

外交・安全保障調査研究事業費補助金（調査研究事業）
「我が国の経済安全保障・国家安全保障の
未来を左右する新興技術」
中間報告書

令和3年3月

公益財団法人 未来工学研究所

目 次

1. はじめに	1
2. 令和2年度作業の目的と構成	3
3. 初年度の調査研究の内容と成果	4
3.1 現時点での合成生物学研究の特徴に関する俯瞰的な理解と整理.....	4
3.1.1 合成生物学の定義.....	4
3.1.2 合成生物学の成り立ちと合成生物学のアプローチ.....	10
3.1.3 合成生物学の特徴、期待されるメリット等.....	15
3.1.4 米欧中における合成生物学研究の特徴、代表的な事例等.....	18
3.1.5 日本の合成生物学研究の取組みの現状と問題点.....	40
3.2 現時点でのニューロテクノロジー研究の特徴に関する俯瞰的な理解と整理.....	47
3.2.1 ニューロテクノロジーの定義.....	47
3.2.2 ニューロテクノロジーの特徴、期待されるメリット.....	49
3.2.3 米欧中におけるニューロテクノロジー応用研究の特徴、代表的な事例等.....	57
3.2.4 日本のニューロテクノロジー研究の取組みの現状と問題点.....	74
4. 次年度調査研究の取組み	83

1. はじめに

世界経済フォーラムは 2006 年以降、毎年 1 月の年次総会（通称ダボス会議）にて世界全体が直面するリスクを分析・評価した報告書『The Global Risks Report』を発表しているが、2017 年に発表された『The Global Risks Report 2017 12th Edition』では、約 750 名の世界各国の専門家・政策決定者へのアンケートを基にした第 4 次産業革命に伴う各種新興技術の発展が及ぼすグローバルリスクに関する調査・分析結果を公開した。

同報告書では、第 4 次産業革命で鍵を握る新興技術として、3D プリンタ、AI・ロボティクス、バイオテクノロジー（遺伝子工学、合成生物学等）、IoT、ニューロテクノロジー、新しいコンピューティング技術（量子コンピューティング、生物学的コンピューティング等）等、12 の技術を挙げた。さらにこれらの技術のうち、「AI・ロボティクス」及び「バイオテクノロジー」が、他の新興技術と比較して、便益のレベルと負の影響のレベルがともに際立って大きく、これらの技術が、将来、人類の発展にとって大きく貢献すると認識される一方、人類の将来に大きなリスクを与えるとの見方を示している。

中でも「バイオテクノロジー」のうち、合成生物学（実際には自然界に存在しない生物構成要素や生物系を設計し製造する、または、現存する生物系を再設計し製造する学問）に関する研究が大きく注目されている。事実、合成生物学により人類・社会が享受できる潜在的な便益は、病気の治療や創薬の発展だけではなく、有用化学物質の生産効率化、農産物の増産等、測りしれないものがある。

合成生物学研究は米国と欧州が先導し、産業化やビジネス化に向けた研究開発が大きく進んでいる。中国においても国家科学技術戦略「中国科学技術イノベーション第 13 次五カ年計画」において合成生物学を重要技術と位置づけ、当該研究に注力し、大々的に投資している。我が国でも合成生物学のベンチャー企業が生まれつつあるが、日本における合成生物学研究は、国から戦略的な支援を受けておらず、欧米及び中国と比較して大きく遅れている。

一方、AI 研究に関連して、ニューロテクノロジーに関する研究が、飛躍的な進歩を遂げている。ニューロテクノロジーは、脳の仕組みを理解するための研究分野である「ニューロサイエンス（神経科学）」の成果を応用した、脳内の意識、思考、高次活動の様々な側面に根本的な影響を与える技術、脳機能の改善や修復を目的とした技術等、幅広い領域の技術を意味するものである。「ニューロサイエンス」に関する研究は、2013 年に米国で開始された、脳の働きの全容を解明することを目指す「ブレイン・イニシアチブ (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies Initiative)」により大きな進歩を遂げ、その成果を利用して、神経学的障害を有する人々の感覚や運動機能の改善等を目的とするニューロテクノロジーの領域に関する研究が盛んに実施されている。

ニューロテクノロジーに関する研究は米国が抜きん出ている。EU も、2013 年から、テクノロジーを利用して脳をシミュレーションし、その働きを理解することを目的とする「ヒューマン・ブレイン・プロジェクト (Human Brain Project)」を推進し、その応用としてニューロテクノロジー研究を進めているが、最近、中国がこの分野を重点研究分野として大きな投資を行っている。我が国でも、人間の脳機能についての理解を格段に高め、知的

機能をもつ先端技術を開発することを目的として、異分野融合により脳情報科学の研究を進めているが、欧米や中国と比較すると、この分野における日本の研究の規模は決して大きくはない。

新興技術である合成生物学やニューロテクノロジーは、今後人類にとり極めて有益な技術であり、新産業としても鍵を握る分野であるが、残念ながら、我が国は欧米中のように、合成生物学およびニューロテクノロジーに関する研究を戦略的に扱ってこなかったことから、欧米中の後塵を拝している状況にある。

一方、軍事分野でも、合成生物学及びニューロテクノロジー研究が進んでいる。米国では、陸軍が、合成生物学を最優先の研究領域の一つとして、この分野の研究を加速させている。米陸軍研究所（ARL）は、長年、生物学を研究する義務を負っていたが、2019年4月にARLは、合成生物学研究をトップ10の優先研究事項の1つに引き上げたとされている。また、ニューロテクノロジー分野においては、米国防高等研究計画（DARPA）で、人の脳にチップを埋め込むことなく、脳の働きのみで、コンピュータを介さず、直接、ドローンや最新の戦闘機などを操作することを目的とした先進的な研究も進められている。中国では軍民融合により、新興科学技術の軍事分野への適用に関する研究開発を加速させており、その重点分野に合成生物学とニューロテクノロジーが含まれているが、我が国では、合成生物学およびニューロテクノロジーの軍用研究が意味することについて議論される状況すらない。

このように、民用および軍用の合成生物学やニューロテクノロジー研究が米国や中国を中心として加速するなか、我が国としては、今後、米中外交政策の一環として、両分野の研究開発の発展が、我が国の経済安全保障及び国家安全保障に及ぼす影響について分析し、理解しておくことが必要である。

本報告書は、以上の問題意識を踏まえて、（公財）未来工学研究所が実施する3年間の調査研究事業「我が国の経済安全保障・国家安全保障の未来を左右する新興技術」の初年度の調査研究で得られた成果等について、中間報告書の形としてまとめたものである。

本調査研究事業は、以下のメンバーによって実施した。

【主査】	多田 浩之	未来工学研究所政策調査分析センター主席研究員
【メンバー】	伊藤和歌子	未来工学研究所政策調査分析センター主任研究員
	山本 智史	未来工学研究所政策調査分析センター研究員

なお、本報告書の執筆に当たっては、下記の有識者のご支援を得た。御礼申し上げます。

- ・ 相澤 康則 東京工業大学准教授（本報告書 3.1.5 項「日本の合成生物学研究の取組みの現状と問題点」の部分）
- ・ 茨木 拓也 株式会社NTTデータ経営研究所 ニューロイノベーションユニット アソシエイトパートナー（本報告書 3.2.4 項「日本のニューロテクノロジー研究の取組みの現状と問題点」の部分）

2. 令和 2 年度作業の目的と構成

(1) 作業の目的

これまで、新興技術としての合成生物学やニューロテクノロジーの技術的な背景や特徴、研究の構成等について俯瞰的に理解することができる文献・資料は殆ど発行されていない。

これを踏まえて、令和 2 年度は、初年度の作業として、民利用を中心とした、合成生物学に関する研究とニューロテクノロジーに関する研究の特徴を俯瞰的に理解し、整理することを目的とする。

(2) 作業の構成

本年度は、以上の目的を踏まえて、両新興技術の定義、民利用を中心とした技術の特徴、期待されるメリット、米欧中における研究の特徴・事例、日本における研究の現状・課題等に焦点を置いて調査した。

本年度の報告書の構成は次のとおりである。

1) 第 3 章（初年度の調査研究の内容と成果）

現時点で把握・理解している、民利用を中心とした両技術の特徴・メリット、米欧中における先進的研究の状況、日本における研究の現状・課題等について整理した。

2) 第 4 章（次年度調査研究の取組み）

本年度の調査研究の成果を踏まえた、令和 3 年度における調査研究の狙いと計画の骨子を整理した。

3. 初年度の調査研究の内容と成果

本章では、現時点で把握・理解している、新興技術としての合成生物学とニューロテクノロジーの特徴、民利用を中心とした両技術に関する米欧中における先進的な研究の状況や事例、両技術に関する国内の研究の課題等について整理する。

3.1 現時点での合成生物学研究の特徴に関する俯瞰的な理解と整理

3.1.1 合成生物学の定義

合成生物学は、生体の改変や創造を可能にするバイオテクノロジーにおける、一連の概念、アプローチおよびツールを意味するが、合成生物学の定義については、未だに普遍的に合意されたものは無い。

表 3-1 は、研究機関等における合成生物学の定義を示したものである。これからわかるように、合成生物学の定義は、専門性や適用分野によって異なり、合成生物学に関して一般的に認められた定義が存在するわけではない。

日本の場合、合成生物学の捉え方は欧米とは異なる。日本の場合は、「つくる」というボトムアップ型のアプローチをとることによって、生命システムの本質の理解を目指す基礎生物学が主流であり、伝統的に酵素を使用する発酵学が進んでいることから、合成生物学を「代謝工学」として捉えられている研究者も多い。

欧米では、合成生物学を、化学、生物学、コンピュータ科学および工学の進歩を融合させて、生命システムを改変・改造・創造することで有用なツールを生み出そうとする応用分野と捉えられている。

表 3-1 合成生物学に関する研究機関、プログラム等による「合成生物学」の定義の例
(文献¹より一部抜粋・編集)

国名	カテゴリ	機関、プログラム等	合成生物学の定義
日本	大学	東京工業大学 生命理工学院機能性 RNA 研究部門	<ul style="list-style-type: none"> 進化の過程で生まれてきた生物のシステムを利用して、何かものを創ること。生物を創ることによって生命のシステムを理解すること。 合成生物学は、前時代の「観察重視の生物学」を超越した 21 世紀型の学際分野であり、SDGs の基盤となる新価値を創造する工学的生物学として多くの新産業を創出する方法論を生み出し続けている。
日本	大学	東京理科大学 総合研究院 合成生物学研究部門	<ul style="list-style-type: none"> 人工細胞や DNA 合成を通じて生命の動作原理を解明する学問。
日本	大学	早稲田大学理工学術院 先進理工学部	<ul style="list-style-type: none"> つくることを研究手段とする生物学、生物工学

¹ (公財) 未来工学研究所、「日欧米中の合成生物学のリスクの考え方とリスクアセスメントの取組みに関する調査研究」、一般財団法人新技術振興渡辺記念会「令和元年度科学技術調査研究助成」報告書、2020 年 9 月

国名	カテゴリ	機関、プログラム等	合成生物学の定義
			学。
日本	大学	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカル情報生命専攻 生命分子遺伝学分野	<ul style="list-style-type: none"> 生命のしくみを再設計したり、再構築することを通じて、十分性の観点から生命のしくみについてより深く理解したり、応用しようとしたりする研究アプローチ。
日本	科学専門誌	日経バイオテク	<ul style="list-style-type: none"> 組織、細胞、遺伝子といった生物の構成要素を部品と見なし、それらを組み合わせて生命機能を人工的に設計したり、人工の生物システムを構築したりする学問分野。
米国	大統領諮問委員会	United States Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues	<ul style="list-style-type: none"> 生物学に標準化された工学技術を適用し、それによって無数のニーズに対応するために、新しい機能や特殊な機能を持つ生物や生物システムを作り出すことを目的とするもの。 標準的な生物学は、生物の構造や化学を、理解し説明されるべき自然現象として扱うのに対し、合成生物学では、生化学的なプロセス、分子および構造を、それらの自然な役割とは無関係に、新規性や潜在的に有用性のある方法で使用される原材料や道具として扱う。
米国	学術機関	National Research Council	<ul style="list-style-type: none"> 生物学システムの設計に、より大きなスピード、費用対効果および予測可能性を提供しようとするもの。 この分野では、遺伝子を DNA の「部品」に落とし込み、それらを組み合わせて生きた細胞に望ましい機能を構築する方法を理解するために、工学の原理を応用する。
米国	国立研究所	Lawrence Berkeley National Laboratory	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子工学を再定義するもの。 <ul style="list-style-type: none"> これまでの遺伝子工学は、クローニングベクターと呼ばれる遺伝子のキャリアと遺伝子を繋げることをコンビナント・テクノロジー、あるいは、遺伝子工学と呼んでいた。その後、遺伝子工学が複雑になり、生物自体の生理的作用を変えることができるようになってきたので、その再定義が行われるようになってきたと解釈している。 「DNA を使った新しい工学分野」という定義もあり得る。
米国	国立研究所	National Human Genome Research Institute (NHGRI)	<ul style="list-style-type: none"> 生物に新しい能力を持たせるように改変することにより、生物を有用な目的のために再設計することを含んだ科学分野。
米国	大学	Department of Biological Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT)	<ul style="list-style-type: none"> 研究者が新しい生物学的システムを構築し、既存の生物学的システムを再設計する新たな研究分野。
米国	大学研究所	Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University	<ul style="list-style-type: none"> 20 世紀後半に発展した分子生物学、生化学、その後発展したゲノム科学、オミックス科

国名	カテゴリ	機関、プログラム等	合成生物学の定義
			<p>学等の多様な生物学の知見を基にして、生命システム（遺伝子ネットワーク、細胞、個体等）そのものの改変あるいは創出を目的に研究する分野。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 広義の合成生物学は、以下の 2 つの側面をもっている。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 「つくる」、すなわちボトムアップ型アプローチをとることによって、生命システムの本質の理解を目指す基礎生物学分野（日本ではこちらが主流） ➤ 生命システムを改変・改造・創造することで有用なツール（最終製品としてのツール、製品を生み出すプロセスで必要となるツール等）を生み出そうとする応用分野（米国ではこちらが主流）
米国	研究コンソーシアム	Engineering Biology Research Consortium (EBRC)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 化学、生物学、コンピュータ科学および工学の進歩を融合させたものであり、これまでよりも速く、より安く、より高い精度でアイデアから製品へと移行することを可能にしている。合成生物学は、抽象化、標準化、自動化された構造を利用して、生物学をベースとした「ツールキット」と考えることもできる。 ・ より専門的には、「酵素、遺伝子回路、細胞などの新しい生物学的実体を設計・構築すること、あるいは、既存の生物学的システムを再設計する」もの。
米国	業界団体	Bio Industry Organization (BIO)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生物学への工学的原理の適用を含む、新しい学際的領域。自然界には存在しない生物学的コンポーネントとシステムの（再）設計と製造を目的とするもの。
米国	学術機関	United States Committee on Future Biotechnology Products	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生きている細胞に望ましい機能を構築するうえで、いかにして遺伝子のパーツを組み合わせることができるかという観点から、遺伝子のパーツについて理解できるようにするために、遺伝子を DNA の「パーツ」として扱う工学的原理を応用すること。
米国	NPO (STEM教育の強化を目的とする)	BioBuilder	<ul style="list-style-type: none"> ・ 合成生物学は、生物学の教科書で学んだ事実と、工学の真の原理を組み合わせ、有用な生体システムを作ったり、モデル化したりすることができる。
EU	政府諮問機関	EC Scientific Committees	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生物の遺伝素材の設計、製造および改変を促進・加速するために、科学、技術および工学を応用すること。
EU	R&D フレームワークプログラム	SMART ⁺ map (RoadMAPs to Societal Mobilisation for the Advancement of Responsible	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産業や生物学の研究への応用を向上するための生物学的システムと生物の人工的な設計とエンジニアリング。生物学的および有機材料

国名	カテゴリ	機関、プログラム等	合成生物学の定義
		Industrial Technologies) ² / Horizon 2020 Programme	を代替または編集して、有機分子と物質を合成的に創出すること。
英国	学術機関	United Kingdom Royal Academy of Engineering	<ul style="list-style-type: none"> 既存の自然な生物学的システムを再設計するとともに、生物学に基づいた部品、新規デバイスおよびシステムを設計し、技術開発を行うことを目的とするもの。
英国	大学、研究センター	Manchester Institute of Biotechnology at the University of Manchester	<ul style="list-style-type: none"> Industrial Biotechnology 2.0 といえるもの。 これまでの生物学、工学、化学等の決められた枠組みを超えて、研究者の創造的な想像力によって推進される。
英国	研究センター、大学	Manchester Institute for Innovation Research at the Alliance Manchester Business School	<ul style="list-style-type: none"> 合成生物学は、遺伝子工学から機械工学、情報科学に至るまで様々な分野の原理や性質を利用している。生物学、工学および情報技術の体系的な組み合わせの学問である。 生物学は伝統的に「発見」の学問であり、工学は既存の装置やシステムの上に積み重ねるものである。合成生物学は、これらのアプローチが統合され、情報技術によって促進された新しい学問分野であり、必然的に収束した学問分野となる。
英国	研究センター	SynbiCITE	<ul style="list-style-type: none"> 工学的生物学テクノロジーを包含し、生物学に基づく部品、デバイスおよびまったく新しい生物学的システムの設計と構築、あるいは、既存の生物学的システムをリエンジニアリングするもの。
ドイツ	オープンな研究会	German Association for Synthetic Biology (GASB)	<ul style="list-style-type: none"> 生物学と工学のインターフェースにおける若い研究分野。我々の知識を拡大し、有用な製品を生産するための新しい機能を備えた生物学的システムを設計および構築することを目的とする。
中国	研究界	中国の合成生物学研究者 (Lizhong Liu, Chenli Liu, Guoping Zhao, Xianen Zhang, Zixin Deng 等)	<ul style="list-style-type: none"> “知識のための創造、利用のための創造”または“知識の構築、利用方法の構築”(合成生物学に関する中国語での格言的な定義) → 生物学的システムの構築を通して生命を理解すること。
国際	国際機関	Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)	<ul style="list-style-type: none"> 何十年にもわたるバイオテクノロジー研究が大量市場への応用という形で成果を上げることができるように、バイオテクノロジーに工学的な標準化をもたらす試み。
国際	国際機関	United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝物質、生物および生体系の理解、設計、再設計、製造や改変を容易にし、加速するために、科学、技術および工学を組み合わせ、現代バイオテクノロジーの更なる発展と新しい次元となるもの。

² Horizon 2020 プログラムによりファンディングされた、責任ある研究・イノベーション (Responsible Research and Innovation: RRI) に関するプロジェクトの一つ。

国名	カテゴリ	機関、プログラム等	合成生物学の定義
国際	国際会議	Thirteenth meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity (COP 13)	・ 科学・技術・工学が結合した、遺伝資源・生存生物・生態系に対する理解・デザイン・再デザイン・製造・改変に関するモダンバイオテクノロジーの更なる開発と新規領域。
その他	科学専門誌	Nature Research	・ 新しい生物学的部品、デバイスおよびシステムの設計と構築、ならびに、有用利用を目的とした既存の天然の生物学的システムを再設計すること。

現在、合成生物学に関して広く使われているとされる定義は、米国の工学生物研究コンソーシアム（Engineering Biology Research Consortium：以下 EBRC）の定義である「酵素、遺伝子回路、細胞などの新しい生物学的実体を設計・構築すること、あるいは、既存の生物学的システムを再設計すること」³であるが、表 3-2 に示したように、生物学的、化学的および工学的な観点によって合成生物学の捉え方が異なる。

表 3-2 生物学的、化学的および工学的な観点による合成生物学の捉え方の相違⁴

学問	合成生物学の捉え方
生物学	生物学者にとって、合成生物学的システムを設計・構築する能力は、天然の生物学的システムに関する現在の理解を検証するための、直接的で説得力のある方法を提供するもの ⁵ 。
化学	合成生物学は、様々な用途のための新規分子や分子システムを製造するためのツール ⁶ 。
工学	工学者にとって生物学は技術である。合成生物学は、これまでの遺伝子工学の研究成果を基に、バイオテクノロジーの応用範囲を拡大し、工学的生物学的システムの設計・構築を容易にする基盤技術の開発に重点を置きつつ、それらを組み合わせる方法を追求めるもの ⁷ 。

このような違いは、合成生物学が、どの程度、従来の遺伝子工学（genetic engineering）の延長線上にあるものなのか、それとも新しいものなのかという考え方や人の健康や環境へのリスクについての考え方にも影響を与える可能性がある。

生物学的、化学的あるいは工学的な観点により、合成生物学の捉え方に相違が認められるものの、合成生物学には以下のような特徴がある。

- ・ 生物学的プロセスを設計し、コンパートメント化するために、標準化やモジュール化

³ Amy K. Wolfe, Maria Fernanda Campa, Rachael A. Bergmann, Savannah C. Stelling, David J. Bjornstad, and Barry L. Shumpert, “Synthetic biology R&D risks: social- institutional contexts matter,” Trends in Biotechnology, Vol. 34, No.5, February 2016.

⁴ Ibid.

⁵ Endy, D., “Foundations for engineering biology,” Nature 438, 2005.

⁶ Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, “New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies,” White May 2010.

⁷ Coordinated framework for the regulation of biotechnology, 51 Fed. Reg. 23302, June 1986.

などの工学的原理を応用すること。

- ・ 改変の規模が大きく、長い鎖状の DNA や代謝経路の挿入・交換を伴うことが多いこと。
- ・ 毎年開催される iGEM (International Genetically Engineered Machine Competition) 世界大会を通じて、学生や科学の専門家ではない人たちをも巻き込む大規模で明示的な取組みを行っていること。

生物システムを創る研究は、図 3-1 に示すように、①既存の生物システムを改変していくトップダウン型と、②部品を集め、試験管の中で人工の生命を創っていくボトムアップ型の 2 つのアプローチがあるが、日本の研究者は、②のボトムアップ型のアプローチを好む傾向にある。

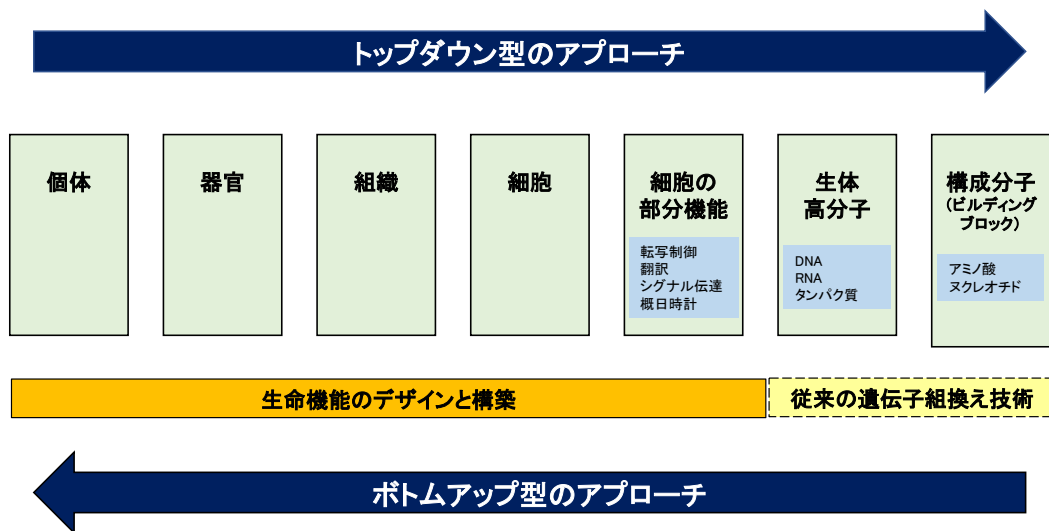


図 3-1 生物システムを創る研究における 2 つのアプローチ
(資料⁸を参考として未来工学研究所作成・一部加筆)

国際的には、合成生物学は、トップダウン型の産業応用を前提とした「バイオエンジニアリング」と位置付けられており、「Engineering Biology」という用語が使用されることが多く、従来の生物学とは異なってきている。合成生物学は、今後ビジネスや産業として発展することが見えている研究分野であり、資金をどれだけ投入できるかという国際的な競争になっている。欧米では、合成生物学の産業利用に関連する技術的課題に焦点を置き、バイオエコノミー（バイオエンジニアリングを活用した経済活動）戦略の一環として、合成生物学に関するベンチャーが数多く生まれ、中国では国家戦略として莫大な資金を合成生物学研究に投資しているなかで、日本では、まだ、合成生物学を産業化するという意識

⁸ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター、「Benchmarking Report on Synthetic Biology、特定課題ベンチマーク報告書「合成生物学」、CRDS-FY2009-GR-02、平成 22 年 3 月

が薄い⁹。

3.1.2 合成生物学の成り立ちと合成生物学のアプローチ

2000年1月、遺伝子トグルスイッチ（二安定状態スイッチ（Bistable Switch）¹⁰と体内時計（Repressilator（リプレッシレーター）¹¹）について記述した、2つの論文^{12,13}が発表されたが、これらの論文が今日の合成生物学への展開のきっかけになった¹⁴とされる。

これらの論文で研究された遺伝子トグルスイッチおよび体内時計はともに、同じ遺伝子、プロモーター¹⁵およびタンパク質を異なる構成で繋いだ回路から作成されたものであり、標準化したコンポーネントを使用して生物学的システムに高度な機能を工学的に組み込むことの実現可能性と予測可能性を示した。合成生物学のこのコアコンセプトは、生体システムのエンジニアリングを加速・強化するうえで、部品、システムおよび設計ツールを標準化することの重要性を実証するものであった。

合成生物学は、遺伝子組換えのスケープと規模を拡大させる、幅広い技術・手法・概念を網羅するまでに成長してきた。これらの技術や手法の多くは、遺伝子工学から発展したものであり、以下が含まれる¹⁶。

- ・ 遺伝子パーツ／遺伝回路ライブラリおよび遺伝子組換え方法
- ・ ミニマルセルと宿主（シャーシ）¹⁷
- ・ プロトセル¹⁸と人工細胞
- ・ 非天然生物学（ゼノバイオロジー）
- ・ DNA合成とゲノム編集
- ・ 市民の科学（DIY（Do It Yourself）バイオ¹⁹等）

⁹ 国内大学の合成生物学研究者へのヒアリングによる。

¹⁰ 外部入力によって平衡点をスイッチングすることが可能。

¹¹ 「ある遺伝子が次の遺伝子の発現を抑制する」セットが3つつながり、ループ構造を形成した、転写抑制活性のみでできている回路。一定の周期を持つ安定した自律振動が可能であると考えられている。

¹² T. S. Gardner and et al., “Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*,” *Nature* 403, 339-342, 2000.

¹³ M. B. Elowitz, “Synthetic Oscillatory Network of Transcriptional Regulators,” *Nature* 403, 335-338, 2000.

¹⁴ EC Scientific Committees, “Opinion on Synthetic Biology II: Risk assessment methodologies and safety aspect,” 2015.

¹⁵ DNAにおける転写制御を担う領域。転写調節因子群の働きにより、転写基本因子群とRNAポリメラーゼがプロモーター上に転写開始複合体を形成し、転写が開始される。特にmRNAの転写は、それぞれの細胞において発現させる遺伝子を選択し、また、遺伝子の発現量を規定する重要なステップであるため、プロモーターにおける転写制御は生命現象の中心的な反応である。

¹⁶ EC Scientific Committees, “Opinion on Synthetic Biology II: Risk assessment methodologies and safety aspect,” 2015.

¹⁷ 遺伝子組換え等を実施する際に、目的とする遺伝子を取り込み、増やすための生物（合成生物学では大腸菌や酵母が良く利用される）

¹⁸ 非生物成分の凝集から形成された、生きていない細胞の前駆体（原始細胞）のこと。非生物であるにもかかわらず、生体細胞に似た特性を示す。

¹⁹ 自己流生物学。

表 3-3 は、上記した現在の合成生物学の主な手法の概要である。

表 3-3 合成生物学の主な手法の概要（文献^{20,21}を基に未来工学研究所編集）

合成生物学の手法	概要
遺伝子パーツ／遺伝回路ライブラリおよび DNA 改変	<ul style="list-style-type: none"> 複雑で人工的な遺伝学的システムの設計は、① データベースにあるゲノムや遺伝子データの利用可能性、② より標準化され、改良された DNA 改変技術、③ DNA 改変株を測定・選択するための高度なツールやリソース、④ 複雑な遺伝学的システムを設計するための計算・分析ツール、⑤ 最先端の遺伝子工学技術への公的・民間投資の拡大など、多くの技術的要因によって推進されてきた。 人工的に設計された遺伝システムは、数十の DNA パーツによって構成される。この複雑な遺伝システムを設計するために「遺伝子パーツライブラリ」と呼ばれる遺伝要素の電子的・物理的貯蔵庫がある。これは、迅速な探索、検索や新規に設計された遺伝システムへの組み込みを加速するもので、特徴づけられた性質や機能を持った遺伝子と DNA 断片を含有する。
ミニマルセルと宿主（シャーシ）	<ul style="list-style-type: none"> ミニマルセルは最小限の要素から構成された細胞であり、ミニマルセルと宿主（デザイナーシャーシ（design chassis））は、工業用微生物の構築のための代替的なアプローチである。このアプローチは、最小ゲノムの概念（基本的な生命を支えるために必要な遺伝子の最小数）が含まれる。 この目的は、細胞への代謝負荷を最小限に抑えることであり、残りの細胞エネルギーを工業化学品や医薬品などの所望の工業製品の製造に向けることができるようにすることである。合成 DNA 回路またはゲノムから生物学的合成をサポートするために必要な構成要素の数を最小限にすることは、機能の制御を単純化することにもなる。
プロトセルと人工細胞	<ul style="list-style-type: none"> プロトセル研究は、新しい生物学的システムを「ボトムアップ」から厳密に工学的に構築し、化学的・物理的プロセスを用いて、生きていなかった物質のみを原料として、新しいシンプルな形態の生命システムを構築しようとする学問領域であり、最終的には自律複製する人工細胞を作ることを目的としている。
非天然生物学（ゼノバイオロジー）	<ul style="list-style-type: none"> 非天然生物学（ゼノバイオロジー（Xenobiology））は、非標準的の生化学系（ゼノ核酸、非標準アミノ酸等）や代替の塩基対、代替の遺伝暗号等を使って生物システムをデザインし、工学的に作り出すようとする合成生物学の領域の一部である。その目的は、生命の起源に関する理解を深めること、有用機能を持ち経済的に注目される改変生物や物質を作ること、および

²⁰ 平成 28 年度国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託事業、“植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発 遺伝子組換え生物等の閉鎖系使用に係る規制のあり方に関する検討”、一般財団法人バイオインダストリー協会、平成 29 年 3 月

²¹ EC Scientific Committees, “Opinion on Synthetic Biology II: Risk assessment methodologies and safety aspect,” 2015.

