

The Beyond Disciplines Collection

# Beyond Disciplines

～ CRDS が着目する研究開発の潮流 2024 ～

# 序文

JST 研究開発戦略センター（CRDS）は、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向およびそれらに関する政策動向を把握・俯瞰・分析することにより、科学技術イノベーション政策や研究開発戦略を提言し、その実現に向けた取り組みを行っている。本報告書は、その活動で見えてきた研究開発の動向の中から、2023 年末時点の状況を加味して注目すべき項目を抽出したものである。取り上げたトピックには、ここ数年で急速にスポットライトが当たってきたトレンドもあれば、10 年程前から CRDS が注目してきた動向がより重要性を増しているものもある。どんな研究テーマにどんなブレイクスルーがあり、それによって世界がどう変わろうとしているのか。研究開発を駆動する社会からの要請にはどんな変化が見て取れるのか。個々の詳細は研究開発の俯瞰報告書や戦略プロポーザルなど当センターの各発行物を参照いただくこととし、本報告書では今日の研究開発の大局的な変化を「潮流」として捉え、そのラフスケッチを描くことを意図した（図1）。

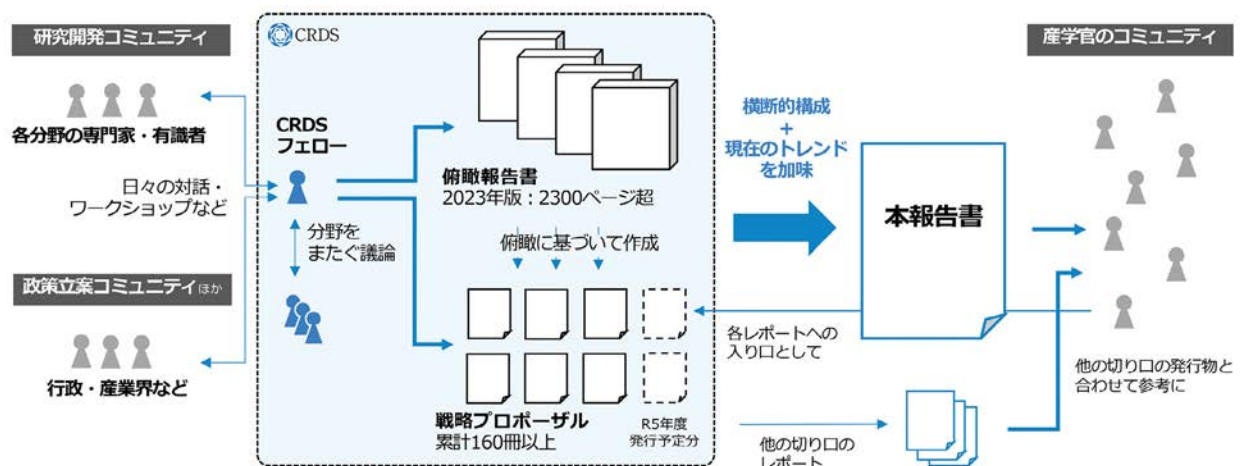


図1 CRDSの活動と本報告書の位置づけ

## 報告書の構成

構成は以下のとおりである（図2）。はじめの2章では、今日の研究開発を牽引する社会からの要請を概観する。**第1章**では、研究開発が持続可能な社会への移行（トランジション）という大きな目的に駆動されていること、**第2章**では、それとともに不確実性を増す世界への備えや対処、技術のガバナンスが求められていることを見ていく。

こうした社会からの要請とともに、新たな発見や発明といったシーズを駆動力としながら科学と技術は高度に進歩してきた。**第3章**では生命科学と医療、**第4章**では材料科学と製造技術における動向を概観する。

研究開発によって生み出される新しい技術は、社会を変えるとともに研究開発自体のありようにも変革をもたらしている。**第5章**では、機械による様々な人的作業の自動化を目指すAI・ロボティクス技術によって科学そのものが変貌を遂げつつあることを見る。**第6章**では、近年の多くの技術的革新の前提条件となるコンピューティング（計算）に焦点を当て、その革新を目指す研究開発の動向を概観する。

研究開発を方向づける社会的な期待や、その中で実現してきた技術の進化、また研究開発の方法論やインフラにおける進歩と同じく重要なトレンドとして、最後の**第7章**では、イノベーションの生み出し方に見られる変化に着目する。

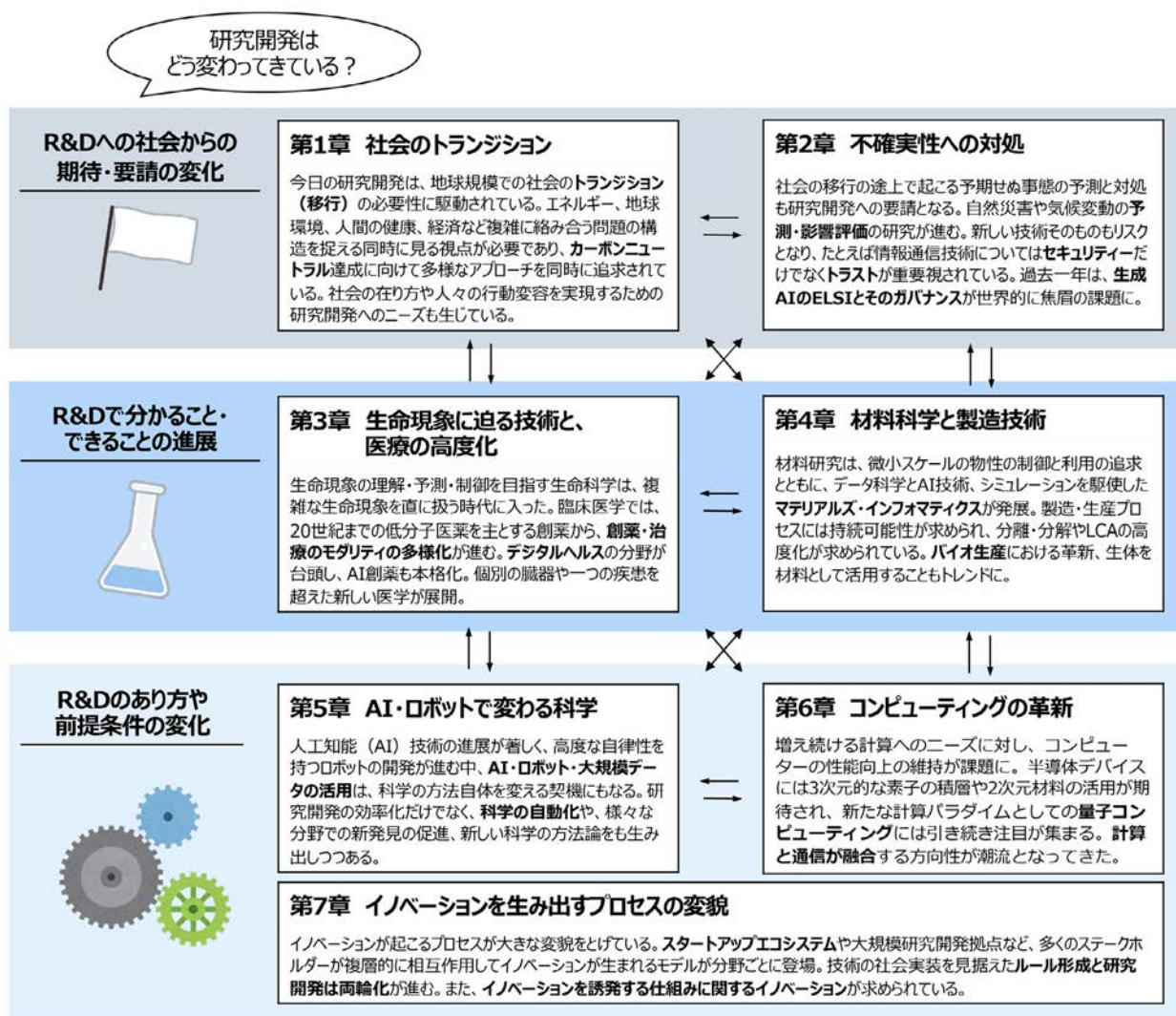


図2 本報告書の見取り図

CRDSでは、2018年に報告書「Beyond Disciplines – JST/CRDSが注目する12の異分野融合領域・横断テーマ」を発行した。当時、世界的に注目されていた「異分野融合型研究」を切り口に、具体的な注目研究テーマ例を示すとともに、融合を推進する研究システム・プラットフォーム、国内外の制度・プログラム事例を紹介したものである。本報告書では、異分野融合の考え方が当時に比べ広まってきた状況を踏まえ、あえて「異分野融合」を掲げてはいないが、CRDSの俯瞰的視野をコンパクトにまとめた発行物という意味では、同報告書の2024年版と位置付けることもできる。

■ CRDS-FY2018-RR-02「Beyond Disciplines」JST/CRDSが注目する12の異分野融合領域・横断テーマ（2018年）」

本報告書は、研究開発の動向の2024年初旬時点でのスナップショットを切り取り、かつ定性的に記述したものにすぎない。関心のあるテーマについては、ぜひ個別領域の戦略提言に踏み込んだCRDSの様々な発信・報告書を参照いただきたい。研究開発の実務、企業経営、政策立案など、様々な場面で科学技術に関わる皆様に、研究開発の潮流・動向を横断的に概観し、議論や考察を深めるためのツールとして本報告書を活用いただければ幸いである。

## 目次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 序文                      | i  |
| 1   社会のトランジション          | 1  |
| 2   不確実性への対処            | 7  |
| 3   生命現象に迫る技術と、医療の高度化   | 13 |
| 4   材料科学と製造技術           | 20 |
| 5   AI・ロボットで変わる科学       | 26 |
| 6   コンピューティングの革新        | 32 |
| 7   イノベーションを生み出すプロセスの変貌 | 37 |

### 〔CRDS文献表記の凡例〕

※PDFでご覧の方はクリックすると当該報告書のWebページに遷移します(リンクの有効性の確認は2024年2月時点)。

| 表記                                        | 文献                                                       |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| ■ <a href="#">ライフ俯瞰</a>                   | CRDS-FY2022-FR-06<br>「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2023年）」 |
| ■ <a href="#">ナノテク・材料俯瞰</a>               | CRDS-FY2022-FR-05<br>「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2023年）」   |
| ■ <a href="#">ICT俯瞰</a>                   | CRDS-FY2022-FR-04<br>「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野（2023年）」   |
| ■ <a href="#">環境・エネルギー俯瞰</a>              | CRDS-FY2022-FR-03<br>「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2023年）」      |
| ■ <a href="#">CRDS-FY20xx-xx-xx「タイトル」</a> | CRDS発行の各レポート（調査報告書/戦略プロポーザル）のタイトルと管理番号を示しています。           |
| ■ <a href="#">TP20xxxxxxx「タイトル」</a>       | CRDSがWebサイトで公開している「海外トピック情報」のタイトルと管理情報を示しています。           |





# 1 | 社会のトランジション

## 章のサマリー

- 人間活動は地球環境に大規模な変化をもたらしている。
- 持続可能な社会への移行（トランジション）は国際社会が直面する地球規模の課題であり、これに対する科学技術の貢献が期待されている。
- 持続可能な社会の移行に向けてはエネルギー、食料、地球環境など、互いに絡み合った要素を同時に扱う必要があり、そのための持続可能性研究が興隆している。
- トランジションの実現には自然科学や工学だけでなく、人文・社会科学や学問の外にある実践的知見も含む「総合知」によるアプローチが重要になる。

### 持続可能な社会への移行という要請

科学技術は、より良い暮らしの追求を一つの大きな駆動力として発展してきた。利便性や快適性、趣味・嗜好や健康などへの貢献は研究開発の大きなインセンティブとなり、その達成を目指して科学と技術がともに進化し、それが経済的・社会的価値につながることで期待されてきた。一方、今日の科学技術には、そうした人間社会や人々の身近な暮らしを重視する価値観や動機とは異なる大きな推進力が働いている。それが地球規模での**持続可能な社会への移行（トランジション）**という要請である。

人間活動による長期にわたる環境負荷は、近年、様々な側面で顕著になっている。「人新世」とも言われるように、今では人類が地球環境の大規模な変化の主要因である。膨大な研究成果やデータから、このままでは人間活動が地球環境に大きなダメージを与え、社会の持続可能性が危機的になることが広く共有されてきた。その代表例である地球温暖化に伴う気候変動は、今後の激甚災害を多発させ、貧困や紛争など他の問題の引き金にもなると懸念されている。

人間活動自体にも綻びが見え始めている。国連の推計によると世界人口は2022年に80億人に達し、2050年には97億人に達すると予測されている。これらの人口を賄うための食糧、特にタンパク源はこれまで食肉が中心だが、今後はそれだけでは間に合わなくなる**タンパク質クライシス**<sup>1</sup>が懸念されている。食肉生産に必要なエネルギーや水などの資源の利用効率の悪さも指摘されている。

こうした諸問題を背景に、SDGs<sup>2</sup>をはじめ、プラネタリーバウンダリー（後述）や、人間の健康と合わせたプラネタリーヘルス<sup>3</sup>といった概念でも包含されるような、地球環境ならびに人間社会をあらゆる側面から持続可能な形に変えていかなければいけないとの認識が国際社会において強まっている。そうした、持続可能な社会への移行という要請に科学技術がいかに応え、どう貢献するのか。これらは、今日の科学技術にとって

- 1 **タンパク質クライシス**：世界的な都市化や人口増加と中間層の台頭により、タンパク質の消費量は年約4%のペースで増えると予測され、食糧不足につながる懸念される。そうした背景から、動物由来の食材や成分を使わない「ミートレス」へ動きが急速に広がっており、大豆などの植物由来の代替肉（プラントベースドミート）が注目されている。
- 2 **SDGs**：国連が2015年9月25日の「持続可能な開発サミット」で採択した「持続可能な開発のための2030アジェンダ」に含まれる目標。貧困や飢餓を終わらせる、公平性を保ち不平等をなくす、環境への配慮など17の目標と、さらにそれらをブレークダウンした169のターゲットからなる。
- 3 **プラネタリーヘルス**：公衆衛生（パブリックヘルス）の概念を拡張し、地球環境の改善と限界ある資源の最適な分配を基軸に、健康や医療が全人類へ公平にもたらされることを目指す概念。医学雑誌Lancetが2015年に掲載した声明「From public to planetary health: a manifesto」が初出。

極めて困難かつ共通的な問いとなっている<sup>4</sup>。

持続可能な社会への移行は容易ではない。先進国にとっても経験のない挑戦であり、各国は試行錯誤で取り組みを進めている。その一環として、社会変革を起点に置く発想である**ミッション志向型科学技術イノベーション政策**<sup>▼</sup>が、欧州を中心に一部採用されるようになってきた。表 1-2 に示すように、科学技術に関連する政策は、時代の中での科学技術の位置づけによってその主眼を変化させてきた。近年は、狭い意味での研究開発に限定されない問題への対応が求められるため、こうした政策が主流化してきている。

▶ ミッション志向型科学技術イノベーション政策

社会変革を伴う長期戦略の実現に向けて、達成期限を定めた明確な目標（ミッション）を設定し、多様な施策・事業の総合的パッケージ（ポートフォリオ）を設計し調整することにより、研究開発の成果の活用とイノベーションを牽引する政策アプローチ。欧州連合（EU）では、2021 年からの研究・イノベーションフレームワークプログラム Horizon Europe の一部で、ミッション志向アプローチを採用している。日本では、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画にて「ミッションオリエンテッド型の研究開発プログラムや制度改革を進める」とし、社会的課題解決を目的とした府省横断の取り組みとして内閣府主導の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」などを実施している。

■ CRDS-FY2022-SP-01「ミッション志向型科学技術イノベーション政策と研究開発ファンディングの推進」

表 1-1 科学技術（・イノベーション）政策の主眼の変遷

| 時代       | 説明                                                                                                                                                                                      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第二次大戦以降  | 各国は、国家安全保障、産業の国際競争力の強化などを目的に、科学技術およびイノベーションを推進するための行政組織、法律など制度面を整備。冷戦期には、防衛、宇宙開発や原子力などの国家的優先課題に資する技術開発を行う組織を国が主体となって設置した。                                                               |
| 1970 年代～ | 国際競争の時代に入り、民間部門の研究開発能力の向上とも並行して、国際競争上必要な技術開発を目的とした産学官のコンソーシアムの形成などを通じた産業技術開発型の政策を実施した。                                                                                                  |
| 1980 年代～ | 政府がターゲットを設定する産業政策やその根底にあるリニアモデルに対する批判とともに、ナショナル・イノベーション・システムの概念が提唱される。公的研究費による研究開発の成果の移転を促進するための知的財産制度の整備、大学や公的研究機関における技術移転機関の設置など、ナショナル・イノベーション・システムを構成する産官学の各要素間の関係の強化を目的とした政策が導入された。 |
| 2010 年代～ | 社会変革のための科学技術・イノベーション政策という新たな枠組みが要請され、その具体的なアプローチとして、「ミッション志向型」の科学技術・イノベーション政策の取り組みが各国で始まる。                                                                                              |

■ CRDS-FY2022-SP-01「ミッション志向型科学技術イノベーション政策と研究開発ファンディングの推進」

異なる要素が相互作用する持続可能性問題

SDGs の 17 のゴールと 169 のターゲットに示されるように、地球、社会、経済の持続可能性を達成するためには、複数の目標を同時に追求しなければならない。SDGs の策定に大きな影響を与えた考え方に、ストックホルム環境研究所のグループが 2009 年に提唱した**プラネタリーバウンダリー**がある（図 1-1）<sup>5</sup>。これは、人類の生存に不可欠な地球環境の要素を 9 つに分けて定量し、その限界点を定義するものである。人間活動による地球環境変化が、いくつかの領域で限界値を超えた場合、地球環境に劇的な変化が起き、人類が安全に生存していくことが難しくなる可能性が示唆されている。9 領域の評価が全て揃った 2023 年のプラネタリーバ

4 2023 年の国連 GSDR レポートでは、必要な移行・変革への 5 つの手段の一つに「科学・技術」を位置づけている。その他の 4 つの手段は「ガバナンス」「ファイナンス」「行動変容」「能力開発」である。GSDR レポートは、国連事務総長から指名された 15 人の科学者を中心に SDGs の進捗のレビューと今後の方向性をまとめた報告書。4 年ごとに取りまとめられ国連 SDGs サミットで発表される。https://sdgs.un.org/gsdrr/gsdrr2023（アクセス日：2023 年 11 月 13 日）

5 2009 年から 2023 年まで、プラネタリーバウンダリーの研究報告書は断続的に更新されている。

ウンダリーの研究によれば、現在の地球環境は4領域において人類の生存が危ぶまれる状況とされた。

同研究によると、中でも窒素やリン酸の生物地球化学的循環はほぼ破綻した状況にあり、その主な要因は農業での大量施肥である。食料増産は世界の人口増加や経済発展を支えてきたが、その持続可能性は十分に考慮されているとは言い難い。気候変動対策の一環としてバイオマス資源の利用拡大が活発に議論されている一方で、これに伴う追加的な施肥（窒素やリンの消費）、大規模な土地利用変化、生物多様性への影響といった地球環境への負荷も同時に懸念されている。

