



ムーンショット型研究開発事業 新たな目標検討のためのビジョン策定

「宇宙に人類が進出するための『デジタル生物圏』 構築に関する調査研究」 調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム：「DIGITAL BIOSPHERE」未来共創チーム
チームリーダー：西原 禎文（広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授）
サブリーダー：奥原 啓輔（プラチナバイオ株式会社 代表取締役 CEO）
チームメンバー：中空 萌（広島大学 大学院人間社会科学研究科 講師）
日下部 裕美子（Impact Access, Inc. 代表取締役 CEO）
Devang Thakor（Anioplex, LLC President）
島原 留美子（広島大学 学術・社会連携室 URA）

Contents(目次)

[I]. Concept	1
[I]-1. Proposed MS Goal	1
[I]-1-1. Proposed MS Goal title	1
[I]-1-2. Vision for 2050 society	1
[I]-2. Targets	2
[I]-3. Background	4
[I]-3-1. Why now?	4
[I]-3-2. Social significance	5
[I]-3-3. Action outline	6
[I]-4. Benefits for industry and society	7
 [II]. Analysis	8
[II]-1. Essential scientific/social components	8
[II]-2. Science and technology map	9
[II]-3. Japan's position in overseas trends	10
 [III]. Plan for Realization	18
[III]-1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals	18
[III]-1-1. Area and field to promote challenging R&D	18
[III]-1-2. Research subject for realization of MS Goal	18
[III]-2. Direction of R&D for realization of Goals	19
[III]-3. International cooperation	20
[III]-4. Interdisciplinary cooperation	20
[III]-5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)	22
 [IV]. Conclusion	24
 [V]. References	26

[I]. Concept(提案する MS 目標案のコンセプト)

[I]-1. Proposed MS Goal (MS 目標案)

[I]-1-1. Proposed MS Goal title (MS 目標案の名称)

「2050 年までに、すべての生物がデータ化された世界を構築し、あらゆる社会課題が解決されるものづくり革命を実現」

[I]-1-2. Vision for 2050 society(実現したい 2050 年の社会像)