合成生物学の手法	概要
	水平伝達による遺伝子組換え体からの遺伝子拡散を防ぐための、新しいタイプの生物学的封じ込めを実現することにある。
DNA 合成とゲノム編集	<ul style="list-style-type: none"> 長鎖 DNA の合成技術およびアセンブル技術の進展や CRISPR/Cas9 システム、人工ヌクレアーゼ等に代表される新しいゲノム編集技術によって、既存のゲノム内で標的とする遺伝子組換えを迅速に行うことが可能になった。これらの技術により、広範囲の高等生物（植物、動物）に適用することができ、その遺伝子組換えのスピードを大幅に加速し、非モデル生物²²の改変を容易に行うことができるようになった。この改変スピードの向上や多重改変技術の開発等によって、リスクアセスメントが難しくなる可能性がある。
市民の科学（自己流バイオ等）	<ul style="list-style-type: none"> 合成生物学が発展するにつれて、その方法や設備、技術はより安価、簡便で使いやすくなってきており、生命科学に関して正式なトレーニングを受けたことがない DIY 生物学者が合成生物学に強い好奇心を持っている²³。 市民科学コミュニティの性質上、DIY 生物学者らが合成生物学専門家コミュニティの行動規範で義務づけられているリスクアセスメントやバイオセーフティを遵守しないのではないかと懸念があるが、正式なコミュニティに属する DIY 生物学者らはバイオセーフティの問題に配慮しているようである。

合成生物学と遺伝子工学間の決定的な違いは、オリジナルの生物システムに対して加えようとする変化のスケールが全く異なることである。遺伝子工学者は、ある特定のシステムを研究するために、通常、1つか2つの小さな変化を導入する。一方、合成生物学者は、新しいゲノムの設計や既存のゲノムの再構築を研究の目標とするため、大きな変化を導入する。合成生物学者は、自身の意図する従来の生物システムの機能を凌駕する機能、あるいは、従来の生物システムには無い特殊な機能を持った新たな生物システムを合成・創出することを目標としているため、それを可能にする遺伝子を設計し、生物システムにそれをプログラムすることが必要になる。

今日の合成生物学の目標は、合成された堅牢な生物システムを、拡張性があって信頼できる方法で設計することである²⁴。このため、合成生物学では、遺伝子工学のプロセスを改善するために、特に、プロトタイプを設計し、具体的な物理的なモノを構築し、設計したモノの機能性をテストし、その欠陥について学習し、その情報を新しくモノを改善する

²² 歴史的な理由から、あるいはモデル生物を調査しやすくする特徴（例えば、実験室での生育ができない、ライフサイクルが長い、繁殖力が低い、遺伝学的に優れていないなど）を欠いているために、研究コミュニティによって広範な研究のために選択されていない生物のこと。

²³ 米国には DIYbio.org という国際的な DIY バイオの市民科学コミュニティがある。2020年9月時点で、Facebook で公開している DIYbio.org の公開グループのメンバー数は 4,000 名を超えている。
< <https://www.facebook.com/groups/diybio/members> >

²⁴ Natalie Kuldell, Rachael Bernstein, Karen Ingram, Kathryn M. Hart (以上著者) / 津田和俊 (監修者)、片野 晃輔、西原 由実、濱田 格雄 (以上翻訳者)、“バイオビルダー：合成生物学をはじめよう”、オライリー・ジャパン、2018年11月。

ための設計の創造にフィードバックするという反復的なプロセスである、DBTL (Design-Build-Test-Learn) サイクルが重視されている (図 3-2 参照)。



図 3-2 合成生物学研究における DBTL (Design-Build-Test-Learn) サイクル²⁵

コンピューティング能力の向上、実験室の自動化、費用対効果の高い DNA 合成・配列決定技術などの DNA を操作するための強力な技術開発により、生物学技術者が、DBTL サイクルを迅速に繰り返して設計を洗練させ、希求する製品を開発することが可能になっている。このようなアプローチに関する主な展開としては、以下のようなものがある。

- ・ 遺伝子部品登録が標準化されたこと。
- ・ 生物学的デザインを作成する前に、それをシミュレーションするためのモデルやその他の定量的ツールの集中的な利用が可能になったこと。
- ・ オープンソースの DNA アセンブリ (短い DNA の断片から元の長い塩基配列を再構築すること) の方法が利用可能になったこと。
- ・ 合理的に設計された遺伝回路 (特定の機能を果たすように設計された DNA コード化された生物学的構成要素のシステム) を創生できるようになったこと。

合成生物学の時代は、これらの概念、アプローチおよびツールが、DBTL サイクルの中で広く採用され、統合されて、バイオエンジニアリングを加速させていることに象徴されている。合成生物学を発展させるために開発された概念、アプローチおよびツールは、今後もライフサイエンスのツールキットに広く統合され、多くの生物学研究やバイオテクノロジー活動に応用されていくと考えられている。

合成生物学の時代においては、新しい技術だけではなく、工学的なパラダイムを生物学的な文脈に応用することにも積極的な取り組みが行われている。生物学的システムを操作し、他の分野の工学的パラダイムを応用することは決して新しいものではなく、1970 年代

²⁵ Eriko Takano 教授 (マンチェスター大学 マンチェスター・バイオテクノロジー研究所 合成生物学専攻) ご提供資料より抜粋。

の組換え DNA 技術の導入から現在に至るまで、遺伝物質や生物学的物質を操作しようとする努力が一貫して行われてきた。変わったのは、工学的パラダイムを生物学的材料に適用することを可能にする特定の技術の威力が増したことである。生物学的物質、システムおよび生物の創造的・破壊的な操作を可能にすると考えられる、新しい技術やプラットフォームを評価することは、潜在的なセキュリティの機会と脆弱性を特定する上で重要であると考えられている。

合成生物学は、電気工学から計算機、生物学、化学に至るまで、様々な科学分野のツールや技術によって可能となっている。例えば、当初、ヒトゲノムの理解を深めるために開発されたが、すぐに他の生物のゲノムの特徴化を行うのに適用されるようになった DNA シークエンシングの能力が飛躍的に向上したことが、過去 10 年間で合成生物学の重要な原料となり、イノベーションを促進してきた。最近では、CRISPR/Cas9 のようなゲノム編集ツールが、遺伝子回路の制御や遺伝子ドライブ²⁶のような合成生物学のテクニックとして採用されている。合成生物学に関連する分野での科学的進歩は目覚しく、例えば CRISPR/Cas9 の適用後わずか 1 年間で、哺乳類の細胞培養（米国）から霊長類（中国）にまで拡張された。

全米科学・工学・医学 アカデミー（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine：以下 NASEM）は、2 つのやや二面性のある現象が、生物学的システムの工学のペースと進歩を加速させている、という見解を持っている²⁷。第一の現象は、生物学的システムの予測可能性が高まり、生物学的性能の基準が進化しているため、バイオエンジニアリングがより理論的なものになりつつあることである。バイオエンジニアリング的なアプローチは、生物学的材料や生物体の設計とその製造を切り離すことを可能にし、生物学的設計の理論的アプローチを促進するための標準が進化している。生物学的知識は、このように設計段階で捉えられ、適用される可能性がある。

第二の現象は、並行して多くの異なる設計を試みることができる能力であり、設計を完成させるために、生体システムの中で、指向性進化法（Directed Evolution）²⁸を利用する可能性があることである。試験のための新しい DNA 構造体（DNA construct）の設計と作成に関わる技術が安価であるため、設計がどのように機能するかという仮説を立てずに作業を進めることが容易になっている。

これらの進歩は、新しいバイオテクノロジーの開発だけでなく、あらゆる種類の行為者（研究者、製造者、事業者等）にそれらにアクセスする機会を与えることになる。これらの技術により、より幅広い治療法、より幅広い生物学的検出・診断法、生物学的異常を検出する機会が可能になると期待されている。しかし、これらの進歩はまた、リソースの少ない悪意のある行為者でさえも、有害な生物学的病原体を作り出す力を増大させる潜在的

²⁶ ゲノム編集技術を利用して、ある有性生殖を行う生物の特定の遺伝子を改変し、集団の遺伝構成を変更すること。ゲノム編集の機構そのものを遺伝子に組み込むことで、改変された遺伝子が常にすべての子の染色体に複製されるようにし、特定の形質を集団全体に速やかに広めることが可能となる。

²⁷ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Biodefense in the Age of Synthetic Biology,” The National Academies Press, 2018.

²⁸ 自然界の淘汰モデルを模す形で、タンパク質・核酸などの機能を目的に応じて向上させていく実験的手法のこと。

可能性をもたらしている。このような状況の中で、合成生物学を可能にする技術を考慮しつつ、それら技術の開発がバイオエンジニアリングの実践におけるパラダイムシフトをどのように導いていくかを検討することは、有益であると考えられている。

3.1.3 合成生物学の特徴、期待されるメリット等

合成生物学は、学問として、またテクノロジーとして、まだ初期の段階である。合成生物学で創生された生命システムと自然界との相互作用に関する問題を含めて、合成生物学の応用に関しても理解が十分ではない面が多い。このような制約条件があるなかで、合成生物学の強みとして、以下を挙げることができる。

表 3-4 合成生物学の強み（文献²⁹に基づき未来工学研究所作成）

特徴	備考
細胞が自身のコピーをつくることができること。	細菌である大腸菌は研究室で約 30 分に 1 回の速さで複製と分裂をすることができる。プログラムされた細胞は比較的簡単に大量培養でき、大規模生産の需要を満たすことができる。
細胞自体が、数多くの複雑なタスク（他の方法では成し遂げることが容易ではない化学反応）をこなす生物学的な機構を含んでいること。	細胞はまた、従来の製造設備では再現することが困難な、ナノスケールの正確さでタスクを行う。さらに細胞には、ナノスケールの機構が壊れたときにはある程度自己修復できるメカニズムを有する。
合成生物学は、解決することが困難な問題に対して、環境にやさしいソリューションを生み出す潜在的な可能性を有していること。	殆どの毒性化合物は、働いている細胞そのものを殺してしまうため、合成生物学を応用した際に生じる副生成物は、基本的に毒性を持たない。また、自然の細胞システムを利用することで、大規模な高温・高圧の製造設備を必要とせず、大きなエネルギーの消費もなく、また、有害廃棄物等の排出もなく、無断のない少ないプロセスで目的とする産物を生産することができる。
合成生物学は、現実世界の課題に取り組むために有用であるだけでなく、自然のシステムの働き方に関して理解を深めるための優れたアプローチであること。	例えば、研究者は、より複雑な細胞機能を解明するうえで、合成生物学により、別の角度から自身の仮説をテストすることができる。

合成化学の進歩が 19 世紀と 20 世紀の現代社会と経済構造の形成に大きな影響を与えたように、合成生物学は、ヘルス、環境、資源管理、経済等に大きな利益をもたらすことが約束されている。

²⁹ Natalie Kuldell, Rachael Bernstein, Karen Ingram, Kathryn M. Hart（以上著者）／津田 和俊（監修者）、片野 晃輔、西原 由実、濱田 格雄（以上翻訳者）、「バイオビルダー：合成生物学をはじめよう」、オライリー・ジャパン、2018 年 11 月

表 3-5 は、合成生物学の応用分野と利用事例である。

表 3-5 合成生物学の応用分野と利用事例
(文献³⁰および各種資料に基づき未来工学研究所作成)

応用分野		利用事例
医療・獣医学	治療と予防	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生物学的・化学的薬剤 ・ ワクチン ・ 遺伝子治療 ・ 細胞治療 ・ 組織工学 ・ 抗菌剤 ・ プロバイオティク³¹ ・ 診断
パーソナルケア製 品	化粧品・パーソナル ケア製品	<ul style="list-style-type: none"> ・ スキンケア ・ 歯科衛生 ・ 日焼け止め
農業	食品・飼料	<ul style="list-style-type: none"> ・ 植物栄養学 ・ 植物の成長・適性 ・ 動物の成長・適性 ・ 食品加工 ・ 診断
産業	エネルギー・鉱業	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新しい燃料（セルロースから燃料の生産等） ・ 光合成燃料と燃料のグレードアップ ・ 鉱物抽出 ・ 燃料の脱硫
	化学品・材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機能性化学品・バルクケミカル³² ・ ゴム・ポリマー ・ 繊維
環境	環境保全	<ul style="list-style-type: none"> ・ 改善・修復 ・ 廃棄物処理 ・ 汚染センサー
情報技術	産業、社会インフラ、	<ul style="list-style-type: none"> ・ バイオセンサー ・ データの生化学的符号化 ・ ナノデバイス
安全保障	セキュリティ、防衛	<ul style="list-style-type: none"> ・ バイオディフェンス ・ 材料
その他	文化とレジャー	<ul style="list-style-type: none"> ・ バイオアート ・ レジャー用植物

上記表から明らかのように、合成生物学は、既に、医療、生活用品、エネルギー、環境、農業、防衛等を含め、様々な分野で利用され、大きなメリットを与えている。例えば「製

³⁰ EC Scientific Committees, “Opinion on Synthetic Biology II: Risk assessment methodologies and safety aspect,” 2015.

³¹ 腸内細菌のバランスを改善し、健康に有益な作用をもたらす生きた微生物（乳酸菌・ビフィズス菌・納豆菌）などを表す。また、それらを含む食品・医薬品なども意味する。

³² 自動化・大規模化した装置によって少品種・多量生産される化学品。

造」という観点で合成生物学のメリットを捉えると、「大規模な生産・製造施設を必要とせず、生物材料（細胞、微生物、植物、動物等）というどこでも手に入る資源を使って、有用化学物質としての燃料、化成品、素材等や食料といった複雑な高付加価値の産物を、大量に、安く、あるいは、安全に生産・製造することができる」ことを挙げることができる。

実際、産業構造審議会 商務流通情報分科会 バイオ小委員会は、微生物や植物等を利用して合成する「バイオ合成法」（合成生物学に基づく製造法）と化学工程を用いて製造する「化学合成法」において製造可能な化合物の相違点に関して、以下のような説明を行っている³³。

【バイオで創れる価値がある～バイオものづくりの真髄～】

化合物を人工的に合成する方法として、微生物や植物等を利用して合成する「バイオ合成法」と、化学工程を用いて製造する「化学合成法」の2つがある。生物は大きくて複雑な構造を持った分子を作ることが圧倒的に得意で、これを化学合成のみで作ろうとすると多段階操作が必要で、エネルギーもコストも膨大となり、事実上、合成できない場合も少なくない。この非効率さを克服するのがバイオ合成の強みである。

他方、化学合成の方がはるかに安価で大量に生産できる化合物に対してバイオを活用するには、解決すべき課題があることも現実である。毒性等により生物が作りにくいものを生物に作らせる技術や化学合成に肩を並べる生産コストの低減が求められる。

社会実装に向けて各種課題を解決しながら、原料にもプロセスにも石油資源を多く使うものづくりからバイオによるものづくりへ転換すると、そこには多くの価値が生まれることになる。バイオだからこそ作れるモノの価値、そして便利さと引き換えに蓄積される地球環境への負の影響を取り戻す価値である。



バイオ合成法と化学合成法で製造可能な化合物

図 3-3 バイオ合成法と化学合成法で製造可能な化合物の相違点

³³ 産業構造審議会商務流通情報分科会バイオ小委員会、「バイオテクノロジーが拓く『第五次 産業革命』」、経済産業省、2021年2月。

合成生物学のアプリケーションは、実質的な経済的可能性を秘めている。Synbio Markets 社によれば、2018 年における合成生物学の国際市場の規模は、110 億米ドル（約 1 兆 2 千億円）相当であったとされ、今後年平均成長率が 25% を超え、2025 年には 550 億米ドル（約 6 兆円）相当の市場になると予測されている³⁴。

3.1.4 米欧中における合成生物学研究の特徴、代表的な事例等

本項では、世界で合成生物学研究をリードしている、米国と英国のトップクラスの研究機関や企業で実施されている合成生物学研究に関する取組の例および合成生物学研究に係るリスクや倫理の問題に関する考え方の例を示す。なお、中国に関しては合成生物学研究に関する倫理面を含めた政策の動きを中心に述べる。

(1) 米国

1) 研究機関や研究所で実施されている研究

米国においては、連邦政府機関と産業界が中心となって、合成生物学研究とその産業への応用を展開している。

a) 連邦政府機関における研究

連邦政府レベルでは、エネルギー省 (United States Department of Energy: 以下 DOE)、国防総省 (Department of Defense: 以下 DOD)、全米科学財団 (National Science Foundation: 以下 NSF)、米国国立衛生研究所 (National Institutes of Health: 以下 NIH)、農務省 (United States Department of Agriculture: 以下 USDA) 等が、合成生物学研究への支援を行っているが、合成生物学研究に最も力を入れている機関は、DOE と DOD である。

DOE では、主に、科学局 (Office of Science) と技術移転局 (Office of Technology Transitions) の 2 つの部門が、合成生物学研究へのファンディングを行っている。また、DOE の傘下にあるエネルギー高等研究計画局 (Advanced Research Projects Agency Energy: 以下 ARPA-E) では、合成生物学に関する破壊的技術を対象とした、ハイリスク・ハイリターンなプロジェクトを支援している。一方、DOD では、国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Planning Agency: 以下 DARPA)、米陸軍、米海軍および米空軍が中心となって合成生物学研究を推進している。

i) DOE

DOE は、次世代持続可能な社会に向けて、植物が、光合成により空気中の二酸化炭素を直接燃料として使用できる油に変換することを可能にする技術を開発すると、いったことを合成生物学研究のスタンスとしている。

科学局の生物学・環境研究室 (Office of Biological and Environmental Research) のゲ

³⁴ SynBio Markets Prospectus (Synbio Markets 社資料)

ノム科学プログラム（Genomic Science Program）では、2007年から米国のバイオエネルギー産業の実現に向けて、バイオエネルギー研究センター（Bioenergy Research Center：以下BRC）プログラムを支援している。BRCは4つのセンターによって構成されている。

各センターは、表3-6に示すように、DOEの国立研究所やトップの大学により主導されており、1センター当たり25億円規模の予算が組まれている。先進的なバイオ燃料およびバイオ製品の生産プロセスの改善とスケールアップへの道筋を加速させるという共通の目標に向けて、それぞれが独自のアプローチをとっている。

表 3-6 DOE BRC プログラムのセンターと研究内容

BRC	主導機関	研究内容
Center for Advanced Bioenergy and Bioproducts Innovation (CABBI)	イリノイ大学アーバン・シャンペーン校	CABBIは、植物の茎の中で燃料や化学物質を作り出す「工場としての植物」アプローチとバイオマスを生態学的にも経済的にも持続可能な価値のある化学物質に変換する自動醸造所のアプローチを利用して、農学、ゲノミクス、バイオシステム設計および計算生物学の最近の進歩を統合し、エネルギー変換用の作物の価値を高める取組を行っている。
Center for Bioenergy Innovation (CBI)	オークリッジ国立研究所	CBIは、バイオエネルギーのサプライチェーンの複数のポイントで、インパクトのある付加価値の高い副産物を開発することができるように、バイオエネルギー関連の植物や微生物の順化を加速する取組を行っている。
Great Lakes Bioenergy Research Center (GLBRC)	ウィスコンシン大学マディソン校およびミシガン州立大学	GLBRCは、リグノセルロースからバイオ燃料やバイオ製品を製造する各段階で、持続可能性を確保するための先進的な科学技術の開発に取組んでいる。
Joint BioEnergy Institute (JBEI)	ローレンス・バークレー国立研究所	JBEIは、分子生物学、化学工学および計算・ロボット技術の最新のツールを使用して、バイオマスをバイオ燃料とバイオ製品に変換する取組を行っている。

特に、JBEIを主導しているローレンス・バークレー国立研究所（Lawrence Berkeley National Laboratories：以下LBNL）は、合成生物学のメッカであるサンフランシスコ・ベイエリアに位置しているため、DOEによる投資が大規模に行われている。合成生物学では、基礎研究から商用化に至るまでいろいろなステップがある。合成生物学の商用化においては、発見（Discovery）、開発、システム試験、実証実験、商用化という段階で進むが、通常、「発見」のフェーズは大学のレベルで行われており、DOEの国立研究所が、製品開発への橋渡しを担っている。

ARPA-Eは、DARPAをモデルとして、ハイリスク・ハイリターン型の研究開発を行い、パラダイムシフトを起こすような技術を開発することを使命とする連邦機関である。ARPA-Eでは、2011年から、PETRO（Plants Engineered to Replace Oil）というプログラムを推進している。本プログラムは、合成生物学的な技術を使用して、直接、輸送用燃料を生産することができる非食用作物の開発を目的とするものであり、植物が有するエネ

ルギーと二酸化炭素の回収プロセスを燃料生産に方向転換することを狙いとしている。

現在のバイオ燃料生産は、植物による太陽エネルギーの取り込みが非効率であること、また植物から大気中の CO₂ を利用可能な燃料に変換するためのプロセスが非効率であることにより、制限されている。本プログラムでは、松の木、タバコ、サトウキビ、ソルガムなどの様々な植物を用いて、石油系燃料に含まれている分子を作り、既存の自動車のタンクに直接投入できるようにする実験を行ってきたとされている。これまで 10 のプロジェクトが支援されてきており、実用化に向けた見通しが得られているもようである。

ii) DOD

○DARPA

DARPA では、合成生物学に関して、Living Foundries、Safe Genes 等のプログラムを実施している。

Living Foundries プログラムは、生体システムの基本的な代謝プロセスをプログラミングすることで、他の方法ではアクセスできない膨大な数の複雑な分子を生成し、そのような分子の適応性、拡張性およびオンデマンド生産を可能にすることを目的とするものである。このプログラムには以下の 2 つの要素が含まれている³⁵。

- Living Foundries: Advanced Tools and Capabilities for Generalizable Platforms (ATCG)
- Living Foundries: 1000 Molecules

最初の要素 (ATCG) は、前述した合成生物学研究における DBTL (Design-Build-Test-Learn) のサイクルを、時間とコストの両面で少なくとも 10 倍に圧縮することを目標として、複雑さの増した生物学的システムを改変するための次世代ツールと技術の開発に焦点を当てたものである。ATCG で関心を集めた技術分野には、設計・自動化ツール、モジュール化された遺伝子部品・デバイス、標準化されたテストプラットフォームおよび宿主 (シャーシ)、生物学的システムを迅速に物理的に構築するためのツール、遺伝子設計の編集・操作などが含まれる。当該要素のプログラムは、2012 年から 3 年計画、3,500 万ドルの予算で進められ、技術開発に成功し、研究開発は完了した。

2 番目の要素 (Living Foundries: 1000 Molecules) は、自動化したプラットフォーム、新しいゲノム編集ツール、機械学習技術等を使用して 1000 個の有用分子からなる化合物を作成することで、効率的かつ迅速に 1000 個の有用分子をキログラム単位で作成できる可能性を実証することで、合成生物学におけるプロトタイピングの課題を軽減することに重点を置いた取り組みを行っている。当該要素のプログラムは、工業用化学品、医薬品、コーティング剤、接着剤など、国防関連の幅広い分野の製品を対象としており、2014 年から 5 年計画、1.1 億ドルの予算で実施された。その後は、当該プログラムの成果の応用研究が推進されているもようである。

³⁵ <https://www.darpa.mil/program/living-foundries>

Safe Genes プログラムは、ゲノム編集技術の偶発的または意図的な誤用から兵士を保護することで、軍の防護と兵士の健康を守ることを支援することを目的とするもので、これにより、遺伝子編集技術の進歩を利用して、遺伝子編集者に対する高度な予防的および治療的処置の開発を促進するとされている。当該プログラムは、以下の3つの領域から構成される³⁶。

- 生物学的システムの規模に係わらず、生物学的システムにおけるゲノム編集（遺伝子ドライブを含む）を制御する方法（いつ、ゲノムのどの部分でオンするかを調整する方法）を開発し、その影響に対抗し、更にはゲノム編集されたものゲノムを元に戻す方法やツールや手法を開発すること。
- ゲノム編集活動を予防または制限し、生物や集団のゲノム完全性を保護する予防および治療法を提供するための低分子および分子戦略を開発すること。
- 望ましくない遺伝子操作が行われたときに、その遺伝子を生物の集団や環境から除去し、元に戻す方法や戦略を開発すること。

当該プログラムでは安全性が優先事項であるとして、当該プログラムの下で行われるすべての研究は、バイオセーフティが十分に管理された施設で行われる。さらに、当該プログラムは、独立の ELSI (Ethical, Legal, and Social Implications) 専門家が情報を提供することで、DARPA がゲノム編集技術に関連する潜在的な問題を積極的に特定することを支援している。当該プログラムは、2017年から4年計画、1,100万ドルの予算で進められている。

なお、米陸軍、米海軍および米空軍も合成生物学研究に力を入れている。ほんの一例であるが、例えば、米陸軍はどこにでも生育している植物等からのバイオ材料の調達技術、米海軍は敵対検知能力を高めるためのバイオセンサーの開発、米空軍はパイロットの疲労回復の向上等に関する研究を進めている。

b) 産業界における研究

米国における合成生物学研究のもう一つ大きな柱は産業界である。米国には、合成生物学の黎明期にある産業の安定的な成長を目指す組織として、SynBioBeta というイノベーション・ネットワーク（コミュニティ）が設立されている³⁷。

SynBioBeta には、生物学を利用してより良く、より持続可能な世界を構築したいという情熱を共有する、生物工学者、投資家、イノベーター、企業家等が参加している。SynBioBeta では、大学のスタートアップ、大企業、投資家等が集まって、新しいアイデアを創造・シェアし、投資家とのマッチングを行う機会が提供されている。

SynBioBeta によると、米国は、過去12ヶ月間、新型コロナウイルスの影響で、景気後退、高い失業率、大恐慌以来最大の四半期GDPの減少などにもかかわらず、バイオ業界は2020年に過去最高レベルの投資が行われたとされている。合成生物学関連企業が2020年

³⁶ <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>

³⁷ <https://synbiobeta.com/about/>

に受けた民間・公的資金は 78 億ドル（約 8,600 億円）に達したが、これは、2019 年の約 2.5 倍、2018 年の約 2 倍という驚異的な規模の投資額になる（図 3-4 参照）。

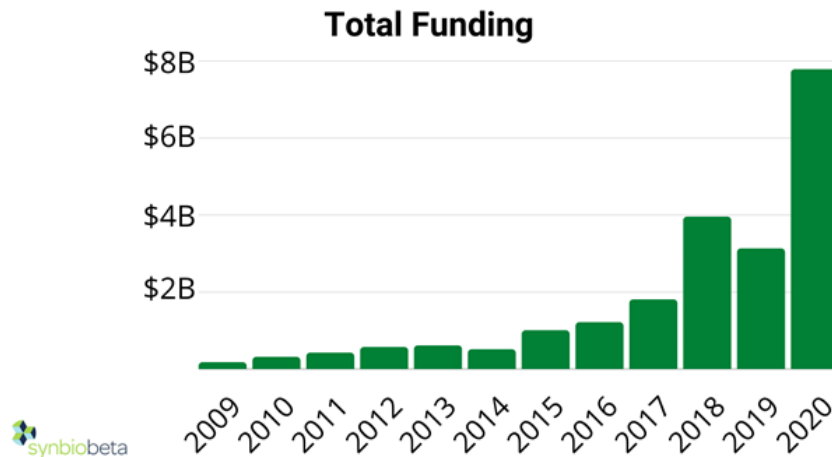


図 3-4 合成生物学への投資額（2009～2020 年）³⁸

一方、合成生物学関連の企業に目を向けると、以下のような企業が注目されている。

まず、オートメーションでは、Zymergen 社と Ginkgo Bioworks 社という企業を挙げるることができる。

Zymergen 社は、世界最大級のゲノムデータのライブラリ、機械学習、オートメーション等を組み合わせた独自の技術プラットフォームを開発しており、石油化学ベースの材料を使用している企業と比べて、新製品を半分の時間で、劇的に低いコストで市場に投入することができる」とされている、西海岸のベンチャー企業である（カリフォルニア州エメリービルに本社を置いている）。一方、Ginkgo Bioworks 社は、エンジニアが何千もの生物学的設計をプロトタイプ化できるように生物工学のプロセスを自動化かつスケールできる細胞プログラミングプラットフォームを開発しており、工業、医療、消費財、食品等に利用する有機物を作り出す微生物を設計・作製するサービスを行っている、東海岸のベンチャー企業である（マサチューセッツ州ボストンに本社を置いている）。

これらの企業は、顧客が必要とする高性能素材（医薬中間体、化成品原料、食品添加物等）の有用物を生産するために必要なスマートセルを IT/AI 技術を駆使して短時間で効率的に設計・製造して、顧客が量産体制を構築することを支援している³⁹。

これらの企業は、基本的には他の大企業のバイオプロセスをハイスループットの技術やデータサイエンスにより効率的に変えていくというビジネスモデルからスタートしたが、

³⁸ <https://synbiobeta.com/synthetic-biology-investment-set-a-nearly-8-billion-record-in-2020-what-does-this-mean-for-2021/>

³⁹ 産業構造審議会商務流通情報分科会バイオ小委員会、「バイオテクノロジーが拓く『第五次 産業革命』」、経済産業省、2021 年 2 月。

Zymergen 社の場合は、自社開発を始めて事業会社に転身し、Ginkgo Bioworks 社の場合は、協業する他社が同社のバイオ・ファウンドリを使って様々な製品を開発するような状況になっており、両社は、投資会社あるいはインキュベーターのようなビジネスモデルに変わりつつある。

