これらの技術は、ナノテクの共通基盤として用いられているが、こうした基盤技術に用いられているハードウェアを急速に発展させているものそのものが、ナノテクの応用であるケースも多い。ある分野に向けたナノテクとそれによりつくられた革新材料・デバイスが、他の材料・デバイスに適用され、それがまた別のナノテクを発展させていくというスパイラル構造を持つことがこの分野の特徴でもある。

1.1.1 社会の要請、ビジョン

古代から、人類の文明はその時代に利用できる材料に強く影響を受けており、材料技術の発展が社会や人々の暮らしのあり方を決定してきたと言っても過言ではない。石器から金属器へ、木材からプラスチックへ、利用できる材料が変わることで、人々の暮らしも社会のあり方も大きく変遷してきた。21世紀に近づいてからは、それまで材料技術が担っていた文明の下支えとしての役割を、最先端のデバイス技術が、材料とともに担うようになった。ナノテクは、それまで人類が直接に見ることも制御することもできなかった微細なスケールの構造を操作することで、材料・デバイス技術の急速な発展を支え、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、現代社会の深い部分に影響を及ぼしている。

現在、私たちの身の回りは、先端材料やデバイスを利用した様々な素材や製品で取り囲まれている。それらは、あまりになじみ深いために、そこにどんな新しい技術が使われているのか、ほとんどわからない。パソ

コンやテレビやスマホなどのエレクトロニクス製品、保温性や抗菌性を有する衣類・繊維、照明機器の代名詞となった青色・白色LEDといった、目に見える製品から、枯渇が危惧される希少資源に頼らない環境にやさしい材料、患者への負担が少ない治療診断のための機器や素材、廃水を浄化するためのシステムを構成する材料、災害に強いインフラを構成する材料、色鮮やかで長持ちする染料・顔料、身の回りの様々な危険を察知するセンサーなどの、目に見えない形で私たちの暮らしを支えてくれる製品まで、ありとあらゆるところで材料・デバイスは人類・社会に関わっている。

一方で、このような深い関わりのため、ナノテク・材料分野の研究開発の方向性は、社会からの強い要請に応じていく必要がある。国際的、国内的な様々な要因が、本分野の進む方向に陰に陽に影響を及ぼし、各々の技術の性格を形作っていく。以下に、本分野に影響の大きな因子と、それに関係する技術群の例を述べていく。

(1) 人類全体の課題との関わり

2015年の国連サミットで決定されたSDGsの17の目標（Goal）は、2016年から2030年までの15年間で達成するとされており、本報告書の発行年は、その折り返し点を越えた年に当たる。SDGsの17目標自体は、直接的に科学技術に言及しているものではなく、国家や国際社会の中で、開発・発展とそれが将来にわたり持続的に行われていくために、堅持していかなければならない視点を表している。大気・海洋・河川・土壌・森林の持続性や、生態系・動植物の多様性確保、貧困の撲滅、農業・食糧生産の持続性、教育や医療への公平なアクセス、感染症対策、温暖化の影響にも関連する災害対応・防災など、これらはいずれも一国だけでは成し得ない目標であり、かつ、各種の規制を含む国際的な合意のもとで、初めて到達しうものである。しかし、制度や規制に基づく人々の行動変容だけでは、到達することが難しい目標、それを実現するためには新たな科学技術やイノベーションが必要になる目標もそこには含まれている。目標3の健康福祉、目標7のエネルギー、目標12の持続可能な消費・生産、目標13の気候変動対策などが、そうした例にあたり、現有の科学技術をうまく使うだけでは到達が難しい課題となっている。また、目標14、15の海陸の生物多様性の維持についても、今後の新興国発展のための開発と両立させるためには、既存テクノロジーを超えた技術革新が必要と考えられる。つまりは、国際社会の持続的な発展のためには、科学技術の発展が不可欠であり、その基盤を支えるこの分野への期待と担う責任は大きい。

SDGsの目標にも含まれているが、気候変動対策およびそれに極めて関連の深いエネルギー供給問題は特に重要な人類全体の課題である。2021年から2022年にかけて公開された、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）の第6次調査（Sixth Assessment Report¹⁾）のWorking Group I報告において、気候システム、気候変動に関する研究結果から、近年の気候変動が人為起源であることに「疑う余地はない（Unequivocal）」との表現がなされた。これは2013年の第5次調査報告書（AR5）の時の「可能性が極めて高い（extremely unlikely）」からさらに一歩進んだ表現である。気候変動への対応方針としては、大きく緩和と適応に分けられ、緩和が温暖化ガス（GHG：Green House Gas）の排出抑制、吸収・固定などを行うための技術や社会制度・仕組みなどを検討するもので、適応が気候変動による一次産業（農業、漁業…）への影響、生物相の変化による伝染病や疾患、豪雨・台風の多発による自然災害に対処する手段を検討するものとなる。

材料・デバイスの技術は、緩和に対しては、化石燃料代替のエネルギー利用手段（太陽電池、蓄電池）、省エネルギーを目指した各種デバイス・システム（パワー半導体、モーター用磁石・磁性体）、CO₂吸収や利用手段としての各種電気化学セルや分離膜などに、直接貢献を期待されている。また、適応に関しては、緩和の場合ほど露わではないものの、水資源確保のためのフィルタなどの技術、感染症対策や社会インフラ保

1 <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

全のための様々な改良にナノテクの応用や材料面からの改良に関わっている例も多く見られる。

2020年に瞬く間に世界中に広まり、長期にわたり社会を変容させただけでなく、その大方の終息後においても、拭い去ることのできない影響を世界に与えたCOVID-19の対策で最も大きな力を発揮したのが、mRNAワクチンであった。このワクチンは、バイオテクノロジーとナノテクの融合により生み出されたものであり、バイオテクノロジーにより人工合成された、コロナウイルスのスパイクタンパク質をコードしたmRNAを、ナノテクにより人工的に作成した球殻状の脂質ナノ粒子で包み、細胞に取り込まれやすいようその表面に処理を施した構造を持っている。通常、開発の開始から治験終了まで、最短でも4年はかかると言われていたワクチンが、世界的な緊急事態のために最優先で取り組まれた背景はあったにせよ、わずか8か月で治験にこぎつけ、承認されていった。この背景には、人工的に合成できるmRNAと脂質ナノ粒子の組み合わせでできているという製造上の利点も関係している。ナノテクが注目され始めた当初からナノテクの適用先としてのバイオ分野は重要な部分を占めてきたが、今回のmRNAワクチンの成功は、その好例といえる。

