

# Beyond Disciplines

CRDS-FY2018-RR-02

JST/CRDSが注目する12の異分野融合領域・横断テーマ（2018年）



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

## はじめに

先人たちのかけがえのない科学的発見の積み重ねが、森羅万象を神話でなく、現実のものとしてきた。しかし、「無知の知」(ソクラテス)こそが科学の原点であり、新たな知の創出はさらなる未知の世界を拓ける。いつの時代も未踏に挑むのは若者たちであり、その志を忍耐強く見守らねばならない。

文部科学省の科学技術・学術政策研究所がつくる「サイエンスマップ」は科学の諸分野の関連性、活動度と発展性について様々に示唆する(図 a)。広い海の上に大きな陸があり、多方向に半島が伸び、大小の島々が浮かんでいる。しかし、この変動、消長する地勢図は論文指標に基づく近年の研究活動の一表現形に過ぎず、海底ではすべてが繋がっている。「科学は一つ」、自然界の普遍的原理に基づく営みに境界はない。この本質に目を背け、あえて学境をつくり頑なに守り続けるのは、大学、専門学会、そして研究者たち自身である。個々の独創研究に加えて、新たな価値の共創は今日喫緊の課題であるが、これを阻むものは近代科学の制度欠陥であろうか。まずは、既存の陸地間に橋を架け、効率的な船や航空便で人びとの往来を促すべきであるが、さらに急速に進化、発展を遂げる情報技術の徹底導入が不可欠であろう。

人間社会は公共に資すべく、政治、経済、教育、医療、食料、交通など様々な要素からなる基盤をつくってきた。その質の維持と健全な発展は「科学プラネット」を介する技術開発の貢献なくしてありえない。一方で、人類文明を保障する絶対的な地球環境条件も厳然と存在する (M. Leach, et al., 2013)。近年は、生存の条件が非線形かつ不可逆に変化し、喪失の危機にさえ曝されている。巨大自然災害のみならず、資源濫費、大気海洋汚染、温室効果ガス排出などの過剰な人為的活動による。そもそも仕組みが異なる社会的、全地球的環境条件が規定する脆弱な生活空間の中で、人類は果たして包括的、持続的な経済発展を堅持し得るであろうか。国・地域を問わず、現世代は社会総がかりで自らの倫理観を糺し、知を統合して後継世代に責任を果たさねばならない。科学技術界には、自身の発展のみならず、周辺の多様な社会が遭遇する未曾有の問題克服のために、広く建設的な対話、熟議を凝らし、その上で大胆かつ迅速に実践することが求められる。

CRDS はそのための実効性ある土壌を醸成したい。いくつかの具体的な提案を掲げる本報告書が一里塚になれば幸いである。

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 センター長

野 依 良 浩

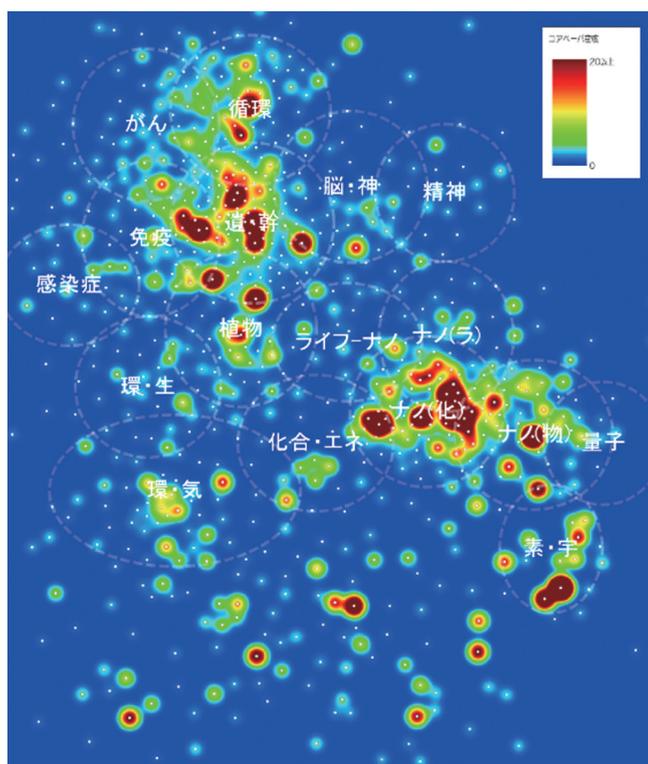


図 a サイエンスマップ 2014

出典：文部科学省 科学技術・学術政策研究所

## Reference

- 文部科学省 科学技術・学術政策研究所, サイエンスマップ 2014, NISTEP REPORT No.169, 2016 年 9 月
- M. Leach, K. Raworth and J. Rockström, "Between social and planetary boundaries: Navigating pathways in the safe and just space for humanity," *World Social Science Report 2013: Changing Global Environments*, (Paris: OECD and UNESCO, 2013)

## 【目次】

はじめに .....	1
1 報告書概要 .....	4
1.1 なぜ異分野融合なのか .....	4
2 CRDS が注目する 12 の異分野融合領域・横断テーマ (2018) .....	8
2.1 複雑社会における人間の意思決定を支える情報科学技術 .....	8
2.2 データ収集・活用を通じた社会課題解決に向けた研究開発 .....	12
2.2.1 エネルギーネットワークと IoT .....	12
2.2.2 データ統合生命・医学 (IoBMT) による個別予見医療 (Precision Medicine) の実現 .....	16
2.3 サイバーフィジカルシステム (デジタルツイン) を用いた次世代設計・製造技術 .....	20
2.4 これからのロボティクス .....	24
2.5 データ駆動型研究開発 .....	28
2.6 生命現象に迫る革新計測技術 .....	32
2.7 バイオ生産システム .....	36
2.8 水・エネルギー・食料問題の統合的解決のためのネクサス・アプローチ .....	40
2.9 物質・資源循環システム .....	44
2.10 分離工学 ～つくる技術と一体不可分で開発しなければならない分ける技術～ .....	48
2.11 バイオ材料工学 ～生体と材料の相互作用を制御する～ .....	52
2.12 研究システム・ラボ改革、融合を促進する R&D インフラ・リソースのプラットフォーム .....	56
3 国内外の制度・プログラム .....	63
3.1 日本の制度・プログラム例 .....	63
3.2 海外 (米、中、英、独、仏、EU) の制度・プログラム例 .....	69

# 1 報告書概要

## 1.1 なぜ異分野融合なのか

世界は今、VUCA 時代 (Volatility/ 不安定、Uncertainty/ 不確実、Complexity/ 複雑、Ambiguity/ 曖昧) といわれるほど、変化の早い・複雑で予測しにくい時代に入っている。一つの方向に、一つのやり方で進むことは、多様性と対応力が求められる現代ではリスクとなった。多様化・複雑化する社会にあって、人類・社会に求められる、または問題とされる事象の多くは、例えば SDGs がまさにその象徴であるが、歴史的な学問・学術の体系にもとづく深く専門・細分化された単一分野では面的に向き合うことが難しくなっている。このことは、1,000 以上もの学会組織が存在するといわれるわが国では、他の主要国に比して特に顕著なようである。科学技術が現代の様々な問題と向き合うには、これまで個々に発展してきた学問体系を越えて新しい分野を定義し取り組む、または複数分野の連携により新たな融合領域を生み出して取り組むことが求められる。そうすることにより、既存分野において新たな発見・進歩が誘発されることも期待できる。

他方、科学技術に関わる政策形成を担う行政組織は、既存分野や既存産業セクターに呼応して構成・運営されてきた歴史的背景がある。上述のような変化の早い複雑で予測しにくい現代社会においては、問題への即応が難しく、硬直化しているといった指摘も聞こえる。もちろん、既存分野・既存産業そのものの存在意義はそれぞれに認められ、それ自身が否定されるわけではないだろう。しかしこれらのことは、どこの分野・セクターでも真正面に向き合うことが難しい、すなわち既存専門分野や既存産業セクターが、「自らには関係ないもの」と互いに目をつむり合う構造を引き起こしている。例えば、ある専門分野の研究者は、「自分はこの問題の専門家ではないが・・・」と言い、わが国に見られる多くの伝統的組織では、「担当部署ではないので・・・」といつでも言えるようにしていなかったか。その発言が内包する問題に、気が付かないことも多いのかもしれない。これはいわば、個人・組織を問わず「自己都合による必要条件の矮小化」が構造的にいたるところで起きてしまうようになっているのである。

本報告書で扱う“融合”は、異分野間の水平連携または垂直連携の結果として生じる、水平分野間の融合や垂直レイヤー間の融合 (垂直の場合は統合といったほうが近いかもしれないが)、のどちらかに限らない。異なるステークホルダー間や異業種間など含め、様々な考えられる。昨今、“トランスディシプリナリー (transdisciplinary)” や “コンバージェンス (convergence)” などの関連表現が諸外国や国際的な場で用いられることが増えている。国内では“融合研究”の語が用いられることが多いが、本報告書では既存の“ディシプリン (discipline)” を越えて新たな融合領域を形成することへの期待から、“Beyond Disciplines” を表題とした。ただしこれらの語は、この文脈において必ずしも厳密な定義を持たない。本報告書ではいずれかに限定せず、これらの概念を包含する言葉として融合の語を用いている。いうなれば、社会的課題のように、ある目的のために融合を起こすことが必要な場合と、その目的のために既存のディシプリンを横断する場合があるし、その目的がなくともディシプリンの横断は自ずから起こる場合があるのである。そして横断の先には、融合が生じる場合がある。ただし、ある目的のための融合と、ディシプリンの融合とは、必ずしも同じではないということにもご了解いただきたい。また、融合領域というものはある日突然にしてできあがるのではなく、異なる分野や専門性が混ざり合い、年単位の時間を経て新たな輪郭を形成していくものである。その新しい輪郭は最初から存在するわけではない。対して、異なるディシプリンや専門家間の“連携”であれば、やると決めれば明日からでも手を携えて活動することが可能である。連携とは、もともとのディシプリンや専門構造を保ったままに、いわば境目を有したままに手を結び成果を生む活動である。融合が

すべてにおいて是というわけではなく、連携のほうが効果的というケースもある (図 1-1)。

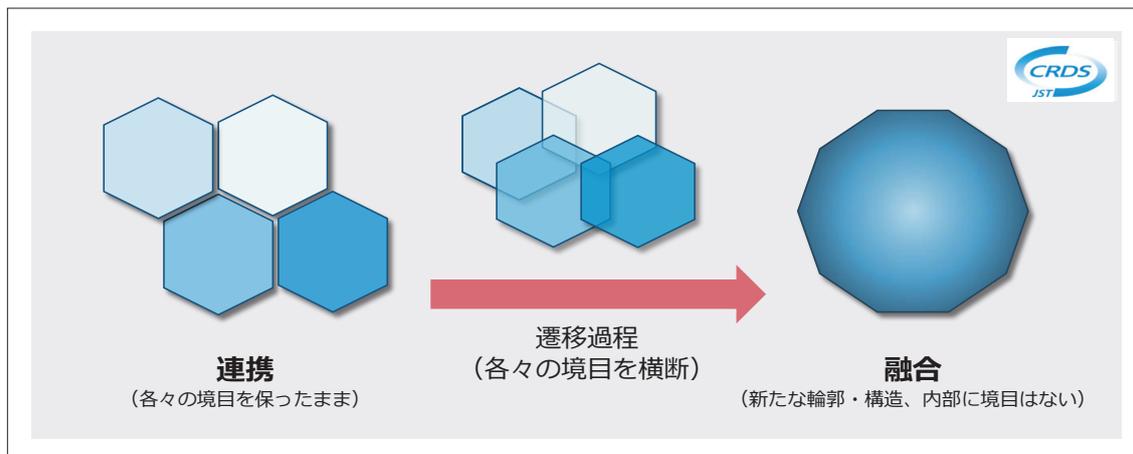


図 1-1 連携と融合

こうした背景認識のもと CRDS では、既存分野を越えて複数分野が連携・横断して取り組む、または融合領域を形成して取り組む動きを惹き起こすには、具体的にどのような異分野融合領域・横断テーマが求められるのか、あるいは見出されつつあるのかについて、いくつかの具体例を提示して広く示すことが第一歩としては重要であると考えた。そのうえで、個人のみならず組織の構造的な変化や新しい試行、制度設計の工夫などが、後の行動を呼び起こすために必要になることはいうまでもない。

報告書前半では、CRDS が 2018 年の段階で認識・注目している、12 の異分野融合領域・横断テーマ

表 1 CRDS が注目する 12 の異分野融合領域・横断テーマ (2018)

No.	融合領域・横断テーマ	融合を生み出すために越えるべき専門	社会実装へ共に行動する人・組織
1	複雑社会における人間の意思決定を支える情報科学技術	システム・情報科学、社会学、行動経済学、政治学、心理学	起業家・企業・事業者、 法律家、金融機関、 医療機関、農家・ 農業法人、行政機関、 NPO・NGO、学校・ 教育者、 デザイナー・ アーティスト、 多様な市民、 etc.
2	データ収集・活用を通じた社会課題解決に向けた研究開発 2.1 エネルギーネットワークとIoT 2.2 データ統合生命・医学 (IoBMT) による個別予防医療 (Precision Medicine) の実現	2.1 システム・情報科学、材料工学、建築学、電気工学、数学、経済学、社会学、心理学、医学、住環境学 2.2 生命科学、医科学、システム・情報科学、医療経済学、病院・医療管理学	
3	サイバーフィジカルシステム (デジタルツイン) を用いた次世代設計・製造技術	システム・情報科学、機械工学、物理学、材料工学、化学工学、金属工学、流体力学、電気工学、計測科学	
4	これからのロボティクス	ロボット・制御工学、機械工学、システム・情報科学、計測科学、材料工学、心理学	
5	データ駆動型研究開発	システム・情報科学、生命科学、材料科学、 etc.	
6	生命現象に迫る革新計測技術	計測・分析科学、システム・情報科学、生命科学	
7	バイオ生産システム	生命科学、システム・情報科学、農学、植物学、薬学、材料科学	
8	水・エネルギー・食料問題の統合的解決のためのネクサス・アプローチ	環境学、エネルギー学、工学、農学、生態学、社会科学、法学、経済学、システム・情報科学	
9	物質・資源循環システム	化学、工学、農学、環境学、生態学、材料科学	
10	分離工学	化学工学、金属工学、生物工学、機械工学、流体力学、エネルギー工学	
11	バイオ材料工学～生体と材料の相互作用を制御する～	生命科学、医科学・臨床医学、材料科学、機械工学	
12	研究システム・ラボ改革、R&Dインフラ・リソースのプラットフォーム	システム・情報科学、ロボット工学、経営工学	

マをピックアップし紹介している。掲載する 12 テーマは、近年の研究開発を広く俯瞰する過程でフォローしているテーマ、または CRDS が近年戦略プロポーザルとして提言したテーマ、あるいは提言化を進めつつあるテーマなど、一定の問題意識を持つものや、調査・分析を進めているものなから選んだ (表 1)。ここでご了解いただきたい点は、そもそも異分野融合・横断テーマを整理学的に網羅しようとするアプローチは適切でないということである。現代の社会的情勢や科学の発展段階を背景とし生まれては変化し、大小さまざまな範囲や構造を内包するものが、互いに影響し合うなか異なる水準の形成過程にある。したがって、それらは必ずしも線形的な対応関係を持たず、きれいに整理されるものではない。CRDS が社会と科学技術の動向を広く俯瞰しようとする活動の過程において、2018 年時点で注目しているものを掲載している。その際、特定の専門家・専門組織だけではない幅広い読者を想定し、できるかぎり簡潔かつ平易に表現することを試みている。

右図は、掲載した 12 のテーマについて便宜上の分布・位置関係を表現したものである。融合領域という特質上、「こちらにも関係すればあちらにも関係する」、元来そのようなものであって厳密性を欠くことをご了解いただきたい。あえてわかりやすさのために、横軸はより自然や地球へのインパクトを及ぼす内容か、ビジネスなどより人工的なものへか、縦軸は工業的か、人間そのものへか、という 4 象限でプロットしている。上述のとおりそもそも、融合領域の種類は網羅的に整理しうるものではないが、掲載テーマの広がりやばらつきを把握する一つの表現である。12 テーマの内、1～11 は研究のテーマに相当するが、12 は研究活動における共通基盤・仕組みに関する面を取り上げた。それぞれの項目で、融合・横断のポイントや、課題と方向性、海外動向を記載している。

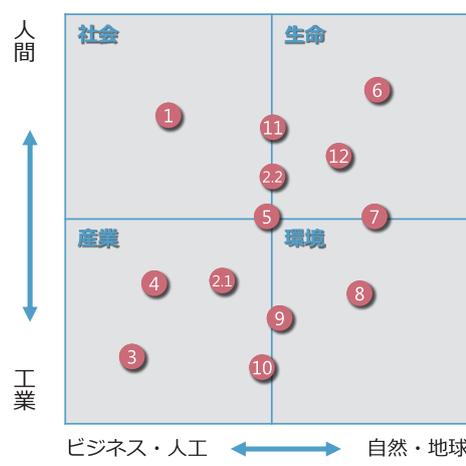


図 1-2 掲載テーマの広がり・分布

報告書後半では、国内外の制度事例を紹介する。諸外国でどのような制度的な取り組みがあるのかについて、日、米、中、英、独、仏、EU のいくつかの事例を取り上げている。例えば米国では、The National Academies が 2005 年に公表した報告書 “Facilitating Interdisciplinary Research” や、同じく 2014 年公表の報告書 “Convergence - Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond” などを出発点として、異分野融合が如何にして生まれ、そして如何にして価値創出をするのか、振興するのかといった視点から検討されている。これらを契機に様々な取り組みが開始されており、公的ファンディング機関がどのような目的や課題をもって分野横断や異分野融合に取り組んでいるのかという切り口で、主要なプログラムに言及する。

CRDS ではこれまでも関連の検討を重ねてきており、例えば「新興・融合科学技術の推進方策に関する戦略提言 社会的課題の解決と科学技術のフロンティアの開拓を目指して」および「新興・融合分野研究検討報告書 ～社会の課題解決と科学技術のフロンティア拡大を目指して～」をそれぞれ 2009 年に発行している。これらの検討から 10 年あまりが経過しているが、両報告書で取りまとめている内容は現在でも十分に効果的なものとして読むことが可能である。むしろ現在における内外の変化、例を挙げれば世界的な金融危機や各地における格差の拡大、巨大 IT プラットフォーマーの台頭、多発する自然災害、などを経ていっそう変化し複雑化する世界にあっては、より具体的なイメージをつかみながら異分野融合の方法論を検討するための一助として、併せて参照いただきたい。

## Reference

- Committee on Facilitating Interdisciplinary Research, Committee on Science, Engineering, and Public Policy. *Facilitating Interdisciplinary Research*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2005)
- National Research Council. *Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2014)
- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「新興・融合科学技術の推進方策に関する戦略提言 社会的課題の解決と科学技術のフロンティアの開拓を目指して」(CRDS-FY2009-SP-03) (2009 年 11 月)
- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「新興・融合分野研究検討報告書 ～社会の課題解決と科学技術のフロンティア拡大を目指して～」(CRDS-FY2008-XR-01) (2009 年 2 月)

## 2 CRDS が注目する 12 の異分野融合領域・横断テーマ (2018)

### 2.1 複雑社会における人間の意思決定を支える情報科学技術

#### (1) 概要

ますます複雑化していく現代社会において、個人・集団が主体性や納得感を持って意思決定できるような、情報科学技術を活用したより良い仕組みの実現が求められる。人間の活動において意思決定は生存さえも左右する根源的な行為であるが、今日、社会環境が複雑化し、難しい意思決定に直面するケースや意思決定ミスを起こすリスクが増えている。そしてその原因の一つに、情報科学技術の発展が関わっている。情報爆発や社会のボーダーレス化により、意思決定に関わる要因・影響にさまざまな可能性が生じ、その広がりが人間の頭では考えられないほどになった。また、悪意・扇動意図を持って他者の意思決定に影響を与えるような情報操作が容易になってしまい、ソーシャルメディアを介したフェイクニュースや“デジタルゲリマンダー”と呼ばれる行為が、世論形成や選挙結果に影響を及ぼし、社会問題化している。

急速に発展した技術が社会に普及していく過程では、効用（光の面）だけでなく弊害（影の面）を伴うのが常である。わが国が目指す社会像 Society 5.0 は情報科学技術に支えられたものであるが、その健全な発展のためには、影の面への対策が必要であることを忘れてはいけない。人間の意思決定に関わる、上で述べた問題に対してもこれが強く求められ、人工知能（AI）技術をはじめとする情報科学技術を進化させつつ、人文・社会科学と連携することで対策を講じる動きが生まれている。加えて留意すべき点は、AI にすべてを任せてしまうのではなく、人間が主体性・納得感を持って意思決定できるようにすることが、人間中心の Society 5.0 につながるということである。これを踏まえ、図 2-1-1 に現在の問題と目指す姿を例示した。

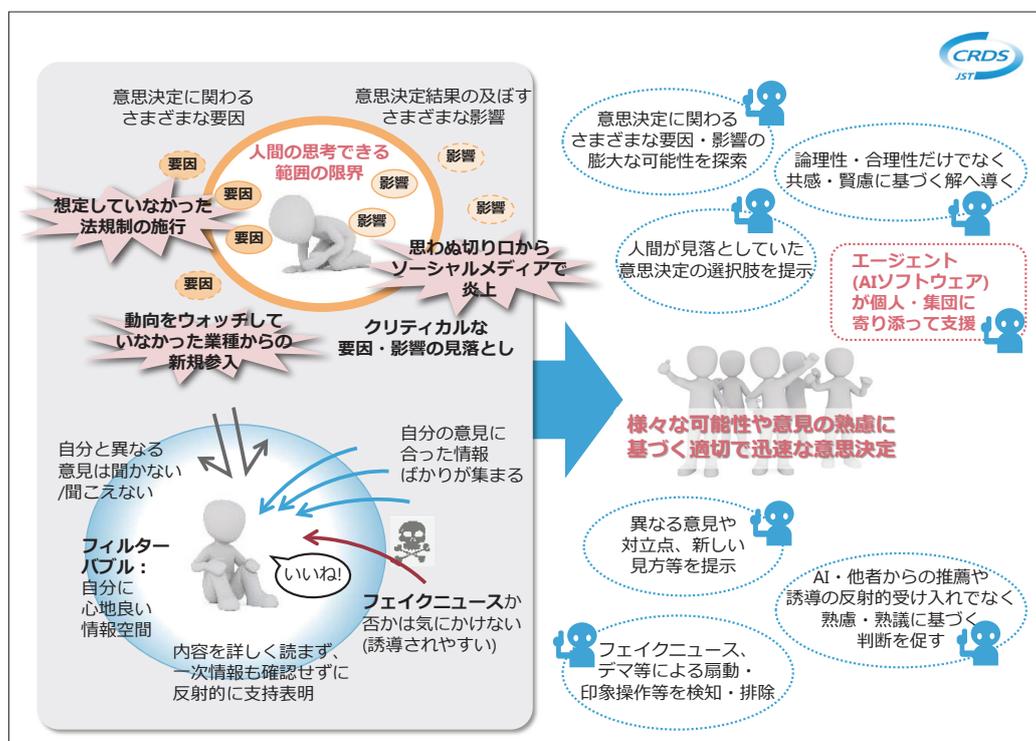


図 2-1-1 情報科学技術の発展と意思決定：現在の問題と目指す姿

## (2) 融合・横断のポイント

我々は日々さまざまな場面で意思決定を行っている。そして、クリティカルな場面での意思決定ミスは個人や集団の状況を悪化させ、その存続・生きさえも危うくする。例えば、企業経営における意思決定ミスは、企業の業績悪化・競争力低下を招き、国の政策決定・制度設計における意思決定ミスは、国の経済停滞や国民の生活悪化につながる。また、個人の意思決定における判断スキルや熟慮の不足は、その個人の生活におけるさまざまなリスクを高めるだけでなく、世論形成・投票等における集団浅慮という形で、社会の方向性さえも左右する。

このような人間・組織・社会にとって根源的な個人・集団の意思決定問題は、主に人文・社会科学の分野で古くから取り組まれてきた問題である（例えばノーベル経済学賞を受賞したハーバード・A・サイモンの研究等）。しかし、今日、(1) で述べたような情報科学技術の発展と社会環境の複雑化に伴い、情報科学技術と人文・社会科学の融合領域・横断テーマとしての取り組みが不可欠になった。

情報科学技術の視点からは米ガートナー社が、データに基づく問題解決の発展を ①記述的分析（何が起きたか?）、②診断的分析（それがなぜ起きたか?）、③予測的分析（これから何が起きるか?）、④処方的分析（では何をすべきか?）という 4 段階で捉えている。④はまさに意思決定問題であり、ガートナーは④をさらに、コンピュータが何をすべきかを決めて自動実行まで行う「自動意思決定」と、コンピュータが行うのは選択肢やそれに準ずる情報を提示するところまでで、最終的な意思決定・実行は人間が行う「意思決定支援」という 2 タイプに分けている。これらは問題の性質の違いによって分かれる。すなわち、コスト削減、売上向上、期間短縮、的中率向上のような明確な評価軸が定められるケースは、その評価軸において最適解を見つけることができれば、それを自動選択することで「自動意思決定」が可能になる。これに対して、明確な評価軸が定められないケースや、人それぞれに応じて評価軸が異なるケースは、最終的な意思決定は人間に任せる「意思決定支援」という形が適する。



図 2-1-2 意思決定問題の分類

ここで評価軸は、意思決定に関わる人間の価値観に対応する。意思決定に関わる人間の価値観の視点から意思決定問題を分類したのが図 2-1-2 である。図 2-1-2 の (A) は、価値観が共有されている状況下で、解が一つに定められるタイプの問題である。「自動意思決定」が可能になるのは、この (A) タイプの意思決定問題であり、現在、AI 技術の実用化が進んでいるのは主に (A) タイプの問題である。それに対して図 2-1-2 の (B) は、社会的価値観やさまざまな人間の価値観が混在している状況下での意思決定問題であり、「意思決定支援」という形が適する。この (B) タイプの問題では、AI 的な論理性・合理性だけでなく、人間の多様な価値観の間の相互作用（例えば共感・賢慮等）を想定したモデル・理論が必要になる。そのため、人文・社会科学との連携が不可欠になる。

### (3) 課題と方向性

(1) で述べたように、意思決定の困難化（意思決定ミスを起こすリスクの増大）という問題が深刻化していることに対して、「ますます複雑化していく現代社会において、個人・集団が主体性や納得感を持って意思決定できるような、情報科学技術を活用したより良い仕組みの実現」に向けた研究開発の推進が求められる。

このビジョンに向けた取り組みを図 2-1-3 に示した。現状の問題とビジョンは上述の通りで、現状の問題が生じるようになった主な原因は、(1) でも述べたように、情報科学技術の発展を背景とした「意思決定に関わる要因の可能性や意思決定結果の影響の可能性が膨大化」（図の原因 1）と「悪意・扇動意図を持った、他者の意思決定に作用する情報操作が容易になったこと」（図の原因 2）と考えられる。これら 2 つの原因への直接的な対策となる研究開発課題として「膨大な可能性を探索し、有効な候補を高速に見つける技術」や「悪意・扇動意図のある情報操作への対策技術（回避、耐性向上）」がある。

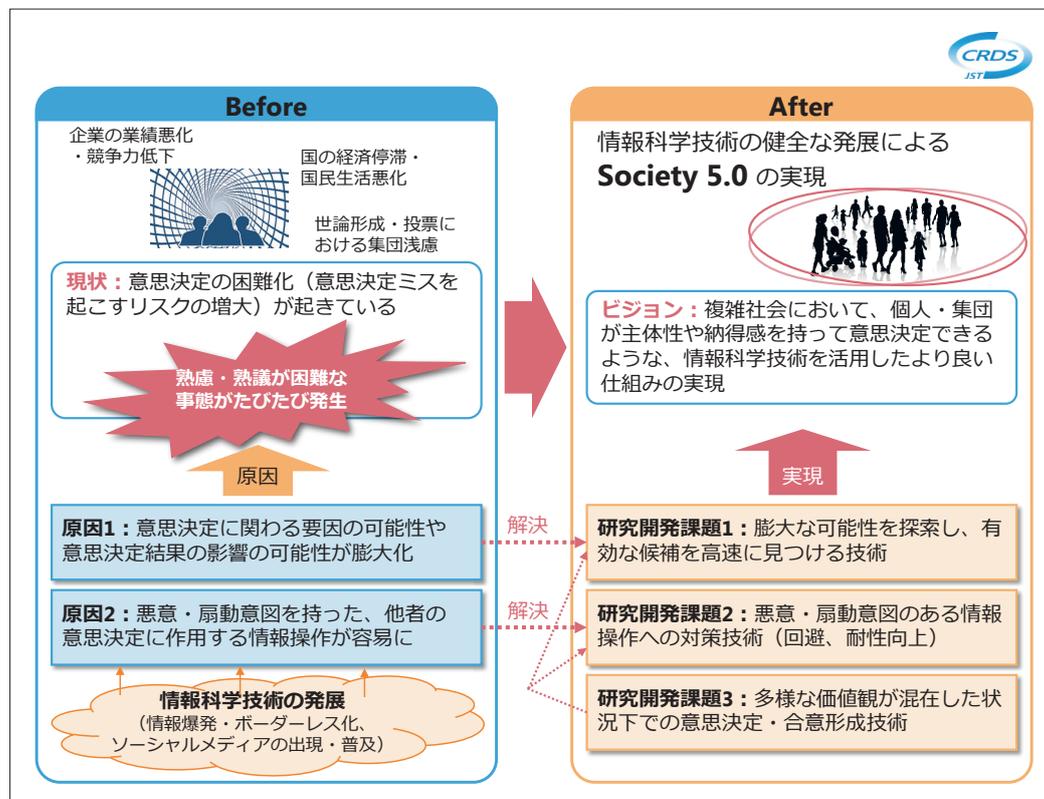


図 2-1-3 ビジョンと研究開発課題

さらに、(2) や図 2-1-2 で述べたような側面を取り込むため、3 つめの研究開発課題として「多様な価値観が混在した状況下での意思決定・合意形成技術」も重要である。

このような社会課題解決は、特定の技術シーズで解決できるものではなく、複数通りの技術的なアプローチを並行して試し、筋の良いものを見極め、それらを組み合わせて解決策を生み出していく「問題解決型の基礎研究」として推進することが必要である。それは必然的に異分野融合領域・横断テーマとしての取り組みになる。

#### (4) 海外動向

ビッグデータや AI を活用したデータ分析ソリューションは、より大きな価値を提供するため、(2) で述べたように、米国大手コンサルティング企業ガートナーがいう処方的分析、すなわち、自動意思決定や意思決定支援へと向かっている。それを支える基礎研究としても、AI・機械学習技術に大型投資がされていることに加えて、人文・社会科学と融合した取り組みも進んでいる。具体的には、米国では、MIT Center for Collective Intelligence (CCI) のオンライン大規模意見集約、スタンフォード大学の討論型世論調査等の取り組みがあり、欧州でも、自動交渉に関する基礎研究・応用 (Imperial College London、Oxford University、Centrum Wiskunde & Informatica 等) に加えて、市民からの意見集約・合意形成のためのシステム (Citizen Science) への取り組みが盛んに行われている。

また、米国は、政治やジャーナリズムと AI・情報科学技術との関わりという面での議論や融合的取り組みが進んでいることも特徴である。今後、企業経営、政策決定、研究開発、安全保障等のさまざまな意思決定シーンにおいて、情報科学技術を活用した適切で迅速な選択肢の生成・評価が国際競争力を左右することになっていくと考えられる。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術」(CRDS-FY2017-SP-03) (2018 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「ワークショップ報告書 複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術」(CRDS-FY2017-WR-05) (2017 年 10 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-04) (2017 年 3 月)
- ・ 福島俊一, 藤巻遼平, 岡野原大輔, 杉山 将「ビッグデータ × 機械学習の展望: 最先端の技術的チャレンジと広がる応用」(情報管理 60 巻 8 号, 2017)

## 2.2 データ収集・活用を通じた社会課題解決に向けた研究開発

システム・情報科学は汎用的な基盤技術であり、様々な分野で様々な効果を発揮し、多様なイノベーションを加速する。エネルギーや交通などの社会インフラや、行政、住民サービスといった社会システムを改善し、効率化・高付加価値化を実現する。さらに、ライフサイエンスやナノテクノロジー・材料といった諸分野の研究開発の欠かせないツールとしてはもちろんのこと、新たな異分野融合領域・横断テーマを創生するドライバーとして、様々な形で研究開発活動にも貢献する。

コンピュータの小型・軽量・高性能化が進むことで、機器のスマート化とデータのデジタル化が進み、IoT の普及により大量のデータの収集と解析が可能になった。スマートデバイスは、インターネットに接続された他のスマートデバイスとやり取りしながらエッジコンピューティングデバイスとしての役割を担い、リアルタイムな制御を行うシステムを可能としている。また、ビッグデータの活用方法を技術的な視点で見ると様々なタイプがある。その一つとして、ビッグデータを知識として大量に蓄積・構造化し、それらを組み合わせた判断・推論からアクションを導く大規模知識集約型がある。IBM の質問応答・意思決定システムの Watson がこの型の代表例である。2016 年、医療機関での治療で回復が芳しくなかった患者について、Watson による診断支援結果を活用した治療方法を実施したところ、回復につながったと報じられている。

以下では、データ収集・活用を通じた社会課題解決に向けた研究開発の例を 2 つ紹介する。1 つ目は、IoT の浸透によるリアルタイムなデータを収集・活用・制御が期待される電力に代表される「エネルギーネットワークと IoT」について。2 つ目は、ビッグデータ・AI を研究開発に活用する「データ統合生命・医学 (IoBMT) による個別予見医療 (Precision Medicine) の実現」を紹介する。ここに挙げた例以外にも、研究開発の加速や、社会課題解決に向けた様々な異分野融合領域・横断研究が急速に拡大・進展している。

### 2.2.1 エネルギーネットワークと IoT

#### (1) 概要

エネルギーは大規模集中型の供給者から多数の需要者 (消費者) に送るネットワークシステムの基本構造を持つ。このためネットワーク上に存在する機器やセンサー類の「モノ」に対して、IoT としてこれらのモノ同士が情報ネットワークでつながることで様々なメリットが得られる可能性がある。特にリアルタイムでエネルギーを伝送する電力ネットワークにおいては、IoT を活用することで、①系統運用と呼ばれる電力需給バランス調整において、需要側のエネルギー機器と協調した調整 (デマンドレスポンス) などを活用しての効率化やコスト削減、②各需要家、特に膨大な数の一般家庭にあるモノのデータが情報としてつながり、活用することでこれまでにない新しいビジネス展開など、今後に向けた大きな期待が寄せられている。

