

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3年度中間報告書（改訂版）

—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—

令和4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年度の研究の目的と報告書の構成	3
3. 米国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 軍用・国家安全保障応用研究の特徴	4
3.1 米国の軍事・国家安全保障分野における合成生物学研究の特徴と事例	4
3.1.1 <i>DARPA</i> の合成生物学研究.....	4
3.1.2 米軍の合成生物学研究	13
3.1.3 <i>IARPA</i> の合成生物学研究	23
3.2 米国の軍事・国家安全保障分野におけるニューロテクノロジー 研究の特徴と事例	25
3.2.1 <i>DARPA</i> のニューロテクノロジー研究	25
3.2.2 <i>IARPA</i> のニューロテクノロジー研究	41
3.2.3 <i>DOD</i> によるサイボーグ兵士が有する潜在的可能性と インパクトに関する研究.....	43
4. 中国における合成生物学およびニューロテクノロジーの軍用研究の特徴	47
4.1 中国における合成生物学およびニューロテクノロジーの 軍用研究の狙いと戦略	47
4.2 中国における合成生物学およびニューロテクノロジーの 軍用研究に関する動きと事例	58
4.2.1 ニューロテクノロジーにおける軍用研究の事例.....	58
4.2.2 合成生物学における軍用研究の事例.....	59
5. 中国の合成生物学およびニューロテクノロジー研究の動きとその影響に関する 米国の国家安全保障研究者・軍関係者の見解	61
5.1 米国の国家安全保障の観点から中国の合成生物学およびニューロテクノロジー 研究の特徴やその影響について分析された論文・資料と関連する著者	61
5.2 各研究者・専門家の見解	62
5.2.1 <i>Joy Putney</i> 博士 (米国疾病対策センター アソシエートサービス・フェロー) ...	62
5.2.2 <i>Elsa Kania</i> 氏 (新アメリカ安全保障センター 非常勤シニアフェロー)	64
5.2.3 <i>Marcus Cunningham</i> 米空軍中佐／ <i>John P. Geis</i> 博士 (米空軍研究タスクフォース所長)	67

6. デュアルユースを含む合成生物学やニューロテクノロジー等の 新興技術の ELSI/RRI の在り方に関する議論	72
6.1 ELSI/RRI の定義.....	72
6.2 合成生物学研究における RRI の取組み	74
6.2.1 <i>SYNBIOCHEM</i> における取組み	74
6.2.2 <i>RRI</i> ツールの開発.....	75
6.2.3 <i>DARPA</i> における取組み.....	76
6.3 ニューロテクノロジー研究における RRI の取組み	77
6.3.1 欧州におけるニューロテクノロジー研究に対する倫理上の懸念.....	77
6.3.2 <i>DARPA</i> における取組み.....	79
6.4 EU と米国におけるデュアルユースに関する議論	80
6.4.1 欧州の議論	80
6.4.2 米国の議論	83
6.5 日本における議論	88
7. 次年度（最終年度）調査研究の取組み	90

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、今後の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。

合成生物学研究は、これまで米国と英国が先導し、バイオエコノミー戦略の一環として、産業化やビジネス化に向けた研究開発を推進してきた。米国は、国防面においても、合成生物学を R&D の最優先事項の一つとしており、DARPA（国防高等研究計画局）、IARPA（情報高等研究計画活動）、米陸海空軍の研究所等で、DOD（国防総省）が考える将来のニーズを踏まえた実用的かつ革新的な研究を行っている。一方、中国においては、科学技術の軍民融合を推進し、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、合成生物学分野での民生および軍事研究に巨額の予算を投じるとともに、当該分野の人材の育成を戦略的に行ってきた。中国人民解放軍は、合成生物学を含むバイオテクノロジーの軍事利用の可能性を真剣に考えており、CRISPR-Cas9 に代表されるゲノム編集ツールを使った研究が盛んに進められている。この結果、今や中国は、米国に肉薄する勢いで、合成生物学研究のトップランナーの地位を築きつつある。