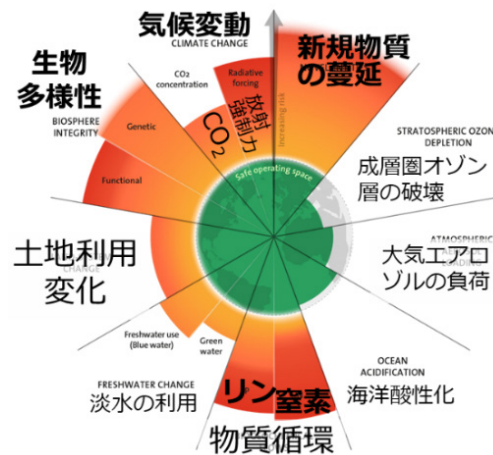


図 1-1 プラネタリーバウンダリー 2023 年版<sup>6</sup>

また、現在の食料システムは持続的でも健康的でもないことが喫緊の課題として指摘されており<sup>7</sup>、第4章でも触れるように、地球環境への負荷が小さく、かつ、人類にとって健康的な食料システムへ移行するための研究開発が各国で進行中である。特に、大量の農地とバイオマスを消費し、温室効果ガスを排出する畜産業の持続可能性の低さへの問題意識から、植物性の代替肉や精密発酵、培養肉や昆虫食など、多彩な代替タンパク質に関する技術革新が始まっている。しかし、持続可能な代替タンパクの生産手段とされる方法が、実は現行の畜産以上に環境負荷が高いことが報告されたり、高度に加工された植物性タンパク質は、必須栄養素が流失していて、かえって健康リスクが高まるなどの懸念が表明されたりすることもある。

このように、持続可能な社会への移行には要素間の複雑な相互作用が立ちほだかり、有望な道筋は直感的には見いだしにくい。そこで、データ科学と数理モデリングを駆使してその相互作用を解明し、持続可能性への道筋を探る**持続可能性研究**が分野として興隆してきた。その研究成果は、Nature Sustainability（2018年創刊）やThe Lancet Planetary Health（2017年創刊）、Nature Ecology and Evolution（2017年創刊）、Nature Food（2020年創刊）等の、比較的新しい学術誌に掲載されることが多い。

■ 2024年発行予定「持続可能な社会の実現に貢献するバイオ生産基盤技術開発（仮）」

6 プラネタリーバウンダリー：ストックホルムレジリエンス研究所（スウェーデン）が2009年から進めてきた地球環境評価指標で、人類が生存できる安全な活動領域とその限界（バウンダリー）を定義する概念である。図の出典：Azote for Stockholm Resilience Centre, Stockholm University. Based on Richardson et al. 2023, Steffen et al. 2015, and Rockström et al. 2009にCRDSが加筆。

7 2019年の国際連合食料農業機関（FAO）による報告をはじめとする様々な報告書で指摘されている。



カーボンニュートラルに向けて

今では、150を超える国や地域が年限付きの温室効果ガス（GHG）排出量のネットゼロ、すなわち**カーボンニュートラル**を長期目標に設定している。日本政府も2050年のカーボンニュートラル実現を目指すことを2020年10月に宣言し、同年12月には経済産業省がその実現に向けた「グリーン成長戦略」を公表した。日本ではその後も関連政策が立て続けに策定され、あらゆる施策を総動員して取り組む姿勢が示されている。再生可能エネルギー導入拡大、エネルギー貯蔵、化石資源代替としての水素やアンモニアの活用、電力システムの安定化など課題が無数にあり、科学技術は（それだけで解決できる問題は少ないとはいえ）重要な役割を担う。同時に、カーボンニュートラル実現に資する技術やシステムは今後の産業競争力の源泉にもなりうるため、研究開発は国・地域間の競争にもなっている。欧州の気候変動関連政策パッケージである「欧州グリーンディール」は、カーボンニュートラルの実現を目指すものであるとともに欧州の成長戦略でもある。日本のグリーン成長戦略も同様であり、こうした事情を背景に先進国を中心として各国はこの分野の研究開発への投資に積極的である。

主な研究開発の動向としては、以下の3つに大別される。表1-2に、この3つの柱における研究開発動向の概要をまとめる。

- ① **電源のゼロエミッション化** …再エネ発電の導入促進、産業・運輸部門の燃料、業務・家庭部門の燃料の転換により、エネルギーをつくる・つかう場面でCO<sub>2</sub>を出さない技術。
- ② **需給安定化** …蓄電・蓄熱によりエネルギーを貯め、変動する需要と供給に応じて高い信頼性で安定に、効率的にエネルギーを運ぶ技術。
- ③ **CO<sub>2</sub>の分離・回収** …化石燃料を利用する際に排出されるCO<sub>2</sub>をオフセットする技術や、排ガスからのCO<sub>2</sub>回収のほか、大気からの回収（DAC）や自然を利用した**ネガティブエミッション技術**▼。

表 1-2      カーボンニュートラルの実現に向けた研究開発動向

| 分類            | 項目         | 説明                                                                                                                             |
|---------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①電源のゼロエミッション化 | 水素・アンモニア製造 | グリーン水素製造のための大型水電解装置やシステムの開発が進む。アルカリ水電解、PEM型水電解が実用・実証段階にありアニオン交換膜型水電解が研究段階として注目されている。                                           |
|               | 貯蔵・輸送      | サプライチェーン構築を見据えて、再エネ賦存量が大きいもしくは化石資源が豊富な国からグリーン水素やブルー水素を水素キャリアの形態で輸送する実証試験が進む。水素キャリア合成では水素を経由しない直接電解合成技術の開発も進む。                  |
|               | 利用         | 水素・アンモニアの混焼・専焼に向けたシステム効率検討、高温高压材料や燃焼機器の開発、NOx排出低減の研究開発、それらを踏まえた中・大型ガスタービンでの実証試験が進む。                                            |
|               | 風力         | 世界では風車の大型化が進む（商用機で定格出力16MW・ロータ直径260m, 2023年）。変動電源の安定的な利用のためのシステム構築も進む。国内でも洋上風力の建設コスト低減技術の開発や環境影響評価のセントラル方式による事業化促進などが取り組まれている。 |
|               | 太陽光        | 高い変換効率のセル開発、未利用場所への展開に向けたモジュール開発。運用技術として、モジュールの劣化メカニズム解明、信頼性/安全性、保守、系統との連携に関する検討が進む。高精度な日射・発電予測の研究開発も進む。                       |
|               | 原子力        | 各国の事情に応じて原子力の活用が見直され、高温ガス炉などの新型原子炉の開発・実証が進められている。核融合炉についても発電および熱利用などを目指した開発が進められており、近年は基礎研究だけでなくスタートアップ投資も活性化している。             |

|                         |                        |                                                                                                                                                 |
|-------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ②需給安定化                  | 蓄エネルギー                 | 電源の負荷平準化、非常用電源、デマンドレスポンス（需要側の対応）、変動性再エネの余剰吸収といった複数の役割を担う多用途な蓄電システムの構築が求められるようになっている。                                                            |
|                         | 蓄電池                    | 比較的短時間での制御が求められる状況での役割が大きい。LIB、NAS電池、RF電池が中心。全固体LIBの検討は安全性、充電の短時間化を目的にEV用で主に行われている。                                                             |
|                         | 蓄熱                     | 蓄熱技術を介したPower to Heat to Power型の蓄エネルギー技術である、カルノーバッテリー（蓄熱発電）が急速な展開を見せている。                                                                        |
|                         | 調整力の創出                 | 変動性再エネ（VRE）と分散型エネルギー資源（DER）の導入拡大に伴う需給バランス維持の困難化、電気の流れの複雑化、電力システムの慣性不足による安定性の低下等の課題に対応する解析・シミュレーション、モニタリング・センシング、機器・システム等の研究開発が進む。               |
|                         | 需要科学とエネルギー・データサイエンス    | スマートメーター等のエネルギーデータとビッグデータを連携活用し、エネルギー消費分析、需要家機器稼働分析、消費者行動分析、行動経済学的分析に基づく新たなサービスの提供を目指した取り組みがなされている。                                             |
|                         | マイクログリッド               | 再生可能エネルギーや蓄電池の導入コストの低下など技術の進展や、地震、台風、集中豪雨、山火事などの自然災害の頻発を背景に、マイクログリッドへの関心が高まっている。                                                                |
| ③CO <sub>2</sub> の分離・回収 | 直接空気回収(DAC)            | CO <sub>2</sub> 濃度の希薄な大気からの回収で、投入エネルギーの確保と削減が課題。欧米で実証試験レベルの取り組みが進む。日本でも内閣府のムーンショット型研究開発制度で取り組まれている。                                             |
|                         | バイオマスエネルギー・CCS (BECCS) | オプションの一つとみなされているが、バイオマス作物の栽培面積拡大による食料との競合や水資源消費、エネルギー収支などの懸念もある。                                                                                |
|                         | 植林・再造林                 | 炭素固定能力を最大化させる森林管理の研究や早生樹の開発などが進む。他の生態系サービスとのバランスを重視する見方も強まっている。                                                                                 |
|                         | 土壌炭素貯留・バイオ炭            | 農地土壌に蓄積する炭素量を増加させるための仕組み作り・イニシアチブが各国で進行している（例：4パーミルイニシアチブ、カーボンファームング）。                                                                          |
|                         | ブルーカーボン                | 沿岸部でのCO <sub>2</sub> 吸収量の評価や藻場の拡大に係る技術開発が進む。深海貯留や難分解性有機炭素による海中貯留など、炭素貯留プロセスの解明や海藻養殖に向けた検討も進む。                                                   |
|                         | 風化促進                   | 玄武岩などの岩石を粉砕・散布しCO <sub>2</sub> が固定される風化を人工的に促進する技術のポテンシャルを見極めるための検討が進む。                                                                         |
|                         | CO <sub>2</sub> 分離回収   | 液体（アミン系吸収剤）による吸収法が最も成熟した技術。新規吸収液の開発や、固体吸着材/吸収材、分離膜を用いた分離回収プロセスの研究開発が進む。                                                                         |
|                         | CO <sub>2</sub> 貯留     | CO <sub>2</sub> -EORや帯水層貯留地の探索、地質調査。圧入技術としてCO <sub>2</sub> をマイクロバブル化する技術の開発が進む。モニタリング技術として光ファイバー方式が期待されている。                                     |
|                         | CO <sub>2</sub> 利用     | CO <sub>2</sub> を水素の還元力を用いて合成燃料や化学原料として有用なメタノールなどに変換する。熱化学反応（触媒技術）の開発が活発。また、再エネ等の電力を直接利用して水素を経由せずに反応させる技術、光触媒によるCO <sub>2</sub> 還元の研究開発も行われている。 |

■ 環境・エネルギー俯瞰

## ▶ バイオマス・ネガティブエミッション技術

ネガティブエミッションは大気中CO<sub>2</sub>の除去（吸収・固定）によりCO<sub>2</sub>排出量をマイナスにする技術であり、BECCS（バイオマス燃料の燃焼排ガス（Bioenergy）からのCCS）、DACCS（直接空気回収によるCCS）などの工学的手法と、森林等の自然を活用した解決策（Nature-based Solutions: NbS）がある。NbSには、海域で行うものとして、海藻・海草等によって海洋生態系に炭素を隔離・貯留する「沿岸部ブルーカーボン」、石灰岩や炭酸カルシウムを用いて人工的に海に二酸化炭素を吸収させる「海洋アルカリ化」などがある。陸域で行うものとして、植林/森林再生、土壌炭素貯留、炭素鉱物化などがある。その有効活用のためには、バイオマス由来の炭素循環・動態の解明が重要となる。

■ CRDS-FY2022-SP-08 「バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究」

## 新技術の社会実装に向けた研究開発

カーボンニュートラルの実現のような社会課題解決志向の研究開発とともに、技術駆動型の研究開発およびその社会実装においてもトランジションは重要なキーワードとなる。代替タンパク源、自動運転車、人工知能など、これまでにない製品・サービスを社会実装していくためには、それらを社会の中で人々の暮らしや制度にどう整合的に埋め込んでいけるかが重要になる。

技術を活用する「社会」の側に着目する研究開発としては、エネルギーの供給だけではなく需要にも注目した社会設計を考える**需要科学**<sup>▼</sup>、SNSなどの大規模データを使って社会を理解する**計算社会科学**<sup>▼</sup>、医療や保育といった社会的資源の最適な配分に数理的な手法を用いる**メカニズムデザイン**<sup>8</sup>等が挙げられる。

また、いわゆる自然科学や工学だけではトランジションへの対応は困難である。人間や社会を総合的に理解するためには人文・社会科学的観点からのアプローチや、学術の外にある経験的・実務的な知識の活用も必要となる。そうしたあらゆる知を有機的に組み合わせる**総合知**<sup>▼</sup>によるアプローチがトランジションの実現には必要となる。文理融合研究や産学官連携の実践には困難も伴うが、これまでの経験や教訓も生かした、分野間・セクター間連携や促進・支援方策の高度化が望まれている<sup>9</sup>。

### ▶ 需要科学

再生可能エネルギーの拡大により、これまで電力の消費者だった人々が自ら電気を作る「プロシューマー」に変わる。また消費電力データをモニターするスマートメーターの導入が世界的に進み、日本では、2024年度を目途に全需要家への設置が完了となる予定である。スマートメーターからのデータを活用し、消費行動に基づく需要の動的挙動を考慮した電力市場価格モデル、インセンティブ設計手法などの可能性が開けてくる。

■ CRDS-FY2017-WR-02「未来エネルギーネットワークと需要科学」

### ▶ 計算社会科学

人間や社会が生み出す膨大なデータの分析、デジタルツールを活用した実験や調査、社会経済現象の大規模なコンピューターシミュレーションなど、新たに利用できるようになったデータや情報技術を駆使し、個人や集団、社会や経済等を、これまでにない解像度とスケールで定量的に研究する学際領域。ビッグデータが利用できるようになってきた2000年代末から分野として確立し、欧米の大学やテック企業に計算社会科学を冠する研究センターや研究室が登場している。

■ CRDS-FY2020-SP-02「Society 5.0実現に向けた計算社会科学」

### ▶ 総合知

日本の科学技術政策では、2021年4月に施行された**科学技術・イノベーション基本法**において人文・社会科学とイノベーション創出が振興の対象に加えられた。今日の科学技術・イノベーション政策が研究開発だけでなく社会的価値を生み出すための政策へと変化しているとの認識から、「今後は、人文・社会科学の厚みのある「知」の蓄積を図るとともに、自然科学の「知」との融合による、人間や社会の総合的理解と課題解決に資する「総合知」の創出・活用がますます重要となる」としている。総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）の2022年3月の中間とりまとめによると、「総合知」とは「多様な『知』が集い、新たな価値を創出する『知の活力』を生むこと」である。諸外国においても、人文・社会科学を含む学術知を社会課題解決につなげるための政策が展開されている。

■ CRDS-FY2022-RR-05「人文・社会科学の知に着目した国際比較」

- 8 **メカニズムデザイン**：異なる目的や選好をもつメンバーで構成される社会において、望ましい意思決定のルールや制度を設計する研究領域。入札によって価格を決める意思決定の応用としてのオークションや、参加者の利益の全体を最大化する組み合わせを見つけるマッチングなど。近年は、「マーケットデザイン」が用いられることも多い。東京大学マーケットデザインセンターが2020年に始動、2023年にも同センターの小島武仁教授が率いるERATOプロジェクトが始動するなど、注目されている。

■ ICT俯瞰 [2.3.4 メカニズムデザイン]

- 9 文理融合研究の課題について、持続可能な資源管理に関する研究開発を対象としたCRDSでの検討例：

■ CRDS-FY2021-RR-06「文理融合研究のあり方とその推進方策」

## 2 | 不確実性への対処

### 章のサマリー

- 目指す社会への移行とともに、その途上で起こる様々な事態の予測と対処も研究開発への要請となっている。
- 不確実性を下げる現状把握・予測技術においては、例えば自然災害や気候変動に関して全球から局所までのマルチスケールでの予測・影響評価の研究が進む。
- AIや合成生物学といった、新しい技術そのものも不確実性となる。情報通信技術についてはいくつかの階層にわたるセキュリティーとトラストが重要視されている。とりわけ過去一年は、生成AIの倫理的・法的・社会的な影響とそのガバナンスが世界的に焦点の課題となっている。

### 不確実性を考慮したトランジション

前章で見たようなトランジションはそれ自体が大きな挑戦だが、その途上では様々な不測の事態も生じる。例えば2020年から続いたCOVID-19パンデミックや2022年のロシアによるウクライナ侵攻は各国の気候変動対策に少なからぬ影響を及ぼした。米中覇権争いなどの地政学的状況はグローバルなサプライチェーンに影響を及ぼしている<sup>1</sup>。こうした中、欧州連合（EU）はエネルギー政策の見直しを迫られ、ロシア産化石燃料からの脱却と温室効果ガス（GHG）排出削減の両立に向けた計画「**REPowerEU**」を2022年に公表した。同計画は従来の気候変動対策に加えてエネルギー安全保障の視点を強めている。パリ協定の実現に向けて世界はトランジションを進めていかなければならないが、足下で起きる事態への対応も同時に行っていかなければならないという難しい状況がここ数年間続いている。しかしながら本来的にトランジションの促進にはこうした不確実性への対処が不可欠である。安全保障上の課題はまた、各国のエネルギー政策だけでなく研究開発戦略にも強く影響する<sup>2</sup>。

これまでは将来のリスクとみなされていた気候変動の影響が世界各地ですでに顕在化し、それらに対する適応の重要性が増している<sup>3</sup>。気候変動が遠因となって起きる紛争や暴動のリスクを**気候安全保障**として捉える見方も出てきている<sup>4</sup>。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次評価報告書では緩和と適応に同時に取り組む「**気候にレジリエントな開発（Climate Resilient Development : CRD）**」が強調されている。その反面、気候変動の影響が今後どのように現れてくるかを精度高く予測することは未だに難しい課題である。そのため欧米では政府主導で予測の高度化が進められている。例えばEUは、地球の高精度デジタルツインモデルを開発し、自然現象や関連する人間の活動を観測、モデル化、シミュレーションすることを目的としたイニシアチブ「**Destination Earth**」を2021年より開始している。一方で予測には本来的に不確実性が伴う。自然が持つ変動性や人間社会が辿る将来に向けた道筋（シナリオ）、あるいは予測モデルそのものの不確実