また、2050 年頃の電力ネットワークの未来像を考えると、一般家庭に太陽光発電 (PV)、燃料電池などの分散型発電装置、電気自動車 (EV) のような蓄電池利用を可能にする装置などが多数導入されていることが想定される。このことは消費のみであった一般家庭が発電もできる消費者に変化することを意味しているとともに、現在よりも膨大で多種多様なエネルギー機器が低圧配電系 (100/200V) のネットワークに存在することが想定される。将来の課題はこれらの一般家庭におけるエネルギー機器を IoT の活用によりネットワーク全体として協調的に活用することで、低コスト化、高効率化、高い頑強性 (停電を起しにくい) を持たせるとともに、新しいビジネス、例えば一般家庭の PV からの余剰電力を隣家との間で低価格で取引 (P2P 取引) するなど、新しい付加価値を生み出せる柔軟なネットワークに変革することが求められる。

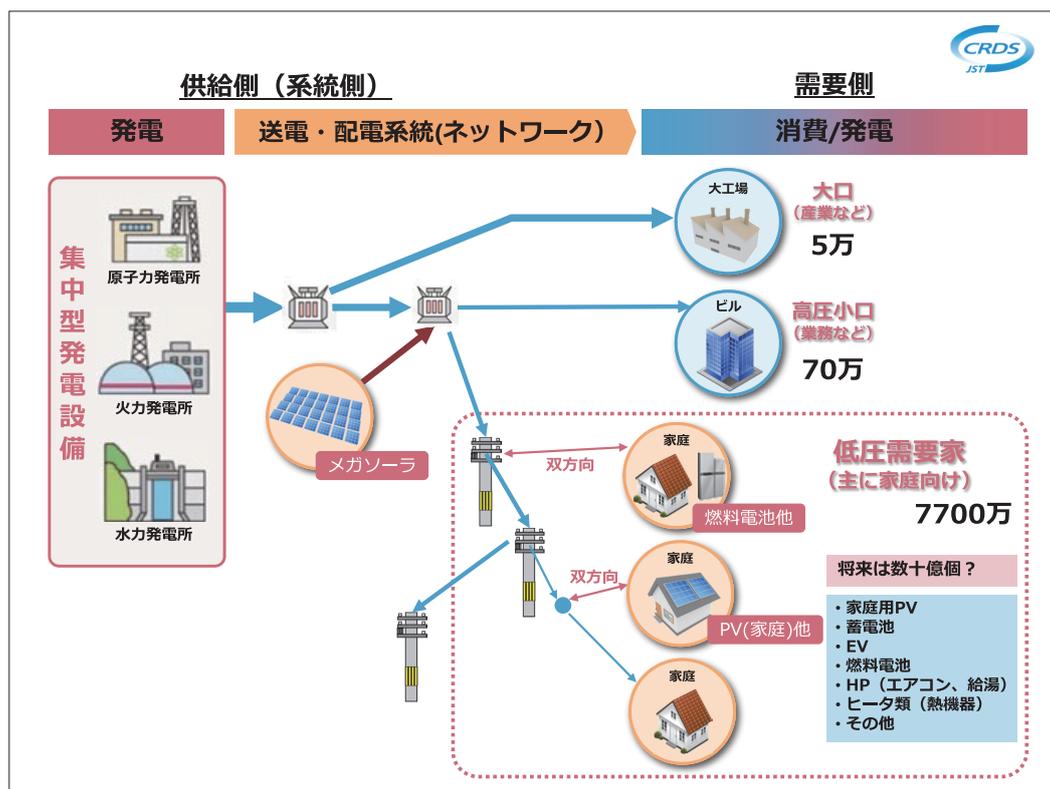


図 2-2-1-1 電力ネットワークの構造

## (2) 融合・横断のポイント

電力システムは停電を避けるために、電力消費量（需要）と電力供給量をほぼリアルタイムで同時同量になるように調整する必要がある（これを系統運用と呼ぶ）。この系統運用のために従来、ネットワーク管理者（系統運用者）は電力需要量を逐次予測するとともに、電力供給量を調整するための設備や仕組みの保持に大きな投資をしてきた。また最近の分散型発電装置である太陽光発電（PV）等の増加は系統運用をさらに困難にさせる要因となっている。このため 2050 年頃においては一般家庭内に存在する多種多様なエネルギー機器に対しても、ネットワーク、特に低圧配電系ネットワークとして、どのように協動的に管理・制御するかが大きな課題となる。このようなネットワークシステムを実現するためには実際の機器や電力潮流を制御する物理層、IoT で代表される情報を利用するサイバー層、さらには家庭内機器の協調制御を可能にするインセンティブも含めたビジネス・制度などを構築するサービス層など、システムを階層に構造化し、各階層の研究開発が重要になる。そのため、情報工学はもちろんのこと、システム工学、材料工学、建築学、電気工学、数学、経済学などの様々な異分野融合・横断が必要になる。さらにエネルギー需要は派生需要であり、食料のように直接消費される財ではない。電気の場合、それを明るさ、情報等の形に変換して消費されている。そのためエネルギー需要の本質を推定するためには、エネルギーを利用する上での人の行動まで踏み込む必要が出てくる。このため、例えばスマートメータなどからの各家庭におけるエネルギー消費のビッグデータから、人の行動と結びつけるような解析等も必要になり、ひいては、社会学、行動経済学、心理学、医学、住環境学などとの連携・融合が必要になってくる（図 2-2-1-2）。

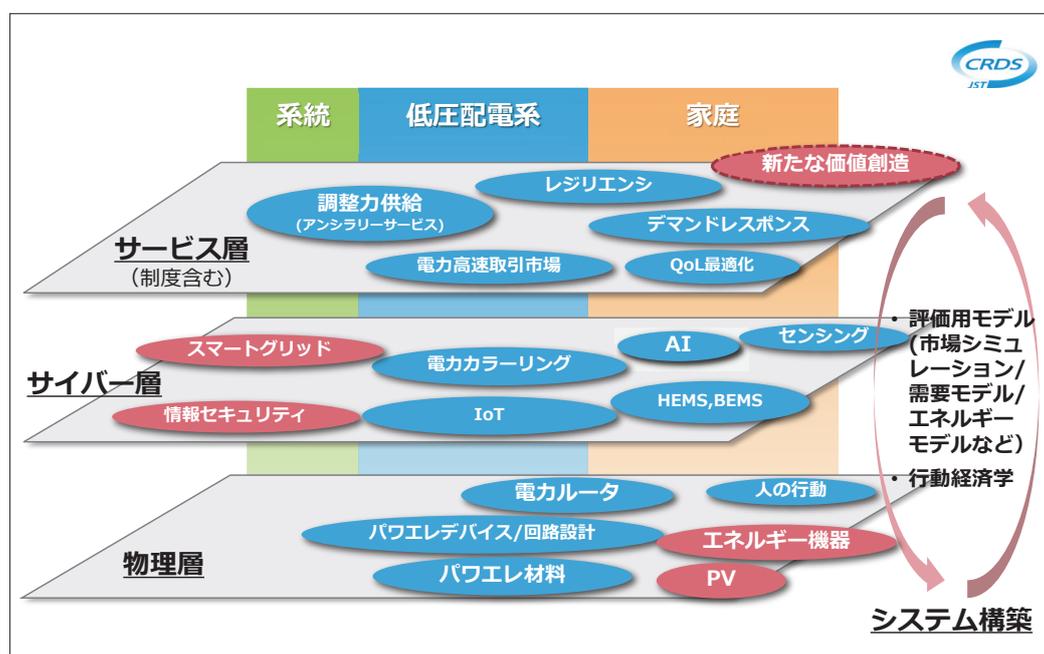


図 2-2-1-2 研究開発領域の 3 層構造

### (3) 課題と方向性

将来のエネルギーネットワークに関連した研究開発は幅広い分野横断が必要になる領域である。その中で IoT は個々のパーツをシステム全体として機能させるために大きな役割を担っている。また一般家庭から得られるデータ（例えばスマートメータからの各家庭の電力消費データなど）を活用することで、一般家庭における電力需要の構造を理解し、その解析を用いた施策により、電力ネットワークにおける効率化、コスト削減、自律分散機能の付与によるネットワークの柔軟性や頑強性の付与、さらには新たな価値創造が期待できると考えられる。

ただし、現在の電力ネットワーク（物理層の電力潮流制御）は系統運用のために集中管理的な仕組みになっており、特に我が国では地域毎の電力会社を送配電を含めて垂直統合的に管理してきた歴史があるため、その傾向は欧米よりも強い。また、電力市場の自由化の歴史が浅い、PV 大量導入時に需給調整シロになる国際連系線がないなど、欧米とは異なる状況も多々あり、むしろ日本の方が将来のエネルギーネットワークの課題が大きいとも言える。このため、制度や仕組みも含めて日本に適した方法を考え、我が国の技術・システム・制度・仕組みを先事例として、世界に広めることも重要と考えられる。このためには IoT であるサイバー層、電力潮流の物理層、サービス層の構造化した 3 層について、新しい発想からの対応策（例えば自律分散型低圧配電ネットワークなど）も含めて、戦略的に研究開発を進めることが重要と考える。

一方で、IoT に共通した課題とも言えるが、各家庭における電力消費活動自体はプライバシーに関わることから、その対策やセキュリティなどの対応も重要な課題である。

### (4) 海外動向

将来に向けた電力ネットワークにおいては、国内外から変革に向けた動きが始まっている。世界経済フォーラムにおいても、将来の 3 つのトレンド、①電化の進展、②配電系における分散型エネルギー機器（PV、蓄電デバイスなど）の拡大、③デジタル化：IoT の出現と接続デバイスの急増、を検証し、その上で将来に向けたシステムレベルでの提案を行っている。これには一般家庭がビジネスに参加でき、これを対象とした技術を統合化することで分散型エネルギー機器が持つリソースの価値を最大化

できるプラットフォームの構築が重要とされている。

欧米では需要家のエネルギー機器を束ねて需給バランス調整の資源とするアグリゲーションビジネスが進んでおり、これに関連したプロジェクトもある。また、米国ではトランザクティブエネルギーと呼ばれる検討が国家プロジェクトレベルで検討されている。配電系ネットワークにおいて、PV のような分散型エネルギー資源を市場経済ベースで活用できるように、例えば家庭用 PV からの余剰電力を隣家に売るなどの P2P 取引を可能にする技術・仕組みづくりを検討している事例もある。

## (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-04) (2017 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学 ～ 2050 年超の一般家庭でのエネルギー需給構造変化に向けて～」(CRDS-FY2016-SP-04) (2017 年 3 月)

## 2.2.2 データ統合生命・医学 (IoBMT) による個別予見医療 (Precision Medicine) の実現

### (1) 概要

21 世紀初頭のヒト全ゲノム解析の発表、それに続く次世代シーケンサーを初めとしたオミクス解析機器の登場により、生命科学・医科学研究において産出されるデータ量は近年飛躍的に増加している。そのことは、研究の方法論にも大きな変革を促した。従来は、分子生物・生化学的手法で特定の生体内分子の挙動を調べるアプローチが主流であったが、近年は膨大なデータ (ゲノムなど) 解析が重要な研究要素となっている。また、世界各国で医療のデジタル化加速に向けた積極的な基盤整備も相まって、大量の医療データ (病院カルテなど) を収集する、いわば「社会測定」とも言うべきデータ収集基盤が次々と整備されておりそれらを医療資源配分や医療提供方法の最適化などに活用しようとする動きが世界的な潮流となっている。他にも、ウェアラブルデバイスなどから生み出される日常データの活用により、健康維持および疾患の予兆を予見しようとする試みも始まっている。

これらのことは、「ライフサイエンス・臨床医学ビッグデータ」を「如何に集めて如何に解析するか」が、これからのライフサイエンス・臨床医学研究の最重要事項であることを示唆している。しかしながら、いち早くその重要性を認識し方向転換した諸外国と比べ、日本の動きは極めて遅い。

そのような状況に対応するため、CRDS では「ライフサイエンスおよび医療に関する膨大なデータの永続的・自動的な収集と構造化を軸とした統合データ基盤を構築する。それをもってデータ主導の生命科学・工学・医学の“知の構造化・統合” および社会参加型の“個別予防・予見医療・適正な医療資源配分”の実現を加速させる」研究開発の方向性を Integration of Bio-Medical Things (IoBMT) と定義し、その実現に向けた取り組みの提言作成を進めている。(2018 年刊行予定)。

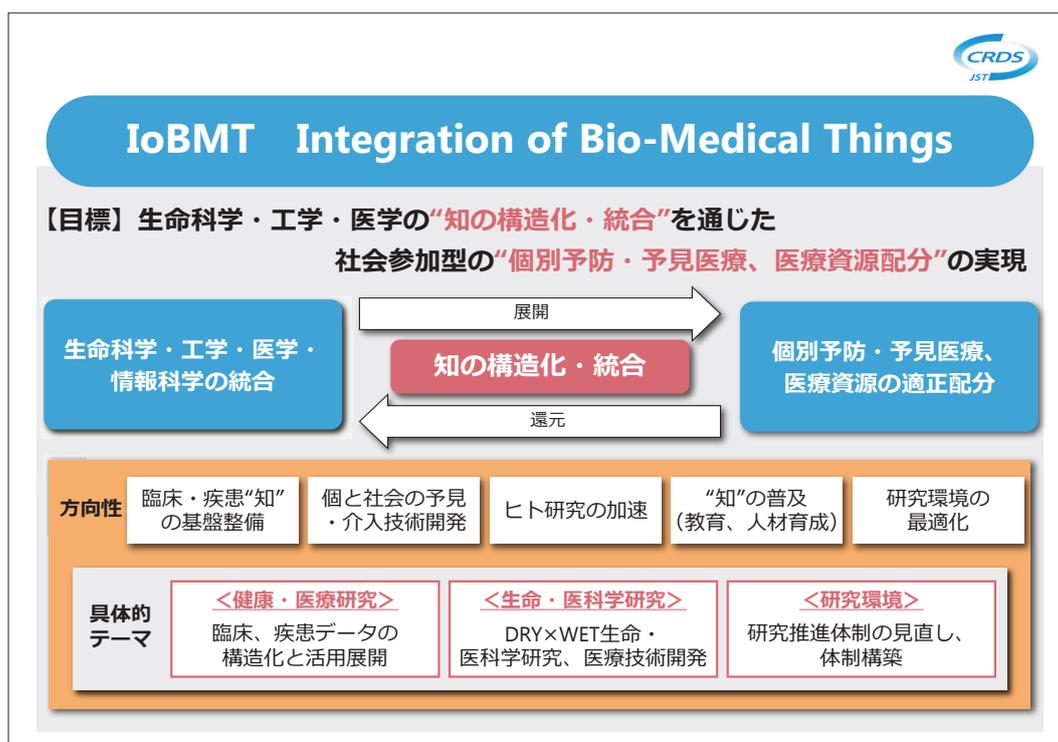


図 2-2-2 IoBMT 概観図

## (2) 融合・横断のポイント

IoBMT は、基礎生命科学研究から健康・医療に係るあらゆる応用開発、さらには医療行政の意思決定支援までも包含するコンセプトであり、融合・横断は多方面にわたる。まずデータの種類の観点からは生命科学・医科学データ（ゲノム・実験データなど）と、健康・医療データ（病院における診療データなど）の 2 つに大別され、それぞれにおいて取り組むべき内容は異なる。

前者について、ゲノムやオミクスといった共通するデータ項目はあるものの、個々の研究者によって研究対象・実験条件は多種多様であるため、世界中（あるいは国内）の研究者のデータ統合から新たな価値を生むことは容易でない。むしろ、例えばヒト全細胞（37 兆個）について細胞 1 個 1 個のレベルで特定のデータ項目を集めてデータベースに蓄積するなど、研究者間の意識を合わせて、戦略的にある特定のデータ収集も並行して実施することが、データ利活用の観点からは有意義であると考えられる。データ収集対象によってプレーヤーの属性は異なるが、全てに共通するのは分子生物学、疾患科学の研究者と、ゲノム・オミクス等のデータ解析に長けた研究者の異分野融合・横断である。

後者について、医療現場のデータは医療行政の一環で集められているものも多く、例えばレセプトは既に定型化したデータが日々全国の病院・診療所で作成され国・自治体のデータベースに蓄積している。これらについては、大量のデータ解析に長けた研究者と、それらを解釈し医療提供の最適化、医療行政の意思決定支援につなげることが可能な医学研究者の融合・横断である。ただし、医療現場のデータには非定型なものも非常に多く、それらの利活用においては、例えば自然言語処理、医療オントロジー、センサー技術などに長けた研究者の異分野融合・横断が必要である。

また、IoBMT を具現化するためには、研究テーマ設定のみならず、研究組織・機関の体制についても最適化が必要である。異なる研究組織・機関の連携加速、あるいは統合を行うことで、融合・横断は大きく進展する。

## (3) 課題と方向性

IoBMT で推進すべきテーマは多岐にわたると考えられるが、特に重要と考えられるテーマを 2 つ挙げる。

①健康・医療データの構造化と活用展開：健康・医療データの利活用が近年国内外で進められているが、実際には当初予想されたほど解析は容易でなく、成果は限定的である。その根幹にはデータの質の問題があると考えられるが、わが国においては未活用の高品質な医療データ群（症例データ、診療ガイドライン、ほか）が存在する。それらデータ群を人力で前処理を行いつつビッグデータ解析を行うことで、現行の医療データ解析では不可能な、新たな価値（診断・診察支援システム、教育システムほか）を生み出すことが可能である。そのために必要な技術開発、解析体制整備、持続性のあるデータ収集システムの構築の推進が重要である。

②研究推進体制の見直し・体制構築：健康・医療データ解析を、ただの流行に乗った研究に終わらせず、わが国に医学・医療研究の活力の源泉としていかなければならない。そのためには、中長期的に本テーマに取り組む機関を設定する必要がある。既存の病院・研究機関の大幅な見直しが必要と考えられる。

## (4) 海外動向

近年、ゲノム・臨床データ解析研究の急速な進展および深刻さを増す医療費高騰を背景とし、医療技術を適用すべき適切なサブグループ（集団）を医学的・経済的根拠に基づき層別化し、新たな医療の枠組みを構築することが強く期待されてきた。そのような中、2015 年に米国のオバマ大統領が Precision Medicine Initiative の推進を宣言し、諸外国もそれに追随する形で巨額の資金を投下し研究開発を加速している。米・欧・英・仏・中の取り組みの規模感を表 2-2-2 に示す。

表 2-2-2 米・欧・英・仏・中の簡易比較表 (PMI 関連)

国名	主要プロジェクト	予算規模 (※1)
米国	Precision Medicine Initiative (2015~) ほか、多数の大型プロジェクトが存在	約 <b>240億円</b> (2016年度)
欧州	Horizon2020 “Personalized Medicine” (2014~2020) 注) precision medicineとは距離のある項目を多数包含	約9,700億円 (7年間総額) →約1,400億円 (単年平均)
英国	Genomics England (The 100,000 Genomes Project) (2012~2018)	約470億円 (7年間総額) →約 <b>70億円</b> (単年平均)
仏国	GENOMIC MEDICINE FRANCE 2025 (2015~2025)	約870億円 (前半5年間総額) →約 <b>170億円</b> (単年平均)
中国	“十三五”国家科技创新规划、科技创新2030 “精密医療” (2016~2020)	約1兆円 (5年間総額) →約 <b>2,000億円</b> (単年平均)

(※1) 1\$=110円、1£=150円、1€=130円として換算

米国は、世界を圧倒する巨額の科学技術予算を有し、長年にわたって世界の研究開発をリードし、新たな潮流を創成し続けている。Precision Medicine Initiative もその1つであると言える。同イニシアティブでは、ゲノム、臨床データ、環境要因（生活習慣、運動ほか）などの多様なパラメーターを収集し、それらビッグデータ解析を通じて人々をサブグループ化（層別化）し、サブグループ毎に最適な介入技術を開発、および提供を目指すものである。FY2016（米国会計年度2016）の予算合計は215M\$である。Precision Medicine Initiative は唐突に出されたコンセプトではない。その背景には、「生物医学ビッグデータの統合加速・・・NIH “Big Data to Knowledge (BD2K)” イニシアティブ」、「ゲノムデータと臨床データの統合加速・・・NIH “eMERGE” プロジェクト」、「新しい医学・医療と社会受容・・・NIH “Clinical Sequencing Evidence-Generating Research (CSER)” コンソーシアム」、「法規制 (HIPAA、GINA、PPACA など)」、「民間主導の新潮流形成 (J. Craig Venter 氏、Chan Zuckerberg Initiative、23andMe など)」などを初めとした、米国の長年にわたる科学的知見や技術の蓄積、人材育成、法規制の整備、産官学の密な関係構築、民の活力（資金力、アイデア力）の存在、などの重厚な蓄積の存在がある。Precision Medicine Initiative はそれら各要素を発展的に統合・展開させる、現実的かつインパクトの極めて大きな国家戦略であると言える。

欧州は、Horizon 2020 (2014 ~ 2020 年) という長期的な研究開発の枠組みのもとで、産官学の知を結集した大型プロジェクトを様々な分野で推進している。Precision Medicine Initiative と比較的近いコンセプトの大型プロジェクトとしては、“Social Challenge” カテゴリーにおける “Personalized Medicine” が挙げられる。予算規模は総額 74 億 7,200 万€、2014 年からの最初の 4 年間で 20 億€である。

英国は、英国版 Precision Medicine Initiative とも言える Genomics England (The 100,000 Genomes Project) を 2012 ~ 2018 年にかけて総額 3.1 億£を投入し推進している。がん、希少疾患（およびその家族）を対象とした、10 万人分のゲノム解析、および臨床データとの統合解析を目指すものである。

フランスは、フランス版 Precision Medicine Initiative とも言える「GENOMIC MEDICINE FRANCE 2025」を 2016 年 ~ 2025 年にかけて推進している。投資規模は最初の 5 年間で 6.7 億€（うち 2.3 億€は産業界からの出資）である。がん、希少疾患（およびその家族）を対象とした、23.5 万人分のゲノム解析、および臨床データとの統合解析を目指している。

中国は、中国版 Precision Medicine Initiative とも言える「精密医療」を 2016 年に発表した。予算

総額は 92 億 \$ (政府予算+企業からの出資) となっており、その中には上述の諸外国の precision medicine 関連予算として計上したもの以外も含まれるため厳密な比較は困難であるが、それでも米国を含む世界トップレベルの予算規模である。推進予定のテーマは米国 Precision Medicine Initiative と類似しており、100 万人規模のゲノムコホートの構築、ゲノムを含むあらゆるデータの取得・統合解析を軸とした精密医療技術の開発と、医療提供に向けた環境整備が計画されている。

## 2.3 サイバーフィジカルシステム (デジタルツイン) を用いた次世代設計・製造技術

### (1) 概要

ものづくりのデジタル化を牽引する中核技術として近年注目されている“デジタルツイン”は、サイバーフィジカルシステムの一つの形態であり、デジタルデータを基に物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製し、将来発生する事象をデジタルの仮想世界で予測することが可能な先進的なシミュレーション技術である (図 2-3-1)。製品・サービスのバリューチェーン全体を通じて高い付加価値が提供されると期待されている。環境・エネルギーや輸送に関する機器・サービスの開発・設計・製造や保守 (寿命予測)、これらの生産性や品質向上に役立ち、Society 5.0 や低炭素社会の実現に貢献する。デジタルツインの根幹は、製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気などの技術分野を横断する複合現象モデル (例えば機械損傷プロセスモデル等) の開発、検証で、その開発と活用が注目されている。しかしながら、モデリングの基礎となる破壊などの物理・化学現象は十分に解明されていないため、求められる先進的な環境エネルギー機器・サービスの創出ができていない。これら現象の把握・理解に基づいた多様な基盤技術の統合化による、基礎的原理説明からのモデル開発・検証および計算効率化技術開発、基礎科学研究からの知識基盤構築とその活用により、低炭素社会に資する先進的機器・サービスの開発が期待される。

わが国では、このようなものづくりの基盤技術を担う工学系専門人材が減少しつつあり、諸外国と比較すると相対的に個々の研究力が低下していることが懸念されている。

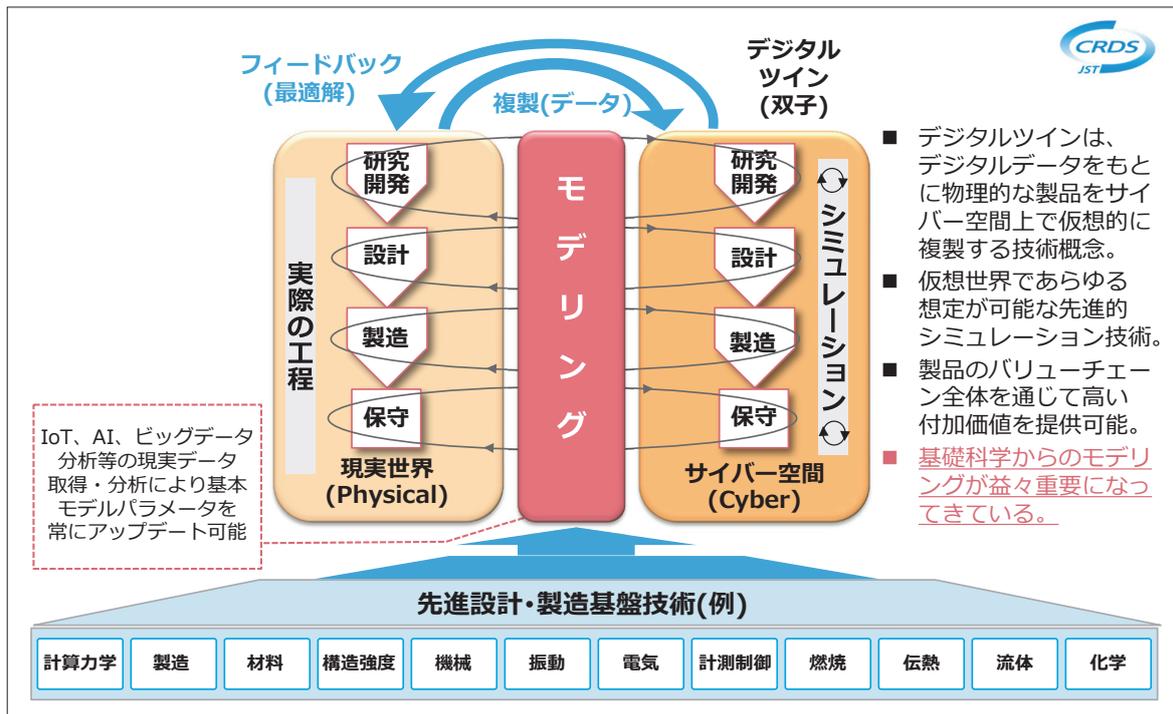
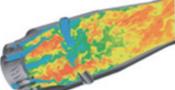
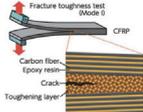


図 2-3-1 デジタルツインと、分野横断の複合現象モデリングを支える多様な基盤技術

### (2) 融合・横断のポイント

上述のようにデジタルツインの鍵は、材料、構造・強度、機械、燃焼、流体、振動等様々な分野を包含する未踏複合現象の解明とそのモデル化で、この差別化が競争力の源泉となる。表 2-3-1 は、モデリングの基礎となる、十分に解明されていない分野横断の未踏複合現象の例を示す。これらの現象

表 2-3-1 モデリングの基礎となる分野横断の未踏複合現象

技術分野	未解明の物理・化学現象(例)	参考図
機械(機械要素・トライボロジー) / 構造強度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 転がり軸受けなど機械要素の損傷メカニズムにおける亀裂進展プロセス</li> <li>・ 潤滑膜の流れと構造体の運動、表面変形などの相互作用メカニズム 等</li> </ul>	
燃焼 / 流体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 急激な過渡現象に対応するガス燃焼制御、空力制御に必要な素反応と乱流の相互作用メカニズム 等</li> </ul>	
流体 / 構造 / 振動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 回転機械や輸送機器における流体、構造、音響の相互作用メカニズム</li> <li>・ 複雑な流体関連振動現象における自励振動メカニズム 等</li> </ul>	
構造強度 / 材料 / 流体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 流体中における炭素繊維複合材料(CFRP)の亀裂進展プロセス 等</li> </ul>	

図出典：ジェイテクト、重工技報、龍谷大学理工学部、JST

解明とモデリングを進めるには、例えば、(i) 機械要素の損傷・亀裂進展メカニズムや、(ii) 急激な過渡現象に対応する燃焼素反応と乱流、伝熱の相互作用メカニズムなどの未踏複合現象モデル化において、(i) では構造・強度、材料の専門性だけでなく、製造、機械、振動、流体などの他技術分野の専門性と、(ii) では燃焼の専門性だけでなく、伝熱、流体、振動、化学、電気などとの他技術分野の専門性との融合・横断が必要となる。デジタルツインを用いた次世代設計・製造技術を構築するには、ものづくりの基盤技術を横断し、知を融合させる工学系専門人材が求められる。

### (3) 課題と方向性

わが国が今後も、ものづくり国家として他国には真似のできない信頼性の高い製品・サービスづくりの強みを継続していくためには、設計・製造基盤技術の深耕と伝承が欠かせない。しかしながら、エネルギー基盤技術(工学)俯瞰ワークショップ(2016年11月25, 26日開催、参考文献参照)によると、わが国の産業界では、製品、要素技術の性能品質は総じて世界有数だが、ビジネスモデルが弱く、プラットフォーム戦略による優位性の確保などができていない。ものづくり産業の開発・設計・製造現場で用いられる解析技術に関して、個別の要素解析技術で世界レベルにある分野がある一方、システム化や統合化は国際的に後塵を拝し、モデリング、シミュレーションの基礎となる物理・化学現象の把握・理解は十分にできていない。評価方法の開発・標準化、評価データの蓄積も立ち後れている。全体解析技術[ソフトウェア、モデル構成式、検証データ取得]でも欧米に大幅なリードを許している。このため、環境・エネルギー機器や輸送機器・サービスの開発・製造・保守に際して、品質、納期、コスト面で産業競争力が発揮できていない。また、大学でも、基盤技術分野の研究力が中国などに比べ弱化してきているため、日本企業が、オープンイノベーションで、上記のモデリングや検証データ取得などを欧米や中国の大学に委託する例が散見され、わが国の大学の基礎研究がますます弱くなると同時に日本企業にも研究基盤が蓄積されないという悪循環となっている。このように、ものづくり産業を支える工学系分野の研究基盤弱体化の懸念が強まっており、産業界並びにアカデミアが直面する上記問題の解決には産学官が連携して分野横断で一体となって取り組む必要がある。

ものづくりのデジタルツイン構築に必要な取り組みは多岐にわたるが、複合現象モデルの開発、検証の重要性を鑑み、以下の 3 つの具体方策への取り組みが期待される。

- ① 多様な基盤技術の統合化・分野融合による、基礎的原理説明からの複合現象モデルの開発・検証、および、モデル計算効率化技術開発、構築モデルの評価方法の開発・標準化
- ② ①に資する基礎科学研究からの知識基盤構築 [物理・化学現象の把握・理解、基盤となる構成方程式の確立、評価データ取得、蓄積等]
- ③ ②を活用した、ものづくり産業を支える工学系の基礎的原理を理解した人材、科学的合理性に基づき、ものづくりができる人材の育成

対象とする製品分野・領域は、ものづくり技術の難易度が高く、開発期間・コストが大きい環境・エネルギー・輸送に関する機器・サービス領域を選択するのが有効である (図 2-3-2)。これらは、デジタルツイン活用の効果が大きく、かつ今後の国際市場獲得や低炭素社会実現に向けた日本の貢献にも寄与すると期待される。例えば、風車、ガスタービン、蒸気タービン、自動車、工作機械、船舶海洋等の環境・エネルギー機器、輸送機器の開発・設計・製造や保守 (寿命予測) を行う際に必要となるデジタルツインが出口として想定される。

上記の①から③を一体的に推進するための研究開発課題構成を表 2-3-2 に示す。これらは異なる製品間で共通的なボトルネックと考えられる研究開発課題群である。これらに係る物理・化学的メカニズムの解明、モデル構成式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、モデル評価方法の開発・標準化、およびそれらに基づく力学基盤を中心とするデジタルツイン技術確立を目指す。当然、共通の課題への取り組みの後には個別の上記製品例へ展開するための研究開発も課題となる。製品共通課題の主要項目を以下に示す。

a 機械損傷プロセスモデル構築と検証 [複合材料も含む機械要素の損傷メカニズムや亀裂進展プロセスの解明等]、b トライボロジーモデル構築と検証 [回転機械の摺動面潤滑膜流れと表面変形などの相互作用メカニズムの解明等]、c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証 [回転機械や輸送機械における流体、構造、音響の相互作用メカニズムなどの解明]、d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証 [急激な過渡現象対応の燃焼素反応と乱流、伝熱・熱伝達の相互作用メカニズム解明等]、e a~d 統合化モデル (デジタルツイン) 構築と検証 [ターゲット製品例への展開と、機械要素の運動、構造変形、振動、潤滑、流体、伝熱、燃焼、化学、電磁気など複合現象支配方程式の高速連成解析モデルの開発と検証等]

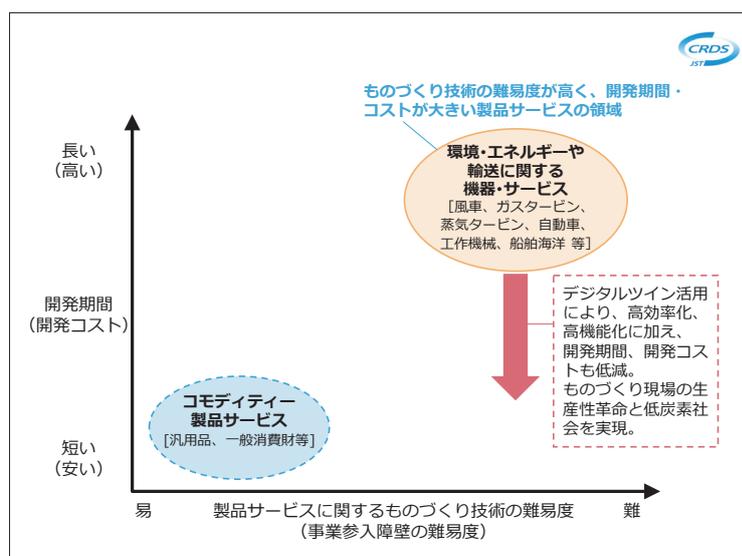


図 2-3-2 デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域

表 2-3-2 具体的な研究開発課題

研究開発課題	ターゲット製品(例)					
	風車	ガスタービン	蒸気タービン	自動車	工作機械	船舶海洋
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
b トライボロジーモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証		○	○	○	○	○
e a~d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	○	○	○	○	○	○

最後に、上記の①から③の取組み項目を効果的に推進し、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術の研究開発で世界を凌駕していくための体制として、ネットワーク型の産学官連携推進体制（コンソーシアム）を中核とした体制構築を適切に進める必要がある。ここでは基礎研究から社会実装までを俯瞰した一貫通貫の研究開発が求められる。加えて、データ連携共通プラットフォーム創出、国際標準化戦略、規制緩和などの出口戦略や人材育成などにも着実に取り組むことが肝要である。