ニューロテクノロジー研究に目を向けると、米国においては、1970年代前半から DARPA により、BCI（ブレイン・コンピュータ・インタフェース）に焦点を置いた研究が進められてきた。その後、2013年から、NIH（国立衛生研究所）を主軸とする、連邦政府として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 Brain Initiative（ブレイン・イニシアチブ）がスタートした。本イニシアチブには、NSF（全米科学財団）、DARPA、IARPA 等もメインプレーヤーとして参加しており、ニューロテクノロジー研究においても、米国が、民生・軍事両面で最先端を走っている。一方、中国においては、2016年から、AI研究の進展を踏まえて「中国脳計画」を立ち上げ、中国人民解放軍の主導により、「軍事知能化」という概念の下、BCIによる人間の脳とマシン知能との融合を目標とした研究が検討されている。

DOD は、中国人民解放軍が主導する合成生物学およびニューロテクノロジー研究の流れを受けて、BHPC（健康&ヒューマンパフォーマンス・バイオテクノロジー評議会）を立ち上げ、脳を含めた人間とマシンの融合による「サイボーグ兵士」の実現に向けた調査研究を実施し、2019年に、サイボーグ技術の2050年導入に向けて提言を示した報告書を公表した。

こういった状況を踏まえ、米国内でも、中国の軍民融合による合成生物学およびニューロテクノロジー研究が米国の安全保障に与える影響を分析し、それへの対策の必要性を表明する研究者や専門家が現れてきた。中国は、既に、米国と並んで AI 大国としての地位を築いているが、合成生物学やニューロテクノロジーにおいても、国際経済及び国防の両面で、「必ず世界をリードする」という意思が大きく働いているように見受けられる。米国は、この中国のメンタリティに対して、これまで以上に脅威を感じている。

昨年度は、初年度の作業として、経済安全保障の観点から、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。また、本調査研究の一環として、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・有識者を当所主催の勉強会に招いて、講演頂いた。

本年度は、前述した、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。また、本調査の一環として、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、国内外の ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の専門家を当所主催の勉強会に招いて、講演頂いた。

本報告書は、以上の背景を踏まえ、公益財団法人 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 2 年目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

2. 令和 3 年度の研究の目的と報告書の構成

(1) 本年度研究の目的

令和 2 年度は、民生利用を中心とした、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について俯瞰的に理解し、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、米国や中国を中心として、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について幅広く情報を収集・整理し、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・軍関係者の見解を整理し、デュアルユースを含む、合成生物学・ニューロテクノロジー研究の新興技術の ELSI（倫理的・法的・社会的問題）／RRI（責任ある研究・イノベーション）の在り方に関する議論について整理することを目的とする。

(2) 報告書の構成

上記した目的を踏まえて報告書を作成した。本年度の報告書の構成は次のとおりである。

●第 3 章

<米国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軍用・国家安全保障応用研究の特徴>

●第 4 章

<中国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軍用研究の動きと特徴>

●第 5 章

<中国の合成生物学とニューロテクノロジー研究の動きとその影響に関する米国の国家安全保障研究者・軍関係者の見解>

●第 6 章

<デュアルユースを含む合成生物学やニューロテクノロジー等の新興技術の ELSI/RRI の在り方に関する議論>

●第 7 章

<次年度（最終年度）調査研究の取組み>

3. 米国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軍用・国家安全保障応用研究の特徴

米国の軍事・国家安全保障分野における合成生物学並びにニューロテクノロジー研究のレベルは、他国と比較して群を抜いている。本章では、現時点で把握・理解している、米国の軍事・国家安全保障分野における合成生物学技術とニューロテクノロジーに関する先端研究の構成、特徴、事例等について述べる。

3.1 米国の軍事・国家安全保障分野における合成生物学研究の特徴と事例

DOD（国防総省）は、合成生物学を国防研究における最優先事項の一つとしており、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）、米陸海空軍において、本格的な研究を進めている。