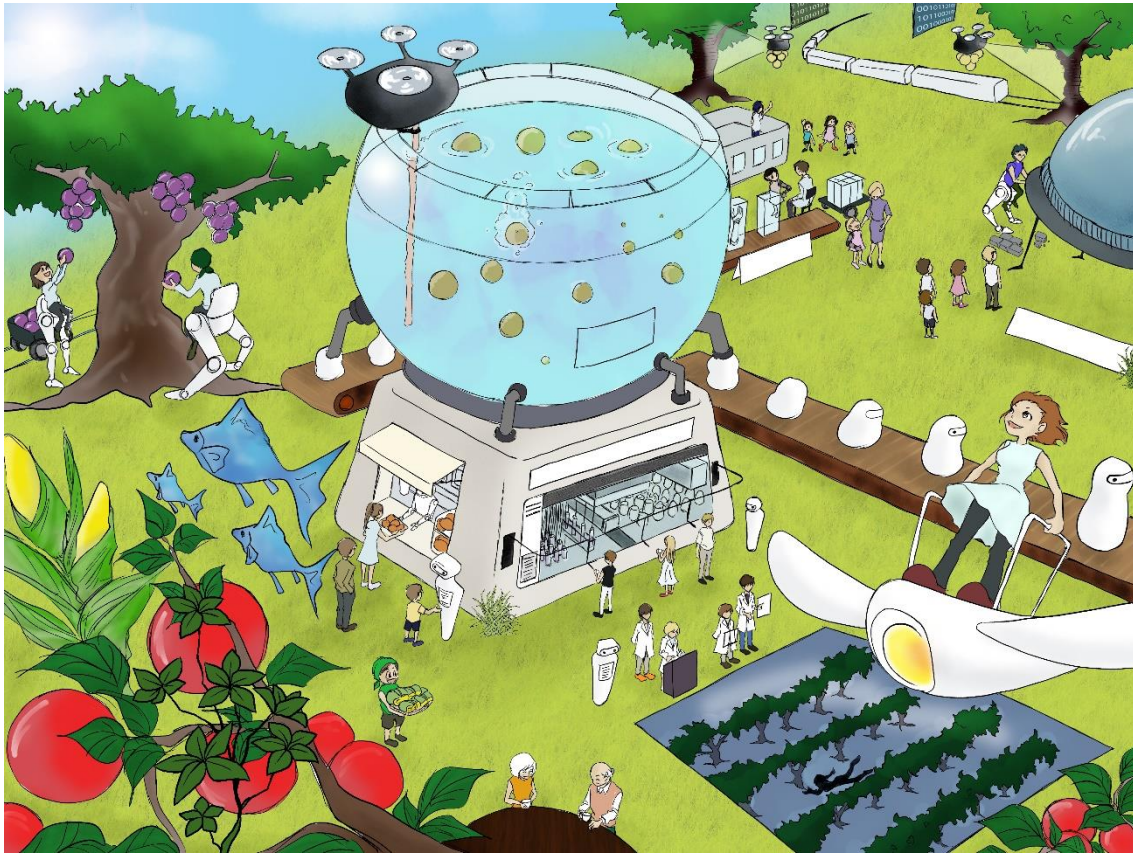


図1 提案する社会像の概念図

昨今、日本政府は 5 年から 10 年の比較的長いスパンで科学技術的な課題（イシュー）解決に予算を配分している。多くのイシューは、この 5 年から 10 年という時間で、十分に解決できると考えられる。一方で今回の MS 目標では、30 年という非常に長いスパンが設定されている。この長い時間を使って、一体何をすべきなのだろうか。我々は半年間の調査研究を実施した。

その結果我々は、これまでの 30 年で劇的に社会を変革したインターネットのように、新たな科学技術・産業のイノベーションを生み出す“場”の形成が必要であるという結

論に至った。過去 30 年の間、専門家でない所謂一般の人々を含めた様々な人がインターネット＝“場”に斬新なアイデアを持ち寄り、計り知れない数のイノベーションを生み出してきた。そうした革命が一定の到達点に達した今、我々は次の 30 年をかけて、また新たな“場”を形成する必要に迫られている。

その“場”となりうるのが、すべての生物がデータ化された世界「DIGITAL BIOSPHERE（デジタル生物圏）」である。デジタル生物圏は生物データが集積した“場”であり、その活用によって人類が直面する様々な社会課題、例えば、新型コロナウイルスの感染拡大や地球温暖化、食料問題、大規模災害といった深刻な課題の解決が期待される。

よって我々は MS 目標案として、「2050 年までに、すべての生物がデータ化された世界を構築し、あらゆる社会課題が解決されるものづくり革命を実現」を提案する。

このデジタル生物圏は、学術・産業・文化・社会的な観点からのイノベーションが自発的に創出される新しいものづくりの“場”となっていくと想像している。

さらに我々は、2050 年に MS 目標を達成したさらにその先の未来に、究極の極限環境である宇宙に人類が進出するために必要な、多数のゲームチェンジング技術が生み出されていくことを期待している。

[I]-2. Targets

(当該 MS 目標の達成シーン。2050 年(及び 2030 年)に何が実現しているか)

【MS 目標の達成シーン】

- (1) 2050 年までに、人類を脅かす新たな感染症のパンデミックが発生しない世界を実現する。
- (2) 2050 年までに、二酸化炭素 (CO₂) などの温暖化ガスの実質的な排出量をゼロにする、「カーボンゼロ」を実現する。
- (3) 2050 年までに、コンピュータ上で生物を進化させ、気候変動など環境変化にも適用できる生物を自由自在にデザインする。
- (4) 2050 年までに、バイオデータを活用してロボティクスを革新し、生物のように遺伝的に進化するロボットを開発する。

【実現可能性】

- (1) デジタル生物圏に蓄積された過去のウイルスデータから、毒性の高いウイルスの遺伝情報を予測することで、早期にワクチンの生産・備蓄が可能となり、パ

ンデミックを未然に防ぐ。またはパンデミックになった場合でも、早期解決が可能となる。

- (2) ゲノム解析技術により、CO₂ から有用物質を生産する合成経路を明らかにし、キーとなる遺伝子を自由自在に改変するゲノム編集技術を導入すると、微生物が持つ CO₂ 吸収力を飛躍的に高めることが期待される。
- (3) 大容量の次世代メモリ技術と、それを解析する次世代コンピューティング技術を開発し、生物の超ビッグデータを保存・解析できる環境を整えることで実現できる。
- (4) 長い時間をかけて地球環境に適応・進化してきた生物の構造・機能から知見を得て、その応答を学習するロボットをデザインすることで実現できる。