#### (4) 海外動向

近年、デジタルツインやそれを支える先進設計・製造基盤技術において、時代の変化に対応した新しい視点での設計・製造・加工技術などのイノベーションの開発が国内外で進んでいる。ドイツでは、Industrie 4.0 に代表されるように、シミュレーション基盤技術などのイノベーション振興施策が実施されている。EU は、Horizon 2020 の下、2016 年「Smart Cyber Physical Systems」として、約 22 億円を製造の自動化に向けたサイバーフィジカルシステム技術（CPS、デジタルツインは CPS の一つの形態）への取り組みに投資した。英国では高付加価値製造カタパルトが既に始まっており、2017 年 3 月には、デジタルカタパルトとイノベート UK が、中小企業に対し、The Digital Engineering and Test Centre との共同研究によるデジタルツインを活用した先進製造技術テーマの公募を開始した。

米国では、2011 年以降、国家先進製造戦略計画（National Strategic Plan for Advanced Manufacturing）や先進製造パートナーシップ（AMP: Advanced Manufacturing Partnership）などで、先進製造のためのデータ基盤を整備してきており、製造イノベーションの育成と商業化の促進に取り組む産学官パートナーシップ Manufacturing USA などでも推進している。また、米国科学財団 NSF が、2008 年以来、計約 300 億円を CPS 技術に対して投資してきている。ERC（Engineering Research Centers）プログラムでは、産学連携プロジェクトにて、基礎科学の知見獲得からの基盤技術に基づいてデジタルツインの社会実装まで着実に実施しているものもある。さらに、GE などの一部企業で、デジタルツイン技術の導入事例が幾つか出てきている。

中国は、第 14 次五か年計画（2021～2025 年）を視野に入れ、製造業発展のための施策として、「中国製造 2025」を発表した。本施策では、製造工程のスマート化（「スマートマニュファクチャリング」および「環境配慮型製造工程」）やイノベーション強化に関する 5 つのモデルプロジェクトが選定されている。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 革新的デジタルツイン ～ものづくりの未来を担う複合現象モデリングとその先進設計・製造基盤技術確立～」(CRDS-FY2017-SP-01) (2018 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「科学技術未来戦略ワークショップ報告書 革新的デジタルツイン ～デジタルツインを支える先進設計・製造基盤技術～」(CRDS-FY2017-WR-09) (2018 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「俯瞰ワークショップ報告書 エネルギー基盤技術(工学)」(CRDS-FY2017-WR-04) (2017 年 9 月)
- ・ 中山 力、木崎 健太郎、吉田 勝『日経ものづくり』(2017 年 8 月号) 特集「製造業革新を加速するデジタルツイン」

## 2.4 これからのロボティクス

### (1) 概要

ロボティクスは、高い自律性を持つ機械や、機械と人間の緊密な相互作用を実現することで、安全・安心で質の高い生活をもたらす新たな社会システムの形成に貢献する融合領域である。ロボティクスは工学系の技術の集大成ともいえるが、本報告書では、図 2-4-1 に示すようにロボティクスの俯瞰図を 3 層からなる構造にまとめた<sup>1</sup>。基盤技術層は、いわゆる機械としてのロボットを形成する、材料、動力、センサーに通信・情報処理と人工知能から成る。機能コンポーネント・統合化技術層では、基盤技術を機能の単位で再整理し、その上に全体をまとめてロボットとするためのシステム化・統合化技術を置いた。最上位の応用領域には、社会の中で活躍するさまざまなロボットをモビリティ・フィールド、空中、生活支援・福祉、医療、産業用・研究開発用というカテゴリーに分類して整理した。またこれらに共通して勘案すべき事項として、社会システムの一員として安全・安心で質の高い生活をもたらすロボットの在り方や社会とのかかわり方に関する論点を考察する領域を「ロボティクスと社会」と称し位置付けている。

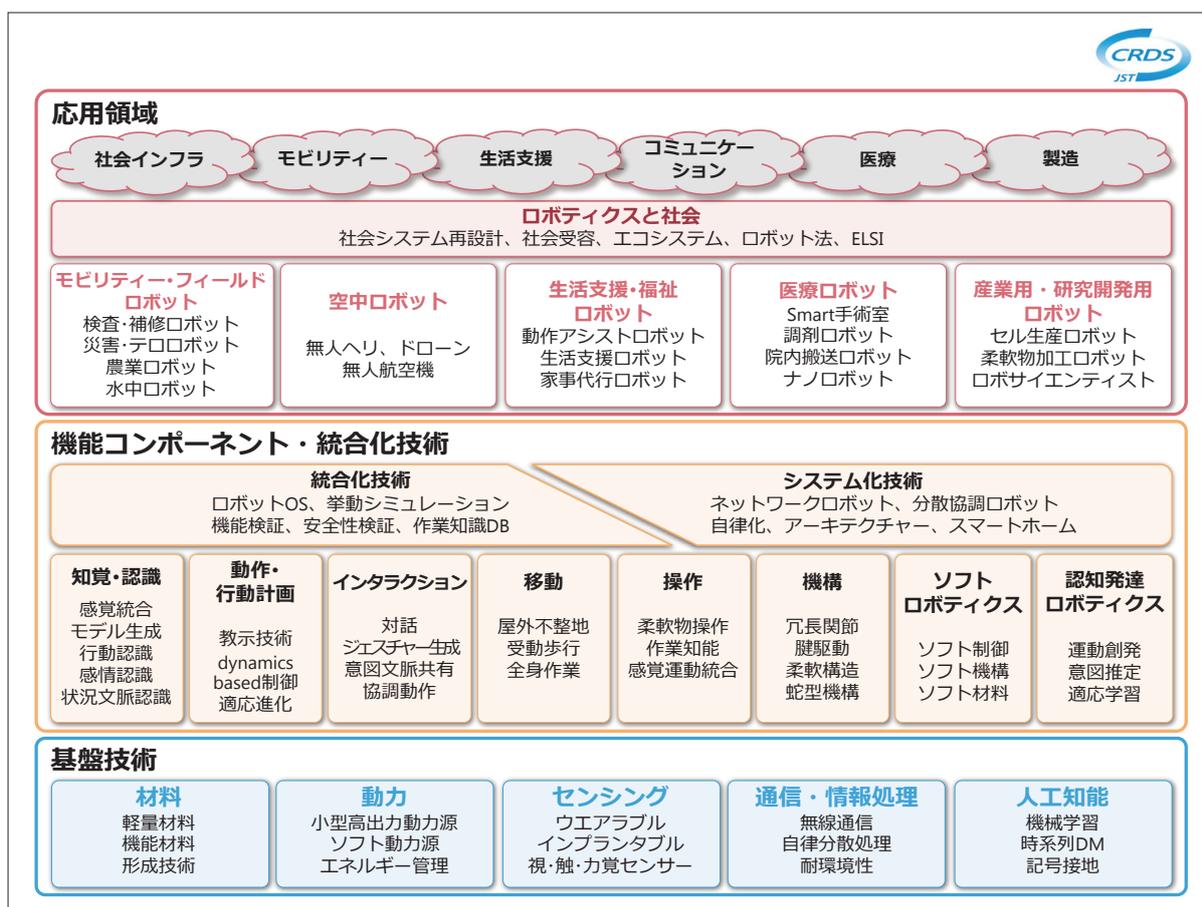


図 2-4-1 ロボティクスの俯瞰図  
 CRDS 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2017 年) より

1 俯瞰の体系にはさまざまな見方があり、日本ロボット学会の「日本のロボット研究開発の歩み」では、Integration/Intelligence、Manipulation、Locomotion、SensingとBusinessという構造で整理している。

## (2) 融合・横断のポイント

ロボットは、認識、判断、計画、動作の各知的処理要素の統合、機構、センサー、アクチュエーター、電子回路、コンピュータ、電源、配線、外装、ソフトウェアの各構成要素の統合、さらには、移動、マニピュレーション、対話、ユーザーインターフェース等の機能の統合により構成されることから、ロボティクスはシステム化の技術といえる。

CRDS が発行した戦略プロポーザル「ナノ・IT・メカ統合によるロボット基盤技術の革新」(2016 年)では、人に寄り添うスマートロボットを目指して、ロボットの 3 大構成要素と密接に関連する工学分野の関係(図 2-4-2)の整理を行い、異分野連携による新たなコミュニティの形成に関して次のような提案をしている。

新たな要素技術・基盤技術開発を進めるうえでは、ロボット関係者だけでなく、情報通信やナノテクノロジー・材料などの異分野の研究者・技術者との連携が重要であるが、これを早期に実現するためには、新たなコミュニティの形成が重要になる。特に、学会の役割は重要であり、様々な専門分野に分かれている学会の中に、ロボット、情報通信、ナノテクノロジー・材料などの研究者・技術者が一緒に要素技術・基盤技術や機能モジュール・システムについて議論できる共通の場を作ることが肝要である。日本ロボット学会、日本機械学会、精密工学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、情報処理学会、応用物理学会、日本化学会、日本材料学会、日本複合材料学会などが、学会の垣根を越えて新たなコミュニティの形成を図ることが期待される。

このような取り組みによって、「分析の科学」に対して、日本で弱いと言われている「システム統合」や「設計の科学」を根づかせることが重要である。そのためにはシステム統合の理念、ストーリーに新規性や独自性を求め、それが実装に貢献するものであれば、適正に評価する文化をアカデミアで共有する必要がある。

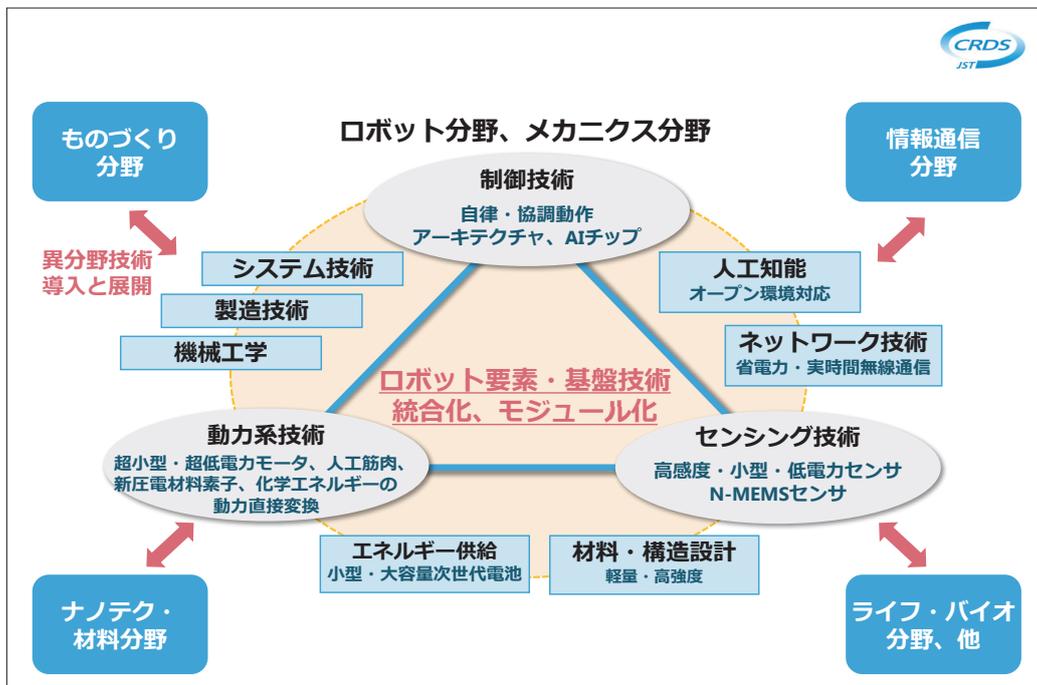


図 2-4-2 ロボットの 3 大構成要素と密接に関連する工学分野  
 CRDS 戦略プロポーザル「ナノ・IT・メカ統合によるロボット基盤技術の革新」より

### (3) 課題と方向性

異分野融合領域・横断テーマとしてのロボティクスにおいて解決すべきこと、進むべき方向につき主なものを記述する。

#### ① 社会共創ロボティクス

ロボティクスの要素技術が整いつつあるなかでシステム技術の進展を加速する仕組み、社会への導入に伴うリスクを軽減するとともに、便益を最大化するための制度設計、社会への浸透を加速するためのビジネスとしてのサイクルを実現するエコシステム構築を含む社会実装の促進など、ロボティクスによる単なる既存機能の置き換えではない社会システムの再設計に係わる研究開発が必要である。例えば、日本学術会議の第 22 期の『提言：ロボット活用による社会課題解決とそれを支える先端研究の一体的推進方策～社会共創ロボティクス～』の中では、ロボット活用による社会課題解決や社会変革を実現するために、利用者、研究開発者、供給者が一体となったオープンイノベーションの枠組み「社会共創ロボティクス」の早急な確立と推進が不可欠であるとしている。

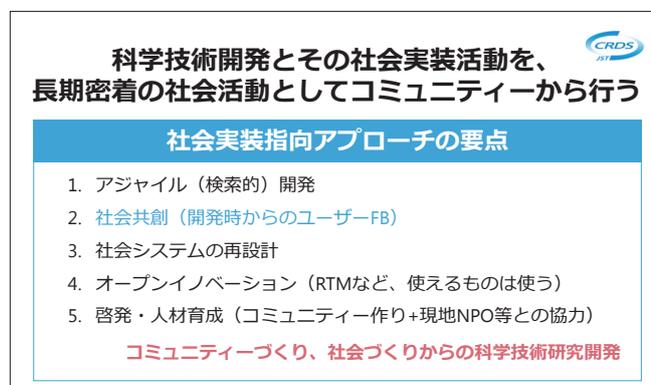


図 2-4-3 これからのロボティクス

#### ② 新しい知見・新技術の創出

新しい知見・技術として特に注目すべきものを列挙する。「ソフトロボティクス」は、従来の剛性の高い機構や関節を有するロボットがその高い精度により作業を実現することに対し、柔軟な材料を積極的に用いて新しい機能を発現したり、生物が実現しているシステムやプロセスを参考に動作したりする、新たな分野である。また、ロボットの「知能化」が注目されるが、近年、深層学習に代表される人工知能技術の発展が世界的な潮流となり、大学や研究機関のみならず、多くの企業が参入している。さらに、人の意思と機械とを直接つなぎ相互に作用させるシステムの実現を目指すブレイン・マシン・インターフェースの研究は、主に米国が主導する形で進められている。例えばリモコンや音声などによる操作をせずとも、ロボットに意思伝達（命令）したりその応答を受けたりすることが実現されると期待されている。日本でも、医療応用のため脳の硬膜下に埋め込む形の電極およびロボットシステムへの連結の取り組みがなされている。

#### ③ ファunding、プラットフォーム提供、コンテスト型研究開発の一体化

従来の研究テーマに対するファundingに加えて、そこで開発された技術の検証の場として、災害ロボティクスチャレンジに代表されるようなファunding、プラットフォーム提供、コンテスト型研究開発の一体化が重要である。準備と実施を含めて 1～2 年の短サイクルで何回も回すことで、研究コミュニティの活性化と、研究の加速化が図られる。また、オープンソースの活用はロボティクス研究の基盤となりつつあるが、そこで利用されるソフトウェアもこのように複数の研究グループが同じ課題に取り組み、同じロボットプラットフォームを活用する中で鍛えられ利用に耐えうるものに成長していくことも期待できる。また、日本がいち早く開発して知財化し、さらに国際標準規格などを提案することなど、開発された次世代ロボットの知財戦略を構築・実行することが重要である。

#### (4) 海外動向

米国では、2011 年から省庁横断型のロボット開発支援プログラム (National Robotics Initiative: NRI) にて、DARPA、NASA、NIH、農務省のパートナーシップの下で広範にわたるロボティクス分野の支援が行われている。また、グランドチャレンジ型ファンディングによる応用技術開発 (DARPA Urban Challenge、DARPA Robotics Challenge、Amazon ピッキング・チャレンジ) や、特定分野に特化した実用的な製品開発 (掃除ロボット Roomba、双腕ロボット Baxter、手術支援ロボット da Vinci、人型生物型ロボット Boston Dynamics など) に強みがある。さらに、シリコンバレーには、特に知能化、統合化をコア技術としたロボットスタートアップやベンチャーキャピタルなどによるロボット実用化エコシステムが構築されている。

欧州では、2010 年に開始したデジタル・アジェンダにロボティクス等の AI 関連領域があり、FP7 や Horizon 2020 の枠組みで研究開発を支援してきた。基礎研究に加えて産官学が参画する連携も促進する。FP7 の ECHORD++ プロジェクトの Urban Robotics によるスマートシティはロボットの社会実装の成功例といわれる。また、FP7 RoboLaw では通常の研究開発に加えて社会の中で働くロボットに関する規制やガイドラインを策定した。個別には、ドイツは Industrie 4.0 にて産業用ロボットも含めた生産システムの研究を推進している。英国は、ビジネス・イノベーション技能省が研究開発費を公的研究組織や大学等に交付し、AI 関連領域としてロボット分野を支援している。フランスは、R&D、ベンチャー支援、地域経済活性化など、複数の支援計画で、AI 関連領域であるコネクテッド・オブジェクト、ロボット分野等を重点分野とした。

中国では、中国製造 2025 にてロボット産業の発展方針と技術的ロードマップを明確にし、産業用ロボットに投資を集中している。また、ベンチャー企業が積極的に知能化統合化の成果を商品化しており、ドローン (DJI) の様に知能化統合化をにらみながら、トップシェアを持つ分野の企業も輩出している。

韓国では、韓国科学技術院 (KAIST) を中心にロボティクスの取り組みを推進している。2015 年 DARPA Robotics Challenge では、KAIST 開発の二足歩行人型ロボットが全課題をクリアして最短時間で優勝し、ロボット開発の実力を示した。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-04) (2017 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル ナノ・IT・メカ統合によるロボット基盤技術の革新」(CRDS-FY2015-SP-03) (2016 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「科学技術未来戦略ワークショップ報告書 ナノ・IT・メカ統合によるスマート小型ロボット基盤技術」(CRDS-FY2015-WR-09) (2016 年 3 月)
- ・ 日本ロボット学会「日本のロボット研究開発の歩み」

## 2.5 データ駆動型研究開発 ~バイオインフォマティクスとマテリアルズインフォマティクスを例に~

### (1) 概要

本格的なビッグデータ時代が到来し、2020 年にはインターネットに繋がるデバイスが 500 億台を超え、1 兆個のセンサーが世界を覆う。その結果、人類が生み出すデジタルデータは指数関数的に増大し、2020 年には 44ZB になるといわれている。このようなビッグデータに対して人工知能 (AI) を用いて解析し、ビジネスに役立てようとする動きが世界中で活発化しており、「データを制するものがビジネスを制す」とまでいわれる時代になっている。人工知能のコア技術である深層学習を始めデータ解析手法が進化する中で、学术界においてもビッグデータや AI を用いた新しい研究開発の流れが大きくなるとなりつつある。ますます多様化・複雑化していく社会の中で研究開発のスピードアップ/コストダウンへの要求が高まると同時に、これまでの研究の蓄積からも、もはやこれまでのように研究者による勘と経験だけでは新発見や新物質を発見し、生み出すことが困難になっており、「データ駆動型研究開発」という新しい研究手法に注目が集まっている。

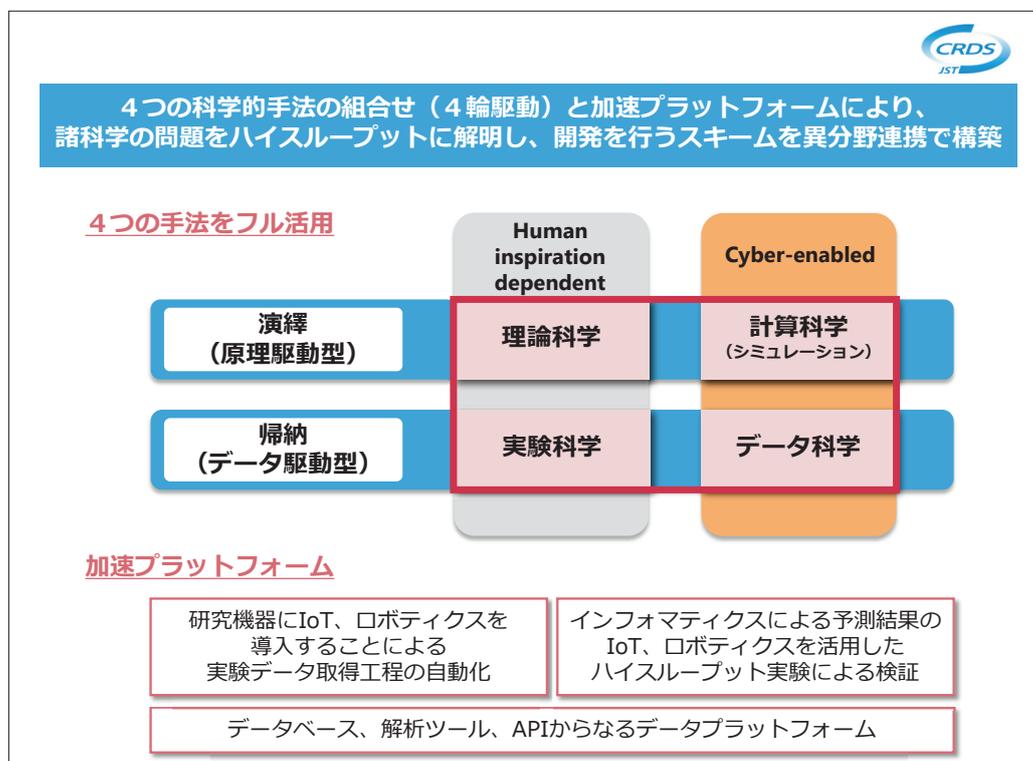


図 2-5 データ駆動型研究開発の概念図

本項では例として、ライフサイエンス・医療分野と物質・材料分野におけるデータ駆動型研究開発を取り上げ、海外動向を含め、現状・課題・将来の方向性について概説する。

#### a. ライフサイエンス・医療分野

次世代 DNA シーケンサー (NGS) の登場とその性能向上により、ゲノム情報が短時間・低コストで入手可能となったことでバイオインフォマティクス (生物のデータを情報科学的手法によって解析する学問および技術の総称) の重要性が急速に高まっている。特に、米国では 2015 年に「Precision Medicine Initiative」、2016 年に「Cancer Moonshot Initiative」をスタートさせ

ており、世界中で「個別化・層別化医療」、「ゲノム医療」、「精密医療」と呼ばれ、研究が活発に行われている。膨大なヒトゲノム情報を解析することで疾患と遺伝的要因の関連性などが解明されると期待されている。また、遺伝子、疾患、薬物標的分子（タンパク質）、薬（分子）の未知の相関を解く「AI 創薬」が重要領域となっている。さらに、医用画像への AI の適用による「画像診断支援」も始まっている。基礎研究としても、各種オミクス・オーム研究も各種機器から産出される膨大なデータとその関係性を導くことが求められている。

#### b. 物質・材料分野

米国が 2011 年に「Materials Genome Initiative (MGI)」を発表したことをきっかけにマテリアルズインフォマティクス（材料科学にデータ科学を融合させた新しい研究開発手法）が世界中で精力的に行われるようになってきている。実験／計算で得られた物質・材料に関する知識とデータを駆使して、統計的手法により物質・材料の機能を制御する規則を探り、得られた規則性から具体的に新物質・新材料の発見を加速することを目的としている。

## (2) 融合・横断のポイント

ライフサイエンス分野も物質・材料分野も 20 世紀までは、理論家、実験家主導で研究が行われてきた。研究者による仮説と検証という作業において、経験と勘によるセレンディピティが科学技術・産業を進展させた。21 世紀以降のデジタル化時代においては、計算科学、データ科学および IoT 的な自動化による解析や予測、設計が進むと考えられる。

ライフサイエンス分野は NGS やイメージング機器の進展により、ビッグサイエンス化している（膨大なデータの解釈に重点が移行）。これはすなわちコンピュータサイエンスの側面が次第に大きくなることを意味しており、今後ますますその傾向が大きくなっていく。物質・材料分野も実験と計算のインタープレイが 2010 年頃までに進み、2012 年以降はデータ科学の活用が始まるなど年々計算機の存在感が大きくなっている。

またグローバル化によりこれまで新興国と言われていた国・地域の研究者のレベルが上がることからコストとスピードの競争も激しくなる。データ駆動型研究開発の発展によって、必要となる実験量およびコストの軽減、開発時間の大幅な短縮などの効果が生まれることが期待されている。以下、両分野におけるこれまでの取り組みや研究の現状について記載する。

#### a. ライフサイエンス・医療分野

1990 年代に米国を中心に行われたヒトゲノム解読プロジェクトでは、2003 年にヒトゲノムが解読されるまでに 30 億ドルもの多額の研究費が投入された。数年前までは 1 週間程度、数十万円程度のコストがかかっていたヒトゲノム解読が、最近では数時間・数万円程度で可能になっている。今後はさらなる短時間化・低コスト化が進むと考えられている（2020 年には 20 ドルゲノムの時代が来るともいわれている）。これによって、診療と研究の融合領域であるゲノム医療が可能となる時代に突入している。

また 2012 年の深層学習技術の誕生以降、機械学習技術は年々改良され、AI を創薬や診断に使う研究がリバイバルした。ここ数年世界のビッグファーマは AI 創薬ベンチャーに大規模な投資を行っている。また、画像解析による疾患の病態解析などが世界各国で進みつつあり、米国 FDA は 2018 年 4 月、糖尿病網膜症を検出する AI を用いたデバイスを、医療機器として初めて承認した。概ね 2020 年までには相当数の医療機関で利用できる環境が整ってくるのではないかと考えられている。また、カルテ解析など、AI を用いた日本語の意味解析を含む技術を基にした精緻な病状診断支援技術も開発されつつある。さらに、今後はヘルスケアサービス（未病・生活習慣病の予測・予防支援など）や感染症の予測などにも応用されることが予想されている。

日本でも AMED において、ゲノム医療や AI 画像診断の取組が行われている。

#### b. 物質・材料分野

世界の研究開発の動向としては、蓄電池材料などを始めとした無機材料、有機エレクトロニクスなどの有機材料、鉄鋼材料などの構造材料の3つの分野それぞれで研究がある。内容としては、①新物質の探索、②微細構造と材料物性の相関、③結晶構造から材料組織までのマルチスケール解析、④計測インフォマティクスといったものが見られる。

日本では、内閣府 SIP「革新的構造材料」の中の研究開発項目の一つ「マテリアルズインテグレーション」、JST イノベーションハブ構築事業「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ (MI2D)」、JST さきがけ「マテリアルズインフォマティクス」、JST CREST/ さきがけ「情報計測」、JST CREST「革新材料開発」、NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」などで、データベースの構築も含め上記①～④の統合的な研究開発が行われている。

### (3) 課題と方向性

#### a. 人材育成 (教育改革)

データ駆動型研究開発でリードするためには、データ科学と自然科学の異分野連携・融合およびそれらの分野間を跨ぐ人材の育成が急務である。そのためには、異なる分野の研究者・技術者が共同で研究できる場の設定、両方の分野を学べる環境を整備することが肝要である。多くの実験/計算データを所有している自然科学研究者と様々なデータ分析手法を熟知しているデータ科学研究者が、知識・経験・技術を相互補完しつつ、新知見・新物質・新材料の発見に向けて互いに切磋琢磨できる環境作り、さらには共通の目的意識を持って自主的に分野の垣根を越えて協働していくことが必要不可欠である。

#### b. 大量の質の良いデータの蓄積 (共有)

ライフサイエンス・医療分野、物質・材料分野問わずデータ駆動型研究開発共通の課題として、膨大なデータ量を確保することはもちろん、蓄積するデータの質を担保することが重要である。すなわち、優れたデータ解析技術を有していたとしても、質の悪いデータからは質の悪い結果しか得られない。様々なデータから新たな知見を発見するためのデータ科学手法を有効に用いるためにはアノテーションと呼ばれる解釈情報を付与することが必要となる。

生物においては、細胞などは周辺環境に応じて時々刻々と変化するものであり、目的に応じてサンプルの採取方法について標準化が必要である。構造材料においては、ナノスケールにおける転移などの欠陥の密度や分布、粒界や界面の構造、ミクロスケールにおける結晶粒のサイズや形状、応力やひずみの分布、マクロスケールにおける欠陥や残留応力など、各スケールで多くの構造や組織の因子が関係するが、これらのデータをどういう形式を用いてどうデータベース化するのか、さらにこれらの因子は製造や加工のプロセス条件によって変化するものであるため、どのようにアノテーションすべきなのか、など課題が山積している。

将来的には目的に応じてオンデマンドでデータを取得するような環境を構築することも考えられる。この目的のためには、ロボットを活用した研究開発プロセスの自動化などが検討されるべきであるし、米国 DOE のレポートでは、従来の計測機器を中心に構成された研究環境を、サンプルセントリックな研究環境の構築 (一つのサンプルに対し、簡便にマルチモーダルな計測機器でデータをとれる) を検討することまで言及されている。つまり、ビッグデータや AI を活用するために、IoT・ロボティクスを総動員するという方向性が考えられる。

#### c. 相関 (候補物質) から因果へ

新物質の発見において、データとデータ科学手法によって、相関や候補物質が得られるが、これは時によっては数百以上の単位で得られるものであり、実際に相関から因果を抽出するには実験で検証することを伴う。律速は合成やモデル動物を用いた検証等の実験プロセスになると予想

される。候補物質を作成する合成プロセスの予測技術や候補遺伝子群をノックアウトしたモデル動物を構築する技術など相関から因果を抽出するためのハイスループットな実験的手法の確立が望まれる。

#### (4) 海外動向

##### a. ライフサイエンス・医療分野

米国の Precision Medicine Initiative、英国の Genomics England、フランスの Genomic Medicine France 2025 など、国をあげて大規模な取組みが進められている。中国においても精密医療のプログラムが始まっており、15年間で官民合わせて600億元（年間約650億円）を拠出するとされている。

このようなゲノム医療以外にも、米国は NIH において Big Data to Knowledge (BD2K) program を、英国は MRC において医療バイオインフォマティクスイニシアティブ、ドイツもメディカルインフォマティクス・イニシアティブを進めている。

##### b. 物質・材料分野

米国では、MGI を実施(2011～2016年、総額5億ドル超)。2011年に発表された MGI では「計算ツール」「実験ツール」「デジタルデータ」を材料イノベーション基盤として位置づけ、材料開発に要する期間とコストを 1/2 にすることを目標に設定した。5年間で5億ドルを超える国費が投入された結果、データベースの構築や異分野横断のセンター設立などが達成された。現在、4つのセンター（Center for Next Generation of Materials Design: CNGMD、SUNCAT Center、Center for Hierarchical Materials Design: CHiMaD、Predictive Integrated Structural Materials Science: PRISMS）を中心に、研究開発活動を継続して実施中。

EU では、Horizon 2020 の枠組みの中で Novel Materials Discovery (NOMAD) プロジェクト（2015～2018年、総額5Mユーロ）を開始。スイスは独自に Materials' Revolution: Computational Design and Discovery of Novel Materials (MARVEL) プロジェクト(第1フェーズ: 2014～2018年、総額1,800万スイスフラン。最大第3フェーズまで)を実施中。

中国は「中国版 MGI」と銘打って、北京および上海を中心に国を挙げて研究開発を実施中。国家重点研究開発計画の一つとして「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム（2016～2020年、総額3億元）」を開始。

韓国は、2015年から10年計画で「Creative Materials Discovery Project」（1課題あたり最大2.4億ウォン）を開始。2016年には韓国科学技術研究所（KIST）に「Materials Informatics Database for Advanced Search: MIDAS」を設置。

#### (5) Reference

##### a. ライフサイエンス・医療分野

- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2017年）」(CRDS-FY2016-FR-06)（2017年3月）

##### b. 物質・材料分野

- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル データ科学との連携・融合による新世代物質・材料設計研究の促進(マテリアルズ・インフォマティクス)」(CRDS-FY2013-SP-01)（2013年8月）
- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2017年）」(CRDS-FY2016-FR-05)（2017年3月）
- ・島津博基 他『マテリアルズ・インフォマティクス～データ科学と計算・実験の融合による材料開発～』（東京：株式会社情報機構，2018）

## 2.6 生命現象に迫る革新計測技術

### (1) 概要

近年の生命科学の研究は、次世代シーケンサーや質量分析器の進展に伴い、ゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボローム等の多量のオミクスデータや、クライオ電子顕微鏡や超解像顕微鏡のような計測機器による多量の精細な画像データを解析するという、いわゆるビッグデータ時代に突入した。従来の生物学研究は個々の要素に着目した要素還元的なボトムアップ型が主流であったが、現在の生物学研究はビッグデータを背景としたトップダウン型研究の比重が高まっているともいえる。

CRDS では生命科学における技術革新の 3 つの潮流を、“精緻化・精鋭化”：生命を時間的、空間的に極めて精緻に観察する技術、“多様化・複雑化”：モデル生物のみならず様々な生物種への適用可能な技術や分子～個体複雑系の解析を可能とする技術、“統合化・システム化”：ビッグデータを統合・解析し様々な事象の対象を個別化し、予測する技術、としてまとめている。このようなビッグデータの解析は、生物学的な専門性ととも、データ科学や数理科学の専門性が必須であり、融合領域・横断的研究である。

このようにライフサイエンス研究が融合領域・横断的であるように、計測・解析技術の開発も、融合領域・横断的なものになっている。例えばオミクス解析に欠かせないシーケンサーを例に挙げると、従来型のいわゆる電気泳動方式のシーケンサーは、生物学的知識よりは DNA 鎖を物理化学的な高分子として捉え、物理化学的な専門性と工学的な専門性が融合することにより開発することができた。しかし、特に第 3 世代シーケンサー（DNA の 1 本鎖を長く読める）では、ナノサイズのポアを高精度、高密度に構成する技術、微量の電気シグナル検出、解析する等の工学的専門性ととも、タンパク質をハンドリングする分子生物学的な専門性、さらには解析されたシーケンスデータを解析するデー