その一方で、米国は、インテリジェンス分野でも、米国情報高等研究計画活動（Intelligence Advanced Research Projects Activity: IARPA）が、合成生物学を重要な新興技術の一つとして取り上げ、情報活動の向上に資する先進的な合成生物学研究を進めている。

以上を踏まえて、以下、DARPA、米陸海空軍および IARPA による合成生物学研究の特徴と事例を示す。

3.1.1 DARPA の合成生物学研究

DARPA の合成生物学プログラムは、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。DARPA の各合成生物学プログラムの研究の内容は、非常にユニークであり、斬新的なアイデアに富んでいる。

表 3-1 は、現時点で把握している DARPA における主な合成生物学プログラムのリストである。表 3-1 より、DARPA における主な合成生物学プログラムの特徴として、以下等を挙げることができる（ヒアリングした合成生物学研究者のご意見を参考とさせて頂いた）。

- ・ DARPA の合成生物学プログラムは、米軍にとって実用的なプログラムから構成されており、研究のテーマ設定が明確かつ具体的である。
- ・ DARPA の合成生物学研究は、バイオに限らず、研究に使える技術は何でも利用する（特定の技術にこだわらない）、バイオで絞りさせるものは全て絞り出そうとする、といった意図が見られる。
- ・ DARPA の合成生物学プログラムは、研究者から、研究者の持っている専門性や要素技術を引き剥がして、実際に使える技術を作らせることを狙いとしている。
- ・ DARPA の合成生物学プログラムの多くは、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している。これらは、将来の分散型社会や循環型社会の実現に大きく貢献できる可能性がある。

- ・ DARPA の合成生物学プログラムは、軍での利用を目的とした研究ではあるが、AI や自律型ロボット研究の場合とは異なり、研究が成功すれば、直接、多様な産業に適用あるいは応用することができると考えられる。

表 3-1 DARPA における主な合成生物学研究とその内容

プログラム名	研究期間	R&D の概要
Biological Robustness in Complex Settings (BRICS) ^{1,2}	2014～？	BRICS プログラムは、改変した微生物のバイオシステムを、DOD (国防総省) にとって信頼性が高く、費用対効果の高い戦略的資源に変えることを目的とする。これには、例えば、物体の地理的な出所の特定、重要システムやインフラの腐食、生物付着などのダメージからの保護、危険な化合物の検知、オンデマンドでの新しいコーティング剤・燃料・薬剤の効率的なバイオ生産等が挙げられる。 本プログラムは、これらの潜在的なアプリケーションを実現するために、変化する最小の構造化された環境で確実に機能する、安全で安定したバイオシステムを設計するために必要な基礎的理解、設計原理および要素技術を追求するものであった。BRICS 以前の合成生物学では、主に培養された微生物の個々の種を改変することが中心であった。このような種は、脆弱であり、生き延びるために精密な環境制御を必要とし、遺伝子組換えによって人工的に得られた利点を失う可能性がある。そのような改変された微生物が生き残るために必要な環境制御を維持し、遺伝子の変化を検出して補正するには、かなりのコストがかかる。このため、本プログラムは、合成生物学的システムを、明確に定義された実験室環境から、DOD の活動に良く見られるより複雑な環境へ安全に移行できるようにすることを長期的な目標としている。
Biological Control ³	2016～？	Biological Control プログラムは、マルチスケールの生物システムの制御の基盤を構築することを目的とする。具体的には、ナノメートルからセンチメートル、数秒から数週間、生体分子から生物の集団まで、スケールを超えた生物システムの制御のための新しい機能を開発し、生物を部品として作られた組込コントローラを使用して、システムレベルの動作をプログラムすることを目標とする。 本プログラムでは、既存の制御理論を応用・発展させ、機械システムや電気システムなどの従来の制御工学と同様に、一般化が可能な生物学的制御戦略を設計・実装する。その結果、基礎的な理解と能力が向上し、エンジニアリング・バイオロジーに新たな機会をもたらすことになることとされている。この R&D に成功したチームは、これらの能力を統合・適用して、DOD に関連する提案者が定義したアプリケーションに対する、原理証明のための実用的な生物学的ソリューションを実証する。
Engineered Living Materials (ELM) ⁴	2016～？	ELM プログラムは、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、生体システムの特性を組み合わせたりビング・バイオマテリアルを開発