- 1 CRDSでは、科学技術を俯瞰するにあたりその前提となる「現下の国際情勢」と、それを踏まえた「科学と社会」との関係を次のレポートで整理した：■ [CRDS-FY2022-FR-08「俯瞰の前提（2023年）～現下の国際情勢と「科学と社会」～](#)
- 2 OECDが科学技術イノベーション（STI）の動向を2年に一度まとめる報告書「OECD STI Outlook」の2023年版では、STI政策の安全保障化（securitization）の進展が指摘されている。  
<https://www.oecd.org/sti/science-technology-innovation-outlook/>（アクセス日：2023年10月6日）
- 3 気候変動世界経済フォーラムが1,200人の専門家に行った「グローバルリスク意識調査」の結果、直近2年間で最も影響が大きい世界規模のリスクは「生活費の（高騰による）危機」であったのに対して、今後10年間では「気候変動の緩和策の失敗」「気候変動への対応策の失敗」「自然災害と極端な異常気象」が上位3項目となった。世界経済フォーラム「グローバルリスク報告書2023年版」<https://jp.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>（アクセス日：2023年10月5日）
- 4 **気候安全保障**：気候変動を環境問題として捉えるだけでなく、食糧問題やエネルギー問題、地政学的リスクなど地球規模で脅威を与える問題として捉える考え方。日本を含む各国が、国家安全保障戦略の中に気候変動を位置づけている。



性などがあるためである。不確実性を完全に取り除くことはできないため、不確実性を適切に理解しながら予測を適切に活用していく姿勢が今後より重要になる。

■ 環境・エネルギー俯瞰 [第1章 研究対象分野の全体像]

#### ▶ 気象と気候の近未来予測

将来起こりうる気象・気候の変化の予測は、従来は天気予報や50～100年先を見据えた気候変動予測で主に行われてきた。しかし昨今は、気候変動リスクを考慮した自然災害対応が自治体などでは求められているほか、産業界の事業者にも、「気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）」提言への対応として、気候関連リスクが財務に与える影響の把握・開示が求められ始めている。こうした背景から、数週間、数か月、数年、あるいは十年以上先といった「近未来」の時間スケールでの予測の必要が高まる。幅広い時間的・空間的スケールをカバーする予測モデルの開発が、欧米を中心に進められている。

■ CRDS-FY2021-SP-08「極端気象災害と気候変動リスクへの対応強化に向けた近未来予測」

世界中に大きな影響を及ぼしたCOVID-19は、日本においても平時を含む感染症対策に関する様々な課題を浮き彫りにした（**日本政府の新型コロナ対策の課題**<sup>5</sup>）。とくに、感染状況や病態の把握、ウイルスの変異、治療効果などの解析に必要な、専門家同士の協力体制、現場から専門家助言組織への疫学情報、試料、ゲノム情報などの提供が、必ずしも十分でなかった。データに基づく対策を取るために不可欠である、健康・医療 RWD（リアルワールドデータ）を収集・活用する基盤が日本にはないことも浮き彫りとなった。

■ CRDS-FY2020-RR-05「感染症に強い国づくりに向けた感染症研究プラットフォームの構築に関する提言」 ■ ライフ俯瞰 [第1章 研究対象分野の全体像]

#### ▶ 日本政府の新型コロナ対策の課題

日本政府は「新型コロナウイルス感染症対応に関する有識者会議（座長：永井良三）」を2022年4月に発足させた。同年6月に公開された報告書<sup>5</sup>では、これまでの新型コロナ対策を踏まえ、法制度・運用、医療提供体制、PCR検査体制、情報収集・公開、専門家助言組織、感染症研究体制、司令塔のあり方などに関して課題を挙げている。その後、2023年9月には内閣感染症危機管理統括庁が発足した。

国際情勢が目まぐるしく変化する中、目指すべき社会への移行を着実に進めつつ、突発的に発生するパンデミックや、災害等、不測の事態に対処するための研究開発が求められている。

### オルタナティブデータの活用

予測の重要性は気候・気象の分野に限らず、災害、感染症、経済など幅広い分野で増している。近年は様々な機械学習やシミュレーションの手法を組み合わせ、大規模なモデルを構築することで高い精度の予測を行うことがトレンドであるが、それを支えるのが大規模データである。その一例として、Web上で得られる様々な**オルタナティブデータ**<sup>6</sup>により、現状の把握や近未来の予測も可能になってきている。

5 新型コロナウイルス感染症対応に関する有識者会議「新型コロナウイルス感染症へのこれまでの取組を踏まえた次の感染症危機に向けた中長期的な課題について」（2022年6月15日）  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/coronavirus\\_yushiki/pdf/corona\\_kadai.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/coronavirus_yushiki/pdf/corona_kadai.pdf)（アクセス日：2023年11月22日）

## ▶ オルタナティブデータ

政府統計や企業統計などの公開データではないデータの総称。クレジットカードの決済データや販売のPOSデータ、電力需要データや衛星画像データ、交通系ICカードの利用データやスマートフォンの位置データ、ウェブの記事やSNS（交流サイト）の投稿など。オルタナティブデータは組み合わせることによって価値が高まり、機械学習や人工知能（AI）の発展によって膨大な非構造化データを分析できるようになったことで、利用が進んでいる。金融の分野における経済指標の推定といった用途からオルタナティブデータの利用が始まったが、現在では、消費者意識の把握などのマーケティング応用から政策立案まで、幅広い用途で使われている。

■ ICT俯瞰 [2.3.5 計算社会科学]

## 情報通信分野におけるセキュリティとトラスト

人工知能（AI）、合成生物学、ニューロテクノロジーといった新しい科学技術が社会にもたらすリスクが近年強調されている。新興技術の倫理的・法的・社会的影響（ELSI）を予見し、効果的に対応するための科学技術ガバナンス▼が求められている（第7章も参照）。

## ▶ 科学技術ガバナンス

近年、技術の発展が社会に急速かつ大きな影響を与えたとの認識から、科学技術のかじ取りを適切に行う「科学技術ガバナンス」の重要性が国際的に重視されてきている。世界経済フォーラムやOECDといった国際的な枠組みにおいては、とりわけ進展の速いデジタル技術を念頭に、ルール形成の議論を産学官民で柔軟かつ迅速に行う「アジャイル」なガバナンスの必要性が提起され、日本では経済産業省が「アジャイル・ガバナンス」の具体的実現に向けた検討を進めてきた。科学技術ガバナンスへは、国家・政府、産業界、市民社会に加えて、研究開発を担う学術界の各ステークホルダーが主体的に関与することが期待されている。

■ CRDS-FY2023-SP-01「科学技術・イノベーションの土壌づくりとしてのELSI/RRJ」

とりわけ進展が著しい情報通信技術に関しては、ロシアによるウクライナ侵攻でのSNSを介した世論への関与、政府や医療機関などの重要施設を狙ったサイバー攻撃などが激化しており、サイバー空間が社会にもたらすリスクが増大している。また、AI技術を用いた対話エージェントなどが急速に普及し、新たなリスクも予見される。

これらのリスクに対処するために、悪意ある第三者の攻撃から情報システムおよび情報サービスを守る**セキュリティ**と、利用の際の安心・信頼を担保する**トラスト**の重要性が高まっている。

セキュリティとトラストの諸課題は、図2-1のように整理できる。縦軸は守る対象であり、デバイス、システム、情報（データ）、人と社会という4階層で示す。セキュリティに関しては、日々高度化するサイバー攻撃に対抗すべく、暗号技術やマルウェアの検知、認証技術をはじめとする様々な技術による対策が強化されてきているほか、システムへの不正侵入を防ぐ**ゼロトラストアーキテクチャー**の考え方が浸透してきた。また、システムのハードウェアやソフトウェアが不正に改変されていないことを検証しシステム間の信頼関係を確立するシステムの**デジタルトラスト**や、データを扱う人やモノが本人、本物であることと、データが改ざんされていないことを保証するデータ・コンテンツのデジタルトラストの研究も進む。

セキュリティやトラストの技術が強化される中、とくに最上位の階層である「人と社会」のセキュリティとトラストに注目が当たっている。SNSを介したフェイク動画による影響工作など、人の認知が脆弱性とみなされつつあり、そうした攻撃に対抗する**コグニティブ・セキュリティ**の考えが出てきた。さらに、攻撃に対する防御に加えて、システムおよびサービスを安心・信頼して利用するためのトラストが求められている。トラストとは「相手が期待を裏切らないと思える状態」である。旧来のトラストは、顔が見える人間関係や人々の間のルールに支えられたが、新技術や新サービスが社会に広まる中、それらを安心・信頼して利用できるかが問題となる。旧来のトラストに代わる、デジタル社会におけるトラストを新たに形成することが求められ、**トラストの3側面**▼から新たなトラストのよりどころを築き多面的・複合的に検証することが求められている（表

2-1)。関連して、どのように信頼性を担保しつつ国境を越えるデータ流通を実現するかというデータガバナンスが外交上の問題にもなっている中、日本はDFFT（Data Free Flow with Trust）というコンセプトを打ち出し、その実現に向けた国際的なルール形成に貢献している。

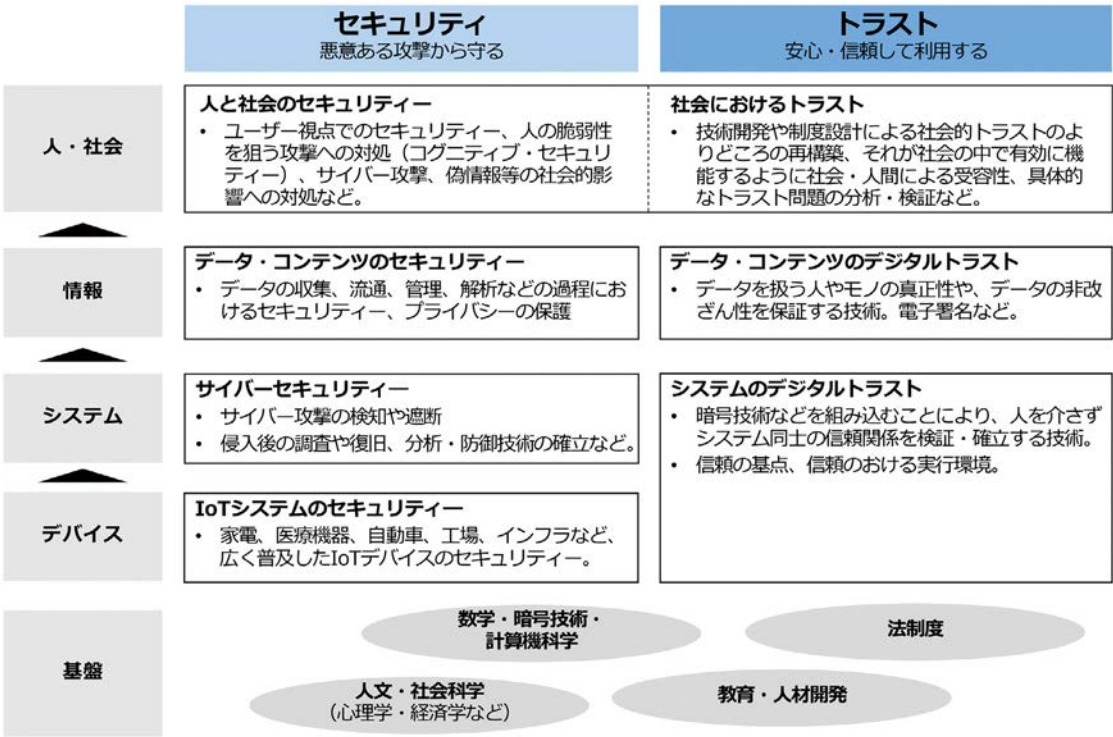


図 2-1 セキュリティ・トラストの俯瞰図

■ ICT 俯瞰 [2.4 セキュリティ・トラスト]

▶ **トラストの3側面**

トラストには、「対象真正性」（本人・本物であるか?）、「内容真実性」（内容が事実・真実であるか?）、「振る舞い予想・対応可能性」（対象の振る舞いに対して想定・対応できるか?）という3側面がある。各々においてそれを担保する社会的なよりどころが存在してきたが、デジタル技術の進展により旧来のよりどころだけでは不十分になってきている（表2-1）。

■ CRDS-FY2022-SP-03「デジタル社会における新たなトラスト形成」

表 2-1 **トラストの3側面**

| トラストの3側面                                  | 現状の社会的よりどころ                                      | 問題点                                                                          |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| (A) 対象真正性<br>本人・本物であるか？                   | 印鑑・サイン、身分証・鑑定書、デジタル認証・生体認証など                     | 真正性保証の対象が拡大、デジタル特有の偽造・偽装・改ざんの可能性も拡大。トラスト基点の信頼性担保にも課題あり。                      |
| (B) 内容真実性<br>内容が事実・真実であるか？                | 事実性については証拠写真・監視カメラ映像など、学説については査読制による学術コミュニティ合意など | AIによるフェイク生成が高品質化したため、写真・映像の証拠性が揺らぎつつある。そもそも絶対的の真実・事実は定まらず、ファクトチェック可能な対象は限定的。 |
| (C) 振る舞い予想・対応可能性<br>対象の振る舞いに対して想定・対応できるか？ | 人的行為・タスクについては契約・ライセンスなど、機械・システムの動作については仕様書など     | ブラックボックスAIでは動作仕様が定義できず、常にその動作を予見できるわけではない。説明可能AIも近似的説明であり、保証にはならない。          |

## AIと共生する社会へ

人間の知的作業をコンピュータで代行する人工知能（AI）技術は、便利で効率的な社会へつながると期待される一方、様々な負の側面に対する懸念が指摘されている。各国はAIの研究開発を国家戦略に位置づけ、2010年代半ばからはG20やOECDなどの様々な国際的な枠組みの中でAIの倫理原則が定められてきた。2022年末から2023年初旬にかけては、とりわけOpenAI社のChatGPTの一般利用が広まったことで、従来のELSI論点に加え生成AIがもたらしうる新たな懸念についての議論が活発化している（表2-2）。人間・社会の価値観にAIを整合させる**AIアライメント**▼を含む、AIの社会的影響への技術・制度的な対応が喫緊となっている。

表2-2 生成AIで新たに登場・深刻化したELSI論点

| 種類                | 論点            | 説明                                                                                                    |
|-------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| モデル構築（訓練）時の懸念     | 著作権問題         | AI生成物が訓練データに含まれる著作物と類似している場合、著作権侵害が生じる可能性がある。                                                         |
|                   | プライバシー侵害      | 訓練データにプライバシーに関わる情報が含まれる可能性。                                                                           |
|                   | 自然環境へのインパクト   | 訓練時に大量の電力や水を消費することによる環境影響。                                                                            |
|                   | モデル構築時の労働問題   | モデル訓練時に有害データの除去などに危険かつ集約的な労働が関わっている可能性がある。                                                            |
| モデル利用時の懸念<br>①：悪用 | 危険物・兵器の拡散     | 薬物や兵器の製造を容易にする危険性。                                                                                    |
|                   | サイバーセキュリティ    | サイバー攻撃のためのコード生成が容易かつ巧妙になる可能性。                                                                         |
|                   | 偽情報・プロパガンダ生成  | フェイクニュースの生成やなりすましでの利用。                                                                                |
|                   | 有害コンテンツ生成     | 性的コンテンツ、ヘイトスピーチの生成など。                                                                                 |
| モデル利用時の懸念<br>②：誤用 | ハルシネーション（幻覚）  | 無意味または誤った内容が真実であるかのように生成される問題。                                                                        |
|                   | 情動的介入・過度な擬人化  | 意識や人格を持っているかのような錯覚をユーザーに与えることがもたらす問題（Chatbotに促された可能性のある自殺に関する報道も）。                                    |
|                   | 情報漏洩          | 生成AIへの入力（プロンプト）に含まれる機密情報の流出の懸念。                                                                       |
| 社会への広範な影響         | データ汚染         | ネット上にAI生成物があふれることによる、言論空間の混乱など。                                                                       |
|                   | 社会的バイアス       | 学習データに含まれるバイアスが強化される懸念。                                                                               |
|                   | 教育への影響        | 教育効果に悪影響をもたらしたり、教育現場に混乱をもたらしたりする懸念。                                                                   |
|                   | 創作文化への影響      | クリエイター市場への影響、著作者性の見直しも含む広範な影響。                                                                        |
|                   | 民主主義への影響      | 偽情報やAIによるノイズ的情報が、選挙などにおける民意形成に及ぼす影響。                                                                  |
|                   | 労働経済への影響      | AIの普及により労働市場に著しい影響が出る懸念。                                                                              |
| まだ見ぬAIに関する懸念      | 未来のAIがもたらすリスク | 自律性を高めた今後のAIが、予期せぬ挙動をもたらす懸念。AGI（Artificial General Intelligence）、超知能（Superintelligence）の問題として議論されている。 |

■ CRDS-FY2023-RR-02「人工知能研究の新潮流2」



## ▶ AIアライメント

人間・社会の価値観にAIを整合（align）させることを意味するAIアライメントは、10年ほど前から一部の研究者による議論がなされており、2020年ごろから広く用語として普及した。将来AIが自律性を高め、いわゆる「汎用人工知能（AGI）」や「超知能（superintelligence）」の脅威が背景にあるが、最近では、生成モデルが出力するバイアスや悪用など、より手近な問題への対応もAIアライメントの問題に含まれるようになった。なお、「AI Safety」など関連する類語もあり、今後の政策的・学術的・技術的な議論の中でこれらの用語のニュアンスも変遷していくものと思われる。

■ [CRDS-FY2023-RR-02「人工知能研究の新潮流2」](#)

## 3 | 生命現象に迫る技術と、医療の高度化

### 章のサマリー

- 生命現象の理解・予測・制御を目指す生命科学は、計測技術の進展で得られるようになったゲノムなどの大規模データにより、生命の複雑性を直に扱う時代に入った。
- 臨床医学では、20世紀までの低分子医薬を主とする創薬から、核酸医薬品、再生医療（幹細胞治療）、遺伝子治療など、新たな創薬モダリティ（治療技術のタイプ）への拡張が進んできた。
- デジタル技術を治療に用いるデジタルヘルス（ヘルステック）の分野が台頭し、AIを活用した創薬も本格化している。
- 老化のプロセスを理解し老化そのものを制御しようとする研究や、全身の様々な臓器の相互作用の全体像を理解しようとする研究などが活性化し、個別の臓器や一つの疾患を越えた新しい医学が展開している。

### 生命科学の技術革新

生命現象の理解・予測・制御を目指す生命科学（ライフサイエンス）と、その成果の健康・医療への応用を目指す臨床医学は、生命を捉える技術の革新とともに発展してきた。

物理・化学に依拠する生理学の発展などを背景に近代医学が確立した19世紀、遺伝子組換え等の新たなバイオテクノロジーにより**バイオ医薬品**<sup>1</sup>や多くの合成医薬品が発達し、MRIや内視鏡など数多くの医療機器が開発された20世紀を経て、21世紀に入るとさらに高度な技術が登場してきた。以下はその一部である。

