

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」

令和4年度最終報告書

—日本として考えるべき外交政策：

米中2強の時代に求められる新興技術戦略—

令和5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3年度までの研究の経緯と最終年度の研究の概要	3
2.1 令和3年度までの研究の経緯.....	3
2.2 最終年度の研究の概要.....	4
2.3 報告書の構成.....	7
3. 合成生物学とニューロテクノロジーの特徴	8
3.1 合成生物学.....	8
3.1.1 合成生物学の定義.....	8
3.1.2 合成生物学の応用分野.....	9
3.1.3 合成生物学について議論されている国際的課題.....	11
3.2 ニューロテクノロジー.....	18
3.2.1 ニューロテクノロジーの定義.....	19
3.2.2 ニューロテクノロジーの応用分野と標準化への流れ.....	20
3.2.3 ニューロテクノロジーについて議論されている国際的課題.....	25
4. 米欧中日の合成生物学とニューロテクノロジーに係る市場・産業化、政府 R&D プログラム、規制／ガバナンス等に関する最近の動き	28
4.1 合成生物学.....	28
4.1.1 米国.....	28
4.1.2 英国.....	38
4.1.3 中国.....	45
4.1.4 日本.....	54
4.2 ニューロテクノロジー.....	59
4.2.1 米国.....	61
4.2.2 EU／英国.....	69
4.2.3 中国.....	75
4.2.4 日本.....	82
4.3 合成生物学とニューロテクノロジーの取組に関する米国・英国／EU・中国・日本間の比較.....	87
5. 合成生物学およびニューロテクノロジーにおける米中の競合関係に関する議論	91
5.1 合成生物学における米中の競合関係に関する議論.....	91
5.1.1 バイオエコノミーの側面.....	91
5.1.2 政策の側面.....	92

5.1.3	技術競争力の側面	94
5.1.4	規制の側面	99
5.1.5	軍用への適用、国家安全保障などの側面.....	101
5.1.6	オープンイノベーションの側面.....	102
5.2	ニューロテクノロジーにおける米中の競合関係に関する議論.....	104
5.2.1	産業・経済の側面	104
5.2.2	政策の側面	105
5.2.3	技術競争力の側面	106
5.2.4	規制の側面	108
5.2.5	軍用への適用、国家安全保障などの側面.....	109
5.2.6	オープンイノベーションの側面.....	115
5.3	研究安全保障について考える	117
5.3.1	研究安全保障.....	117
5.3.2	経済安全保障との対比	118
5.3.3	概念の整理.....	118
5.3.4	新興技術と研究安全保障.....	120
5.3.5	小括.....	122
6.	政策提言.....	123
6.1	合成生物学とニューロテクノロジーに関する日本の立ち位置.....	123
6.2	政策提言	124
7.	おわりに.....	130
付録 1：合成生物学およびニューロテクノロジー研究の ELSI への取組の在り方に関する論点		
付録 2：DARPA における主な合成生物学 R&D プログラムのリストと内容		
付録 3：DARPA における BCI を中心とした主なニューロテクノロジーR&D プログラムのリストと内容		

1. はじめに

本研究は、人類の将来に大きなメリットとともにリスクをもたらすと考えられている、新興技術である合成生物学とニューロテクノロジーを対象として、それらが日本の経済安全保障と国家安全保障に及ぼす影響を分析し、今後日本がとるべき外交政策に資することを目的として、令和2年度からスタートした。

令和2年度は、初年度の作業として、経済安全保障の観点から、国内外の合成生物学研究者・有識者およびニューロテクノロジー研究者・有識者を当所主催の研究会にお招きし、講演頂いたうえで、民利用を中心とした合成生物学研究とニューロテクノロジー研究の特徴を俯瞰的に理解し、整理することを目的として調査を実施した。

令和3年度は、国内外の合成生物学研究者や有識者、ニューロテクノロジー研究者や有識者に加え、ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の専門家を当所主催の研究会にお招きし、講演頂いたうえで、軍事分野における合成生物学およびニューロテクノロジー研究を取り巻く背景を踏まえて、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研究の特徴を俯瞰的に理解し、整理することを目的として調査を実施した。

本年度（令和4年度）は、プロジェクトの最終年度を迎え、令和2年度および3年度に実施した研究を踏まえて、市場・産業化、政府 R&D プログラム、規制／ガバナンス（ELSI/RRRI（責任ある研究・イノベーション）を含む）の観点から、合成生物学とニューロテクノロジーに関する米欧中日の最近の取組について幅広く補完調査を行い、経済安全保障および国家安全保障の観点から大きな問題になっている合成生物学およびニューロテクノロジーにおける米中の競合関係に関する議論を幅広く調査・分析したうえで、合成生物学とニューロテクノロジーを中心とした新興技術に関して、日本として考えるべき政策について提言を行った。

本年度は、この調査活動の一環として、①米国の合成生物学研究者や中国の安全保障問題に関する米国の研究者を当所主催の研究会にお招きし、講演頂くとともに、②米国から、最先端のニューロテクノロジー研究を実施している科学者、中国の新興技術や技術移転に詳しい安全保障を専門とする研究者、合成生物学ユニコーン企業の創業者および破壊的技術の ELSI の側面にフォーカスした国際的な研究を行っている研究者をお招きして、「新興技術が日本の経済・国家安全保障に及ぼす影響について考える」Webinar を2回実施し、多様なテーマで講演頂き、幅広く議論頂いた。