この他、オートメーションに関しては、Berkeley Lights 社が、光選択技術を利用して、細胞単位で、自動的に培養・評価・選別することで、通常では数週間から数カ月かかる細胞株の開発を数日に短縮することができる技術を開発している。合成生物学で細胞の機能を改変する場合には、細胞の数で 10 の 7 乗から 10 の 10 乗ぐらいのスケールで沢山のテストを行うが、生産性の高い細胞とそうではない細胞の選別が非常に難しい。Berkeley Lights 社の技術を使うと、一個の細胞から生産性を観察できるので、より早くスクリーニングを行うことができ、多様な産業への応用が期待されている分野の一つである⁴⁰。

遺伝子合成技術も合成生物学で重要であるが、この分野では Twist Bioscience 社の独り勝ちになっている。同社は、独自の半導体ベースの合成 DNA 製造プロセスを利用して、ゼロから DNA を合成することができる技術を持っている（カリフォルニア州サンフランシスコに本社を置く）。5~6年前までは、遺伝子を合成する場合、96 結のウェルプラスチックプレートに、オリゴと呼ばれる小さな DNA を合成して、それらを全部混ぜて 1 個の遺伝子を作るという作業をしていた。同社のテクノロジーでは、従来の 96 ウェルプラスチックプレートではなくシリコン上で DNA を合成することで、これまでの DNA 合成の非効率性を克服するだけでなく、研究開発を加速するための費用対効果の高い、迅速で高品質なハイスループット DNA 合成を可能にするとされる。

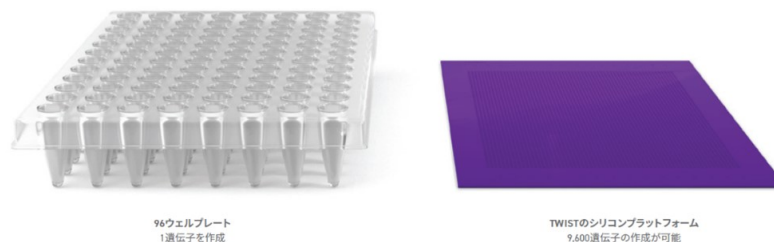


図 3-5 従来のウェルプラスチックプレートによる DNA 合成のイメージ（左図）と Twist Bioscience 社のシリコンプラットフォームによる DNA 合成（右図）のイメージとの比較⁴¹

農業分野では、最近、遺伝子工学で改変した微生物を開放系で実験等を行う動きが出ている。その先駆けが PIVOT BIO 社である。PIVOT BIO 社は、Bayer Crop Science 社と

⁴⁰ 吉国靖雄氏（米国エネルギー省ジョイントゲノム研究所 DNA 合成科学プログラム部門長）の合成生物学に関する勉強会での講演からの情報による。

⁴¹ <https://twistbioscience.yokohama/overview>

前述の Ginkgo Bioworks 社が 100 億円規模の投資を行って設立されたベンチャー企業である（カリフォルニア州バークレイに本社を置く）。現在、農業では化学肥料が使われているが、窒素を固定するために大量のエネルギーを消費すること、化学肥料に含まれる余分な窒素が、後から N_2O として畑から出てきて、地球温暖化ガスとなることを踏まえて、PIVOT BIO 社では、窒素固定をする細菌という、生物肥料のようなものを開発している⁴²。

タンパク質の合成も注目される分野である。米国等では、ベジタリアンやビーガン（肉だけではなく、ミルクなども飲まないという人たち）が結構おり、そういった人たちにタンパク質の栄養素を提供する、Geltor 社や Impossible Foods 社のような企業がある。

現在、コラーゲンやゼラチン等のタンパク質は、豚、牛、魚等から抽出されているが、Geltor 社では、微生物発酵技術を用いて、動物性を全く含まないコラーゲンを開発している。また、美容・パーソナルケア製品向けに、生物学的にはエラスチンと同一の「ヒトエラスチン」を開発しており、食品、美容、パーソナルケア等業界から注目されている。

Impossible Foods 社は、植物由来の人工肉や乳製品を製造・開発している食品テクノロジー企業である（カリフォルニア州レッドウッドシティに本社を置く）。当該企業は、どうして肉の味や肉の匂いがするのかを科学的に研究し、筋肉の中に含まれているミオグロビンを焼いたときに、肉のおいしさが出てくると突き止めた。ミオグロビンに似たタンパク質で、レグヘモグロビンというタンパク質が大豆の中にあるが、その遺伝子を酵母に作らせて、レグヘモグロビンを作り、それをベジ肉に混ぜると本物の肉のような味、風味が出るというものである。米国と香港の 1,000 以上のレストランで同社の人工肉を使用した「インポッシブル・バーガー (Impossible Burger)」を提供している⁴³。



図 3-6 Impossible Foods 社の人工肉を使用した「インポッシブル・バーガー (Impossible Burger)」⁴⁴

⁴² <https://www.pivotbio.com/>

⁴³ 吉国靖雄氏（米国エネルギー省ジョイントゲノム研究所 DNA 合成科学プログラム部門長）の合成生物学に関する勉強会での講演からの情報による。

⁴⁴ <https://japanese.engadget.com/impossibleburger-210045688.html>

2) 合成生物学研究におけるリスクの検討の必要性を論じた DOE の論文

これまで述べてきたように、合成生物学は、科学を変革し、社会に多大な利益をもたらすと期待されているが、同時に潜在的なリスクを秘めており、多くの文献で、合成生物学に関連したリスクに関する問題が取り上げられている。

このような中で、「合成生物学の研究開発に関するリスクや遺伝子改変された生物の封じ込め（生物学的封じ込め）に関する既存の研究文献においては、研究開発の環境で生み出される、研究生物に関して進化・相互作用するネットワーク、規則、役割および慣行（これらを「人間の行動に影響を与える要素」と呼ぶ）が、リスク、生物学的封じ込めおよびリスク回避の可能性に関して、どのように影響を与えるかについて検討されておらず、これらの要素を無視していると、リスクや生物学的封じ込めに関連した問題を予測すること、回避すること、また、認識することができなくなる可能性がある」という見解を示した論文⁴⁵がある。

本論文は、DOE 科学局（Office of Science）の生物学・環境研究部門（Biological & Environmental Research）の助成金による研究によるものであるが、この研究では、合成生物学の研究開発に焦点を当て、研究開発現場におけるバイオセーフティや規制への関心が高まっていること、行動を形成する社会的・制度的要因（人々が交流する環境や、行動が形式的・非公式のルールや運用方法によってどのように形成されるかを包含している）を分析することで、研究開発中にリスクが生じたり、リスクを増幅あるいは減少させるような、見過ごされていた状況を発見することができ、不注意によりリスクを増大させる可能性のある研究方法を回避することができる可能性があるとしている。

合成生物学の研究開発においては、規則や標準的な慣行は、研究者の研究組織、研究室や現場での手順、分野別の訓練、役割と責任、専門家としての野心などの要因に影響されるが、この文献では、研究を悪い目的で利用しようとする意図的な試みではなく、通常の研究状況に焦点を置いている。

本論文では、このような考え方は、多くの新興技術に当てはまるものであるが、主に以下の理由で、合成生物学に適用することが重要であるとしている。

- ・ 合成生物学は急速に進化しており、研究開発の初期段階では、不注意に関するギャップを理解することが特に大きな影響を与える可能性があること。
- ・ 合成生物学の実験が、通常の研究機関以外でも行われるようになってきていること。
- ・ バイオテクノロジーに関連したバイオセーフティや規制への関心が高まっていることにより、行動を形成する社会的・制度的要因を考慮に入れることが有益であると考えられること。

本論文では、合成生物学の特徴的な要素が、その潜在的なヒトの健康と環境への影響について、すでにならりの注目を集めていること、CRISPR のような新しい遺伝子編集技術の出現により、ヒトの健康や環境へのリスクに関して適切に検討することが促されている

⁴⁵ Amy K. Wolfe, Maria Fernanda Campa, Rachael A. Bergmann, Savannah C. Stelling, David J. Bjornstad, and Barry L. Shumpert, "Synthetic biology R&D risks: social- institutional contexts matter," Trends in Biotechnology, Vol. 34, No.5, February 2016.

としている。また、現在、複数の生物学的構成要素やプロセスの改変が大きく拡張され、ゲノム編集によって達成された改変に潜在的な永続性があることから、これらの技術は、従来の遺伝子工学に伴う単一遺伝子の組換え技術を圧倒するレベルの技術であるとして、最近の遺伝子組換え技術の複雑さ、組換えのスケールおよび組換えの迅速さにより、リスクや生物学的封じ込めに関連した既存のアセスメントと実験の実践が通用しなくなる可能性があることを指摘している。

本論文では、合成生物学に関する文献のレビューに基づき、リスクと生物学的封じ込めに対する3つの支配的な指向性（生命倫理、ガバナンスおよびテクノロジー）に係わる文献を分類し、上記の議論を踏まえて4つ目の方向性（社会・制度）を提案している。

表 3-7 各種文献における合成生物学のリスクに関する検討の指向性
(文献⁴⁶より抜粋)

指向性	指向性が特徴付けられる軸	文献で強調する傾向があるもの	推奨事項	備考	関連する文献
生命倫理	合成生物学のリスクと生物学的封じ込めに関する規範的で広範な視点	<ul style="list-style-type: none"> 基本原則 行動に関する提言 	<ul style="list-style-type: none"> 現場で改変生物を放出する前にリスクアセスメントを実施しておく。 信頼性の高いセーフガードのレビューを行い、それを特定する。 	<ul style="list-style-type: none"> リスク評価や漏洩防止のための適切な封じ込めなど、比較的概略的な提言がなされているが、リスクを防止するためにはどのような要素を評価すべきかについては言及されていない。 	a, b, c
ガバナンス	政策、規制および手続き	<ul style="list-style-type: none"> 介入のポイント、政策の選択肢、"望ましい基準" 方針・規則・手順の構築 不十分な知識 合成生物学により生み出された有害物質の偶発的または意図的な漏洩 	<ul style="list-style-type: none"> 標準化された手順と実践を開発する。 関連するステークホルダーの利益のバランスを考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 一般的に、ガバナンスに関する文献では、政策、規制、または手順が研究開発の実践にどのように反映されるかについて関心を示しているわけではない。 	d, e
テクノロジー	合成もしくは再設計された有機物により、潜在的にもたらされる可能性のある危害の種類	<ul style="list-style-type: none"> 毒性学的または生態学的影響 商業規模の生産または使用 バイオセキュリティまたはデュアルユース 	<ul style="list-style-type: none"> 生物学的封じ込めを計画する。 研究コミュニティ間でのベストプラクティスを共有する。 	<ul style="list-style-type: none"> 合成生物学から生じる可能性のある害の種類については、多くの研究で注目されているが、その多くは研究開発の場ではなく、商業規模での生産や応用に重点を置いている。 研究開発環境での実践の相違が、遺伝子組換え生物などへの曝露が起きる可能性をどのように形作っていくのかを検討して 	f, g

⁴⁶ (公財) 未来工学研究所、「日欧米中の合成生物学のリスクの考え方とリスクアセスメントの取組みに関する調査研究」、一般財団法人新技術振興渡辺記念会「令和元年度科学技術調査研究助成」報告書、2020年9月

指向性	指向性が特徴付けられる軸	文献で強調する傾向があるもの	推奨事項	備考	関連する文献
				いるわけではない。	
社会・制度 (論文 ⁴⁷ で提案)	研究開発の実践の中で不用意にリスクを生み出したり、増加させたりする条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ リスクを引き起こす要因としての社会的・制度的な要素 ・ 研究開発における通常の習慣・行動 ・ 公式／非公式のリスク関連ガイダンス間の整合性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 異なる分野にも適用できるガイドラインを作成することが可能。 ・ 研究機関間での研究に関する一貫した実践を奨励する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 合成生物学に関する既存の研究開発リスクと生物学的封じ込めに関する文献は、社会的・制度的に重要な要素を見落としている。 	—

a: Balmer, A.S., and Martin, P., "Synthetic biology: social and ethical challenges," Institute for Science and Society, University of Nottingham, 2008.

b: Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, "New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies," The White House, May 2010.

c: Parens, E., et al., "Ethical issues in synthetic biology: 191 an overview of the debate," Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2009.

d: International Risk Governance Council (2010) Guidelines for the Appropriate Risk Governance of Synthetic Biology, 2010.

e: Garfinkel, M.S. et al., "Synthetic genomics: options for governance," J.C. Venter Institute, 2007.

f: Henley, W. J., et al., "Initial risk assessment of genetically modified (GM) microalgae for commodity-scale biofuel cultivation," Algal Res. 2, 66–77, 2013.

g: National Research Council, "Biological confinement of genetically engineered organisms," National Academies Press, 2004.

(2) 英国

英国は、米国と同様にかなり早くから合成生物学に注目してきた。2012年に、産業界ステークホルダー主導の UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group により、「A Synthetic Biology Roadmap for the UK」⁴⁸が発表された。このロードマップでは、英国政府がどのように合成生物学を支援していくべきかが議論されたが、英国政府は、実際にこのロードマップにしたがって、合成生物学へのファンディングを開始した。

その後、2016年に、Synthetic Biology Leadership Council (SBLC)により、「Biodesign for the Bioeconomy: UK Synthetic Biology Strategic Plan 2016」⁴⁹が公表された。この計画は、英国の合成生物学に関する8つの研究拠点を構築することによって、公衆の利益に適う合成生物学由来の製品やサービスを加速するための戦略を示したものであり、戦略的に重要な以下の5つの分野が示された。

- ・ 産業化と商業化を加速すること。
- ・ イノベーション・パイプラインの能力を最大化すること。
- ・ 専門性を有する労働力を構築すること。
- ・ 協力的な事業環境を整備すること。

⁴⁷ Ibid.

⁴⁸ UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group, "A Synthetic Biology Roadmap for the UK," Technology Strategy Board, July 2012.

⁴⁹ Synthetic Biology Leadership Council, "Biodesign for the Bioeconomy: UK Synthetic Biology Strategic Plan 2016," February, 2012.

- ・ 国内外のパートナーシップにより合成生物学の価値を構築すること。

英国は、合成生物学を活用して科学技術開発・生産・商用化することに関して世界でトップになることを意図しており、米国に続き、世界で No.2 の合成生物学の市場を形成している。

1) 英国の合成生物学研究開発拠点

英国は、図 3-7 および表 3-8 に示すように、全国に合成生物学研究拠点として、8つの合成生物学研究センター（Synthetic Biology Research Centres：以下 SBRCs）を設立しており、毎年、合成生物学・ゲノム関係のスタートアップ企業が数多く誕生している。

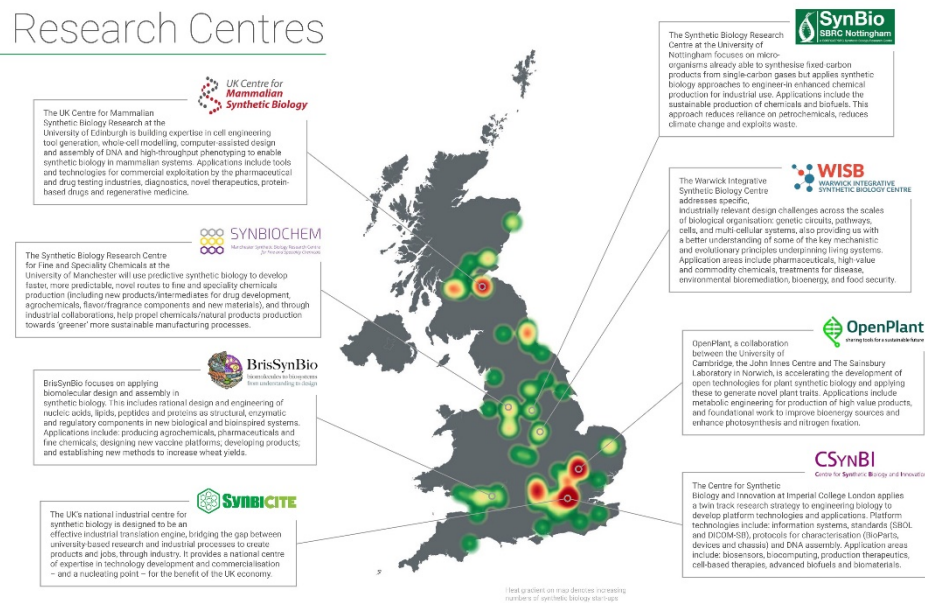


図 3-7 英国における 8つの合成生物学研究拠点（SBRCs）のロケーション

表 3-8 英国における 8つの合成生物学研究拠点（SBRCs）
（文献⁵⁰に基づき未来工学研究所が作成）

研究開発拠点（SBRCs）	運用機関	役割、機能など
SynbiCITE	Imperial College London	英国における合成生物学発展のための国立の産業センターであり、大学での研究と産業プロセスのギャップを埋めることで、産業界を通じて製品や雇用を創出することを目的としている。このセンターは、英国経済の利益のために技術開発と商業化における専門知識に関する

⁵⁰ L.J. Clarke and R.I.Kitney, “Synthetic biology in the UK – An outline of plans and progress,” Synthetic and Systems Biotechnology, Volume 1, Issue 4, December 2016.

研究開発拠点 (SBRCs)	運用機関	役割、機能など
		センター機能を提供しており、新興企業から大規模な多国籍企業まで、英国を代表する学術機関と産業界のパートナーの協力を促進している。SynbiCITE のパートナーネットワークには、英国の 26 の大学と 46 の産業・商業パートナーが含まれており、多国籍企業、中小企業、スタートアップ企業で構成されている。
CSynBI	Imperial College	エンジニアリング・バイオロジーに対して、プラットフォーム技術とアプリケーションの開発というツインタック戦略を採用している。プラットフォーム技術には、情報システム、標準規格、特性評価のための詳細なプロトコル、DNA アセンブリ等が含まれている。アプリケーションには、バイオセンサー、バイオコンピューティング、生産療法、細胞ベースの治療法、先進的なバイオ燃料・バイオマテリアル、酵母由来のペニシリン、酵母合成ゲノムプロジェクト (Sc2.0) への参加などがある。
BrisSynBio	University of Bristol	特にタンパク質に焦点を置いて、生物学的分子やシステムを設計・設計する能力を向上させ、この知識を健康や英国産業に関連するアプリケーションに応用することを目標とする。応用分野としては、細菌を利用した農薬・医薬品・ファインケミカルの製造、 Dengue 熱やその他の対応できていないクリニカル・ニーズに対する新しいワクチンの開発、小麦の収量を増やすための新しい方法の開発などが挙げられる。
SYNBIOCHEM	University of Manchester	医薬品開発のための新製品や中間体、農薬、持続可能なバイオ製造のための新素材を含む、ファインケミカルや特殊化学品の生産に関する合成生物学研究に焦点を置いている。化学品や自然製品の生産を「グリーン」でより持続可能な製造プロセスに向けて推進するために、様々な業界のパートナーとの積極的な協力関係によりアプリケーションの開発が行われている。
OpenPlant	University of Cambridge と John Innes Centre and The Sainsbury Laboratory in Norwich と の共同運用	植物合成生物学のための新しいツールや手法の開発を加速させ、形質開発のための標準ツールのオープンな交換や適用を促進している。応用分野として、新しい医薬品、化学物質、グリーンエネルギー源等（光合成や窒素固定の強化を含む）の開発が挙げられる。
SynBio	University of Nottingham	材料を消化し、単一の炭素ガスをより望ましく有用な分子に変換することができる生物を生み出すための、合成生物学の応用を推進している。応用領域としては、石油化学製品への依存度を下げるための化学物質や燃料の持続可能な生産、廃棄物としての温室効果ガスの利用、それにより新興の廃棄物経済を促進することなどが挙げられる。
UK Centre for Mammalian	University of Edinburgh	哺乳類での合成生物学を可能にするために、細胞工学ツールの生成、全細胞モデリング、コンピュータ支援によ

研究開発拠点 (SBRCs)	運用機関	役割、機能など
Synthetic Biology Research		る DNA の設計・構築、ハイスループットな表現型特性に関する専門知識の構築を推進している。
WISB	Warwick Integrative Synthetic Biology Centre	遺伝的回路、経路、多細胞システムなど、生物学的組織のスケールを超えて、工業的に関連性のある特定の設計課題に取り組むとともに、生体システムを支える重要な仕組みや進化の原理のいくつかをよりよく理解するための取組を行っている。応用分野としては、医薬品、高価値・汎用化学品、疾病治療、環境バイオレメディエーション、食料安全保障などが挙げられる。

2) SYNBIOCHEM における研究の構成

以下、上記研究拠点のうち、SYNBIOCHEM を取り上げ、当該機関における研究事例を示す。

SYNBIOCHEM (Synthetic Biology Research Centre for Synthetic Biology of Fine and Speciality Chemicals) は、合成生物学を利用した、ファインケミカルおよび特殊化学品 (医薬品開発のための新製品や中間体、農薬、持続可能なバイオ製造のための新素材を含む) の生産に関する英国/欧州のセンター・オブ・エクセレンスである。当該センターは、2014 年に、バイオテクノロジー・生物科学研究会議 (Biotechnology and Biological Sciences Research Council 以下 BBSRC) / 工学・物理科学研究会議 (Engineering and Physical Sciences Research Council : 以下 EPSRC) から 1000 万ポンド (約 15 億円) 以上の資金提供を受け、マンチェスター大学によって設立された。

同センターは、業界パートナーとの積極的なコラボレーションを通じて、合成生物学の能力を利用して、より持続可能な製造プロセスで化学品/自然品を生産できる取組を行っている。当該センターは、高度に統合された学際的な技術プラットフォームと、現代のファインケミカルおよび特殊化学品の生産のための、真に世界をリードする物理的インフラストラクチャを開発してきた。欧州では、この新興技術の急速な進展に伴い、社会的、倫理的、規制上の課題 (責任ある研究とイノベーション (Responsible Research and Innovation : 以下 RRI)) が議論されているが、同センターでは、マンチェスター大学全体の社会学者や経済学者と合成生物学研究者が密接に連携して、RRI に関する問題についても研究が行われている。

a) SYNBIOCHEM の技術的能力

SYNBIOCHEM は、合成生物学研究のための統合化した技術プラットフォームとしてバイオ・ファウンドリ (Bio Foundry) ⁵¹ を設立した。

この技術プラットフォームは、化学物質生産のための微生物バイオ工場の予測可能な工学的な操作や処理を容易に行うための強力な機能を提供するものである。予測型の合成生物学の力を利用することで、同センターは多くの産業分野 (ヘルスケア、エネルギー、農薬、グリーンケミストリー医薬品、新素材、バイオレメディエーションなど) のスケールアップに向けた、

⁵¹ バイオ工場と呼ばれることもある。

次世代の持続可能な製造プロセスを推進している。

これにより次世代の研究者のための持続可能な研究活動が可能になっている。同センターの研究者は、コンピュータ、バイオインフォマティクス、設計、酵素学、タンパク質、化合物の分析、ビッグデータといった分野の専門家、そして RRI に関する知見を有するビジネススクールやソーシャルサイエンスのポスドクやシニアポスドクも加えた専門家から構成されている。

同センターは、2014 年に、高価値化学物質の多様なファミリーの微生物生産のために合成生物学の予測手法を利用するという野心的なビジョンを打ち出した。バイオ・ファウンドリのコンセプトをモデルにしたこのセンターは、挑戦的プロジェクトに取り組むための共同環境の中で、学際的なコア研究チームと幅広い学界のコミュニティを結びつけることに成功した。

同センターは、マンチェスター大学の Manchester Institute of Biotechnology (MIB) 内の化学、酵素工学、システム生物学（計算）、微生物研究の専門知識に裏打ちされた最先端の機器への広範かつ継続的な投資の恩恵を受けており、一連の革新的な DBTL (Design-Build-Test-Learn) ツールと技術を開発し、自動化された合成物に依存しない、大腸菌によるバイオ製造パイプラインに統合した。このパイプラインは、微生物により多様な化学物質をオンデマンドで生産するために、迅速なプロトタイピングを可能にしている。

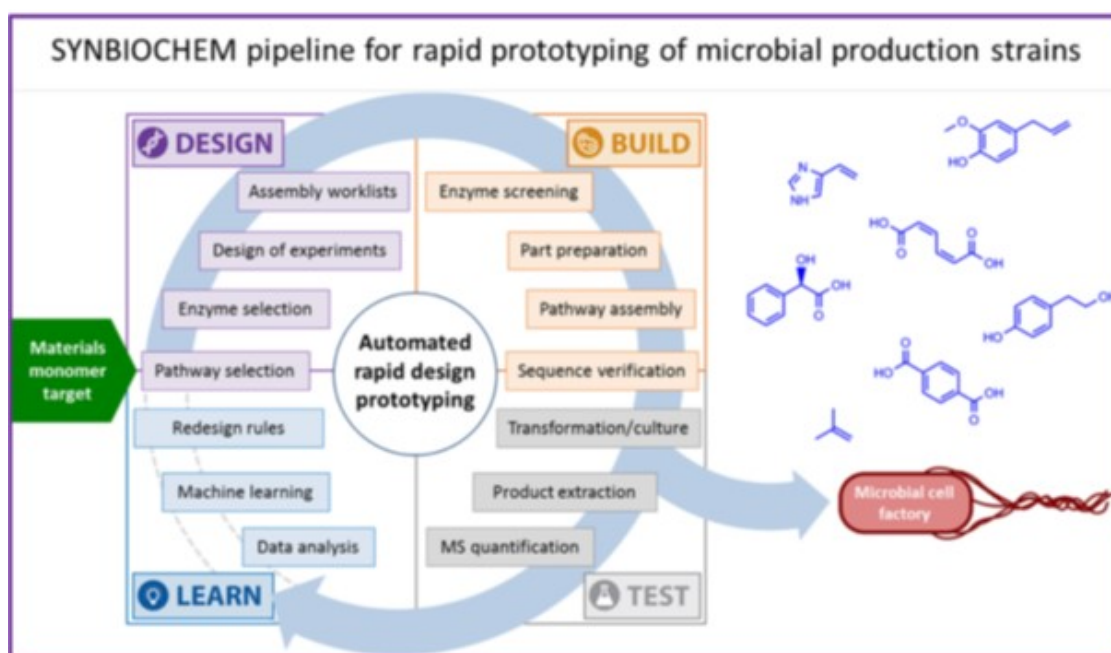


図 3-8 SYNBIOCHEM における微生物生産株の迅速なプロトタイピングに関するパイプラインのイメージ⁵²

⁵² <http://synbiochem.co.uk/wp-content/uploads/SYNBIOCHEM-Booklet-June-2020-1.pdf>

b) SYNBIOCHEM での研究開発

同センターにおける上記パイプラインの能力を実証するために、同センターは、表 3-9 に示したように、商業的にも関心が高い、多様性のある新しいアルカロイド、フラボノイドおよびテルペノイドをターゲットとしてそれらの生産とスケールアップを加速させることを目的としたプロジェクトを実施している。

表 3-9 アルカロイド、フラボノイドおよびテルペノイドを実証のターゲットとする理由

ターゲットとする化学物質	実証のターゲットとする根拠
アルカロイド	最も重要な医薬・農薬化合物の多くを構成する、天然由来の生理活性化合物群である。
フラボノイド	医薬品開発のための植物由来フラボノイドの改変に関する研究は、その生物学的な利用可能性が低く、複雑な化学合成が複雑であり、植物における生合成経路の理解が不足しているため、十分に実施されていない。
テルペノイド	香料、フレーバー、医薬品、殺虫剤、ポリマーなどの幅広い用途に使用され、高価値の化学物質を合成するためのビルディングブロックとなる。

同センターとマンチェスター大学は、幅広いアプリケーションを持つ高性能材料の開発を中心とした一連の合成生物学イニシアチブをスタートした。この研究は、合成生物学、付加製造技術、材料／ポリマー科学および関連分野の専門知識を活用している。以下は、実施されている研究の一例である。

- ・ 安価な飼料ストックからスタートし、細菌宿主の中で新しい経路を特定し、改変することで、高度な特性を持つ新しい生体材料の持続可能な生産を可能にする。
- ・ バイオマテリアル研究の確立された分野を超えてインパクトを与え、生物学に由来する、あるいは生物学に触発された材料（バイオミメティクス）を巻き込んだ新たな機会を開発している。例えば、クモの糸のタンパク質は、鉄よりも引っ張り強度が高いことが知られており、リンペットを岩に固定するタンパク質の糖接着剤は、どんな合成接着剤よりも水中での強度が高いことが知られている。

同センターは、特にバイオベースの化学品製造、バイオ治療薬、新規バイオマテリアルにおいて、バイオベース経済のための英国のビジョンを実現するために果たすべき大きな役割を担っており、DSM、GSK、BASF、Shell、Lifetech などの企業と共同研究を行っている。

3) RRI

RRI とは、社会の関与を考慮し、研究とイノベーションが有する社会的、倫理的、公平的、環境的な意味合いおよび便益について、オープンにかつ焦点を当てた検討のプロセスである。RRI は、新しい概念であると同時に古い概念でもある。科学、技術およびイノベ

ーションの発展における責任の問題についての議論は、半世紀以上も前から行われてきた。しかし、科学に対する研究倫理の枠組みを適用することに焦点を当てた議論から、科学的実践や技術開発および新興技術が有する社会的な意味合いを含め、より広いトピックに枝分かれした議論へと発展してきた。これは、科学的実践が価値のないものとみなされるべきではなく、経済、環境および社会に及ぼす新興技術の潜在的なプラスとマイナスの影響を考慮に入れるべきであるという事実への関心が高まったことを意味している。このような考え方は、責任の概念化に関する学術的研究をさらに推し進めただけでなく、新興技術が有する潜在的な影響に関連した固有の不確実性に対処することを目的とする技術評価組織と技術評価の実践に関して大きな影響を与えた。

学術界や政策界では、RII 以前のアジェンダやプログラムは、ELSA (Ethical, Legal and Social Aspects) や ELSI として知られてきたが、これらは、新興技術の倫理的、法的および社会的な側面や意味合いを表す略語である。これらのアジェンダは、主に科学者と社会科学者間の学際的な共同研究に基づいていたが、科学的実践に変化をもたらすこと、またこれら 2 つの科学者グループ間の統合的かつ生産的な関係性を提供することに失敗したと批判されてきた。