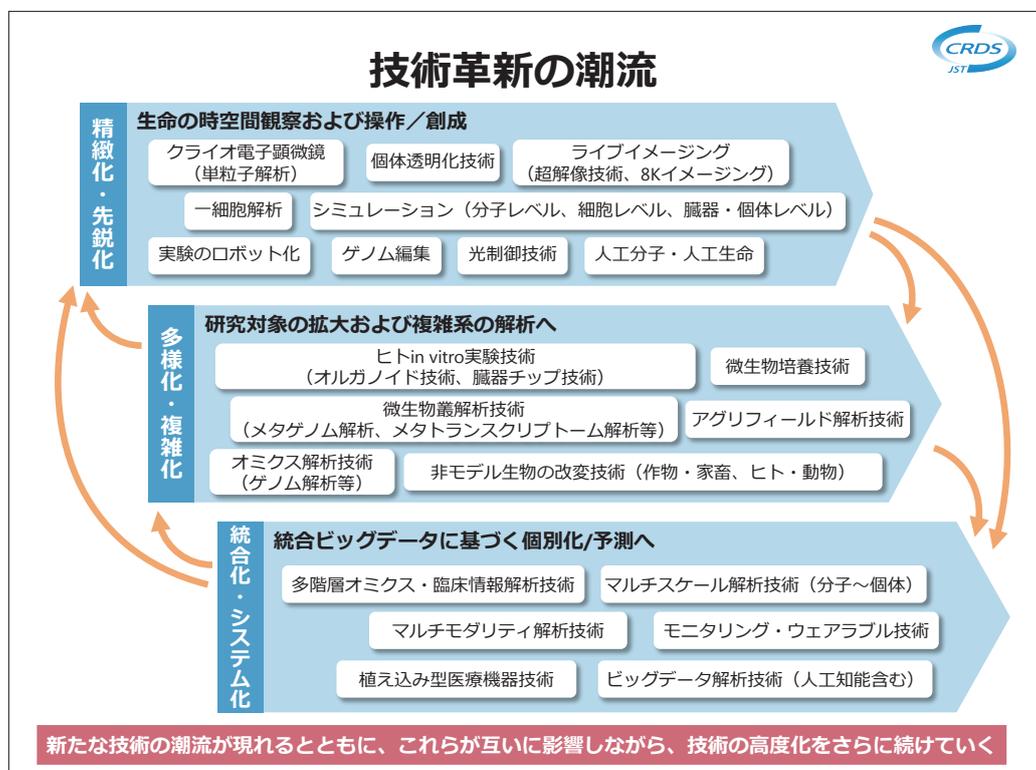


図 2-6 生命計測技術革新の潮流

タ科学、インフォマティクスの専門性の連携・融合により開発されている。また、“精緻化・精鋭化”した技術としてクライオ電子顕微鏡や超解像顕微鏡がある。クライオ電子顕微鏡はセンサー技術と画像解析技術（単粒子解析）と生体分子調製技術という工学、画像解析、生物学の連携・融合が必須であり、超解像顕微鏡においても、光学、画像解析に加えて蛍光蛋白質等のハンドリングという分子生物学的な技術の連携・融合により光の回折限界をこえるイメージングを達成している。

## (2) 融合・横断のポイント

技術革新の潮流の一つである“精緻化・精鋭化”のひとつとして、クライオ電子顕微鏡がある。クライオ電子顕微鏡は、精製したタンパク質等の試料を非晶質の氷の中に分散した状態で包埋し、様々な向きの試料を単粒子再構成法という計算手法により高い解像度で立体構造を解析する方法である。このようなブレークスルーをもたらしたのものとして三つの革新的技術がある。一つ目は、センサー技術である。電子を直接検出できる高感度な CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体) カメラであり、このカメラにより読み取り速度が従来の CCD カメラに比べて格段に速く、入射する電子を直接計数することが可能となった。二つ目は、試料交換をコンピュータ制御で自動化するロボット技術である。三つ目はソフトウェア技術である。クライオ電子顕微鏡単粒子解析の画像解析ソフトウェア Relion は、ベイズ統計をアルゴリズムに組み込み、粒子の構造が均一でないことを考慮に入れて画像解析を行う方法である。このソフトウェアの登場により近原子分解能を得る速度が飛躍的に改善されている。クライオ電子顕微鏡の試料は生体分子粒子が非晶質の氷に単分散していなければならず、生物学的知識が欠かせない。さらに、クライオ電子顕微鏡撮影画像は 1 視野の画像データが 11 ギガバイトにも達し、1 セットの解析用データが 50 テラバイトを超えるため、そのような大量のデジタルデータを転送、処理、保存する技術開発が、ハード・ソフトともに必要である。このようにクライオ電子顕微鏡では、センサー技術、ロボット技術等の工学技術、画像解析等のソフト技術、デジタルデータのアーカイブ転送等のコンピュータ技術、試料調製、データ解釈における生物学の専門性が融合して初めて近原子分解能の構造解析が可能になる。

また、“多様化・複雑化”にはハイスループットなシーケンサー技術が必須となる。従来の電気泳動型の第 1 世代のシーケンサーに比べて、第 2、第 3 世代シーケンサーは学際的な専門知識が欠かせない。第 2 世代シーケンサーは、電気泳動を用いずに酵素反応と、多くは光学的な方法によりシーケンシングする技術であるが、酵素のハンドリングという分子生物学の専門知識と光学や電気といった専門性がなければ開発できない。第 2 世代のシーケンサーは、DNA を増幅して解読していた。そのため少量試料では増幅によるアーティファクト（試料中に本来存在しなかった DNA 配列が生成される現象）が出る可能性がある。第 3 世代のシーケンサーでは、DNA を増幅せずに、1 分子で解読する技術である。その技術の一つであるナノポアによるシーケンサー技術は、タンパク質で構成されたナノポアの中を 1 分子の DNA が通るときの電流値を計測して塩基配列を解読している。このナノポアをアレイ状のセンサーチップに配置し、集積回路により計測制御を行っている。このように第 1 世代の電気泳動法によるシーケンサーに比べて、第 2、第 3 世代のシーケンサーは、生物工学と電気工学、さらには計測されたデータを統合的に解析するデータ科学が融合した技術である。

従来の計測機器は一般的に、物理、化学、工学技術により開発されてきた。上述した例にとどまらず、近年の生命科学における革新的技術は、これらの工学技術に加えて、生物学的な専門性が必須となってきている。

## (3) 課題と方向性

- ・情報科学と工学技術との連携

生命現象や生命機能を理解するためには、個々の分子から細胞レベル、組織レベルまで高い時間、

空間分解能でイメージングすることが求められる。その実現には、光学デバイス、レンズ、撮像素子などの光学系や撮像系技術等の工学技術を、目的とする生命現象や対象物に合わせて開発することが必要となる。特に、ナノメートルからセンチメートルを超える幅広いダイナミックレンジからなる膨大な量の画像データや、オミクスデータを合わせたデータ処理・解析技術等の情報科学との連携が必須となる。

- ・ 計測機器・データの標準化

画像データでは、現状でも個々の研究者が必要とする以上の情報量が含まれている。それを、他の研究者と共有し、それぞれの研究者が個別の観点から解析できるようにすることで、取得したデータをより有効に利用できるようになるはずである。また、異なる手法により得られたデータを共有し組み合わせることにより、さらに高度な解釈を得ることも可能になる。これらを実現するためには、計測機器においても大きな画像データの通信・共有に対応した仕組み、また画像データ形式や計測機器の標準化の取り組みが必要である。

- ・ 生物学、物理学、化学、情報科学、計算科学、数理科学、計測分析機器・エンジニアリングの連携と人材の育成

今日の生命科学における計測技術の開発では、ターゲットとする生命現象に対して装置開発、プローブ開発、バイオ応用の3つをバランスよく調和させなければ、実用につながる技術を開発し、普及させることはできない。また、上述のように膨大な量のデータを効率良く扱うことが求められ、情報科学との連携も必須であるため、生物学、物理学、化学、情報科学、計算科学、数理科学、計測分析機器・エンジニアリングといった様々な分野の研究者が集まって研究開発を進めていくことが必要になる。そのためには異なる専門性を持つ者同士の相互理解が深まらなくてはならないが、我が国では、生命科学の専門性と工学の専門性、情報科学の専門性等を併せ持つ装置開発者や研究者が少なく、それぞれの専門性を生かし切れていないことが課題である。

例えば米国では、学部時代に物理を専攻した学生が、ポストドクから神経科学などのライフサイエンス領域へと参入するケースが日本に比べて多く、そこから革新的技術が創出されることがある。当該分野の性質上、こうした異分野への参入を促す仕組みを構築することが新たな人材や技術の創出に有効であると考えられる。

#### (4) 海外動向

米国では、例えば NIH のコモンファンドのプロジェクト “4D Nucleome Project” において、細胞内の核がどのように構造化され機能しているのか、そのメカニズムを知ること、ヒトやマウスのゲノムの時空間的な構造と動態の解明を目指すプロジェクトが進められ、実験的アプローチと計算的アプローチが必要であるとしている。このプロジェクトは、以下の6つのイニシアティブから構成されている。

- ・ Nuclear Organization and Function Interdisciplinary Consortium (NOFIC) : マルチディシプリナリーなチームで構成されたコンソーシアムで、核の構成に時空間的にアプローチする方法の開発と評価を担う。
- ・ Nucleomics Tools: 3次元的なゲノム間の相互作用の化学的または生化学的な方法の開発と評価。
- ・ Study of Nuclear Bodies and Compartments: 3次元的な核内構造体の配置や遺伝子発現の分子装置の関連研究を行う戦略やツールの開発。
- ・ Imaging Tools: 1細胞のより高いスループット、分解能、多成分解析可能なライブイメージン

グ技術の開発。

- Organizational Hub (4DN-OH) and Opportunity Pool: データ、試薬、プロトコルを 4D nucleome 研究者や、より広範の研究コミュニティと共有する website の構築。
- Data Coordination and Integration Center (4DN-DCIC) : 4D nucleome 研究者により生み出されたデータを追跡、保存、表示を行う。統合分析を支援するデータ分析センターや、コミュニティ全体で採用される指標と基準の開発。複雑なデータセットへのアクセスと理解を容易にする視覚化ツールの提供を行う。

プロジェクトはこのようなイニシアティブにより、イメージング、ゲノミクス、遺伝子操作、生物物理、計算生物学、数値モデリングなどの学際的研究を要求している。

また、同じく NIH は “The Human BioMolecular Atlas Program” を開始しているが、この中でもオミクスとイメージングの融合を謳っており、生命科学、情報科学、工学の連携が重要な要素とされている。

英国では、Francis Crick Institute が約 9 億ドル規模の予算で活動を開始している。現在の生物医学研究では、大量の実験データや生物組織の画像を処理しなければならない。しかしながら、生物学者と物理学者では扱う言語（専門用語体系）が大きく異なり、研究文化の衝突があった。この研究所ではこの課題を解決するために、生物医学研究と物理学、化学、数学、工学などの異分野融合を推進することをビジョンとし、全研究者のうち 5 分の 1 を物理、化学、数学、工学の研究者としている。

## (5) Reference

- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-05) (2017 年 3 月)
- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-06) (2017 年 3 月)
- 岩崎憲治「新時代：クライオ電子顕微鏡による近原子分解能解析」『ライフサイエンス領域融合レビュー』5, e010 (2016) DOI: 10.7875/leading.author.5.e010
- Ewen Callaway, “London super-lab opens under cloud of Brexit,” *Nature*, 537 (2016) , 147
- Elizabeth Gibney, “Biomedical institute opens its doors to physicists,” *Nature*, 509 (2014), 544–545 DOI: 10.1038/509544a

## 2.7 バイオ生産システム

### (1) 概要

生物的プロセスを活用した生産システムの研究開発が近年注目されている。生産ターゲットとしては主に二つ、①燃料、化成品や医薬品などの有用物質、②細胞、植物、動物などの生物体そのものが挙げられる。その出口は農林水産業、食品・化学製造業、医療など、これまで生物が関わってきたほぼ全ての産業に跨り、関連する研究領域は生命分子・システム及び、栽培飼育などの利用生産プロセスの設計、最適化に関する分子レベル～フィールドまでの幅広い科学を包含する学際的側面の強い分野である。

従来は育種による生物体そのものの改良、栽培飼育による生物体の生産性向上のどちらに関しても、限られた手法しか存在しなかった。そのためこれらに関する技術開発はコストや時間を要するものが多かったが、近年のゲノム編集技術に代表されるバイオテクノロジーの革新と、分析・解析技術の高度化、さらに IoT、AI といった情報通信・処理技術の急速な発展がこれまでのバイオ生産システムの研究手法を一変させる大きなインパクトを与え、産官学のいずれからも注目を浴びている。物質生産における具体例としては、AI を遺伝子、代謝経路設計やフィードバックに活用、合成生物学と組み合わせたバイオベンチャー企業群に対して、米国では 2016 年だけで 1,000 億円規模の投資が行われている。農作物に関しては、九州と同じ程度の面積しかないオランダが IT を活用した農業、スマートアグリを推進、施設園芸に活用することで世界 2 位の農作物輸出大国へと躍進を果たしたことが挙げられる。

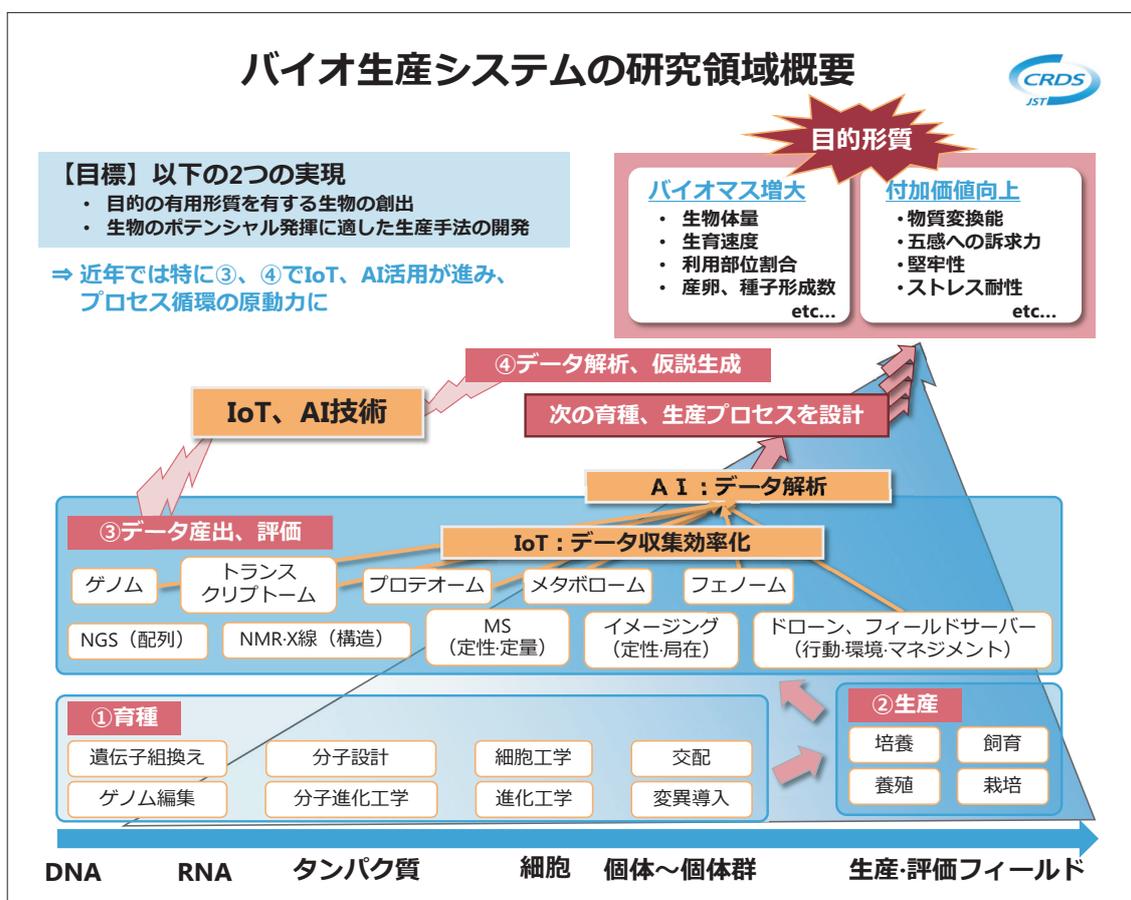


図 2-7 バイオ生産システムの研究領域の概要

また近年の SDGs、Bioeconomy といった概念の提言及び普及浸透といった社会的背景も注目を集める大きな要因である。生物は再生可能資源を原料に用いて、化学工業的プロセスと比較してエネルギー、環境負荷の低い物質変換を行うことが可能であることから、SDGs や Bioeconomy に関連した産業の創出に大きく貢献するものと認識されている。

## (2) 融合・横断のポイント

生命は DNA、RNA、タンパク質や糖質、脂質といった多種の生命分子が織り成す複雑な分子システム・ネットワークから成り立っており、これらを予想に基づき改変し、目的の形質を有する新品種を育種するのは容易ではなく、突然変異体の発見、試行錯誤の交配など運や勘・経験に大きく左右されるものであった。また新品種や新しい栽培飼育方法が実際に改善に繋がっているかは栽培飼育を行って検証する必要がある、成長に長期間を要する生物種の場合はその検証にしばしば数年単位の時間を要した。

一方、現代においては急速に生物学が発展し、その様相を大きく変えた。20 世紀は分子生物学に代表される要素還元的アプローチによる知見が蓄積され、得られた知見を統合、生命をシステムとして理解するための試みとしてシステムズバイオロジーと呼ばれる生物学が勃興した。さらに従来とは異なる要素構成的なアプローチを取り入れた合成生物学が誕生し、その流れは近年開発されたゲノム編集技術により大きく加速した。また並行して、次世代シーケンサー (NGS)、クライオ電顕、各種オミクス、イメージング技術などの解析技術が次々と開発改良され、生命分子・システムをより高い時空間的分解能で解析し、網羅的な解析データを大量に収集することが可能となった。これらのデータを情報処理技術により合成生物学と融合した育種手法の開発が進められており、特に研究サイクルの早い微生物を用いた物質生産で盛んである。成功例としては、米国のバイオベンチャー、Amyris による植物由来の抗マラリア薬、アルテミシニンの合成プロセス開発が挙げられる。その原動力は Design-Build-Test-Learn プロセス (DBTL サイクル) の自動化・システム化であり、遺伝子組み換え、ゲノム編集技術、DNA 合成技術を駆使した迅速な菌株構築 (Build)、培養サンプルの各種オミクス解析、酵素活性評価による作製株の評価 (Test)、AI を用いた評価データの解析と、次の育種に向けた設計 (Learn、Design) のサイクルの効率化が図られている。また、微生物と比較して育種やその評価に時間を要する農林水産物においてもデータ活用育種は急速に進んでいる。全ゲノム情報を多数の生物体から得て、有用形質と関連するマーカーを探索するゲノムワイド関連解析 (Genome Wide Association Study: GWAS) や、ゲノム上の DNA マーカー情報を元に形質を予測、優良形質個体を選抜するゲノミックセレクションの手法が開発され、従来手法と比較して時間空間、労力を大きく節約することが可能となった。

生産プロセス開発においてもデータ活用の動きは活発で、ここ数年で急激に発達したドローンやフィールドセンサーを用いたモニタリング技術、そして IoT、AI など情報処理技術やその融合が進む。特にこれまでモニタリングが困難であった農林水産業においてその傾向は強く、ドローンで病虫害の激しいエリアを特定しその部分にのみ農薬を散布する、センサーブイで水質の変化を検知し赤潮や病気の発生を早期に検知するといった手法が開発されている。この他にも、モニタリングで得られた環境、マネジメント情報を生物、品質情報と合わせて解析することで、複雑に変化するフィールド環境状況に応じた収穫、施肥、水やりなどの介入方法やタイミングの最適化やその実施の自動化などの試みが次々と行われるようになった。

データ駆動による融合研究の推進に向けて、オミクス解析で用いる質量分析装置、NGS やイメージング機器などデータ産出機材集約の必要性も大きく高まっている。しかしこれらの機材はいずれも高額であり、単独の研究室規模では全ての機材の調達、維持はほぼ不可能な状況である。産出される膨大なデータの処理、構造化も人間の処理能力を大幅に超えており、ハード、ソフトの両面での集約

が求められている。このように近年のバイオ生産システム研究においては異分野融合領域として取り組む重要性が一層強く認識されるようになり、豊富な人材や資金を要するビッグサイエンスとしての側面も強くなっている傾向がある。

### (3) 課題と方向性

前述のように、バイオテクノロジー、分析・解析技術、情報処理技術の革新と融合により本領域を取り巻く状況は一変した。しかしそれでも、バイオ生産システム研究には特に効率性という点で課題は多い。その本質は育種、生産プロセスのいずれにも一貫した指導原理が存在しないという点にある。育種成功例とされる事例も、本質的には天然、既存に存在する核酸、アミノ酸配列をベースとして改良、改変し、生産プロセスを実施して選抜を行って得られたものがほとんどである。そのため全く新規の配列をベースとした機能性分子、新規システムを合理的に設計し、その能力を予測することは現在でも困難なままである。生産プロセスにおいても改良速度は大幅に向上しているものの、何故それで上手くいったのか、という問いに対する生命科学的な説明はブラックボックスのまま置き去りにされている例が多い。本領域における直近の技術進歩は従来の試行錯誤のプロセスを高速で行うものが多く、成功例が知られているものを改良するには有用だが、全く成功例が存在しない事例に対しては答えを出すことはおろか検討の範囲に目的とする答えがあるのかを判別することすら困難であるのが現状である。

このような現状を打破するためには、生命システム、生産プロセス設計のための指導原理創出を目指し、その設計精度を向上させていく必要がある。そのためには生命分子・システムの統合的理解を通じた生命科学全般の構造化と、その知見を生産プロセスと結び付けて考えることが必要不可欠である。近年研究コミュニティ、分野横断、融合的な研究例が増えているとはいえ、依然としてバイオ生産システム研究に関わる研究者のバックグラウンドには生命科学の観点だけでも偏りが大きい。また直近の産出データ増大とその解析、統合に必要な不可欠である情報科学分野の人材の参画も、わが国は諸外国の後塵を拝する状況にある。個別に優れた研究は日本にも多数存在するが、それらを個別成果に留まらせず、指導原理の創出に向けていかに束ねていくかという研究体制、土壌の仕組みを設計することが今後重要になるだろう。

本領域は元来学際的要素が強く、育種及びその評価過程で様々な実験、解析設備を必要とする。これらの機器には高額なものも多く、その利用には高い習熟度、専門性が求められるものも多い。さらに高品質データの蓄積、解析から次の手を模索するデータ駆動型科学としての側面も強い分野であることから、ハード面だけでなくソフト面でも集約が強く求められるが、このような拠点の集約は遅れ気味である。また本領域に限ることではないが、情報処理技術全般の活用の遅れも深刻である。バイオインフォマティクスに限っても、徐々にではあるが関連学科が各地の大学に設立されているにも関わらず、その修了者が定着するための土壌は整っていないと言いがたい。研究推進体制としては、研究成果が個々の成果の単なる集合体ではなく、汎用性を有する理論体系を構築することを目的とした強固な運営管理体制が重要である。産官学それぞれの参画が望まれるが、前述の通り本領域はビッグサイエンスとしての側面が強くなっており、ある程度の規模の設備を整備・維持することができなければ推進が困難であり、産業界が参入に二の足を踏む要因となっている。産官が投資を分担し、産学による育種、生産プロセス高精度設計アルゴリズムの研究基盤構築をおこなうことが重要である。

バイオ生産システム研究では生命システムの改変や創造に関わる内容も包含するため、常に ELSI、デュアルユースの観点に向き合う必要がある。しかしこれらに関連した法規制整備は科学技術開発と比較してしばしば大きく遅れる。関連科学技術が社会に与えるインパクトを考慮しつつ、汎用性と拡張性に優れた規制を迅速に整備することが重要である。

#### (4) 海外動向

バイオ生産システムの発展には育種手法の革新が必須であり、合成生物学の応用利用は育種に革新をもたらす有用なツールであると各国に認識されている。以下のいずれの国に関しても、共通してシーケンサーや質量分析装置、実験ロボット、情報処理施設などが高度に集約された研究拠点を設立している。

米国では、防衛戦略上の関心からか、公的研究では合成生物学の知見を活用した燃料、有用物質生産のような応用志向が強く、DOE、DARPA、NSF といった政府主導による研究プログラムが積極的に進められている。DOE においては 2019 年度予算要求において引き続きバイオエネルギーに関するプログラムで合成生物学研究をサポートすることが盛り込まれている。DARPA においては Living Foundries プログラムが進行中である。NSF においては Strategic Plan FY2018-2022 で New Enabling Technologies として合成生物学が言及されており、関連した研究プログラムとしては、2019 年度予算要求では Enabling Discovery through Genomic Tools (EDGE) プログラムによる合成生物学研究、Understanding the Rules of Life (URoL) による数学、物理、コンピュータサイエンスを活用した普遍的な生命のルール解明を目的とした研究の促進が盛り込まれている。民間の動きも活発であり、DARPA やゲイツ財団の支援を受けて抗マラリア薬、アルテミシニンの生産プロセスを確立し、大きな脚光を浴びた Amyris に代表されるバイオベンチャーが多数設立されている。また、食料生産研究としては、USDA により Agriculture and Food Research Initiative (AFRI) において植物、動物の健康や生産性といった内容に関する研究が盛り込まれている。

欧州では、英国が積極的に取り組みを進めており、今後戦略的に投資すべき 8 大領域の中に合成生物学、農業科学が含まれる。合成生物学は BBSRC、EPSRC の両機関が主導する。現在 6 つの大学が合成生物学の拠点として指定、国立のビジネスインキュベーターとして SynbiCITE が設けられている。

中国では、合成生物学の研究拠点が天津や深圳といった都市におかれ、海外トップラボの誘致や留学帰還者の積極的な登用により急速なキャッチアップを進めている。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「国際比較調査 特定課題ベンチマーク報告書 合成生物学」(CRDS-FY2009-GR-02) (2010 年 3 月)
- ・ 矢野経済研究所「2018 年版 養殖ビジネスの市場実態と将来展望」(株式会社矢野経済研究所, 2018)
- ・ 経済開発協力機構 (OECD) , *The Bioeconomy to 2030 DESIGNING A POLICY AGENDA* (2009)
- ・ 米国ホワイトハウス : The White House, *National Bioeconomy Blueprint* (2012)
- ・ 米国国立科学財団 : National Science Foundation (NSF), *FY 2019 Budget Request to Congress*
- ・ 米国エネルギー省 : Department of Energy (DOE), *FY 2019 Budget Justification*
- ・ 米国国防高等研究計画局 : Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), *Defense Advanced Research Projects Agency Defense-Wide Justification*
- ・ 米国農務省 : United States Department of Agriculture (USDA) , *FY 2019 USDA Budget Summary*
- ・ 英国バイオテクノロジー・生物科学研究会議 : Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC) , *Delivery Plan 2016/17 - 2019/20*
- ・ 英国 Innovate UK: Innovate UK: *Delivery plan 2017 to 2018*

## 2.8 水・エネルギー・食料問題の統合的解決のためのネクサス・アプローチ

### (1) 概要

気候変動に伴う異常気象、世界人口の増加、都市への人口集中等が、人間社会にとって不可欠な資源の確保に深刻な影響を及ぼすと懸念されている。そうした中、2011 年頃から資源の持続的な供給・消費についての国際的な議論が活発化した。その際のキーワードが「水・エネルギー・食料ネクサス (Water-Energy-Food Nexus)」である。

一般的に「ネクサス (nexus)」とは「繋がり (のある一連の物事)」を表す言葉だが、ここでは「連環」等と訳され、主に資源を巡る相乗関係 (Synergy)、二律背反関係 (Trade-off)、対立関係 (Conflict) に注目する。近年は「水・土地・エネルギー (Water-Land-Energy)」や「水・廃棄物・土壌 (Water-Waste-Soil)」等のネクサスも研究されている。

ネクサスの考え方に基づく研究や課題解決のための方策検討は「ネクサス・アプローチ」と言われる (図 2-8)。国際社会での議論の活発化を受けてネクサス・アプローチ関連の研究が世界中で進められており、その方向性は概ね次の 3 つである：1) ネクサスの視覚化と解決方策の開発、2) ネクサスの実践 (ステークホルダーとの協働による問題解決)、3) 一般的手法の開発。また研究対象として多いのはエネルギー・水ネクサス問題である。欧州の公的研究機関や米国の大学等で比較的研究が盛んだが、中東、南米、アジアでも取組みがある。日本では大学や公的研究機関による活動が見られるものの、世界の状況を踏まえると全体としては必ずしも活発でない。今後は、トランスディシプリナリー研究の流れの中で、政策的なイニシアティブによる戦略的な推進や民間企業取組み支援等を通じた強化が期待される。

### (2) 融合・横断のポイント

ネクサス・アプローチでは従来個別に扱われていた複数の重要課題を一つの課題と捉え直し、その個別課題間の連環に注目する。そして個別最適の積み重ねよりも統合的かつ効率的な課題解決を目指す。例えば持続可能な都市をテーマとした場合、食料やエネルギーの都市への供給に必要な水の確保、

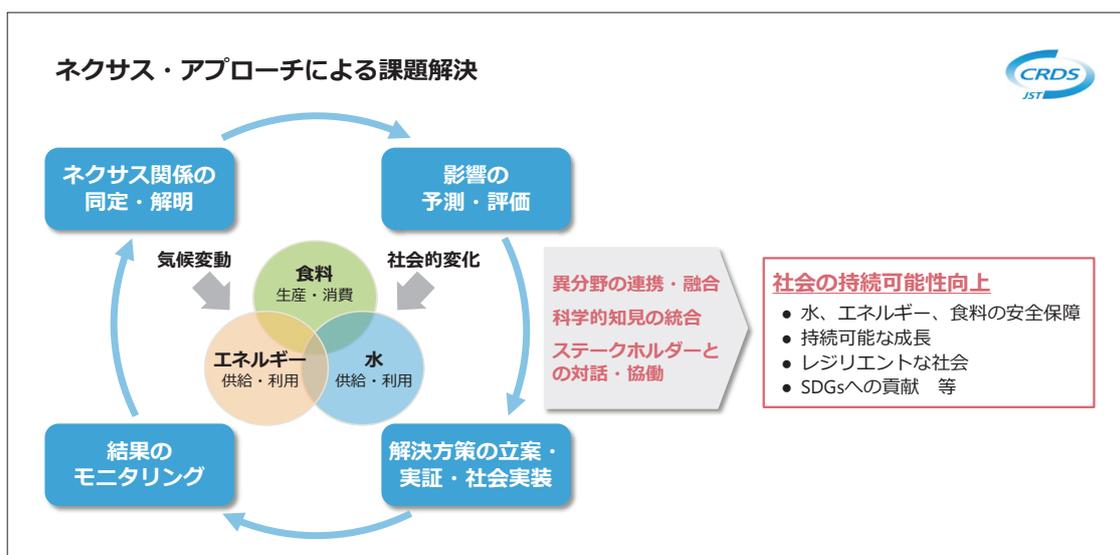


図 2-8 水・エネルギー・食料問題に対するネクサス・アプローチの概念図  
(田崎 & 遠藤 (2017)、Hoff (2011) を参考に CRDS 作成)

水供給に必要なエネルギーの確保等、資源間の連環に注目することで、全体最適なシステムの構築を目指す。

個別課題を超えた取組みとなるため必然的に研究に学際性が求められる。地域の具体的課題に取り組む場合は政策立案者を含むステークホルダーとの協働も必要となる。目的の共有、科学的知見の統合、コミュニケーション等は不可欠な要素となる。加えて研究プロジェクトの実施にあたっては全体を統括するリーダーの素質が重要になり、同時に各研究参加者にも個別の専門性に加えて学際研究への理解と積極的な関与が求められる。より長期的には、学際研究を本格的に教育する場からそうした人材が輩出されることが重要である。

### (3) 課題と方向性

#### 研究開発上の課題

ネクサス問題は地域性が強い場合も多く、ケース・スタディが各地で実施されている。比較的良好に取り上げられるのはエネルギー・水ネクサスである。水力発電やバイオ燃料に用いられる水、あるいは下水処理や農業用水供給のためのポンプ駆動に必要なエネルギーの実態把握や管理技術等に関する研究が行われている。自国のネクサス問題に加えて開発途上国への援助としてネクサスプロジェクトを実施するケースもある。空間規模では地域規模から国・地域あるいは全球規模（気候変動等）の研究まであり、異なる規模間での情報の統合化が課題の一つとなっている。

ネクサス・アプローチに必要なツールとして、ネクサス関係を分析、可視化、予測するためのモデル開発が行われている（例：The Water, Energy, Nexus Tool 2.0）。実質的な標準モデルは未だなく、次のような意義があることから研究開発が進められている：1）地域の各主体や政策立案者等のステークホルダーとのコミュニケーションツールであると同時に、住民がネクサス問題に自ら取り組む際に利用可能なツールとなる（社会的意義）、2）様々な情報や知見の統合化ツールとなればネクサス問題に幅広く展開可能なツールとなる（科学的意義）。今後検討すべき項目には、モデルの対象範囲（資源の種類、都市や流域圏といった空間的広がり等）、気象や人口動態等の不確実性の組み込み、サブモデル間の連携、優れたユーザビリティ、統合化モデルの開発等が挙げられている。モデルに加えてデータの重要性も大きい。観察データ、統計データ、実験を通じて得られるデータ、推計等によって新たに生成されるデータ等、多様なデータが介在する。そのためこれらデータをどう効率的に収集、処理、利用するかという点が課題である。

更にネクサス問題の分析から得られた理工学的な知見を地域の課題解決に結びつけるためには法学的、社会科学的観点からの検討も必要となる。例えば関連規制を洗い出して相互の関係性を整理する研究等が行われている。

#### 日本におけるネクサス・アプローチ研究の本格化に向けた課題

日本でネクサス・アプローチを明示的に掲げた取組みは限定的である。しかし SDGs の達成に向けた取組みでもネクサス・アプローチの重要性が指摘され始めていること等を踏まえると、今後の活発化が予想される。またそれに伴って国としての戦略的な推進を期待する声が高まることも予想される。進め方としては、例えば、1）府省横断的なイニシアティブを掲げ、その下で基礎、応用、実証、実装、技術移転等の様々なフェーズの研究開発関連施策を展開する、2）まずは科学的知見や個別技術の収集・蓄積を目的としたケース・スタディの支援を行い、事例を蓄積しながら将来的に取組みを本格化させる、3）中央アジア、中東、アフリカ等、海外でのプロジェクトの実施やその支援を行う（例：脱塩化の技術移転）、4）民間企業の参画を促す（プロジェクト参画、大学や公的研究機関との共同研究の促進等）、等の様々な形が考えられる。

#### (4) 海外動向

近年のネクサス・アプローチの議論は 2011 年に独政府がボンで開催した会議がきっかけである。同会議は「国連持続可能な開発会議(リオ+20) (2012 年 6 月開催)への貢献を目指すとともに、「水・食料・エネルギー安全保障ネクサス」への取組み及びその統合的解決に向けた新しいアプローチの必要性の共有・議論を目的とした。

この時期には国際機関等からも提言やレポートが出され、同時に国や機関レベルの具体的取組みも増加した。2012 年には、欧州では独政府の支援でネクサス関連の情報プラットフォーム (Nexus Resource Platform) が開設された。ドレスデンには国連大学物質フラックス・資源統合管理研究所 (UNU-FLORES) が設立された。米国はエネルギー省 (DOE) がエネルギーと水のネクサスに関する省内横断組織 (Energy-Water Nexus Crosscut Team) を発足させた。日本では総合地球環境学研究所が「アジア環太平洋地域の人間環境安全保障 水・エネルギー・食料ネクサス」プロジェクトを開始した (2012 ~ 2017 年)。