なお、本年度は、政策提言を行う一環として、合成生物学とニューロテクノロジーに関する最近の米欧中日の取組を踏まえて、合成生物学とニューロテクノロジーの取組のレベル感について各国間の比較評価を行った。

本書は、以上を踏まえ、公益財団法人未来工学研究所が実施する調査研究事業「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3年間にわたる調査研究で

得られた成果を最終報告書として纏めたものである。

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特別研究員
	山本 智史	未来工学研究所政策調査分析センター研究員

本調査事業の研究においては、研究会、Webinar、インタビュー等を通して、国内外の合成生物学研究者・有識者およびニューロテクノロジー研究者・有識者から、数多くの助言や示唆を頂いた。改めて皆様に感謝申し上げます。

今回、外務省より補助金を得て、このような非常に挑戦的な研究を実施することができた。ここに記して、深甚なる感謝の意を申し上げます。

公益財団法人 未来工学研究所政策調査分析センター 主席研究員
多田 浩之

2. 令和3年度までの研究の経緯と最終年度の研究の概要

2.1 令和3年度までの研究の経緯

前述したように、本研究は令和2年度から4年度にわたる3年間で実施した。以下、これまでの研究の経緯について述べる。

(1) 令和2年度の研究

表2-1に、令和2年度の研究会の概要を示す。

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について、専門家以外の者が、それらの技術的な背景、研究の構成や特徴の本質、それらの研究がもたらす意味等について総体的に理解することに資する文献・資料は殆ど発行されていなかった。

このような状況を踏まえて、令和2年度は、外務省をはじめ関連する省庁の方を対象にして、合成生物学とは何か、ニューロテクノロジーとは何か、といった基本的なことについて共通の認識を得るために、国内や海外で活躍されている合成生物学並びにニューロテクノロジーに関する研究者や有識者をお招きして、非公開で、5回にわたるオンライン研究会を実施した。

令和2年度は、これらの研究会で得た知見も踏まえて、経済安全保障の観点から、米欧中における、民利用を中心とした合成生物学及びニューロテクノロジーに関す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調査・整理し、中間報告書¹を作成した。

表 2-1 令和2年度に実施した研究会の概要

回	開催日	研究会講師（肩書は当時）	講演テーマ
第1回	令和2年7月1日	相澤 康則 東京工業大学生命理工学院准教授	合成生物学の可能性とリスクー経済・国家安全保障の観点から
第2回	令和2年8月25日	Eriko Takano 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 合成生物学教授	Potentials of synthetic biology in fine and speciality chemical production
第3回	令和2年9月30日	吉国 靖雄 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	米国の合成生物学への取組
第4回	令和2年10月27日	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	ニューロテクノロジー～定義、研究の全体像、未来像及び社会に与える便益と負の影響、今後の研究課題～
第5回	令和2年11月26日	長谷川 良平 国立研究開発法人産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門上級主任研究員	ニューロテクノロジー研究の最新動向～BMIを中心として

¹ 外交・安全保障調査研究事業（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、公益財団法人 未来工学研究所、令和3年3月。

(2) 令和 3 年度の研究

表 2-2 に、令和 3 年度の研究会の概要を示す。

国内では、合成生物学やニューロテクノロジー研究が国家安全保障に与える影響について専門的に研究を行っている研究者は多くはない。令和 3 年度は、このような理由から、国内から、バイオセキュリティの専門家、中国の軍事研究に関する有識者、先進生命科学技術の倫理問題に関する研究者を、米国から、ニューロテクノロジー研究者でありながら国家安全保障に関する研究を行っている研究者や、ELSI の観点から DARPA（米国防高等研究計画局）の合成生物学研究プログラムに対して助言を行ったご経験のある社会科学研究者をお招きして、非公開で、5 回にわたるオンライン研究会を実施した。

令和 3 年度は、軍事分野における合成生物学およびニューロテクノロジー研究を取り巻く背景を理解しつつ、これらの研究会で得た知見も踏まえて、米国・中国を中心とした軍事・国家安全保障分野における合成生物学およびニューロテクノロジーに関する研究の特徴と動向や、中国の合成生物学とニューロテクノロジー研究に対する米国の国家安全保障研究者・軍関係者の見解について幅広く情報について幅広く調査・整理し、中間報告書²を作成した。

表 2-2 令和 3 年度に実施した研究会の概要

回	開催日	研究会講師（肩書は当時）	講演テーマ
第 1 回	令和 3 年 6 月 25 日	四ノ宮 成祥 防衛医科大学校長	先進生命科学技術のデュアルユース問題とバイオセキュリティ
第 2 回	令和 3 年 8 月 5 日	土屋 貴裕 京都先端科学技術大学准教授	中国における合成生物学／ニューロテクノロジーに関する軍事研究と応用の状況およびその我が国の国家安全保障への影響
第 3 回	令和 3 年 9 月 3 日	標葉 隆馬 大阪大学社会技術共創研究センター准教授	先端科学技術をめぐる社会的議題の探索的可視化と熟議実践
第 4 回	令和 3 年 10 月 15 日	Joy Putney ジョージア工科大学定量生物学博士研究員／Sam Nunn 国際関係学部 Sam Nunn 安全保障プログラム・フェロー	U.S. Neurotechnology Strategy for National Defense: Insights from Brain-Computer Interfaces (BCI)
第 5 回	令和 3 年 12 月 3 日	Sam Evans ハーバード・ケネディスクール「科学技術と社会」プログラム シニア・リサーチ・フェロー	Governing Dual Use Biological Research in the United States