現在、英国では、科学的なアクターやイノベーターに対して、責任を「規定すること」を求める声が複数挙がっている。その声は、研究活動に対する倫理的行動規範の適用や研究を設計し、その成果を商業化する際の科学者やイノベーター自身の価値観や関心事についての考察から、科学、技術およびイノベーションの潜在的な影響や利益に関する予測や評価まで多岐にわたる。これらの目標には、社会科学との共同を奨励するという学際的な性質を備えている。

重要なことは、これらの目標を達成するには、市民社会や産業界の代表者などの他のアクターの関与も必要とすることである。このように、RRI の共同には学際的な側面も含まれている。RRI のための単一のグローバルなビジョンは存在しないが、この概念に関連するアプローチや方法に関する目的は、以下の 4 つの幅広いカテゴリに分類されると考えられている。

- ・ 研究とイノベーションにおける倫理的・社会的側面の識別と評価
- ・ 研究とイノベーションのリスクおよび潜在的なプラスとマイナスの影響の識別・評価
- ・ 研究とイノベーションにおける社会と技術の統合および学際性
- ・ 研究とイノベーションにおける公共とステークホルダーの関与

RRI は、EU で実施されている Horizon 2020 プログラムの横断的テーマとして、気候変動や高齢化などを含む様々な社会的課題に対する解決策を提供しながら、研究とイノベーションの成果を欧州社会の価値観、ニーズおよび期待されるものと整合させるための枠組みとして構想されている。このようにして、RRI は、「Science with and for Society (社会とともにある科学、社会のための科学)」として知られる EC プログラムの包括的な概念として生まれ、市民社会を含むすべての利害関係者が、科学教育、研究課題の定義、研究の実施、研究成果へのアクセスおよび社会における新しい知識の応用 (男女平等、研究にお

けるジェンダーの問題および倫理的配慮を十分に尊重する) に関して協力して取り組むことが求められるようになった。

英国の研究者たちは、これらの考えを基に、科学とイノベーションのガバナンスは、より先を見通すこと、反映させること、参加すること、対応することであるとし、RRI の概念を運用できるようにするためのフレームワークを開発した。2013 年、EPRSC (バイオテクノロジー・生物科学研究会議) は、BBRSC (バイオテクノロジー・生物科学研究会議) との共同出資のイニシアチブとして、英国内の 6 つの SBRCs (合成生物学研究センター) にて RRI に特化した活動を行うことで、RRI の実践的な運用を推進してきた。RRI の実践を先駆的に進めている。RRI に特化した活動を推進している SBRCs⁵³の一つが、マンチェスター大学マンチェスター・バイオテクノロジー研究所にある SYNBIOCHEM である。

同センターは、研究者、産業界、政策立案者、NGO およびその他の利害関係者が、科学・イノベーションの初期段階で合成生物学の利点とリスクを予測し、意思決定 (商業的に実行可能で社会的に有用な製品とプロセスをどのように提供するか) に反映させるためのプロセスと対話を促進している。

同センターにおける合成生物学研究には、RRI プラットフォーム (図 3-9 参照) が組み込まれており、合成生物学が直面する倫理的・規制的側面に関する主要なプログラムを開発している。これには、研究とイノベーションの経路に関するリアルタイム評価・予測、倫理的・法的・規制的な問題の予測、RRI に関する教育・トレーニングなどが含まれる。

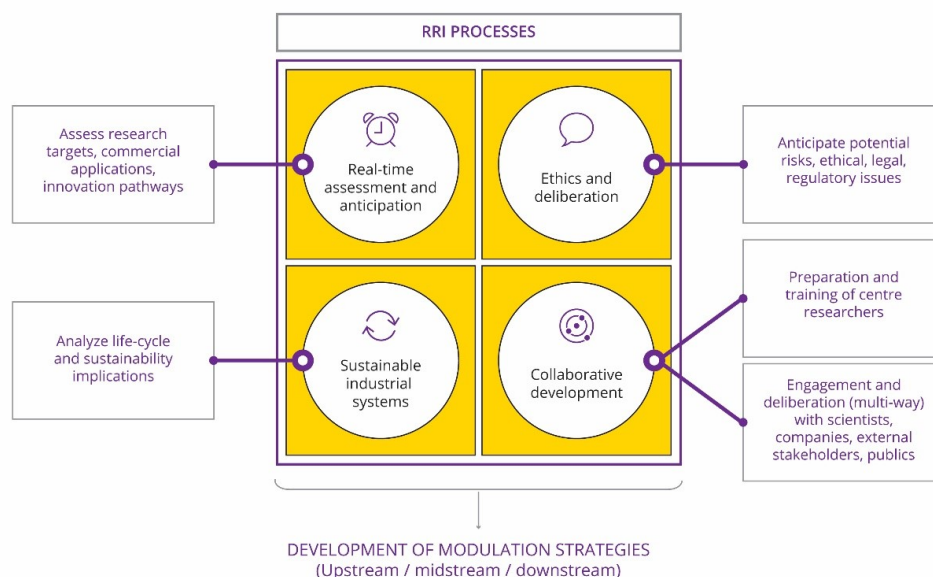


図 3-9 SYNBIOCHEM における RRI プラットフォームの構成⁵⁴

⁵³ RRI に特化した活動を推進している SBRCs は、SYNBIOCHEM の他、BrisSynBio、SynBio、OpenPlant、UK Centre for Mammalian Synthetic Biology Research、WISB である (表 3-7 参照)。

⁵⁴ <http://synbiochem.co.uk/responsible-research-and-innovation/>

(3) 中国

1) 科学技術政策におけるバイオテクノロジーの位置づけの変遷

中国において、合成生物学を含むバイオテクノロジーの研究開発が促進されるきっかけとなったのは、2006年に中国政府の制定した科学技術に関する中長期計画「国家中長期科学技術発展計画要綱」以降であろう。同計画では、バイオテクノロジーを将来のハイテク産業においてキャッチアップを図るための重点と位置づけた。さらにバイオテクノロジーにおける「先端技術（次世代のハイテク及び新興産業の重要な発展の基礎となり、国家のハイテクイノベーション能力を総合的に体现する技術）」として、①標的分子の発見・同定技術、②動植物品種と医薬品の分子設計技術、③遺伝子操作とタンパク質工学技術、④幹細胞に基づく人体組織工学技術、⑤次世代産業バイオテクノロジー、が掲げられた。

また、バイオ産業に関する第11次五か年計画（2006～2010年）「バイオ産業発展第11次五か年計画」では、バイオ産業を重点育成すべきハイテク技術の支柱産業と位置付けられた。

この時期以降、合成生物学分野においても、研究施設の創設や、研究プロジェクトの立ち上げが多くみられるようになった。この傾向は、2010年10月に「国務院による戦略的新興産業の育成と発展の加速化に関する決定」が発表され、バイオ産業が戦略的新興産業として位置づけられると、ますます加速することとなった。

第13次五か年計画（2016～2020年）では、戦略的新興産業の育成に関し「合成バイオ技術と再生医療技術を迅速に発展させる」ことが明記された。さらに、戦略的新興産業に関する5ヵ年計画「国家戦略的新興産業発展第13次五か年計画」では、2020年にはバイオ産業規模を8-10兆元とし、強い国際競争力を持った新型バイオテクノロジー企業とバイオ経済群を形成する、との目標が明記された。その実現のための重点分野を、以下のとおり示した。

表 3-10 バイオ産業の創出、バイオ経済の発展にかかる重点分野（2016-2020年）

重点分野	内容
バイオ医薬新体系の構築	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子検査（DNA シークエンシング）、大規模細胞培養、標的型・長期間有効な薬物送達、グリーンスマート生産等の技術研究開発の応用により、ハイエンドな産業発展を目指す。 新型抗体・ワクチン、遺伝子治療、細胞治療等のバイオ製品や製剤を開発し、科学薬物イノベーションとハイエンド製剤開発を推進し、特色のある革新的な漢方薬の研究開発を加速化し、重大疾病の予防・治療と薬物の新規開発を実現する。
生体医工学の発展水準の向上	<ul style="list-style-type: none"> スマートでモバイルの新型医療設備（例：全方位型の遠隔操作可能な医療サービスプラットフォーム）の発展。 高性能医療設備とコア部品の開発（例：高品質の医学映像設備、先進放射治療設備、ハイスループット低コストのDNA シーケンサー、遺伝子編集設備） 付加製造技術（注：3D プリンティング）を用いて組織器官の修復や代替材料及び挿入のための医療器械製品のイノベーションと産業化。
バイオアグリカルチャーの	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝子編集、分子設計、細胞変異等のコア技術イノベーショ

重点分野	内容
産業化の発展	ンと育種応用を実現。 <ul style="list-style-type: none"> バイオ技術による新品種育成の産業化推進。 食品における合成バイオ技術や、腸内フローラのメタゲノム解析等のキー技術イノベーションの推進と精密栄養食品の創出。
バイオ製造の大規模な応用の推進	<ul style="list-style-type: none"> 有機酸、化学アルコール、オレフィン、アルカン、有機アミンなどの基礎化学製品の生物学的手法による製造と応用を実現する。 バイオベースポリエステル/ポリウレタン、バイオナイロン、バイオゴム、微生物多糖類といったバイオベース材料の産業チェーン化、集積化、大規模化の発展を推進。
バイオサービスの新業態の育成	<ul style="list-style-type: none"> 規則に則った液体生検、遺伝子診断などの新型技術診療サービス機構の育成。 健康診断や健康相談、モバイルヘルス（携帯情報端末を積極的に医療に導入することで個人の健康を高める）等の健康管理サービスの発展。
バイオエネルギーの発展モデルの創出	<ul style="list-style-type: none"> 発電、ガス供給、熱供給、燃料などの分野でバイオエネルギーを全面的かつ大規模な応用。 石炭をバイオマス成型燃料で代替した集中的な熱供給を実施し、バイオマスコージェネレーションを促進。 大型のバイオマス集中ガス供給原料の処理、高効率のメタンガスの嫌気性発行等のキー技術のボトルネックを解消。

また、科学技術イノベーションに関する5カ年計画「国家科学技術イノベーション第13次五か年計画」では、国家重大特別プロジェクトのテーマとして、「遺伝子組み換えによる新品種の育成」「重大な新薬の発明」「エイズ、ウイルス性肝炎など重大な伝染病の予防・治療」が列挙され、産業技術の国際競争力の向上において「先進バイオ技術」、基礎研究の強化において「農業における生物の遺伝的改良」「医学免疫学」「タンパク質複合体と生命過程の制御」「幹細胞研究及び臨床へのトランスレーション」「発達における遺伝と環境の相互作用」「合成生物学」「ゲノム編集」が挙げられている。

2) 中国における合成生物学の普及

a) 研究動向⁵⁵

中国において合成生物学研究が本格化するのには、2010年以降である。科学技術部が2010年に始動したタンパク質研究国家重大科学研究計画⁵⁶では、合成生物学が研究対象として取り上げられることとなった。

その他の競争的研究資金制度においても、合成生物学に関する多くの研究プロジェクトが採択された。同制度の1つである「国家重点基礎研究発展計画（973計画）」では、2010年以降、毎年2つの合成生物学に関する研究プロジェクトが始動している。

⁵⁵关正君、魏伟、徐靖「合成生物学研究进展及其风险」2015年6月、中国生物多样性保護国家委員会ウェブサイト<<http://cncbc.mee.gov.cn/kpzs/rsswdyx/201506/P020150616593837746632.pdf>>; 江会锋「合成生物技术助力可持续发展」『生物技术通报』2020, 36(4):I-II。

⁵⁶「国家重大科学研究計画」とは、973計画の一部であり、タンパク質研究の他に、量子制御、ナノサイエンス、発育・生殖、全地球的变化、幹細胞研究の5つがある。

973 計画で初めて採択された研究プロジェクトは、「細胞工場の人工的合成」である。微生物細胞の代謝ネットワークを研究対象とし、標的化学物質の生合成経路を設計し、合成にかかる DNA 因子を発見・合成し、制御機能を備える分子モジュールを合成することで、標的製品のための人工的な代謝経路を形成するなどし、高効率の合成能力を有する人工細胞工場を形成するという内容である。

翌年 2011 年には、「新機能を有する人工的な生物の構成要素の構築・統合」「微生物由来の医薬品のイノベーションと大量生産のための人工合成システム」というプロジェクトが採択された。前者はイノベーションと高効率の DNA 合成・スプライシング (DNA から写し取った遺伝情報から不要部分を取り除く分子的編集作業) にかかる技術システムの確立、生物の構成要素の合成と特性評価、モジュール設計と集積・組み合わせ等の工程のためのプラットフォーム形成等を目指す。後者は微生物由来の医薬品の合成プロセスに係る諸問題を解決することで、医薬品にかかる生物合成の効率化を図ろうとする研究である。

その他の競争的研究資金制度の「国家ハイテク発展計画 (863 計画)」や国家自然科学基金においても、人工細胞工場、光合成を模倣した人工葉、新機能を有する人工的な生物の構成要素と生物と化学を組み合わせた合成システム、といったプロジェクトが採択されている。

2018 年には国家重点研究開発計画「合成生物学重点特別プロジェクト」が開始され、ゲノムの人工合成、高機能のシャーシ細胞、人口転写因子と遺伝子回路、人工細胞の合成代謝と複雑な生態系、実現技術システム、生命倫理・安全評価、といったテーマでプロジェクトが募集されている。

このように研究プロジェクトが盛んにおこなわれるなか、倫理的観点から物議を醸し出す研究事例も出てきている。

2018 年 11 月に南方科技大学の賀建奎元准教授が「遺伝子編集により HIV ウィルスに耐性のある遺伝子をもつ双子の女兒を誕生させることに成功した」と発表した⁵⁷が、国内外で批判を浴び、深圳市の裁判所にて、懲役 3 年、罰金 300 万元の判決を下された⁵⁷。

また、2019 年には中国科学院昆明動物研究所と米ノースカロライナ大学の共同研究チームが、ヒトの「MCPH1」遺伝子のコピーをアカゲザル 11 匹の脳に移植したところ、ヒトの脳と同様に脳の発達速度が緩やかになり、短期記憶や反応時間の試験で対照群の野生の猿より成績がよかったとの研究成果を雑誌『国家科学評論 (National Science Review)』に発表し⁵⁸、倫理面から批判の声が上がっている。

b) 研究施設の設定動向

中国科学院 (Chinese Academy of Sciences: CAS) 傘下に複数の合成生物学・ゲノム研究所が設置されている。

⁵⁷ 「“基因编辑婴儿”案一审宣判 贺建奎等三被告人被追究刑事责任」2019 年 12 月 30 日、新华网 <http://www.xinhuanet.com/2019-12/30/c_1125403802.htm>

⁵⁸ 「中国科学家首次在猴中转入人脑基因」2019 年 4 月 15 日、财新网 <<https://science.caixin.com/2019-04-15/101404121.html>>

ゲノム研究については北京ゲノム研究所⁵⁹、国家ゲノム研究センター⁶⁰がある。合成生物学については天津工業生物技术研究所⁶¹、深圳先進技術研究院合成生物学研究所⁶²、合成生物学重点实验室⁶³がある。

深圳先進技術研究院合成生物学研究所では3つの合成生物学・ゲノム研究センター（定量合成生物学研究センター、合成ゲノミクス研究センター、合成生物化学研究センター）の運用がスタートする等、合成生物学・ゲノム研究の若手研究者の育成とともに、この分野の研究に巨大な投資を行っている。

大学機関では、上海交通大学微生物代謝国家重点實驗室、天津大学教育部合成生物先端科学センターがある⁶⁴。

c) 国際協力及び国外での活動

合成生物学分野では、中国は海外との共同研究や、国際大会への参加も積極的に行っている。

マサチューセッツ工科大学で毎年開催される学生主体の合成生物学の国際大会 International Genetically Engineered Machine competition (iGEM) には、2005年に初めて参加して以来、中国の主要大学から多くのチームが参加し、上海科技大学や浙江大学等を始めとするチームが金メダルを獲得している⁶⁵。

研究面では、2007年11月、天津大学と英エディンバラ大学は「エディンバラ大学-天津大学システム生物学・合成生物学研究センター」を共同設立している。

2010年には、米国科学アカデミー、全米技術アカデミー、英国王立学会、英国王立工学会アカデミー、中国科学院、中国工程院の6機関の共催による合成生物学の国際シンポジウムの開催で合意し、2011年に上海で開催された⁶⁶。

同じく2010年、米国コールド・スプリング・ハーバー研究所は中国で「コールド・スプリング・ハーバー・アジア会議」というプラットフォームを立ち上げ、2012年には蘇州にて合成生物学をテーマとするシンポジウムを開催している⁶⁷。

⁵⁹ 北京基因组研究所/ Beijing Institute of Genomics<<http://www.big.cas.cn/>>

⁶⁰ 国家基因研究中心/ National Center for Gene Research<http://www.ncgr.ac.cn/cn_index.asp>

⁶¹ 天津工业生物技术研究所 / Tianjin Institute of Industrial Biotechnology<<http://www.tib.cas.cn/>>

⁶² 深圳先进技术研究院合成生物学研究所 /Institute of Synthetic Biology (iSynBio)
<<http://isynbio.siat.ac.cn/>>

⁶³ 中国科学院合成生物学重点实验室<http://www.bulletin.cas.cn/publish_article/2018/11/20181116.htm>

⁶⁴ 江会锋、前掲。

⁶⁵ 「喜報！上科大学生获得国际基因工程机器大赛（iGEM）金牌」2020年11月27日、上海科技大学、<<https://www.shanghaitech.edu.cn/2020/1127/c1001a57993/page.htm>>; 「浙大学子参加2020年iGEM基因工程机械大赛再获金牌！」2020年11月25日、浙江大学、<<https://www.zju.edu.cn/2020/1125/c32861a2220592/pagem.htm>>

⁶⁶ 「中美英合成生物学研讨会在沪召开」2011年10月13日、生物谷
<<https://news.bioon.com/article/6526275.html>>

⁶⁷ 关正君、魏伟、徐靖、前掲。

3) 合成生物学研究の倫理に関する政策

a) 中国国内の動き

中国においても、合成生物学は科学の進歩を促進し、人間の幸福に貢献する一方で、生物倫理的配慮と生物安全性のリスクを伴う「両刃の剣」と見なされている。新しい生物を評価するには、合成生物学の管理文書と規制を改善し、実験室での作業ファイリングシステムを確立して標準化し、専門家向けの安全教育とトレーニングを強化し、科学普及プラットフォームを確立し、世論を合理的に導く必要があると認識されている。したがって、合成生物学の健全な発展には、生物倫理に関する研究、教育、政策および規制に関する研究とその定式化が伴わなければならないとしている⁶⁸。

中国科学技術部は、華中科技大学と関連チームが実施した 2018 年合成生物学重点特別プロジェクトで、合成生物学の健全な発展に関連する研究を開始した。2019 年 7 月 24 日には、中央全面深化改革委員会第 9 回会議で「国家科学技術倫理委員会編成計画」が審議され、承認された。2020 年 10 月 17 日には、第 13 回全国人民代表大会常務委員会において、「バイオセーフティ法（生物安全法）」が可決され、2021 年 4 月 15 日より施行される⁶⁹。

b) バイオセキュリティ問題における米国との関係

2019 年 7 月 26 日、米国ワシントン D.C.にて、ジョンズ・ホプキンス健康安全保障センター（Johns Hopkins Center for Health Security）と天津大学バイオセーフティ研究・戦略センターの共催により、「合成生物学時代のバイオセーフティとバイオセキュリティ：中国と米国の課題に答える（Biosafety and Biosecurity in the Era of Synthetic Biology: Meeting the Challenges in China and the U.S.）」ワークショップが開催された⁷⁰。

米国と中国は、合成生物学に関する基礎・応用研究および投資において最先端を走っており、国際的にも、急速に発展するこの分野の主導国として、合成生物学の研究と応用に関連したバイオセーフティとバイオセキュリティを推進する責任を共有していると認識されている。このワークショップは、中国と米国の技術・政策専門家、ならびに、欧州の専門家が一堂に会し、各国の現在のガバナンス構造について相互理解を深め、合成生物学時代のバイオセーフティとバイオセキュリティに関するグローバルな政策を推進するために何が必要かについて対話を開始することを目的としたものである。

本ワークショップには、米国、中国および欧州から研究者、政策立案者およびその他関係者 100 名以上が集まり、バイオセーフティとバイオセキュリティに関して議論が行われ、以下の 6 つのパネルセッションが行われた⁷¹。

- ・ パネル 1：合成生物学が約束するもの

⁶⁸ Xian-En ZHANG, “Synthetic biology in China: Review and prospects,” *Scientia Sinica Life*, Volume 49, Issue 12, pp1543-157, 2019.

⁶⁹ 「中华人民共和国生物安全法」中国人大網

<<http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/202010/bb3bee5122854893a69acf4005a66059.shtml>>

⁷⁰ Thomas Inglesb et al., “Biosafety and biosecurity in the era of synthetic biology: Meeting the challenges in China and the U.S.,” *Journal of Biosafety and Biosecurity*, Volume 1, Issue 2, pp73-74, September 2019.

⁷¹ Ibid.

- ・ パネル 2：近い将来の合成生物学の機会と課題
- ・ パネル 3：先端ライフサイエンスの監視のための新たな課題と将来のガバナンスの選択
- ・ パネル 4：合成生物学時代の国際協力の可能性の探索
- ・ パネル 5：責任ある科学を推進するための次世代リーダーの育成
- ・ パネル 6：デュアルユース技術がもたらす課題：実務家のための戦略

米国、中国および欧州のワークショップ講演者と参加者の間で、合成生物学の研究を守るためには、バイオセーフティや合成生物学のガバナンスへの関心を高めることが必要であるという意見が一致したとされる。参加者はまた、現在、合成生物学の国際的なガバナンス体制が整っていないことを考慮し、合成生物学の研究と投資をリードする中国と米国が、世界の専門家や政策立案者と協力して、合成生物学研究における責任ある行動を促進するための規範や基準を確立することを求めたとされる⁷²。

ジョンズ・ホプキンス健康安全保障センターと天津大学バイオセーフティ研究戦略センターの主催者は、これらの議論を継続するために、追加のセッションを計画することに合意した。このセッションは、2020年に中国で開催されることが暫定的に予定されていた⁷³が、両国間でコロナウイルス感染症の問題等が深刻化するなか、当該セッションに関する公式な情報は出ていない。

3.1.5 日本の合成生物学研究の取組みの現状と問題点

国内でも合成生物学を専門とする研究者は少なからず存在しているが、研究者自身の専門性や興味となるテーマを追求する研究が多く、産業応用を目的とするというよりも基礎研究に近いものが多い。これは、これまで、欧米のように、合成生物学を、将来の経済・産業活動に大きなインパクトを与える重要な新興技術として捉え、バイオエコノミーの展開を図るための国家戦略が無かったことに起因すると言っても過言ではない。

このような中、ようやく、2019年に内閣府により「バイオ戦略」が策定され、日本の合成生物学研究が新しい展開を迎えようとしているが、欧米及び中国における産学官による合成生物学への投資や研究活動への支援の大きさを鑑みると、国内におけるバイオエコノミーの展開の観点から、検討すべき重要な点が見受けられる。

本項では、これを踏まえ、内閣府のバイオ戦略の課題と今後国内で検討すべき重要な点について、大局的に整理する。

(1) 内閣府のバイオ戦略の課題

欧米や中国を中心とした海外では、合成生物学やそれを支える IT 技術の進展により、第 2 次バイオテクノロジー技術革新が加速し、バイオエコノミーは国外で急速に拡大し始めている。一方、我が国は、バイオ分野に対する国家戦略が 10 年空白であったこともあり、合成生物学の潮流に乗り遅れ、その結果、バイオ分野での国際的プレゼンスの低下が深刻化するなか、2019年に内閣府によって「バイオ戦略 2019」（令和元年 6 月 11 日：統合イ

⁷² Ibid.

⁷³ Ibid.

ノベーション戦略推進会議決定)が策定され、関係省庁が動き出し、さらに2020年6月には新型コロナウイルス感染症後の経済回復への施策を加味した「バイオ戦略2020」(令和3年1月19日統合イノベーション戦略推進会議決定)⁷⁴が策定された。

2.1 2030年に向けた全体目標

- ・ 全体目標として「2030年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現」掲げる
 - ・ 「世界最先端のバイオエコノミー社会とは、以下の3つの要素が実現している状態を想定
- ① **バイオファースト発想**
 - ・ 持続可能な生産と循環による Society 5.0 の実現のために、バイオについての倫理的・法的・社会的問題について議論できる環境の下、まずバイオでできることから考え、行動を起こせる社会を実現
 - ② **バイオコミュニティ形成**
 - ・ 経営者をはじめ社会を主導する立場の者から市民に至るまでバイオファースト発想が根付き、国際連携・分野融合・オープンイノベーションを基本とし、世界のデータ・人材・投資・研究の触媒となるような魅力ある国際的なコミュニティを形成
 - ・ 国際的なコミュニティが中核となり、各地域とのネットワークが構築され、ヒト・モノ・カネの好循環が生まれ、各々特色あるバイオによる持続可能な循環型コミュニティ・健康的な生活を送れるコミュニティを形成
 - ・ これらのコミュニティ群を、我が国のバイオエコノミー社会の姿として世界に示し、国内外から共感される「バイオコミュニティ」モデルを世界展開
 - ③ **バイオデータ駆動**
 - ・ バイオとデジタルの融合により、生物活動のデータ化等も含めてデータ基盤を構築し、それを最大限活用することにより産業・研究が発展
 - ・ 国際標準となる測定法・測定機器を生産システムに組み込み、世界で一番生物の活動をデータにできる国を実現
- ・ 2019年度中に、継続的に戦略全体の状況を把握する KPI²⁰について、そのデータ取得体制、国際情勢等を含め官民で検討し、設定²¹

図 3-10 「バイオ戦略2019」における全体目標の部分
(「バイオ戦略2019」より一部抜粋)⁷⁵

このバイオ戦略こそが、現時点での日本政府による合成生物学に対する最も大きな取り組みである。バイオ戦略の中身は今後毎年見直されるが、全体目標「2030年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現させる」を今後10年間一貫して目指すことが明言されている。ここでの「世界最先端のバイオエコノミー社会」とは、「バイオファースト発想」「バイオコミュニティ形成」「バイオデータ駆動」という3つの要素が実現している状態を想定され、これを実現するための5つの基本方針として「市場領域設定・バックキャスト・継続的なコミット」「バイオとデジタルの融合」「国際拠点化・地域ネットワーク化・投資促進」「国際戦略の強化」「倫理的・法的・社会的問題への対応」が設定されている。

また、これら5つの基本方針は、大型投資を見込め、成長性が高いと判断された、図3-11に示す9つの市場領域での競争力強化を目指したより具体的な方策の実施に落とし込まれ

⁷⁴ <https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>

⁷⁵ https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio2019_honbun.pdf

ることになっている。

[参考] 社会像と市場領域

< 社会像 >			
すべての産業が連動した循環型社会	多様化するニーズを満たす持続的・一次生産が行われている社会	持続的な製造法で素材や資材をバイオ化している社会	医療とヘルスケアが連携した未来く社会参加できる社会

< 市場領域 >	
① 高機能バイオ素材 (軽量性、耐久性、安全性) <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> 軽量強靱なバイオ素材市場の拡大が予測 素材技術・利用領域（車等）に強み
② バイオプラスチック (汎用プラスチック代替) <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> 海洋プラスチックごみによる環境汚染等が世界的課題 プラスチックの適正処理・3Rのノウハウ等に強み
③ 持続的・一次生産システム <small>とりまの番号：農林水産省</small>	<ul style="list-style-type: none"> 急成長するアジア・アフリカの農業生産性の向上が課題、食ニーズ拡大 世界レベルのスマート農業技術等に強み
④ 有機廃棄物・有機排水処理 <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> アジア等の成長により廃棄物処理・環境浄化関連市場の拡大が予測 世界最高レベルの廃棄物・排水処理に強み
⑤ 生活習慣改善ヘルスケア、機能的食品、デジタルヘルス <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> 生活習慣病増加、健康関連市場が拡大、デジタルヘルスに各国が着目 健康長寿国である健康データに強み
⑥ バイオ医薬・再生医療・細胞治療・遺伝子治療関連産業 <small>とりまの番号：健康・医療戦略室</small>	<ul style="list-style-type: none"> バイオ医薬品等の本格産業化と巨大市場創出が期待 伝統的基礎研究基盤、細胞培養技術に強み
⑦ バイオ生産システム<工業・食料生産関連 (生物機能を利用した生産)> <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> 生物機能を利用した生産技術が米国を中心に急成長中 微生物資源・生物資源、発酵技術に強み
⑧ バイオ関連分析・測定・実験システム <small>とりまの番号：経済産業省</small>	<ul style="list-style-type: none"> バイオ産業の基盤として、大幅拡大が期待 先端計測技術、ロボティクス等要素技術に強み
⑨ 木材活用大型建築、スマート林業 <small>とりまの番号：林野庁</small>	<ul style="list-style-type: none"> 木造化は温室効果ガス削減効果が高く、欧州、北米中心に着目 スマート林業に特長性、木造建築技術、美しい設計、施工管理に強み

図 3-11 「バイオ戦略 2020」に示された 9 つの市場領域
 (「バイオ戦略 2020 (基盤的施策) のポイント」⁷⁶より抜粋)

上記の説明からもわかるように、バイオ戦略は産業や経済の発展を指向した施策で、その目標はあくまで「バイオエコノミー社会の実現」であり、外交・安全保障の観点相対的に弱い。上述の基本方針の 1 つに「国際戦略の強化」は含まれており、「バイオ戦略 2019」では、「4.8 国際戦略の強化」と項目を設け、図 3-12 のように課題と今後の取り組み（担当省庁）が記載されているものの、「守りながら攻める」という経済と安全保障の両輪のバランスが取れているとはいえない。

⁷⁶ 内閣府特命担当大臣（科学技術政策担当）竹本直一、「バイオ戦略 2020 (基盤的施策) のポイント」、内閣府資料、2020 年 6 月

4.8 国際戦略の強化

4.8.1 課題

- ・ バイオ分野について、市場動向、政策・規制動向、データ、人材、投資、技術動向等に関する情報を収集・集約する体制が確立していない
- ・ 海外市場の獲得に必要な標準化、国際規制調和、再生可能な生物資源の安定確保の観点から外交ツールの活用が必要