以上のように、人類全体に共通する課題の解決に、材料・デバイス技術とそれらを支えるナノテクの研究開発が大きな役割を果たした例が数多くみられる。もちろん、すべての課題が材料・デバイスのレイヤーで解決されるわけではなく、装置、システムから、それらの利用方法、社会システムの在り方に至るまで、解決が図られる問題も多く存在する。しかし、その解決方法が、根本の原理を変えてしまうほど劇的な進化である場合には、材料・デバイスにも革新が期待される場合が多い。

（2）国際情勢との関わり

VUCA（Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity）の時代と言われてから長い年月が経っている。元々は1990年代の冷戦終結によって、それまで明確であった戦略がまったく不透明になったことを指す米国の軍事用語であったが、それが2010年代になって変化が激しくなった世界情勢による経済戦略の不確定さを表すタームとして再利用された。その不確定さは歳を経るごとにさらに増大し、近年に至っては軍事・経済を含むあらゆる方面で、国際情勢は一寸先も見えないほどの変動を迎えている。

今日の大変動の目に見える原因としては、中国の台頭とそれに対する米国の対応による米中対立、COVID-19パンデミックによる世界的な混乱、ロシアのウクライナ侵攻によるエネルギー・資源・食料の供給不安などがあるが、これらによって、それまで信望されていたグローバリズムへの期待が揺らいだことの影響も大きい。グローバリズムの三規範（民主主義、市場原理、科学技術）の一つ、市場原理は、ある製品・サービスを、最も安く供給できる国から調達することで、世界全体の資本の利用効率が向上するとの考えが前提にある。これは、ものやサービスを、その生産に最も適した場所で生産することで、国際的な分業体制を普遍化し、全体としての繁栄を目指す考え方である。しかし、先に述べた一連の事象から、グローバルサプライチェーンへの不安、競争相手国依存への警戒が語られるようになり、自国第一主義や保護主義が議論されるようになった。こうした風潮は、国家安全保障や経済安全保障の旗のもとで、近年急速に進んでいる。ナノテク・材料分野に関連する影響としては、希少資源やエネルギーの競争相手国への依存を減らすこと、半導体、電池などに関する技術の海外依存の低減、量子やAI、先端情報技術の流出対策、といった様々な面に現れ始めている。

その端的な例としては、市場原理の元で、韓国や台湾のファウンドリが圧勝し、世界中がそこに依存するようになった先端半導体製造技術がある。5年ほど前には、最先端の半導体加工技術はそれらのファウンドリに任せ、それ以外の企業は設計に特化するモデルが最適と考えられ、国家レベルでもその選択を是としていた。しかし、近年の半導体供給不足などから、米国や日本は半導体先端技術の国内確保へ向け舵を切った他、欧州においても先端半導体技術の確保が叫ばれるようになっていく。適地生産による効率化という理想が、簡単に崩れることを目の当たりにした各国の方針転換の例である。この他、アジアの企業の寡占状態であった蓄電池や、日本が世界に先駆けて取り組んできた水素エネルギー関連技術へ、欧米が国策として大々的に取り組むなど、将来的にチョークポイントとなりうる技術の自国確保の動きが鮮明になっている。

（3）日本との関わり

良く知られているように、国土が狭く地下資源に恵まれない国であるにもかかわらず、日本が工業による近代化の道を歩むことができたのは、鉱石や原油などの工業原料を輸入し化成品、機械、などの製品に加工して輸出する加工貿易を行ってきたためである。アジア諸国の工業化の進展や日本企業の工場の海外移転を背景に、原材料輸入の割合が減り、半完成品を含む製品輸入の割合が増えている傾向はあるにせよ、自動車や化学薬品といった最終的な製品を輸出することで、国内で使われる燃料や食料の輸入を可能にしている構造は、日本の近代化が始まった明治以降変わっていないことは認識しておくべきである。実際、2020年の貿易統計では、輸出入額とも約70兆円²であるが、その輸出額の大部分を輸送機器、一般機械、電気機器、化学製品が占めている。日本は実態経済において、こうした工業製品を売ることで、国民の食料や燃料といった生活に必要な不可欠な物資を購入している。

しかし、輸出を担うこのような製品群やこれを製造する企業の国際的な競争力の総体的な低下の傾向が見え始めている。日本が得意としてきた、自動車に代表される擦り合わせ型の技術や、ノウハウの蓄積がものをいう化学製品・素材の分野でも、諸外国の急速なキャッチアップにより厳しい競争環境にある。こうした技術の競争力を支えてきたのは、材料やデバイス・プロセス技術、機械・製造装置等であり、その源泉にあるのが企業やアカデミアの研究開発である。成熟した産業のための基礎的な研究開発は、アカデミアの研究者にとって必ずしも花形の分野には見えず、現在の花形の研究テーマに集中するあまり、その他の分野の研究者やアカデミアの研究室の数が減っていたり、新規投資の減少から企業における基礎研究も低調化したりすることが、将来的にはさらなる競争力の低下と、産業の衰退にもつながる懸念がある。ひとたび学術的基盤が失われると、それを取り戻すことは容易でなく、衰退・消滅の危機にあるアカデミアの学術分野を精査し維持する検討も必要であろう。

（4）イノベーションの中のナノテク・材料

「ナノテクノロジー」の語が、世界に広く認知されてから20年以上が経過した。広く使われた言葉は、時に「古臭い」、「時代遅れ」といった印象を一部の人に与えることがある。しかし、実際には先端半導体をはじめとするエレクトロニクスを支えているのは、まさしくナノスケールの加工・観察評価の技術であり、電池や水素関連技術もナノスケールに制御された材料やデバイスが主役である。さらには、バイオテクノロジーの対象となる細胞内部の構造体のスケールは、ナノテクの格好の対象である。こうした意義から、現在でも、世界各国の国家戦略の極めて重要な部分をナノテク・材料は占めている。

近年、機械学習・AIによる大規模データの活用が世の中を変えるほどの影響を与え始めており注目が集まっているが、それを可能にしたのが、少なく見積もっても10年ごとに二桁向上する、ICT機器の性能向上である。また、今後さらに革新的な情報処理技術が生まれ普及していくためには、それを実行するICT機器と中心機能を担うデバイスの性能もまた継続的に向上が求められることになる。これからも進化を続け、その時々々の社会の要請に答える期待を担うのが、ナノテク・材料である。