2.2 最終年度の研究の概要

表 2-3 に、令和 4 年度に実施した研究会の概要を示す。

米国は、合成生物学及びニューロテクノロジー研究では、民生及び軍事の両方において世界を大きくリードしているが、最近中国が、軍民融合政策に基づいて、これらの分野の

² 外交・安全保障調査研究事業（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」令和 3 年度中間報告書—国家安全保障分野の合成生物学とニューロテクノロジー研究における米中覇権争いの幕開け—、公益財団法人 未来工学研究所、令和 4 年 3 月

民生・軍事両面にわたる研究を加速していることを受けて、米国議会等の場で、これら新興技術分野における米国の優位性の喪失の可能性に関する懸念と、それが米国の経済・国家安全保障に与える潜在的な影響に関する議論がクローズアップされてきている。

このような状況を踏まえて、最終年度は、公衆衛生分野における米国の合成生物学の第一線の研究者であるジジ・グロンバル（Gigi Gronvall）博士と、中国におけるこれらの分野の民生・軍事両面にわたる研究の状況に際しい米国の安全保障の専門家であるエルザ・カニア（Elsa Kania）氏をお招きして、非公開で、オンライン研究会を2回実施した（表2-3参照）。

さらに、これまでの研究会並びに調査研究の内容を踏まえ、国内では殆ど重要な新興技術として認識されていない合成生物学やニューロテクノロジーが、国の経済・安全保障を含め、将来の人類や社会に対してどれだけ大きな影響を与える可能性があるのか、また、これらの分野の研究で最先端をいく米国で、合成生物学やニューロテクノロジー研究についてどのように認識されているのか、どのような課題や懸念が議論されているのか等について、トップの研究者・専門家に解説・議論頂き、それらを、国内の政策意思決定者、大学研究者、企業関係者等に共有頂くことを目的として、「**新興技術が日本の経済・国家安全保障に及ぼす影響について考える**」という位置付けで Webinar シリーズを2回開催した。

第1回目は、米国から、ニューロテクノロジー研究におけるトップの科学者（マックス・リーゼンフーバー（Max Riesenhuber）博士）と最近の中国のニューロテクノロジー研究の状況に詳しい国家安全保障の専門家（ウィリアム・ハンナス（William Hannas）博士）をお招きし、「**ニューロテクノロジー研究が経済・国家安全保障に及ぼすインパクトについて考える**」というテーマで Webinar を開催した（表2-4参照）。

一方、第2回目は、ヒト細胞を対象とするゲノム工学の第一人である東京工業大学の相澤康則先生をモデレータとして、米国から、合成生物学のユニコーン企業として世界の注目を集めているギンコ・バイオワークス社の創業者であり、エンジニアリング・バイオロジーとしての合成生物学の基礎を築かれたトム・ナイト（Tom Knight）博士、精密医療、ゲノム医療、再生医療などの破壊的技術の社会的・倫理的・政策的側面の分析に関する国際的な研究者であるロサリオ・イサシ（Rosario Isasi）博士をパネリストとしてお招きし、「**合成生物学研究が2030年の社会に与えるインパクトについて考える：経済安全保障と ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の観点から**」というテーマで Webinar を開催した（表2-4参照）。

最終年度は、令和2年度及び3年度の研究成果に加え、これらの研究会や Webinar で得た知見も踏まえて、合成生物学とニューロテクノロジーの特徴について整理し、米欧中日における、合成生物学とニューロテクノロジーに係る市場・産業化、政府 R&D プログラム、規制／ガバナンス等に関する最近の動きを調査・整理し、合成生物学およびニューロテクノロジーにおける米中の競合関係に関する議論を調査・分析したうえで、これら新興技術の加速的発展がもたらす世界情勢の変化に対応していくために今後日本がとるべき政策提言を行い、最終報告書として纏めた。

表 2-3 令和 4 年度に実施した研究会の概要

回	開催日	研究会講師（肩書は当時）	講演テーマ
第 1 回	令和 4 年 6 月 7 日	Gigi Kwik Gronvall ジョンズ・ホプキンス健康安全保障 センター上級研究員／同大学ブル ムバーグ公衆衛生大学院 准教授	The Present and Future Promise of Synthetic Biology
第 2 回	令和 4 年 9 月 1 日	Elsa B. Kania 新アメリカ安全保障センター 非常勤シニアフェロー	Seeking Surprise? —The PLA's Outlook on Cognitive Science and Biotechnology for the Future Battlefield