4.8.2 取組

- ・ 2019 年度中に、情報収集を行う重点国・地域及びこれを担う関係機関等を検討し、定期的に市場動向、政策・規制動向、データ、人材、投資、技術動向等に関する情報を収集・集約する体制を確立⁴⁶【全府省庁】
- ・ 政府開発援助による支援、資金配分機関による実証事業等を最大限活用し、我が国の先進技術の海外市場への展開、海外市場の獲得に必要な標準化、国際規制調和、再生可能な生物資源の安定確保を推進【健康医療、科技、外、厚、農、経】

図 3-12 「バイオ戦略 2019」における国際戦略の部分
(「バイオ戦略 2019」より一部抜粋) ⁷⁷

さらに、「バイオ戦略 2020」では、9つの市場領域それぞれにおける「国際戦略」に対する取り組みが掲げられているが、その文言をみると、安全保障の観点がさらに薄まっている。国際戦略に対する取り組みを掲げていない市場領域があり、国際戦略の取り組みを記載している市場領域でも従来型の国際協調という枠組みに留まっている。

この経済重視、技術開発優先の現状は、日本がバイオ分野での大幅な遅れを取り戻すためには致し方ないとも言える。しかしながら、もしうまく「守りながら攻める」ことができれば、大幅な遅れを取り戻すどころか、日本がこれまで培ってきた周辺分野とバイオ主流分野を融合させることで、世界のバイオエコノミーを牽引できるかもしれない。以下、バイオ戦略を手摺りにしながら、現在の日本バイオの課題を挙げつつ、「守りながら攻める」ことを前提にした、新しい価値をバイオで創造する土壌を日本に築くための道筋を描いてみる。

バイオ戦略の冒頭では、合成生物学によるバイオ産業革命が明記されているものの、バイオ戦略の具体的な取り組みの中では、合成生物学を基軸とする取り組みが少ない。この要因は「合成生物学の本質が十分理解されていない」という現状にある。本質が理解できていないので、それを発展させる政策も、それを守る方策も、設計・実行できないであろう。

合成生物学とは、方法の学問なのである。具体的な研究対象に対して適用する新しい方法や見方を提供する学問であり、世界や社会を悩ます課題を解決するための新しい方法や戦略を生み出す学問である。約 35 億年の進化のおかげで地球上に生まれた多種多様な生物システムから、その一部分を従来とは異なる視点と方法で取り出して部品としてそのまま使ったり、それをさらに模倣したり、また複数の異なる部品を組み合わせたりして、新しい価値を創り出すのが合成生物学である。従来の生物学では「観察」が基本であったの

⁷⁷ https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio2019_honbun.pdf

に対し、合成生物学では生物システムに高度に介入し、生物学の工学化を加速させている。

これが現実的になってきた最大の技術的要因の一つは、ゲノム技術の驚異的革新である。生命の設計図であるゲノムを大規模に格安で高速に解読できるようになった**ゲノム解読**技術に加えて、狙ったゲノム部位を好きなように改変できる**ゲノム編集**技術および、ゲノム編集よりも大規模にゲノム全体を設計し、合成できる**ゲノム構築**技術の驚異的な発展にある。合成生物学分野では、社会の課題に照らし合わせ、部品あるいは模倣相手として活用すべきとして定めた生物システムをゲノムレベルから改良し、活用することで、課題解決につなげる。前項で述べたように世界の合成生物学は、農林畜産漁業、化学マテリアル、環境エネルギー、医薬健康といったあらゆる産業セクターにおいて様々な新価値を、ゲノム新技術群によって次々と創出している。これは今後も加速するのは明白である。地球上に存在する生物システムは微生物も含めるといまだ人類が把握できていないほど多種多様であることから、これらほぼ無尽蔵に存在する生物システムを起点に、ゲノム技術を活用することで、未来においても今日では全く想像できない新しい価値を合成生物学は量産し続けるであろう。

このように「方法の学問」である合成生物学に対して、バイオ戦略が「バイオファースト発想」を目標とすべき「世界最先端のバイオエコノミー社会」の一要素として掲げていることは高く評価できる。「バイオファースト発想」とは「自足可能な生産と循環による Society 5.0 の実現のために、バイオについての倫理的・法的・社会的問題について議論できる環境の下、まずバイオでできることから考え、行動を起こせる社会を実現」と、バイオ戦略 2019（令和元年 6 月 11 日）で説明されている。これこそまさに、合成生物学を方法の学問と捉え、バイオエコノミー社会における創造性を合成生物学で発揮するという行動規範を指し示している。

しかし上述のように、バイオ戦略の具体的プランニングと実行は、9 つの各市場領域の中で個別に行われているために、結局、各領域が従来から慣れ親しんだ方法に立ち戻っている印象が強い。そのため、提案されている今後の取り組みでは「バイオファースト発想」の思想は希薄となり、合成生物学的な要素が少ない。しかし「世界最先端のバイオエコノミー社会」を目指すのであれば、これ 9 つすべての市場領域が、合成生物学という方法と掛け算をするような体制が求められる。合成生物学という横串で異なる市場領域を貫き、異分野の融合も誘発する具体的な方策が必要であるが、市場領域で区分された現在の実施体制ではこれは難しいであろう。バイオ戦略では「バイオ戦略を推進する司令塔機能の強化」も目指しており、その司令塔にはこの合成生物学の本質に根ざした政策デザインと実施を期待したい。

(2) 今後国内で検討すべき重要な点：バイオ研究拠点施設の整備

「方法」である合成生物学を異なる業界や市場領域を貫く横串として機能させるためには、政策実施上の司令塔だけでなく、研究開発上の国家拠点も設けるべきである。バイオ戦略でも「バイオコミュニティ形成」を、目標とすべき「世界最先端のバイオエコノミー社会」の一要素として掲げており、バイオコミュニティの中核拠点としてバイオファウンダリ（バイオ研究拠点施設）が設置されつつある。最初に設置が進んでいるのは、大容量

細胞培養を可能とする施設であり、合成生物学においても微生物を用いた物質生産におけるスケールアップ試験に不可欠な施設である。発酵や醸造の長い歴史をもつ日本において、細胞培養は本来強い分野であるが、技術継承が遅れているため、ノウハウを含めた技術衰退が危惧されているが、このような培養施設において技術継承をしつつ、伝統的な発酵醸造技術の土台に、最新の合成生物学を組み上げていくことで日本独自の合成生物学の柱が一つ強固になるはずである。このような拠点形成では、技術管理と技術流出防止の利点もあることから、安全保障の観点からの体制づくりも必要である。

もうひとつ、緊急に必要な拠点が、上述の解説・編集・構築からなるゲノム工学技術を、様々な産業領域・市場領域が横断的に活用できる研究開発のための拠点である。このような国内研究開発拠点は現在存在しないため、アカデミアや企業でも各研究組織・グループが個別に必要な技術を導入しているのが現状である。しかし米英中の3カ国ではそれぞれ、合成生物学に特化した研究拠点を国内に整備し、そこに個別の企業やグループでは導入不可能な最新鋭の研究装置を揃えて、外部者が活用できるような体制が既に確立している。これは経済発展や技術開発を加速させられるだけでなく、技術管理も人材育成の観点からも非常に有益である。技術流出も集中的に監視できるため、安全保障上もメリットは大きい。このような、国益を重視した合成生物学に特化した研究開発拠点の整備は急務である。

合成生物学に特化した研究開発拠点は、米英中と同様に、国立研究所あるいは大学に設置するのが自然の流れであるが、国益を優先した研究開発拠点の設置には、従来のバイオ研究拠点とは異なる制度設計が必要であろう。現在国内でも合成生物学を冠する研究グループや研究グラントは少なからず存在しているが、各研究グループは研究者の好奇心を満たす個別研究であることが多く、またそれら研究テーマは、海外の合成生物学産業に対抗するための基盤となり得る研究というよりは、基礎研究としての生物学研究の傾向が強いものが多い。すなわち、「国益としての合成生物学研究開発」を推進している研究グループは意外に少ない。当然基礎研究としての生物学研究は重要であるが、「国益としての合成生物学研究開発」の比重がこれほど低いのは、先進国の中でも日本だけである。

この状況を危機と捉えるためにも、本項の冒頭で言及した合成生物学の本質を真に理解すべきである。合成生物学とは、生物システムを活用する方法を提示する学問であり、その方法を活用できる対象は既存のバイオ研究での対象よりも広い。様々なモノやコトが新しい価値を生み出す現代の錬金術こそが合成生物学であると捉えるべきであり、生物学のなかの一分野として合成生物学を捉えるのは絶対的に誤認である。同様に、ゲノムもまた生物学の一存在と見てはいては、ゲノムを自由自在に改変できる可能性の大きさを理解することができず、日本はバイオエコノミーでも後塵を拝することになるであろう。「ゲノム上に、特定の塩基配列情報を書き込めば、細胞システムを自由に操作・制御することができ、細胞代謝ネットワークを使って好きな物質生産が可能になる」という未来に向かって、海外は合成生物学を国策として推進している。繰り返すが、「国益としての合成生物学研究開発」を主導する拠点形成は急務である。

研究開発拠点を国主導で形成することに加えて、合成生物学のベンチャー企業を量産し、支援する政策も欠かせない。90年代に見た欧米 IT 産業の興隆でも、ベンチャー企業

が鍵となる要素技術開発の役割を担い、それを国や大企業が支えるという経済エコシステムが有効に機能したが、同様のエコシステムが合成生物学分野においてもすでに欧米では確立されている。しかし日本では、このようなエコシステム形成は進んでいない。合成生物学では、1つの新技術が、新方法を提示し、業界全体を変革する可能性の高い分野であるため、国策として合成生物学に特化したベンチャー支援制度を整え、世界で戦える合成生物学企業を育成する必要がある。

以上の拠点整備、ベンチャー支援を進める上では、バイオ人財の育成も鍵となる。我が国におけるバイオリテラシーの低さも無視してはいけない課題である。バイオ研究者の不足だけでなく、バイオ分野の価値を正しく評価できる機関、組織、人材の不足も深刻である。我が国において、合成生物学の真価を理解でき、正しい提案を進言できるシンクタンクがどれほどの数があるのだろうか。このような状況では、国外へのバイオ研究者の流出も今後深刻な問題になるであろう。

3.2 現時点でのニューロテクノロジー研究の特徴に関する俯瞰的な理解と整理

3.2.1 ニューロテクノロジーの定義

主として人間の脳や神経についての解明を目指す基礎科学であるニューロサイエンス (neuroscience) の技術的応用分野・領域を、ニューロテクノロジー (Neurotechnology) と呼ぶ。最も広範には「知見や方法論の応用にとどまらず、直接脳に関する「技術」の応用に絞ったドメイン」がニューロテクノロジーである⁷⁸。ニューロテクノロジーの具体的な定義については、『ネイチャー』、『サイエンス』、『ネイチャーバイオテクノロジー』、『ニューロン』、『セル』等の最有力誌を通覧しても、確たるコンセンサスが得られていないのが現状である⁷⁹。米国の研究開発プログラムである「ブレイン・イニシアチブ (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies Initiative : 以下 BRAIN Initiative)」においては、ニューロサイエンスのために使用できるテクノロジーを、「ニューロテクノロジー」と総称していることが多い。

そうした技術としては、①脳の情報処理の異常 (気分障害、認知症等) の未然防止、改善、代替技術、②脳の実際の測定、脳を感じる製品価値に関するモデル構築により、製品・広告を評価改善する技術、③ヒューマン・マシン・インタフェース (Human-Machine Interface : 以下 HMI) の1形態として脳と外部デバイスを接続しそだ情報提示をする技術、④人間同士のコミュニケーション技術 (ブレイン・ブレイン・インタフェース (Brain-Brain Interface))、⑤能力の拡張・補完技術、⑥人工知能に脳の情報処理様式を応用する技術、などが挙げられる⁸⁰。

ニューロテクノロジーを支えるのは、電磁氣的計測 (脳磁法 (Magnetoencephalography : 以下 MEG)、脳波検査法 (Electroencephalography : 以下 EEG))、代謝的変化の計測 (ポジトロン断層法 (Positron Emission Tomography : 以下 PET)、磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging : 以下 MRI)、機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging : 以下 fMRI))、近赤外光計測)、電極・半導体の生体内埋め込み、最近では2光子イメージング法などの計測技術の数々である⁸¹。

既の実現している人工内耳やディープ・ブレイン・スティミュレーション、最近では経頭蓋磁気刺激 (Magnetic Stimulation : 以下 TMS) のような医療応用がなされている技術、軍事利用可能な技術、一般消費者向け技術をまとめてニューロテクノロジーと呼ぶこともある。

最先端の技術開発を行う有識者へのヒアリングにおいては、「ニューロサイエンス自体を変革するような技術であり、実社会に大きな影響を与え、脳と技術の相互作用をもたらすような技術」を特別にニューロテクノロジーと呼ぶ方が、定義として意味があるのではないかとする指摘が得られた⁸²。

今後、ニューロテクノロジーの発展とともに、人間の生物学的な脳の能力を超えるよう

⁷⁸ 茨木拓也『ニューロテクノロジー』技術評論社, 2019, p44

⁷⁹ ATR 川人光男氏へのヒアリング (2021.1 実施)

⁸⁰ 茨木前掲, pp44-45 を元に作成

⁸¹ ATR 川人光男氏へのヒアリング (2021.1 実施)、JST ウェブサイト 小特集 視聴覚・脳とメディア <https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/60/11/60_11_1725/_pdf>

⁸² ATR 川人光男氏へのヒアリング (2021.1 実施)

に、脳がある方向に向かって巨大化、グループ化していくことが考えられる。そうした方向性を包含することができれば、ニューロテクノロジーの先進性を十全に表現しうる定義となる可能性がある⁸³。

表 3-12 ニューロテクノロジーの定義一覧

プログラム、機関、個人等	内容	備考
BRAIN Initiative	神経系が健康と疾病に対してどのように機能しているかについて、根源的な洞察を得ることを可能にする研究開発と装置の使用（機関の見解としてのニューロテクノロジーの定義は示していない） ⁸⁴	BRAIN Initiative は 2013 年に開始された、（米国国立衛生研究院（National Institute of Health：以下 NIH）が主管する、米国の大規模かつ戦略的なニューロサイエンス、ニューロテクノロジー研究プログラムである。
米国国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency：以下 DARPA）	(1)神経機能や行動機能の回復を目的としたブレイン・コンピュータ・インタフェース（Brain Computer Interface：以下 BCI）開発等の取り組み、(2)人間の訓練やパフォーマンスの向上を目的とした BCI 開発等の取り組み（機関の見解としてのニューロテクノロジーの定義は示していない） ⁸⁵	DARPA は神経機能や行動機能の回復、訓練の向上、人体機能の強化等を目的とした BCI の開発を主導してきた。
ヒューマン・ブレイン・プロジェクト（Human Brain Project:以下 HBP）	人間の脳を理解し、ニューロサイエンスの知識を医療や技術に移転すること（機関の見解としてのニューロテクノロジーの定義は示していない） ⁸⁶	HBP は、人間の脳を包括的に理解することを目的とした、2013 年から 2023 年までの 10 年間にわたる EU の FET（Future and Emerging Technology）フラッグシッププロジェクトである。
OECD	エレクトロニクスとエンジニアリングの人の神経システムへの適用 ⁸⁷	—
駐日イスラエル大使館 経済部	脳機能の改善と修復のさまざまな側面を含む、人々が脳と人間の思考をどのように理解するかに影響を与える技術研究分野 ⁸⁸	—
沖縄科学技術大学院大	脳科学の応用技術 ⁸⁹	—
Oliver Müller, Stefan Rotter	神経系と技術的装置を直接接続することを可能にする、一連の方法論と機器類 ⁹⁰	フライブルク大学（Albert-Ludwigs-Universität Freiburg）哲学部教授（Müller

⁸³ 前掲注 82

⁸⁴ NIH ウェブサイト<https://braininitiative.nih.gov/sites/default/files/pdfs/brain2025_508c.pdf>

⁸⁵ Robbin A.Miranda et al.,” DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies,” *Journal of Neuroscience Methods* Volume 244, 2015.4.15, p 53<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027014002702>>

⁸⁶ Katrin Amunts et al.,” The Human Brain Project—Synergy between neuroscience, computing, informatics, and brain-inspired technologies,” *PLOS BIOLOGY* PLoS Biol 17(7), 2019.7.1, p 1<<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3000344>>

⁸⁷ OECD ウェブサイト<<https://www.oecd.org/sti/ieconomy/37823085.pdf>>

⁸⁸ 駐日イスラエル大使館ウェブサイト<https://israel-keizai.org/news/braintech_2019/>

⁸⁹ OIST ウェブサイト<<https://www.oist.jp/ja/news-center/news/2014/12/5/17471>>

⁹⁰ NIH ウェブサイト<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5733340/>>

プログラム、機関、個人等	内容	備考
		氏)、フライブルク大学生物学部教授 (Rotter 氏)
長谷川良平	「脳を理解する」ための基礎研究であるニューロサイエンスに対し、「脳を活用する」ための技術開発を指す ⁹¹ 。	産業技術総合研究所 人間情報研究部門ニューロテクノロジー研究グループ グループ長
茨木拓也	脳に表現されている様々な情報やその処理様式の基礎科学的理解に基づき、脳情報を読み解き・書き込み・伝送・仮想化する技術 ⁹²	株式会社 NTT データ経営研究所 ニューロイノベーションユニット アソシエイトパートナー

3.2.2 ニューロテクノロジーの特徴、期待されるメリット

前節のとおり、ニューロテクノロジーの定義は様々であるが、その技術的特徴を端的に示したのが、茨木拓也氏の「脳に表現されている様々な情報やその処理様式の基礎科学的理解に基づき、脳情報を読み解き・書き込み・伝送・仮想化する技術」という定義だといえよう。

本節では、この定義に基づき、同氏の著書を主要参考文献として、ニューロテクノロジーを、(1)脳情報を読み取る技術、(2)脳情報を書き込む技術、(3)脳情報を仮想化する技術(脳の情報処理をコンピュータに実装する技術)、の3つに分けて整理する⁹³。

(1) 脳情報を読み取る技術

脳の情報取りにおいて、近年人間の計測技術として発展しているのは、第一に高価・高精度の大規模装置を使用した脳計測装置、第二に小型・安価・簡易なウェアラブル生体センサー、である。現時点では最適の計測手法は存在せず、各装置の特性を理解し、脳以外の心理・行動・生理データとも組み合わせる必要がある。

1) 計測指標

計測に用いる指標は、大きく分けて「主観指標」と「客観指標」がある。

主観指標には Sematic Defferential (SD) 法⁹⁴を用いた主観・官能・心理評価が多用されているが、近年はスマートデバイスの進化により、実際の製品の使用シーンでの心理を評価するリアルタイム心理計測が可能となり、記憶によるバイアスを最小化したデータが取得可能となっている。

客観指標は大きく分けて生体信号計測と行動計測の2つがある。前者は大脳皮質を中心

⁹¹ 長谷川良平「ブレイン・マシン インターフェースの現状と将来」電子情報通信学会誌 Vol.91, No.12, 2008, p1066 <<https://www.ieice.org/jpn/books/kaishikiji/2008/200812.pdf>>

⁹² CAN ウェブサイト 茨木拓也氏記事 <https://www.can-neuro.org/academy/basic1_2.html>

⁹³ 技術の整理にあたっては、茨木拓也『ニューロテクノロジー～最新脳科学が未来のビジネスを生み出す』(2019年、株式会社技術評論社)の第4章「脳情報を読み取ることで見えてくる可能性」、第5章「脳に情報を書きこむ技術」、第6章「脳の仮想化がもたらす未来」に加え、2020年11月26日に弊所で同氏を講師に招き開催した勉強会の議事録を参考にした。

⁹⁴ 商品やサービス、銘柄などの与える感情的なイメージを、「明るい - 暗い」、「人工的な - 自然な」など、相反する形容詞の対を用いて、7段階等の尺度で回答させる方法。

とした中枢神経の計測と、身体の自動的な反応としての自律神経系の計測の2種類から成る神経活動計測と、脳からの信号による筋肉活動といった非神経活動計測がある。後者は発話や表情変化、反応時間、位置情報や活動量情報等を計測する対人計測と、機器や乗り物などの操作情報といった間接計測がある。

表 3-13 人間計測技術の全体像⁹⁵

主要指標		客観指標				
主観・官能・心理評価	リアルタイム心理計測	生体信号計測		行動計測		
		神経活動計測		非神経活動計測	対人計測	間接計測
		中枢神経(脳)計測	自律神経計測		発話・音声	機器・乗り物の操作情報など
		脳波	心拍・脈拍・発汗・瞳孔径	表情		
		fMRI			筋電	
fNIRS	眼電位・眼球運動	位置情報・活動量				

2) 計測技術

脳計測技術には、「侵襲型」と「非侵襲型」がある。前者は外科手術による開頭と埋め込みを要する技術であり、後者は身体を傷つけずに計測可能な技術である。

侵襲型には、剣山のような針電極を刺入するか、皮質脳波 (ECoG) と呼ばれる 60 個の電極のついたシートを脳表面に留置する、という手法があり、皮質表面の脳活動と脳深部の脳活動を計測可能である。

非侵襲型と比較すると、脳計測装置を脳に直接埋め込むため、脳の 1 次情報である神経の電気活動の把握において、多様な電気プロセスを反映する LFP (局所細胞外電位) を捉え、情報の発信源にアプローチすることが可能である。また、どの辺りの神経細胞が活動したかという空間情報を多く得ることが可能になる、などの利点がある。他方で手術を要するため、利用へのハードルは高い。

一方非侵襲型の計測手法には、頭皮質上の電位を記録・可視化する EEG (脳波検査法)、活動部位の血流変化を記録・可視化する fMRI (機能的磁気共鳴画像法) と機能的近赤外線スペクトロコピー (functional Near-Infrared Spectroscopy : 以下 fNIRS) があり、いずれも皮質表面を中心とした計測となる。なお、fMRI は MRI (磁気共鳴画像法) を用いて脳や脊髄の血流動態を捉える技術であり、fNIR は近赤外線を用いて、血液における酸素と結合した酸素化ヘモグロビンと、酸素と結合していない脱酸素化ヘモグロビンの変化量を測定する手法である。

3 者を比較すると、脳波は時間分解能 (どの程度時間変化を捉えられるか) が高いため、脳活動のミリ秒単位の時間変化を詳細に調査したい場合に用いられる。さらに計測器の簡

⁹⁵ 茨木拓也、前掲、133 ページの表を元に未来工学研究所作成。

易化が進み、実現現場でも計測可能になっている。また、機器費用が安価で、導入への障壁が fMRI と比較して低い。また先行研究が豊富なため、計測計画が立てやすい。他方で、シグナルが微弱で電氣的なノイズに弱い、信号を取り出すために大量の試行回数を要するなどの欠点がある。

一方 fMRI は、空間分解能（どの程度細かい部位の活動を捉えられるか）が高く、活性化している脳部位を詳細に調査したい場合に用いられる。fMRI は脳の深部まで 2~3 mm の解像度で血流動態を捉えることができる。また低い時間分解能を撮像技術の向上により補い、全脳スキャンを 1 秒程度で実施できる。他方、コストが高く、脳波計測装置が簡易なものであれば 100 万円程度で保有できるのに対し、fMRI の導入費用は数億円かかる。

fNIRS は自然に近い環境下で脳の活動状態を測定でき⁹⁶、プローブ装着が簡単で、乳幼児でも計測可能だが、脳波や fMRI と比較して空間・時間分解能ともに低く、脳血流の変化以外の計測指標が少ないなどの欠点がある。

以上のように、それぞれの計測技術には利点と欠点があるため、研究目的に合わせ、計測方法を選定して組み合わせることが必要である。また、脳情報の読み取り技術の向上には、上記のようなセンシング技術に加え、膨大かつ多様な脳情報データを特定の目的変数と関連付けてモデル化する解析技術の貢献が大きい。さらにこの脳活動パターンを数学的に処理して理解する機械学習も急速に普及している。

3) 脳情報読み取り技術の応用—期待されるメリット

a) 運動機能の代替

センシング技術を用いて応用研究が進んでいる分野がブレイン・マシン・インタフェース (Brain Machine Interface : 以下 BMI) である。これは事故や疾患で身体を思うように動かせなくなった患者の運動機能を代替するため、脳情報を読み取りロボットアームや車いすなどの機械を操作する一連のシステムを指す。1990 年代の開発当初は、右か左かといった単純な弁別しかできなかったが、皮質脳波 (ECoG) の読み取った情報から話そうとしている内容を音声として合成できるようになった。これは脳情報から声道発声器官の運動を予測し、そこから発話音声を解読するという 2 段階の解読モデルである。なお、本モデルには再帰的ニューラルネットワーク (RNN) という機械学習技術が多分に用いられている。

なお、ロボットのような大型機械を動かさずに、コンピュータと接続して操作を行うシステムは、ブレイン・コンピュータ・インタフェース (Brain-Computer Interface : 以下 BCI) と呼ばれ、区別される。

b) 運動機能の回復

BMI 技術は運動の回復にも有用である。例えば脳卒中後の麻痺患者のリハビリに応用する BMI 療法がある。これは、患者の脳波を計測し、「動きたい」という運動意思に合わせ

⁹⁶ 「脳機能イメージング」島津製作所ウェブサイト
<<https://www.an.shimadzu.co.jp/apl/lifescience/invivo.htm>>

てロボットで手の運動を支援したり、VR/AR で自分の手が動いている映像を流すなどのフィードバックを与えることで、運動意思を示す→筋肉が動き筋紡錘からの信号が脳内に戻る／動いたような視覚体験をする→末梢運動神経が活動する、というループが形成され、全く筋肉活動が見られない患者であっても脳内に残された神経回路の再構成が大規模に進み、運動機能が回復するという。

c) 人間の感覚体験の定量化と最適化

視聴覚体験、味覚体験など人間の感覚体験における知覚内容や価値を定量的に理解し、製品開発・広告宣伝・サービス開発に応用されている。中でも fMRI 計測で人間の知覚体験を再構成するブレイン・デコーディング（脳情報解読）が注目を集めている。同分野では京都大学の神谷之康教授が世界的権威であり、神谷氏の研究チームは「neuron」という単語を fMRI で計測した脳情報から解読することに成功し、その後被験者の夢の内容の解読の成功に至った。同チームはさらにこの研究を発展させ、被験者の見ている動画の再構成に成功している。なお、同チームの行った実験やその研究成果の詳細については本報告書 76 ページを参照されたい。

このほかに、2017 年にスタンフォード大学の研究チームは、クラウドファンディングの結果を脳から読み解く研究成果を発表している。これは被験者に脳を fMRI で計測しながら 36 のプロジェクトのプレゼンテーションを見せ、投資するかしらないかを判断してもらうという実験である。その結果、被験者の主観報告等よりも、fMRI で捉えた側坐核の活動の方が資金調達の成否を正確に判断できたという。

d) インタフェース

次世代の HMI（ヒューマン・インタフェース）として、伝達したい内容を脳から直接入力・伝達できる技術の実用化も進んでいくと考えられる。例えば Facebook 社は 2017 年 4 月、非侵襲的な脳装置を用いて 1 分間に 100 ワードの入力ができる装置を数年以内に開発すると発表した⁹⁷。また、2019 年世界ロボット大会で行われた「脳波タイピング競争」では、天津大学の大学院生の魏斯文氏が、マカオ大学・香港大学が共同開発した BMI（ブレイン・マシン・インタフェース）を用いて、691.55 バイト／分の情報伝達速度という新記録を達成した。これは通常の指操作でのスマートフォン入力速度を上回る⁹⁸。

また、文字入力・意図や情動状態を送受信するブレイン・ブレイン・インタフェース技術の開発も進んでいる。これは例えばある人の「手を動かしたい」という脳波を計測し、インターネットを介して遠く離れた別の人の運動野を刺激すると、その人の手が動く、という技術である。中国浙江大学の研究チームは 2019 年、微小電極を埋め込んだサイボーグ・ラットに対し、人間の脳波から指示を出し、その動きを制御することに成功したと発

⁹⁷ 『脳で入力』夢の 1 分 100 語 フェイスブック挑む 一瞬の変化を光学画像に」日本経済新聞、2017 年 5 月 25 日<<https://www.nikkei.com/article/DGXLZO16842470V20C17A5TJN000/>>; "Facebook is building brain-computer interfaces for typing and skin-hearing," TechCrunch, April 20, 2017 <<https://techcrunch.com/2017/04/19/facebook-brain-interface/>>

⁹⁸ 「世界ロボット大会脳波制御タイピング 新記録更新」中国網日本語版、2019 年 8 月 26 日 <http://m.china.org.cn/orgdoc/doc_1_76803_1365959.html>

表している⁹⁹。

(2) 脳情報に書き込む技術

脳に情報を書き込む技術は、大きく分けて2種類ある。1つ目は、電気・磁気などによる刺激で神経活動を誘発・修飾する外的方法で、2つ目は自分の脳活動を変化させることを学習する自発的方法（ニューロフィードバック）である。前者は被験者の努力を必要としないという点では導入が容易だが、効果の持続性に課題がある。後者はトレーニングを要するため目的の脳情報処理を自分でできるようになるまでには時間を要するが、他方で効果は少なくとも数か月程度は持続する。

1) 刺激による介入

刺激方法には、上述の脳計測と同様、侵襲型と非侵襲型がある。

侵襲型には、「直接皮質刺激（Direct Cortical Stimulation：以下DCS）」と、「深部刺激法（Deep Brain Stimulation：以下DBS）」があり、いずれも疾患の診断・治療などに用いられる。前者は頭蓋内に電極を留置し、刺激装置と接続して刺激電極として用いるものであり、脳外科手術の際に脳機能マッピング¹⁰⁰の目的で行う。後者はパーキンソン病などで機能不全を起こしている部位に深部電極を留置し、慢性的に刺激するというものである。

一方、非侵襲型には、以下の3つがある。

1つ目はTMS（経頭蓋磁気刺激）であり、コイルに瞬時的な高電圧をかけて、頭皮直下の神経細胞群に誘導電流を流し、活動電位¹⁰¹を誘発するというものである。

2つ目は、「経頭蓋直流電気刺激（Transcranial Direct Current Stimulation：以下tDCS）」であり、正負極を頭皮に圧着させ、数ミリアンペアの電流を頭皮に流すことで、電極直下の皮質神経細胞群の興奮・抑制を引き起こすものである。