1.1.2 科学技術の潮流・変遷

以下では、材料・デバイス技術の進化の歴史とナノテク登場の経緯、それらに対する日本の貢献を概観した後、現在の技術的潮流について示す。

2 例年は80兆円以上であるが、2020年はコロナ禍の影響で2割以上経済活動規模が縮小している。

（1）材料科学技術の進化

前項でも述べたように、利用できる材料が新たに生まれることにより、人々の生活様式も大きく進化・発展を遂げてきた。太古には、粘土を焼いてつくる土器の登場が、自然石に加工を施した石器の時代から、定住化し農耕を始める時代への変化を促し、農耕の大規模化と都市の巨大化から古代国家の成立には、農耕器具や武具としての金属器の発展が大きく寄与したと言われている。自然界に存在する「物質」から、人に役立つ「材料」を作り出すためには、物質に何らかの処理を加えて形や性質を変える必要がある。そうした処理に関する知識の集積が材料科学の起源である。そして、その処理は時を経るごとに複雑・精緻化し、得られる材料の可用性もどんどん向上していった。自然石に打撃を加えて剥片化する処理と、酸化物を還元して金属を得る処理では、その処理に求められる工程の種類や数、コントロールすべきパラメータに大きな違いがある。

どのような材料をどのような原料から作り、どの目的に使うのかに関しては、地域それぞれの地理的な特色にも影響される。例えば、古代ヒッタイト（現在のトルコ周辺）で生まれたとされる製鉄・製鋼技術は、ヒッタイトの滅亡とともに、ヨーロッパ、インド、中国に伝わり、朝鮮半島経由で弥生時代の日本にも伝わったが、具体的な製法や使用する原料はその土地ごとに特化していった。かつては、古代インドのるつぼ鋼であるウーツ鋼（ダマスカス鋼）や、日本のたたら製鉄による玉鋼など、その土地独自の製法・原料からそれぞれ特徴ある鋼が生産されていた。その後、18世紀以降近代製鉄が始まり、製鉄法が徐々に現在のような高炉法を中心とした間接製鉄に収束するまでは、製鉄技術の地域性がかなり存在していた。

近代製鉄が始まり、鉄鋼の大規模生産が始まるのと時を同じくして、欧州の産業革命が興った。蒸気機関を動力とする紡績・織布の生産性はそれまでの人力によるものから桁外れに増大し、近代化への道を作っていくことになるが、この蒸気機関の効率を向上させるために、高压化に耐える鋼鉄が不可欠であった。圧力容器としての鉄を使いこなせたことが産業革命を生み出した要因と言ってもよい。鉄鋼に関する技術革新は、近代になっても続き、強度や耐食性を著しく向上させた各種鋼の発明や、磁性材料としての鉄の機能・利用法が見出されてからの磁石材料、軟磁性材料の開発などにつながっている。

鉄鋼以外の材料科学の歴史も概観する。古代オリエントから中世ヨーロッパに伝わった物質に関する知識は錬金術を経て、試薬や実験技法の発展を生み、18世紀末（1774年）のラヴォアジエによる質量保存則の発見において、神秘主義的性格を剥ぎ取った化学の誕生を見る。ここに、数千年間蓄積された材料に関する知識・伝承は、系統的サイエンスとして見直され、現代につながる物質科学の体系ができ始めた。ラヴォアジエ以降、1803年ドルトンの倍数比例則、1811年にアボガドロの分子説により、ほぼ、現在の化学の基本となる原子・分子に関する概念が確立した。また、様々な天然の生体材料に錬金術時代に発見されていた酸やアルカリ処理を行うことで、様々な有機化合物が新規に発見されてきたが、これらの物質の構成が原子・分子で説明されたことから派生的な発見が容易になり、ますます多くの材料が発見されるようになった。世界初のプラスチックであるセルロイドは1856年に、最初の合成樹脂であるフェノール樹脂は1872年に発見されているが、それらが工業的に量産されるようになった20世紀に入ってから、新化学物質の発見はより加速していく。米国で石油化学工業が興った1920年代以降、生体材料を出発原料としない有機化学製品が安価に大量に出回るようになり、プラスチックを使った文明の新しい形が形成されてきた。

プラスチックの他に20世紀の化学がもたらした重要な化学物質にアンモニアがある。ドイツのフリッツ・ハーバーとカール・ボッシュが1906年に開発したハーバー・ボッシュ法は、鉄を触媒に水素と窒素を400-600℃、200-1000気圧の超臨界流体状態で直接反応させるもので、それまでは不可能と思われた空中窒素の固定に初めて成功した。得られたアンモニアは化学肥料の原料となり、食糧生産量を急増させることで、20世紀以降の人口爆発を支えている。

古くから陶磁器として使われてきた焼き物を改良して、様々な機能を発現するようにしたファインセラミクスや、都市や道路などの構造材料としてのセメント、鉄が使えない様々な環境に使われる非鉄金属ベースの合金や金属間化合物などの様々な無機材料も19世紀終盤以降に、次々と発明され工業化されていった。

さらに、1920年代を過ぎると、物質の究極的理論としての量子力学が誕生してくる。量子力学はそれまで、

経験則として知られていた化学の知識に、より根本的な原理からの統一的な説明を与えるとともに、新現象の予測や物性の起源の理解を可能にした。これらの知見は、次に述べるナノテクの基盤となっていった。

(2) ナノテクの登場と進化

人類の歴史と同じ長さで語られる材料の進化の中で、人類はその原因を知らないままで物質のナノスケールにおける構造の変化を利用してきた。人類が物質のナノ構造を積極的にコントロールし始めたのは、量子力学が誕生し、石油化学工業、繊維、鉄鋼・非鉄金属工業、窯業、セメント工業などが飛躍的に発展した20世紀の終盤になってからである。この時期をもってナノテクが誕生したと言っても良いだろう。