【2030 年における達成シーン】

- (1) 2030 年までに、ゲノムを活用した生物由来の製品を開発する「バイオものづくり」を実現し、ワクチンやバイオ医薬品の迅速な生産体制を構築する。
- (2) 2030 年までに、石油から大量のエネルギーを使って化学合成する物質生産をバイオプロセスへ転換し、脱炭素化を推進する。
- (3) 2030 年までに、生物の超ビッグデータを保存する大容量メモリ技術を確立する。
- (4) 2030 年までに、環境中のバイオデータを自動で収集し、基地局にデータを転送するロボットを開発する。



図2 ムーンショット目標のターゲット

[I]-3. Background(当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等)

[I]-3-1. Why now?

(当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由)

新型コロナウイルス感染症に対する迅速な検査体制の構築やワクチン開発、地球温暖化による環境変化にも適応できる新たな品種改良、食料問題の解決など、最先端のバイオテクノロジーを駆使して、生物機能を最大限に引き出すことで、人類が直面する様々な社会課題を解決することへの期待が高まっている。

このような潮流を踏まえて、人類が直面する地球規模の諸問題を解決し、持続的な発展を可能にする「バイオエコノミー」を実現するには、未来ビジョンに基づいたバックカスティングのアプローチが必須である。そのための手段として、あらゆる生物・環境データを収集し、誰もがそのビッグデータを利用・解析し、社会問題の解決に取り組める“場”を構築する必要がある。

そこで我々は、すべての生物がデータ化された世界「デジタル生物圏」を構築し、社会課題を解決するものづくり革命を実現、という MS 目標を提案する。これは、古代エジプトで世界中の知を蓄積したと言われる「アレキサンドリア図書館」の 21 世紀デジタル版を構築するプロジェクトとなり、我が国の産業競争力の源泉となる（図 3）。

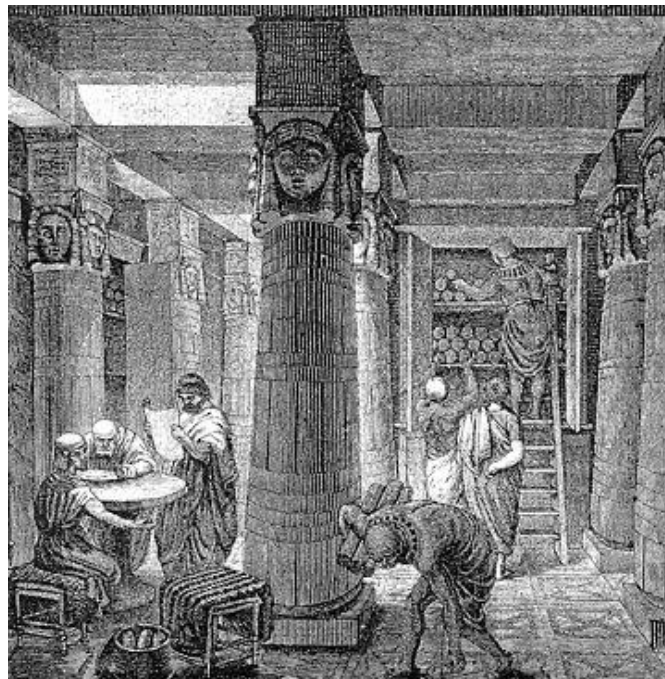


図3 古代エジプトで「人類の英知の集積」と謳われたアレキサンドリア図書館
(出典:Wikipedia)

[I]-3-2. Social significance (目標達成の社会的意義)