3つ目は、「経頭蓋交流電気刺激（Transcranial Alternating Current Stimulation：以下tACS）」であり、特定の周波数の電気刺激を与え、脳の周期的な律動を変化させるものである。

3者を比較すると、TMSはcm単位で焦点的に刺激を行えるため、さまざまな刺激パラメータを異なる神経機構に働きかけることができる。一方、tDCSやtACSは7cm²程度の広範囲で穏やかな刺激を行うことが可能であり、大きく高価な装置を必要とするTMSと比較して、仕組みが簡素で可搬化も可能である。

2) ニューロフィードバック

ニューロフィードバックとは、外部から対象者の脳を観測し、対象者にそれを知らせ、

⁹⁹ Shaomin Zhang, Sheng Yuan, Lipeng Huang, Xiaoxiang Zheng, Zhaohui Wu, Kedi Xu & Gang Pan "Human Mind Control of Rat Cyborg's Continuous Locomotion with Wireless Brain-to-Brain Interface," Scientific Reports, 04 February 2019 <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-36885-0>>

¹⁰⁰ 脳の各部位がどのような働きをしているかを、あたかも脳を地図に見立てたかのように "マッピング" し、その結果から図などを作成すること。

¹⁰¹ 神経細胞が信号を受け取り他の細胞に伝えようとする際に、細胞膜に生じる一過性の膜電位（細胞の内外に存在する電位差）の変化。

自身で特定の脳の状態にコントロールできるようにトレーニングする技術であり、2010年頃から飛躍的に研究が進んでいる。電気や磁気による外部刺激と比較し、大型の刺激装置を必要とせず、刺激装置の介入より多様かつ複雑な脳状態を導入でき、外的刺激を行わないため、心理的抵抗が少ないという利点がある。

ニューロフィードバックの種類は、主に以下のとおりである。

1つ目は、EEGを用いたニューロフィードバックであり、視覚的注意¹⁰²の向上や、マインドワンダリング（注意散漫状態）の減少、メンタルローテーション（頭の中で想像した対象物を回転させるような処理）や楽器の演奏などのパフォーマンス向上といった効果が報告されている¹⁰³。

fMRIを用いたフィードバックでは脳領域間の機能結合や特定関心領域（ROI）に働きかけることも可能であり、また長期的な影響ももたらすことが可能だと報告されている。

もう1つは、デコーディング技術で特定の脳状態をフィードバックするデコーディッドニューロフィードバック（DecNef）がある。具体的には、脳活動のデータから脳内の情報を解読し、それを短い時間遅れで脳に報酬として帰還し、結果として特定の空間的脳活動パターンを誘起するという技術¹⁰⁴であり、日本で研究が進んでいる分野である。同技術は、解読可能な脳活動パターンで表現されるあらゆる状態や疾患のコントロールに適用できる可能性があり、また無意識にトレーニングするため、心的外傷後ストレス障害(PTSD)の治療も、患者に辛い記憶を思い出させることなく行うことが可能である¹⁰⁵。

3) 書き込み技術の応用—期待されるメリット

a) 感覚代替

人工感覚器と脳を結合する技術や、外部感覚情報を脳へフィードバックするか、あるいは神経細胞の活動へ変換する技術の研究開発が進んでいる。

例えばスタンフォード大学の頭蓋内の認知電気生理学プログラム（Stanford Human Intracranial Cognitive Electrophysiology Program：以下 SHICEP）では、4人の被験者の頭蓋内に電極を留置して視覚野のさまざまな位置を電気刺激し、対応関係を調べるといった実験を行った。それによると、ある特定の位置に視覚刺激を与えた際に活動する脳領域に対し、電気刺激を行うと、同じ位置にフォスフェンと呼ばれる眼内閃光が誘発され、その閃光は刺激する閃光の大きさに相関して大きくなることが判明した¹⁰⁶。視野内のどの位

¹⁰² 視覚系が状況に応じて一部の対象だけに選択的に注目して処理を行うこと。

¹⁰³ Tomas Ros, Jean Théberge, Paul A Frewen, Rosemarie Kluetsch, Maria Densmore, Vince D Calhoun, Ruth A Lanius “Mind over chatter: Plastic up-regulation of the fMRI salience network directly after EEG neurofeedback,” *NeuroImage*, Volume 65, 15 January 2013, Pages 324-335

< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811912009561?via%3Dihub> >

Ranganatha Sitaram, Tomas Ros, Luke Stoeckel, Sven Haller, Frank Scharnowski, Jarrod Lewis-Peacock, Nikolaus Weiskopf, Maria Laura Blefari, Mohit Rana, Ethan Oblak, Niels Birbaumer & James Sulzer” Closed-loop brain training: the science of neurofeedback,” *Nature Reviews Neuroscience* volume 18, pages86-100(2017).

¹⁰⁴ 「研究紹介」ATR 脳情報通信総合研究所ウェブサイト、<https://bicr.atr.jp/decnef/about/>。

¹⁰⁵ 具体的な実施プロセスや研究事例については、本報告書 77-78 ページを参照されたい。

¹⁰⁶ Jonathan Winawer, Josef Parvizi” Linking Electrical Stimulation of Human Primary Visual Cortex, Size of Affected Cortical Area, Neuronal Responses, and Subjective Experience”*Neuron*, December 21, 2016, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27939584/#affiliation-1>.

置にどの大きさの光点を見せるか、が制御できるようになれば、後天的視覚障害者向けに人工視覚デバイスとして応用できる可能性がある。

また、末梢の感覚器において、人工網膜や人工内耳といった網膜や蝸牛神経を電気刺激し、視覚や聴覚を機能補完する「人工感覚」技術の開発が進んでいる。また、工学と認知神経科学を結び付けたコグネティクスと呼ばれる分野が登場し、センサー情報をデジタルデバイスによりほかの感覚に変換・伝送する研究が進んでいる。例えば事故や病気で手足を切断した人の損傷部位に神経刺激装置を埋め込み、義手や義足のセンサーを通じて自然な感覚が得られるようにする神経機能代替デバイスがすでに欧州ベンチャー企業により開発されている。

b) 脳機能調整

前述のとおり、電気・磁気刺激は疾患の診断や治療などで応用されている。例えば、DBS（脳深部刺激法）は、パーキンソン病の症状改善に利用されている。また、脳表面に留置して脳波を記録する硬膜下電極による電気刺激は、慢性疼痛の治療に用いられている。また、tDCS（経頭蓋直流電気刺激）は既存の抗うつ薬である SSRI（選択的セロトニン再取り込み阻害薬）に対して非劣性は示さなかったものの、一定の治療効果があることが報告されている¹⁰⁷。

ニューロフィードバックの臨床応用例としては、注意欠陥多動性障害（ADHD）の児童に対し、同症状の児童の安静時 EEG に多く含まれる低周波成分を減少させることで、症状が緩和される事例が報告されている。そのほかにうつ病や成人の高機能自閉症スペクトラムの治療にも効果があると期待されている。

c) 脳機能のトレーニング

臨床以外でも、刺激による介入、ニューロフィードバックの効果が報告されている。

例えば、tDCS を前頭前野に行うと、コントロール条件に対し、課題成績の向上・反応時間を短縮できる。また、就寝中に tACS を受けることで、記憶の定着を促進できるという報告事例もある。

そのほかに、脳の左半球に陰極、右半球に陽極をつけて tDCS を行うだけで、4 割の被験者がナインドットパズル（3×3 の 9 つの点を 4 本の線か一筆書きで通せという問題）を解けるようになったとの事例もあり、tDCS が発想力向上に貢献する可能性を示している。

また、ハワードヒューズ研究所の男性職員 31 名を被験者として、右背外側前頭前野に tDCS を与え、あるフライトシミュレーターの課題を 4 日間行ってもらおうと、被験者間のスキル向上のばらつきが、シャム刺激（厳密な効果検証のため与えられる偽の刺激）に比べて減少したという。

¹⁰⁷ Andre R. Brunoni, Adriano H. Moffa, Bernardo Sampaio-Junior, et al. "Trial of Electrical Direct-Current Therapy versus Escitalopram for Depression," the New England Journal of Medicine, June 29, 2017, DOI: 10.1056/NEJMoa1612999.

d) 防衛分野への応用

防衛分野への応用可能性としては、以下の3つが考えられる。

1つ目は、機器とのインターフェースとしての応用である。

BMIを使用すると、脳波を読み取ることで、実際の反応の約100ミリ秒前に、「実際にどの操作をするか」「求められている反応はどれか」を解読できるため、意識・操作行動の前に判別できる。さらに、ある実験により、アンドロイドの腕をBMIで動かす訓練をすると、マルチタスク能力を向上できる可能性があることがわかっている。

また、脳に情報を直接入力することも、動物実験の段階だが、可能になってきている。2匹のマカクザルの脳に電極を埋め込み、画面に2つの視覚刺激（長方形のアイコン）を表示させ、サルがアームを操作して画面上でアイコンに触れると、一次体性感覚野（大脳皮質の一部。感覚情報と温度情報を処理する）に凹凸刺激に似た皮質内微小刺激（ICMS）を与えた。その際、高周波（高密度）のアイコンに触れた時には報酬を与え、低周波（低密度）のアイコンに触れたときは無報酬とした。その結果、サルは2つのアイコンを弁別できることが分かった。

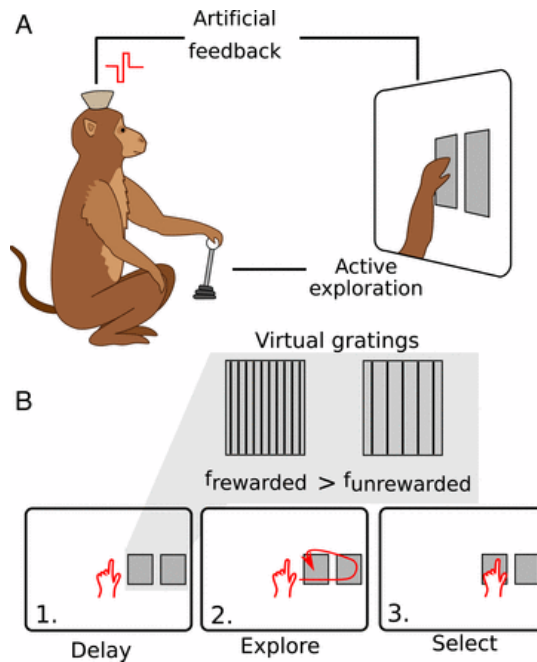


図 3-13 一次体性感覚野（S1）に皮質内微小刺激（ICMS）を与える実験¹⁰⁸

こうした技術が発達すれば、例えば fMRI 装置内から複数の無人機を操作することも可能となるし、両手がふさがり視線を外していても機械操作が可能となる。

2つ目は、オペレーターのモニタリング技術としての応用である。脳情報からオペレーターの眠気を検出したり、疲労・作業負荷を検知し、対応策を指令として出す技術である。

¹⁰⁸ Joseph E. O'Doherty, Solaiman Shokur, View ORCID ProfileLeonel E. Medina, Mikhail A. Lebedev, and Miguel A. L. Nicolelis” Creating a neuroprosthesis for active tactile exploration of textures,” PNAS, October 22, 2019.

米陸軍では Land Warrior 1.0 と呼ばれる兵士用ウェアラブルデバイスが 1994 年より開発されている。歩兵用として開発された武器システム、ヘルメット、コンピュータ、デジタル・音声通信、位置推測・ナビゲーションシステム、保護服を統合したシステムで、ヘルメット内部に脳波計や心拍モニターを搭載し、兵士の脳波、筋電、表情、汗、体温等を計測し、兵士の現在おかれている状況をモニタリングするというものである¹⁰⁹。

3 つ目は、スキルトランスファーとインストール技術である。ニューロフィードバックを用いることで軍事的なスキルを向上させることが可能である。

例えば、VR 上の飛行機を操作する被験者の脳波を計測し、PIO（パイロット誘導振動、パイロットの操作入力過多により生じるパイロットの意図に反した機体の振動現象）の予兆を検知すると、ボリュームを上げた合成心拍音をフィードバックし、音が聴こえたら音量を下げるように教示するという実験例がある。これによると、操作ミスの予兆を検知し、心拍数を下げるようにフィードバックすることで、操縦パフォーマンスが向上し、興奮の抑制と認知コントロールの向上にも成功した。そのほか、射手にニューロフィードバックを利用した訓練を行わせると、射撃成績が向上する事例もある。また、イスラエル国防軍の研究事例でストレスレジリエンス（ストレスに対する耐性）を強化し戦場でのトラウマ（PTSD）に備えるというものがある。脳波と fMRI の信号を同時に取ることによって、脳波から fMRI の信号を予測するという技術開発が成功している。ストレスを感知する脳の扁桃体の脳活動の推定信号波を測り、推定しながら本人がそれを抑えるような訓練ができる。

(3) 脳情報を仮想化する技術

脳情報の「読み取り」「書き込み」に加え、脳の情報処理様式をコンピュータに実装・シミュレーションすることも重要な技術であり、機械学習といった AI 分野の技術向上に発展してきた。

脳の情報処理を AI に実装化した例としては、脳の学習システムをモデル化した「ニューラルネットワーク」とその応用である「ディープラーニング」があげられる。

そのほか、2018 年には前頭前野と大脳基底核のネットワークを模した人口脳アーキテクチャがメタ強化学習（＝学習の学習）を実現することが分かっている¹¹⁰。また、脳を参考にしたアーキテクチャをつくるだけでなく、脳情報を機械学習に直接取り入れることで、その精度向上に大きく貢献することも明らかになっているという報告もある。今後、AI とニューロテクノロジーの融合が進めば、双方分野は飛躍的に発展する可能性を秘めている。

3.2.3 米欧中におけるニューロテクノロジー応用研究の特徴、代表的な事例等

本項では、BRAIN Initiative を含めた、米国における先端のニューロテクノロジー研究

¹⁰⁹ “Land Warrior Integrated Soldier System,” Army Technology, https://www.army-technology.com/projects/land_warrior/.

¹¹⁰ Jane X. Wang, Zeb Kurth-Nelson, Dharshan Kumaran, Dhruva Tirumala, Hubert Soyer, Joel Z. Leibo, Demis Hassabis & Matthew Botvinick” Prefrontal cortex as a meta-reinforcement learning system,” Nature Neuroscience, 14 May 2018, <https://www.nature.com/articles/s41593-018-0147-8>.

の事例、HBP（ヒューマン・ブレイン・プロジェクト）を推進してきた欧州の研究の動向と英国におけるニューロテクノロジー戦略について示す。中国に関しては、科学技術政策における脳・神経科学研究の位置づけ、「中国脳計画」等、ニューロテクノロジーに関する中国の最近の動きを中心に述べる。

(1) 米国

1) ニューロテクノロジー研究の進展と現状

米国におけるニューロサイエンスおよびニューロテクノロジー研究開発の歴史は古く、早くも冷戦期の 1970 年代には DARPA において、神経機能や行動機能の回復、訓練の向上、人体機能の強化等を目的とした BCI（ブレイン・コンピュータ・インタフェース）開発の取り組みが始められた¹¹¹。その後、21 世紀を目前にして、米国ではブッシュ（父）大統領の主導により、1990 年から 1999 年の間にわたる、「脳の 10 年プロジェクト（Project on the Decade of the Brain）」が開始された。

これは、米国議会図書館と NIH（米国国立衛生研究院）の国立精神衛生研究所（Institute of Mental Health：以下 NIMH）を中心に、省庁間にわたる様々なプログラム、式典、活動を通じて、「脳研究から得られる恩恵に対する一般市民の認識を高める取り組み」を行ったものである。「脳の 10 年プロジェクト」に関する両者の合同プロジェクト（LC/NIMH Project）では、米国議会議員やスタッフ、一般市民に最先端の脳研究を紹介し、新たな科学的発見をもたらす倫理的、哲学的、人間的な含意について国民の対話を促すことを目的に、出版物やプログラムなど、さまざまな活動を後援した¹¹²。

脳科学への国民の認知と理解を背景に、米国政府は 2013 年に NIH を主軸とした大規模かつ戦略的なニューロサイエンス、ニューロテクノロジー研究プログラムである Brain Initiativ を創設した¹¹³。NIH とアライアンス研究所、官民の研究機関による一連の研究開発を通じて脳の働きを解明し、画期的な医療技術等の実現を目指すとされている。NIH は 2019 年の段階で、すでに同イニシアチブに総額 13 億ドル以上を投資しており、700 以上の研究プロジェクトを採択して研究資金の提供を行なっている。同イニシアチブの戦略指針となっている NIH 長官諮問委員会による 2014 年の報告書「BRAIN 2025 A Scientific Vision」では、2021～2025 年度においても、年間研究予算 5 億ドル以上を維持するものとされている。

米国においては、著名なところでは Neuralink や Facebook 等の民間企業、スタートア

¹¹¹ DARPA ウェブサイト DARPA and the Brain Initiative< <https://www.darpa.mil/program/our-research/darpa-and-the-brain-initiative> >

¹¹² 米国議会図書館ウェブサイト Project on the Decade of the Brain< <https://www.loc.gov/loc/brain/> >

¹¹³ 主要国の脳研究イニシアチブには、EU：ヒューマン・ブレイン・プロジェクト（The Human Brain Project：HBP、2013 年開始）、米国：ブレイン・イニシアチブ（The BRAIN Initiative、2014 年開始）、オーストラリア：オーストラリア・ブレイン・アライアンス（The Australian Brain Alliance、2016 年開始）、中国：中国脳プロジェクト（The China Brain Project、2016 年開始）、日本：BRAIN/MINDS プロジェクト、2016 年開始、カナダ 政府 / ブレイン・カナダ共同ファンド（Government / Brain Canada joint funding、2017 年開始）、韓国：韓国ブレイン・イニシアチブ（Korea Brain Initiative、2017 年開始）、国際ブレイン・イニシアチブ（International Brain Initiative：IBI、2017 年開始）がある。HBP ウェブサイト Human Brain Project< https://sos-ch-dk-2.exo.io/public-website-production/filer_public/e9/4c/e94cf4b1-a99d-47ac-908a-b0e4c0f6b7bd/hbp-mission-brochure.pdf>

ップにおいてもニューロテクノロジーへの研究投資、商用化開発が盛んに行われている。一方で米国商務省産業安全保障局（DOC BIS）は、デュアルユース技術としての発展の可能性が高く、国外流出に伴う安全保障上の懸念から「新興技術」として輸出管理対象となる技術リストに、BCIを含めるように制度改正を進める動きを見せるなど、経済安全保障上の政策の進展も注目される。

2020年10月15日には、米国ホワイトハウスの国家安全保障会議（NSC）が「重要・新興技術に関する国家戦略（National Strategy for Critical and Emerging Technology (CET)）」を公表し、今後米国の国家的利益に大きな影響を及ぼす技術の一つとして、「ヒューマン・マシン・インタフェース」が挙げられるなど、ニューロテクノロジーは引き続き米国の科学技術政策において、中心的な戦略的地位を占め続けることになるとと思われる¹¹⁴。

2) BRAIN Initiative

a) 概要

2013年に立ち上げられたBRAIN Initiativeは、脳回路を正確にマッピングして観察するためのツールを開発し、適用することで、脳の働きを解明することを目的とした研究開発プログラムである。同イニシアチブには、NIHから10のNIH研究所・センター（IC）が参加している¹¹⁵。連邦政府機関からは、NSF（全米科学財団）、DARPA、FDA（米国食品医薬品局）、IARAPA（情報高等研究開発活動）が名を連ねる。プログラムにおけるBRAIN Initiativeアライアンスは、同イニシアチブにおける政府と民間研究機関の調整を担い、官民連携が進められている。

2019年までに、NIHは数百名の研究者に700以上のグラントを提供し、総額は13億ドルに達した。直近では、2019年は190件、2020年度は183件の新たなプロジェクトが採択されている。

表 3-14 BRAIN Initiative への投資額¹¹⁶

年度	投資額（百万ドル）	採択プロジェクト（件）
2014	45	55
2015	85	65
2016	155	105
2017	260	110
2018	400	200
合計	950	530

出典：NIH ウェブサイト The BRAIN Initiative®

NIHによると、BRAIN Initiativeの目的、意義等の詳細は、以下の通りである。

¹¹⁴ NIH ウェブサイト Overview < <https://braininitiative.nih.gov/about/overview> >

¹¹⁵ National Center for Complementary and Integrative Health (NCCIH)、National Institute on Aging (NIA)、National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB)、National Institute on Drug Abuse (NIDA)、National Institute of Neurological Disorders and Stroke (NINDS)、National Eye Institute (NEI)、National Institute on Alcohol Abuse and Alcoholism (NIAAA)、Eunice Kennedy Shriver National Institute of Child Health and Human Development (NICHD)、National Institute on Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD)、National Institute of Mental Health (NIMH)の各研究所

¹¹⁶ https://braininitiative.nih.gov/sites/default/files/resources/pdf/brain_overview_2018_one_pager_508c.pdf

表 3-15 BRAIN Initiative の目的、意義等

項目	内容
目的	<p>個々の細胞と複雑な神経回路が時間的・空間的にどのように相互作用しているのかを解明し、脳疾患の治療、治療、予防のための新しい方法を模索する。脳がいかにして大量の情報を記録、処理、利用、保存、検索することを可能にしているかを解明する。</p>
必要性	<p>約 1,000 億個のニューロンと 100 兆個の接続を持つ人間の脳は、科学における最大の謎の一つであり、医学における最大の課題であり続けている。アルツハイマー病、パーキンソン病、自閉症、てんかん、統合失調症、うつ病、外傷性脳損傷などの神経・精神疾患は、個人、家族、社会に多大な影響を与えている。近年の神経科学の進歩にもかかわらず、人間の脳は非常に複雑であるため、神経学的・精神医学的疾患の根本的な原因はほとんど解明されていない。これらの悲惨な状態に苦しむ人々を効果的に支援する方法を開発するためには、研究者はまず、健康と疾病の両方で脳がどのように機能するかを理解するための、より完全な情報ツールを必要としている。</p>
時宜性	<p>過去 10 年間だけで、この分野における科学者たちの数々の画期的な発見があった。ヒトゲノムの配列決定、神経細胞の接続をマッピングするための新しいツールの開発、イメージング技術の解像度の向上、ナノサイエンスの爆発的な発展などである。これらの発見は、科学分野を横断的に統合する前例のない機会をもたらした。例えば、高度な遺伝学的技術と光学的技術を組み合わせることで、科学者たちは動物モデルの光パルスを使って、脳内の特定の細胞の活動が行動にどのように影響するかを判断できるようになった。さらに、神経科学と物理学の融合により、研究者は高解像度のイメージング技術を用いて、生きている人間の脳がどのように構造的・機能的につながっているかを観察することができるようになった。</p>
方法・意義	<p>この先駆的な取り組みの野心的な性格を考えると、幅広い専門知識と経験に基づいて計画を立てることが不可欠であった。そのため、NIH は、NIH 長官諮問委員会 (Advisory Committee to the NIH Director : 以下 ACD) のハイレベルなワーキンググループを設立した。このワーキンググループは、Cornelia "Cori" Bargmann 博士 (ロックフェラー大学) と William Newsome 博士 (スタンフォード大学) が共同議長を務め、科学界、患者団体、一般市民からの幅広い意見を求めた。両博士により公表され、ACD が強く支持する報告書「BRAIN 2025: A Scientific Vision」は、BRAIN Initiative の科学的目標を明確にし、これらの目標を達成するための複数年に渡る科学的計画を作成した (スケジュール、マイルストーン、費用の見積もりなど)。</p> <p>このような大胆な目標を達成するためには、多様な分野や分野にまたがる優秀な科学者やエンジニアのアイデアが必要となる。そのため、NIH は、DARPA、NSF、FDA、IARPA を含む他の政府機関と緊密に協力している。民間パートナーもまた、BRAIN Initiative へ投資している。5 年前には、このようなプロジェクトは不可能と考えられていた。今や 5 年後にするのでは遅すぎると言わなければならない。</p>

項目	内容
NIH による研究支援	<p>2019年までに、NIHは数百名の研究者に700以上のグラントを提供し、総額は13億ドルに達した。このプロジェクトの横断的な性質を考慮して、NIHのBRAIN Initiativeは10のNIH研究センター(Institute & Center:IC¹¹⁷)すなわちNCCIH、NEI、NIA、NIAAA、NIBIB、NICHD、NIDA、NIDCD、NIMH、およびNINDSによって管理されており、そのミッションと現在の研究ポートフォリオはBRAIN Initiativeの目標と一致している。</p> <p>これら10のIC間の調整は複数のレベルで行われている。外部プログラムのスタッフとICのディレクターは定期的に会合を開き、NIH全体のBRAIN Initiative研究の戦略的計画、管理、サポートを統合している。さらに、BRAIN Multi-Council Working GroupとNeuroethics Working Groupが結成され、同イニシアチブに参加している10のICに様々な問題について意見を提供している。両研究所は、21世紀治療法(21st Century Cures Act)によるものを含む、議会がBRAIN Initiativeのために用意した資金を戦略的に管理し、NIHの継続的な神経科学への多額の投資を活用している。同イニシアチブがNIH全体で大きな盛り上がりを見せていることを考えると、同イニシアチブの目標を補完するNIHの多くの研究グループ(個々のNIH研究所およびセンター、NIH長官室、女性健康研究室、行動・社会科学研究室、NIH神経科学研究グループプリント)からの追加資金によって、アドホックベースでも遂行される。</p>
BRAIN Initiativeの未来・倫理への配慮	<p>BRAIN Initiativeの急速な展開を受け、ACD BRAIN Initiative Working Group 2.0が結成された。グループは、「BRAIN 2025」報告書で示された計画に基づき、BRAIN Initiativeの進捗状況と進歩を評価し、脳回路の理解に革命をもたらす新しいツールや新しいツールを適用するための重要な機会を特定し、継続的な技術開発を行う価値のある分野を指定することを任務とした。また、BRAIN Initiativeの神経倫理サブグループは、進行中の研究の倫理的な意味合いを検討し、BRAIN Initiativeの進歩の将来を予測し、同イニシアチブのための神経倫理「ロードマップ」を作成することを任務とした。検討の詳細は、「BRAIN Initiative 2.0」報告書、「神経倫理(Neuroethics)」報告書に記載されている。</p>

b) BRAIN Initiative 計画の方向性

BRAIN Initiative の設計に関し、方向性と戦略を検討した NIH 長官諮問委員会の 2014 年の報告書「BRAIN 2025 A Scientific Vision」¹¹⁸では以下の提言がなされている。

- BRAIN Initiative を 2016 年度から 10 年間かけて発展させ、最初の 5 年間は技術開発に主眼を置き、次の 5 年間は脳に関する基本的な新しい発見を行うための技術の統合に主眼を置く。
- ワーキンググループは、相互作用するニューロンの回路の解析が特に機会に富み、革命的な進歩の可能性を秘めていると特定した。回路を真に理解するためには、構成細胞を特定して特徴付け、互いにシナプス接続を定義し、回路が生体内で機能している

¹¹⁷ NIH に 27 存在する、個別分野に特化した研究センター。

¹¹⁸ NIH, “BRAIN 2025 A Scientific Vision,” BRAIN Working Group Report to the Advisory Committee to the Director, June 2014.