¹ <https://www.darpa.mil/program/biological-robustness-in-complex-settings>

² <https://www.darpa.mil/news-events/2014-07-29>

³ <https://www.darpa.mil/about-us/control-systems-and-biology>

⁴ <https://www.darpa.mil/program/engineered-living-materials>

3.2 米国の軍事・国家安全保障分野におけるニューロテクノロジー研究の特徴と事例

米国のニューロテクノロジーを利用した軍用研究は、1970年代前半から始まっていた。米国におけるニューロテクノロジーの軍用研究への投資は、40年近くにわたり、DARPAのブレイン・コンピュータ・インタフェース（Brain Computer Interface: BCI）研究に焦点を置いて継続的に行われてきたことから、DARPAのニューロテクノロジー研究が最先端をいくものであることは疑いの余地が無い。

一方、IARPAにおいても、米国のニューロサイエンス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 : BRAIN Initiative）を通じて、インテリジェンス活動に資するニューロサイエンスあるいはニューロテクノロジーに関連する研究が実施されており、情報として公開されているだけでも、この分野における米国のニューロテクノロジー研究の内容が尋常ではないことが十分に伺える。

このように、米国の国防分野でのニューロテクノロジー研究が進展する中、DODが2018年に、脳を含めた人間とマシンの融合による「サイボーグ兵士」の2050年までの実現可能性とそのインパクト、ELSI（倫理的・法的・社会的問題）等について研究した報告書（Cyborg Soldier 2050: Human/Machine Fusion and the Impact for the Future of the DOD）を公表した。この報告書における技術的な分析は、DARPAやIARPAのニューロテクノロジー研究の内容や成果を踏まえたものと考えられ、米国内外で注目されている。

以上を踏まえ、本節では、DARPAとIARPAにおけるニューロテクノロジーの研究の特徴、構成、事例等について述べ、DODで検討されている、人間とマシンの融合とDODの将来へのインパクトに関する検討内容について説明する。

3.2.1 DARPAのニューロテクノロジー研究

DARPAほど持続的にBCIのR&Dにファンディングを行っている機関は無い。この分野のほとんどすべての技術的な進歩は、DARPAのR&Dへのファンディングに起因すると言っても過言では無い。DARPAは、毎年、BCIに関する研究に数百万ドルを投資し、BCIの研究アジェンダを効果的に推進している。

表3-4に、DARPAにおけるBCIを中心とした、代表的なニューロテクノロジー・プログラムを示す。図3-1に、過去20年にわたるDARPAにおけるBCIを中心とした、代表的なニューロテクノロジー・プログラムの構成と予算の流れを示す。また、図3-2に、DARPAにおけるBCIを中心とした、代表的なニューロテクノロジー・プログラムの実施期間を示す。

BCIに対するDARPAのニューロテクノロジー・プログラムの包括的な目標は、以下の通りである。

- ・ 米軍兵士の認知能力を増強させること。
- ・ 義足や心的外傷後ストレス障害（PTSD）治療などの開発により、武力抗争や戦闘による兵士の負傷等の影響を軽減すること。

DARPA のほぼすべての BCI プログラムが、上記の 2 つのカテゴリのいずれかに該当するが、DARPA はこれらの目標を達成するために、ニューロテクノロジーに関する基礎研究にも多額のファンディングを行っている。米軍としてその DARPA の研究成果を使うか否かを別にしても、その技術が一般社会に出て、世界のニューロサイエンス・コミュニティに利益をもたらしている例がある。例えば、以下に示すように、投資家や企業が有望な技術を取り上げ、さらに商業化することもある³⁹。