表 2-4 令和 4 年度に実施した「新興技術が日本の経済・国家安全保障に及ぼす影響に
ついて考える」Webinar の概要

回	開催日	Webinar 講師／パネリスト等 （肩書は当時）	講演テーマ
第 1 回 (注 1)	令和 4 年 9 月 21 日	Maximilian Riesenhuber ジョージタウン大学メディカルセン ター神経科学科教授／同大学ニュー ロテクノロジーセンター共同ディレ クター	Neurotechnology R&D in the US — state of the art and future implications for our society
		William C. Hannas ジョージタウン大学研究教授／同大 学安全保障・新興技術センター主席 アナリスト	China's AI-Brain Program: China's project to merge human and artificial intelligence
第 2 回 (注 2)	令和 4 年 10 月 20 日	【パネリスト】 Tom Knight ギンコ・バイオワークス社 (Ginkgo Bioworks) 創業者	Past and Future of Synthetic Biology
		【パネリスト】 Rosario Isasi マイアミ大学医学部 J.T.マクドナル ド財団人類遺伝学部門 研究准教授	Synthetic Biology: Towards an Ethical and Governance Framework
		【モデレーター】 相澤 康則 東京工業大学生命理工学院准教授	—

(注 1) テーマ名は「ニューロテクノロジー研究が経済・国家安全保障に及ぼすインパクトについて考える」

(注 2) テーマ名は「合成生物学研究が 2030 年の社会に与えるインパクトについて考える：経済安全保障と ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の観点から」

2.3 報告書の構成

上記した目的を踏まえて最終報告書を作成した。最終報告書の構成は次のとおりである。

第3章：合成生物学研究とニューロテクノロジー研究の特徴

第4章：米欧中日の合成生物学とニューロテクノロジーに係る市場・産業化、政府 R&D プログラム、規制／ガバナンス等に関する最近の動き

第5章：合成生物学およびニューロテクノロジーにおける米中の競合関係に関する議論

第6章：政策提言

第7章：おわりに

付録1：合成生物学およびニューロテクノロジー研究の ELSI への取組の在り方に関する論点

付録2：DARPA における主な合成生物学 R&D プログラムのリストと内容

付録3：DARPA における BCI を中心とした主なニューロテクノロジー R&D プログラムのリストと内容

6. 政策提言

本章では、5章までの議論を踏まえて、新興技術・イノベーションという枠組みで、米中2強の時代において、安全保障の観点から日本として考えるべき政策について提言を行う。

6.1 合成生物学とニューロテクノロジーに関する日本の立ち位置

再掲になるが、合成生物学とニューロテクノロジーにおける日本の国際的な立ち位置の確認のため、表 6-1 に、合成生物学の市場・産業化・投資・R&D・人材育成・ガバナンスなどに関する米国、英国、中国および日本間の相対比較を、表 6-2 に、ニューロテクノロジーの市場・産業化・投資・R&D・人材育成・ガバナンスなどに関する米国、EU/英国、中国および日本間の相互比較を示す。

表 6-1 合成生物学に関する米国・英国・中国・日本間の相対比較：
市場・産業化・投資・R&D・人材育成、ガバナンスなどの観点から
(未来工学研究所作成) (再掲)

	市場	産業化	投資規模	政府 R&D プログラム		R&D インフラ	教育・人材育成	ガバナンスへの取組
				民生用	軍用			
米国	5	5	5	5	5	5	5	4
英国	4	4	4	4	2	4	5	5
中国	2	3	5	4~5	4~5	4	4~5	1
日本	1	1	1	2	—	3	1	2

(注) 表中の数字は相対評価。相対評価の基準は表 4-12 参照。

表 6-2 ニューロテクノロジーに関する米国・EU/英国・中国・日本間の相対比較：
市場・産業化・投資・R&D・人材育成、ガバナンスなどの観点から
(未来工学研究所作成) (再掲)

	市場	産業化	投資規模	政府 R&D プログラム		R&D インフラ	教育・人材育成	ガバナンスへの取組
				民生用	軍用			
米国	5	4	5	5	5	5	5	4
EU/英国	3	3	3	5	1(英国)	5	5	5
中国	2	2	4	4	3	4	4	1
日本	1	2	1	3	—	3	2	3

(注) 表中の数字は相対評価。相対評価の基準は表 4-12 参照。

これらの表からわかるように、合成生物学に関しては、産業化・投資・R&D・人材育成の面で、完全に米英中に引き離されている。特に、投資規模と R&D に関しては、中国が米国と肩を並べるほどに力を付けており、日本は、もはや米中に追いつくことが困難な状況

にあると言っても過言ではない²⁹⁹。

一方、ニューロテクノロジーに関しては、投資・人材育成の面で、完全に米国、EU および中国に引き離されている。ただし、市場化・産業化に関しては、ベンチャーへの投資といった観点から米国がリードしているものの、ニューロテクノロジーに関するニーズおよび市場が未開拓であることから、日本としても国際的にも競争していくチャンスがある³⁰⁰。

日本は、また、合成生物学、ニューロテクノロジーともに、欧米と比較して ELSI や RRI と言ったガバナンスの取組も大きく遅れている。実際、4.2.4 項で述べたように、海外で活発化する新興技術のガバナンスに関する議論において、日本のプレゼンスが非常に弱いことが指摘³⁰¹されているが、これは、そもそも日本は、合成生物学、ニューロテクノロジーともに、国際的に重要なプレーヤーと見なされていないことによる³⁰²。

合成生物学、ニューロテクノロジーともに、実体としての産業・経済活動の存在感が薄く、市場が活性化していない状況では、国際的に、実践的なガバナンスについて示唆を与えていくことは容易ではない。したがって、ここでは、政策提言に向けて、合成生物学、ニューロテクノロジーともに、市場、産業化、投資、R&D、人材育成などの強化を、日本として先決すべき課題とすることを前提条件とする。