ときの動的な活動パターンを観察し、その重要性を検証するためにこれらのパターンを動的に検証することが必要である。また、回路内や脳全体の相互作用する回路間の情報処理を支配するアルゴリズムを理解する必要がある。

- 研究目標 1～6（多様性の発見、複数のスケールでのマップ、動作中の脳状態の把握、因果関係の実証、基本原理の特定、人間の神経科学の発展）で生み出された新しい技術的・概念的アプローチを統合し、神経活動のダイナミックなパターンが、健康と疾患における認知、感情、知覚、行動にどのように変換されるのかを発見する。BRAIN Initiative の最も重要な成果目標は、開発された新しい技術と概念構造を相乗的に応用することで、精神機能の包括的で機械論的な理解を得ることである。
- BRAIN Initiative の中核的な原則となるべき特定のテーマ（7つの主要目標）は、
 - ヒトの研究とヒト以外のモデルを並行して追求すること
 - 学際的な共同研究で境界を越えること
 - 空間スケールと時間スケールを統合すること
 - データ共有のためのプラットフォームの確立
 - 技術の検証と普及
 - 神経科学研究の倫理的意味合いの考慮
 - NIH・納税者・基礎・トランスレーショナル・臨床神経科学コミュニティに対する説明責任、である。
- NIH による BRAIN Initiative への投資を今後 5 年間（16-20 年度）で年間 4 億ドルまで増加させ、その後（21-25 年度）も年間 5 億ドルで継続する。

c) BRAIN Initiative での研究成果

BRAIN Initiative における最新の顕著な成果は以下のとおりである。以下に示すように、同イニシアチブの研究テーマは、その研究の性格を反映して、いずれも基礎研究の色彩が濃いものが並んでいる。

表 3-16 BRAIN Initiative の最近の成果

テーマ	内容
記憶ゲームは脳損傷の理解に役立つか？	2020 年に NSF から資金提供を受けた BRAIN Initiative の研究者たちは、光学イメージングとオプトジェネティック技術を用いて、一次および二次体性感覚皮質の役割を解明し、外傷性脳損傷後に回復が困難なスキルを特定した。この研究では、マウスのウィスカー記憶ゲームを用いて、タスクに関連する特定の種類の情報が、両脳領域において分離型と分散型の両方で発生することを明らかにした。この研究は、人間の脳が感覚情報をどのように処理し、運動能力をどのように回復させるかについての理解を深めることにつながる。
皮質ネットワークによる機械知能	IARPA の Machine Intelligence from Cortical Networks (MICrONS : 皮質ネットワークによる機械知能) プログラムは、2020 年のうちに大成功を収めた。IARPA が資金提供した BRAIN Initiative の研究者たちは、

テーマ	内容
	<p>ハイスループットの透過型電子顕微鏡を用いてニューロン回路をマッピングするためのペタスケールの自動イメージングパイプラインを開発した。この研究は、複数の脳領域にまたがる皮質の微小回路レベルの大規模な電子顕微鏡データセットの収集が可能であることを実証した。このイメージング技術は、大規模な研究センターだけでなく、複数の小規模な研究室に分散して導入することができるのも利点である。</p>
<p>「喉の渇き」には種類があるのか？</p>	<p>NIHから資金提供を受けている BRAIN Initiative の研究者グループが、ネズミの異なるタイプの喉の渇きの細胞基盤を調べたことは、今年大きな話題となった。研究グループが調べたのは、「浸透圧性渇き」と「低揮発性渇き」という 2 種類の渇きである。浸透圧による喉の渇きは、純粋な水を欲する場合であり、低揮発性の喉の渇きは、ミネラル分を含んだ水を欲する場合である。血液中の浸透圧が上昇し、体液が失われると、角膜下器官 (SFO) と末端角膜血管器官 (OVLT) の両方で c-Fos (神経活動の間接的なマーカー) の発現が強くなることが判明した。この研究成果はメディア (NPR) においても“Water Or A Sports Drink? These Brain Cells May Decide Which One We Crave”として取り上げられた。この研究はカリフォルニア工科大学が研究設備を提供することで可能となったもので、携わった研究者は、「米国の大学、特にカリフォルニア工科大学のオープンで歓迎される環境がなければ、この研究は実現しなかった」と述べ、科学におけるオープンボーダーの重要性を強調している。</p>
<p>アストロサイトは脳の"マスター・コンダクター"である</p>	<p>「Neuroscience News」、「The Life Boat Foundation」、「NR Times」などはこのように成果を評した。2020年に発表されたこの NIH 資金を受けた発見は、まさに革命的である。BRAIN Initiative の研究者たちは、洗練されたウィルスと遺伝子の技術を用いて、NRCAM と呼ばれるアストロサイトの接着分子が、脳内の興奮性ではなく抑制性のシナプスを制御していることを実証した。「私たちは、アストロサイトが脳の音楽を構成する音符を奏でる指揮者であることを発見した」と、BRAIN Initiative の研究者であり、研究論文の筆頭著者である Scott Soderling 博士は述べている。</p>
<p>国際共同研究の支援</p>	<p>2020年には、BRAIN Initiative Alliance の複数の組織にまたがる研究が促進された。例えば、BRAIN Initiative の資金により、NIH、NSF、Kavli Foundation、DARPA は、「統合型ニューロフォトニクス」の実現を目的とした国際共同研究を支援した。2020年に発表された論文で、BRAIN Initiative の研究者たちは、統合型ニューロフォトニクスのパラダイムが、脳組織における高速・高密度・深部の機能イメージングを実現する可能性を示した。この研究は、Psychology Today に掲載された。</p>
<p>特定の行動を起こすための脳の信号パターンを分離し、解読することができるのか？</p>	<p>2020年、NIH と NSF から資金提供を受けた BRAIN Initiative の研究者チームは、まさにこの疑問に答えようとした。研究者たちは、特定の行動に関連する神経パターンの分離に関連するいくつかの問題を明らかにする、優先的部分空間識別 (PSID) と呼ばれる機械学習アルゴリズムを開発した。Maryam Shanechi 博士は、USC Viterbi News の取材に</p>

テーマ	内容
	対し、「私たちは、興味に基づく特定の行動に関連する脳信号の動的パターンを分離できるアルゴリズムを初めて開発した」と述べている。このようなアルゴリズムは、神経疾患や精神疾患の患者の失われた脳機能を回復させるための、より高度な BMI の開発に役立つ可能性がある。

3) DARPA における研究開発事例

ニューロテクノロジー開発の嚆矢となった DARPA による BCI への初期投資は、1974 年に「Close-Coupled Man/Machine Systems」(後に「Biocybernetics」と改称)プログラムとして開始された。このプログラムでは、脳波または脳磁図 (MEG) を用いて非侵襲的に測定した脳信号を含む人間の生理信号を応用して、人間と機械の間の直接的なコミュニケーションを可能にし、警戒心、疲労、感情、意思決定、知覚、一般的な認知能力に関連する神経状態をモニタリングすることを目指していた。このプログラムでは、人間の脳波における単一試行の感覚誘発反応の詳細な理解など、特筆すべき進歩があった。2002 年、DARPA はブレイン・マシン・インタフェース (BMI) プログラムを開始し、続いて人間支援神経デバイス (HAND) プログラムを開始して、BCI の分野に大きく舵を切った。これらの初期プログラムでは、義肢装具の感覚運動制御 (2003 年)、記憶エンコーディングの促進 (2007 年)、視覚入力の変換 (2005 年)、動的な神経デコーディングアルゴリズムの開発 (2005 年)、高解像度の神経イメージングのための新たなデバイスの開発 (2004 年) など、BCI の幅広い研究開発が行われた。DARPA では、この時期にニューロテクノロジー分野における基礎的な知見を獲得し、多くの技術が開発された¹¹⁹。

DARPA は、2014 年以降、オバマ大統領の BRAIN Initiative を支援するために 2 億ドル以上の投資を行ってきた。1970 年台から行われて来た DARPA の脳科学研究に、この連邦政府の投資が加わることで、人の健康を改善し、人々の生活、仕事、遊び方を変える可能性のある革新的なニューロテクノロジーの開発が加速している¹²⁰。DARPA における主な研究開発事例は以下のとおりである。

表 3-17 DARPA のニューロテクノロジーに関する主な研究開発事例

プログラム	内容
Electrical Prescriptions (電子処方: ElectRx)	ElectRx プログラムは、神経線維ほどの大きさの超小型デバイスを用いて臓器の機能を調節し、低侵襲な注射で投与することで、人間の体の自然治癒力を高めることを目的としている。
Hand Proprioception and Touch Interfaces (手の固有受容感覚とタッチインタフェース)	HAPTIX プログラムは、完全に移植可能なモジュール式の再構成可能な神経インタフェース・マイクロシステムを開発し、義肢インタフェース・リンクなどの外部モジュールと無線通信することで、被験者に自然な手の感覚をもたらすことを目的としている。

¹¹⁹ Robbin A. Miranda et al., "DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies," *Journal of Neuroscience Methods* Volume 244, 2015.4.15, pp 52-67<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027014002702>>

¹²⁰ DARPA ウェブサイト Neuroscience <<https://www.darpa.mil/tag-list?tag=Neuroscience>>

プログラム	内容
HAPTIX)	
Neural Engineering System Design (神経工学システム設計：NESD)	NESD プログラムは、脳とデジタル世界の間で、極めて高い信号分解能と高速データ転送帯域を実現する埋め込み型ニューラル・インタフェースの開発を目指す。
Neuro Function, Activity, Structure and Technology (神経機能・活動・構造・技術：Neuro-FAST)	Neuro-FAST プログラムは、脳活動の視覚化と解釈を可能にすることで、脳に対する脅威を解明し、軽減するとともに、機能を改善する行動を促進するためのブレイン・イン・ザ・ループ・システムの開発を促進目的としている。革新的な組織保存法である「クラリティ」を開発し、遺伝学、光記録、BCI (ブレイン・コンピュータ・インタフェース) などの最新の知見を探究する。
Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology (次世代非手術型神経技術：N3)	N3 プログラムは、脳内の複数の場所から一度に読み書きできる、安全で携行可能な神経インタフェースシステムの開発を目指す。これまでの神経技術では、外科的に電極を埋め込む必要があったが、N3 では健常者が使用できるように、外科手術を必要としない高解像度の技術開発を目標としている。
Reliable Neural-Interface Technology (信頼性の高い神経インタフェース技術：RE-NET)	RE-NET プログラムは、高性能な義肢などの複雑な機械を制御するのに必要な規模と速度で、神経系から確実に情報を抽出するための技術を開発することを目的としている。
Restoring Active Memory (動的記憶の回復：RAM)	RAM プログラムは、ワイヤレスで完全に移植可能な神経インタフェース医療機器を開発し、ヒトへの臨床使用に向けた治験をおこなうことを目的としている。この装置は、外傷性脳障害や神経疾患によって記憶を失った人が、新しい記憶を形成したり、既存の記憶を取り戻したりすることを可能にする。
Revolutionizing Prosthetics (義肢装具の革新)	Revolutionizing Prosthetics プログラムでは、DARPA が開発した腕システムの機能性を向上させ、上肢を失った軍人などの治療に役立てることを目的としている。このプログラムで開発された器用な動きが可能な手の機能システムは、すでに不発弾を除去するための小型ロボットシステムに応用され、兵士がそうした場面で手足を失うリスクを軽減している。
Systems-Based Neurotechnology for Emerging Therapies (新薬開発のためのシステムベースの神経技術：SUBNETS)	SUBNETS プログラムは、神経心理学的疾患を治療するための、埋め込み型のクローズドループ診断・治療システムの開発を目的としている。
Targeted Neuroplasticity Training (神経可塑性標的訓練：TNT)	TNT プログラムは、末梢神経を正確に活性化することで、脳内の神経結合を促進・強化し、認知スキルトレーニングのペースと効果を向上させることを目的としている。TNT プログラムでは、国防総省が行う大規模な訓練のコストと期間を削減し、より高い成果を収めることを目指し、幅広い認知スキルの学習を可能にするプラットフォーム技術の開発を行う。

4) Neurallink 社の「ガートロード」の事例

テスラの創業者で著名な実業家のイーロン・マスク (Elon Musk) 氏が設立したニューラル・インタフェース企業「Neuralink」社は、2020年8月28日、嗅覚をモニターできるとするコインサイズのデバイスを、「ガートロード」と名付けられた豚の脳皮質に埋め込んで作動させる実験映像を、ライブストリーミングで公開した¹²¹。

ガートロードが餌を食べて匂いを感じると、インプラントが検出した信号が外部コンピュータに送信され、音楽が鳴るというものである。これは脳にチップを埋め込み、コンピュータと連動させる BCI 技術の実証であり、頭蓋骨に埋め込んだチップから神経の動きをコンピュータやスマートフォンに伝え、操作することを目指しているという。マスク氏は、この技術がゆくゆくは認知症やパーキンソン病、脊髄損傷といった症状の治療に役立つと話している。同社は、2019年に臨床実験も開始しているという¹²²。

マスク氏と Neuralink 社の連名で投稿されたこの実験に係る論文（査読無し）のabstractでは、披露された技術の基盤について以下のように主張されている。

【マスク氏、Neuralink 社による論文における主張¹²³】

BMI (ブレイン・マシン・インタフェース) は、感覚・運動機能の回復や神経疾患の治療につながると期待されているが、チャンネル数が少ないためにその可能性が制限されており、臨床用 BMI はまだ普及していない。この論文では、スケーラブルな高帯域 BMI システムに向けた Neuralink 社の最初のステップについて説明する。私たちは、小型で柔軟な電極「スレッド」のアレイを構築し、1つのアレイにつき 3,072 個の電極を 96 個のスレッドに分散させた。また、1分間に 6 本のスレッド (192 個の電極) を挿入することができる脳外科用ロボットも開発した。各スレッドは、表面の血管を避け、特定の脳領域を標的にするので、ミクロン単位の精度で脳内に個別に挿入することができる。電極アレイは、低消費電力のオンボード増幅およびデジタル化のためのカスタムチップを搭載した小型の埋め込みデバイスとしてパッケージ化されており、3,072 チャンネル分のパッケージが占める面積は (23×18.5×2) mm³ 以下である。1本の USB-C ケーブルでデバイスから全帯域のデータストリーミングを行い、すべてのチャンネルを同時に記録することができる。このシステムは、慢性的に埋め込まれた電極において、最大 85.5% のスパイク収率を達成している。Neuralink 社の BMI へのアプローチは、臨床に適したパッケージの密度とスケーラビリティにおいてが前例のないものである。

こうしたマスク氏の主張につき、メディアの反応は概ね好意的であったものの、専門家の反応は控えめなものであった。専門家の多くはマスク氏の提案する技術は空想的とまでは言えないにしても、実現にはあまりにも遠い道のりが待っている、としている。例えば、ニューカッスル大学のニューラル・インタフェース・エンジニアである Andrew Jackson 教授は、今回の実験は「堅実なエンジニアリングだが、平凡な神経科学にすぎない」とコメントし、マスク氏らが査読付き論文の精査を避けている点を強調している。これに対し

¹²¹ YouTube チャンネル Neuralink Progress Update, Summer 2020
<<https://www.youtube.com/watch?v=DVvmgjl74w>>

¹²² BBC ウェブサイト Neuralink: Elon Musk unveils pig with chip in its brain<
<https://www.bbc.com/news/world-us-canada-53956683>>

¹²³ Elon Musk, Neuralink, "An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels", bioRxiv, 2019.7.18 < <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/703801v2.full> >

てマスク氏は、「残念ながら、学术界の多くの人々は、アイデアの価値を過大評価しながらも、それを実現することを過小評価する傾向がある」とツイートした¹²⁴。

ケース・ウェスタン・リザーブ大学の生物医学工学准教授で、BrainGate 社の主任研究員である Bolu Ajiboye 氏は、Neuralink 社のデバイスが長期にわたって安全にデータを伝送できることが証明されれば、「大きな進歩」であると述べている。ただし、組織にダメージを与えるような熱を発生させずに、これだけのデータを転送できる方法は、まだ人間では実証されていない。また、デバイスのサイズがかなり大きい点も課題であるという。さらに、こうした技術では脳波の解読（デコーディング）が鍵となるが、統計的アプローチや深層学習アプローチを用いたデコーディングアルゴリズムの開発に、Neuralink 社が工数を費やした形跡も見られない、と指摘した。

「この分野では、技術に何ができると主張しているのか、どのような用途を目指しているのかについて、明らかにすべき大きな責任がある」と Ajiboye 氏は言う。「イーロン・マスク氏がこの分野に参入したことで、多くの注目を集めている。それは歓迎すべきことだが、課題は、誇大広告と現実の違いを語らなければならない、ということである」¹²⁵。

マスク氏が、こうしたデモンストレーションを通じて大きな話題を提供し続けている点は、ニューロテクノロジーにとって一種の福音でもあるとする意見もある。「マスク氏の Neuralink 社のビジョンを信じるかどうかにかかわらず、この分野で大規模な商業ベンチャーが出現することは、研究開発にとって有望である。2016 年の初期構想以来、マスク氏は 1 億ドル以上の資金を Neuralink プロジェクトに投入した。Neuralink プロジェクトが開発した製品のプロトタイプは、すでに FDA（米国食品医薬品局）から画期的な装置として指定を受けている。

前例のない規模の資金投入、メディアの注目、商業化への道筋の提示により、この分野に関連する投資家の間で見られた慎重な態度が解消する可能性がある。最先端の技術を顧客に提供しようとする企業の設立が促進され、科学者が新たな問題に取り組むことができるようになるだろう。そう考えると、マスク氏と彼の音楽を奏でる豚の幸運を心から祈るばかりだ」¹²⁶。

¹²⁴ マンチェスター大学ウェブサイト Will Elon Musk's Neuralink change biotech R&D?<
<https://www.manchester.ac.uk/discover/news/will-elon-musks-neuralink-change-biotech-rd/>>

¹²⁵ Emily Waltz, "Elon Musk Announces Neuralink Advance Toward Syncing Our Brains With AI," *IEEE Spectrum*, 2020.8.28, <<https://spectrum.ieee.org/the-human-os/biomedical/devices/elon-musk-neuralink-advance-brains-ai>>

¹²⁶ マンチェスター大学ウェブサイト Will Elon Musk's Neuralink change biotech R&D?<
<https://www.manchester.ac.uk/discover/news/will-elon-musks-neuralink-change-biotech-rd/>>

(2) 欧州

1) Human Brain Project (HBP)

a) 概要

HBP は、人間の脳を包括的に理解することを目的とした、2013 年から 2023 年までの 10 年間にわたる欧州 FET (Future and Emerging Technology) フラッグシッププロジェクトである。

HBP には欧州の 19 カ国の大学、病院、研究所等の 134 のパートナー機関、23 の提携メンバーが加盟している。29 件のパートナー・プロジェクトが実施され、欧州全土で 500 人以上の科学者とエンジニアが参加している。HBP では 2013 年から 2023 年までの間に EU 資金 4 億 600 万ユーロ、各国資金 6 億ユーロの調達を目標にしている。HBP の成果として、これまでに 1,200 以上の科学論文が発表されている。

HBP は卓越した神経科学研究のため、脳に着想を得た技術の研究開発のための共同プラットフォームである、The European Infrastructure For Brain Research (EBRAINS) を運用している。HBP は、脳研究、脳医学、脳に着想を得た技術の進展を加速するために、学際的なアプローチを採用している。HBP の研究インフラである EBRAINS においては、科学者や産業界が、データ、モデル、ソフトウェアツール、ハードウェア機能を利用できるようになっている。HBP は、EU の 4 つの主要なスーパーコンピュータセンターのコンピューティングおよびデータ分析能力を活用しながら、欧州の主要な大学および研究機関の学術研究能力を引き出している。

HBP では、意識、動物実験、患者の匿名性などに関する問題についてのパブリックエンゲージメントの取り組みがなされるなど、研究の社会的・倫理的な側面も重視されている。また、科学者やエンジニアが学際的なチームで研究を遂行する能力を高めるための包括的な教育プログラムも実施している。

HBP のコアプロジェクトは、6 つの学際的かつ統合された科学と研究インフラのワークパッケージ (WP)、および 3 つの包括的な架橋的研究活動の WP で構成されている。

表 3-18 HBP コアプロジェクトのワークパッケージ (WP)

プログラム	テーマ
WP1	ヒトのマルチスケール・ブレイン・コネクトームとその変動性：シナプスから大規模ネットワークおよび機能まで
WP2	脳の認知と意識を支えるネットワーク
WP3	認知アーキテクチャのための適応型ネットワーク：高度な学習からニューロロボティクス、ニューロモーフィック・アプリケーションまで
WP4	EBRAINS データ・サービス
WP5	EBRAINS モデリング・サービス
WP6	EBRAINS コンピューティング・サービス
WP7	マネージメントとコーディネーション
WP8	コミュニケーション、アウトリーチ、活用
WP9	責任ある研究とイノベーション (RRI)

b) EBRAINS

HBP は、神経科学と現代の情報技術の融合を、大規模かつ統合的で体系的な方法で推進するものである。HBP は、より広範なコミュニティに利益をもたらす永続的な脳研究プラットフォームである EBRAINS を開発している。研究活動を促進するため用意された EBRAINS の枠組みでは、さまざまな神経科学コミュニティをまとめる永続的な分散型デジタル研究インフラを提供し、斬新で全体的な視点から脳にアプローチする手段を提供している。

EBRAINS は、専用のビッグデータ解析、クラウド、ハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC) リソース (FENIX Infrastructure¹²⁷) に支えられ、神経データ、モデル、機能にまたがる共同ワークフローを提供する。研究インフラとして、さまざまな空間的・時間的スケールで表現される極めて複雑なレベルの事象に対応することができる。

EBRAINS は、現代の ICT を活用して、神経科学のデジタル化を目指すものである。EBRAINS が提供するサービスは、研究者が神経科学の分野における既存の障壁を克服し、脳機能や認知能力の基盤となるメカニズムの理解を深めるのに役立つ。また、脳を利用した革新的な技術を開発するために必要な手段を提供し、医療や脳を利用した ICT の分野で変革をもたらす可能性を秘めている。

脳の機能に関する新たな知識は、コンピューティング、AI、医療の分野におけるイノベーションの原動力となる。EBRAINS は、科学における新しい知見、技術開発におけるイノベーション、ヨーロッパや世界の患者のための進歩の触媒となることが期待されている。

c) 今後の展望

HBP および EBRAINS の研究の最終段階 (2020 年 4 月~2023 年 3 月) では、脳ネットワーク、意識の役割、人工ニューラルネットワークの 3 つの中核的な科学分野の研究を進めながら、EBRAINS をさらに拡大することに焦点が当てられている。

2) 英国

a) ニューロテクノロジー戦略

英国の王立協会 (The Royal Society) は 2019 年 9 月に、英国政府に対するニューロテクノロジー開発戦略に関する提言を盛り込んだ報告書「iHuman Blurring lines between mind and machine」を発表した¹²⁸。

同報告書は米国の BRAIN Initiative、欧州の HBP など各国のニューロテクノロジー戦略に触れたのち、ニューロテクノロジー関連市場の有望さ (世界全体の市場規模は、2018 年に 84 億ドル、2022 年には 133 億ドル)、特に米国における民間セクターの投資額の大きさを指摘している。英国政府は 2027 年までに GDP の 2.4% を研究開発に充てるとして

¹²⁷ BSC (スペイン)、CEA (フランス)、CINECA (イタリア)、CSC (フィンランド)、CSC (スイス)、JSC (ドイツ) の欧州の 6 つのスーパーコンピュータセンターが共同で構築した HPC インフラの通称。初期バージョンは、HBP の一環である ICEI (Interactive Computing E-Infrastructure) プロジェクトで利用されている。FENIX 研究インフラウェブサイト ABOUT FENIX<<https://fenix-ri.eu/about-fenix>>

¹²⁸ 王立協会ウェブサイト iHuman Blurring lines between mind and machine PERSPECTIVE <<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/ihuman/report-neural-interfaces.pdf>>

いるが、「ニューラル・テクノロジー¹²⁹」への投資は、英国にとって戦略的に重要であるとする。

ニューラル・テクノロジー分野における英国の強みとして報告書は、①神経科学や電気工学などの関連する分野での卓越した学術研究、②新興技術の責任あるイノベーションについて世界をリードする規制、③研究、イノベーション、商業化のための国家プラットフォームである国民保健サービス（National Health Service：以下 NHS）、ライフサイエンス分野とゲームをはじめとするクリエイティブ産業の競争優位性を挙げている。

報告書は、「英国は現在、ニューラル・インタフェースの開発において米国に遅れをとっている（UK currently lags behind the USA in the development of neural interfaces）」として、先見性のあるアプローチをとることでこのギャップを埋めなければならない、と指摘している。そうしたアプローチとして、産官学が連携し、英国での技術開発を保証しながら、倫理や規制、多様性や包括性の面でも世界をリードする英国のニューロテクノロジー「エコシステム」の構築を呼びかけている。

具体的なニューロテクノロジー戦略における行動要請（A call to action）として、王立協会は、以下の点を英国政府に勧告している。

表 3-19 王立協会報告書による「行動要請」

原則／ 政府への要請	内容
原則	<ul style="list-style-type: none"> ・ 英国での技術開発を促進するために、「ニューラル・インタフェース・エコシステム（neural interface ecosystem）」を構築する。このエコシステムは、ニューラル・インタフェース・アプリケーションの開発を促進するデジタル技術の進歩に支えられる。 ・ エコシステムでは、科学者、臨床医、ゲーム開発者、センサー開発者コミュニティ、アーティスト、政策立案者、投資家、資金提供者、規制当局、一般市民などが参加し、相互交流を促進するネットワークが形成される。 ・ エコシステムは、商業化とスケールアップを促進し、投資家、規制当局、消費者との信頼関係を構築するための合意標準（consensus standards）を開発する。 ・ エコシステムは、ニューラル・インタフェース開発者と、デバイスの被験者の両方に、包括性と多様性を求める。この取り組みを通じ、ニューラル・インタフェースが不平等を助長する可能性を軽減する。

¹²⁹ 同報告書では”neural interface technology”としている。

原則／ 政府への要請	内容
政府への要請	<ul style="list-style-type: none"> ・ ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）は、ニューラル・インタフェースをグランド・チャレンジ（Grand Challenge）に指定することを検討すべきである。 ・ Innovate UK は、バーチャル・リアリティ開発のための「Immerse UK」と同様の目的で運営される「UK Centre for Neural Interfaces」への資金提供を検討すべきである。具体的な目標としては、医療界とゲーム界のコラボレーションを支援することが考えられる。センターを監督する役員の少なくとも10%は一般市民であることが推奨される。 ・ UKRI は、ニューラル・インタフェースを用いた精神疾患の治療法開発を支援しているが、技術の医療応用が十分達成されていない点が課題である。 ・ 英国規格協会（BSI）は、エコシステムに積極的に関与し、この分野における国際的に認知された規格の策定を支援することを検討すべきである。初期の課題としては、医療機器規制の対象外であるインタフェースの安全性に関する規制策定が考えられる。 ・ UK Centre for Neural Interfaces は、年次報告書において、新興分野における多様性と包括性の達成状況を評価すべきである。 ・ エコシステムは、ニューラル・インタフェースを試用する被験者の多様性を確保するための、産業界主導の具体的な基準を策定すべきである。 ・ エコシステムは、ニューラル・インタフェースが構築されるトレーニング・データセットの多様性を評価するための監査を奨励・促進すべきである。これは、性別、民族、社会経済的地位に関わらず、ユーザーにとってテクノロジーが同等に機能することを保証することを目的とする。

(3) 中国

1) 中国科学技術政策における脳・神経科学研究の位置づけ

中国では、2006年に発表された「国家中長期化学技術発展計画（2006－2020年）」において、科学の先端的課題の8項目の1つに「脳科学と認知」が挙げられて以来、各種競争資金制度においても少なからぬ研究費が脳科学研究に配分されるようになった。現在は国家重点研究開発計画に統合された国家ハイテク研究発展計画（863計画）と国家重点基礎研究発展計画（973計画）では、脳科学研究への助成額は14億元である。科学技術部が主導する国家自然科学基金では、脳研究に約20億元が助成されている。同基金の助成スキームの一つである「重大研究プロジェクト」では、2008年に「視聴覚情報に基づくコグニティブ・コンピューティング（ある事象をコンピュータが自ら考え、学習し、答えを導き出すこと）」をテーマとする研究プロジェクトへの大規模な助成を開始し、5年間で73件が採択された。また、中国科学院では同基金から年間6000万元の研究費を得て、2012年に脳機能マッピングに関するプロジェクトを始動している¹³⁰。

この時期には、各大学・研究機関でも次々に脳科学関連の研究所が設立された。上海交

¹³⁰ 蒲慕明、徐波、譚铁牛「脳科学与类脑研究概述」『中国科学院院刊』2016年7月10日。

通大学では、2002年の時点で脳型コンピューティング・機械知能研究センターを設立し、厦門大学では、情報科学・技術学院人工知能研究所と国家モデルソフトウェア学院が共同で福建省脳型インテリジェントシステム重点実験室を発足させた。

北京大学では2006年4月に設立された先端融合領域学科研究院内に脳科学・脳型研究センターが設置され、清華大学では2014年9月に脳型コンピューティング研究センター¹³¹を発足させた。中国科学院では、2014年に脳科学・インテリジェント技術エクセレンスセンターを設立し、同自動化研究所は2015年4月に脳型知能研究センターを発足させた。

脳・神経科学分野の研究が国家レベルで推進されるようになるのは第13次五か年計画（2016-2020年）からである。同計画で示された2030年までの国家重要プロジェクト「科技イノベーション2030 重大プロジェクト」の6つの「重大科学技術プロジェクト」の1つに、「脳科学と脳型知能研究¹³²」プロジェクトが入ることとなった。同プロジェクトは「中国脳計画」と呼称され、北京市、上海市、浙江省、広東省、天津市、湖北省、四川省、重慶市等の主要としても地域版の計画が策定されるとともに、研究施設が次々と設立されることとなった。

そのうちの 하나가、2018年3月に北京市中関村生命科技园に設立された「北京脳科学・脳型研究センター¹³³」である。同センターは、北京市政府、中国科学院、軍事科学院、北京大学、清華大学、北京師範大学、中国医学科学院、中国中医科学院が共同で設立された。研究分野は、①共通技術プラットフォームとデータベース構築、②認知障害関連の重大疾病、③脳型コンピューティングとブレイン・マシン・インテリジェンス、④児童青少年の脳・心理の発育、⑤脳認知原理解析の5分野である。同年、上海市は科学技術重大プロジェクト「脳と脳型智能基礎研究の実用化・応用研究（脳与类脑智能基础转化应用研究）」を始動し、「上海脳科学・脳型研究センター」を設立した¹³⁴。

2) 「中国脳計画」の概要

「中国脳計画」の核となる考え方は「一体両翼」である。「一体」は脳の認知機能の原理（脳の認知機能を理解するため、神経基盤を研究主体とする）を指し、「両翼」は脳型コンピューティング及びブレイン・マシン・インテリジェンス技術と、脳の重大疾病の診療、を指す。ブレイン・マシン・インテリジェンス（脳機智能）の定義は明らかでないが、BMIやBCIといった脳情報を利用して脳と機器を結びつけるような技術や、脳科学とAIの融合領域の技術を総称するものだと考えられる。

¹³¹ <https://www.cbicr.tsinghua.edu.cn/>

¹³² 日本語ではなじみのない「脳型知能研究」だが、これは、英語の Brain-Like Intelligence を中国語に翻訳したものである。「脳型知能」は「高度に進化した生物の脳によって体現される知能」であり、「脳型知能研究」は人工知能、コンピュータ科学、脳科学と神経科学、認知科学等の研究分野の学際的研究であるという（出典：曾毅、刘成林、谭铁牛「类脑智能研究的回顾与展望」『计算机学报』第39卷第1期、2016年）。