ナノテクにはいくつもの応用領域があり、それぞれに異なった特性や歴史を持つ。まずは、他のナノテク領域を支える役目も果たしているエレクトロニクス応用分野における歴史を述べる。19世紀末に学問として認知された電気工学から、電子工学が分かれ、その工業的利用が始まったのは20世紀に入ってからである。初期の電子工学は通信工学とほぼ同義であり、無線電信技術の発明、ラジオの発明、真空管などの非線形素子と増幅回路の発明へと続いていく。ナノテクへの足掛かりは、増幅回路に使われていた二極管や三極管と同様な機能を持つ固体素子であるダイオードやトランジスタの発明にある。1947年のBardeen, Brattain, Shockleyらによるトランジスタの発明は、量子力学の固体物性物理への本格的な応用の始まりでもあったが、エレクトロニクス分野にとっては、機器の小型化を通じた可用性の拡大という実利的意味を持った。真空管を使った機器を小型化することは、それ自体が新たな市場や用途を生むことになり、それによる産業の広がりが期待されたのである。半導体産業は、その始まりの時点から「小型化する価値」を進化の原動力としてきたといってもよく、その後の集積回路時代の高集積化のDNAへとつながる素地を見ることができる。

このような先端技術の流れの中で、後のナノテクの興隆を予見した言葉として、ノーベル物理学賞を受賞した米国のFeynmanのコメントがよく引用される。“There’s a plenty of room at the bottom”。1959年、米国物理学会の講演で原子分子レベルの現象を扱う科学技術の可能性を予見したものである。当時は、それほど大きな反響を呼んだとは言えず、実際にそれを行おうとしたものもいなかったが、1990年代になって改めて注目されたことで、ファインマンは、ナノテクの最初の提唱者としての地位を得ることになった。ファインマンの言葉の3年後の1962年には、久保亮五（東京大学）が、金属微粒子における量子サイズ効果を理論的に計算し、ナノサイズになると通常のバルク材料とは異なる性質が現れることを示している。これは、ナノスケール効果の最初の具体的理論予測といえる。また、トンネルダイオードでノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈の半導体超格子の提案と実験（当時、米国IBM 研究所、1969年）はナノスケール効果の具体的な実証である。単語としての「ナノテクノロジー」を最初に提唱したのも日本人で、1974年の生産技術国際会議において、東京理科大学の谷口紀男が初めて技術の概念提唱を行っている。もっとも、これは機械加工の最小寸法が年々縮小している事実から、「2000年にはこれがナノメートルスケールに到達する」という意味であり、現在からするとかなり限定された意味になる。

トランジスタ以来の小型化のDNAを持つ半導体デバイスは、1960年代に入ると、モノリシック集積された集積回路（IC：Integrated Circuit）の時代を迎える。1960年代にごくわずかなトランジスタを同一基板上に集積することから始まったICは、1970年代の電卓戦争の具体的な需要の元で集積度がどんどん向上していき、大規模集積回路（LSI：Large Scale Integration）、80年代入っての超大規模集積回路（VLSI：Very Large-Scale Integration）と進化していく。90年代に入り、同一基板上のトランジスタ数が1000万を超えた ULSI（Ultra Large-Scale Integration）以降は、新しい呼称がつけられることはなくなったものの、集積化はその後さらに続いていった。2020年の時点で7 nm 世代技術によるトランジスタの集積数は100 億個に到達している。

有名なムーアの法則はチップ当たりのトランジスタの数が一定期間（1.5年が標準的）ごとに2倍になるというものであり、デナードのスケールリング則は、チップ上のトランジスタ密度が倍加しても、消費する電力密度が不変であることを述べたものである。この両者を組み合わせたものがクーメイの法則で、電力当たりの計

算量がムーア則と同じレートで増加することが示されている。1.5年ごとに計算能力が2倍になるならば、10年ごとに計算機の性能が約100倍に向上することになるが、実際、この指数関数的性能強化は、世界最初のコンピュータの誕生（～1950年）から70年間、ほぼキープされており³、70年間で100兆倍電力効率と計算能力が向上している。

半導体の高集積化を実現可能としてきたのは、洗浄、成膜、リソグラフィ、エッチング、熱処理といった半導体製造・加工技術と、それに用いられる各種化学物質の進化であることは言うまでもないが、製造技術以外の周辺技術がこれと歩調を合わせて進歩してきたことも極めて重要な意味を持っている。1980年代以降の様々な分析評価技術の進化は、微細化する半導体チップを評価するための、より高レベル・高難度の要求に応えるためになされてきた。LSIの世代が進み素子が微細化するとともに、それ以前には許されていた構造上の欠陥や不純物がデバイス性能に支障を与えるようになる。それを排除したプロセスを開発するためには、そのような微小な欠陥や極微量の不純物を観察・検出する必要があるが出てくる。この要求に沿うために、微細なデバイス構造を観察するための、走査型電子顕微鏡（SEM：Secondary Electron Microscope）や透過型電子顕微鏡（TEM：Transmission Electron Microscope）などの観察装置、組成や微量不純物などの分析のためのX線光電子分光（XPS：X-ray photoelectron spectroscopy）や二次イオン質量分析（SIMS：Secondary Ion Mass Spectrometry）装置などの分析装置の性能は向上し続けなければならなかった。また、これら以外にも光学特性、電気特性を調べる様々な、分析装置・評価装置も世代ごとに厳しくなる要求に応えるべく、徐々に高精度化を果たしていった⁴。

こうして、半導体製造産業からの段々と高度化する要求に応えていくことで、その周辺の装置・材料技術も高度化していった。現在の日本では、半導体製造産業がかつての輝きを失っているが、半導体製造・評価装置や、製造に必要な素材の産業は、いまだに、世界の先端半導体製造を支えている。

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

同じく2000年頃から、生命科学分野でも技術の大きな躍進が見られる。きっかけはヒトゲノムの解読技術や遺伝子組み換え技術に代表されるバイオテクノロジーである。ここで使われた次世代シーケンサーは、人力で一つ一つヌクレオチドを読み取っていたのとは桁違いの速度でDNA配列を決定することができるが、これもナノテクの成果である情報処理デバイスや光デバイスの進化が大きな役割を果たしている。このようにナノテクは相互に利用し合いながら、お互いにより高度な技術となっていく性質がある。また、半導体産業で培われた評価技術の転用が可能になったことで、生命科学の躍進に伴って多くの情報科学者やナノテク・材料研究者が生命科学・バイオテクノロジーとの境界領域の研究開発に参入した。その後の進歩は著しく、ES細胞研究やiPS細胞の創出を始め、ゲノム編集のような新技術の獲得が次々と起こっている。