米国では、DOE の省内横断組織が、大学や DOE 傘下の国立研究所との共同によるワークショップ等を通じた問題の深掘り、米国内の水・エネルギーネクサス関係の分析及び視覚化、省内関連プロジェクトの一元化 (リスト作成)、EU との共同ワークショップ開催、中国との二国間共同研究開発プロジェクト開始等を行ってきた。更に国立科学財団 (NSF) が 2016 年からネクサスを柱としたトップダウン型の研究プログラム (Innovations at the Nexus of Food, Energy and Water Systems, INFEWS) を開始した。INFEWS は食料・エネルギー・水資源の相互関連性の理解を社会の持続可能性の増進やレジリエンスの強化等へと繋げてゆくための統合的かつコンバージェントな研究の推進を目標としている。

地球環境分野の国際研究イニシアティブ「Future Earth」(FE) も、「Future Earth 2025 Vision」(2014 年)の中の 8 つの重要な挑戦課題のうちの 1 つに水・エネルギー・食料ネクサスを挙げている。FE は、今後の地球環境研究において、自然科学、社会科学、工学、人文科学、法学等の異分野間でのインターディシプリナリー研究を推進し、かつこれをアカデミアだけではない多様なステークホルダーと共に設計・創造すること (トランスディシプリナリー・アプローチ) を目指している。この FE の挑戦課題を受け、FE のメンバーであるベルモント・フォーラムが国際共同研究活動 (Collaborative Research Action) の 2016 年公募課題で「Sustainable Urbanisation Global Initiative (SUGI) /Food-Water-Energy Nexus」を設定した。採択課題 15 件のうち 2 課題に日本の大学と公的研究機関が参画している。

ネクサス・アプローチ研究をリードする国際的な研究機関には UNU-FLORES、国際応用システム分析研究所 (IIASA)、ストックホルム環境研究所 (SEI) 等がある。UNU-FLORES は The Nexus Observatory プロジェクトを開始し、科学的知見をいかに政策的な意思決定につなげるかという観点から、各種データや知見の整理・統合、知識の変換、情報伝達等のためのプラットフォーム構築に取り組んでいる。

SDGs の議論でもゴール間のシナジーやトレードオフを考慮した包摂的な取組みが求められている。国際科学会議 (ICSU) 等の複数機関が SDGs のゴール間の関連性を視覚化する取組みを行っている。今後は、これを実行へと移してゆくために SDGs へのネクサス・アプローチの取り込みが重要になると予想される。実際に食料・エネルギー・水ネクサスが対象とする課題は多数の SDGs と関連が深い。近年の環境・エネルギー分野の国際会議や学会等でネクサス問題をセッションテーマに取り上げる事例が散見されるようになってきている。また国際エネルギー機関 (IEA) の専門家グループも 2018 年 5 月に水とエネルギーのネクサス問題に関する課題等を議論するワークショップを欧州委員会下の共同研究センターと共に開催した。こうした国際的な注目は今後も続く予想される。

## (5) Reference

- 田崎智宏、遠藤愛子 「「ネクサス」と SDGs ー環境・開発・社会的側面の統合的実施へ向けて」『持続可能な開発目標とは何か』蟹江憲史 編著 (京都: ミネルヴァ書房, 2017)
- Endo, A. et al. “A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus,” *Journal of Hydrology: Regional Studies* 11 (2017), 20-30
- Hoff, H. *Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 NEXUS Conference* (Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011)
- Griggs, D. et al. “Policy: Sustainable development goals for people and planet,” *Nature* 495 (2013), 305-307
- International Council for Science (ICSU), “A Guide to SDG Interactions: from Science to Implementation,” (Paris: ICSU, 2017)

## 2.9 物質・資源循環システム

### (1) 概要

人間は生活を営む上で様々な物質や資源を利用・消費する。しかし地球上のあらゆる物質や資源は基本的に有限である。また資源の枯渇や濫用は人間社会の発展を阻害し、地球環境にも負の影響を及ぼす。そのため、社会の持続的発展は、物質・資源利用の持続可能性の向上と共に進めることが肝要である。物質・資源利用の持続可能性向上のためには各々のバリューチェーン全体を考慮に入れた循環的利用の視点が欠かせない。その上で科学的知見の統合による全体像の把握・分析、各種技術の開発、規制の変更、システムの構築、社会との協働等、様々な手段を活用した取組みが求められる。次に物質・資源の循環を考えるためには、対象となる系と対象となる元素についてそれぞれ考慮する必要がある。対象となる系としては、自然界における人間の営みに関わる物質循環、ならびに人間社会を中心とした人工物の中での物質循環、の二つがある。

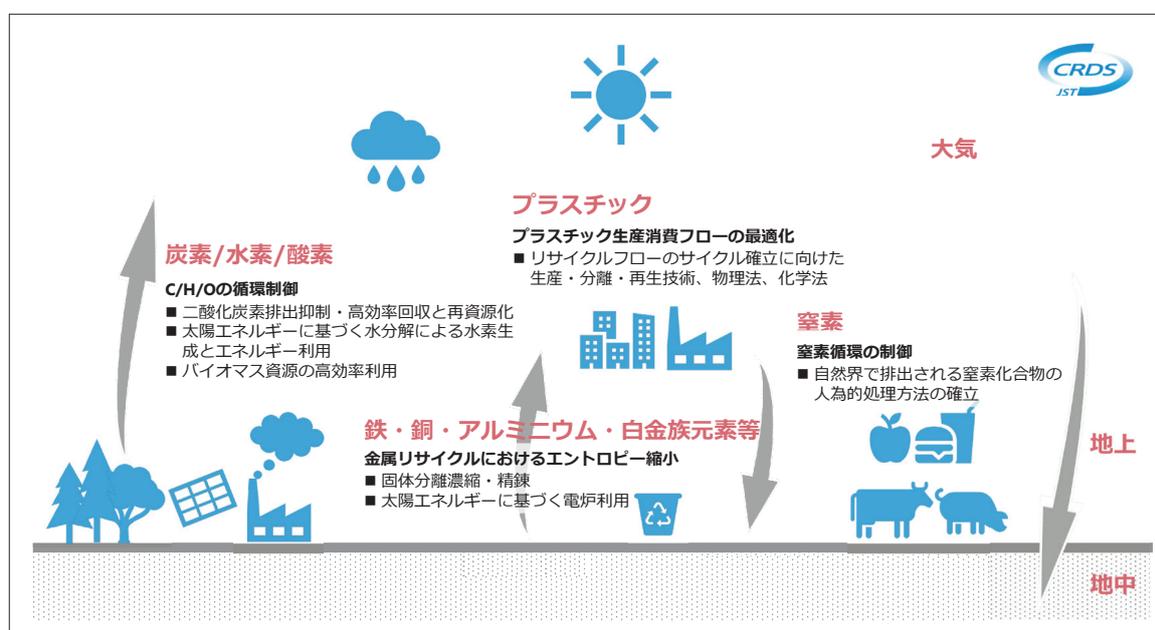


図 2-9 二つの物質・資源循環の流れ

自然界における人間の営みに関わる物質循環を考えた場合、主対象となる元素として窒素や炭素を挙げることができる。まず窒素はハーバー・ボッシュ法の確立によって自然界における元々の循環が大きく変化した元素である。ハーバー・ボッシュ法による年間 1 億 8 千万トンのアンモニア合成に端を発する過剰な施肥は、土壌・水域・大気への窒素化合物放散を引き起こしている。炭素も同様に、化石資源由来の炭素が人間活動を介して二酸化炭素となり大気中に大量に放出され地球温暖化の一因となっている。なお炭素に関しては、化石資源の他にも、水と二酸化炭素から光合成を介して有機物(植物体)へと変換され、その有機物が人間社会の中で様々な形で利用・消費されており、水素、酸素との組み合わせ(C/H/O)を様々なに変化させる形で循環している。よってそうした点に着目した循環利用を考えることも重要である。人間社会を中心とした人工物の中での物質循環(マテリアル・フローとも言われる)では、鉄・銅・アルミニウム・白金族元素等の希少元素・プラスチック(有機化合物)が主対象となる。鉄・銅・アルミニウムは金属の中でも比較的混合せずに用いられ、その消費量が多い。また白金族元素等の希少元素は微量ながら高価であり、賦存量も少ないため、消費後には都市鉱

山の形で回収再利用される。プラスチックはほとんどが難分解性のため、自然界には回帰せず、分離回収も難しいためリサイクル率が低く、廃棄物処理施設の圧迫やマイクロプラスチックによる海洋汚染等が問題になっている。

これらに鑑みた場合、今後考えるべきポイントは、C/H/O の循環制御（二酸化炭素排出抑制・高効率回収と再資源化、太陽エネルギーに基づく水分解による水素生成とエネルギー利用、バイオマス資源の高効率利用）、窒素循環の制御（自然界で排出される窒素化合物の人為的処理方法の確立）、金属リサイクルにおけるエントロピー縮小技術（固体分離濃縮・精錬、太陽エネルギーに基づく電炉利用）、プラスチック生産消費フローの最適化（リサイクルフローのサイクル確立に向けた生産・分離・再生技術、物理法ならびに化学法を含む）などが挙げられる。

## (2) 融合・横断のポイント

自然界における物質循環に関して、窒素循環は、人間活動に起因する環境負荷軽減のための対策が必要である。これには肥料工業・農業・水処理などが排出制御の鍵を握り、大気観測・環境評価などがモニタリングに関わっており、多分野の知見を融合して進めていく必要がある。この際、対象とする物質循環の範囲を広げるほど、対策支援を単独の公的資金でまかなうことが困難となるため、関連府省の連携に基づく支援が重要になる。例えば米国の気候変動研究プログラム（Global Change Research Program）は予め作成される全体的な計画に基づき各府省の計画が立案される仕組みになっており、こうした府省連携体制の構築が規模の大きい物質循環関連研究の推進では一つの望ましい形となる。また、実社会における実証や普及の段階では、通常の意味での科学研究者や技術・サービスの事業化をめざす企業その他、自治体、生産活動・消費活動に対する助言者として働く専門家（都道府県の農業技術センターの専門職員等）、農業者、消費者等の参画も必要になる場合が考えられる。

C/H/O の循環に関しては、現在の化石資源に依存したエネルギー・物質の流れから脱却するための取組みが必要である。これには、再生可能エネルギー由来電力を用いながら、炭素源（原料）としてバイオマスや二酸化炭素を利用する物質変換技術の高度化が必要である。二酸化炭素の再資源化については植物の光合成（遺伝子組換えなどによる生育促進）、人工光合成（光触媒性能向上）、二酸化炭素分離濃縮（高効率化）がいずれも重要であり、さらには希薄な大気中・排気中の二酸化炭素の直接利用（DAC と呼ばれる）にも注目が集まる。併せて、水素の製造と利用（水分解の効率向上、バイオマスや廃棄物からの水素製造、中温域で動作可能な燃料電池の開発、高効率水素燃焼、水素貯蔵輸送のためのエネルギーキャリア技術）、植物資源の有効利用（バイオマスの集約、高効率ガス化、バイオリファイナリ技術による化学品製造、セルロースナノファイバー（CNF）などによる次世代材料製造）などが鍵となる。これらを進めるためには農学・工学・理学・環境学の融合が重要である。

人工物の中での物質循環に関しては、有用かつ希少な天然資源の減少や世界的な供給不安定化、価格高騰等の資源問題への対応として、都市鉱山に代表される質の高い資源循環システムの構築が必要である。鉄・銅・アルミニウム・白金族元素等の希少元素については回収、固体分離精製、濃縮、精錬が鍵を握っており、工学・環境学が中心となる。またプラスチックについては、分離回収・精製、油化・ガス化などが重要な要素技術であり、また海洋などでのモニタリングも重要である。ここでもやはり工学・環境学を横断する知見が必要となる。

## (3) 課題と方向性

自然界における物質循環を持続可能にしていくためには、未解明の事柄も依然として多いためプロセス解明が重要である。また非線形性があり将来変化の予測には不確かさが避けられない。そのため、その時点での物質循環の観察（モニタリング）に基づき対策を構築し、結果を踏まえて更に対策を修正していく、というフィードバック・ループを組み込んだ管理方法（順応型管理）が必要であり、そ

のための技術やシステムの構築が求められる。またその際、物質循環は自然の循環過程によっても人間活動（貿易等）によっても生じるため、一国だけではない国際的な連携の観点も重要になる。とりわけ窒素に関しては東アジアが世界の中でも施肥による環境負荷の大部分を占めており、その軽減が重要な課題である。従ってこうした地域で導入可能な、経済性に優れた環境負荷のモニタリング技術と軽減対策技術の研究開発が必要になる。

C/H/O の循環については、人間活動を通じた化石資源由来の二酸化炭素の大気中への排出を如何に制御するかが課題となる。そのための様々な研究開発が世界中で積極的に進められている。これらの中で重要と目されているものとしては太陽エネルギーを用いた再資源化技術（とりわけ二酸化炭素還元に必要な水素製造技術）、水素貯蔵運搬のためのエネルギーキャリア関連技術、バイオマスの高効率回収技術、バイオマス高効率利用技術、および希薄な二酸化炭素の高効率回収技術等である。

人工物の循環に関しては、希少元素については「元素戦略」の下で「代替」（特定の元素に依存せず豊富で無害な元素によって目的機能を代替）、「減量」（希少元素・有害元素の使用量を極限まで低減）、「規制」（有害物質に対する各国の使用量規制や基準を乗り越える高い技術の戦略的な開発）、「新機能」（元素から未知の機能を生み出す）に関する取組みが中心であったが、一方で「循環」（循環利用や再生を推進）に関する取組みが不足していた。従って今後は希少元素の再利用技術の開発や再利用システムの構築や、元素毎のマテリアルフローの追求に更に注力することが必要になる。また鉄・銅・アルミニウムについては効率良い固体分離技術、水素を用いた製鉄（COURSE50: CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50）技術、太陽エネルギーを用いた高効率電炉（濃縮・精錬）技術が、プラスチックについては異種の材料の混合体を分離処理あるいは併存処理する技術が望まれる。

#### (4) 海外動向

窒素循環に関しては、地球規模での窒素循環の管理に向けた、研究者の国際的なパートナーシップである国際窒素イニシアティブ（INI）が 2003 年以降続けられている。各地域の窒素アセスメントの実施や、米国とオランダの研究者らが共同で開発した窒素フットプリント計算ツールを用いた普及・啓発等を行っている。また現在、地球規模の窒素管理のための各国の政策立案支援を目的とした国際窒素管理システム（INMS）創設が国際的に議論されており、その創設に向けた 4 年間の先行プロジェクト「Towards INMS」を INI が 2017 年に開始した。同プロジェクトは地球環境ファシリティ（GEF、5 つの環境関連条約の資金メカニズムとして世界銀行に設置されている信託基金）を用いた国連環境計画（UNEP）の支援により、イギリス自然環境研究会議（NERC）を通じてイギリス生態水文学研究所（CEH）が代表機関となって実施されている。日本からの参画登録機関は農研機構・農業環境変動研究センター、北海道大学、国立環境研究所、立命館大学である。

C/H/O 制御に関して代表的な取組みは、ドイツ連邦教育研究省（BMBF）が 2016 年に発表した「エネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクト」の柱の一つ「余剰電力の貯蔵“Power-to-X”」である。エネルギー転換とは一極集中型の化石・原子力発電から分散型の再生可能エネルギーへの転換を目指す連邦政府の方針である。Power-to-X では余剰な再生可能エネルギーの 90% 以上を化学的原料、ガス燃料、または燃料の形で貯蔵するプロセスに関する研究等を実施している。開始後 10 年間でアーヘン工科大等のアカデミア、シーメンス社等の産業界、そして市民が連携してエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策の創出を目指す。米国では早くからバイオマスを原料とした化学品製造の重要性が提唱され、バイオマスリファイナリに関するファンディングがなされてきた。

人工物の中での物質循環に関しては、欧州で比較的積極的な取組みが見られる。欧州委員会は主要な経済成長戦略の一つとして 2015 年に「循環型経済（Circular Economy）パッケージ」を公表した。廃棄物の削減やリサイクルの推進に関する行動計画や目標が示され、希少な鉱物資源の戦略的利用も

含まれている。希少な鉱物資源利用の一環として「Critical Raw Materials」のリストを見直す検討が 2017 年に行われ、改めて 27 の対象鉱種が特定された。また行動計画の中にはプラスチックに対する戦略もあり、リサイクル可能性、生物分解性、危険物質の含有、並びに SDGs への貢献を目指した海洋ごみの大幅削減に焦点をあてている。

加えてプラスチックについては、欧州委員会が 2018 年 5 月に使い捨て容器包装に利用することを原則禁止した。またプラスチック容器や包装の回収処理費用を製造者に負担させる通達が出ており、時期は定めていないものの、使い捨ての弁当容器やフォーク・スプーン等はなくし、ペットボトルは 90% 以上をリサイクルさせる予定である。こうした背景には中国における廃棄物輸入禁止策の施行があるとの見方がある。他方、米国では欧州のような動きは国レベルでは現在のところ見られず、回収されたプラスチックは自国で大半が処分され、一部がリサイクルされている。

希少元素については日本が世界に先駆けて 2004 年に「元素戦略」を提唱し、米欧がそれに追随し、現在までこれら三極が密接に連携しつつも各々に戦略的な取組みを行ってきている。現在は比較的大きな新しい動きは見られないが、米国の国家科学技術会議 (NSTC) の下部委員会で重要元素 (critical minerals) リストの見直しが行われる等、各国・地域で安全保障の観点から情勢を注視している。

## (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 持続的窒素循環に向けた統合的研究推進」(CRDS-FY2012-SP-01) (2013 年 2 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「ワークショップ報告書 科学技術未来戦略ワークショップ報告書 高度炭素・水素循環に資する革新的反応・分離のための CxHyOz 制御科学」(CRDS-FY2017-WR-12) (2018 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-05) (2017 年 3 月)
- ・ 種田あずさ 他「地球規模での窒素循環管理に向けた窒素フットプリント研究の最新動向 - 国際ワークショップ参加報告 -」『日本生態学会誌』67 (2017), 189-196

## 2.10 分離工学 ～つくる技術と一体不可分で開発しなければならない分ける技術～

### (1) 概要

自然界は種々の物質からなる多様な混合物で構成されており、多くの反応が同時進行的に起きている。生体内も同じ状況で、血液中では無数の物質が入り混じって流れている。持続可能な社会を構築していくためには、混合物から有用な物を選別して取り出し、不要物を取り除くプロセスが重要となるが、エネルギー投入が必要となる。目的物質を高精度にかつできるだけ低エネルギーに「分ける」という分離プロセスは、合成・製造に並ぶ基本プロセスであり、産業においても極めて重要な位置を占める。例えば廃水処理や海水淡水化における分離プロセスは省エネ分離が課題であり、シェールガス・シェールオイルの採掘時に生ずる汚染水は環境問題を引き起こすことが懸念され、有効な分離技術が求められている。他にも放射性物質の安全な分離や、バイオ燃料精製時の脱水分離、大気中における PM2.5 のような汚染物質の分離、発電所や工場から生じる CO<sub>2</sub> の分離、高純度水素の分離、さらには鉱物資源の選鉱、製錬・精錬も分離プロセスだが、世界では、良質の鉱山は減少しており、ヒ素等の有害な物質を多く含む低品位鉱の採掘に着手せざるを得ず、目的とする元素資源を低環境負荷・低エネルギーで分離する事が求められている。人類は資源から多様な製品を工業的に生産し、消費し、次はリサイクルで再び分離することが求められる。循環を考えた分離が課題である。一方、生体に目を向ければ、特定の細胞やタンパク質、医薬品成分の分離精製など、疾患の早期診断・治療、低侵襲治療に高速の分離プロセスが要求されている。これらバイオ系物質の分離では、分析と一体になった技術が必要であり、しかも、患者の負担を減らすため、あるいは体内に少量しか存在しない成分であることから、極微量での高精度分離・分析が重要になる。現代の分離要求はこれほどまでに多岐にわ

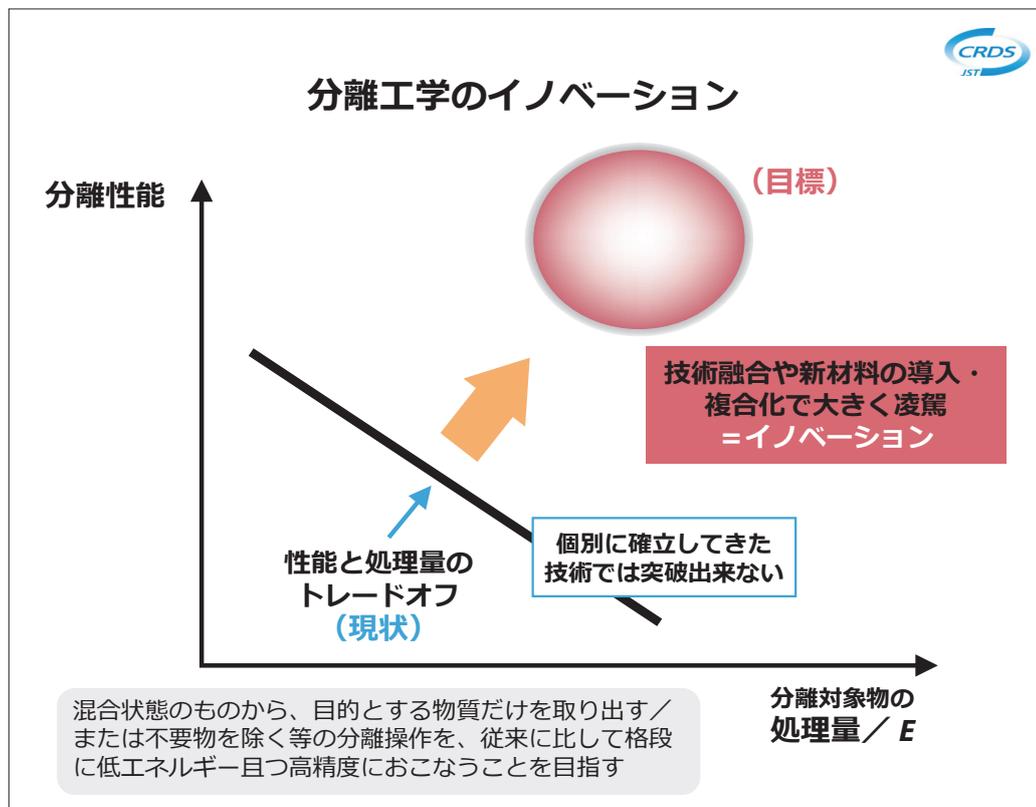


図 2-10 分離工学のイノベーション

たるが、化学工学や精錬学に代表される既存の学術体系によって構築されてきた分離プロセスだけでは対応できなくなっており、現代の科学技術・イノベーションの観点から、そして将来社会・産業の要請からより横断的な分離工学として捉え直す時期に来ている。

## (2) 融合・横断のポイント

あらゆる分離操作は、物質の化学的、物理的、電気的物性に起因する。自然界の物質から利用物質へと変換する各過程で、多様な物質の状態を計測し、ミクロレベルの物質の挙動、分離メカニズムを明らかにする基礎研究、マクロレベルの分離の制御、最適化や実装までの工学的研究を実施することにより、幅広い自然科学分野の連携と融合、基礎研究からシステム開発・実装までを考えることが重要になる。一般に分離の基本原則は、機械的分離、平衡分離、速度差分離に大別され、それぞれ学問的基盤が構築されている。近年のナノテクノロジーや先端計測技術、シミュレーション技術の飛躍的進展を活用し、これら基本原則と、分離操作を担う媒介となる物質・材料・デバイス・プロセスを、原子・分子レベルで制御することによって、従来は困難であった低エネルギー・高精度な分離操作の実現を目指すことが必要である。通常、分離対象物の単位エネルギーあたりの処理量と分離性能は、トレードオフの関係にあるが(図 2-10)、分離性能を高く保ったまま、必要な処理量の分離を実現するイノベーションが目標となる。そこでは、個別に確立されてきた技術手法だけでは突破できない現状を、技術融合や新材料・デバイスの導入、反応との組合せなど複合化することによって、大きく凌駕することが求められる。これには、分離工学を体系化し、横断的な取り組みからイノベーションへ結びつけることを目指すことがポイントである。

現代の分離ニーズは、より多様化・複雑化したニーズが次々に登場している。これら分離の対象課題は、3つの主要ニーズ・方向性に大別される。すなわち 1. 気体・液体の分離、2. 鉱物資源・固体の分離、3. バイオ・医薬食農系の分離、である。化学工学、金属工学、生物工学は当然のことながら、プロセスを構築するための機械工学や流体力学が求められる。さらにこれらを横断する共通基盤科学技術が重要であり、特に既存の学問体系を越えた学術界の貢献が求められる。例えば混合溶液中の相分離過程や結晶核形成メカニズムの解明と自在制御、それらを把握するためのその場計測技術や、計測不可能な現象を把握するためのシミュレーションモデルの確立などである。それぞれの分離ニーズごとに、求められる分離のスケール・規模や精度は異なり、目的に応じて適用すべき分離技術またはその組合せ、システムも異なってくる。要求分離性能は用途によって決まり、それぞれの性能を実現するためにはコストも強く考慮した新しい分離技術・プロセスや分離素材の開発が重要になる。共通基盤科学技術として分離工学を体系化することができれば、様々な分離のニーズに対して適切な解を相互に提供・構築することにつながる。ある特定の分離ニーズにしか適用されていなかった分離の技術が、実は別の分離ニーズへ応用・発展可能である可能性がある。分離工学によるイノベーションという新しい知の融合を促進するには、先端の研究者・技術者は学協会活動を通じ、自身の研究の位置づけや課題を新たに認識するために、基礎研究者、応用研究者、工学者間のネットワークを構築・発展させることが求められる。同時に、様々な学術分野において、広く分離工学への理解と発展を促進していくことがポイントである。現在、気体・液体を対象とした分離工学を扱う、コアとなる学会は化学工学会である。金属製錬やバイオ系の分離技術を考えると、その枠組を超えた広範な連携が求められる(日本金属学会、資源・素材学会、日本分子生物学会、日本機械学会、日本化学会、高分子学会、日本分析化学会、日本分析機器工業会、等)。

## (3) 課題と方向性

従来、分離技術の研究開発者は、必ずしもニーズとしての要求分離性能を的確に把握せず、限られた条件下でより高性能な技術を開発することを目標としてきた面がある。その結果、コスト意識が希

薄で、高い分離性能が得られても、コストが見合わないというケースが多々あった。今後は経済合理性を踏まえたプロセス検討がまずなされ、そこで必要となる分離性能が決められ、更に実用化可能なコストが概算され、そのうえで分離技術の選択、新技術の開発をおこなう流れが求められる。既存の蒸留分離技術を代替するような新技術を導入する障壁は高く、新方式だけに限るのではなく、既存技術との組み合わせによって、プロセスシステム全体として大幅な分離性能の向上が望めるケースや、コスト削減・省エネルギーを実現する新技術の開発が重要である。一方、過去の研究開発プロジェクトに目を向けると、特定の分離対象と分離技術を明確にターゲティングしている傾向が強い。その場合、吸着・吸収剤や分離膜といった分離材料の一般的な設計開発指針を構築した上での新たなニーズへ対応するための研究開発が必要となる。しかし、根本的な分離機構・現象解明・理論解析を扱うことができず、また基礎科学データの蓄積も不足していることから、産業界は新技術の導入に踏み出しにくい面があった。各研究開発課題は、分離対象・応用の目的によって必要となる分離技術やそのプロセス・規模が異なるために、実用段階に向かうほどそれぞれ別の取り組みが必要になる。しかし、分離対象の最小単位はいずれも原子・分子～マイクロメートルスケールであり、基礎となる科学的原理や活用する技術には共通するものが多数ある。そこで、応用開発研究のみでは為し得ない新たな分離工学イノベーションの種となる新技術や共通原理・共通ツールを「気体・液体・固体・バイオを横断する共通基盤技術」として研究開発をおこなうことが重要である。

以下、3つの分離ニーズごとに述べる。まず、気体・液体の分離技術では、石油化学産業の蒸留分離をすべて代替するような技術を考えることは適切ではない。例えば、石油の採掘、すなわち油田・ガス田開発とその際の随伴水処理の部分では、省エネルギーの要請から分離膜技術が大いに期待されている。日本は分離膜の要素技術は世界トップレベルといわれるが、分離膜単独では省エネルギーを達成することはできない。分離膜を用いたプロセスシステム技術を構築することでようやく省エネルギーが得られる。プロセスシステムの技術実証段階では、例えば海外産油・産ガス国との共同研究開発の形態を取る必要がある。特に、使用環境を加味した現地での実証は極めて重要である。また、産油・ガス国の研究開発機関にとって、日本の新技術による実証実験は、単に技術開発による知的財産取得や設計ノウハウ取得だけでなく、高等教育における重要テーマに位置づけられる。現地国ではそうした共同研究案件に長期間の研究予算措置を設定する一方で、日本側は現地側と同様の複数年度の予算措置が難しいことが多く、海外研究機関との協業実現には日本側の制度が大きく影響する。プロセスシステムの実証運転では、分離膜の破過のような運転上の具体的トラブルを想定し、それを事前に察知する診断予測技術や破過後の修復技術などを設計に考慮するエンジニアリングの観点が不可欠なため、早い段階から日本側での産学連携体制構築が必要である。さらに、開発した技術の知財の所有については、相手国機関との調整に国レベルの関与が必要となる。このようなことから、特に国際共同スキームに長けた機関によるプロジェクト・ファンディング体制の検討が必要となる。実用化へ向けては、大量・効率生産を指向したプロセスシステム化が必須である。これには基礎物性の計測技術、理論解析、基礎物性を蓄積したデータベース、シミュレーションに関する基盤技術の確立が必要となる。実装にはプロセスシステムの長期運転信頼性を検証する必要があるが、先端技術を開発する複数の研究者が、類似のテーマで個々に試験設備を自前で製作するのは時間とコストの無駄である。そこで例えば、実証レベルに近い試験運転が可能な実証試験センターを公的研究機関内に設置し、かつそれが国の保安法規を十分に満足し、研究開発者が実用化研究を行える仕組みが必要であろう。これにより研究開発を加速し、国際競争を優位に進めることが可能となる。

鉱物資源・固体の分離で注目されるのはレアメタル等の精錬技術であるが、リサイクルという社会システムの整備が不可欠である。現在のリサイクルでは、中間処理、物理選別、化学選別を最適化できる社会制度・構造ではないため、多くの場面でリサイクルはコスト構造がマイナスになる。発想を変えて、リサイクルでの分離を前提に製品設計を行い、リサイクルでのメリットを出すことができる

社会システムが求められる。共通基盤科学技術としては、反応過程・溶液中の物質の挙動の原子分子レベルでの理解や、電解精錬におけるその場観察技術の構築などが必要である。製錬研究では、過去に断念したアイデアを現代の技術力を使って再度チャレンジすることも必要であろう。対象物の不均一性・複雑性をもたらす、固体選別に対する科学的アプローチの阻害は、各国共通の課題であり、諸外国の研究開発も未だ明確には打開の方向に動いていない。分離技術は様々な分野において競争力を獲得しうる重要なツールだが、社会生活に直接的な影響を与える種々の製品そのものとは異なり、目的達成に資する技術課題突破の解決手法である。したがって、分離工学によるイノベーションの結果としての国際競争力を獲得するには、社会システムや制度などと同時に発展させることが重要である。

バイオ・医薬食農系の分離は、上記 2 分野とスケールが異なり、分離は極微量のピコリットル ( $10^{-12}$ L) やフェムトリットル ( $10^{-15}$ L) 以下、分子・細胞のサイズレベルでの高精度の分離が要求される。対象スケールが小さいために、要素技術の完成がそのまま実用・社会実装につながる可能性が高い。分離対象が、例えばエクソソームのように近年新しく発見された細胞内の小器官であると、分離する技術だけでなく、分析・解析技術も同時に必要となる。高い医療上のニーズを持つ分離対象物質の場合、精緻でかつ簡便な技術として完成することが求められ、様々な周辺技術の同時開発が必要である。

#### (4) 海外動向

諸外国では、CO<sub>2</sub>/メタン分離、窒素/メタン分離やエタン/エチレン分離、プロパン/プロピレン分離、水素/CO<sub>2</sub>分離などのガス分離関係の研究開発報告が増加している。

米国では、シェールガスにおけるガス分離の研究が進み、水処理に関しては、分離膜素材に関する研究から膜の工業化に至る幅の広い研究が行われている。固体関係でも、DOE が 2011 年に“Critical Materials Strategy”と題した報告書を刊行し、米国の取るべき 3 つの柱として、1. グローバルなサプライチェーンの多様化、2. 元素代替技術の開発、3. 元素のリサイクル・再利用・効率的利用を掲げている。これに基づいて、DOE は 2013 年に希土類研究拠点を形成する事業をスタートし、さらにトランプ政権下でも、安全保障の観点から元素戦略を推進する政策立案を進めている。

欧州では、Horizon 2020 の枠組みにもとづき、CO<sub>2</sub>対策とガス化学工業の経済性・将来を展望し、ガス分離に関するプロジェクトを多数推進している。水処理に関する基礎研究も盛んである。固体関係では、アルカリ岩・カーボナタイト中のクリティカル原材料、低品位鉱・廃棄物からの金属回収、FeAl 系極限環境耐性材料、超硬材料の開発など鉱物資源およびそのリサイクルに関する基礎的な研究を継続的に支援している。

中国では、基礎研究から産業化まで急速にレベルを向上させている。排水基準の厳格化が応用研究を後押ししており、100 社をはるかに超える膜メーカーが存在している。韓国でも、水処理に関する大型プロジェクトの影響で、分離膜の研究が活発化している。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 分離工学イノベーション～持続可能な社会を実現する分離の科学技術～」(CRDS-FY2015-SP-04) (2016 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「科学技術未来戦略ワークショップ報告書 分離工学イノベーション」(CRDS-FY2015-WR-10) (2016 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-05) (2017 年 3 月)

## 2.11 バイオ材料工学 ～生体と材料の相互作用を制御する～

### (1) 概要

バイオ材料工学とは、生体組織や体液などの生体を構成する成分と材料の間にはたらく生体 / 材料相互作用メカニズムに立脚して、材料の設計・創製・評価をおこなう研究開発を指す。これにより、多様な生体環境に適応して生体 / 材料相互作用を能動的に制御することが可能な、新しい材料の創出が期待される。

超高齢社会の到来、医療・健康ニーズの多様化や医療技術・機器の高度化に伴って、医療・ヘルスケアなどに用いられる材料には、生体现象を制御するためのさまざまな機能が求められている。例えば、生体組織が再生し機能を発揮するように細胞を誘導する材料や、生体とリアルタイムに物質や情報をやりとりすることで診断・治療をおこなう材料、体外で細胞の三次元組織化を促進し移植用の組織・臓器や創薬・医学研究用のモデル組織を構築する材料など、生体環境に応答して機能を発揮する材料の実現が望まれている。一方で、生体組織や体液などの生体を構成する成分に接して利用される材料（バイオ材料）は、機能発現の以前に、生体から異物認識されない生体適合性を有していることが欠かせない。しかし、多様かつ複雑な生体環境に対する適合性の発現メカニズムには未だ不明な点が多く、バイオ材料の研究・開発は経験的な試行錯誤に依存せざるを得ない面がある。