6.2 政策提言

上記した、合成生物学とニューロテクノロジーに関する日本の国際的な立ち位置および前提条件を踏まえて、以下、日本として考えるべき政策について重要と考えられる提言を纏める。

(1) 国内外で活躍する若手科学者・工学者を交えた新興技術 R&D 戦略策定の仕組み作り

そもそも、日本政府は、少なくとも、経済安全保障の観点から、合成生物学およびニューロテクノロジーが、日本の未来を占うキーテクノロジーであるということを十分に理解していないことが、表 6-1 および表 6-2 から十分に見て取れる。

実際、合成生物学やニューロテクノロジーは、新興技術の中でも、日本の政府関係者にとってなじみが薄いことから、それらが将来、日本の産業や国民生活などに与えるインパクトだけではなく、経済安全保障や国家安全保障に及ぼす影響などについてイメージすることは容易なことではないことは理解できる。

しかし、合成生物学やニューロテクノロジーのような新興技術に関する研究やビジネス

²⁹⁹ 米国のバイオベンチャーに在籍されている日本人科学者のご意見も併せて、総合的に判断した。

³⁰⁰ 国内のニューロサイエンス・ニューロテクノロジーの事業者へのインタビューにより、「今後、ハイプサイクル的に新興の技術が淘汰され、生き残る企業・技術が選択されていくことが予測され、その中で、日本の技術・企業が国際社会において存在感をもてるかがこの数年の勝負である。」とのコメントを頂いた。

³⁰¹ 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター、「ニューロテクノロジーの健全な社会実装に向けた ELSI/RRI 実践」、CRDS-FY2022-WR-06、令和 4 年 10 月。

³⁰² 2021 年 11 月に、欧州評議会と OECD の共催により、「Neurotechnologies and Human Rights Framework: Do We Need New Rights?」というタイトルで、ラウンドテーブルのシンポジウム（オンライン）が行われた。この会議には、UNESCO も参加し、米国、スイス、ドイツ、イタリア、カナダ、フランス、オーストラリア、ノルウェー、英国、ポルトガル、オランダ、韓国およびチリから、この分野の専門家が参加して幅広く意見交換されたが、日本からの出席者は無かった。

の流れは非常に早いことから、投資を行うタイミングやスタートアップを立ち上げるタイミングを逃してしまい、市場への参入が遅れてしまう可能性が出てくる。

例えば、現在、合成生物学で良く使用されている CRISPR 技術は、2012 年に発明された技術であるが、1 年後の 2013 年には、大学などの研究所で当たり前のように使用され、当該技術を開発した研究者たちは、それを基にスタートアップ企業を立ち上げ、当該技術をベースとした創薬を目標とするようなバイオテック・ビジネスが一気に始まった。わずか数年の間で、当該技術を利用した一大産業が作られた雰囲気がある。2012 年以前は、遺伝子組み換え技術の次世代型技術として、ゲノム編集技術に関するアイデアが構想としてはあったが、それを実現するのは難しいと考えられていた。それが実現可能なものになり、一気に一大産業が形成された言っても過言ではない³⁰³。

特に、中国の指導者は、AI と同様に、新興技術である合成生物学やニューロテクノロジーの R&D に対して、戦略的に大規模な投資を行うことにより先行者利益を得ることのメリットを十分に理解し、国家科学技術戦略として「中国科学技術イノベーション第 13 次五ヵ年計画計画」、「国家戦略的新興産業発展第 13 次五ヵ年計画」等を立案・遂行している。このままの状態では、日本は新興技術分野で完全に国際的な影響力を失ってしまうことが危惧される。

このようなことから、新興技術分野において、国内外の大学、研究機関、企業（ベンチャーを含む）などで活躍している、若手のトップクラスの目利きの科学者・工学者を招集し、新興技術を中心とした日本として考えるべき包括的な R&D 戦略を検討していくことが必要である。また、日本の政策意思決定者が、経済安全保障および国家安全保障の観点から新興技術の本質を理解し、新興技術の流れの速さを考慮した R&D 戦略を立案できるような仕組みを作っていくことが必要である。

(2) 国防・安全保障における新興技術の適用の在り方に関する検討の必要性

前述の(1)の議論に関連するが、そもそも日本においては 国防・安全保障におけるニューロテクノロジーや合成生物学の応用可能性について議論すらされていない。

ニューロテクノロジーや合成生物学のような新興技術は、本質的にデュアルユースである。米中では、合成生物学やニューロテクノロジーの国防・安全保障への応用研究を盛んに実施しており、英国も規模は小さいながらも、合成生物学やニューロテクノロジーの国防・安全保障への応用研究を実施している。

現在、日本では、大学や国立研究所でデュアルユース的な研究がしにくい、予算が取りにくいといった状況にある。例えば、ニューロテクノロジーの場合、防衛省や防衛装備庁でも、ニューロテクノロジーの防衛分野への利用ということで投資を試みているが、その予算が少なく、それを受けることができる研究者が少ない。実際、国防におけるニューロテクノロジーのニーズが理解できる技術者や研究者が非常に少ない³⁰⁴。