- **ゲノム解析技術**：1990年に開始されたヒトゲノムの解読作業は13年間・30億ドルの時間とコストをかけて行われた。2000年代半ばに登場した次世代シーケンサーにより、現在では1,000ドルで個人のゲノムの解析が可能となった。こうしたゲノム解析の高速化、低コスト化により、ヒトを含む動物、植物、微生物のゲノム解析が幅広く行われるようになった。
- **ゲノム編集技術**：ゲノム上の狙った箇所に改変を加える技術をゲノム編集と呼ぶ。2012年にジェニファー・ダウドナとエマニュエル・シャルパンティエらにより簡便なゲノム編集ツールである**CRISPR/Cas9**が開発されて以降、様々な生物を対象とした精密な遺伝子改変が可能となった。
- **生物の光操作**：光を使って狙った細胞や生体部位を高い時空間の精度で操作できるようになりつつある。2005年に、膜タンパクのチャネルロドプシンを用いた遺伝学的な光操作の技術が神経科学で応用されたことを契機に、生命現象に関わる様々なタンパク質の光操作の技術が開発されている。
- **タンパク質構造予測・設計**：タンパク質の立体構造を高精度で予測するソフトウェア**AlphaFold2**<sup>▼</sup>が登場した。

■ ライフ俯瞰 [2.3 基礎基盤]

1 **バイオ医薬品**：遺伝子組換え技術などのバイオテクノロジーを利用し、微生物や動植物細胞を用いて生物的に生産・調製された原薬を医薬品化したもの。有機化学を基盤に化学合成で得られる「合成医薬品」と対比してこう呼ばれる。

### ▶ AlphaFold2（タンパク質立体構造予測AI）

2021年7月、Alphabet社傘下のDeepMind社（現Google DeepMind社）は**AlphaFold2**を発表した。これはタンパク質のアミノ酸配列情報のみから安定な立体構造を高精度で予測できるソフトウェアであり、高度な技術と多額の費用がかかる実験手法と同等の精度の予測ができることから、50年来の「タンパク質折り畳み問題」のブレイクスルーとみなされている。精度の高さと自由なライセンス性のため、公開からまもなく多くの後発ソフトウェアが登場している。予測の逆問題を解くことで望ましい立体構造を形成する**de novoタンパク質設計**など、生命現象の理解や創薬に大きく寄与すると見込まれる。

■ ライフ俯瞰 [2.3.10 タンパク質設計]

こうした技術をもとに、現在のライフサイエンス・臨床医学は、複雑な生命現象を単純な原理に還元することなく、その複雑性に直に対峙する時代に入った。次世代シーケンサーや質量分析器から産出される大量の**オミクス**▼データと、電子顕微鏡、光学顕微鏡、PET（ポジトロン断層法）、MRI（核磁気共鳴イメージング）等から産出される画像データ、臨床健康記録などの他の情報ソースを統合した時空間情報の解析が可能になり、さらに細菌と宿主動物/ヒトの相互作用に着目する**マイクロバイーム**▼の解析も近年のトレンドである。

### ▶ オミクス

生体中に存在する分子全体を網羅的に研究する分野を総称して「**オミクス**」と呼ぶ。遺伝子を対象とするゲノミクス、転写物（mRNA）を対象とするトランスクリプトミクス、タンパク質を対象とするプロテオミクス、代謝物を対象とするメタボロミクスなどがある。近年の次世代シーケンサーなどの計測技術の高度化により、各階層におけるオミクスデータが大量に得られつつある。一細胞レベルで包括的かつ定量的に分子プロファイルを得る技術が開発され、さらに時空間的な分解能を持った細胞挙動の解析や組織・臓器レベルの空間的解析へと応用され始めている。単一細胞から二つ以上の情報を同時に取得する**単一細胞マルチオミクス**もトレンドになっている。

■ ライフ俯瞰 [2.3.1 遺伝子発現機構][2.3.6 一細胞オミクス・空間オミクス]

### ▶ マイクロバイーム

土壌、海洋、大気、動植物の体内や体表などのあらゆる環境中に存在する、細菌、古細菌、原生動物、真菌、ウイルスなどの微生物の集団である微生物叢（マイクロバイオータ）が持つ遺伝子や機能をマイクロバイームと呼ぶ。ヒトを宿主とした微生物叢のうち、腸内の微生物叢（腸内フローラ）の研究が進んできた。2022年には健康な人の便に含まれる細菌群が医薬品として米国FDAに承認された。今後は単離された有効微生物のカクテルの医薬化も視野に入る。植物を宿主とする微生物叢の研究も活性化しており、農業への応用が期待される（第4章も参照）。

■ ライフ俯瞰 [2.3.3 マイクロバイーム]

多階層にわたる生命現象を解析できるようになったことで、ビッグデータを活用した研究・技術開発が主流になってきた。それにより、以下に見るような、個人差に着目した医療・ヘルスケアや、新たな治療へのアプローチが生まれている。

## 医薬品・治療モダリティの多様化

**医薬品・治療モダリティの多様化**は、健康・医療分野における大きなトレンドとなっている（図3-1）。ここで「モダリティ」とは、治療技術のタイプを指す。



図3-1 治療モダリティの多様化の歴史

20世紀に全盛期を迎えた**低分子医薬**は、それまで不治の病とされた疾患の制御を次々と実現した。20世紀末になると、**低分子医薬**では治療困難な疾患に対する治療モダリティへのニーズが高まる中で、20世紀末より試行錯誤が続けられてきた**抗体医薬**が花開き、21世紀に入ると巨大な市場を形成した。しかし抗体医薬も万能ではない。現在も、新たな治療モダリティ候補が続々と登場している（表3-1）。こうした医薬品・治療モダリティの多様化は、疾患の制御・根治を大きく加速させている。

表3-1 新しい医薬品・治療モダリティ

| 医薬品・治療モダリティ       | 説明                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 核酸医薬品             | 鎖状に連なった十数から数十塩基の核酸分子あるいはその化学修飾体を用いた医薬品の総称。アンチセンス核酸、siRNA、miRNA、mRNA、デコイ核酸、核酸アプタマー、CpGオリゴ、RNA編集などが含まれる。中でも、人工的に合成したmRNAを医薬品として体内に投与し、ワクチンや治療薬として働くタンパク質を体内の細胞に産生させる <b>mRNA医薬品・ワクチン</b> は、新型コロナウイルスワクチンとして活用されたことで広く知れ渡った。                                      |
| 幹細胞治療（再生医療）       | 疾患や外傷、加齢などによって失われた組織・臓器の生態機能に対し、幹細胞や組織・臓器の移植などによる再生を目指す医療。近年では移植治療だけではなく、生体ナノ粒子や化合物などを活用した再生誘導研究、創薬評価への幹細胞の活用（オルガノイド、organ-on-a-chip、疾患iPS細胞など）、さらには未来の食として期待される培養肉の研究開発などへの展開にも注目が集まる。                                                                        |
| 遺伝子治療             | 体外に取り出した患者細胞に目的遺伝子を導入・発現させて再度体内に戻す手法（ex vivo 遺伝子治療）や、遺伝子導入ベクターの全身投与によって標的臓器において目的遺伝子を直接発現させる手法（in vivo 遺伝子治療）。2017年の <b>CAR-T細胞療法</b> ▼の上市を契機に、新たな治療モダリティとして高く期待されている。                                                                                         |
| ゲノム医療（精密医療・個別化医療） | 個人のゲノム情報をはじめとした各種オミクス検査情報をもとにして、患者の体質や病状に適した医療を行うこと。2000-2010年代に世界中で整備されてきたバイオバンクとも連携し、特定疾患のなりやすさや薬物応答性の個人・人種による差が解明されつつあり、新規治療薬開発、既存医薬品選択の最適化、個別の疾患予防への行動促進への利用が期待される。米国では100万人規模での研究コホートを創設し、参加者の遺伝子や生活習慣など各種情報をデータベース化する <b>All of Us program</b> が進められている。 |

■ ライフ俯瞰 [2.1 健康・医療]



▶ CAR-T細胞

CAR-Tは、体内で免疫を担うキラーT細胞に、CD19抗原結合分子と共刺激分子などで構成されるChimera Antigen Receptor（CAR）分子をex vivo（生体の外）で遺伝子導入した細胞。標的とする血液がんの特異的にCAR-T細胞が結合する際の刺激でキラーT細胞が活性化し、がん細胞を攻撃する。2017年8月、CAR-T細胞製剤が血液がんの一種である再発・難治 B-ALL（急性リンパ芽球性白血病）/DLBCL（びまん性大細胞型B細胞リンパ腫）の患者の9割に大きな治療効果を示し、米国で承認された（2019年に日本でも承認）。その後も血液がんを対象とした CAR-T 製品が続々と登場している。現状では対象疾患の少なさ、高額な治療費、副作用、製造の難しさ、治療後の再発などの課題が残るものの、今後の発展に期待が持たれている。

■ CRDS-FY2020-SP-01「デザイナー細胞」

薬剤を標的組織・細胞へ送達するドラッグデリバリーシステム（DDS）の開発が進んでおり、例えば mRNA ワクチンでは、脂質ナノ粒子（LNP）がキャリアとして用いられた。分子に機能を持たせる分子ロボティクス、診断と治療を一体的に行うナノセラノスティクスの技術開発も見られる。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.2.2 生体関連ナノ・分子システム]

デジタル技術・データの活用

生命科学・臨床医学のビッグデータ化に伴い、それを解析し活用するデジタル技術の活用も高度化している。健康・医療の分野では、かつては医薬品と医療機器によるアプローチが主流であったが、2010年頃よりデジタルヘルス/ヘルステックの分野が台頭し、市場・産業としての存在感が急速に大きくなっている。これはデジタル技術とデータを使用して予防から治療までのヘルスケアの提供、および医薬、医療機器の開発を改善・向上させる取り組みであり、モバイルヘルス（mHealth）アプリ、電子医療記録（EHR）、遠隔医療、ウェアラブルデバイス、診断機器、研究機器などから生まれるデータを用いる。日本ではまだその広がりを実感しにくいものの、世界で多くのユニコーンが誕生し、この分野で様々なサービスを提供している。

表3-2 医療・健康分野におけるデジタル技術活用の広がり

| 大分類                           | カテゴリー                 | 説明                                                                                                                                                    |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新しい診療形態/データと洞察/インフラストラクチャーと運用 | 遠隔医療/遠隔モニタリング         | インターネットを介してオンラインで行われる診療。医療提供者とライブでついで診断や、デバイスを介した医療提供者による患者の状況の常時把握などがある。米国では一般ユーザー向けの医療サービスを提供する Devoted Health 社、Ro 社、Lyra Health 社など数社のユニコーン企業が登場。 |
|                               | RWD/RWE、異種データの相互接続・運用 | 日常的に収集される患者の健康状態および医療の提供に関連するリアルワールドデータ（RWD）とそれを分析して得られるリアルワールドエビデンス（RWE）の収集・流通・活用に関するプラットフォームやツールなど、産業的なエコシステムが構築されつつある。                             |
|                               | 臨床意思決定支援              | 医療専門家および医師の臨床意思決定を支援するために特別に設計された医療ITシステム。大規模言語モデル（LLM）の活用が注目されている。                                                                                   |
|                               | クリニカルトライアルテック/分散型臨床試験 | 治験に参加してもらう患者のリクルート、治験参加者のモニタリング、あるいは治験そのものをバーチャルなデータに置き換える対照群の生成などにより、臨床試験を効率化する技術・取り組み。分散的に臨床試験を行うためのツールを提供する企業が出てきている。                              |

|         |                          |                                                                                                                                          |
|---------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 検査・診断   | ポイントオブケア診断               | 新しい医療機器や <b>SaMD（プログラム医療機器）</b> ▼を用いて、検査室環境の外で行われる診断。糖尿病患者の血糖コントロールのモニタリングや、新型コロナウイルス感染症の迅速な診断ツールなど。こうした動きは「医療の民主化」とも表現される。              |
|         | デジタルバイオマーカー / ウェアラブルデバイス | ウェアラブルデバイス等を用いてモニタリングしたデータを、疾患や健康のバイオマーカーとして活用する。消費カロリー、心拍数、睡眠パターンといった健康指標だけでなく、加速度計を用いたパーキンソン病の発症予測などの研究開発もなされている。                      |
|         | リキッドバイオプシー（バイオマーカー）      | 血液や尿中の分子・細胞をバイオマーカーとして検査・診断に用いる手法。バイオインフォマティクスと機械学習の手法を用いて、がんの早期発見などへの活用が進んでいる。                                                          |
| 革新的な治療法 | デジタル治療 / 治療アプリ           | 臨床試験からの科学的エビデンスに基づき、ソフトウェア・プログラムを使用して治療介入（疾患の管理）を行うもの。SaMDの代表例であり、糖尿病患者向けの治療補助アプリ、小児注意欠如・多動症（ADHD）治療用アプリ、ニコチン依存症治療用アプリなどが社会実装されている。      |
|         | AI創薬 / データ駆動ハイスループット創薬   | AIを用いた新薬発見。2020年に立て続けにAI創薬に関する成果が発表され、現在AI開発の医薬品候補の第一波が臨床試験に入っている。                                                                       |
|         | プログラム生物学                 | ゲノム編集、ゲノム合成とAI・データサイエンスを用いて細胞内の遺伝コードを設計し、特定の機能を持つ細胞・微生物・タンパク質・核酸・化合物等を設計すること。とくに <b>AlphaFold2</b> に見られるような、AIによるタンパク質の立体構造予測と設計の進展が著しい。 |

■ CRDS-FY2023-RR-03「健康・医療トランスフォーメーション」

▶ **SaMD（プログラム医療機器）**

2013年にIMDRF（International Medical Device Regulators Forum）が、単体で医療機器として機能するソフトウェアをSaMD（Software as a Medical Device：医療機器としてのソフトウェア、プログラム医療機器）と定義し、従来から広く使われている医療機器の一部の役割を担うソフトウェアと明確に区別した。日本においても、2014年に薬事法が改正され、新たに施行された医薬品医療機器等法（薬機法）において、単体のソフトウェアも医療機器として認められることになった。

■ CRDS-FY2020-SP-01「デザイナー細胞」

標的探索や医薬品候補分子の最適化といった創薬研究の各段階をAI技術により効率化する**AI創薬**も本格化してきた。昨今、AI創薬と合成生物学（第4章も参照）が結びつき、設計、生成（合成）、評価、学習のサイクルが回せるようになってきた（**プログラム生物学**）。例えば香港に拠点を置くInsilico Medicine社は、データと深層学習による治療標的の特定、AlphaFoldによるタンパク質設計、標的の分子生成、初期段階の創薬実験までを自動化されたパイプラインで行う体制を自社内で構築している。

デジタル技術の活用に欠かせないのがデータである。EHR（電子健康記録）、レセプト（診療報酬明細書）、レジストリ（疾患登録システム）、患者報告、モバイルデバイスから得られるデータなど、患者の健康状態および医療に関連する**リアルワールドデータ（RWD）**が日常的に収集されている。それを分析して得られるエビデンスを**リアルワールドエビデンス（RWE）**と呼ぶ。RWDを統合し、様々な付加価値を生み出し、サービスを提供するには、個人レベルで横断的（医療機関などのデータソース間）、縦断的（通時的）な情報の統合、およびデータ利用者への流通が必要となる。諸外国では**健康・医療RWD利活用基盤**▼が確立し始めている。

### ▶ 健康・医療 RWD 利活用基盤

医療機関などで収集される RWD の 1 次利用（個人への医療・ヘルスケアサービス提供）や 2 次利用（集団のデータの研究利用とその社会実装）のためには、1）現場でのデータ収集を効率的に行う仕組みと、2）個人の異種データを統合し適切に加工（匿名・仮名加工）した上で流通する仕組み、が基盤となる。特に米国では、1 次データ収集者（医療機関、保険会社・組合など）同士での個人の健康・医療データの交換を仲介する事業者、統合した情報を集約・加工した分析用データを研究機関や製薬企業などへ提供する事業者といった、健康・医療 RWD の流通を担う民間プレーヤーが存在し、RWD 利活用基盤が確立している。様々な制度的・技術的なハードルはあるものの、日本に適した基盤の構築が急務となっている。

■ 2024 年発行予定「健康・医療リアルワールドデータ利活用基盤の構築と生成 AI への展開」

## ニーズを背景に高度化する医学研究

ここまで見てきたトレンドを背景に、個別の臓器や一つの疾患を越えた新しい医学が展開している。老化のプロセスを制御し、老化関連疾患の予防を目指す研究開発はその一例である。老化という現象そのものを創薬標的として捉え、生体内から老化細胞を選択的に除去する **senolytic 創薬** などの開発が世界的に進められている。

### ▶ 老化細胞除去創薬（senolytic 創薬）

近年の細胞老化研究の成果を踏まえた、生体内から老化細胞を選択的に除去する薬剤の開発。2015 年に、抗がん剤の一種で分子標的薬である dasatinib と、植物の特化代謝物である quercetin に老化細胞を選択的に細胞死へと誘導する作用があることが報告され、これらの薬物は senolytics と名付けられた。現時点ではマウスを対象とした研究成果であるものの、世界中で大きな注目を集め、バイオベンチャー設立、個人の投資家からの出資も相次ぎ、大規模な老化研究につながりつつある。

■ CRDS-FY2021-SP-06「加齢に伴う生体レジリエンスの変容・破綻機構」

情報技術を活用し著しい進展を見せているのが脳科学である。2010 年代には米国の BRAIN Initiative、欧州の Human Brain Project、中国の China Brain Project、日本の革新脳・国際脳プロジェクトなど、大型の脳プロジェクトが相次いで実施された。全脳の解剖学的・生理学的なデータ構築、さらに精密な全脳シミュレーションによって脳機能を解明し、効果的な治療を見出すアプローチが追求されている。脳科学は AI 分野との距離が近く（例：計算脳科学<sup>▼</sup>）、実験的研究と理論的研究が両輪で発展している。医療技術の観点からは、アルツハイマー病の治療薬が登場し、注目を集めている。

また、脳から情報を読み出し、脳に介入する **ニューロテクノロジー**<sup>2</sup> の産業応用が近年加速している。脳と機械をつなぐ **BMI（Brain-Machine Interface）** 技術はその中核をなし、人工内耳や人工網膜などの感覚機能の補完や増強を行う感覚型 BMI、脳活動から脳内の意図を解読し運動・コミュニケーション能力を支援する運動制御型 BMI が利用されている。医療を超えたニューロテクノロジーの活用が始まる中、その倫理的・法的・社会的影響の評価と対処を含む社会実装に向けた議論が国際的に活発化している。

■ ライフ俯瞰【2.1.11 脳・神経】 ■ ICT 俯瞰【2.1.7 計算脳科学】 ■ CRDS-FY2022-WR-06「ニューロテクノロジーの健全な社会実装に向けた ELSI/IRRI 実践」

## ▶ 計算脳科学

脳を情報処理システムとして捉えて、脳の機能を調べる研究分野。**計算論的神経科学**（Computational Neuroscience）とも呼ばれ、脳のメカニズムを計算論・アルゴリズムと表現・ハードウェア実装といった、計算機科学の概念を使って理解することを目指す。人工知能（AI）の分野と関係が深く、昨今のAIの中核的技術である深層ニューラルネットワークの理論的解明などにおいてもその成果が期待されている。Google DeepMind社は、AlphaGo、AlphaFoldをはじめ、革新的なAI技術を組み込んだソフトウェアを次々に開発して注目されているが、「知能の解明」を企業ビジョンとして掲げており、創業者デミス・ハサビス自身は脳科学研究での高い実績も有する。近年は神経科学（脳科学）とAIの交点に位置する分野を指して、「Neuroscience Inspired AI」や「NeuroAI」といった言葉も使われる。