このような状況を打開するには、生体と材料の間にはたらく相互作用のメカニズムに立脚した材料設計指針を打ち立てることによって、生体環境に適合する材料の探索という概念から抜け出す必要がある。生体との相互作用を能動的に制御することが可能な新しい材料の創出によって、未解決の医療・健康ニーズに応え、健康長寿社会の実現に貢献することが、バイオ材料工学の目指すところである（図 2-11-1）。

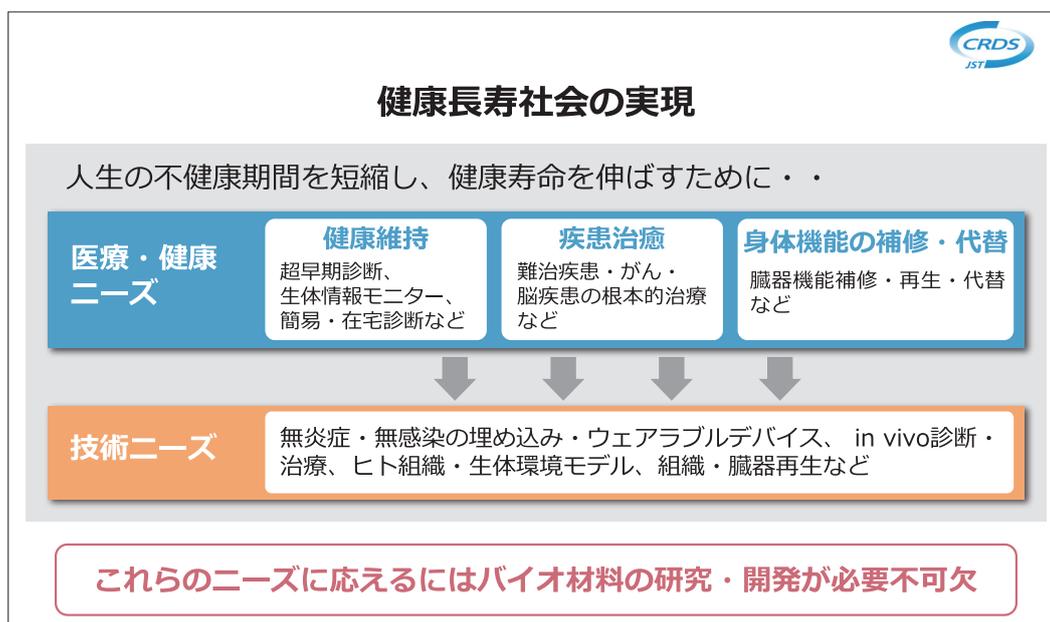


図 2-11-1 バイオ材料工学で健康 / 医療ニーズに応える

### (2) 融合・横断のポイント

バイオ材料工学を端的に表現すると、「生体と材料の間で起きている現象の定量的な評価・解析をおこない、メカニズムを解明することによって、生体 / 材料相互作用が制御可能な材料の設計・創製をおこなう」ということになる。バイオ材料工学の推進には、さまざまな材料系の構築や界面計測・

定量解析をおこなう理学・工学系研究者に加え、生体分子や細胞、小動物を使った研究が可能な生物学研究者、新しい医療・健康技術や治療法を模索している医学研究者などの連携・融合が必要である。バイオ材料工学の主要な研究開発課題について、以下に示す。

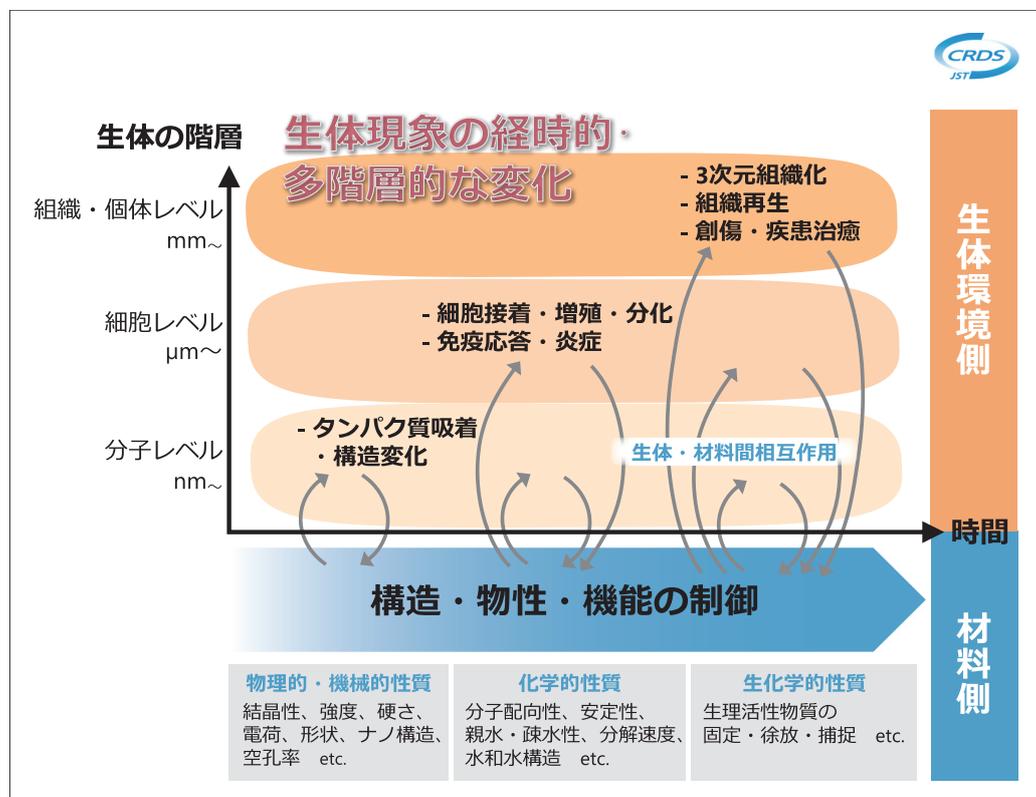


図 2-11-2 多階層的な生体現象・変化と材料との相互作用

① 生体 / 材料相互作用によって生じる現象の理解

生体 / 材料間の相互作用は、材料と生体環境が接触して界面が生じた瞬間に始まり、水和やイオン吸着、生体分子の吸着などマイクロ秒にも満たない時間で起こる現象から、細胞の吸着・増殖といった分～時間オーダの現象、さらには組織・臓器・個体レベルの現象へと経時的・階層的に進んでいく。材料の用途、使用環境によって注目すべき生体現象は異なるが、背景にある経時的かつ階層横断的な変遷を定量的に明らかにし、そのメカニズムを理解・解明することが重要である。複雑な生体現象を医学・生物学的な視点から理解すること、また同時に、多様かつ複雑な生体環境に置かれたときに材料の示す構造・物性・機能とそれらの経時変化について物理学・化学・材料工学的な視点で理解することが重要であり、異分野の視点・知識を集結して生体 / 材料相互作用の究明に取り組む必要がある。

② 多様な生体環境における定量評価・計測を実現する新技術・装置開発

時間的・空間的に変化する複雑な生体環境と材料との相互作用を理解するには、相互作用に起因する多様な現象を経時的・定量的に計測・解析することを可能にする技術の開発が必要である。既存の計測・分析技術を複雑な生体 / 材料界面に適用するための技術や、生体内の局所的な硬さ、圧力、体液の流れ、温度、pH などの物理的・化学的性質の in vivo 計測技術、低侵襲 / 非侵襲に生体内を観察可能な 3 次元動態イメージング技術、各種計測やオミクスにより得られる膨大なデータを解析するための情報科学的手法などが挙げられる。医学・生物学系研究者、理学・工学系研究者に加え、情報科学の専門家との連携が必須である。

### ③ 新規バイオ材料の設計・創製

生体 / 材料相互作用に起因する経時的・多階層的な生体现象の理解に基づいて、それを制御することが可能な構造・物性・機能をもつ材料を設計・創製する。これまでに我が国で培われてきた高度な材料設計・合成・創製技術、ナノテク・加工技術を駆使して、所望の特性を有する材料を具現化する。材料特性を自在に制御するには、異なる特性をもつ材料である金属・無機・合成高分子・生体由来分子などを広く対象として捉え、それらを適切に複合化することが材料設計上の戦略として有効と考えられる。さまざまな材料分野の研究者、加工技術の専門家による連携・融合が必要である。

### ④ 実用化を促進する評価基盤構築

新規に創製したバイオ材料を医療・ヘルスケアの実用技術へ発展させるためには、実際の使用条件・使用目的に即した評価をおこない、安全性と有効性を十分に担保した上で、製品としての最適化を図る必要がある。実際に材料が使用される生体環境の模擬や、評価法・評価指標の設定など、バイオ材料の評価に関する諸課題を解決し、評価基盤を構築することが重要である。材料工学系研究者、臨床に精通した医学系研究者に加え、レギュラトリーサイエンスの専門家との連携が求められる。

なお、これらの研究開発課題の推進においては、研究対象が実際の医療・健康ニーズから乖離することを防がなければならない。このため、課題設定の段階から材料系研究者と医学系研究者を中心に、異分野の研究者が十分なコミュニケーションをおこない、材料が使用される生体環境場の科学的な定義と、創製すべき材料・機能の共有化を図る必要がある (図 2-11-3)。

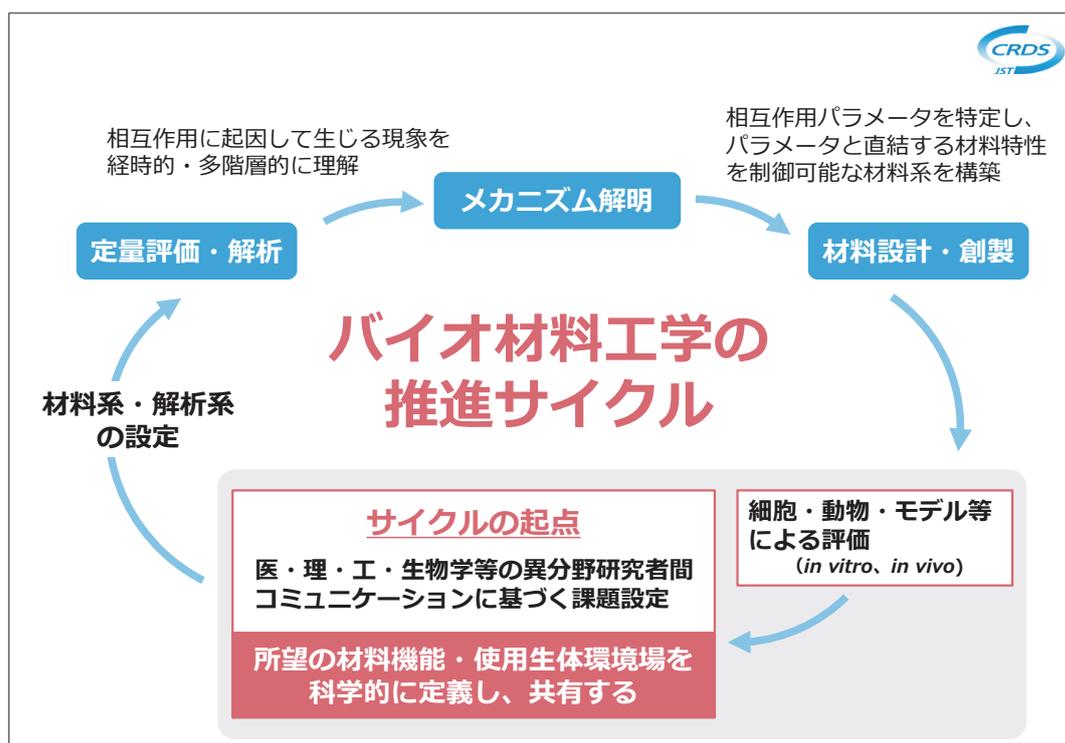


図 2-11-3 異分野融合・連携に基づくバイオ材料工学の推進サイクル

### (3) 課題と方向性

新しい医療・ヘルスケア技術の実用化には、安全性・有効性に係る審査を経て承認を得る必要があるが、新規バイオ材料が承認取得に至るまでには膨大な時間と労力、巨額の費用を要することが課題となっている。特に、体内で使用する材料については、PMDA (独立行政法人医薬品医療機器総合機構)

による承認を得ることが難しく、開発途中で頓挫することが少なくない。このため、実際の医療機器開発においては、安全性の担保された承認済みのバイオ材料の使用が前提条件となることが多い。しかしながら、承認済みの既存材料だけでは求められる機能・性質を達成できない場合がある。未解決の医療・健康ニーズに応えうる技術を生み出すとの観点からは、機能発現に主眼を置いた新規材料の研究開発が必要である。

#### (4) 海外動向

バイオ材料に関係する世界的な動きとして、生体機能を有する組織体を生体外で構築するバイオファブリケーションに関する研究の活発化がある。細胞研究の進展に加え、マイクロ・ナノ加工技術およびマイクロ・ナノ流体デバイス技術の高度化によって、実際の生体組織に近い 3 次元の構造・機能をもつ組織体の構築が可能になり、再生医療分野における応用が期待されている。特に、バイオ材料の原料と細胞を望みの位置に配置することが可能なバイオプリンティング技術の出現によって、研究者人口が増加し、2010 年にはバイオファブリケーションの国際学会 (International Society for Biofabrication) が発足している。

米国では、バイオ材料に関連したいくつかのプログラムが、複数の大学による連携の下で進行している。NIH の支援によるものでは、組織工学、3D 印刷、バイオプリンティング関連の新技术開発をおこなう CECT (Center for Engineering Complex Tissues) や、ポリマー系のバイオ材料の研究開発をおこなう RESBIO (Integrated Technologies for Polymeric Biomaterials) が挙げられる。また、NSF の STCs (Science and Technology Centers) のうち、生体内の分子・細胞・組織に働く力に着目して新しい材料や医療、農業技術を目指す CEMB (Center for Engineering MechanoBiology) と、細胞と細胞の間、あるいは細胞と細胞周囲の環境に働く相互作用を理解・制御して細胞を使ったシステムを構築する CEBICS (Center for Emergent Behaviors of Integrated Cellular Systems) の 2 つのセンターでバイオ材料工学と関わる研究が進められている。さらに、NIH が FDA、DARPA との協力の下で進めている Tissues-on-Chips プログラムなど、再生医療・組織工学関連のプログラムが多く存在する。

欧州では、バイオ材料の基礎研究から実用化までの研究戦略が Horizon 2020 のロードマップ「BIOMATERIALS FOR HEALTH ~ A Strategic Roadmap for Research and Innovation」によって提示され、これに基づいて関連分野へのファンディングが行われている。また、EPTN (European Technology Platform on Nanomedicine) において、ナノ材料の医療応用を推進するための産学における取り組みが支援されている。

中国は科学技術政策の根幹となる「国家中長期科学技術発展計画綱要(2006～2020年)」において、ライフサイエンス分野の優先テーマの 1 つとして「先進的な医療設備および生物医用材料」が掲げられており、これに基づいてバイオ材料研究が推進されている。また、論文や国際会議などにおける研究報告の増加が顕著であり、バイオ材料に関する論文数で圧倒的優位を保ってきた米国に迫る勢いである。

#### (5) Reference

- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-05) (2017 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 領域別分科会「バイオ・ライフとナノテク・材料の融合領域」(CRDS-FY2016-WR-10) (2017 年 3 月)
- ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「科学技術未来戦略ワークショップ報告書 生体との相互作用を自在制御するバイオ材料工学」(CRDS-FY2018-WR-04) (2018 年 8 月刊行予定)

## 2.12 研究システム・ラボ改革、融合を促進する R&D インフラ・リソースのプラットフォーム ～ナノテク・物質・材料分野とライフ・臨床医学分野を例に～

### (1) 概要

過去 30 年間で、いわゆる“日本の一研究室”の研究活動・行動様式はどれだけ変わっただろうか。実は、多くの研究室はあまり変わっていない。いずれの科学分野においても、科学の発展段階にともなって研究の対象はより複雑化し、例えば、ナノテクノロジーによって物質の複雑な構造や機能を原子・分子レベルで制御することができるようになってきたし、遺伝子解析やゲノム編集技術、幹細胞技術によって、生命の再定義にも迫らんとする研究がおこなわれている。その際、いずれであっても高度・高価な実験機器と、膨大な実験試行回数、それに伴って生じる膨大な研究データを処理するコンピューティング能力の保有が、これらの研究を進展させ、世界の研究競争において決定的な差をもたらすことが自明となりつつある。にもかかわらず、今日の日本の研究室における日々の活動・行動様式は、多くの機関であまり変わっていない。

これには二つの原因がある。一つは、昨今指摘されるように、日本の科学技術研究費が頭打ちの状況にあるなか、研究者人口は少しずつ増加してきた。すなわち、上述のように一研究単位あたりの研究に用いなければならないリソース・コストは増えているはずなのに、一人あたりの研究予算は増えない（または減る）構造にある。したがってマクロに見れば、同じやり方では研究成果の生産量と生産性は、上がらない。研究力を表わす指標の一つが論文の数や引用された回数なのだとすれば、この数に関しては諸外国と比較して日本が相対的に地位を下げている、あるいは分野によっては生産性が落ちていることは確かである。国立大学の法人化（2004 年）後の基盤的な研究費の減少や研究者の研究時間の減少がこの一因であるとの指摘もある。一方、主要国で論文の数の生産性が落ちているという話を聞かない。

もう一つは、研究の方法論、やり方そのものにある。すなわち、主要国では高度な実験機器やコンピュータ、そして現在では研究データや処理ソフト、そして実験方法の標準化（サンプル標準や測定標準）も含め、ハブ拠点を設けて共有化・共通化する仕組み構築が早くから進んできたが、日本では研究室ごとに、PI 単位ごとに申請された研究費によって導入するスタイルが長く常態化し、研究室や研究分野がタコソボ化した面がある。また、世界の各地でこのように共有化・共通化されたハブは、産学官連携と融合領域研究を拓く共鳴の場・土壌として大きな存在感を発揮するようになり、いわば現在の IT プラットフォーマーさながらの R&D プラットフォーマーとして、研究の推進力・競争力の源泉となっている。さらに、最近ではロボットの進展により、研究に必要な膨大な実験試行回数を自動化する、いわばロボット実験機器の導入が始動している。今、研究スタイルは大きく変わる時期にきている。こういった世界の動きに対応すべく、ディシプリンごとの縦割り構造を打破する教育改革や、リベラルアーツとしての数理・データサイエンス教育・基本スキルが必要であることは論をまたない。以下では、研究開発投資効率を最大化するための、研究システム・ラボ改革を、R&D インフラ・リソースのプラットフォーム化の観点で述べる。

### (2) 融合・横断のポイント

ナノテク・物質・材料分野では、20 世紀までは石油化学工業や半導体産業が牽引役となり、実験家と理論家の主導で研究が行われてきた。研究者の経験と勘によるセレンディピティが、事実、科学技術と関連産業を大いに進展させる契機となった。21 世紀以降の情報時代においては、計算科学、データ科学に用いる計算機の高度化と、計算・データ処理の自動化による解析や予測、物質機能や材

料機能の設計ということが進む。今では、計算科学やデータ科学の手法を研究に導入することは、発展のためにはあらがえない流れとなってきたが、個々の研究者は自らを、理論家、実験家、計算科学者、そしてデータサイエンティストのいずれかであると称する。しかし、今求められるのはこれらのどれかだけではなく、総動員する研究スタイルである。もちろん各々の研究者には得手／不得手、専門／非専門が当然あるが、自らの不得手・非専門を、新たな研究の地平に踏み出さないことの理由にしてはならないだろう。個で解決できないのであれば、集団でもって初めて取り組めること、解決に近づくことができる課題に目を背けてはならない。これを研究環境の観点からみると、研究の効率を最大化する研究環境へのアクセスが決定的に重要となる。例えば、原子分解能収差補正電子顕微鏡や放射光施設を始めとする最先端の計測・分析機器へのアクセス、ナノメートルスケールでの物質制御を可能にする微細加工装置や物質合成装置群、そしてこれらの先端機器を自在に操る高度な専門技術を有するエキスパートと、彼ら彼女らの持つ知・ノウハウへのアクセス、さらには数万原子・分子集団のシミュレーションを担う第一原理計算や分子動力学計算に用いるスーパーコンピュータへのアクセス、物質・材料・デバイスに関するビッグデータ・データベースから目的の機能や構造を実現するためのソフトウェア等データ科学ツールの使用、このような高度な研究インフラは、使いこなすための専門人材の充実と一体不可分で考えなくてはならないため、いくつかの特定の場所へ集中的に整備・蓄積し、プラットフォームとして最短で利用することが戦略上重要となる。また、そのような場を、多様な専門性と課題を持つ者が、産学連携と融合領域研究を拓く共鳴の場として、研究スキルの習得やレベルアップの土壌として、育てていくことがポイントとなる。

ライフサイエンス分野は、戦後の分子生物学の勃興もあり特定の遺伝子・分子に着目した研究が長らく続き、これにより生命における多くの新しいビルディングブロックが発見されてきた。一方で、2000 年代中盤以降の次世代シーケンサー (NGS) や質量分析器、それらを用いた様々な技術の進展により、生命の時空間的なダイナミクスを対象とすることが可能になりつつある。また、これら機器の急速な発展によりデータの解析に重点が置かれ、高額設備と豊富な人材、資金を要するビッグサイエンスとしての側面が強くなっている (ライフサイエンスのビッグサイエンス化)。これはすなわち今後ますますコンピュータサイエンス化が進むと同時に、知識集約型の研究に向かうことを示唆している。このような時代において、特定の分野で働く個々の研究室の伝統的な研究スタイルで、世界と伍していけるだろうか。

2013 年に登場したゲノム編集技術 CRISPR/Cas9 を発明したことで有名な米国の Broad Institute (2004 年～) では、「特定の分野で働く個々の研究室の伝統的な学術・行動様式は、生物医学の新たな課題に対応するには設計されておらず、ヒトゲノムと生物システムの包括的な見方を得るために、高度に統合された方法で作業しなければならない」という認識に基づき、MIT とハーバード大学が共同で下記の思想のもと研究所を設計、設立した。

- ・生物学、化学、数学、計算、工学、医学が臨床研究と組合せた素早いチームで働くこと
- ・適正な規模の、世界クラスの研究インフラストラクチャーにアクセスできること
- ・創造性、リスク、データといった研究のオープンな共有の雰囲気醸成できること

例えば現在の健康医療分野で世界のトレンドとなっている Precision Medicine、個別化医療、ゲノム医療といった分野は、ゲノム情報、オミクス情報とヒトの疾患情報、環境情報などの相関や因果を解明し、診断・治療に役立てるものである。このような診療と研究の融合領域以外の基礎研究においても、神経コネクトーム、マイクロバイオーム、全身細胞アトラス、生体分子アトラス・トランスオミクス、ヌクレオーム (遺伝子発現機構) 等といった世界のトレンドともいえる研究はいずれもシーケンシングベースのオミクス技術、イメージング技術、データ解析技術の 3 つの技術の統合的活用

がキーテクノロジーになっており、明らかに規模、知識集約が求められる典型的なテーマである。すなわち膨大なデータを蓄積・共有すること、そこから知（データ）の構造化と新しい知識の抽出が必要となる。こういった研究を従来の専門に特化した大学あるいは国研のラボで進めるためには、研究のシステム・ラボの在り方そのものを構造的に変えていくことが必要であり、いち早く対応した者が、次代の R&D プラットフォーマーとなるだろう。

### (3) 課題と方向性

#### 研究インフラプラットフォーム (PF)・拠点の持続性と運営財源の多様化

大学・国研等の公的機関が PF 運営を主導する場合、研究開発基盤としてオープンで平等な利用機会を産学官に安定的に提供することが重要である。産学官の研究開発“全体”の投資効率を最大化するという出発点から考えれば、当該公的機関の運営費（交付金）、利用者による利用料や関連する共同研究費およびその他の寄付金、国がこうした研究インフラを整備するための目的で措置する PF 構築・事業費、の大別した 3 種の財源が考えられる。利用料の財源は、アカデミアの場合は国の競争的研究資金や企業からの受託研究費の一部が充てられる。3 種の最適な割合がどの程度であるべきかという議論に必ずしも正解があるわけではないが、運営の柔軟性や持続性を考えれば、できるだけ特定の財源に偏らないことが、どれか 1 種の財源が凹んだとしても運営に極端な影響を及ぼさずに安定的な研究インフラ利用環境を提供するという観点から重要である。わが国の大学・国研の場合、運営費交付金や利用料収入、国の事業予算を複数年度にわたって積み立てるなどして PF 運営の持続性を高めようとしても、資金・会計処理制度上の課題があり、これを阻んでいる。他方、民間が PF 運営の主体となる場合には、企業体としての PF 経営になるため、より成長し利益を増大させることが前提条件となる。ここでいう利益とは PF の利用者等から得られる収入から運営コストを差し引いたものとなるが、利益追求型の PF としてはより高い利用料金を払ってくれる利用者や投資をしてくれる相手を重視することになる。したがって利用はある程度の支出をいとわない者に限定されるか、投資を担う者の意向を反映するかたちとなる。提供する装置や技術・情報の調達・維持コストとの関係で見合うものである場合に限って成立するモデルである。

大学・国研等の公的機関が PF 運営を主導するにあたって特に課題となるのが、数年単位で更新が必要になる先端設備群である。ライフサイエンス関連機器では 2～3 年に一度、ナノテク・材料関連では 5～7 年程度で技術の世代が新しいものに替わるが、一通りの研究範囲に対応する設備群の更新財源を、これら 3 種の財源から十分に賄うことには、現在の状況では至らない。しかし、技術の世代推移に追いついていけないということは、先端技術を用いることが研究のすべてではないとしても、世界の研究の先端から脱落することを意味する。運営費交付金が漸減するなか、各地の大学・国研ではたまたま申請が承認される施設整備補助金や、一定規模以上の競争的研究資金に採択された研究プロジェクト資金、あるいは特別な目的によって措置される国の補正予算等の偶然に頼っているのが現状であり、設備調達と更新を中期的に計画措置する費用を、PF の運営コストとして組み込んで運営予算を組まなければならない。そのためには、技術の蓄積度合や地理的条件、対応する規模を考慮したうえで、日本であればハブ的な大型の PF と、技術領域や機能を特化した中規模 PF とがバーチャルなネットワークを構成して我が国の研究インフラを全国的にカバーすることが重要になると考えられる。すなわち、研究投資効率最大化のために戦略的に研究インフラを運営するには、研究テーマ・プロジェクト遂行型の研究資金とは別に、またはそれらの総額の一定割合に相当する経費を、上述 3 種の財源の総額として恒常的に担保できるかどうかにかかっている。

#### 高度専門人材と研究支援人材

大学や国研等の研究機関（研究所、研究センター、研究科）には、研究者とは別に、研究機器や研

究対象に応じた技術的な専門性を持った人材と、会計・ファイナンス等を担うアドミニストレータ人材、知財や技術移転・橋渡し・マッチングを担う人材の、大別して 3 種の人材が必須である。現在では URA がこれらの一部または複数機能を担う大学もある。ところが、大学では長くラボ単位の研究人材と、研究科単位・部局単位の事務管理人材が主流であり、外部に開かれた共通研究インフラ PF を運営し研究開発を発展・展開するための 3 種の人材を恒常的に措置することができていない。例えば、欧州や米国の主要な研究機関では、設備の共同利用が徹底して行われているため、個々の研究室には試験管や試薬などの消耗品があり、顕微鏡、分析機器、加工装置、遠心分離器、シーケンサーなど共同で利用される設備は、専用の共通スペースに置かれている。また、共同で利用されるほとんどの設備の管理は専門スタッフにより行われており、常にメンテナンスが行われ、故障しても直ぐに修理を行う体制が整っている。ポスドクや学生は自身の研究に専念することができる。現在のように計測機器が発展し、機器の更新が速い時代においては、機器を購入するだけでは不十分であり、機器の性能をスペック通りに引き出す高度技術、さらには修理や改造、場合によっては開発提案にも及ぶ専門人材と一体で措置することが必要となる。また、資金や契約管理、知財・技術移転・橋渡し人材に関しても、多様化された財源のファンドレイズから、戦略的な管理会計、産業界とアカデミアの懸け橋としてのコミュニケーション、技術や人材の組み合わせ・出会い・事業化支援等をコーディネートする人材が重要になっている。このような人材の必要性は認識されて久しいが、未だわが国では国際的に見ればディスアドバンテージがある。すべての大学や国研に十分に確保することは現実的ではなく、上述の PF・拠点の単位で、ある程度の流動性と恒常性を担保した構造として確保することが重要であろう。

これらの PF に寄与する人材、すなわち研究開発投資効率の最大化に直接的な寄与をもたらす人材についての、本質的な課題は人件費にある。PF に寄与する人材と、従来から認識される研究人材・事務管理人材とは、いずれの大学・国研でも人件費が競合する構造を抱えている。多様化された財源を人件費に組み合わせて充てることも一つのオプションだが、何よりも必要なことはこの人件費の競合に対して、人材評価制度とともに真正面から向き合い改革に取り組むことであり、このことなくして研究開発投資効率が最大化されることはないのである。

### 研究者は何に時間を割くのか

研究をおこなう者にとって最重要事項の一つ、それは研究の自治である。世界を自らの目で観察し、自らの専門の中で抱く内在的な知的好奇心を出発とするなかで、研究課題を自ら定めおこなうこと。どのようなやり方で課題にアプローチするかを決め、その結果を論文というかたちで公表し、初めて明らかとなった人類の知を世界に公開し共有する。研究を職業としておこなうにあたり、研究活動のどの部分にどれだけの時間を割くのが、本項冒頭で述べた研究の生産性と直接に結びつく。二つの課題を挙げる。一つは、研究対象が複雑化し、膨大な実験試行回数やデータ処理が必要になるケースが増えていることから、上述の研究インフラ PF へのアクセスや、ロボット技術を取り入れることでこれらを自動化することが課題である。もちろん、自ら実験に必要な機器を製作し、手を動かして実験や計算をおこなうこと、そして仮説の構築と思考実験は、発見や発明へ至るプロセスに欠かせないことの一つではある。しかし、研究対象が内包する問題の空間が、特に融合領域や横断テーマではより複雑な空間構造となり、そこに立ち向かうためには所要時間を短縮するインフラ・ツール、そして多様な専門人材へのアクセスと連携が決定的に重要となる。

二つ目が、研究者のキャリアパスとの関係である。日本と他の主要国との大きな違いは、研究者としての道を歩み始めた初期の段階、すなわち博士課程やポスドク時代には、主要国では、学費（免除）や生活費に充てる給与が支払われるということである。この間に研究に集中し、研究者としての基本骨格を形成することがとりわけ重要である。そのためには、“本質的な課題”を研究対象としなければ

ならない。しかし、研究プロジェクト期間に限られた任期制のポジションが増えた今、特に若手にとっては短期間に次のポスト獲得に有効な成果を挙げることが焦眉の急となってしまふ。ときとして、それは論文の数やインパクトファクターなど、盲目の指標となる。一方で、多くの伝統的研究分野では、研究者の高齢化が起きている。大研究室の研究テーマに依存することの是非や、分野としての評価も定まっていない／成果が認められるかどうか不透明な融合領域・横断テーマに挑戦することのリスクに抗うことは、研究者のキャリア形成との関係において容易ではない。そして彼らは“研究以外”の雑務にも多大な時間を割かなければならない境遇に置かれる。

### 融合領域研究を阻む見えないもの

融合領域研究の発展は一般に「15～20年以上かけて発展するプロセス」とされる。しかしながら、日本の公的ファンディングシステムは、3年から5年程度の研究資金（プログラム／プロジェクト）が多く、十分に対応できていない。さらに、それぞれのプログラムが独立し、相互の接続性に欠けるため、融合領域研究を進める研究者はその都度、本格的な融合に至るための研究継続には新たな別のプログラムに挑戦することが必要になる。そのうえ、プログラム自身の改変も頻繁であり、継続性をさらに困難なものにしている。

また、融合領域研究を評価できる人材と、評価方法が確立していない。伝統的ディシプリンにおいて業績を積み重ねた著名研究者に評価を委ねることが多く、このことが融合領域研究の評価には適さない場合があることはいわずもがなである。結果、十分な評価に至らず、上述のように新たな研究課題に挑戦するのを躊躇させ、特に若手研究者の意欲をそいでしまうことがある。プロジェクト期間に有期雇用されるポストドク・若手研究員、そして技術者等にとっては、評価の確立していない融合領域にあって、研究課題が成果としてかたちになりつながるかどうかは、死活問題となつてのしかかる。

一方で、若手研究者においても、新たな研究テーマを模索し提案していく能力が低下しているとの指摘や、そのような研究環境、教育・機会の提供がなされていないといった指摘もある。欧米等の大学に比較して、日本では大学が新たな融合領域研究に取り組む組織を立ち上げるインセンティブが不明瞭である。時間のかかる融合領域研究に対し、近年の短期的な成果を求められる風潮から、研究テーマとして設定しにくいとの声がある。一方、融合をテーマにしたプログラムについても、形だけ集まることの弊害や、実態は真の連携ができていないといったことが時折指摘され、論点となる。これらの課題に対し、以下のような仕組みを参画機関・人材へのインセンティブ付与とともにおこなうことが重要である。

- ・研究インフラ・PF 施策やファンディング制度を核にした、国内外の知恵と研究者のネットワークの形成
- ・ネットワーク形成の核となるオープン型研究開発拠点の構築と、拠点の持続的発展を妨げる資金管理規則（や自己規制）、雇用制度（契約年限、評価、クロスアポイント等）の改革
- ・大学や国研の統治機構に関連する法整備と運用の改革
- ・異分野の研究者が互いに研究をベンチマークし、新たなアイデアを触発するメカニズムの導入
- ・社会的課題、研究開発のアイデアや状況の共有、研究開発の方向性の設定、イノベーションの加速、ELSI への取組、人材の育成・活用等のための産・学・官・社会が参画したプラットフォームの形成
- ・研究者、特に若手研究者が融合領域・横断テーマに挑戦しやすい組織と仕組み、環境の形成
- ・融合領域・横断テーマに取り組む研究者を登用し、大学や研究機関が自ら変わろうという組織変革や人材登用、そのために必要な評価基準・評価制度の改革
- ・こうした取組を通じて変革を実現しようとする大学や研究機関の基盤構築経費のサポート

- ・研究者を見守り新たな挑戦への着手を可能とする組織運営
- ・若手が新たな研究の流れや異なる研究分野に触れる機会の創出・誘導
- ・「課題解決」を軸にした融合領域・横断科学技術の教育プログラムの設置
- ・社会的課題、社会からの期待や、融合領域・横断的科学技術に対応して自ら関わり、融合領域・横断的科学技術を積極的に取り上げる学会を育成・支援し、研究の発表・評価の土壌を形成