物質科学をベースに発展してきた分子・原子レベルの計測技術、シミュレーション技術、データ科学、ナノスケール微細加工や物質合成技術といったナノテクが強力なツールとして機能することで、今後も速やかに、生命科学における知の蓄積が、医療・診断・健康といった社会・産業技術として開花するものと期待される。

3 厳密には、最初のコンピュータENIACは真空管を使っていたため、クーメイの法則に従う理由はない。しかし、初期のICベースのコンピュータを基準としても、クーメイの法則はかなり正確に成り立っている。

4 加工・評価装置の高度化には、それらの制御に使われている半導体が高性能化してきたことも大きな要因となっている。半導体産業はその製品の高度化が製造技術の高度化を生み、ますます製品が高度化していくという正のスパイラル性を持っている。

事実、遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物等から得られる生体情報を数値化・定量化するための技術やデバイス・装置のほとんどが、ナノテクや材料技術の寄与なくしては実現不可能なものである。ナノ粒子をキャリアとした薬物送達システム（ナノDDS）は、疾患部位へ効率的に薬物を到達させ、薬効を制御するとともに副作用の低減を可能にした。温度感受性ポリマーは細胞培養基材に応用され、生体に移植可能なシート状の細胞集合体形成を可能としている。

ここまでナノテクを取り巻く環境の歴史を述べた。現在の科学技術の中では、ナノテクに全く無関係なものを探す方が難しいほどに、すべての分野の底流にナノテクは使われている。今後も新しい技術が登場したり、新しい社会課題が生じたりする時には、その実現のために、新たなナノテクが必要となるだろう。

(3) 材料・デバイス技術への日本の貢献

近代科学を用いた産業への日本の本格参入は、明治政府が殖産興業のスローガンの元、機械制工業、鉄道網整備、資本主義の確立を目指した時に始まる。欧米から技術者を招き、最新技術を導入した官営工場を各地に建築するとともに、ヨーロッパに留学生を派遣し先進の科学技術の導入に努めた。また、明治19年以降には、帝国大学を各地に建設し、国内での先進科学教育にも力を入れた。こうした努力の結果、国内の大学・企業からも、世界の材料科学への貢献が現れるようになってきた。

1917年に東北帝国大学の本多光太郎が、当時の高性能磁石タングステン鋼の3倍の保磁力を持つKS鋼を発明した。第一次大戦中による海外からの磁石鋼の輸入途絶に対策するための研究成果であった。また、「本多スクール」とも呼ばれた本多光太郎の教え子である茅誠司、増本量らや、さらにそこに師事した多くの研究者たちが、世界における日本の磁性学の確固たる地位を築いた。また、現在においても、最強の磁石として知られているNd-Fe-B系磁石（ネオジム磁石）は、1984年に当時住友特殊金属（現：プロテリアル）の佐川真人により発明された。発明から三十年以上たっても、飽和磁束密度・保磁力においてネオジム磁石を超える物質は見つかっていない。高温での保磁力低下を防ぐ改良、希少添加金属の使用量を抑える改良などが加えられながら、現在でも、自動車用モーター、風力発電用発電機などの、性能が最も重視される用途に使われ続けている。その生産量は年々増加を続け、焼結製品だけでも世界で年産13万トンに達している。

1968年に東京大学の本多健一と藤嶋昭により発見された、酸化チタンによる水の直接光分解（ホンダーフジシマ効果）は、その後の、光電気化学研究の扉を開いた。太陽光照射だけで、水を酸素と水素に分けることのできるこの現象の発見は、この直後に起こるオイルショックの際の代替エネルギー源としても大きな期待を集めた。酸化チタンのエネルギー源としての応用は実用には供されなかったが、現在も、人工光合成の研究として後継の研究が続けられ、日本は世界をリードしている。光電気化学効果は、その後、橋本和仁らにより、光触媒効果、抗菌効果、セルフクリーニング効果などへの応用が開拓され、1000億円級の産業を生み出している。

1980年にOxford大学の固体物理の大家J. B. Goodenoughと東京大学助手の水島公一により、リチウムイオンの可逆的出し入れが可能な遷移金属酸化物を電池の正極に使用する電池が提案された。1980年代には、旭化成の吉野彰により、Goodenoughらの考案した酸化物正極に、負極材料としてリチウムイオンをインターカレーション（原子層間への取り込み）する炭素（黒鉛）を組み合わせた、現在のリチウムイオン電池（LIB）の原型にあたる基本構造が考案され、1986年に実用的なプロトタイプが完成した。LIBは、1991年にハンディビデオカメラに搭載されることで実用化され、その後ノートパソコンや携帯電話のようなモバイル機器に広く使用できるようになった。スマートフォンなどの今日の携帯機器の利便性は、LIBなしにはあり得ない。その後、LIBの大型化にむけた開発も進められ、電気自動車の蓄電池や非常用電源としても実用化が加速している。LIBを開発した一人として吉野彰は2019年にノーベル化学賞を受賞した。ノーベル賞受賞理由において「人類に最大の恩恵を与えた」として高く評価されるに至った。

1986年には、名古屋大学の赤崎勇と天野浩により窒化ガリウムの高品質な単結晶膜形成等の研究成果が生まれ、1993年に日亜化学工業の中村修二らによりInGaN（窒化インジウムガリウム）を用いた高輝度の

青色LEDが開発された。その後1996年には、量子井戸構造を用いた青色LED および青色レーザーが世界で初めて実用化された。この青色LEDの出現により、蛍光体と組み合わせでの白色LEDが実用化された。白色LEDの実現により、液晶ディスプレイのバックライト光源、高効率な一般照明、車載ヘッドランプなどが世界的に普及していく。高輝度で省エネルギーの白色光源を可能とする青色LEDの発明に対して、赤崎・天野・中村の三氏は2014年にノーベル物理学賞を受賞した。さらに今、コロナ禍において屋内のウイルスを不活化する紫外線LEDランプに展開し、ウイルス防護・対策の手段として普及・拡大が期待されている。

1995年に、ハードディスクに高密度記録された情報を、高速に読み取る磁気ヘッドに用いるための、トンネル磁気抵抗素子（トンネル障壁材料は AlOx ）が、東北大学の宮崎照宣らによって開発された。トンネル磁気抵抗素子は、それまでの磁性金属薄膜を用いた磁気抵抗素子よりも高い磁気抵抗比が期待されることから、磁気ヘッドへの応用が検討されていた。その後、2004年に産業技術総合研究所の湯浅新治らにより、トンネル磁気抵抗素子のトンネル障壁材料を酸化マグネシウムにすることにより、高集積化の鍵を握る磁気抵抗比の大幅向上を達成した。2007年に実用化され、現在の大容量ハードディスクの磁気ヘッドとして世界中で使用されている。