国防・安全保障への応用研究は、戦闘（防御、攻撃）、兵器・機材の保守、物資補給・調

³⁰³ 米国バイオベンチャー在籍の日本人若手科学者へのインタビューによる。

³⁰⁴ 国内のニューロサイエンス・ニューロテクノロジーの事業家のインタビューによる。

達、輸送、教育、訓練、諜報等の向上や効率化に資するもの等、国防・安全保障のニーズにより多岐にわたると考えられる。

ここで参考になるのは、DARPA の合成生物学プログラムである。DARPA の合成生物学プログラムは、たしかに、米軍が考える将来のニーズを踏まえた、現場や戦場で使えるための実用的な技術やシステムを創出することを目的としているが、注目されるのは、どこにでもある生物を利用して、遠隔作戦地域での自己完結型及びオンデマンド型で資材や物資を供給・調達できる技術やシステムを確立することを狙いとするプログラムや、合成生物学のデュアルユース面と ELSI/RRRI の問題を考慮した国家安全保障に資するプログラムなどの存在である³⁰⁵。

これには以下が含まれる。

- **Engineered Living Materials (ELM)**³⁰⁶：従来の建築材料の構造的特性、および、その場で急速に成長し、自己修復し、環境に適応する能力等、バイオシステムの特性を組み合わせたリビング・バイオマテリアルを開発することで、遠隔地、緊迫した環境、リスクの高い環境、あるいは、災害後の環境における軍事的なロジスティックスと設営に革命を起こすことを目的とする。
- **ReSource**³⁰⁷：自己完結型の統合されたシステムを使用して、軍の廃棄物を、武器や機械の化学潤滑剤、さらには食料や水に変換する等、軍の重要物資の調達方法に革命を起こすことを狙いとするもので、必要なときに必要な場所で、オンサイトで材料を迅速に生産できるシステムを創り出すことを目標とする。
- **Safe Genes**³⁰⁸：ゲノム編集技術がどのように機能するかを根本的に理解し、ゲノム編集技術を、有益な目的のために、安全にかつ責任を持って、予測して利用する方法を考案し、ゲノム編集技術の偶発的または意図的な誤用に関連する、バイオセーフティおよびバイオセキュリティに関する潜在的な問題に対処することを目的とする。

このような R&D は、非常に挑戦的であり、半ば SF 的な側面があるが、DARPA の場合、少なくとも、「創造的かつ野心的で世界を変え得ると同時に、実現可能性のあること」という基本理念に関する基準³⁰⁹を満たすことを条件として、挑戦的な R&D プログラムを提案

³⁰⁵ DARPA の合成生物学プログラムについては、本報告書の付録 2「DARPA における主な合成生物学 R&D プログラムのリストと内容」を参照されたい。

³⁰⁶ Engineered Living Materials (ELM) (DARPAtv)
(https://www.youtube.com/watch?v=K_2HauVJYNE)

³⁰⁷ Teams Selected to Produce Critical, On-Demand Stocks from Military Waste (DARPA ホームページ)
(<https://www.darpa.mil/news-events/2021-01-12>)

³⁰⁸ Building the Safe Genes Toolkit (DARPA ホームページ)
(<https://www.darpa.mil/news-events/2017-07-19>)

³⁰⁹ この基準は、1970 年代当時、DARPA 局長であったジョージ・ハイルマイヤー (George H. Heilmeier) が確立した「ハイルマイヤーの問答集 (Heilmeier Catechism)」と呼ばれる。具体的には、①「何を試みようとしているのか？専門用語を一切使わずに、提案するプログラムの目標について説明せよ」、②「それは、現在どのような方法で実現されているのか？現行のやり方のどこに限界があるのか？」、③「提案するアプローチの何が新しいのか？なぜそれが成功すると考えるのか？」④「それが成功した場合、どのような変化を生み出せるのか？」、⑤「リスクとそのリターンは何か？」、⑥「どの程度のコストがかかるのか？」、⑦「どの程度の時間がかかるのか？」、⑧「中間試験と最終試験において、何を持って成功と判断するのか？」という

することができる³¹⁰。このような DARPA における R&D プログラムの提案の考え方やプログラムの事例は、今後の日本における、安全保障や国防を意識した研究のテーマ設定やファンディングの在り方に関して最高のお手本になると考えられる。

一方、日本のムーンショット型研究制度は、DARPA の R&D プログラム的な要素を持った研究であると考えられ、実現可能性が小さくとも、当該研究制度の枠組みでこのような研究をやってみる価値があると思われる³¹¹。DARPA の R&D プログラムの優れているところは、技術の実現可能性のみに焦点を置くのではなく、顕著な技術ブレイクスルーをもたらしうるアイデアであるか否かが大きなポイントとしていること、数%の成功しか期待できないと思われる研究についても予算を付けていること、何十年にわたり、同じテーマの研究に対して戦略的にかつ継続的にファンディングを行っていることである。

同じテーマに対してムーンショット型研究を継続させることが重要な理由は 2 つある。一つは同一の研究に投資し続けないとそのリターンが見えないことである。5 年ではわからない。もう一つは人材育成である。人材育成には時間がかかる。5 年間の資金が切れたら、その分野がなくなるということを繰り返していると、その分野の専門家は生まれにくい。少なくとも、今の日本の産業競争力を維持するのであれば、そのような人材を継続的に生み出していくことが必要である。一旦予算が途絶えると、それを復活させることは容易では無い³¹²。