以上のいずれも構造的な課題に手を打たないまま、世界と伍して研究成果創出の生産性を挙げることや、融合領域・横断テーマをより開拓していくことは叶わない。研究システム・ラボ改革、融合を促進する R&D インフラ・リソースのプラットフォームは、わが国の研究開発投資効率を最大化させるための本丸である。

#### (4) 海外動向

(ア) アンダーワンループ型の集中拠点

- ・ IMEC  
ナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関で、オランダ、台湾、中国、インド、アメリカ、日本等に研究・マーケティング拠点を構える。年間予算は約 3 億ユーロ、450 mm の研究開発ラインを持つ。人員は 2,000 名を超え、そのうちの 1,400 名がプロパー、400 名弱が外部からの研究員、300 名弱が PhD の学生。世界中にパートナーネットワークを張り巡らせ、60 社のサプライヤーと提携、応用・製品では 200 社以上との協力関係を築く。一企業では投資規模が大きすぎて対応できない最先端半導体微細加工技術でリーダーシップを発揮し近年 EUV 露光技術開発の実証に成功。世界の名だたる企業・研究機関が参画・活用している。IMEC における技術開発が実用・量産化への近道であるとする世界のトップ機関を惹きつけている。
- ・ MINATEC  
仏原子力・代替エネルギー庁 (CEA) や地方自治体 (グルノーブル) の主導で創設された、欧州屈指のナノテクノロジー研究開発拠点。CEA の研究所である LETI (電子情報技術研究所)、LITEN (新エネルギー・ナノ材料技術研究所)、LIST (インテリジェントシステム研究所) の 3 研究所が MINATEC の研究開発活動の中核である。予算 650M € / 年、研究者 4,500 名、特許出願 600 件 / 年のスケールで運営されている。ここに 23,000 名を超える研究者が世界中から集まっている。CMOS と MEMS の 200 mm、300 mm のプロセスラインを持ち、近年は IoT やバイオエレクトロニクス、自動運転等の領域を強化している。
- ・ Broad Institute  
2004 年、ボストンにマサチューセッツ工科大学 (MIT) とハーバード大学の研究所が統合改組して設立された。3 千人以上の科学者が参加。趣旨は本文中に記載。2016 年度は 4.1 億ドルの予算であり、公的資金、慈善団体、企業からの資金で運営されている。
- ・ ニューヨーク・ゲノム・センター  
2011 年設立の、北米最のゲノム研究機関 (非営利の学術研究機関)。コロンビア大学、コーネル大など十数の機関が共同でこれまでにないテクノロジー、科学、医学の一体的融合により医療ゲノミクスと精密医療の加速進めるとしている。連邦および民間の助成金、法人および慈善団体の支援により 3 億ドル以上を調達している。
- ・ Francis Crick Institute  
2016 年、ロンドンに医学研究協議会 (MRC)、英国癌研究所、ウェルカムトラスト、インペリアル・カレッジ・ロンドン、ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン、キングス・カレッジ・ロンドンの協力の下、設立された。1,500 人の科学者とサポートスタッフ合わせ 3,000 名規模と言われている。

いる。境界なしで発見を追求できるよう建物は研究者のコミュニケーション・コラボレーションをいかに活性化するかを思想の基に設計されている。各種共通設備・機器が支援人材とともに非常に充実している。英国・欧州を支えていく優秀な研究者の登竜門・ハブとして次代を担う研究者を育て、欧州各国に送り込むことを想定していると言われている。1.6 億ポンド (2017 年総収入)。

#### (イ) ネットワーク型/コンソーシアム型の PF

##### ・NSF-National Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI)

NNCI は NSF のナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワークプログラム (NNIN) の後継として 2016 年に開始。5 年間で 81M ドル以上の予算が計画されている。米国内 15 州にまたがる 27 機関から成る 16 拠点 (内、9 拠点にはパートナーとして 1 つ以上の地方大学が参画する形態) で構成される。日本の文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 (2012 ~ 2021 年度) に相当するプログラムであり、規模的にも概ね同程度。欧米並ともに、このようなナノテクノロジーに関する先端研究共用インフラの整備・発展は、研究開発成果の創出に際し、投資効率を最大化させるものとして共通認識となっている。NNCI に採択された拠点は、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置などのナノテク最先端研究設備をオープンな共用施設として提供する。また、専門技術スタッフにより装置利用や技術習得、専門知見の面でのサービスを充実させる。NSF ではこれまでおよそ 40 年間の長期にわたり研究インフラ・サービスの充実に投資を続けてきた。各拠点は、エレクトロニクス、フォトニクス、マイクロ機械、マイクロ流体、など、それぞれに特徴・専門性を有する。なかには地球科学やライフサイエンスに専門性を有する拠点も含まれており、新分野を促進させることも重視している。

##### ・ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures)

欧州では、国単位のネットワークの他、Horizon 2020 で国を超えたインフラ整備にも力を入れており、バイオイメーjing (Euro BioImaging)、データ・バイオインフォマティクス (ELIXIR)、構造生物学 (INSTRUCT)、トランスレーショナルリサーチ (EATRIS) などが進められている。例えば、バイオイメーjing では、英国バイオイメーjing やドイツバイオイメーjing 等のように国ごとに組織されているものをまとめる形となっている。本文中にも記載したとおり、欧州では研究所・センター、研究科などで機器共用と支援人材が伝統的にシステムとして整備されていることは日本への大きな示唆といえる。

## (5) Reference

- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-05) (2017 年 3 月)
- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野 (2017 年)」(CRDS-FY2016-FR-06) (2017 年 3 月)
- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「G-TeC 報告書 主要国のナノテクノロジー政策と研究開発・共用拠点」(CRDS-FY2011-GR-01) (2011 年 6 月)
- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「新興・融合科学技術の推進方策に関する戦略提言 社会的課題の解決と科学技術のフロンティアの開拓を目指して」(CRDS-FY2009-SP-03) (2009 年 11 月)
- ・科学技術振興機構 研究開発戦略センター「新興・融合分野研究検討報告書 ~社会の課題解決と科学技術のフロンティア拡大を目指して~」(CRDS-FY2008-XR-01) (2009 年 2 月)

## 3 国内外の制度・プログラム

第 3 章では、日本および海外の制度事例を紹介する。まず、日本の部分では、科学技術基本計画における「融合領域」に対する捉え方の変化について概観した上で、融合領域研究を促進する拠点型のプログラムとして 4 事例、文部科学省の先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラムと、世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)、JST のセンター・オブ・イノベーションプログラム (COI)、産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) の各特徴と採択拠点を示す。

海外の部分では、米、中、英、独、仏における公的ファンディング機関が取り組んでいる異分野融合や学際研究を促す主要なプログラムに焦点を当てる。また、EU レベルで推進されている異分野融合領域・横断テーマの推進施策についても言及することとする。

### 3.1 日本の制度・プログラム例

#### 3.1.1 背景情報 - 科学技術基本計画における「融合領域」-

ライフサイエンス等重点研究分野が指定された第 2 期科学技術基本計画 (2001 ~ 2005 年) では、同時に「融合領域」について「科学技術の発展が急速であり、かつ知識が細分化されてきている中で、新しい科学技術は異なる分野の手法や考え方の間の触発や融合の中から生まれることが多いので、研究開発の推進に当たって、境界領域や異分野の融合領域に特に留意する必要がある。」と指摘している。これらは、第 3 期基本計画 (2006 ~ 2010 年) においては「新興領域・融合領域」とされ、さらに、イノベーション創出に向け、「イノベーションは新たな融合研究領域から創出されることが多いが、そのような領域は経済社会ニーズに基づく課題解決に向けた積極的な取組により効果的に形成される。」との認識のもと、「先端的な融合領域研究拠点の形成」が掲げられた。課題達成型研究開発が掲げられた第 4 期基本計画 (2011 ~ 2015 年) でもこれらの方針が継続されている。オープンイノベーションが掲げられた第 5 期基本計画 (2016 ~ 2020 年) では、「イノベーションを興すのは人であり、人が組織やセクターを越えて交流することで多様な知識等が刺激し合い、融合し、そこから新たな価値が創り出される。海外では、大学と企業間、又は規模や業種の異なる企業間で人材が移動する、あるいは複数の組織に兼務することが、迅速なイノベーションの実現に寄与している状況が見られる」と、研究分野としての融合領域だけでなく人材の流動化とそこから起こる融合について強調している。

#### 3.1.2 先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム

##### (1) プログラム概要

わが国が国際社会において持続的に競争優位を獲得していく上では、基盤となる科学技術力と、これに基づく連続的なイノベーションの創出が不可欠である。また、多様化する社会ニーズを的確に解決していくためには、従来のアプローチではなく、異分野の融合によるシナジー効果を最大限活用し、新たな知を生み出していくことが求められている。本事業は、先端的融合領域において、次世代を担う研究者・技術者の育成を図りつつ、将来的な実用化を見据え、入口から出口まで一貫した産学協働により死の谷を克服することを目指した研究開発を行う拠点を形成することにある。この拠点では、大学のみならず、企業が積極的に事業にコミット (マッチングファンド形式) することにより、10 ~ 15 年先を見通した新産業の創出等の大きな社会・経済的インパクトのあるイノベーションを創出するための研究開発を強力に推進する (web サイトより。一部省略)。

## (2) 期間と予算規模

再審査までの 3 年間：年間 3 億円程度

本格的実施後：年間 5 ～ 7 億円程度

平成 18 年度採択

高次生体イメージング先端テクノハブ	京都大学
ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点	東京大学
未来創薬・医療イノベーション拠点形成	北海道大学
再生医療本格化のための最先端技術融合拠点	東京女子医科大学
生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム	大阪大学
ナノバイオ標的医療の融合的創出拠点の形成	岡山大学
少子高齢社会と人を支える IRT 基盤の創出	東京大学
分析・診断医工学による予防早期医療の創成	名古屋大学
半導体・バイオ融合集積化技術の構築	広島大学

平成 19 年度採択

フォトニクス先端融合拠点	大阪大学
システム疾患生命科学による先端医療技術開発	東京大学
マイクロシステム融合研究開発拠点	東北大学
先端融合医療レドックスナビ研究拠点	九州大学
次世代免疫制御を目指す創薬医学融合拠点	京都大学
コ・モビリティ社会の創成	慶應義塾大学
ナノテク高機能ファイバー連携・融合拠点	信州大学
「光医療産業バレー」拠点創出	日本原子力研究開発機構
海洋生物工学の戦略的イノベーション創出	東京海洋大学

平成 20 年度採択

翻訳後修飾プロテオミクス医療研究拠点の形成	横浜市立大学
光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点	産業技術総合研究所
バイオプロダクション次世代農工連携拠点	神戸大学

### 3.1.3 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

#### (1) プログラム概要

近年、優れた頭脳の獲得競争が激化してきている中で、わが国が科学技術の力で世界をリードしていくためには、優秀な人材のグローバルな流動の「環」の中に位置づけられ、世界中から人材が集まる開かれた研究拠点をつくっていく必要がある。このような問題意識の下、平成 19 年度に文部科学省が開始した事業が「世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)」である。本事業は、高いレベルの研究者を中核とした世界トップレベルの研究拠点の形成を目指す構想に対して政府が集中的な支援を行うことにより、システム改革の導入等の自主的な取り組みを促し、世界から第一線の研究者が集まる、優れた研究環境と高い研究水準を誇る「目に見える拠点」の形成を目指している。本事業では、研究拠点に「世界最高レベルの研究水準」、「融合領域の創出」、および「国際的な研究環境の実現」、「研究組織の改革」の 4 つの要件を求めており、こうした目標を達成するため、大学の学長、学長経験者、

ノーベル賞受賞者、産業界、そして著名外国人有識者を含む世界トップレベル研究拠点プログラム委員会において、採択時の審査及び毎年度のフォローアップ（進捗状況の評価）を行っている。

## (2) 期間と予算規模

期間：10 年間

支援額（1 拠点あたり / 年）： ～ 7 億円 / 年 × 最長 10 年間（平成 29 年度採択）

～ 7 億円 / 年 × 10 年間（平成 24 年度採択）

13 ～ 14 億円程度 / 年 × 10 年間（平成 19、22 年度採択）

平成 29 年度採択

拠 点 名 称	概 要	ホスト機関	拠 点 長
ニューロインテリジェンス国際研究機構（IRCN）	究極の問い「ヒトの知性はどうのようにして生じたか？」に、脳神経発達の理解から迫る	東京大学	タカオ ヘンシュ
ナノ生命科学研究所（NanoLSI）	細胞内外の「未踏ナノ領域」を開拓し、生命現象の仕組みをナノレベルで理解する	金沢大学	福間 剛士

平成 24 年度採択

国際統合睡眠医科学研究機構（IIS）	睡眠覚醒機構の解明を目指し、基礎から臨床までを網羅する世界トップレベルの睡眠医科学研究拠点	筑波大学	柳沢 正史
地球生命研究所（ELSI）	地球と生命の起源を探る国際融合研究拠点	東京工業大学	廣瀬 敬
トランスフォーメティブ生命分子研究所（ITbM）	世界を分子で変える：合成化学と動植物科学の融合	名古屋大学	伊丹 健一郎

平成 22 年度採択

カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I2CNER）	カーボンニュートラル・エネルギー社会実現への道筋	九州大学	ペトロス ソフロニス
-------------------------------	--------------------------	------	------------

平成 19 年度採択

材料科学高等研究所（AIMR）	世界トップの材料科学研究拠点形成	東北大学	小谷 元子
カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）	宇宙の起源と進化の解明を目指す融合型研究拠点	東京大学	村山 斉
物質 - 細胞統合システム拠点（iCeMS）	細胞科学と物質科学を統合した学問分野をメゾ領域で創出	京都大学	北川 進
免疫学フロンティア研究センター（IFReC）	免疫を視る ―動的ネットワーク解明へ新たな挑戦―	大阪大学	審良 静男
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（MANA）	マテリアル・ナノアーキテクトニクス ―新材料開発のための新しいパラダイム―	物質・材料研究機構	佐々木 高義

### 3.1.4 センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム

#### (1) プログラム概要

10 年後の目指すべき社会像を見据えたビジョン主導型のチャレンジング・ハイリスクな研究開発を最長で 9 年度支援するプログラム。我が国が、今後国際的な競争の中で生き残り、経済再生を果たしていくためには、革新的なイノベーションを次々に生み出していくことが必要である。文部科学省が平成 25 年度に開始した「革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM)」では、10 年後の社会で想定されるニーズを検討し、そこから導き出されるあるべき社会の姿、暮らしのあり方(「ビジョン」)を設定した。

JST ではセンター・オブ・イノベーション (COI) プログラムとして、このビジョンを基に、10 年後を見通した革新的な研究開発課題を特定し、既存の分野や組織の壁を取り払い、企業や大学だけでは実現できない革新的なイノベーションを産学連携で実現するとともに、革新的なイノベーションを連続的に創出する「イノベーションプラットフォーム」を我が国に整備することを目的として、基礎研究段階から実用化を目指した産学連携による研究開発を集中的に支援する。ハイリスクではあるものの実用化の期待が大きい異分野融合・連携型の基盤的テーマに対して、集中的な支援を行う。研究開発期間全体を通して JST からの支援と企業からのリソース提供により拠点を運営していく。

#### (2) 期間と予算規模

期間：平成 25 年度～ 33 年度の最長 9 年度間 (予定)

支援額 (1 拠点あたり / 年)： 10 億円程度

#### (3) 採択拠点

ビジョン 1 少子高齢化先進国としての持続性確保

拠点名	中核機関	プロジェクトリーダー	研究リーダー
『食と健康の達人』拠点	北海道大学	吉野正則 (株) 日立製作所	玉腰暁子 北海道大学
真の社会イノベーションを実現する革新的「健やか力」創造拠点	弘前大学	工藤寿彦 マルマンコンピュータ サービス (株)	中路重之 弘前大学
さりげないセンシングと日常人間ドック®で実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点	東北大学	和賀 巖 NEC ソリューション イノベータ (株)	末永智一 東北大学
自分で守る健康社会拠点	東京大学	池浦富久 東京大学	鄭雄一 東京大学
スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点	川崎市産業振興財団	木村廣道 川崎市産業振興財団	片岡一則 川崎市産業振興財団
運動の生活カルチャー化により活力ある未来をつくるアクティブ・フォー・オール拠点	立命館大学	田中孝英 オムロンヘルスケア (株)	伊坂忠夫 立命館大学
活力ある生涯のための Last 5X イノベーション拠点	京都大学	野村剛 パナソニック (株)	小寺秀俊 京都大学

ビジョン2 豊かな生活環境の構築（繁栄し、尊敬される国へ）

「感動」を創造する芸術と科学技術による共感覚イノベーション拠点	東京藝術大学	山本耕志 (株) JVC ケンウッド	桐山孝司 東京藝術大学
『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点	東京工業大学	廣井聡幸 ソニー (株)	若林整 東京工業大学
人間力活性化によるスーパー日本人の育成拠点	大阪大学	上野山雄 パナソニック (株)	松本和彦 大阪大学
精神的価値が成長する感性イノベーション拠点	広島大学	農沢隆秀 マツダ (株)	山脇成人 広島大学

ビジョン3 活気ある持続可能な社会の構築

フロンティア有機システムイノベーション拠点	山形大学	三宅徹 大日本印刷 (株)	大場好弘 山形大学
コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点	東京大学	湯本潤司 東京大学	常行真司 東京大学
感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点	慶應義塾大学	松原健二 (株) ロングフェロー	村井純 慶應義塾大学
革新材料による次世代インフラシステムの構築拠点	金沢工業大学	池端正一 大和ハウス工業 (株)	鵜澤潔 金沢工業大学
世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点	信州大学	都築浩一 (株) 日立製作所	遠藤守信 信州大学
人がつながる “移動” イノベーション拠点	名古屋大学	畔柳滋 トヨタ自動車 (株)	森川高行 名古屋大学
共進化社会システム創成拠点	九州大学	石原晋也 西日本電信電話 (株)	若山正人 九州大学

### 3.1.5 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム

#### (1) プログラム概要

産業界との協力の下、大学等が知的資産を総動員し、新たな基幹産業の育成に向けた「技術・システム革新シナリオ」の作成と、それに基づく学問的挑戦性と産業的革新性を併せ持つ非競争領域での研究開発を通して、基礎研究や人材育成における産学パートナーシップを拡大し、我が国のオープンイノベーションを加速することを目指す。新たな基幹産業の育成の核となる革新的技術の創出を目指すとともに、新たな基幹産業の育成が図れる持続的な研究環境・研究体制・人材育成システムを持つプラットフォームを形成することを目的とする。大学等と民間企業によるコンソーシアム型の連携により、非競争領域の産学共同研究、博士課程学生等の人材育成及び産学連携システム改革を一体的に推進することで、「組織」対「組織」による本格的な産学連携を実現し、我が国のオープンイノベーションの本格的駆動を図る。

企業による民間資金を活用したマッチングファンド形式の研究開発プログラムであり、企業には、大学等における基礎研究の企画から参画し、研究開発費及び博士課程学生等の人件費等の拠出を通じ

た本格的な産学共同研究を推進していただく。大学等及び民間企業は、プラットフォームを担う「共創コンソーシアム」を形成し研究開発を推進する。革新的技術によるイノベーションの担い手となる人材の育成をはかるため、学生や若手研究者を含む多様な人材の参加を推奨する。また、博士課程学生等の人材育成においては、文部科学省の「卓越大学院プログラム事業」との連携も視野に入れた人材育成システムを構築することが期待されている。

本プログラムは、「未来投資戦略 2017」（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）における「2025 年度までに大学・国立研究開発法人等に対する企業の投資額を 2014 年の水準の 3 倍とする」という政府目標の達成に向け、マッチングファンドを活用した産学共同研究を推進するほか、「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」（平成 28 年 11 月 30 日イノベーション促進産学官対話会議事務局）に基づく大学等の産学連携システム改革を加速するためのプログラムとしても位置づけられている。

## (2) 期間と予算規模（※公募・採択年度によって変動あり）

1 ～ 1.7 億円程度／年度、5 年度間

平成 28 年度採択領域

研究領域	共創コンソーシアム	領域統括
世界の知を呼び込む IT・輸送システム融合型エレクトロニクス技術の創出	IT・輸送システム産学共創コンソーシアム	遠藤 哲郎 東北大学
有機材料の極限機能創出と社会システム化する基盤技術の構築及びソフトマターロボティクスへの展開	有機材料極限機能創出・社会システム化共創コンソーシアム	大場 好弘 山形大学
人と智能機械との協奏メカニズム解明と協奏価値に基づく新しい社会システムを構築するための基盤技術の創出	人間機械協奏技術コンソーシアム (HMHS コンソーシアム)	武田 一哉 名古屋大学
ゲノム編集による革新的な有用細胞・生物作成技術の創出	「ゲノム編集」産学共創コンソーシアム	山本 卓 広島大学

平成 29 年度採択領域

安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出	量子アプリ共創コンソーシアム	中野 貴志 大阪大学
生理学的データ統合システムの構築による生体埋込型・装着型デバイス開発基盤の創出	埋込型・装着型デバイス共創コンソーシアム	齋藤 直人 信州大学
大規模都市建築における日常から災害時まで安心して社会活動が継続できる技術の創出	社会活動継続技術共創コンソーシアム	山田 哲 東京工業大学

## Reference

- ・ 第 5 期科学技術基本計画 本文
- ・ 「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」ウェブサイト
- ・ 「世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)」ウェブサイト
- ・ 「センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム」ウェブサイト
- ・ 「産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA)」ウェブサイト

## 3.2 海外（米、中、英、独、仏、EU）の制度・プログラム例

ここでは海外の公的ファンディング機関に着目し、各機関が実施・運営する既存の学問体系や分野を越えた複数分野の連携や異分野融合、学際研究を促す主要な制度・プログラム例を紹介する。

具体的には、米、中、英、独、仏の 5 か国の公的ファンディング機関における融合や学際研究に関連したプログラムの趣旨、その支援領域や採択課題（プロジェクト）、助成金額や実施期間などの情報を取りまとめた。また、EU では多年次にわたる科学技術イノベーションの研究助成制度としてフレームワークプログラムが実施されているが、Horizon 2020（2014～2020 年）で推進されている異分野融合領域・横断テーマの促進施策についても簡単に触れる。

なお、異分野融合領域・横断テーマを推進する動きは、公的ファンディング機関に留まるものではない。個々の大学や研究機関の単位でも、よりダイナミックなやり方で自発的に連携・融合を促す活動を展開しているケースがある。その点を考慮すれば、本章で紹介する事例は各国・地域の取り組みの一部にすぎないものであるということに予め留意いただきたい。

### 3.2.1 米国

#### (1) 米国国立科学財団（NSF）

米国国立科学財団（NSF）は 1950 年に創設された、米国の基礎研究・学術研究活動を支援する独立連邦政府機関であり、その年間予算は約 78 億ドル（2018 年度）である。NSF は、自らの活動が未来を変革する知の創出につながり、ひいては米国の経済発展、安全保障、国際指導力の維持等へ貢献するものと位置づけている。

#### (2) NSF の「コンバージェンス研究」

2016 年 8 月、コルドバ NSF 長官により、「NSF が未来に向けて投資すべき 10 のビッグアイデア」が発表された。この 10 のビッグアイデアは、「NSF におけるコンバージェンス研究の拡大」、「NSF INCLUDES（理数教育を通じたダイバーシティの拡大）」、「中規模研究インフラ」、「NSF 2026（斬新なアイデアの長期支援）」を主題とする 4 つの「プロセス・アイデア」と、「データ革命」、「人間と技術のフロンティア」、「生命法則理解」、「量子飛躍」、「宇宙の窓」、「北極」を主題とする 6 つの「研究アイデア」で構成されている。

コンバージェントなアプローチとは、「その開始において挑戦的な研究という枠組みを設け、疑問への取り組みの成功にとって必要な協力を促進させるもの」と NSF では考えられている。NSF のウェブサイトには、人の健康の保護、食糧・エネルギー・水の連環（ネクサス）の理解、あらゆる尺度での宇宙探査といった現代におけるグランドチャレンジは、単一の分野のみによって解決されるものでなく、幅広く様々な分野を基盤とするアイデア、アプローチ、知識を統合させるコンバージェンスという発想法が求められ、それがイノベーションと発見を促すことに繋がる、とある。上記 10 のビッグアイデアの中に「NSF におけるコンバージェンス研究の拡大」を掲げたことで、NSF は、その科学と工学の全分野にわたる強固な連携により、コンバージェンスを促進するための適切な措置を取ることを大々的に打ち出したと言える。

NSF では、「NSF におけるコンバージェンス研究（Convergence Research）」を以下の 2 つの特徴を有するものとして定めている。

- ・ 特定の差し迫った問題によって引き起こされる研究。特定の課題や機会 — それらが深遠な科学的問いから生まれるものであれ差し迫る社会的ニーズから生まれるものであれ — に対処するニーズによって触発されて生まれる研究。

- ・ 分野を跨ぐ統合の深化。異なる分野出身の専門家が共通の研究課題を追求し、彼らの知識、理論、方法、データ、研究コミュニティ、言語が次第に交じり合い、統合する状況を指す。新しい枠組み、新しいパラダイム、また新しい分野が、複数のコミュニティ間の持続的な相互作用を形成しうる。

このようにコルドバ長官のイニシアティブで「NSF におけるコンバージェンス研究の拡大」が NSF の業務の方向として重要であることが示された後、2017 年 8 月には、「研究アイデア」の 5 つの領域においてコンバージェンス研究に関連した課題 23 件が採択された。以下の表は、これら課題に関する情報を取りまとめたものである。課題の大半はワークショップの開催、ネットワークの構築、サマースクールの開設に関するもので、これらを通じてコンバージェンス研究の推進方法の検討やネットワークの拡大を図っている。

表 3-2-1 コンバージェンス研究に関連した課題例

「研究アイデア」の種類	採択課題数	現在(2018年7月)までの助成額(ドル)	助成期間(終了時期は見込)	課題名
データ革命	4 件	148 万	2017 年 9 月～2020 年 8 月	ビッグデータからの理論モデル導出に関する基礎研究
		150 万	2017 年 10 月～2020 年 9 月	意思決定の改善のためのデータサイエンス：不確実性、因果関係、プライバシー、ネットワーク構造における学習
		150 万	2017 年 9 月～2020 年 8 月	データサイエンスの基礎研究所
		10 万	2017 年 10 月～2018 年 9 月	21 世紀のデータサイエンス教育のための社会科学的知見
人間と技術のフロンティア	8 件	10 万	2017 年 9 月～2018 年 8 月	人間と機械のインタラクションにおける多様な学習 データに関するコンバージェンス研究ワークショップ
		9 万	2017 年 9 月～2018 年 8 月	自動運転トラックによる未来の労働力への示唆：社会技術研究の課題、利益、機会に関するワークショップ
		10 万	2017 年 9 月～2019 年 8 月	STEM 労働力の関与を高める人間 - 技術パートナーシップに関する研究形成のためのワークショップ
		10 万	2017 年 9 月～2019 年 8 月	製造からマイクロ製造まで：大量生産の先にある労働を再考する
		5 万	2017 年 9 月～2019 年 8 月	クラウドソーシング研究における人間と技術の融合的展望に関するワークショップ
		10 万	2017 年 9 月～2019 年 8 月	「未来の労働」力を形成する：テック系労働者文化、コワーキング、組合、起業家精神とデジタル労働での経験に関するコンバージェンスワークショップ
		50 万	2018 年 1 月～2022 年 12 月	高まる自動化の時代における労働の社会技術的展望に関するコンバージェンス研究に対する研究コーディネーションネットワーク
		50 万	2017 年 9 月～2022 年 8 月	システム中心の研究ネットワークを通じて中小企業の生存能力を高める：技術、持続可能な発展、実践の連携

北極	6 件	10 万	2017 年 10 月 ～ 2018 年 9 月	新たな北極を航行する - 北極地域における未来の輸送システムの理解に関するワークショップ
		10 万	2018 年 1 月～ 2018 年 12 月	新たな北極における適応能力とレジリエンス：人と自然にとって公正かつ望ましい結果への道筋を、コンバージェンスを通じて特定する
		4 万	2017 年 1 月～ 2018 年 11 月	北西航路を想定した、新たな北極の航行に際してのニューイングランドの役割に関するワークショップ
		50 万	2017 年 9 月～ 2021 年 8 月	データサイエンスにおける知識共同生産（コプロダクション）に関する北極圏の土着民と米国西部のコミュニティ間のネットワーク
		50 万	2018 年 1 月～ 2021 年 12 月	永久凍土地帯の海岸浸食部と北極におけるその社会経済的インパクトに対する課題と解決策を特定するための分野横断研究ワークショップ
		50 万	2018 年 7 月～ 2022 年 6 月	海岸沿い地域の危険性、観察、統合研究のための北極ネットワーク
量子飛躍	3 件	70 万	2017 年 6 月～ 2021 年 5 月	NSF/DOE 量子科学サマースクール
		160 万	2017 年 9 月～ 2021 年 8 月	量子飛躍におけるセクター間連携に関するワークショップ
		10 万	2017 年 9 月～ 2018 年 8 月	安全な通信の量子的要素に関するワークショップ
生命法則理解	2 件	50 万	2017 年 9 月～ 2022 年 8 月	生物多様性のクロススケール・プロセス研究
		50 万	2017 年 9 月～ 2022 年 8 月	生命の起源の探求のための研究調整ネットワーク

出典：NSF のウェブサイトをもとに CRDS で作成

上記に加え、10 のビッグアイデアの「研究アイデア」を構成する「生命法則理解」、「量子飛躍」、「北極」、「データ革命」、「人間と技術のフロンティア」のそれぞれの領域においても、コンバージェンスに言及した公募が以下の表のとおり実施されている。

表 3-2-2 コンバージェンス研究に関連した公募例

「研究アイデア」の種類	公募タイトル	概要	支援規模
生命法則理解	生命システムの予測と発現	ゲノムから環境まで含む様々な因子と、生命の表現型との関係解明	提案内容に応じ調整（研究集会は 1 課題当たり最大 10 万ドル、最長 1 年間）
生命法則理解	土壌中のシグナル	センサー、無線システム、高度なサイバーシステムとデータ解析、土壌生態系のモデリングなどのアプローチにより、生物学的、物理化学的な相互作用を含む土壌プロセスのモニタリング	1 課題当たり最大 30 万ドル、最長 2 年間で基本に、提案内容に応じ調整（既存のプログラムと組み合わせて資金配分を設計する）
量子飛躍	量子システムにおける変革的な進歩	量子情報の利用に向けた材料開発、理論実証、統合プラットフォームの開発	1 課題当たり最大 100 万ドル、最長 5 年間

量子飛躍	量子通信のための統合プラットフォーム	光・電子に基づく量子デバイスアプローチ、量子信号を最小限の損失で伝搬、保存、経路制御する媒体、量子ビットの高忠実度検出を実現する受信技術などの課題	全体で 500 万ドル (1 課題当たり 3 年間で 75 万ドル、7 課題程度を想定)
北極	新たな北極圏研究	観測およびネットワーク技術開発、環境変化の把握と予測、インフラ開発と生態系や社会システムとの相互影響の研究など	提案内容に応じ調整 (既存のプログラムと組み合わせて資金配分を設計する)
データ革命	データ駆動型の化学	データ分析手法を使用して、優れた活性および選択性を有する触媒の発見、新しい化学種および合成反応の設計や合成条件の予測など	提案内容に応じ調整 (既存のプログラムと組み合わせて資金配分を設計する)
人間と技術のフロンティア	認知能力と身体能力の向上	人間と技術の相互作用に焦点を当て、1) 人間の認知を高めるための基盤研究、2) 具現化された認知支援デバイス・システムの研究、の両テーマ	小規模課題：1 課題あたり 3～5 年間で 75 万～150 万ドル、最大 16 課題を想定 大規模課題：1 課題あたり 3～5 年間で 150 万～300 万ドル、最大 8 課題を想定

出典：NSF の各種ウェブサイトをもとに CRDS で作成

また、コンバージェンス研究それ自体の促進に関する、分野を限定しない公募として、以下のものが実施されている。

表 3-2-3 コンバージェンス研究に関連した公募例

「プロセス・アイデア」の種類	公募タイトル	概要	支援規模
NSF におけるコンバージェンス研究の拡大	コンバージェンス研究の拡大	コンバージェンス研究を必要とする新たな研究課題を見出し、分野横断的なチームで取り組む	1 課題当たり最大 100 万ドル、最長 3 年間

出典：NSF のウェブサイトをもとに CRDS で作成

「NSF が未来に向けて投資すべき 10 のビッグアイデア」は、予算的な裏付けがあって立ち上げられた取り組みではない。そのため、上記の公募で採択された研究課題に対しては、公募の内容に応じて、「探索的研究初期概念グラント (EARly-concept Grants for Exploratory Research: EAGER)」や「学際的な科学・工学により展開される研究 (Research Advanced by Interdisciplinary Science and Engineering: RAISE)」等の NSF の既存のファンディングメカニズムを通じて支援が行われている。EAGER は斬新な発想やアプローチ、新分野・学際などの要素を含む探索的研究を、RAISE はトランスフォーマティブな学際的研究を支援するための仕組みである。いずれも、革新的なアイデアが埋もれてしまうことを防ぐために、通常の審査手続きを経ず、プログラムオフィサー (PO) の裁量によって支援を決定している。

他方で、NSF の 2019 年度予算要求において、ようやく各ビッグアイデアの予算化が打ち出された。そのうち「NSF におけるコンバージェンス研究の拡大」には 1,600 万ドル、6 つの「研究アイデア」には各 3,000 万ドルが計上されている。また、それぞれのビッグアイデアにおけるコンバージェン

ス促進のための制度として、「コンバージェンス加速支援 (Convergence Accelerator)」の新設が盛り込まれている。これは、NSF が外部機関 (民間セクター、他の連邦機関、海外ファンディング機関等) と連携してコンバージェンスを促進するための時限的な制度であり、同制度を通じて 10 のビッグアイデアへの支援が追加的に措置される。2019 年度予算要求では、「データ革命」と「人間と技術のフロンティア」に各 3,000 万ドル、計 6,000 万ドルが計上された。さらに外部機関からの追加投資 4,000 万ドルが見込まれている。

各アイデアには、戦略チームと事業チームの 2 チームが配置される。局長らから成る戦略チームではどのように目標を達成するのかについて計画を立てる一方、PO から成る事業チームは、研究コミュニティ向け書簡 (Dear Colleague Letter) を発表したりファンディングメカニズムを検討したりして、事業の推進を行う。

## Reference

- ・「NSF が未来に向けて投資すべき 10 のビッグアイデア」ウェブサイト
- ・林幸秀 編『米国国立科学財団 NSF - 基礎研究を支える連邦政府独立機関』(東京: 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, 2018)