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

ナノスケールの特徴的な構造を持つナノカーボン材料においても日本の貢献は大きい。最初のブームを巻き起こしたナノカーボンであるフラーレン（ C_{60} ）は、1984年にクロトー（英）、スモーリー（米）、カール（米）によって発見された。炭素の6員環と5員環からなるサッカーボール構造が、アメリカの建築家バックミンスター・フラーが線分の集まりで構築したジオデシックドームなどの構造と似ているところからその名がつけられたが、実は、クロトーらの発見に先立つ1970年には、北海道大学の大澤映二がその構造モデルを発表している。同じく、代表的なナノカーボン材料であるカーボンナノチューブ（CNT）は、1991年、NECの飯島澄男がフラーレンを製造した放電装置の電極の中から発見し、それが炭素6員環ネットワークが閉じた筒状になった構造モデルであることを見出している。1970年代から炭素繊維を研究していた信州大学の遠藤守信は、その後、気相法によるCNTの成長技術を開発し、量産化技術へと発展させた。このように日本が主導してきたナノカーボン材料は、2004年に登場した炭素の二次元原子層であるグラフェンへと発展し、特異な電気的、機械的、化学的性質を有することから、電子デバイス、スーパーキャパシタ、ディスプレイ、強靱な複合材料、医療・バイオ応用などの工学的応用への期待が高まっている。日本が世界市場の過半を有する複合材料の代表である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、長年の研究開発の末、炭素繊維の欠陥構造をナノレベルで制御する技術開発によって、航空機や自動車への採用が進むに至っている。

図1.1.2-1に、日本が誇る材料・デバイス研究による社会的・経済的なインパクトの主要な事例をまとめ示す。



図 1.1.2-1 日本が誇るナノテク・材料研究による社会的・経済的なインパクト

（4）現在の技術潮流

① テクノロジーを牽引する ICT 技術

1988年から国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductors：ITRS）が発行されるようになり、半導体テクノロジーのロードマップが公開されてきた。これにより、半導体の製造・評価に関わる企業が、「いつまでにどのような製品が必要になるのか」の目安を得ることができるようになり、それぞれの企業の中で技術開発スケジュールを立てやすくなった。ムーアの法則のトレンドがこれほど長く持続できたのは、業界全体でのスケジュール意識を一致させるロードマップ公開の効果が大きい。ITRSの機能は2017年以降、IRDS（International Roadmap for Devices and Systems）に受け継がれ、半導体デバイスだけでなく、その応用先であるシステムにまでその対象を広げている。現時点では2022年度版が、一部の章を除いて公開されており、CMOSロジック/メモリのデバイス構造・アーキテクチャの現状とトレンドが示されている。また、次世代AIデバイス、脳型コンピュータへの応用、それらを実現するデバイス新構造や新材料などが取り上げられている。さらに、極低温動作の量子コンピュータに向けた超伝導デバイスやクライオCMOSといった低温デバイスに関しても章が設けられており、現状・課題から将来の方向性までが記載されている。

回路寸法の微細化だけではムーア則の維持が難しくなった2000年代以降は、若干の微細化を行いながら、同時に回路配置や構造を変更することにより、ムーア則のトレンドを維持してきた。しかし、2 nm以降の世代に関しては、そのような手法を使っても、面内のサイズ縮小によるスケールアップの維持は難しくなると考えられており、シリコンナノシートやナノワイヤを用いたGate All Around（GAA）構造を構成単位として、それを積層した3次元構造にならざるを得ないと考えられている。この3次元構造は、異なるチップに作られた回路を物理的に重ねたこれまでの3次元LSIとは異なり、CMOSプロセスの中で3次元的なチャネル構造を作成するという新しいフェーズに入ることを意味する。また、2 nm世代を幾つか超えた時点で、チャネル材料としてのSiの限界が来ることも予想されており、チャネル材として遷移金属カルコゲナイドのような二次元物質を用いる検討も世界中で開始されている。

単独チップの微細化による高性能化を行うのではなく、異種機能チップを単一パッケージの中に搭載するこ

とで、LSIとしての機能を向上させていく方向も盛んに検討されている。2000年代から、単一のシリコン片（ダイ）上に、すべての機能を構築するSoC（System on a Chip）に対して、機能ごとに異なるダイに作られたチップ群を、接続基板（インターポーザ）を介して接続し、同一パッケージ内に収めるSiP（System in Package）という手法が存在したが、最近の動きは、このSiPの考え方をさらに進化させたものと言える。インテル、AMDなどの10社が発表した半導体のダイ間の相互接続のためのオープン規格「Universal Chiplet Interconnect Express」（UCIe）に参加する企業は、Advanced Semiconductor Engineering、AMD、Arm、Google Cloud、インテル、メタ、マイクロソフト、クアルコム、サムスン、TSMCなど10社で、半導体大手、ファウンドリ企業、パッケージング、IPサプライヤー、クラウドプロバイダーなどが参加している。また、組み合わせるチップとしてプロセッサ、メモリといったデジタルチップだけでなく、高周波回路、通信回路、光ICなどを組み合わせることも積極的に検討されている。

②ヘルスケア・医療を支えるナノテク・材料

先進国を中心に高齢化が進む中、健康で安心と快適さと幸せを実感できるWell-Beingな社会の実現のために、健康寿命の延伸や健康格差の縮小などが求められている。医療の高度化のためには、生体及びその構成成分と相互作用し、所望の機能を発揮する機能性材料の創出が極めて重要とされており、この分野がナノテク・材料が貢献する重要な領域となっている。適切な物理化学的性質・耐久性を有し、生体への副作用リスクが十分に低いこと、そして生体環境において異物認識されずに調和できる「生体適合性」が、医療・ヘルスケアに応用される人工生体組織・機能性バイオ材料には求められる。

mRNAワクチンに見られたように、人工的に微小なシステムを構築し、生体環境での挙動や作用を制御しようとするテクノロジーは、精緻な分子・システムの設計技術、さらにはシステム-生体間相互作用の高度な理解に基づくものである。これは、生命機能の再現や拡張的機能の創出を可能にし、また生体機能の制御によって革新的な医療技術の確立に貢献する。現在は、COVID-19 mRNAワクチンの成功を受け、mRNAとナノ医薬のデザインに関する研究開発が国際的に活性化している他、DNAワクチンや脂質ナノ粒子の安全性と標的指向性を改善する研究も注力されている。また、ナノ医薬の生体適合性を改善するために、現在広く利用されているが分解性に課題があるポリエチレングリコール（PEG）の代替材料などが検討されている。