■ ICT俯瞰 [2.1.7 計算脳科学] ■ CRDS-FY2019-RR-06「ドライ・ウェット脳科学」



# 4 | 材料科学と製造技術

## 章のサマリー

- 製造の起点となる材料の研究は、微小スケールの物性の制御と利用の追求を続けてきた。
- 高度化する材料への要求を満たすには広大な材料空間の探索が必要となり、データ科学とAI技術、シミュレーションを駆使したマテリアルズ・インフォマティクスが発展している。
- 今日の製造技術には機能だけでなく製品・サービスのライフサイクル全体での持続可能性への要求から、高度な分離技術とともにライフサイクルアセスメント（LCA）の高度化が望まれている。
- バイオテクノロジーは材料・製造の分野にも革新をもたらしており、特に農業・食料生産の分野では生物的硝化抑制（BNI）小麦などのインパクトのある進展が見られる。
- 生きた細胞をセンサーや治療技術、建材等の材料として活用する試みもトレンドとなってきた。

### 微小スケールでの物質制御・利用

材料（マテリアル）とは、何らかの有用な機能を持ち、何らかの用途に使うことができる物質を指す。材料の革新は、素材・製造産業の革新の起点となってきた。

材料の性質は、nm（ナノメートル）スケールでの原子・分子の配列から、mm（ミリメートル）スケールにおよぶ組織構造に至る非常に多くの要素によって決定されている。そのことを人類が知り、制御できるようになってきたのは比較的近代以降のことである。特に、20世紀初頭に登場した量子力学と20世紀後半以降の**ナノテクノロジー**<sup>1</sup>により、それまで経験的に蓄積されてきた材料に関する知識が、ナノスケールの物性の理解によって体系化され、それらを制御する新しい材料開発が可能になってきた。2000年代に入ると、米国の**国家ナノテクノロジーイニシアチブ（NNI）**、日本の第2期科学技術基本計画（2001年度）における「ナノテクノロジー・材料」の重点推進分野化など、各国は科学技術政策の重点分野に位置づけて研究開発を進めてきた。

ナノスケールでの電子、光、力学、熱、分子の特性を生かすための様々な技術が発展している。半導体集積回路のように、加工寸法を微細化することによる性能向上だけでなく、以下に挙げるような、ナノスケールで構造を制御することで初めて機能が発現する材料・デバイスが見出されている。

- **ナノスケールの力学の制御**：材料の力学特性発現機構をナノスケールに立ち戻って理解し、強度（劣化・破壊）や接着、摩擦・摩耗、自己修復などにおいて材料が本来持つ力学機能を最大限まで引き出す方向性の研究。これまでにない高性能・高機能・高耐久な材料や、新しい材料設計につながる事が期待される。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.4.3 ナノ力学制御技術] ■ CRDS-FY2018-SP-05 「トランススケール力学制御による材料イノベーション」

- **ナノスケールの熱の制御**：ナノスケールの微小空間、微小時間での熱（フォノン）の振る舞いを理解し、熱の高効率な利用を目指す**フォノンエンジニアリング**が、過去数年国内外で発展。高機能化するIT機器が発生する熱の処理や、IoTデバイスのための**エネルギーハーベスティング**<sup>2</sup>などの応用への期待が高い。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.5.4 フォノンエンジニアリング] ■ CRDS-FY2014-SP-04 「ナノスケール熱制御によるデバイス革新」

- **スピンの活用**：固体中の電子が持つ物理量である「電荷」と「スピン」を同時に活用する**スピントロニクス**が、1990年代以降のナノテクノロジーの発展により学理体系として構築された。熱スピン流に基づいた熱電変換を目指す**スピнкаロリトロニクス**や、物質のトポロジカルな性質に着目したスピン流の制御、量子状態制御への応用、スピン流を用いた人工知能デバイス研究なども進む。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.3.6 スピントロニクス]

1 **ナノテクノロジー**：概ね1～100ナノメートルの領域において、物質の構造を制御して合成・加工する技術を指す。  
2 **エネルギーハーベスティング**：周辺環境に存在する熱や光、振動などの微小エネルギーを利用して電力に変換する技術。

電子やスピンの状態を制御し、個々の量子的な性質を引き出すことで新たな機能を発現する物質・材料は**量子マテリアル**と呼ばれる。1980年代後半の高温超伝導フィーバーをきっかけに盛んに研究されるようになり、近年ではトポロジカル絶縁体をはじめとする**トポロジカル物質**▼、グラフェンなどの2次元物質群が注目されている。また次世代のセンシング技術としての**量子センサー**▼も実用に近づく。

#### ▶ トポロジカル物質

2000年以降、数学のトポロジー（位相幾何学）を物質系に適用することで、これまでの金属、半導体、絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相として「トポロジカル物質」が提唱された。代表例であるトポロジカル絶縁体は、物質の内部が絶縁体であるにもかかわらず、物質の表面にトポロジーに起因する電子の伝導状態を持つ。トポロジーの観点で物質を捉え直すことは、既知物質においても新現象や新機能につながりうるため、実用化検討の候補対象となる物質群が大きく拡張されることが期待される。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.5.5 量子マテリアル] ■ CRDS-FY2016-SP-02 「トポロジカル量子戦略」

#### ▶ 量子センサー

光学的現象や化学的反応ではなく、量子効果を利用するセンサー。とりわけ、ダイヤモンド結晶内部に設けた空孔が量子素子となる**ダイヤモンド Nitrogen-Vacancy (NV) 中心**は、新しい蛍光プローブとして注目される。ダイヤモンド NV 中心による光検出磁気共鳴 (ODMR) が1997年に報告されると、ドイツや米国などで基礎研究が進んだ。磁場、電場、温度、圧力、pHなどのセンシングへの活用が期待され、各国でスタートアップが多数立ち上がるほか、中国は10年ほど前から NV 中心の研究を本格的に実施。日本では筑波大学や産業技術総合研究所が材料面で成果を上げてきた。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.3.4 IoT センシングデバイス]

### データ・AI・シミュレーションによる新規物質の探索

近年、材料には多くの機能が求められている。高機能化だけでなく、大容量/小型/軽量、高速動作/高耐圧、高保磁力/高飽和磁化/高耐熱性、高強度/高靱性、高電気伝導/低熱伝導、高活性/長寿命といった、ときには相反する多機能の同時実現が要求される。こうした要請に応えるべく、材料開発は**複合化**や**多元素化**による新材料開発や、これまで未活用だった**準安定相**<sup>3</sup>など新たな物質相の開拓へ向かっており、新材料の候補を探す範囲（探索空間）が急拡大している。

広大な可能性を含む物質探索空間を、従来の実験科学を中心とした試行錯誤的手法で探索するのはもはや難しい。そこで、理論科学・計算科学・データ科学とAI技術を駆使したデータ駆動型物質・材料開発である**マテリアルズ・インフォマティクス**の考え方が出てきた。2011年に米国が**Materials Genome Initiative (MGI)**<sup>4</sup>を開始して以来、マテリアルズ・インフォマティクスの本格的な研究が始まり、様々な新規物質・材料の設計・探索における有用性が実証されてきた。例えば、リチウムイオン電池用の正極材料や固体電解質、水電解用電極触媒などの電気化学材料の探索に活用されている。材料そのものの探索にとどまらず、材料製造プロセスを探索・最適化する**プロセス・インフォマティクス**▼や、計測・解析を効率化する計測インフォマティクスとの連携の重要性が増している（図4-1）。

- 3 **準安定相**：物質のエネルギー的に最も安定した状態（最安定相）ではないが、一定の条件下では安定して存在する相。例えば、炭素が作る構造物のうちグラファイトは最安定相であり、ダイヤモンドやフラーレン、カーボンナノチューブは準安定相である。
- 4 **Materials Genome Initiative**：4つの塩基の組み合わせで構成される「生物ゲノム」になぞらえて、周期表で使用可能な118元素の組み合わせを探索することを米国政府は**マテリアルズゲノム**と呼んだ。MGIは、物質・材料研究にかかわる計算手法と情報解析手法の統合により、新材料の発見から製品化まで20年以上かかるといわれる開発工期の半減を目標に掲げた。

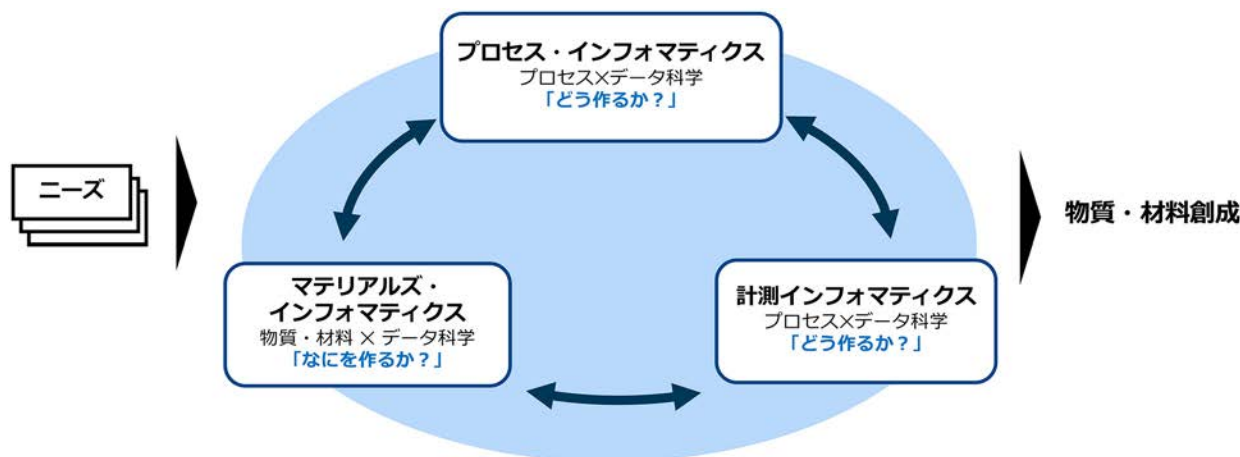


図4-1 データ駆動型物質・材料開発

#### ▶ プロセス・インフォマティクス

マテリアルズ・インフォマティクスによって所望の物性を持つ材料が予測されても、その実際の品質・性能は製造プロセス（合成温度、圧力、時間など）に影響を受ける。材料開発において、プロセスを定めるパラメータを毎回変更することはコストがかかるため、なるべく少ない合成の試行回数で効率的にプロセス・パラメータを最適化することが望ましい。データ科学を活用した効率的な材料合成プロセスの探索は**プロセス・インフォマティクス**と呼ばれ、近年活発に研究が進められている。

■ CRDS-FY2021-SP-01 「材料創製技術を革新するプロセス科学基盤」

また、広大な材料探索空間においてデータ駆動型材料設計・創製を行うために、実験DXの活用も重要となっている。ロボットなどによるハイスループット実験や、AI技術によるスペクトル解釈・画像解析、これらを統合した自律的最適化手法、さらにデータ蓄積・活用基盤は材料設計・創製に大きく貢献する。

**シミュレーション**（計算科学）の活用も進む。**第一原理計算**<sup>5</sup>などを用いて物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを解析・予測する**計算物質科学**は長年の歴史を持つが、近年では、データ科学の応用による手法の高度化も進む。日本のPreferred NetworksとENEOSは、汎用原子レベルシミュレーターMatlantisを共同開発し、材料開発者向けに提供している。また、これまでの第一原理計算が苦手としてきた、電子同士の相関の強い材料の電子状態や、周期的に並んでいない多数の原子集団によって決まる材料物性などについても、それらを取り扱う学理や手法の開拓が進み、多くの材料・デバイスの性質の解明、改良に役立てることができるようになってきた。

■ CRDS-FY2019-SP-02 「未来材料開拓イニシアチブ」 ■ ナノテク・材料俯瞰 [2.5.3 データ駆動型物質・材料開発][2.6.3 物質・材料シミュレーション]

### 持続可能な製造・生産

第1章で見たようにカーボンニュートラルや資源循環社会への移行（トランジション）が求められている中、あらゆる材料・製品に関する**ライフサイクルアセスメント（LCA）**<sup>▼</sup>の高度化と、ライフサイクルを意識した合成・製造・生産技術開発が進む。2010年代に世界で論点化した**プラスチックごみ問題**<sup>▼</sup>や、鉱山資源の低品位化の一方で、蓄電池用など特定の金属の需要が増加する材料のリサイクルの重要性が増している。そこでは混合物から目的成分を低エネルギーで取り出す、または不要物を取り除く**分離・分解技術**が鍵を握る。

5 **第一原理計算**：量子力学の原理に基づき、電子の質量、電荷やクーロン力などの基本物理量から物性量を直接導く計算のこと。実験値に合わせるための経験的パラメータの導入や原理的な裏付けのないモデル化を行わず、基本原理から直接物性量を導き出す。

### ▶ ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment：LCA）

ある製品・サービスのライフサイクル全体（資源採取—原料生産—製品生産—流通・消費—廃棄・リサイクル）またはその特定の段階における環境負荷を定量的に評価する手法。カーボンニュートラルやその他の持続可能な社会の実現に向けた技術・システムの開発や導入を検討するためには、現存しないライフサイクルの情報に基づくLCA（**Prospective LCA**などと呼ばれる）を実施しなくてはならず、そのためには何らかの仮定や推定、シミュレーションなどが必要となる。

■ 環境・エネルギー俯瞰 [2.9.5 ライフサイクル管理（設計・評価・運用）]

### ▶ プラスチックごみ問題

2014年頃から、海洋プラスチックごみ問題が国際社会で認識されるようになってきた。微細化したプラスチック片である**マイクロプラスチック**の生態系への影響が指摘され、EUは循環経済政策パッケージ（2015年）の一環として2018年に「循環経済におけるプラスチックのための欧州戦略」を打ち出すなど、積極的な姿勢を示してきた。アジア各国も廃プラ輸出入制限を強化している。そうした中、化石資源由来プラスチックからバイオマスプラスチックや紙等への転換や、海洋生分解性プラスチックの製造・利用のための材料技術ならびにリサイクル技術が重要度を増している。

■ CRDS-FY2019-SP-07「環境調和型プラスチック戦略」 ■ 環境・エネルギー俯瞰 [2.9.4 リサイクル]

日本では前世紀から様々な製品のリサイクルシステム構築が進んだ一方で、大量生産・大量消費・大量廃棄から大量生産・大量消費・大量リサイクルに移行しただけという側面もある。環境負荷の低い物質循環を実現するには、材料を作る側（動脈産業側）と分離・回収・リサイクルを行う側（静脈産業側）が一体として取り組む道を探る必要がある。資源に乏しい日本が世界に先駆けて打ち出したコンセプトに**元素戦略**▼があるが、これを大気中CO<sub>2</sub>削減なども含む「元素の循環をサステナブルかつコストエフェクティブに実現する」という大目標へと拡張した**次世代の元素戦略**が重要になっている。

■ CRDS-FY2020-SP-05「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御」 ■ ナノテク・材料俯瞰 [2.5.2 次世代元素戦略]

### ▶ 元素戦略

日本が2004年頃に提唱した、資源に恵まれないというハンデを克服しながら、我が国の材料技術に関する強みを発揮し続けることを目的とした戦略。希少元素を豊富な元素で置き換える「代替」、使用量を減らす「減量」、回収・再活用する「循環」、有害元素の使用に関する「規制」、新たな活用で引き出す「新機能」の5つの柱で構成した戦略。2010年の中国/レアアースショックを契機として世界から注目を集め、研究開発を国際的にリードした。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.5.2 次世代元素戦略]

## 持続可能なバイオ生産

バイオテクノロジーは、農業・食料生産およびその他のバイオ生産に革新をもたらしている。食料生産に関しては、（第3章でも触れた）2012年に発表されたCRISPR/Cas9による**ゲノム編集技術**と、様々な作物の**ゲノム解読**が新しい品種の開発を牽引してきた。生物に人工的に新たな機能を付与する**合成生物学**では、設計（Design）→構築（Build）→テスト（Test）→学習（Learn）の各ステップを繰り返して最適な遺伝子を実現するDBTLサイクルによる研究開発が定着してきた。Novozymes社（デンマーク）、Ginkgo Bioworks社（米国）などのバイオ企業はDBTLサイクルを本格的に実装し、市場を開拓している。

近年、世界各国が**バイオエコノミー**の戦略を打ち出し、日本政府も2019年に「**バイオ戦略**」を策定した。バイオエコノミーは、生物資源（バイオマス）やバイオテクノロジーを活用して、気候変動や食料問題を解決し、持続可能な成長を目指す概念である（ただし、バイオエコノミーの定義や戦略は各国・地域によって異なる）。EUでは、当初はバイオ由来品による化石資源代替を前面に出したが、2018年の戦略改訂以降は、バイオ生産そのものの持続可能性を重視するようになってきた。

現在、持続可能性は「持続可能性指標」と呼ばれる複数の項目で評価され、特に大量に使用される燃料



や食料の分野では**国際持続可能性炭素認証**（International Sustainability and Carbon Certificate: ISCC）等の第三者認証による運用がなされている（第7章も参照）。LCAに関する研究開発の進展により、どの化石資源由来製品をどのようなバイオ資源由来品へ代替することが、最も環境負荷削減に貢献するのかについて議論が始まっている。バイオ生産を無条件にサステナブルであるとみなす時代は終焉を迎えつつあると言える。

バイオ生産において、多項目の持続可能性指標を向上させるためには、農地をこれ以上拡大しないことが大前提となる。近年、そうした制約を満たす新たな生物資源の探索と改変をベースに、社会実装に成功した事例が散見されるようになってきた。**微生物による第2世代のエタノール生産**はその一例である。Clariant社（スイス）は2種の糸状菌をオンサイトで混合培養することで、非可食バイオマスを糖化する酵素のコストを劇的に低下させ、同時に遺伝子組換え酵母によって、従来の2倍量の基質をエタノールに変換することに成功した。これにより、従来に比べかなりの低コストで農業残渣を基質としたバイオエタノールの商用生産に成功し、積極的に各国に技術展開を続けている。LanzaTech社（米国）は、排気ガスを基質とした微生物発酵でエタノール生産する技術を開発し、海外へ技術移転を展開中である。

食料生産においても進展が見られる。例えば、土壌微生物を対象にした**マイクロバイーム**（第3章も参照）が農業の革新をもたらし始めている。日本の研究機関による、野生型小麦の遺伝子を活用した**生物的硝化抑制（BNI）**▼**小麦**の開発は世界の注目を集めた。

■ ライフ俯瞰 [2.2 農業・生物生産]

#### ▶ 生物的硝化抑制（BNI: biological nitrification inhibitors）

土壌細菌による硝酸化を抑制することで、窒素肥料による環境汚染対策となる技術。日本の国際農林水産業研究センター（国際農研）を中心とするチームは、2009年に熱帯牧草の一種ブラキアリアの根から土壌微生物による硝化作用を抑制する物質が分泌していることを報告した。この生物的硝化抑制（BNI）作用はトウモロコシや小麦などでも存在することが明らかとなった。国際農研はBNI能力を持つ野生型小麦と実用品種の小麦を交配することによって強化した**BNI強化小麦**を開発した。この成果は2021年の米国アカデミー紀要の論文賞を受賞している。