¹³³ <http://www.cibr.ac.cn/>

¹³⁴ 张学博、阮梅花、袁天蔚他「神经科学和类脑人工智能发展：新进展、新趋势」『生命科学』第32卷10期、2020年10月。

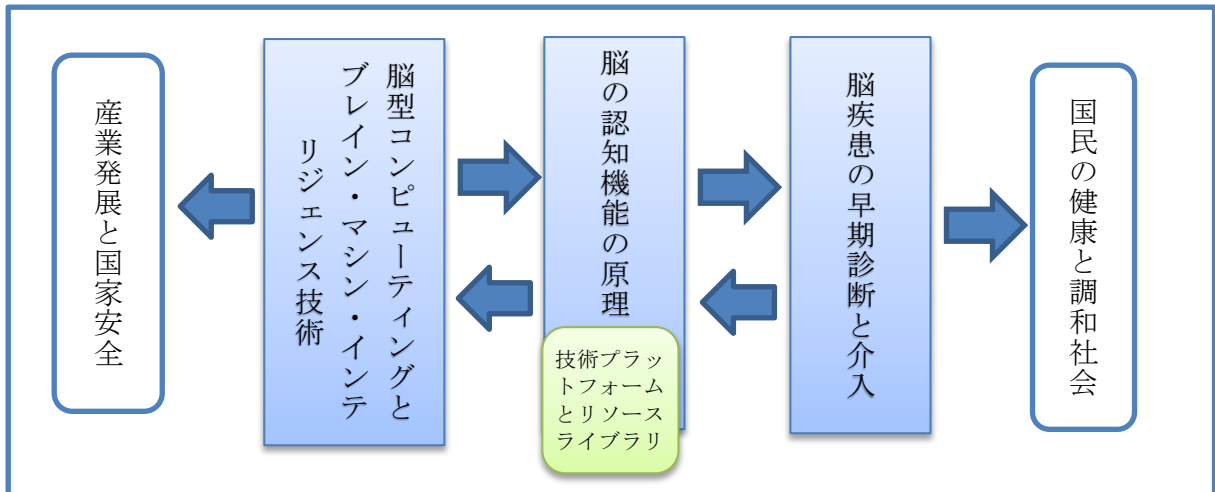


図 3-14 「中国脳計画」のフレームワーク 135

脳科学及びインテリジェント技術の専門家によると、その具体的研究内容は以下のとおりであるという。

表 3-20 「中国脳計画」の主な研究内容 136

分野	研究内容
脳の認知機能の原理	脳の基本的な認知機能（感覚・知覚、学習・記憶、情動・感情、注意・選択など）と高次脳の認知機能（共感、思考、自己認識、言語など）の神経回路や働きのメカニズムの解明において、ヒトの脳のマクロレベルの神経回路と実験動物のメゾスコピック神経回路の構造的・機能的なマッピングを行う。
脳疾患の早期診断と介入	主要な脳疾患（幼児期の自閉症や知的障害、中年期のうつ病や依存症、老年期の変性脳疾患など）の病態の解明。 主要な脳疾患の早期警戒・早期診断のための各種指標（遺伝子プロファイリング、血液・脳脊髄液、脳画像、脳機能などの指標）の確立。 主な脳疾患の早期介入・治療・リハビリのための薬理的・生理学的・物理学な新規ツールの開発。
脳型コンピューティングとブレイン・マシン・インテリジェンス	脳型コンピューティング理論と次世代人工ニューラルネットワークコンピューティングモデル、ニューラルネットワークプロセッサや脳型コンピュータの求めるソフトウェア環境やアプリケーションプラットフォーム、自己学習型・環境適応型ロボット、BMIや脳と機械を融合した新規モデルや手法、脳活動（電気、磁器、超音波）制御技術の研究開発。

3) 主な研究事例

先述の浙江大学や香港大学とマカオ大学の研究事例を挙げたが、中国では「中国脳計

¹³⁵ 蒲慕明、徐波、譚铁牛、前掲。

¹³⁶ 前掲注 134

画」始動後、大学・研究機関にて数々の研究報告がなされている。

北京大学の分子医学研究所、情報科学技術学院、生物動態化学結像センター、生命科学学院、工学院と中国人民解放军軍軍事医学科学院から成る研究チームは、自由行動するマウスの脳活動を正確に記録可能な高速・高解像度のマイクロ 2 光子顕微鏡を開発し、2017 年 5 月 29 日「Nature」誌で発表した¹³⁷。

華中科技大学武漢光電国家実験室（建設中）生物医学光子学機能実験室の駱清銘教授の研究チームの開発したハイスループット 2 色イメージング法では、マウスの脳全体を細胞レベルで高解像度に 3D イメージングを形成し、再構築したと発表した¹³⁸。

また 2018 年、中国科学院生物物理研究所の王曉群教授、北京大学の湯富酬教授らの研究チームは、ヒトの前頭前野の発達過程における前頭前野形成の細胞・分子メカニズムを初めて体系的に研究し、その成果を「Nature」誌に発表した¹³⁹。

3.2.4 日本のニューロテクノロジー研究の取組みの現状と問題点

(1) 日本のニューロテクノロジー研究の状況

我が国におけるニューロテクノロジー研究は主に大学・研究機関で行われており、運動意図を解読し、機械等を動かす BMI（ブレイン・マシン・インタフェース）、またそれを応用したリハビリテーション技術（BMI 療法）、ニューロフィードバック等を用いた介入研究で世界的にも競争力のある研究開発が行われている。

1) BMI を利用した身体機能の代替研究

BMI を利用した麻痺患者等の身体機能の代替に関しては、関西のグループが充実した研究開発成果を出しており、NICT・CiNet の鈴木隆文氏¹⁴⁰や、大阪大学医学系研究科の脳神経外科・国際医工情報センターの平田雅之氏¹⁴¹、大阪大学高等共創研究院の柳澤琢史氏のグループ¹⁴²が、重症 ALS 患者に対する皮質脳波を用いた BMI の臨床研究等、侵襲型・非侵襲型含めた BMI の基礎・応用研究を進めている。

2) BMI を利用した身体機能の回復研究

a) BMI 療法

慶応義塾大学の牛場潤一准教授を中心としたグループが開発している「BMI 療法」は、脳卒中後の麻痺患者さんのリハビリテーションに BMI を使おうというものである¹⁴³。

脳の一大原則として、神経細胞同士は「使えばつながる」というものがあり、たとえ脳

¹³⁷ 「北京大学召开“成功研制新一代微型化双光子荧光显微镜”专题新闻发布会」2017 年 6 月 1 日、北京大学ウェブサイト<http://pkunews.pku.edu.cn/xwzh/2017-06/01/content_298070.htm>

¹³⁸ 「《自然・通讯》发表华中科技大学骆清铭教授团队最新研究成果」2016 年 7 月 7 日、青塔<<https://www.cingta.com/detail/815>>

¹³⁹ 「Nature：中国科学家首次解析人脑“中央处理器”，领先美国脑计划」2018 年 3 月 15 日、MedSci<https://www.medsci.cn/article/show_article.do?id=c72013251ea7>

¹⁴⁰ https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/83/11/83_996/_pdf

¹⁴¹ https://www.jstage.jst.go.jp/article/sobim/42/2/42_89/_pdf

¹⁴² <https://www2.med.osaka-u.ac.jp/nsurg/yanagisawa/>

¹⁴³ Ushiba, J., & Soekadar, S. R. (2016). Brain-machine interfaces for rehabilitation of poststroke hemiplegia. In Progress in Brain Research

卒中後で脳の運動に関わる一部分の神経細胞が脱落しても、脳には「可塑性」という、変化してそれを維持する機能がある。そこで、「運動準備の神経細胞群」⇒「筋肉に運動指令を伝達する運動実行系の神経細胞群」⇒「実際に筋肉が動いた結果を脳にフィードバックする求心性の感覚神経細胞群」が連続して活動するようなトレーニングをくり返すことで、徐々に運動機能が回復することが期待される。しかし麻痺が重度だといっさい四肢が動かないので、リハビリに関しても手の施しようがなかったという現状があった。

BMI 療法とは、そうした状況の麻痺患者の脳波を計測し、患者が「動きたい」という運動意思を読みとって、それにあわせて外骨格ロボットで手の運動を支援したり、電気刺激を筋に加えたり、バーチャル・リアリティ上で自分の手が動く映像を流すなどのフィードバックを与えるというもので、まったく筋肉活動が見られない患者でも機能回復を目指せるものである。

日本以外でもこうした両方の効果は研究されていて、世界各国で行われた 9 件 235 名の患者を対象とした研究のメタアナリシスで、従来型の治療法やなどの統制条件と比べて、BMI 療法の効果量は 0.79) あることが報告されている¹⁴⁴。

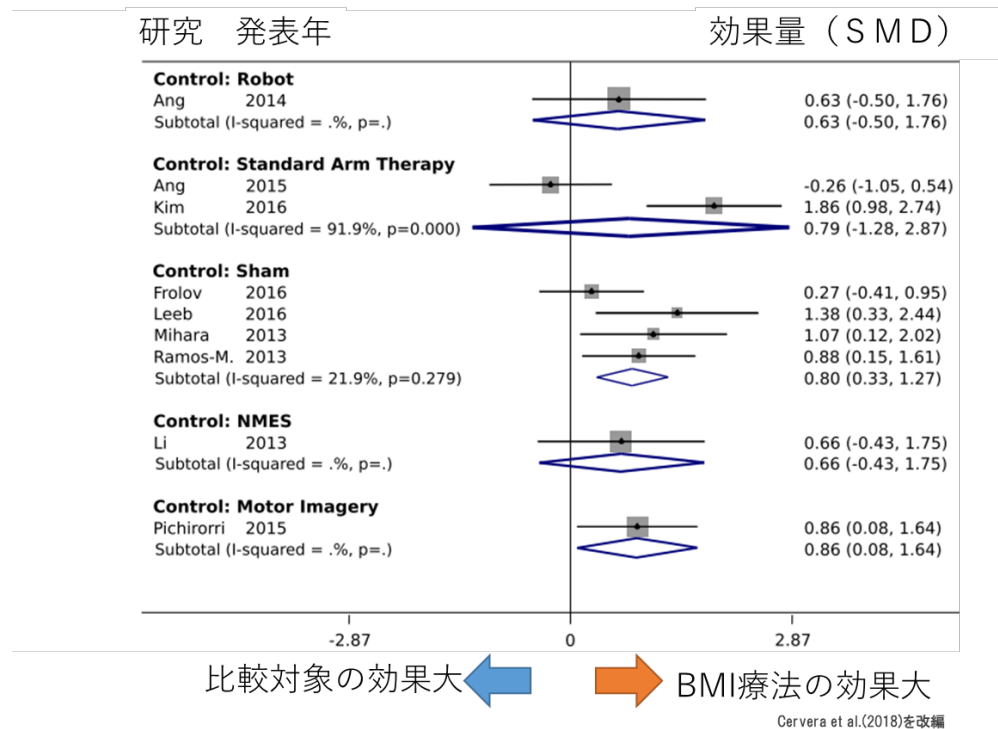


図 3-15 BMI 療法の効果に関するメタアナリシスの結果

b) 人工神経接続

BMI 療法以外の技術として、東京都医学総合研究所の西村幸男氏¹⁴⁵は、不治の病であ

¹⁴⁴ Cervera, M. A., Soekadar, S. R., Ushiba, J., Millan, J. del R., Liu, M., Birbaumer, N., & Garipelli, G. (2018). Braincomputer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis. *Annals of Clinical and Translational Neurolog*

¹⁴⁵ <https://www.igakuken.or.jp/project/detail/neuroprosth.html>

ると考えられていた脳脊髄損傷に対する革新的な治療法“人工神経接続”を脳梗塞患者と脊髄損傷患者に適用し、損傷によって失った機能である“自分の身体を感じ、自分で動かす”ことを再獲得することを目指し研究開発を行っている。実際に脊髄損傷を受け、脳と脊髄の連絡が遮断された患者に対し、“人工神経接続”はコンピュータを介して損傷を免れた神経同士をバイパス・接続し、自身の意思⇒コンピュータ⇒脊髄神経回路への刺激ループを形成することで随意的に運動を制御することに成功している。

こうした人工神経接続を長期間継続することで自分の脚で歩けるようになった例もあり、人工神経接続の技術は、麻痺した運動機能を一過性に再建するのみに留まらず、その継続によって随意運動機能を回復させる可能性を持っている。

3) 感覚・知覚に関連する脳情報解読技術

我が国におけるニューロテクノロジー研究は運動情報を扱う BMI 以外にも強みがあり、その一つが感覚に関する脳情報の解読技術である。我々が、感覚器を通して世界をどう知覚し、認識しているかという「感覚体験」を対象に、fMRI 計測等により多様で複雑な人間の知覚体験を再構成するようなものは、ブレイン・デコーディング（脳情報解読）あるいは“科学的なマインド・リーディング”¹⁴⁶技術として、近年注目を集めている。

この分野は、京都大学の神谷之康氏が世界的な権威であり、彼らが世界に先駆け 2005 年に発表した研究¹⁴⁷では、被験者に線分の角度がまちまちの縞模様を見てもらい、それを初期視覚野と呼ばれる、エッジの処理といった基礎的な視覚処理プロセスを担う領野の脳活動（fMRI）から解読できる（どの角度のものか当てる）ことを示した。その研究以前までは生物の視覚系で、視野の中にどんな傾きの線分（エッジ）があるかを「一次視覚野」という場所が処理していることは、1958 年の段階でわかっていたが、それは動物の 1 個のニューロンレベルで「特定の方角をコードしている」という知識にとどまっていた、「どの神経細胞が、どの情報をコードしているか」はニューロンの発火を見なければわからないという前提があった。

彼らはそれを人間の、しかも fMRI という解像度がそこまで高くない方法で、視覚体験の「内容」つまりどんな傾きの線分を見ているかを解読できたことで、画期的な成果となった。その後、神谷氏のグループはさらに、視野のどの辺に刺激があるかを解読する技術を作り、「neuron」という単語を fMRI の脳情報から「再構成」することに 2008 年成功したり¹⁴⁸、「被験者が寝ている間に見た夢の内容を解読する」という成果に至っている¹⁴⁹。

また、2021 年 3 月現在 NICT/CiNet に所属する西本伸志氏のグループが 2011 年に発表した「Vision Reconstruction」、すなわち fMRI で計測された脳活動の情報から、その人が今見ている動画の内容を画像として再構成する技術も日本がリードしている分野であ

¹⁴⁶ SMITH, K. (2013). Reading minds. *Natur*

¹⁴⁷ Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nature Neuroscience*

¹⁴⁸ Miyawaki, Y., Uchida, H., Yamashita, O., Sato, M. aki, Morito, Y., Tanabe, H. C., ... Kamitani, Y. (2008). Visual Image Reconstruction from Human Brain Activity using a Combination of Multiscale Local Image Decoders. *Neuron*

¹⁴⁹ Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. *Science*

る¹⁵⁰。それまでの視覚関連のデコーディングは線分の傾きや、砂嵐が動く方向などシンプルな知覚に関するものから発展していったが、西本氏らはその解読対象を日常生活における連続的な視覚体験へと一気に飛躍させた。彼らは「自然動画」と呼ばれる、映画のトレーラーなど私たちが普段目にする動画を、fMRI スキャナ内で被験者に大量に見てもらい、その「脳活動」と「動画特徴」との間をコンピュータに学習させ、大量の動画データベースの中から、脳活動から予測された特徴に近い動画を選定・平均化して画像を再構成するという方法をとることで、被験者が見ているものを視覚化した。結果、完璧ではないものの「女性が右側にいる」や「飛行機が真ん中にある」等を再構成することに成功した。

4) ニューロフィードバック技術

デコーディング技術を応用し、脳活動のパターンから「特定の脳状態」を本人にフィードバックし、自身で脳の状態を改変する訓練を行う技術がニューロフィードバック、あるいはデコーディッドニューロフィードバック (DecNef) と呼ばれる領域である。日本のお家芸ともいえる領域で、ブラウン大学の渡邊武郎氏、ATR の川人光男氏、理研・脳神経科学研究センター (CBS) の柴田和久氏らが 2011 年頃から切り拓いてきた領域である¹⁵¹。

DecNef は、被験者に脳のターゲット領域で特定の活動パターンを誘発して、その行動・認知への変化を観察する目的で生まれてきた技術であるが、応用を見据えた視点での利点として、「解読可能な脳活動パターンで表現されるあらゆる状態や疾患のコントロールに適用できる汎化性」と「無意識にトレーニングできるため、治療のために患者にとって辛い記憶を思い出さなければいけないような心的外傷後ストレス障害の治療も負担なくおこなえる」という点がある。

DecNef の基本的なプロトコルは、以下のようなものである。

1. 被験者は、脳活動計測をしながら、視覚刺激 (マーク) に集中するよう指示される
2. ターゲット領域の脳活動パターンを計測し、事前に作成したデコーダーに入力する
3. 計測した脳活動パターンとデコーダーをもとに、ターゲットとの類似度を計算する
4. 類似度に応じた大きさのマークが被験者に提示される
5. 被験者は、トライアンドエラーをくり返ししながら、そのマークを大きくすることをトレーニングしていく

柴田氏らが成功した DecNef により「人の顔への好意」を変えろという興味深い研究を例として、具体的なプロセスを以下の図で紹介する。

¹⁵⁰ Nishimoto, S., Vu, A. T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B., & Gallant, J. L. (2011). Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies. *Current Biology*

¹⁵¹ Watanabe, T., Sasaki, Y., Shibata, K., & Kawato, M. (2017). Advances in fMRI Real-Time Neurofeedback. *Trends in Cognitive Sciences*.

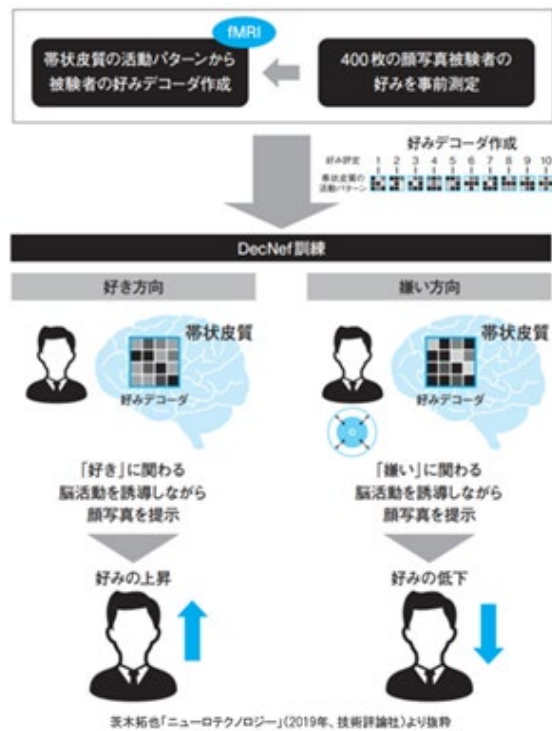


図 3-13 DecNef により「人の顔への好意」を変えようという研究のプロセス

まず、被験者の脳を fMRI でスキャンしながら 300 枚の顔写真を見せて、どのくらい好きかを 10 段階で評価する。機械学習を使うと、脳の「帯状皮質」の活動パターンから、その人が「好き」だと感じた時と「嫌い」と感じた時、双方の予測（解読）ができることがわかった。次に、「好きでも嫌いでもない」と答えた顔を見せながら、続いて提示される緑色の円形の視覚刺激を大きくするように教示される。本人には開示しないが、この図形の大きさは、「好き」か「嫌い」な脳を見せた時の帯状皮質の活動パターンに近いと大きくなるように、リアルタイムに制御してある。本人は試行錯誤を繰り返して図形を大きくしていると、その後同時に見ていた顔を「好き」あるいは「嫌い」双方の方向に変化させられることが分かった。

こうした DecNef を利用し、実験的に導入したトラウマを、DecNef で無意識に克服できるようになるという研究も現ソニー CSL の小泉愛氏と NICT・CiNet の天野薫氏らのグループから報告されている¹⁵²。

臨床以外のニューロフィードバック応用に関しては、スキル獲得、つまり自分で意識的に身につけるのが難しい能力をニューロフィードバックでトレーニングするようなソリューション開発が有望である。

教育分野の事例として、NICT・CiNet の成瀬康氏の研究を紹介する。日本人は英語の L と R の発音が聞きとることが困難であるが、脳波を計測してみると、意識できないレベル

¹⁵² Koizumi, A., Amano, K., Cortese, A., Shibata, K., Yoshida, W., Seymour, B., ... Lau, H. (2016). Fear reduction without fear through reinforcement of neural activity that bypasses conscious exposure. *Nature Human Behaviour*

でLとRを聴いている時の反応は異なる (MMN: ミスマッチ陰性電位と呼ばれる脳波事象関連電位)。この MMN の差を可視化して、ニューロフィードバックトレーニングで最大化させるとLとRを聞き分けられるようになったことを報告¹⁵³している。

5) AI とニューロテクノロジーの融合

BMI やニューロフィードバックに欠かせない脳の情報処理様式の理解にもとづいて、それをコンピュータに実装・シミュレーションすることも重要分野と言える。

「シナプスの伝達効率変化を通じた学習機能の実現」「階層的・分散的な処理機構」「情報の分散表現」など、脳の情報処理様式の知識を計算機に実装するという方法論は、少なからず機械学習分野の発展に貢献してきた。機械学習は AI の中心技術であるが、AI と神経科学は親和性が高く、脳の学習システムをモデル化した「ニューラルネットワーク」とその応用の「ディープラーニング」は、AI にブレイクスルーを起こし、2021 年現在も続いている第 3 次 AI ブームをけん引している。

国際的な競争が激しいこの領域では現在、世界中で AI 研究と神経科学研究を結びつける産学官連携巨大プロジェクトが推進されていて、日本でも 2017 年には生命科学と情報科学をつなぐ新学問分野“Neurointelligence”を標榜した「ニューロインテリジェンス国際研究機構 (IRCN)」が文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラムに新規採択されている¹⁵⁴。

日本国内でこうした脳科学と人工知能の融合に特に力を入れているのが、前述の IRCN 以外では総務省とその所管の NICT (情報通信研究機構) であり、NICT の参画する「脳情報通信融合研究センター(CiNet)」は、脳活動計測や解析技術で世界的にも強みを持っている。これまでは基礎研究が中心であったが、NTT データらと 2017 年に「脳情報通信ビジネスラボ」を始動したり¹⁵⁵、2019 年には本田技術研究所との大規模な共同研究を開始する¹⁵⁶など、民間も交えた融合技術の社会展開に産学官協働での取り組みを加速している。

6) ニューロテクノロジー分野の事業化動向

こうした技術を実際に臨床応用事業として本格的に取り組んでいる企業としては、国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 脳情報通信総合研究所の川人光男所長が立ち上げた XNef 社が挙げられ¹⁵⁷、日本の研究者たちが中心的な役割を担って切り拓いた DecNef 法を応用した診断機器、治療機器、ソフトウェアなどを開発している。基礎研究でも応用面でも世界と戦えるレベルを持っている数少ない領域であり、国家をあげた支援が望まれる。

更に最近では政府が主導する大型プロジェクトの中でテーマとして選ばれるようになってきており、内閣府が主導するムーンショットにおける金井プロジェクト¹⁵⁸は、「BMI 機

¹⁵³ Chang, M. et al. Unconscious improvement in foreign language learning using mismatch negativity neurofeedback: A preliminary study. PLoS One 12, 1-13 (2017).

¹⁵⁴ <https://ircn.jp/>

¹⁵⁵ <https://www.nttdata.com/jp/ja/news/release/2017/110101/>

¹⁵⁶ <https://www.nict.go.jp/info/topics/2019/05/20-1.html>

¹⁵⁷ <https://www.xnef.jp/company.html>

¹⁵⁸ <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/index.html>

能を持つサイバネティックアバターを開発する」テーマとして採択されている。

その他、2020年に一般社団法人応用脳科学コンソーシアム¹⁵⁹が設立され、世界に例を見ない民間主導のユニークな取り組みであり、基礎研究と事業を橋渡しする存在として期待されている。

(2) 日本のニューロテクノロジー研究の問題点

諸外国に比べて基礎研究投資および応用事業を行う事業者が少ないことが、日本の大きな課題として挙げられる。

1) 基礎研究投資の脆弱性

諸外国で本分野への投資が進む背景には、ベースとなる神経科学の基礎研究が進んでいることがある。しかし、2014年にエルゼビア社という科学出版社が発表した「Brain Science : Mapping the Landscape of Brain」という調査レポート¹⁶⁰では、2009年から2013年までの期間に掲載された約200万件におよぶ脳と神経科学に関する研究論文を調査し、数が多い上位5か国は、米国、英国、中国、ドイツ、日本となっていた。我が国は2021年時点ではさらにランクを下けている可能性もある。研究発表の件数とシェアの伸び率という点で中国は抜きん出ており、それぞれ11.6%と7.5%に達していた。そういった成長率は日本が最低である。

人材流出も懸念されている。海外から優秀な研究者を集める中国の人材招致プロジェクト「千人計画」において、兵器科学の最高研究機関とされる北京理工大・ロボット研究センターでは、AIやロボット工学、ロボット製造に活用できる日本人の神経科学者が採用され、神経科学などを研究・指導している¹⁶¹。同センターは、弾道ミサイルの誘導や軍民両用ロボットなどを研究してきたとホームページで説明している。こうした背景には中国では多額の研究費などが保証され、研究環境が日本より魅力的という状況が指摘されている。

基礎研究は国力の基礎になるもので、その国際競争力の低下は我が国の安全保障上脅威となる。

2) ニューロテクノロジー全般に関する応用志向の教育課程の欠如

一方、基礎研究だけでなく応用志向の神経科学分野の教育課程の欠如も指摘できる。欧米を中心に、ビジネススクールでも「消費者神経科学」をカリキュラムとして扱うところが2014年の時点で30か所もある¹⁶²。消費者神経科学関連の研究部署を持つ研究機関の例として、カーネギー・メロン大学、コロンビア大学、コペンハーゲン・ビジネススクール、ハーバード・ビジネススクール、ロンドン・ビジネススクール、MIT（マサチューセッツ工科大学）、スタンフォード大学、UCLA、カリフォルニア大学バークレイ校などが挙げられる。テクノロジーそのものではないが、マーケティングなど、ビジネス分野への

¹⁵⁹ <https://www.can-neuro.org/>

¹⁶⁰ https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0004/53455/ElsevierBrainScienceReport2014-web.pdf

¹⁶¹ <https://www.yomiuri.co.jp/politics/20201231-OYT1T50192/>

¹⁶² Smidts, A., Hsu, M., Sanfey, A. G., Boksem, M. a. S., Ebstein, R. B., Huettel, S. a., ... Yoon, C. (2014). Advancing consumer neuroscience. Marketing Letters

応用に対する関心の高さが伺えるが、残念ながら我が国では脳科学の応用に関する教育機会や情報に接する場は少ない。

3) ニューロテクノロジースタートアップの不足

Facebook、Neuralink だけでなく、日本のニューロテクノロジー分野のスタートアップについても相対的に勢いが足りていない。英語圏のみの調査であるが、図 3-17 に示す通り、ニューロテクノロジー分野のスタートアップは欧米が中心であり¹⁶³、日本から世界的に名の知れるようなニューロテクノロジー企業はまだ誕生していない。

このため、基礎研究の体制整備、教育環境の構築と共に社会実装の出口の部分でこうしたスタートアップ企業を支援するような国家的な取り組みが期待される。

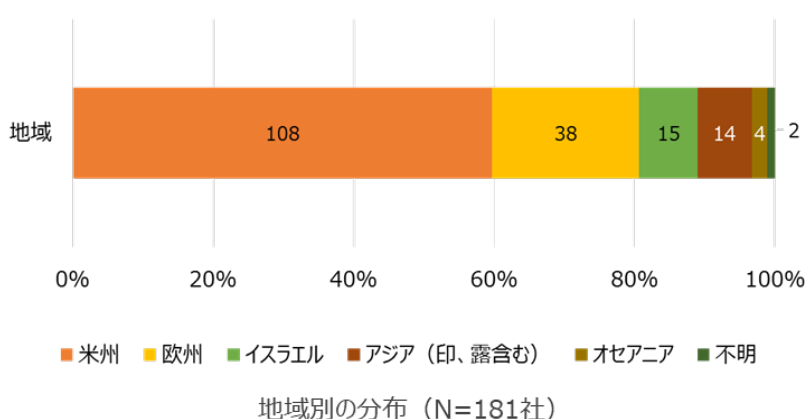


図 3-14-17 ニューロテクノロジー関連スタートアップの企業数

4) 倫理・法律・社会的課題への対応・国際的な協調活動の不足

BMI やニューロフィードバックは可能性がある分野でありながら、遺伝子治療の分野における「遺伝子改変がどこまで許されるか？」と同様に「人間は人間の脳にどこまで介入してもいいのか？」という問いを強く投げかける領域でもある。

また、ニューロテクノロジーを、権力を得ようとする国家・独裁者やテロリストによって使われるリスクもある。日本で規制しても、他国が進めるということも十分考えられる。国際社会が協調して、ニューロテクノロジー分野の負の側面を抑えこむ努力をすることが期待されるが、なかなかそうした動きは見られない。

ニューロテクノロジー分野は、科学的に後進国となりつつある我が国が基礎研究の領域ではまだ競争力を持っている分野でもあり、その社会実装における ELSI 関連問題も、国際的な議論を主導していくことで存在感を示していきたいところである。応用分野では、英国のユニバーシティカレッジロンドンと日本の NTT データ経営研究所が共同で「Applying Neuroscience to Business¹⁶⁴」という世界で初めての脳科学の産業応用を議論

¹⁶³ <https://www.can-neuro.org/consortium/research2018.html>

¹⁶⁴ <https://www.nttdata-strategy.com/newsrelease/190719.html>

する研究者事業者を集めた国際会議を開催するなど、小さくはあるが取り組みもあるため、政府としてもこうした基礎研究や産業応用上のシーズを実社会に普及促進させる施策が望まれる。

4. 次年度調査研究の取組み

(1) 基本方針

今年度は、経済安全保障の観点から、民利用を中心とした、先進的な合成生物学とニューロテクノロジー研究の現状、日本の研究の課題等について調査したが、次年度は、国家安全保障の観点から、軍事利用を中心とした両技術に関する先進的な研究の現状、日本の研究の課題等について調査する。

(2) 研究のアプローチ

次年度は、本年度と同様に勉強会形式で研究を進めるが、両年度の調査研究結果を踏まえて、国内外の合成生物学あるいはニューロテクノロジー研究の専門家を交えて、これらの新興技術の発展が今後の社会や人類に及ぼす影響について議論するとともに、これらの新興技術の国際的かつ協調的な利用や導入に関して、経済安全保障あるいは国家安全保障の観点から、日本政府としてどのようにイニシアチブをとっていくべきかについて討論し、それを情報発信することを目的とした、リモートセミナー（Webinar）の開催を検討する。

外交・安全保障調査研究事業費補助金（調査研究事業）
「我が国の経済安全保障・国家安全保障の
未来を左右する新興技術」中間報告書

令和3年3月31日発行
編集・発行 公益財団法人 未来工学研究所

〒135-8473 東京都江東区深川 2-6-11 富岡橋ビル 4F
電話 03 (5245) 1011
FAX 03 (5245) 1062
URL: <http://www.ifeng.or.jp/>