今後政府内で、大学などの科学者コミュニティ、研究機関、産業界、防衛省などを交えて、国防・安全保障分野においてニューロテクノロジーおよび合成生物学を活用していくことのメリットとリスクについて議論し、研究開発の在り方について検討していくことが必要になると考えられる。

(3) 新興技術政策意思決定プロセスにおけるフォーサイトの導入

前述したように、合成生物学やニューロテクノロジーのような新興技術は、技術開発や産業化の流れが速いことから、これからどのような技術が出現するのか、それがどのような影響を及ぼすのか、未来を予測しながら、新興技術戦略を検討していくことが一層重要になってくる。

現在のように国際情勢の動きが激しく、非常に流動的な国際社会においては、数十年先の未来を正しく予測し、それを踏まえた科学技術・イノベーション戦略を策定することは容易ではない。しかし、このような戦略立案を効果的に支援する手法の一つとして、フォーサイトを挙げるができる。

例えば EU では、フォーサイトは、「代替となる未来を規律正しく分析すること」と定義され、政策立案者が将来の可能性、シナリオおよびその結果を考慮し、より良い情報に基

7つの質問項目から構成される。研究を提案する DARPA のプログラム・マネージャーは、DARPA 局長や室長の前で、この基準に基づいて研究提案に関する質問を受け、明確に答えることが求められる。

³¹⁰ 公益財団法人未来工学研究所、「「海外の新興・融合領域に係る戦略策定プロセスに関する調査分析業務」報告書」、2020年3月。

³¹¹ 米国バイオベンチャー在籍の日本人若手科学者へのインタビューによる。

³¹² Ibid.

づいた意思決定を行うことを支援することを目的としている³¹³。フォーサイトは、日本を含め、欧米を中心として諸外国で、政策意思決定のプロセスの一環として良く使用されている。

EU では、フォーサイトは、EU の研究・イノベーション政策提案の準備、特に、**Horizon Europe** 等のような研究・イノベーション枠組みプログラムの戦略・計画立案において活用されている³¹⁴。EU のフォーサイトの特徴としては、政策サイクルの初期段階において、目的や優先順位が明確になる前の知識ベースの段階で、合意形成や情報に基づく政策議論のための基盤を整えるために使用され、その後、政策アイデアを未来につなげるという観点から、目的や優先順位をフィルタリング・評価するプロセスとして使用されていることが挙げられる³¹⁵。

欧米では、未来には基本的な不確実性があり、10年後、15年後といった長期的あるいは中期的に正確に予測をすることは不可能であると認識されている。したがって、フォーサイトはむしろ、さまざまな可能性のある未来のシナリオを幅広く探求し、それに備えることであると理解されている。

日本では、文部科学省 科学技術・学術政策研究所（National Institute of Science and Technology Policy: NISTEP）が、科学技術基本計画を始めとする科学技術イノベーション政策立案のための基礎情報を提供することを目的として、1971年から約5年ごとに、大規模なフォーサイトである「科学技術予測調査」を実施している³¹⁶。この調査では、2040年をターゲットイヤーとして、科学技術の未来像と社会の未来像を描き、それらを統合して、科学技術発展による社会の未来像を描いている。

日本として、未来を見据えた新興技術戦略を検討していくためには、国内の専門家の協力の下に、合成生物学やニューロテクノロジー等の日本が出遅れている重要な新興技術に着目したフォーサイト研究を早急に実施し、政策意思決定のプロセスの一環として、10年、20年、30年先の新興技術の発展とその社会的インパクトに関する予測・分析結果を積極的に取り入れていくことが必要である。

(4) 合成生物学やニューロテクノロジーの国際規格化への積極的な関与

日本が、合成生物学やニューロテクノロジーなどの新興技術分野で、国際的に影響力を持つには、少なくとも国際規格化に積極的に係わっていくことができる存在になることが必要である。

前述したように、合成生物学やニューロテクノロジーのような新興技術は、技術開発や産業化の流れが速いことから、現時点で存在する技術をもとに国際規格を作っていくだけ

³¹³ Research and innovation: Foresight (European Commission ホームページ)

(https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/support-policy-making/shaping-eu-research-and-innovation-policy/foresight_en)

³¹⁴ Ibid.

³¹⁵ Ibid.

³¹⁶ 科学技術予測・科学技術動向 (NISTEP ホームページ)

(<https://www.nistep.go.jp/research/science-and-technology-foresight-and-science-and-technology-trends>)

では不十分である。これからどのような技術が出現するか、未来を予測して、国際規格作りのフレームワークを作っていかなければならない。法規制を策定してから国際規格を考えるのではもう遅い。

合成生物学やニューロテクノロジーのような新興技術においては、数年というレベルで定期的に国際規格を更新していくことが求められると考えられるため、国際的な協調体制を作って、国際規格の枠組み作りをしていくことが必要になると想定される³¹⁷。日本が、合成生物学やニューロテクノロジーの分野で、国際的な影響力を確保していくためには、このような国際規格の仕組み作りに積極的に関与し、日本が得意な領域で指導力を発揮していくことが重要になる。