■ ライフ俯瞰 [2.2.5 植物栄養]

今後の方向性としては、膨大なゲノム情報の解析を通して、その進化系統を考慮しつつ形質とゲノム情報変化の関係を紐解く**パンゲノムアプローチ**による生物資源探索が有望であると考えられる。

■ 2024年発行予定「新生物機能とサステナビリティ研究で拓く持続可能な社会への道（仮）」

### 生物機能を活かす材料

材料としての生物にも注目が集まっている。組織工学技術に基づく再生医療材料や食用培養肉の製造は以前から試みられているが、近年では合成生物学と材料科学が融合した「**材料合成生物学**（Materials synthetic biology）」あるいは「**Engineered Living Materials**」と呼ばれる研究分野が、欧米や中国を中心に興っている。タンパク質、ペプチド、多糖類、脂質などの分子から、細胞や組織、個体に至る多階層の生物由来物質が利用され、その自己組織化能力を生かした材料として機能する。生細胞と人工材料を組み合わせた**Hybrid Living Materials**▼は広範な応用可能性が示されているほか、生体の一部（筋組織や感覚器など）あるいは生体そのものを駆動力やセンサーに利用したバイオハイブリッドロボットの研究も活発化している。

■ ICT俯瞰 [2.2.2 生物規範型ロボティクス]

### ▶ Hybrid Living Materials

生細胞（生きた状態の細胞）と人工材料を組み合わせた材料。生物に由来する超高感度・特異的な環境応答性や自己修復性、自己複製能力と同時に、人工材料由来の力学的頑強性を兼ね備えた機能性材料として期待されている。Livingセンサー、Living治療技術、Livingエレクトロニクス、Livingエネルギー変換材料、Living建材など、応用の幅は広い。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.2.1 人工生体組織・機能性バイオ材料]

## 5 | AI・ロボットで変わる科学

### 章のサマリー

- 近年、対話型生成AIの登場に見られるように人工知能（AI）技術の進展が著しく、高度な作業を行うロボットやラボオートメーション技術の開発も進む。研究DXの考え方も普及した。
- AI・ロボットを活用した新しい科学の方法論である「AI・ロボット駆動科学」は、論理推論や実世界操作などの実現を目指す次世代AIモデルの研究開発のフィールドとしても期待されている。
- AIの利用は研究開発の効率化や新発見の加速だけでなく、研究者ワークフローのAI支援、論文出版、研究評価、科学コミュニケーション、研究インテグリティ、シチズンサイエンス、メタサイエンス（科学の科学）など、科学の営みの多くの場面にも波及する。

### AIの急進展と、自律性を増すロボット

現代の人工知能（AI）の中核をなす**機械学習**で用いられるモデル<sup>1</sup>には、データが属するグループを同定する**識別モデル**と、データが創られる過程を学習する**生成モデル**がある。2010年代に深層学習が登場し、第3次AIブームが起こった当初は、画像認識や異常検知などを中心に識別モデルの実用化が大きく進展した。さらに、2014年のGAN（Generative Adversarial Networks：敵対的生成ネットワーク）の成功を契機に画像系の生成モデルの実用化が進み、実在はしないが本物のような画像・映像の生成、線画の自動着色・写実画変換、見えない面まで推測した3Dモデル生成などが可能になった。さらに、**拡散モデル**（diffusion model）によって安定して高品質な画像生成が可能になり、2022年にはText-to-Image型の高品質な画像生成システム（Midjourney、Stable Diffusion、DALL-E2など）の利用が一般にも広がった。

言語においては、2017年にGoogleが発表した深層ニューラルネットワークモデルの**Transformer**がブレイクスルーとなり、この仕組みを用いてOpenAIが2020年に**大規模言語モデルのGPT-3**を発表した。OpenAIは、その後2022年11月末に、GPT-3にfine-tuningと呼ばれる少数の例示による訓練を対話向けに実施した**ChatGPT**を発表した。ChatGPTは、自然言語の指示文（プロンプト）に対して、まるで人間のような自然な応答を返したり、専門家のスキルや知識を備えているかのような応答を返したりし、**生成AI**（generative AI）の大きなブームを引き起こした。

翌2023年には、国内外含め多くの大規模言語モデルが登場した。さらに、言語に他のモーダル（画像など）も対応づけられ、マルチモーダル性・汎用性が高まりつつある。大規模言語モデルを含む「大量かつ多様なデータで訓練され、多様な下流タスクに適応できるモデル」は**基盤モデル**（foundation model）と呼ばれるようになった<sup>2</sup>。

■CRDS-FY2023-RR-02「人工知能研究の新潮流2」

実世界で自律的に動くロボット技術は、20世紀半ばの産業用ロボットから始まり、家庭等で働く知能ロボットの研究開発が盛んになった1990年代、手術支援ロボットやロボット掃除機が開発された2000年代を経て、2010年代以降は、人工知能を搭載し自らの行動を判断、決定し動作する知能ロボットへの期待が高まってきた。特に日本では少子高齢化に伴う労働人口の減少を背景に、各産業分野の労働生産性を高めることが期待され、**開かれた環境で動作できるロボット**<sup>▼</sup>の開発が求められている。

■ICT俯瞰「2.2 ロボティクス」

- 1 **モデル**：機械学習の分野では、入力データをもとに出力を行うニューラルネットワークなどの仕組みを「モデル」と呼ぶ。
- 2 2021年に設立されたスタンフォード大学基盤モデル研究センター（CRFM: Center for Research on Foundation Models）による定義。

## ▶ 開かれた環境で動作するロボット

従来のような「閉じた環境」ではなく、物理環境や人との相互作用、ロボット自身の状態に制限がなく、またタスクが時々刻々変動する「開かれた環境」で動作するロボットの開発が進む。知能面では、**深層強化学習**や、それをシミュレーションで行う**Sim2real**、レーザー距離センサーや画像を用いた自己位置推定と周辺環境の地図構築を同時に行う**SLAM**（Simultaneous Localization And Mapping）の技術が進展している。ロボットを構成するハード面では、柔軟な材料に特有の機械的・電氣的・化学的性質を積極的に利用する**ソフトロボティクス**の方向性が探索されているほか、**包摂アーキテクチャー**などロボット自身と周囲の環境との相互作用を取り込んだ新しい制御のパラダイムも取り入れられている。

■ CRDS-FY2022-SP-02「リアルワールド・ロボティクス」

ロボットの動作を生成したり、制御したりするために深層学習を用いる取り組みが進展している。深層学習により環境センシングから動作生成までを一気に（end-to-endで）学習する帰納的なアプローチが登場し、活発に取り組まれるようになった。ばら積み部品のピッキング作業、衣類を畳む作業、車の運転操作を含め、様々な適用事例が示されている。また、この1年あまりは大規模言語モデルで用いられるTransformerに大量の動作データを学習させるRobotics Transformerの研究開発が急速に立ち上がった。GoogleとEveryday Robotsが2022年末に発表したRT-1（Robotics Transformer 1）は、ロボット実機13台を17カ月にわたって稼働して動作データを収集し、その大規模学習から700種類のタスクで97%の成功率を達成した。実機を用いた大規模学習によって、ロボット動作生成の汎用性が高められた先進事例と言える。今後、基盤モデルの活用はロボティクスにおいて非常に活発な研究開発領域になると考えられる。

## AI・ロボットと科学

AIとロボティクスの高度化と普及、さらに**計測技術の高次化**▼が進み、21世紀の科学のあり方は大きく変わろうとしている。IT化・デジタル化を駆使した研究開発プロセスの変革（**研究DX**、**リサーチトランスフォーメーション**）は研究開発の効率化だけでなく、様々な分野での新発見の促進や新しい科学の方法論をも生み出しつつある。

■ CRDS-FY2020-RR-06「リサーチトランスフォーメーション（RX）」

## ▶ 計測の高次化

計測は「科学の母（Mother of Science）」とも言われるように、あらゆる分野の科学の根幹をなす。今日の計測機器・システムは、温度・重量などの物理量を出力するだけでなく、その内部でデータの統計処理など分析まで行うようになっている。そのため、今日は計測の概念を、計測で得られた物理量に意味を与える「**意味的計測**」（例：位置データの住所・ランドマークへの変換など）や、物理量の分析結果に基づいて次のアクションの決定・実行まで行う「**自律的計測**」（例：ロボットやドローンを用いて計測を自律に行うシステム）にまで拡張すべき時代に入っている。

■ CRDS-FY2018-RR-03「計測の俯瞰と新潮流」

科学研究は、図5-1のサイクルでモデル化できる。実験（観測）によって得られたデータから新しい①**知識**を帰納し、既存知識と新知識から新たな②**仮説**が生み出される（仮説推論）。新しい仮説から検証可能な③**予測**を導き（演繹）、自然科学の多くの分野ではこれを④**実験**により確かめる。実験による検証では、仮説の採否が決まったり修正されたりするが、これは実験結果から帰納した新知識とみなせる。このように仮説検証により新発見や新知識を生み出すという科学研究のプロセスは、4つの要素とそれらの間の4つのプロセスからなる、検証済み仮説が蓄積・洗練されていくサイクルとしてモデル化できる。



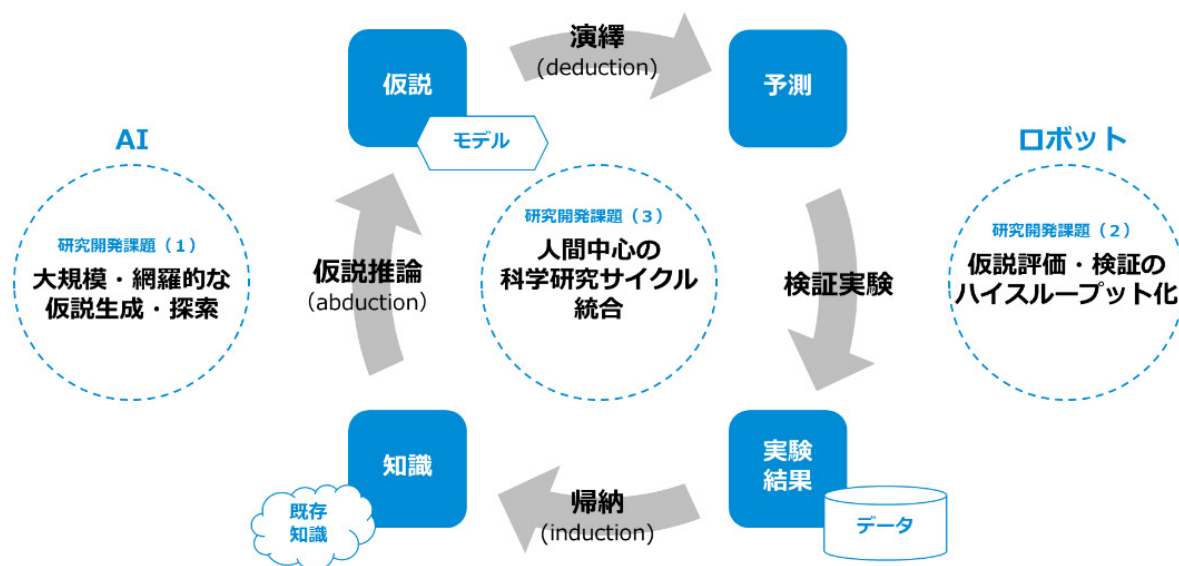


図5-1 科学研究サイクル

AIやロボティクスの高度化と普及は、このサイクル中の**仮説推論**<sup>3</sup>（図の左側）と**検証実験**（右側）に大きな変革をもたらすと期待される。具体的には、それぞれ以下のような可能性が考えられる。

- **仮説推論**：機械学習によって実験・観測データから抽出した規則性や、非常に多くの変数やパラメータによるモデルを既存の知識と照らして得られる新しい仮説を**大規模・網羅的**に生成できるようになる。これにより、広大な仮説空間の効率的な探索が可能になり、人間の認知限界・認知バイアスに制約されない科学的発見がもたらされる可能性がある。
- **検証実験**：ロボティクスを用いた実験の自動化技術や実験プロトコルの標準化、評価・測定機器のネットワーク化など、科学的発見プロセスを構成する様々な技術を一つのプラットフォーム上に統合することで**ハイスループットの仮説評価・検証**が可能になる。人間の科学者では操作が難しい高精度実験の実現や、再現性の確保にも大きく貢献する。生命科学では、ロボットによる実験の自動化とAIによる条件探索や最適化を組み合わせた**ロボティックバイオロジー**<sup>▼</sup>の取り組みが進む。

#### ▶ ロボティックバイオロジー

生命科学の一部では、ロボティックバイオロジーの名の下に科学の自動化に向けた要素技術の開発が進められている。2022年6月には理化学研究所を中心とする研究チームが、汎用ヒト型ロボットLabDroid「まほろ」と新開発の最適化アルゴリズムを組み合わせた自動実験システムを構築し、iPS細胞（人工多能性幹細胞）から網膜色素上皮細胞（RPE細胞）への分化誘導効率を高める培養条件を、人間の介在なしに発見できることを実証した。

■ ICT俯瞰 [2.1.6 AI・データ駆動型問題解決]

生命科学・医学分野では、新型コロナウイルスのワクチンの高速開発や安全・有効な薬の高速発見（第3章も参照）、材料科学分野では所望の機能を持つ材料の自動設計・最適化、入力された組成・構造の化合物の合成方法の自動決定（第4章も参照）にも活用されている。

3 **仮説推論**：図5-1のサイクルで「知識」から新しい「仮説」に至る過程は**仮説推論（abduction）**と呼ばれ、仮説から予測を導く**演繹（deduction）**や実験によって検証する**帰納（induction）**とは異なった推論形式だとされる。

システム生物学者の北野宏明は、「2050年までに生理学・医学分野でノーベル賞級の科学的発見をできるAIシステムを作る」ことを掲げる**Nobel Turing Challenge**を2016年に提唱し、英国のアラン・チューリング研究所（The Alan Turing Institute）は**The Turing AI Scientist Grand Challenge**プロジェクトを2021年に開始した。

**研究DX、データ駆動科学、AI・ロボット駆動科学、AI for Science、Automated Research Workflow**などの様々な概念で表現される科学へのデータ、AI、ロボットの活用を目指す動きは、近年の基盤モデル・生成AIのブームにより国内外で活発化している。基盤モデルの科学活用に関しては、既存の調整済みの基盤モデル（ChatGPTなど）をそのまま利用する方法、既存の基盤モデルをもとに対象分野のデータを追加学習させてその分野に適応させる方法、独自のコーパスを用いた事前学習を行って独自モデルを開発し利用する方法などが模索されている<sup>4</sup>。現在発表されている多くの事例では、言語モデルに内部表現を獲得させ、その表現を用いて構造予測・物性予測をする仕組みになっている。Transformerアーキテクチャーは時系列データからの学習にも効果的であり、気象予測や異常検知などのタスクで成果を上げ始めている。

米国科学アカデミー<sup>5</sup>、日本学術会議<sup>6</sup>といった学術界での検討のほか、創薬や材料など産業界でも取り組みが進む。Microsoft Research社は、英国、中国、オランダに拠点を置くAI4Scienceチームを2022年に設立し、機械学習と物理学・化学・生物学等の世界的な専門家を擁してAI科学の推進に取り組む。

■ CRDS-FY2021-SP-03「人工知能と科学」 ■ CRDS-FY2020-RR-01「デジタルトランスフォーメーションに伴う科学技術・イノベーションの変容」

## AIが変える、社会的プロセスとしての科学

AI技術は、科学の知識生産の自動化・自律化を進めるだけでなく、研究者が行う研究活動や、社会で営まれる科学の制度・システムにも影響をもたらす（表5-1）。大規模言語モデルなどを用いた研究支援ツールや、研究投資（ファンディング）やアウトリーチなど、社会や政策とのインターフェースにおいてもAI導入が始まる。同時に、生成AIが科学の実践に与える悪影響への懸念も指摘されている。研究の評価やファンディングなど、科学の社会的プロセスにおけるAI活用も盛んに議論・試行されている<sup>7</sup>。近年、世界中で進む**オープンサイエンス運動**とも相まって、科学におけるAI活用が一段と進展していくことが予想される。

- 4 例えばアミノ酸配列を学習したタンパク質言語モデルや、SMILES表記の分子構造を学習した分子言語モデルなど、アテンション機構が有効に働くようなケースへの基盤モデルの利用が試みられている。
- 5 National Academic of Sciences, Engineering, and Medicine. Automated Research Workflows for Accelerate Discovery: Closing the Knowledge Discovery Loop, The National Academic Press, 2022. <https://doi.org/10.17226/26532>（アクセス日：2023年11月1日）
- 6 日本学術会議（2022.12）「研究DXの推進－特にオープンサイエンス、データ利活用推進の視点から－に関する審議について」  
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-k335.pdf>（アクセス日：2024年1月23日）
- 7 例えばOECDは2021年に「AIと科学の生産性」というワークショップを実施し、科学の広範なプロセスにおけるAI活用の可能性について検討した。<https://oecd.ai/en/wonk/ai-future-of-science>（アクセス日：2024年1月23日）

表5-1 社会的プロセスとしての科学におけるAIの活用の可能性

| カテゴリー          | AI活用が可能・問題になる場面                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 研究者ワークフローのAI支援 | ●文献・情報を「探す」「出会う」「読む」「まとめる」「書く」工程のAI支援が進展<br>●言語の壁を下げる効果への期待も             |
| 論文出版           | ●査読プロセスへのAI導入                                                            |
| 研究評価           | ●種々の研究評価やグラント審査へのAI導入<br>●査読者の選定や、大学研究評価へのAI導入                           |
| 科学コミュニケーション    | ●ファクトチェックのためのツールとしてのAI活用<br>●平易な記事の自動生成                                  |
| 研究インテグリティ      | ●再現性・再生可能性の向上のためのAI活用（トラストマーカー有無の自動判定など）                                 |
| シチズンサイエンス      | ●人間の集合知とAI活用の関係性は今後の焦点に                                                  |
| 科学の科学          | ●科学計量学がデータ増大と機械学習やネットワーク科学等の手法を取り入れた「Science of Science（科学の科学）」として新段階に発展 |

▶ オープンサイエンス運動

オープンサイエンスは、科学の成果である論文へのオープンアクセス、科学の素材である研究データに関するオープンデータ、科学の実施主体を市民に広げるシチズンサイエンス、研究評価改革、途上国の科学へのアクセス確保などを包含するコンセプトであり、2010年代に世界中で進展した。研究データに関しては、各国の政府や資金配分機関が研究データ共有のポリシーを策定している。日本の政策もオープンデータ・オープンアクセスの方向に大きく舵を切っている。

■ TP2023Q203「研究データ共有（オープンデータ）の動向」

科学研究はどこへ向かうか

AI・ロボットを取り入れて変貌しつつある科学は、どこへ向かうのだろうか。科学サイクルの自動化・自律化にはいくつかの段階が考えられる（表5-2）。どのレベルにいつ達するかは分野によって変わると思われるが、その過程でいくつかの共通の課題に直面することが予想される。