## 3.2.2 中国

### (1) 国家自然科学基金委員会 (NSFC)

国家自然科学基金委員会 (NSFC) は基礎研究と応用研究の一部を国の財政資金で支援する機関で、1986 年に設立された。NSFC は米国の NSF をモデルに作られている。NSFC は、研究者の創意によるボトムアップの基礎研究への資金配分や人材育成、拠点形成などをメインとしているが、2 割程度の研究資金を戦略的プログラムに配分しており、大学や国立研究機関との関係が深い。21 世紀に入り、中国経済の発展に伴い、政府の基礎研究重視の政策を追い風として予算を急激に伸ばし、基礎研究振興において中国の重要なファンディング機関となっている。

### (2) NSFC の「重点項目」、「重大项目」、「重大研究計画」

中国政府は 2000 年頃から分野の横断・融合・新分野開拓を推進する重要性を認識し始めた。国家科学技術中長期規画綱要 (2006 ~ 2020 年) の第六章第二項では「基礎研究における分野の横断・融合・新分野開拓の推進に注力」を明確に掲げ、基礎研究におけるオリジナリティ創出を図っている<sup>2</sup>。

基礎研究を推進する主要な担い手である NSFC の予算総額は 240 億元で、そのうちボトムアップ型の基礎研究を支援する「一般項目 (General Program)」<sup>3</sup>を通じた助成総額は 101 億 7,000 万元となっている。平均助成額はプロジェクト当たり平均約 60 万元の直接経費で、期間は 4 年である。

他方、NSFC は、国家・社会課題解決型の戦略的プログラム「重点項目 (Key Program)」や「重大项目 (Major Program)」、「重大研究計画 (Major Research Plan)」によってトップダウン式に分野横断・

2 参考情報として、「国家科学技術中長期規画綱要 (2006~2020年)」における横断・融合に関連した取り組みに言及しておきたい。同綱要は中国の科学技術基本政策の中核を成すものである。この綱要にリストアップされた2006~2020年の重点領域を見てみると、数学、物理、化学、天文学、地球科学、生物学など基礎研究分野を支援しながら、基礎研究分野間、基礎研究分野と応用研究分野間、および自然科学と人文社会科学の連携によるオリジナリティの創出、新しい領域の創出により、世界トップレベルの研究推進を目指していることが分かる。

3 原語表記は「面上項目」であり、当機構からの他の報告書、書籍等では「面上項目」「一般プログラム」などと表記する場合もある。

融合研究を推進し、新しい分野・領域を創出してきた。2016 年 6 月に公表された「国家自然科学基金第 13 次五カ年発展計画 (2016 ~ 2020 年)」では、基礎研究支援の方針として「探索・人材・施設設備・融合」を支援対象として明確に掲げ、イノベーション・チーム支援プログラムや科学技術研究拠点支援プログラムなどを追加的に支援することを打ち出して分野の横断と融合のさらなる推進を図っている。

NSFC は「医学」「情報科学」「工学と材料科学」「地球科学」「ライフサイエンス」「化学」「数理科学」「技術経営」の 8 つのディビジョン (Division) に分けられ、「重点項目」はディビジョン内の横断・融合を、「重大項目」はディビジョン間の横断・融合を推進するプログラムとなっている。各プログラムの詳細は以下のとおり。

表 3-2-4 各ディビジョン内の横断・融合を推進する重点項目

＜重点項目＞	
特徴	優位性のある領域、又は新領域創成のために、トップダウン式の研究助成を実施
助成期間	5 年間
助成金額	平均助成金額は 300 万元／プロジェクト
申請条件	①基礎研究の助成を受けた経験を有する ②申請者は教授級の職位にある ③研究者メンバーは基本的に同一研究機関で、必要な場合、最大 2 機関を上限とする
支援領域	8 ディビジョンすべてが支援対象
支援テーマ例	「医学」ディビジョンでは、2017 年度に 3 億 2,750 万元の予算で 39 テーマ 112 のプロジェクトを支援。この 112 件のうち、融合が色濃く見られたテーマのいくつかを以下に挙げる。 ・スマート医学画像処理技術 (診断技術、Big data、AI の融合) ・微小組織微小臓器と生体機能チップ (Human organs-on-chips) に関する研究 ・漢方薬の品質規格マーカーの開発 (漢方学と西洋医学の融合) ・東洋医学・西洋医学の融合による糖尿病の予防と治療

出典：各種ウェブサイトの情報をもとに CRDS で作成

表 3-2-5 8 つのディビジョン間の横断・融合を推進する重大項目

＜重点項目＞	
特徴	国や社会の重大な課題の解決に向けて、分野融合的な研究をトップダウン式に支援
助成期間	5 年間
助成金額	1,500 ~ 2,000 万元／研究テーマ
申請条件	①基礎研究の助成を受けた経験を有する ②申請者は教授級の職位にある ③ 1 つのテーマに 5 つ以下の研究課題を設置する ④ 1 つの研究課題の研究開発者は、最大 2 機関に所属する ⑤ 1 つのテーマの研究者は最大 5 機関に所属する
支援領域	8 ディビジョンすべてが支援対象
支援テーマ例	1 つの研究テーマに最大 5 の研究課題を設置している。2017 年度は 39 研究テーマの助成が決定された。具体的なテーマ名をいくつか以下に挙げる。 ・エネルギー関連小分子活性化／変換のための多孔性複合体研究 (化学、材料学、ナノテクの融合) ・細胞代謝物によるがんの早期発見研究 (生物化学、プロテオミクス、バイオインフォマティクスの融合)

出典：各種ウェブサイトの情報をもとに CRDS で作成

表 3-2-6 育成～重点支援～システム化と段階的に支援する重大研究計画

<重点項目>

特徴	国の発展戦略に基づき、特定の研究テーマにおいて関連する領域群を長期（8 年程度）に亘ってトップダウン式に支援
助成期間	①育成段階 3 年間 ②重点支援段階 4 年間 ③システム化段階 個別決定
助成金額	①育成段階 100 万円／プロジェクト ②重点支援段階 300 万円／プロジェクト ③システム化段階 400 万円／プロジェクト 2017 年度には 23 の研究テーマが採択され、各研究テーマに 3,000 ～ 4,000 万円が配賦。1 つの研究テーマには、10 以上のプロジェクトが設置されている。
支援テーマ例	2017 年度の支援テーマ「大気複合的汚染の原因及び対策に関する基礎研究」を見ると、全体予算は 3,300 万円となっている。同テーマの下に育成段階プロジェクトが 1 件、重点支援段階プロジェクトが 8 件、システム化段階プロジェクトが 2 件、設置されている。計 11 件のプロジェクトのうち具体的なプロジェクト名をいくつか以下に挙げる。 ・ ライトフィールドに関する理論と応用技術（物理、化学、ICT、材料の融合） ・ 人間－機械－環境協働型ロボットに関する研究開発（柔らかいロボット、複雑環境認識、ロボット間協働技術等を支援し、ロボティクス、材料科学、ICT 等の融合を狙う）

出典：各種ウェブサイトの情報をもとに CRDS で作成

ちなみに「Guide to Programs 2017」では、「interdisciplinary」という単語が 118 回、「multidisciplinary」が 17 回登場する。「Guide to Programs 2016」以前のファンディング・ポートフォリオには「Convergence」は挙げられてないが、ガイドライン中には「interdisciplinary」と「multidisciplinary」が 2017 年版と同程度頻出する。このことから、異分野融合・横断研究の重要性はボトムアップ型基礎研究においては長年強く認識されてきたことが伺える。

## Reference

- ・ NSFC Annual report 2016
- ・ NSFC Guide to Programs 2017
- ・ 国家自然科学基金第 13 次五カ年発展計画（中国語）

## 3.2.3 英国

### (1) 英国研究・イノベーション機構 (UKRI)

英国研究・イノベーション機構 (UKRI) は、7 つの研究会議 (分野別に設置された研究資金助成機関)<sup>4</sup>、Innovate UK (主に産学連携や企業におけるイノベーション活動を支援する研究資金助成機関)、および Research England (大学に運営費交付金を配分する機関) が単一の法人組織としてまとめられ、2018 年 4 月に発足した英国最大の公的ファンディング機関である。UKRI では、傘下にある 9 つの構成機関の独立性や柔軟性を最大限に活かし、異分野融合や組織横断でイノベーションに繋げるファンディングに、より重点を置いている。戦略的なアプローチに基づいて年間 60 億ポンドに上る政府

4 7 つの研究会議はそれぞれ以下のとおり。芸術・人文学研究会議 (AHRC)、バイオテクノロジー・生物科学研究会議 (BBSRC)、工学・物理科学研究会議 (EPSRC)、経済・社会研究会議 (ESRC)、医学研究会議 (MRC)、自然環境研究会議 (NERC)、科学技術施設会議 (STFC)。

の研究イノベーションへの投資効率を最大化することが目指されている。

## (2) UKRI の学際プログラム

UKRI は、革新的で学際的、かつ分野横断的なアプローチが 10 ～ 20 年かけて大型の研究課題の多くを解決するために必要であると見なし、英国の研究力の質および国際パフォーマンスの強さを示す世界トップクラスの研究への助成を行っている。

UKRI が運営する現行の学際型研究プログラム (Multidisciplinary programmes) は、UKRI 傘下の研究会議が 2000 年代から始めていた研究プログラムである。同プログラムでは、以下の 6 優先領域において世界トップレベルの分野横断型研究を行うプロジェクトに研究資金を助成している。助成額や実施期間はプロジェクトごとに異なる。

- ・ デジタルエコノミー (Digital Economy)
- ・ エネルギー (Energy)
- ・ グローバルな食糧保全 (Global Food Security)
- ・ 薬剤耐性に対する取組 (Tackling Antimicrobial Resistance)
- ・ 生命に関わる技術 (Technology Touching Life)
- ・ 都市生活パートナーシップ (Urban Living Partnership)。

「グローバルな食糧保全」の領域を具体例でみると、2016 年に「グローバルな文脈における英国食糧システムのレジリエンス」という学際研究プログラムが開始した。同プログラムは、環境・生物・経済・社会・地政学的ショックに耐えうる食糧システム能力を高め、英国の食糧保全を強化することを目指している。2016 年度に第一次公募が、2017 年度に第二次公募が実施され、2018 年度にも第三次公募が実施される予定である。プログラムの全体予算は 1,450 万ポンドである。研究者が申請者となる。

第一次公募は英国の食糧供給の最適化およびグローバルな食糧保全への取り組みを目的とし、5 件のプロジェクトに対し最高で総額 900 万ポンドの助成を決定した。助成期間は 3 年間である。第二次公募はグローバルなショック、環境上・人口統計上の変化、および病害虫等による脅威から英国の食糧供給のレジリエンスを高めることを目的とし、5 件のプロジェクトに対し最高で総額 490 万ポンドの助成を決定した。以下の表は、これら計 10 件の詳細を取りまとめたものである。

表 3-2-7 学際型プログラム「グローバルな文脈における英国食糧システムのレジリエンス」における支援プロジェクト一覧

	プロジェクト名	助成金額 (予定)
第一次公募	新鮮な果物・野菜を確保する英国内システムの水リスクに対するレジリエンスの強化 研究主任：Prof. Hess (クランフィールド大学)	129 万ポンド
	グローバルなショックに対する英国の食糧システムのレジリエンス 研究主任：Prof. Rounsevell (エディンバラ大学)	100 万ポンド
	英国の養豚産業のレジリエンスに対する強化および将来的な変化についてのインパクト予測 研究主任：Prof. Collins (リーズ大学)	210 万ポンド
	食糧システムのレジリエンスのための知識統合 研究主任：Prof. Doherty (ヨーク大学)	346 万ポンド
	英国人の好む果物の将来の確保 研究主任：Prof. Bebbler (エクセター大学)	123 万ポンド

第二次公募	英国の食糧システムのレジリエンスと持続可能性におけるリンの役割 研究主任：Prof. Withers (バンガー大学)	151 万ポンド
	英国におけるレジリエントな授粉のための展望のモデル化 研究主任：Prof. Potts (レディング大学)	59 万ポンド
	日常のレジリエンスと持続可能性に向けた社会技術イノベーション 研究主任：Prof. Reed (ニューキャッスル大学)	149 万ポンド
	持続可能な経済的・生態的放牧システム 研究主任：Dr. Norton (英国水文学研究所)	62 万ポンド
	人里離れた高地における食糧システムのレジリエンスにおける家畜の役割 研究主任：Dr. Bruce (エディンバラ大学)	69 万ポンド

出典：関連ウェブサイトをもとに CRDS で作成

UKRI では 2018 年に、分野横断的・学際的プログラムを支援するためのファンディング・スキームとして戦略優先基金 (SPF) を新設することを予定している。同スキームは、ハイレベルな研究開発優先領域への戦略的投資を強化し、分野横断・学際型の取り組みを推進することを意図したものとされている。

## Reference

- ・ UKRI 公式ウェブサイト
- ・「グローバルな食糧保全」戦略計画

## 3.2.4 ドイツ

### (1) ドイツ研究振興協会 (DFG)

ドイツ研究振興協会 (DFG) は、連邦教育研究省 (BMBF) を所管省として、大学および公的研究機関の支援 (ただしほとんどの資金が大学に配分されている) における基礎研究を対象とした研究資金助成を行っている。年間予算は約 32 億ユーロ (2017 年) で、大学の総研究開発費の 20% 程度を配分している。DFG の主なタスクは、大学の研究支援の他、研究者間の協力・交流支援、若手研究者の支援、議会への科学的助言などがある。

### (2) DFG の共創プログラム

DFG では研究者個人を対象とした日本の科研費にあたる Research Grant を主たるプログラムとして運営しているが、関連ある分野における国内／国際協力を促し大学の科学的ポテンシャルに注目することで、協力や構造的イノベーションを促進する共創プログラム (Coordinated Programmes) を展開している。同プログラムは、複数の機関 / 研究者を申請者とする 7 つの主な取り組みを含むが、そのうち融合の促進や新たな研究領域の創成に関連したものは優先プログラム (Priority Programmes: SPP)<sup>5</sup> と共同研究センター (Collaborative Research Centres: SFB)<sup>6</sup> の 2 つである。それぞれ概要を以下に記す。

5 ドイツ語ではSchwerpunktprogramm (重点プログラム) SPPという名称。

6 同じくSonderforschungsbereich (特別研究領域) SFB。

■優先プログラム (SPP)

SPP は、異分野融合研究や異なる地域間の共同研究という付加価値を考慮して、自然科学および人文科学の振興を促すことを目指すプログラムである。

原則として年に 1 度の公募を実施し、1 次ラウンドで研究コミュニティ (申請者は研究者) からボトムアップで研究テーマを公募し、採択された研究テーマに関し 2 次ラウンドで研究提案を公募する二段階方式をとる。1 次ラウンドでは、DFG の評議会 (Sentat) がテーマを審査、新テーマの可否を判断し、特に優先度の高い領域を策定し公募を行う。助成期間は最長 6 年間 (6 年×1 回、3 年×2 回、2 年×3 回) で、採択はピアレビューにより実施されている。研究テーマが決まると、コーディネータが任命され、2 次公募が始まる。2 次ラウンドでは、個別プロジェクトのテーマは応募者が再びボトムアップで提案し、研究パートナー/チームはコーディネータを中心に応募者間で調整が行われる。SPP では応募に締切があり、年に 1 度という原則があるため、常時応募可能な通常の DFG の Research Grant とは異なる。

採択の両ラウンドでは、①提案のオリジナリティ、②領域融合的研究であるかどうか、③若手研究者の関与可能性、④限られた地域の研究者間のグループではなく、ネットワークを構築することなどが審査される。各研究プロジェクトの助成額は均一で、コーディネータに裁量の余地はない。以下の表では、公募研究テーマと採択プロジェクトの一例を示した。

表 3-2-8 SPP における公募テーマ (2017 年) と採択プロジェクト例

公募研究テーマ (2017) / プロジェクト	PI 所属機関
コンピュータによるコネクティクス (Computational Connectomics)	フランクフルト先進研究所
ヒト大脳皮質の大規模計算モデルにおけるマルチスケール結合と脳構造の統合	ユーリッヒ総合研究機構
脳における言語の基盤となる動的コネクトーム	ヒト認識・脳科学マックスプランク研究所
ヒト微小構造コネクティクス: 組織学および CLARITY による組織モデリングと検証	ヒト認識・脳科学マックスプランク研究所
健康とてんかんにおけるマウス歯状回の高分解能結合解析	ボン大学
網膜内層の計算モジュールの解明	チュービンゲン大学
ゼブラフィッシュにおける両眼視覚フロー処理回路の機能的コネクティクス	神経バイオロジーマックスプランク研究所
フェレット脳の内因性結合モデルのマルチスケール解析と計算モデリング	ハンブルク大学病院
脳卒中におけるマルチスケールのメカニズムを明らかにするモデリングに基づくコネクトーム	ハンブルク大学病院
臨床コネクティクス: 深部脳刺激に対するネットワークアプローチ	ケムニッツ工科大学
ゴキブリの概日時計のコンピュータコネクティクス	ベルリンシャリテ大学病院
統計的推論を用いた解剖学的に現実的な皮質コネクトームの予測	コンラート=ツァーゼ情報技術センター
動的コネクトーム: バランスを保つ	フランクフルト先進研究所

出典: 関連ウェブサイトをもとに CRDS で作成

■共同研究センター (SFB)

SFB は、革新的で長期的な研究テーマに取り組むことで、新たな研究領域の創成ないしは新学科の設立に寄与することを目的としたプログラムである。

SPP と同様、1 次ラウンドで大学 (申請者は大学) からボトムアップで領域提案を公募し、年に一度の審査を経て採択された領域に対し 2 次ラウンドで研究提案を公募する二段階方式をとる。1 次ラウンドで大学側からの提案を評議会 (Sentat) で審査する。新領域に採択されると 1 名ないしは複数名の領域コーディネータを任命する。領域の審査基準は、①国際的な競争力の高い研究と獨創性、②洗練された長期的な研究計画、③大学当局の適切な人的、財政的な計画、④若手研究者の育成とマネジメント、などとなっている。さらに、大学だけでなく公的研究機関との連携有無も加味される。SPP と異なり、領域コーディネータには資金配分の裁量が認められている。最長 12 年 (4 年×3 回) の助成プログラムで、2018 年の予算では約 7 億 1,700 ユーロを配分して、274 領域を支援する予定とされている。

SFB は 1968 年から続く歴史あるプログラムだが、2017 年度からは DFG の博士課程学生支援プログラム (Research Training Groups) と連動する形で、大学院の研究支援を包括的に実施している。

以下の表では、SFB の公募テーマ、参加大学およびプロジェクト名の一例を示した。この公募では、Spin と何か違う分野 (物理学、化学、機械工学、プロセス工学) を掛け合わせて (Spin+X)、先進的スピン工学 (advanced spin engineering) のためのコヒーレントなプラットフォームの構築を目指している。

表 3-2-9 SFB における公募テーマ (2017 年) と採択プロジェクト例

公募テーマ (2016) / 領域	参加大学 / プロジェクト数	
Spin+X: Spin in its collective environment	カイザースラウテルン工科大学、マインツ大学	
スピン現象の基礎	10 件	スピン+軌道カップリング: スピン-軌道トルクの起源の理解
		スピン+相変化: スピンと電荷および格子との競合相互作用
		スピン+オービトロニクス: 電氣的生成によるスピン-軌道トルクと純スピン流
		スピン+フォノン: スピנקロスオーバー材料のマイクロ構造とナノ構造におけるスピン-フォノン相互作用の探索
		スピン+歪み: 磁気秩序と異方性に及ぼす静的および動的歪みの影響
		スピン+マイクロ構造: 拡張欠陥の原子構造と磁気構造の相互作用
		スピン+交換: スピンと交換のダイナミクスの理論
		スピン+交換-ダイナミクス: フェムト秒スケールにおける交換相互作用
		スピン+界面交換: 強磁性表面における単一分子磁石の交換相互作用
		スピン + 電荷: 準一次元磁性ナノワイヤにおける散乱とトンネリング

	機能的スピン現象	9 件	スピン + マグノン：情報処理のためのスピン励起
			スピン + 流：磁化を操作する純スピン流
			スピン + 非平衡：超高速非平衡スピンと電荷輸送
			スピン + マグノン制御：マグノン特性の動的制御
			スピン + カップリング - 制御：ハイブリッド超分子システムにおけるスピン - スピン相互作用の制御
			スピン + マグノン制御：マグノンとプラズモンの相互作用制御
			スピン + メカニカルセンシング：鉄鋼の歪み誘起スピン現象の解明とキャラクタリゼーション
			スピン + 化学センシング：NMR 信号増強のための電子と核スピン間の角運動量の伝達

出典：関連ウェブサイトをもとに CRDS で作成

DFG の予算全体における SPP および SFB の予算を比較したのが、以下の表である。これで見ると、2017 年の DFG 予算のうち、SPP の予算は全体の約 7%、SFB の予算は約 22% であることが分かる。

表 3-2-10 DFG 全体における SPP と SFB プログラムの予算規模

DFG 全体 (2017 年実績)			32 億 4,810 万ユーロ
優先プログラム (SPP)	テーマ数	プロジェクト数	予算
	107	3,501	2 億 2,100 万ユーロ
共同研究センター (SFB)	テーマ数	プロジェクト数	予算
	283	5,544	7 億 1,680 万ユーロ

出典：「DFG Annual Report 2016」をもとに CRDS で作成

## 3.2.5 フランス

### (1) 国立研究機構 (ANR)

国立研究機構 (ANR) は、主に大学と国立研究機関を対象として競争的に資金を配分する公的ファンディング機関である。2005 年に公益利益団体として設立され、2007 年以降は行政的性格公的機関 (EPCA) として法的には位置づけられている。ANR が 2015 年に配分した資金は約 3 億 9,000 万ユーロである。公募は大きく一般公募と特定公募に分かれ、それぞれ 4 つの柱 (重要な社会課題、研究のフロンティア、欧州研究圏の構築とフランスの国際的な魅力向上、研究および競争力の経済的インパクト) のもとに設置されたプログラムの単位で資金が配分されている。

### (2) ANR のコンバージェンス・インスティテュート

コンバージェンス・インスティテュート (Convergence Institute) は 2016 年に開始された比較的新しいプログラムであり、2010 年に開始された総額約 350 億ユーロの大規模借り入れ「未来への投資」プランの支援対象である。「未来への投資」プランは首相直下の投資総局が実行責任を負っており、ANR はその資金配分を委託されている。2017 年の ANR 報告では約 1 億 300 万ユーロが本プログラムのために予算確保されている。本プログラムの目的は、社会経済的課題の重大イシューに対処するため、また、科学コミュニティによって提起された問題に応えるため、大規模で注目を集めるような学際的研究拠点を構築することにある。プロジェクトの公募に先立ち、応募に関する 3 つのガイド

ラインが以下のとおり示された。

- ・ 特定の場所に組織されたパートナーシップの下、新しい知識を生み出すことを目的として、多様な研究の能力や異なる学問分野のスキルを結集すること。
- ・ 分野横断的な研究と連携をとりつつ、修士号と博士号の段階において卓越した養成を展開・導入し、継続すること。
- ・ 拠点の主たる課題に応えるダイナミックな機構を一定期間展開し、その際、国際的に高いレベルの科学的野心、科学者の雇用に関する戦略、単純かつ効果的なガバナンスを備えたものとする

公募は 2016 年 3 月に開始され、2 回に分けて行われた。申請者の条件に関する明確な規定は設けられていないが、上記のガイドラインおよびコンバージェンス・インスティテュートのプログラム申請書を見る限り、研究者個人が優秀なテーマを持って申請というよりは大学や研究機関が申請者であることが望ましいと見なされている。応募に際しては、6 つのカテゴリーの中から少なくとも 2 つ以上を融合分野として選んで申請することが求められるとともに、期待されるプロジェクトのアウトラインおよび評価のポイントが 7 点示された。申請プロジェクトの審査過程は主に 6 段階から成る。以上の情報を取りまとめたのが以下の表である。

表 3-2-11 「コンバージェンス・インスティテュート」プログラムにおける融合分野候補、  
 公募のアウトラインおよび評価ポイント、並びに審査過程に関する情報

公募申請の際に融合分野として選ぶべき 6 つのカテゴリー					
材料とエネルギーの科学	地球・宇宙・環境の科学	生命と健康の科学	デジタルと数学の科学	社会科学	人文
プロジェクトのアウトラインおよび評価ポイント					
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 科学的または社会経済的チャレンジを明確にしたインターディシプリナリーな研究プロジェクトであること</li> <li>・ リーダーシップやマネジメント能力を発揮できるハイレベルの科学者によって率いられていること</li> <li>・ 科学的なレベルの高さとインターディシプリナリーへのプロセスが指標となる</li> <li>・ フランスにおける大学院を体現する機構となること</li> <li>・ 国のサイト政策とリンクした拠点内のプロジェクトであることが望ましい（具体的には IDEX や COMUE にある拠点）</li> <li>・ パートナーとして企業、産業界、病院などを検討すること</li> <li>・ 最長 10 年間</li> </ul>					
審査過程の流れ					
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ANR による書類審査</li> <li>・ レフェリーによる選別</li> <li>・ 国際レフェリーによる評価</li> <li>・ 本公募の管理委員会へのレフェリーの結果報告</li> <li>・ 首相直下の投資総局での裁可</li> <li>・ 審査結果の公表</li> </ul>					

出典：各種情報をもとに CRDS で作成

公募の結果、下表 3-2-12 の 10 件のプロジェクトが採択された。

表 3-2-12 「コンバージェンス・インスティテュート」プログラムで採択されたプロジェクト 10 件

プロジェクト名	概要	プロジェクト主幹大学・機関
チューリングと生命体	生命体の起源の複雑性を多分野横断的なアプローチから研究・探求する	エックス・マルセイユ大学
気候変動と土地の活用	気候、食物、生物多様性、エコシステム、土地の活用による社会経済的課題に取り組む	パリ・サクレ大学
デジタル農業	コンピュータ科学、産業、農業における知を駆使する	モンペリエ大学
個人や集団を通じた病気 の出現の起源	コンピュータサイエンスとデータサイエンス、統合生物学、社会科学の手法を駆使する	パスツール研究所
言語、コミュニケーション と脳	言語、神経科学、心理学、情報科学、数学、医学の分野を横断して、言語、コミュニケーション、脳についてのデータ解析、モデリングを行う	エックス・マルセイユ大学
移民	今日の欧州の様々な移民問題を研究し、政府に提言する	国立科学研究センター (CNRS)、国立保健医学研究所、国立人口調査研究所、パリ第一大学他
ガン - 腫瘍の可塑性と 適応性。カスタマイズさ れた新しい世代の医学	ガンの理解とモデリング、新しい知見の臨床への応用と医学におけるガンの可塑性の影響について研究する	フランソワ・ラブレ研究所 (リヨン大学)
Q ライフ	細胞核のダイナミックな構造、細胞膜の構造、細胞間の伝達を主要テーマとする	パリ科学・人文学拠点 (PSL)
ビッグデータ	複数の大学、グランゼコール、企業がコンソーシアムを形成し、ビッグデータに、数学、情報科学や人文社会 (法、社会、倫理、ビジネスマネジメント) と技術移転の観点から取り組む	パリ・サクレ大学
都市	全地球的变化という文脈における都市空間の脆弱性とダイナミズム、人間中心の都市化による環境、新しい政府と職業、歴史と都市の知の科学論などについて研究する	リヨン大学

出典：関連ウェブサイトをもとに CRDS で作成

上記表の一番上にある「チューリングと生命体」プロジェクトの詳細を見てみると、主幹機関はエックス・マルセイユ大学 (AMU) で、パートナー機関は国立科学研究センター (CNRS) と INSERM (国立保健医学研究所) となっている。生命体の起源の複雑性を多分野横断的なアプローチから研究・探求することを目的とし、AMU のルミナリーキャンパス内の 48 の研究グループを結集したプロジェクトである。研究グループは、バイオ、物理、情報科学、数学、複数のプラットフォームから成り、約 120 名以上の研究員 (研究者、エンジニア、博士課程、ポスドクを含む) を 10 年間新規雇用することを可能にしている。研究資金として、ANR からの資金と A\*MIDEX 基金 (プロジェクト主幹大学であるエックス・マルセイユ大学の学内競争資金) から併せて約 2,000 万ユーロの配分を受ける。本プロジェクトでは大学院の創設も援助し、バイオや物理、バイオコンピューティングに関する修士と博士を多分野横断的なネットワークをもって養成する。研究者、学生、エンジニアなどの新しい才能を惹きつけ、ルミナリーキャンパスがバイオシステムに関する多分野横断研究の国際的発信力を身に着けることを目指している。

### 3.2.6 EU

ここまで国単位でプログラム事例を見てきたが、欧州では各国レベルの政策と補完的に連携しながら、EU レベルで取り組む方が効果的な事業は EU が主体的に担っている。科学研究の分野もその例外ではない。EU では多年次にわたる科学技術イノベーションの研究助成制度として、フレームワークプログラムが実施されているが、Horizon 2020 (2014 ~ 2020 年の 7 年間、総額約 750 億ユーロ) 下の施策では、意図的に分野の融合を図っているものがある。

例えば Horizon 2020 を構成する 3 つの柱のうち第一の柱の「卓越した科学」には、ERC (欧州研究会議) というファンディング・スキームがある。その総額は約 250 億ユーロであり、プロジェクトの選考基準を唯一「科学的エクセレンス」とのみ定め、学際・新興分野の最先端研究分野を支援する。助成する側から研究テーマを与えることはない。ERC では、自然科学から社会科学に至るまで幅広い分野が助成対象となっている。

ERC の助成金は 5 種類あり、そのうちのひとつが「シナジー助成金 (Synergy Grants)」と呼ばれるものである。このシナジー助成金では、異なる専門知識を持つ研究者 (PI) 2 ~ 4 名のグループが集まって野心的な研究課題に取り組むことを支援し、6 年間で最高 1,000 万ユーロが支給される。同助成金は、異なる分野が相乗効果を発揮し、新しい発見や新しい成果をもたらすことを期待するものである。シナジー助成金は 2012 年および 2013 年に公募がパイロット的に実施され、2018 年から本格的に開始した。2013 年に採択されたプロジェクト数は 13 件ある。そのうちのいくつかの例を以下の表で示す。

表 3-2-13 シナジー助成金 (2013 年) で採択されたプロジェクト例

プロジェクト名	PI 名	国籍	所属機関
北極海氷およびグリーンランド氷床のセンシティブティ	Eystein Jansen ※研究責任者	ノルウェー	ベルゲン大学
	Kerim Nisancioglu	ノルウェー	ベルゲン大学
	Jens Christensen	デンマーク	デンマーク気象研究所
	Bo Møllersøe Vinther	デンマーク	コペンハーゲン大学
生命、地球システム、社会におけるリン元素の制約の影響	Josep Penuelas ※研究責任者	スペイン	環境研究・森林応用センター
	Michael Obersteiner	オーストリア	応用システム分析国際研究所
	Ivan Janssens	ベルギー	アントワープ大学
	Philippe Ciais	フランス	ヴェルサイユ・サン・カンタン・アン・イヴ・リーヌ大学
有機無機ハイブリッド界面におけるスピン - 電荷変換とスピнкаロリトロニクス (spin caloritronics)	Henning Sirringhaus ※研究責任者	英国	ケンブリッジ大学
	Joerg Wunderlich	英国	日立製作所 Hitachi Europe Ltd.
	Jairo Sinova	ドイツ	ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ
	Iain McCulloch	英国	インペリアル・カレッジ・ロンドン
境界を越えて: 宗教、地域、言語、国家	Michael Willis ※研究責任者	英国	英国博物館
	Sam Julius van Schaik	英国	英国図書館委員会
	Nathan Hill	英国	ロンドン大学東洋アフリカ研究学院

出典: 関連ウェブサイトをもとに CRDS で作成

#### Reference

- ERC 公式ウェブサイト

## 本章の最後に

本章 3.2 では、海外の主要な公的ファンディング機関における分野融合や学際研究の促進に関するプログラムを取り上げた。紹介した各プログラムにおける「融合」の趣旨は、①科学的課題または社会的課題の解決・達成に向け知を融合しようとするもの、②分野融合そのものを促進して新たな科学を創出しようとするもの、の 2 つに大別される。それをまとめたものが以下の表である。米国 NSF のビッグアイデアでは①と②の両方の側面からコンバージェンス研究を支援している。①に当てはまるのは英国 UKRI の学際型研究プログラムとフランス ANR のコンバージェンス・インスティテュート、また②に該当するのは、中国 NSFC の重点項目・重大項目、重大研究計画の 3 プログラム、ドイツ DFG の優先プログラム、欧州 ERC のシナジー助成金になる。

課題解決に向けた融合	分野融合自体の促進
<ul style="list-style-type: none"><li>・米 NSF：ビッグアイデア - 研究アイデア</li><li>・英 UKRI：学際型研究プログラム</li><li>・仏 ANR：コンバージェンス・インスティテュート</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・米 NSF：ビッグアイデア - コンバージェンス研究の拡大</li><li>・中 NSFC：重点項目、重大項目、重大研究計画</li><li>・独 DFG：優先プログラム</li><li>・欧 ERC：シナジー助成金</li></ul>

異分野融合や学際研究の取り組み自体は必ずしも新しいものではないが、各国の主要な公的ファンディング機関では近年、融合をハイライトしたプログラムが立ち上がってきている。その文脈や注目点はどこにあり、誰がどのようにプログラムの目的を設定し課題を決めているのか、評価をどのように行っているのか等、示唆に富むヒントを海外の事例に見ることができる。



## ■ 作成メンバー ■

永野 智己 (監修・編著)  
福島 俊一 (複雑社会における人間の意思決定を支える情報科学技術)  
坂内 悟、尾山 宏次、辻 真博 (データ収集・活用を通じた社会課題解決に向けた研究開発)  
大平 竜也 (サイバーフィジカルシステム (デジタルツイン) を用いた次世代設計・製造技術)  
茂木 強、馬場 寿夫 (これからのロボティクス)  
宮下 哲、島津 博基 (データ駆動型研究開発)  
堀 邦夫 (生命現象に迫る革新計測技術)  
山本 秀明、桑原 明日香 (バイオ生産システム)  
中村 亮二 (水・エネルギー・食料問題の統合的解決のためのネクサス・アプローチ)  
関根 泰、中村 亮二 (物質・資源循環システム)  
永野 智己、松田 一夫 (分離工学)  
荒岡 礼 (バイオ材料工学)  
島津 博基、永野 智己 (研究システム・ラボ改革、R&D インフラ・リソースのプラットフォーム)  
津田 憂子、新田 英之、澤田 朋子、周 少丹、富田 英美、中川 尚志、長谷川 貴之、八木岡 しおり  
(国内外の制度・プログラム)  
小松崎 美奈、根上 純子、堀内 正隆 (構成)  
中山 智弘 (企画・構想)

※お問い合わせは下記までお願いいたします。

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) －

平成 30 年 8 月 August, 2018 初版発行

令和 元 年10月 October, 2019 第 2 版発行

ISBN 978-4-88890-603-6

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

電 話 03-5214-7481

E mail crds@jst.go.jp

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

©2019 JST/CRDS

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。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-603-6