- ・ Neuralink 社の「ミシン」手術ロボット⁴⁰：SUBNETs プログラムによる。
- ・ ステントロード (Stentrode) ⁴¹の初期コンセプト：RE-NET プログラムによる。
- ・ 初期の Braingate 試験で使用された義肢：Revolutionizing Prosthetics プログラムによる。

DARPA の BCI に対する戦略的関心は、1960 年代に情報処理技術局 (Information Processing Techniques Office: IPTO) の初代局長であった JCR リックライダー (Joseph Carl Robnett Licklider) ⁴²が「人間とコンピュータの共生 (man-computer symbiosis)」という彼のビジョンを発表したことに始まる。DARPA の最初の BCI に関するファンディングは、1974 年に「Close-Coupled Man/Machine Systems」(後に「Biocybernetics」と改称) というプログラムに対して行われた。

同プログラムでは、脳波または脳磁図記録 (Magneto-Encephalo-Graphy: 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。同プログラムは、すべての脳科学が「心理生理学的」なものであった時代に、BCI 研究への最初の重要なファンディングが行われたプログラムであり、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。

1980 年代から 90 年代にかけては、DARPA の BCI 研究へのファンディングについて文書化されていないが、2002 年に DARPA の BCI への関心が再び高まり、それ以来、大きく成長してきた。DARPA は 2000 年代に入り、AugCog プログラム⁴³や HAND プログラム⁴⁴の下で、侵襲的および非侵襲的 BCI 研究にファンディングを行った。HAND プログラムは特にその目的が広く、2002 年から 2015 年までファンディングが行われた。

³⁹ <https://www.from-the-interface.com/DARPA-funding-BCI-research/>

⁴⁰ 5 ミクロン幅の電極である極細の糸で人間の脳を「縫い合わせる」マシン。このマシンは、脳を強化し、ホストなしでロボットや人工知能に対抗するのに必要な電力を与えることができるように、1,024 個もの非常に薄い電極を組み込むことができるとされる。

⁴¹ 血管を通して脳に移植可能な、脳神経からの信号を直接取り出せるセンサデバイス。ステントロードは、脳外科手術を必要としない唯一の研究用埋め込み型デバイスで、患者が手や声を使わずに外部システムをワイヤレスで制御できるように脳を訓練できるように設計されている。

⁴² 現代のコンピュータネットワークについてのコンセプトを作り上げた重要な人物。サイバネティクスと人工知能の先駆者であるとされている。

⁴³ https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_cognition

⁴⁴ https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2007-11_01

7. 次年度（最終年度）調査研究の取組み

(1) 方針

次年度（最終年度）は、令和 2 年度で明らかにした、米英を中心とした民生利用を対象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および日本の合成生物学とニューロテクノロジー研究の課題と本年度の成果を踏まえて、以下を実施する。

- ・ 米国、EU および中国における、合成生物学及びニューロテクノロジー研究の傾向や特徴に関する俯瞰的な整理
- ・ 合成生物学およびニューロテクノロジー研究における米中間の覇権争いが、日本の経済安全保障および国家安全保障に与えるインパクトの分析
- ・ 経済安全保障および国家安全保障の観点に基づく、合成生物学およびニューロテクノロジー研究に関する国際戦略の在り方に関する提言

(2) 研究のアプローチ

以下のアプローチにより研究を行う。

- ・ 最近の合成生物学あるいはニューロテクノロジー研究の進展を踏まえた経済安全保障や国家安全保障政策の在り方に関する見解を有する国内外の専門家などを招いて、数回程度の勉強会を実施する。
- ・ 上記勉強会と並行して、特に深堀が必要だと思われる問題については、外部研究協力者にヒアリング調査を実施する。
- ・ 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者・専門家を招き、新興技術が安全保障に与える影響と国際連携の在り方に関して、Zoom による国際セミナーを開催する。

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」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—
令和4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/>