- **ブラックボックス問題**：科学に限らないAI一般の問題として、深層学習ベースのAIシステムが下した判断の経緯や理由を、人間が理解することがほぼ不可能となる問題。AIシステムの判断根拠を可視化し、なぜその答えを導き出したのか人間に理解可能にするようにモデルに説明性を持たせる**説明可能AI（XAI）**技術が求められている。

■ ICT俯瞰 [2.1.4 AIソフトウェア工学]

- **因果推論**：特に現状のAIシステムは因果関係の推測が難しい。AI科学が、相関を超えて因果の探求に進むためには、因果推論が可能なAIの模索が必要となる。近年、因果推論の数理的研究は活発化しており、医学や経済学、金融等だけでなく、Webサービス関連、マーケティング、政治学、政策科学、材料科学、気候学、農学、製造業など多様な領域での応用が期待されている。

■ ICT俯瞰 [2.7.3 因果理論]

表 5-2 科学研究サイクルの自動化レベル

| レベル           | 説明                                                                                                                                               |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| レベル1（計算科学）    | 明示的に与えられたモデルに基づいて数値シミュレーションし、演繹によって予測を出力。                                                                                                        |
| レベル2（データ駆動科学） | 与えられたデータの統計性やパターンから帰納して、知識を抽出。                                                                                                                   |
| レベル3          | 特定の閉じた系で完全情報ゲームとしてAIシステムが探索・最適化を行う。関係する全ての要素のデータが揃っており、モデルに不明な変数はないと仮定する。ゴールや評価関数は人間が明示的に機械可読な形で与える。                                             |
| レベル4          | 開放系での不完全情報ゲームとしてAIシステムが探索・最適化を行う。環境との相互作用など、関係する全ての情報が必ずしも明らかでない。データの欠損やモデルに未知の変数があることも仮定する。レベル3同様に、ゴールや評価関数は人間が明示的に機械可読な形で与える。                  |
| レベル5          | 開放系での不完全情報ゲームとしてAIシステムが探索・最適化を行う。レベル4と同様に、関係する全ての情報が必ずしも明らかでない。これに加えて、ゴールや評価関数は間接的にしか与えられない。AIシステムは、ゴールや評価関数についての探索と最適化（メタ最適化）を行い、人間に提案することができる。 |

■ CRDS-FY2021-SP-03「人工知能と科学」

また、人間の科学者とAI・ロボットの協働のあり方は今後問題になるだろう。例えば材料分野のマテリアルズ/プロセス・インフォマティクスでは、材料組成や合成条件の広大なパラメータ空間を探索するために、試料作成、物性評価、パラメータの最適化を、人間の介在なしに機械のみによって行う**自律的最適化手法**（closed-loop operation）が使われ始めている。そのループのどこに人間が参加するのか、すべきかについては、**HMT**（Human-Machine TeamingないしHuman-AI Teaming）や**Human Robot Interaction**の分野からの検討が重要になるだろう。さらに、AI・ロボット駆動科学が進展した暁には、AIが「発見」した超多次元の規則性を人間には理解できないような事態も想定される。科学のAI化は「そもそも科学とは何か」という根源的な問いを我々に突き付けることになる。

■ ICT俯瞰 [2.1.5 人・AI協働と意思決定支援][2.2.5 Human Robot Interaction]



## 6 | コンピューティングの革新

### 章のサマリー

- あらゆる研究開発を支える「計算」へのニーズの高まりを受け、コンピューターの性能向上をどう維持していくか課題になっている。
- これまでの汎用型のノイマン型コンピューターに代わり、タスクに特化した計算ドメイン志向の技術開発が潮流になっている。
- 半導体デバイスに関しては回路の微細化の限界が近づき、3次元的な素子の積層や2次元材料の活用が期待されている。
- 量子コンピューティングは新たな計算パラダイムとして、この10年とりわけ注目されてきた。
- 近年の計算はネットワークを介して行われることが多く、計算と通信の融合が進む。

### 急増する「計算」への需要

これまでの章で見てきた社会課題解決に向けた研究開発や、新しい医療、素材・製造技術、科学の方法論に見られる変革は、大規模なデータやシミュレーションの活用を一つの主要な駆動力としていた。そうしたデータ活用やシミュレーションを可能にするのが**計算（computing）**である。

近年の人工知能（AI）技術の中核をなすニューラルネットワークでは、膨大なデータを大規模なネットワークで学習する必要があり、計算資源の量・質への要求はますます高くなっている。2010年までは機械学習で必要とされる計算量は2年で倍増していたが、大規模なニューラルネットワークが利用され始めた2010以降、計算量が倍増する期間が3～4カ月に短縮されている。さらに、第5章で取り上げた基盤モデルでは計算の量がAIの性能に直結することを示す**スケーリング則**<sup>1</sup>が指摘され、今後もAIの性能向上のために計算量への需要がますます高まると予想される。

一方で、1970年から**ムーアの法則**<sup>2</sup>に沿って向上してきたコンピューターの性能は、2000年代前半から半導体技術の微細化が鈍化してきたため、向上のペースに陰りが見られるようになってきた。また、計算量の増大に伴う電力や水資源の消費などの環境面の問題も大きくなっている<sup>3</sup>。

### ソフト・ハード統合技術開発

これまでのコンピューターは**ノイマン型**<sup>4</sup>の構成を採用し、用途に依らない汎用CPUチップを用いてきた。しかし、これまでのような半導体集積回路の微細化によるノイマン型コンピューターの飛躍的な高性能化・低消費電力化は難しくなりつつあり、新たなコンピューティング技術が求められている。

コンピューティングは、アルゴリズム・ソフト、実装・配線、回路・アーキテクチャー、デバイス・材料という複数の技術レイヤーからなる（図6-1）。ノイマン型に代わる新たなアーキテクチャーおよび数値計算方法、汎用CPUチップに代わる特定用途に最適化された半導体チップなどを開発することで、ある特定のタスクに

- 1 **スケーリング則**：基盤モデルの予測精度が、計算リソース、データセット規模、モデル規模という3変数のべき乗則に従うとする経験則。
- 2 **ムーアの法則**：集積回路の集積率（トランジスタ数）が1.5年ごとに2倍になるという経験則。
- 3 ただし、過去、ICTセクターの電力消費量は過大評価されてきた歴史がある。急速なデジタル化進展に伴うデータ量・計算量の指数増加に対応する様々な技術的対応により、データセンターと通信ネットワークの電力消費は2010年から現在まで大きな増加は見られていない。参考：■ CRDS-FY2021-RR-03「デジタル化とエネルギー」
- 4 **ノイマン型コンピューター**：演算装置、制御装置、メモリー、入力装置、出力装置とこれらの間を接続するデータ伝送機構からなるコンピューターの基本構成。数学者ジョン・フォン・ノイマンによって提唱された。今日の一般的なコンピューターシステムのほとんどがこのノイマン型を採用している。

特化したソフトウェアとハードウェアの組み合わせを追求する**計算ドメイン志向**の技術開発が潮流になっている。アルゴリズム・ソフトのレイヤーにおいて、ノイマン型に代わる計算方式として追求されているものを表6-1に挙げる。

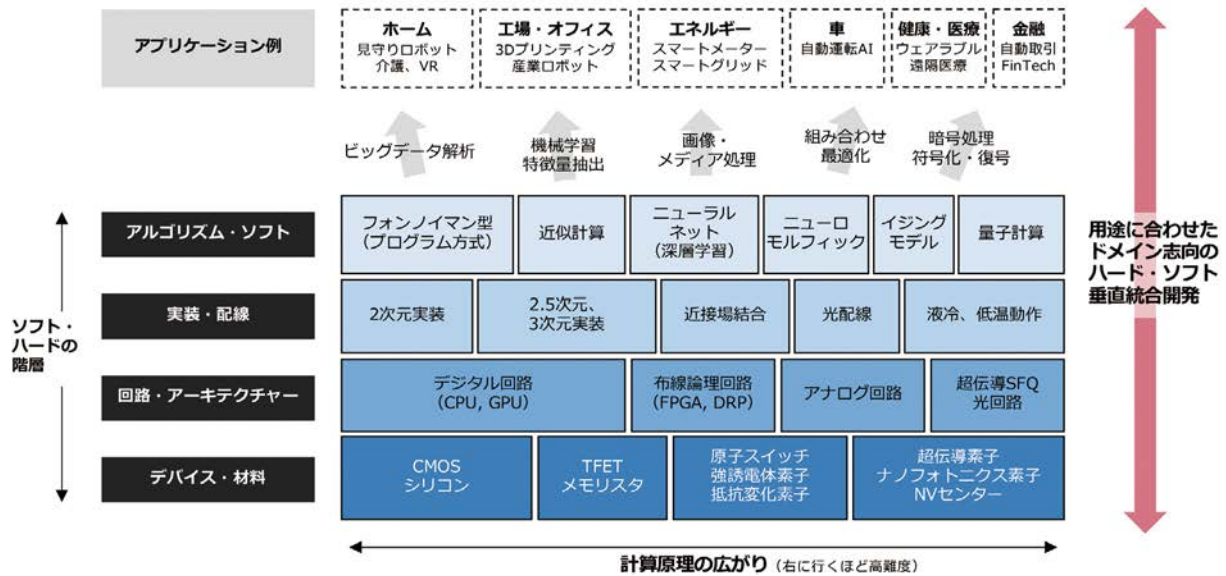


図6-1 ドメイン志向のソフト・ハード垂直統合技術開発

表6-1 新たな計算方式

| 計算方式                     | 説明                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| インメモリー・コンピューティング         | ニューラルネットワークなどのAIで行われる膨大な積和演算を、エッジ側のメモリーの中で実行する計算方式。ニューラルネットワークの重みをReRAM、MRAM、PCRAM、SRAM、FeFETなどメモリーに記憶し、メモリー内部で演算を実行するため、プロセッサとメモリー間のデータ転送が大幅に削減され、従来のGPUやCMOSベースのアクセラレーターに比べて大幅な低電力化・高速化が期待される。 |
| アプロキシメイト・コンピューティング（近似計算） | ある程度の不正確さ、エラーを許容しておおよその答えを求める計算方式。AI応用では、数%程度のメモリーの非線形性、エラー、ばらつきは最終的な認識精度の問題にならないことが示されている。その一種である <b>ストキャスティック・コンピューティング</b> では、論理回路で確率的な計算を行うことで、計算結果の正確さと引き換えに計算時間の短縮や低消費電力化を実現する。            |
| ニューロモルフィックコンピューティング      | 脳のシナプスの機能と発火（スパイク）の仕組みを模倣した計算方式を探るアプローチ。広義には以下のリザーバーコンピューティングも含む。                                                                                                                                |
| リザーバーコンピューティング           | 再帰型ニューラルネットワーク（RNN）の一種で、ネットワーク内部（リザーバー）の重みをランダムに固定し、出力部の重みだけを学習で決めることで、時間に依存する情報処理が可能になる。非線形の変換を担うリザーバー部には様々な物理現象を利用することができ、時系列予測や音声認識などの時系列の情報処理への展開が期待される。                                     |

■ ICT俯瞰 [2.5.1 計算方式]

その際、実際に高度な情報処理を低エネルギーで行っている人間の脳の構造や機能にさらに学ぶ（模倣する）ことが一つの方法となる。人間の脳の構造や機能を模倣、あるいは新たな情報処理のヒントを得ることで、

AI処理に特化したハードウェア（**アクセラレーター**<sup>5</sup>、チップ）を開発し、柔軟で高度な情報処理と低消費電力化の両立を目指すものである。

■ CRDS-FY2020-SP-04「脳型AIアクセラレーター」 ■ ナノテク・材料俯瞰 [2.3.2 脳型コンピューティングデバイス]

#### ▶ 計算ドメイン志向

特定の目的のために一連の技術を組み合わせて構成される計算機能を、計算ドメインと呼ぶ。リアルタイムの画像処理、画像認識、音声認識、自律制御などはその例である。特定の計算ドメイン向けにコンピューティング技術を最適化することで、高い性能・機能を発揮できると期待される。CRDSでは、2018年のプロポーザルにて計算ドメイン志向のソフト・ハード垂直統合技術開発を含む「革新的コンピューティング」を提案し、その実現の要素となりうる技術開発のための様々な提案を行ってきた。

■ CRDS-FY2017-SP-02「革新的コンピューティング」

### 新しいハードウェア：半導体デバイスの革新

これまで半導体デバイスが一貫した性能向上を続けてきた背景には、業界全体での目指す方向性を国際的に共有する技術ロードマップの存在が大きい。1988年から発行されてきた国際半導体技術ロードマップ（ITRS）は2017年にIRDS（International Roadmap for Devices and Systems）に引き継がれ、半導体デバイスの応用先であるシステムにまで対象を広げた技術開発の道筋を描き続けている。その2022年度版では、**CMOS**<sup>6</sup>ロジック/メモリーのデバイス構造・アーキテクチャーの現状とトレンド、次世代AIデバイス、脳型コンピューターへの応用、それらを実現するデバイス新構造や新材料、極低温動作の量子コンピューター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への言及が見られる。

これまで、回路寸法の微細化に加え、2000年以降は回路配置や構造の改良によってムーアの法則のトレンドが維持されてきた。しかし、微細加工技術はすでに数nmのレベルにまで達し、従来の2次元的な微細化ではなくトランジスタのチャンネルを3次元的に積層していく必要性が指摘されている。最近ではシリコン・ナノシートチャンネルを用いた**GAA（Gate-All-Around）構造トランジスタ（GAAFET）**<sup>7</sup>の研究開発が進んでいる。さらにその先の世代では、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）や2次元配列したカーボンナノチューブ（CNT）などの**2次元材料**<sup>▼</sup>をチャンネルに用いることが期待されている。

■ ナノテク・材料俯瞰 [2.3.1 革新半導体デバイス]

#### ▶ 2次元材料

3次元のバルク材料や通常の薄膜材料とは異なる2次元的な構造や特性を持つ材料。1nm世代以降の半導体においては、極薄（5nm以下）のナノシート、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）などの2次元物質、2次元的に配列したカーボンナノチューブ（CNT）といった2次元材料をチャンネルに用いることが期待されている。2次元材料に関する研究開発は、1990年代のCNTの発見、2010年のグラフェンに関するノーベル物理学賞の受賞などにより、世界的に活発になっている。

■ CRDS-FY2022-SP-06「半導体デバイス革新に向けた材料開発戦略」

- 5 **アクセラレーター**：特定用途向けの計算・情報処理を行う専用のプロセッサ。汎用プロセッサでの処理のうち計算負荷の大きなものをアクセラレーターに渡すことで、アクセラレーターが高速・低消費電力にその処理を実行し、結果を汎用プロセッサに返す。
- 6 **CMOS**：Complementary Metal Oxide Semiconductor（相補型金属酸化膜半導体）。電子が多いn型と正孔が多いp型のMOSトランジスタの組み合わせで構成される半導体回路の一種。消費電力が少なく、小型化・高集積化に適するため製造コストを安くできるといった利点から、現在使用されているCPUのほとんどがCMOSを採用している。
- 7 **GAAFET**：Gate-All-Around Field-Effect Transistor（全周ゲートFET）。電流が流れるチャンネルの4面をゲートが完全に囲んだ3次元構造を持つトランジスタ。現在主流のFinFETよりも短チャンネル効果の抑制が期待できる。2nmプロセスノード以降の半導体素子製造では不可欠とされる。

## 量子コンピューティング

過去10年とりわけ注目と投資を集めてきたのが**量子コンピューティング**(量子計算)である。量子コンピューティングは、状態の重ね合わせ、量子もつれ、量子干渉など、量子力学に特有の物理現象を計算原理に用い、従来のコンピューターでは不可能な情報処理を目指す新たな計算パラダイムである。

20世紀末、素因数分解や検索などの問題を効率的に計算できる量子アルゴリズム<sup>8</sup>が発見されたことで、量子コンピューティングの可能性に注目が集まった。現在の第2次量子コンピューターブームの火付け役は、2014年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）のグループによる超伝導5量子ビットデバイスでの実証だったと言われる。以降、量子コンピューターの研究は理論・実験両面でそれを「いかにつくるか」という工学的なフェーズに入った。

従来のデジタルビットに替えて**量子ビット**で演算を行う**ゲート型量子コンピューター**は、実現すれば従来のコンピューターの処理速度をはるかに上回る計算が可能になる。超伝導量子ビット、イオントラップ、冷却中性原子、光量子、シリコン量子ドットなど様々な方式が提案されており、それぞれ大規模化に向けた研究開発が進んでいる。

大規模量子コンピューターの実現には、複数の物理量子ビットにより冗長性を持たせた論理量子ビットを構成する**量子誤り訂正符号**が鍵となる。ただし、誤り耐性量子コンピューターの登場にはまだ時間がかかるため、現実的に手に入る誤り耐性無しの中間スケール量子コンピューターである**NISQ**<sup>9</sup>の開発が世界各国で進む。量子化学計算や機械学習などの実用的な計算で従来型コンピューターに対する優位性（**量子優位性**）を示すことが、量子コンピューティングの実用化に向けた重要な一里塚であるとみなされている。

巨大IT企業が量子コンピューターへの研究開発投資を拡大しつつある。IBMやGoogleが超伝導量子コンピューターの研究開発を進めているほか、AWSやMicrosoftは、様々な小規模量子コンピューターのクラウドでの提供を開始した。量子回路シミュレーター、プログラミング言語、ライブラリを含む**量子ソフトウェア開発キット（SDK）**が提供され、使用しようと思えば誰でも量子コンピューティングを体験できる時代となった。ハードウェア・ソフトウェアの両面のスタートアップも多数立ち上がっている。米国、中国、英国、フランス、ドイツ、カナダ、オランダ、オーストラリア、シンガポール、インド、韓国、など各国政府はそれぞれ独自の国家戦略を打ち出し、量子技術や量子情報科学への研究投資を行っている。

■ CRDS-FY2019-SP-03「量子2.0」 ■ ICT俯瞰 [2.5.3 量子コンピューティング] ■ ナノ材俯瞰 [2.3.5 量子コンピューティング・通信]

### ▶ NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)

おおむね50～100量子ビットのサイズの小規模なアナログ量子コンピューター。量子誤り訂正符号が実装されておらず、このまま大きくしても有意な計算結果は得られない。計算能力は限定的であるものの、誤り耐性量子コンピューターの登場にはまだ時間がかかるため、現実的に手に入る誤り耐性無しの量子コンピューター上で、論理誤りを許しながら、何らかの有用性のある計算を実行することが重要な研究開発テーマとされる。

■ ICT俯瞰 [2.5.3 量子コンピューティング]

## 通信と計算の融合

今日、計算が一つの端末で完結することはほぼなく、ほとんどの場合、そこにはネットワーク上の通信が介在する。2000年代以降、データ処理や様々なアプリケーションを、ネットワークを介してサービスとして提供するクラウドコンピューティングやクラウドサービスが広く普及し、2010年代以降もIoT（Internet of Things）、CPS（Cyber-Physical System）といった新たな概念のもと、様々な関連技術の研究開発や事