生命現象解明などの基礎研究や、医療・ヘルスケアにおける診断、さらには感染症予防におけるキーテクノロジーであるバイオセンシング技術の分野にも、ナノテク・材料の技術が貢献している。ヒトゲノム計画を成功させた立役者である次世代シーケンサーは、一研究室が運用できるほどに低価格化した。2009年には、1細胞レベルでのmRNAの網羅的解析（トランスクリプトーム解析）が実践され、最近ではマイクロ流路技術と組み合わせることで多細胞のトランスクリプトーム解析を全自動で行う装置まで開発されている。半導体加工技術（MEMS：Microelectromechanical System）をベースとして、数cm角の基板上に微細な流路や構造物を加工し、様々な流体操作・化学操作を集積させた「マイクロチップ」を利用したLab-on-a-Chip、あるいはMicro-Total-Analysis-Systems（ μ TAS）と呼ばれる技術が近年注目を集めている。また、集積ナノポア構造を応用した新規一分子計測技術なども登場している。

この他、生体を構成する物質の空間分布とその時間変化、並びに物質間の相互作用を観察する生体イメージング分野も大きく進展しており、生命現象の理解や疾病の診断において不可欠な役割を果たしている。ダイヤモンドNVを利用した各種物理量のイメージングや光の回折限界以下の分解能で観察を行う超解像イメージング技術などの開発が進んでいる。また、こうしたイメージング技術の発展には、AIを用いた画像解析技術が大いに貢献している。

③カーボンニュートラルへの貢献の期待

気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の第6次評価報告書（AR6：Sixth Assessment Report）のWorking Group 1：The Physical Science Basisには、

「大気、海洋、大地を温暖化させているのが、人間の影響であることは、疑う余地はない (Unequivocal)。大気、海洋、極域、生物圏の広い範囲にわたって、急激な変化が起こっている。」という、かつてないほど強い表現が用いられている。温暖化の起源である二酸化炭素などの温室効果ガス排出抑制、いわゆるカーボンニュートラル化は、人類全体にとって、可及的速やかに実現しなければならない課題となっている。

CO₂排出を抑えることのできる、エネルギー源を考える際に3E+S、すなわち、経済性 (Economic efficiency)、安定供給 (Energy Security)、環境 (Environment)、安全性 (Safety) の4要素をバランスよく満たす必要があることはよく知られている。しかし、これらのどの要素をどの程度満たせばよいかについては、時代や立場による幅があるのも事実である。地球環境問題が深刻化し、人類の影響の大きさが認識されていくにつれ、経済性のある程度犠牲にしてでも環境性能を高めようとする先進国の立場と、これから発展していくためにある程度の環境負荷を認め経済効率を優先したい途上国の立場の間に軋轢が生じ、国際的な合意形成を難しくしている。

どのような立場にとっても満足できる解決策が得られないのは、環境への悪影響を下げつつもエネルギーを十分に供給するための技術が現時点では存在しないためである。環境・エネルギーに関する革新技術が未だ求められ続けている。

太陽光/熱、風力、水力などをその源とする再生可能エネルギーは、ひとたびプラントを建設してしまうと、CO₂を排出することなくエネルギーを産生し続けるため、カーボンニュートラル化の切り札となりうる。しかし、これらのエネルギーが集めやすい場所と、エネルギーが多く利用される場所が地理的に離れていることや、電力が多く生み出される時間帯と、大量に消費される時間帯が異なっていること、すなわち空間的にも時間的にもミスマッチが大きいことが、再生可能エネルギー大量導入の大きな障壁になっている。また、再生可能エネルギーが基本的に電力としてしか取り出せないことから、大部分を化石燃料に頼っているモビリティ (自動車、船、航空機) の動力源を始めとした、現在電力が主としては使われていない用途に関しても電化を進めていく必要がある。これらの再生エネルギーの導入を進めていくために強く求められているのが、蓄電池、水電解装置、燃料電池、アンモニアや有機ハイドライドなどのエネルギーキャリアといった、電力の貯蔵、輸送、電力と化学エネルギーの相互変換のための材料・デバイス・機器である。これらには、ナノテク・材料分野の技術が広く関係している上、今後の再生可能エネルギー大量導入に際しては、さらに多くのブレークスルーが求められている。また、パワー半導体、風力発電機や自動車用モーターなどに用いられる強力磁石や軟磁性体などの性能向上も大電力を効率的に利用するために欠くことのできないパーツであり、それらの研究開発も精力的に続けられている。

環境面では、大気や土壤汚染、河川・海洋汚染の改善・防止技術、そして建築物を含む社会インフラの持続性が求められる。物質・材料・デバイスを、原料段階から、製造・加工、使用・消費、廃棄に至るまでトータルで考え、最適な循環を、科学技術と社会制度・法規制の変革によって、いかに実現させるかが、長期的な最重要課題となる。2009年に発表された「地球の境界 (プラネタリー・バウンダリー)」に関する論文では、「その境界内であれば、人類は将来世代に向けて発展と繁栄を続けられるが、境界 (閾値) を越えると、急激な、あるいは取り返しのつかない環境変化が生じる可能性がある」因子が論じられた。それによると気候変動の他に、窒素やリンの循環、生物多様性の損失がすでにバウンダリーを越えているとされている。人類が用いている物質の、構成元素のレベルでの再利用プロセスを実現することが究極の目標といえる。このため、希少資源の低エネルギーな抽出・分離や、採掘・精錬時の環境影響の解決 (不要物質や汚染物質を出さない技術)、代替技術、バイオマスの高効率生産、新素材として注目されるセルロースナノファイバーなどを用いることによる、石化製品の代替が期待されている。