(5) 新興技術の本質に関する理解・教育の推進

日本では、一般的に、合成生物学やニューロテクノロジーそのものが認知されていない。しかし、新興技術に対する興味が無ければ、国民として ELSI や RRI の意味を理解することはできない。合成生物学やニューロテクノロジーのような新興技術が、近い将来、産業、経済および社会全体にわたって大きなインパクトを与える可能性について、国民が理解できるようにしていくことが必要である。

このため、合成生物学やニューロテクノロジーの科学・工学的な本質とその社会的インパクト（期待される利益と潜在的リスクの両面）について理解を促進することを目的とした科学教育あるいは社会科学教育を、高等学校教育レベルから推進していくことが望ましい。

(6) 研究安全保障への取組み

5.3 節に示したように、研究安全保障の問題は、経済安全保障と国家安全保障の両方の問題に大きく係わってくる。特に、合成生物学やニューロテクノロジーに関する研究は、それらがデュアルユース性を持つことから、技術力の優位性をかけた権威主義国家と自由主義諸国との覇権争い、自由主義諸国の研究のオープン性をついた権威主義国家による研究・技術情報の盗取活動等といった問題に直面する可能性が高いと考えられる。

今後、日本政府は、研究安全保障について研究を進め、新興技術を中心としたキーテクノロジーに対する研究安全保障を担保するための仕組み作りを行っていく必要がある。

(執筆者：未来工学研究所主席研究員 多田浩之)

³¹⁷ 未来工学研究所主催の国際 webinar 「合成生物学研究が 2030 年の社会に与えるインパクトについて考える：経済安全保障と ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の観点から」（令和 4 年 10 月 20 日開催）でパネラーとして参加頂いた、Ginkgo Bioworks の共同創業者であるトム・ナイト（Tom Night）博士より、「米国では、バイオセキュリティ対策として世界レベルで環境中の微生物やウイルスの塩基配列を監視するシステムや体制作りに関する提案がされている。通常時は環境中の微生物やウイルスの塩基配列をモニタリングしているが、必要なときにスイッチを押せば、生物学的脅威に本格的に対応できるインフラに急変するプラットフォームを構築するというものである。」というお話があった。日本としても、例えば、このような提案に基づく国際規格作りに協力していくことが推奨される。

7. おわりに

今回の研究は、新興技術の中でも、合成生物学、ニューロテクノロジーという、非専門家にとって、馴染みが薄く、理解することが容易ではない分野の技術の本質を理解しつつ、新興技術の民生や軍事への応用、新興技術がもたらす潜在的な影響、新興技術に係る各国の市場、産業化、R&D プロジェクト、政策、規制・ガバナンス（ELSI/RRRを含む）、更には、米中間の技術競争や研究安全保障に関する議論等、広範囲にわたる領域の情報、知識および知見が求められ、それらを踏まえて、経済安全保障並びに国家安全保障の観点から、日本に求められる合成生物学とニューロテクノロジーに関する政策提言を行うという、極めて挑戦的な研究であった。

日本政府は、合成生物学、ニューロテクノロジーといった、現時点で市場や産業として顕在化していない新興技術に関して殆んど注意を払っていないように思われる。このような新興技術が、市場や産業として顕在化した時には、既に他国によって主導権が奪われてしまっている状態であることをしっかりと理解しておく必要がある。

一方、中国は、少なくとも、AI、先端材料・製造、バイオテクノロジー（合成生物学、バイオ・マニュファクチャリングを含む）等に代表される新興技術の多くの分野で米国をリードしている（豪州戦略的政策研究所が 2023 年 2 月に公表した「ASPI's Critical Technology Tracker - The global race for future power」による）。これは、中国の指導部が新興技術の R&D の重要性を十分に理解し、「国家イノベーション駆動発展戦略要綱」およびそれに基づく「中国科学技術イノベーション第 13 次五ヵ年計画」、「国家戦略的新興産業発展第 13 次五ヵ年計画」等の中長期的な科学・産業技術発展計画を立案し、遂行してきた結果であると考えて良い。

このようなことから、キーテクノロジー分野における中国の躍進と失いつつある米国の優位性が、産業面だけではなく、国際政治面で、日本の将来に何をもちたらすかを真剣に考えていかないと、日本の未来図を描くことすら難しくなると思われる。未来工学研究所は、この調査研究を通じて、国際情勢が極めて流動的で数ヵ月先を読むことが困難になっている時代の中で、新興技術や破壊的技術の本質を十分に理解し、フォーサイト研究等を通して、それらの技術が将来どのように利用されていくのか、日本にとってどのようなインパクトを与えるのか、シナリオベースで予測・分析したうえで、今後の日本の経済安全保障・国家安全保障戦略を考えていくことの重要性を強く認識した次第である。

この鍵となるのは、主要国における新興技術に関する R&D プログラムの状況と R&D 成果の技術移転に関する包括的な情報やデータである。これは、オープンソースで公開されている論文、研究レポート、特許情報等をモニタリングすることで十分可能になる。改めて、国の戦略的事業としてこのような作業を地道に続けていくことの重要性を強調したい。

この調査研究が、新興技術を中心とする科学技術・イノベーション戦略を検討していくための新しい考え方を示すものとしてお役に立てば幸いである。

令和 5 年 3 月 31 日
多田 浩之（主査）

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」令和4年度最終報告書
－日本として考えるべき外交政策：
米中2強の時代に求められる新興技術戦略－
令和5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/>