8 Shorの素因数分解アルゴリズム（1994年）とGroverの検索アルゴリズム（1996年）が、量子コンピューティングの第一ブームの端緒となった。



業化が進んだ。また、IoTやCPSで要求される低遅延性や局所的なデータ処理を実現する**エッジコンピューティング**<sup>9</sup>の可能性も模索されてきた。近年の5G（第5世代移動通信システム）やその先のBeyond 5Gに向けた研究開発、クラウドコンピューティングの成熟とエッジコンピューティングの台頭により、いわゆる「土管」としてのネットワークから、通信と計算処理を融合する「計算基盤」としてのネットワークへの変化が顕著となってきた。

■ ICT俯瞰 [2.6.5 ネットワークコンピューティング]

近年、注目すべき潮流として、通信・ネットワークにおける、GAFAM（Google, Apple, Facebook（現Meta）, Amazon, Microsoft）に代表される巨大IT企業の影響力の増大がある。こうした巨大企業やグローバルにサービスを展開するCDN（コンテンツ・デリバリー・ネットワーク）事業者がTier1<sup>10</sup>に替わる存在となる、ネットワークの**プライベート化（Privatization）**が進む。

一方、プライベート化と異なる志向性を持つ技術の潮流として、**ブロックチェーン**<sup>▼</sup>に代表される**分散台帳（DLT, Distributed Ledger Technology）**を用いた非集中型のアーキテクチャーが継続して検討されている。仮想通貨ビットコインの実装で初めて用いられたブロックチェーンは、仮想通貨以外の用途（**スマートコントラクト**）への拡張を経て、さらに安全かつ高信頼な社会基盤の実現を目指すフェーズへ移行している。一時の過熱した期待は冷めてきたという見方もあるものの、中央銀行デジタル通貨（CBDC：Central Bank Digital Currency）やNFT（非代替性トークン）やDAO（分散型自律組織）など、新しい金融や価値交換や組織形成を支える技術としての可能性に期待が持たれている。

■ ICT俯瞰 [2.6.6 将来ネットワークアーキテクチャー]

#### ▶ ブロックチェーン

ネットワーク上にデータのかたまり（ブロック）を鎖（チェーン）上に連結していく分散台帳の一形態。信頼できる第三者機関の代わりに暗号技術を使うことで通貨の直接取引を可能にし、暗号資産（仮想通貨）Bitcoinの実装に用いられた。暗号資産で使われた第1世代から、スマートコントラクト（契約の自動化）など価値交換以外の情報管理や処理を可能にした第2世代へと進展し、世界中で実証実験（PoC）やプラットフォーム構築が進んだ。現在、ハイプ期が過ぎたと指摘されるものの、巨大プラットフォームに支配されない非中央集権的なインターネットを目指すWeb3.0運動とも相まって、引き続き様々な活用が模索されている。

■ CRDS-FY2019-SP-09「次世代ブロックチェーン技術」 ■ ICT俯瞰 [2.3.1 デジタル変革]

- 9 **エッジコンピューティング**：ネットワークの末端（エッジ）で処理を行うコンピューティングのこと。ネットワークに接続されているデバイスの増加に従い、処理するデータ量が増加していくことが想定されるが、データを集約して処理を行うクラウドコンピューティングではシステム全体の負荷増大や処理遅延といった問題が生じる。これを避けるため、データが発生するエッジ（デバイス近傍）で必要な処理を行う技術の研究が活発になっている。自動運転や建設機械の遠隔制御、遠隔診療、ロボット制御など様々な応用が考えられている。
- 10 **Tier1**：インターネット上の全ての経路情報（フル・ルート）を保持する通信プロバイダー事業者の集合。



# 7 | イノベーションを生み出すプロセスの変貌

## 章のサマリー

- 昨今、イノベーションを起こすプロセスに大きな変化が見られる。スタートアップエコシステムや大規模研究開発拠点など、多くのステークホルダーが複層的に相互作用してイノベーションを生み出すモデルが分野ごとに登場している。
- 技術の社会実装を見据えたルール形成が早期から始まり、研究開発と両輪で進むものになっている。
- イノベーションを誘発する仕組みに関するイノベーションが求められ、イノベーション促進型調達や種々のカーボンプライシングなど様々な金融・経済・行政的な手法が試みられている。

## イノベーションエコシステムの進化

これまでの章を通して、社会からの要請や様々な技術革新が社会実装につながる研究開発を駆動していることを見た。研究開発が様々なイノベーションを生み、新しい経済的価値や社会課題の解決といったインパクトの創出が期待されるからこそ、研究開発は投資の対象となっている。今日、研究開発への投資がイノベーションを通してインパクトを生む仕組みがダイナミックに変化している。産業界においては、企業が自社の資源だけでの研究開発でイノベーションを生むことの限界がかねてから指摘され、オープンイノベーション<sup>1</sup>が広まった。各国の公的セクターも、産学官からなるイノベーションエコシステム▼をどう育むかを政策ゴールに置くようになってきた。

### ▶ イノベーションエコシステム

20世紀の終わりごろ、個別の産業を政策的に育成・発展させる産業政策に替わる発想として、イノベーションが生まれる土壌としての国内の産学官の相互作用であるナショナル・イノベーション・システム(NIS)という考え方が登場した。今日の科学技術・イノベーション政策で言及されるイノベーションエコシステムはNISを引き継ぎつつ、より広範囲にわたる相互作用と、トップダウンの設計・制御の及ばない自律的なアクターの相互作用というニュアンスが「エコシステム(生態系)」の比喩に込められている。多義性のある用語だが、CRDSの2021年のレポートでは「民間企業、政府、公的機関、大学、金融機関、投資家、起業家、市民社会など、多様なアクターが協働、競争を続け、イノベーションを誘発するように働く、相互作用と循環機能をもつシステム」と表現している。

■ CRDS-FY2021-RR-04「イノベーションエコシステム形成に向けた産学橋渡しの現状と課題」

イノベーションに対する産学の貢献のあり方は分野によって大きく異なる。ソフトウェア・ITとバイオ・創薬分野はスタートアップがイノベーションの中心となってきた。とくに技術の進展が早く、モダリティの多様化(第3章参照)が進む創薬分野▼では、製薬企業がスタートアップのM&Aによりイノベーションを成功させるモデルが2010年代に入って確立してきた。

■ CRDS-FY2022-RR-04「スタートアップエコシステムと大学」

1 オープンイノベーション：概念の提唱者ヘンリー・チェスブロウによれば、「組織内部のイノベーションを促進するために、意図的かつ積極的に内部と外部の技術やアイデアなどの資源の流出入を活用し、その結果組織内で創出したイノベーションを組織外に展開する市場機会を増やすこと」。

### ▶ 創薬分野のイノベーションエコシステム

多額の研究開発費を要する医薬品製造業や医療機器企業では、ベンチャー企業のM&Aが加速しており、その少なくない割合が大学、国研などアカデミア由来となっている。ライフサイエンスのスタートアップエコシステムの代表例と言える米国ボストンでは、ハーバード大学とマサチューセッツ工科大学(MIT)のキャンパスをはじめ、バイオベンチャー、メガファーマ、大企業、VC、スタートアップ支援組織、行政組織などが密集したエコシステムを形成し、知識を基盤とする産学官の集積と、人材、知識（技術）、資金の循環によるイノベーションの連続的な創出が実現している。

■ CRDS-FY2021-RR-02「近年のイノベーション事例から見るバイオベンチャーとイノベーションエコシステム」

多くの研究機関や企業が集積する大型研究拠点のメリットも顕在化してきた。食料生産分野においては、研究開発と教育、技術の社会実装までを担うイノベーションハブのワーゲニンゲンの**フードバレー**が特筆すべき存在である。8自治体を中心となって運営するフードバレー財団と、ワーゲニンゲン大学＆リサーチ等の大学および研究機関からなり、Unilever社やKraft Heinz社、Nestle社といったグローバル食品企業を含む3万以上の企業が参加し、食料生産の分野における産学官のイノベーションを生み出す体制を構築している。

■ CRDS-FY2020-FR-04「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2021年）」

ナノテク・材料分野においても、観察・評価・加工・制御の全てのフェーズにおける専門性をカバーする研究者集団や高額な装置を単独の研究機関や企業で確保することは困難になっている。そこで、複数企業・研究機関が参画し、コストやリスクを分散しつつ、多様な専門性を持つ研究者集団を形成し、知財の持続的な蓄積と相互利用ができるといった利点を生かした大型研究開発拠点によるオープンイノベーション指向の研究開発が実施されている<sup>2</sup>。

■ ナノテク・材料俯瞰 [1.3 今後の展望・方向性]

イノベーションエコシステムに関しては、データ・研究機器・人材といった研究資源のエコシステムも合わせて考える必要がある。また、研究支援、資金調達、研究コミュニケーションの改善といった研究開発のエコシステムの改善を志向する新たなアクターの登場も、国内外共通の潮流となっている。また、第1章でも触れたように、新型コロナウイルス感染症は危機時の政策形成におけるデータ流通の重要性を浮き彫りにした。

■ CRDS-FY2020-RR-07「研究機器・装置開発の諸課題」 ■ CRDS-FY2022-RR-03「拡張する研究開発エコシステム」

## ルール形成と両輪化した研究開発

研究開発を通じて生み出された新技術が社会で使われるためには、様々な法や制度やガイドラインといったルールが整備されなければならない<sup>3</sup>。ただし、今日の科学技術に関するルール形成や規範形成の議論は、技術開発が進んでから始まるのではなく、技術が萌芽的な段階から始まったり、そもそもルールへの適合性を考慮した研究開発が求められるようになっていく。また、ルール形成に向けた議題設定自体が、各国が多分野の専門家を巻き込みながら主導権を争う国際的競争の要素も併せ持っている。

■ CRDS-FY2023-SP-01「科学技術・イノベーションの土壌づくりとしてのELSI/IRRI」

- 2 世界の大型ナノテク研究開発拠点としては、欧州のIMEC（Interuniversity Microelectronics Centre）、MINATEC（Micro and Nanotechnology Innovation Centre）、北米のAlbany Nanotech Complex（ANT）、中国の蘇州工業園区（SIP）などがある。これらの拠点では、大学・国立研究機関と、デバイスメーカー、製造装置メーカー、材料メーカーなどが集結し、次世代のデバイスやプロセスを開発するためのエコシステムを形成している。
- 3 新興技術のガバナンスについて、第2章でも触れた。

- バイオ生産分野では、**持続可能性認証<sup>4</sup>**である**国際持続可能性カーボン認証（ISCC、ISCC plus）<sup>5</sup>**等が、今後のバイオマス製品の研究開発の方向性を大きく左右している。例えば、**持続可能な航空燃料（Sustainable aviation fuel: SAF）**に関するCORSIA規格（認証はISCCが担う）に対応するため、航空燃料の主たる原料には廃棄物、すなわち廃食油が選択されるようになった。欧州諸国は持続可能性基準の方向性に基づき、いち早く廃食油市場の独占と、廃食油の熱化学分解によるバイオオイル経由のSAF生産に関する研究開発に多大な投資を行った。

■ 2024年発行予定「持続可能な社会の実現に貢献するバイオ生産基盤技術開発（仮）」

- 材料分野では、2019年以降、欧州の化学品規制である**REACH規則**にナノマテリアルが本格的に対象となる中、EUはナノマテリアルを含む先端材料やそれらを複合的に組み合わせた新規物質を含む「**アドバンスドマテリアルズ**」というカテゴリーを設け、幅広い新材料の安全性の評価をする方向に議論が展開している。「**安全かつ持続可能な材料設計（Safe and Sustainable by Design: SSbD）**」のアプローチが掲げられ、製品の開発プロセス全体を通じて安全性と持続可能性を真に統合する、イノベーションプロセス全体としての再検討の必要性が提起されている。

■ ナノテク・材料俯瞰「2.7.1 ナノテク・新奇マテリアルのELSI/IRRI/国際標準」

現状、技術のルール形成に関しては欧州を起点とする動きが多いが、仮にEU域内のルールであっても世界の事実上の標準（デファクト）となるケースも多い<sup>6</sup>。研究開発とこうした（国際的）ルール形成は、時間差なく両輪で進むものになっている。

### イノベーションを誘引する仕組み

社会が求めるイノベーションが明確であっても、それを生み出す研究開発への投資が十分に集まらないことも多い。そこでは、イノベーションを誘発する仕組みに関するイノベーションが求められている。

例えば、感染症の予防・診断・治療技術は、その感染症の流行が潜在的可能性にとどまるうちは大きな市場形成を見込みにくく、開発に積極的に取り組む企業は限られる。そうした、社会にとっての潜在的なリスクである感染症への予防・診断・治療技術開発を促す上では政府による研究資金提供などのプッシュ型インセンティブや、製品買取保証などのプル型インセンティブなど、適切なインセンティブ設計を行うことが重要である<sup>7</sup>。スタートアップ支援策にも様々な制度が存在するが、公共調達の枠組みでイノベーション促進への寄与を目指す**イノベーション促進型調達**<sup>▼</sup>もそうした政策的手段の一つである。

- 4 **持続可能性認証**：生産者、製造者、取引業者、小売業者、サービス提供者が環境・社会・倫理・食品安全等の観点から優れた取り組みを行っていることを示す自主的なガイドライン。世界には600を超えるサステナブル認証規格が存在すると言われている。
- 5 **国際持続可能性カーボン認証（International Sustainability and Carbon Certificate: ISCC）**：グローバルなサプライチェーンにおいて、環境的、社会的、経済的に持続可能な、あらゆる種類のバイオマスの生産と利用の実現に貢献することを目的として、2008年にドイツの食料・農業・消費者保護庁の支援を受けて発足した。
- 6 「ブリュッセル効果」と呼ばれる。
- 7 現在、AMR（薬剤耐性菌）に対する治療技術開発において、政府によるプッシュ型/プル型インセンティブの議論が進んでいる。  
参考：CRDS 科学技術の潮流－日刊工業新聞連載－第187回「抗菌薬開発 採算性確保へ」  
<https://www.jst.go.jp/crds/column/choryu/187.html>（アクセス日：2023年11月10日）

### ▶ イノベーション促進型調達

イノベティブな新技術を用いた製品・サービスを、商業化前段階から公共調達制度の枠組みで活用することでイノベーションを促進し初期市場形成を促す、エコシステム形成に結びつけていくための政策的ツール。日本では制度整備がまだ十分に進んでいないが、EU、英国、ドイツ、米国、韓国では、法令・規則のレベルからイノベーション促進型調達のための制度を持ち、運用している。

■ TP20230601「科学技術イノベーション促進型公共調達制度の国際比較調査」

社会のトランジションに関わる研究開発への民間投資につながる**経済・金融的方法**の活用も大きく進展している。環境（Environment）、社会（Society）、および企業統治（Governance）の視点を取り込んだ投資活動である**ESG投資**はその代表例である。2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、排出権取引や炭素クレジットといったカーボンプライシング<sup>8</sup>導入の議論が本格化している。DACCS（大気中CO<sub>2</sub>直接回収・貯留）やBECCS（バイオエネルギーとCO<sub>2</sub>回収・貯留）、植林やブルーカーボン等のネガティブエミッション技術の社会実装や普及拡大にも、カーボンプライシングが重要であり、そのための**炭素市場価値の評価**<sup>▼</sup>に関する研究開発が今後求められる。

### ▶ 炭素市場価値の評価

排出権取引や炭素クレジットなどを機能させる上では、炭素市場価値の評価を適切に行う必要がある。例えば、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術をカーボンプライシングにより展開していくに当たっては、「炭素除去（大気中CO<sub>2</sub>除去）の価値」と「バイオマス特有の付加価値」についての検討が必要となる。欧州ではEU排出量取引市場、米国ではカリフォルニア州排出量取引制度などがあるほか、民間セクターが主導し運営するボランタリー市場がいくつか存在する。日本国内でも、自治体によるカーボンオフセット制度や、Jブルークレジットなどがあり、特に海草・海藻のブルーカーボン算定、認証・販売などは世界的に先行した取り組みとなっている。

■ CRDS-FY2022-SP-08「バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究」

本章で概観した以外の部分でも、世界の研究開発を取り巻く外部環境は大きく変化し、イノベーションの生み出し方は変わってきている。CRDSでは「何を研究開発するか」と同じくらい「どの主体が、どのように研究開発するか」を重視し、本章で例示したような「研究がインパクトにつながるシステム」に見られる激しい変化を、国内のステークホルダーと共有すべき重要な潮流として捉えている。

8 **カーボンプライシング**：炭素排出に価格をつけ、炭素排出者の行動変容を促す経済的手法。炭素税、排出量、取引、クレジット取引、炭素国境調整措置等がある。



## おわりに

以上、7章にわたって、今日の研究開発を取り巻く潮流を概観してきた。CRDSの調査活動の中から見えてきたものを、少ない紙幅に極めて高い圧縮率でまとめたものであり、あらゆる重要な項目をカバーするものではない。個別領域の詳細に関しては、該当するCRDS報告書（発行予定含む）を参照いただきたい。

これだけの分野の広がりを横断して俯瞰的に捉えることは、CRDSのようにそれをミッションの一つとする機関の構成員にとっても容易ではない。どうすれば、より見通しよく当センターの調査領域を一望できる発行物が作れるかという課題に対し、多くのメンバーがアイディアと知見を持ち寄りまとめたのが本報告書である。研究開発を捉えるフレームワーク自体も変化する中、2018年の報告書（序文参照）からの着眼点や構成の変更も試みた。

とはいえ、本報告書は研究開発の動向の2024年初旬時点でのスナップショットをとったものに過ぎず、今後も加速する動向については、今後の当センターの発行物にご注目いただきたい。また本報告書はあくまで定性的な動向を紹介するものであり、とりわけ日本の研究力向上など科学技術イノベーション政策上の喫緊の問題については、本書で見た技術的潮流に加え、研究開発のリソースやアウトプットに関する定量的な分析と考察も求められる。そうした異なる切り口からの俯瞰的な取りまとめに関しても今後試行を重ねる予定であり、他の発行物との相補的關係にあるものとして本報告書を有効活用いただければ幸いである。



## 作成メンバー

---

|       |       |                   |
|-------|-------|-------------------|
| 執筆    | CRDS  | ナノテクノロジー・材料ユニット   |
|       | 同     | ライフサイエンス・臨床医学ユニット |
|       | 同     | 環境・エネルギーユニット      |
|       | 同     | システム・情報科学技術ユニット   |
| 企画・構成 | 永野 智己 | (企画運営室 横断・融合グループ) |
|       | 丸山 隆一 | (企画運営室 横断・融合グループ) |

The Beyond Disciplines Collection

CRDS-FY2023-RR-06

---

# Beyond Disciplines

～CRDS が着目する研究開発の潮流 2024～

---

令和 6 年 2 月 February 2024

ISBN 978-4-88890-890-0

---

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp)

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp).

Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

FOR THE FUTURE OF  
SCIENCE AND  
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>