1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図）

ナノテクノロジー・材料分野は、物質そのもの、および物質と環境の相互作用を記述する様々な基礎科学群（物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学等）をその土台に置いている。これらの土台の上に、作製・合成、評価・分析、解析・設計を行うための基盤技術が構築され、その技術を用いて具体的な物質・機能の設計・制御が実現される。そしてデザインされた物質・機能をデバイス・部素材に適用し、最終的に環境、エネルギー、バイオ・医療、情報通信（ICT）・エレクトロニクス・社会インフラなどの諸分野に対し、横断的に革新をもたらすイノベーションの源泉として機能する。

この特徴を踏まえて本分野の全体像や範囲を構造的に表したものが、図1.1.3-1 に示した研究開発俯瞰図である。俯瞰図は以下に述べる8つの区分で構成している。

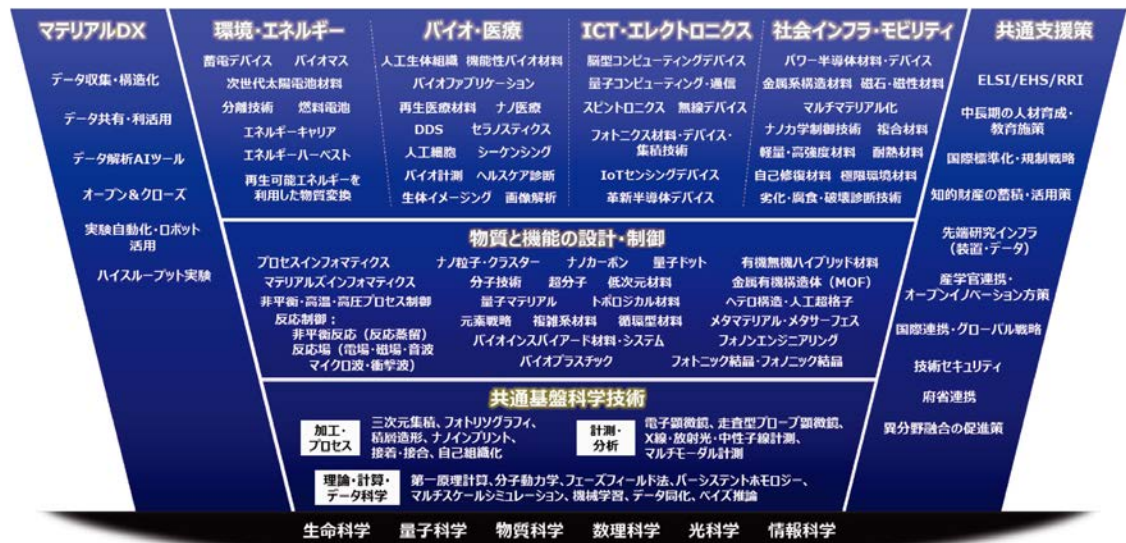


図1.1.3-1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図

科学の土台の上には、弛まず進展してきた微細加工技術や、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・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」がある。そうした基盤技術を利用することで、マテリアルズ・インフォマティクスやフォノンエンジニアリングなどの語に代表される、「物質と機能の設計・制御」区分を置いている。

これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築され、それら多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、「環境・エネルギー分野」、「バイオ・医療分野」、「ICT・エレクトロニクス分野」、「社会インフラ・モビリティ分野」の各区分に貢献する。個々の部素材・デバイスの中には、複数の分野で役割を果たすものも多く存在するが、ここでは代表分野の区分に集約して記載している。

また、科学技術が市場あるいは社会に浸透するかどうかを判断する際には、倫理的受容性・持続可能性・社会的な望ましさといった観点からの検討も必要となり、ELSI（倫理的・法的・社会的課題）、EHS（環境・健康・安全）、RRI（責任ある研究・イノベーション）の観点から、自然科学分野のみならず広く人文社会科学分野との対話や協調・協働も必要となる。さらに、研究・技術開発を進める上で重要となる、人材育成策、知財・標準化戦略、融合・連携の促進策や研究開発インフラの整備など、すべての区分・階層に跨る共通課題を、俯瞰図右側に「共通支援策」の区分としてまとめて記述してある。例えば、ナノ物質においては同一

分子式・重量であっても、形状や表面状態などにより機能活性や有害性が変化するため、健康・環境への影響やリスク評価・管理が重要であり、近年国際的にもナノテクノロジーのELSI/EHS/RRIが課題として取り扱われている。また、ナノテクノロジー・材料分野の重要な動きとしての「マテリアルDX」も、階層を跨りすべての区分に関係するため、図の左側に区分として設け、各技術要素を挙げている。

ナノテクノロジー・材料分野は、俯瞰図に示す階層を形成しながら、社会における広範な分野のニーズに関係していることが見て取れるだろう。本報告書では、俯瞰図の7つの区分⁵に関して国内外の研究開発動向、マクロ環境などを総合的に把握したうえで、ナノテクノロジー・材料分野において特に注視すべき研究開発領域として、29領域を抽出した（図1.1.3-2）。その際の基準は、（1）その技術が科学の新しい潮流に基づく（エマージング性）、（2）その技術が社会や経済に与える影響の大きさ（社会・経済インパクト）、（3）日本が強い技術を持っており継続的に注視する必要がある（定点観測）の3つに基づいて抽出した。これら個々の領域の研究動向や方向性、国際比較について第2章に記載している。

俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	蓄電池	物質と機能の設計・制御	分子技術
	分離技術		次世代元素戦略
	次世代太陽電池		データ駆動型物質・材料開発
	電解・燃料電池		フォノンエンジニアリング
バイオ・医療応用	人工生体組織・機能性バイオ材料		量子マテリアル
	生体関連ナノ・分子システム		有機無機ハイブリッド材料
	バイオセンシング	共通基盤科学技術	微細加工・三次元集積
	生体イメージング		ナノ・オペランド計測
ICT・エレクトロニクス応用	革新半導体デバイス		物質・材料シミュレーション
	脳型コンピューティングデバイス	共通支援策	ナノテク・新奇マテリアルのELSI/RRI/国際標準
	フォトニクス材料・デバイス・集積技術		
	IoTセンシングデバイス		
	量子コンピューティング・通信		
	スピントロニクス		
社会インフラ・モビリティ応用	金属系構造材料		
	複合材料		
	ナノ力学制御技術		
	パワー半導体材料・デバイス		
	磁石・磁性材料		

図 1.1.3-2 主要研究開発領域

5 マテリアルDX区分の内容は、「物質と機能の設計・制御区分」の「データ駆動型物質・材料開発、実験DX」のほうにまとめているため、ここでは7区分となる。