我々が提案する 2050 年の社会像の意義は、デジタル生物圏の構築によって、誰もが自由に必要な情報へアクセスすることができ、各自のアイデアでバイオデータを活用して、社会課題の解決、新たなビジネスの創出が可能となる“実験場”を提供することにある。これにより、インターネットが世界中の人々に利用され、それぞれの創意工夫から革新的なサービスが生み出されたように、我々の生活を一変させるような産業や技術がもたらされると確信している。

(1) パンデミック対策

新型コロナウイルスは RNA ウイルスであるために、突然変異が起こりやすく、感染力の高い変異型が次々と出現している。一般に、RNA ウイルスは、ヒトゲノムの進化速度の約 100 万倍の速度で変異しており、ヒト免疫不全ウイルス (HIV) やインフルエンザウイルス、SARS についても同程度である¹。そのため、デジタル生物圏の構築により、その遺伝情報を瞬時に解析する技術が開発できれば、迅速なウイルス検出、データ解析による変異予測、新たなワクチン開発の時間短縮など、様々な効果が期待できる。

(2) カーボンゼロの実現

地球温暖化による環境変動により、農作物が育たなくなるなど、食料の安定供給を阻むような悪影響が顕在化することが懸念され、世界中で、脱炭素・カーボンゼロへの機運が高まっている。カーボンゼロを実現するには、CO₂ から有用物質を生産する微生物・植物の力を最大限に引き出し、バイオ燃料・バイオ素材などの物質生産をより高効率なプロセスに転換する必要がある。デジタル生物圏には世界中からバイオデータが集積されるため、これを活用してキーとなる遺伝子を明らかにし、ゲノム編集技術によって高効率なバイオプロセスを創出することが可能になる。

(3) 生物のデジタル進化

環境変化をコントロールすることは極めて困難であるため、年々変化する環境に素早く適応する生物をデザインするアプローチが必要となる。そのためには、生物の DNA 配列 (ゲノム) と、環境要因による遺伝子発現 (トランスクリプトーム) の変化、生体内の代謝物 (メタボローム) の変化をまとめて収集することが必要であるが、これらは膨大なデータ量となる。そこで、この超ビッグデータを保存し、そのデータ解析を素早く行うことができる大容量メモリ技術を確立できれば、コンピュータ上で生物進化をシミュレーションし、環境変化に適応できる生物をデザインすることが可能となる。

(4) 進化型ロボット

バイオデータの活用先は、生物のプログラミングだけでなく、非生物であるロボットにも及ぶ。生命誕生から長い時間をかけて地球環境に適応・進化してきた生物を参考にして、その構造・機能、環境情報への応答をモデル化して、自ら学習・行動するロボットを開発することも可能になる。これによって、環境から生物サンプルを収集・解析するロボットを開発することができれば、デジタル生物圏の構築に必要なバイオデータの取得を自動化・高効率化することができる。こうして得られた超ビッグデータから、人が踏み込めないような危険な環境でも活動できるロボットを新たにデザインすることが可能となる。

[I]-3-3. Action outline(当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要)

MS 目標の達成に向けて、科学技術の領域では異分野融合が重要になる。デジタル生物圏の構築には、生物の“デジタル化”と“プログラミング”を実現するバイオ×デジタルの様々な要素技術とその組合せが必要となる。

生物の DNA データ保存の取組みでは、日本・米国・欧州の 3 極で国際塩基配列データベース連携を実施している²⁻⁴。また、バイオデータの共有・整理・統合を進めるため、国際ワークショップ（BioHackathon）を共催し、バイオデータの標準化や、データベース統合化のための技術開発を行っている⁵。このような国際連携の枠組みから、人類の叡智を結集することが必要である。

また、新たに創出される技術シーズを産業に直結させる取組みを加速するために、プロジェクトからスピノフしたスタートアップ創出や、産業の各セクターで社会実装を担うプレーヤーへの橋渡しなど、グローバルなビジネス展開の視点と、そこから収益を上げて自立化していく道筋を立てることが重要である。

さらに ELSI への対応として、市民など様々なステークホルダーと研究開発の初期段階から十分なコミュニケーションをとることも重要である。情報公開を適切に行い、社会の倫理観の醸成と研究開発側へのその共有を図る取組みを進めていく。それにより市民との対話、人文・社会科学との融合による「総合知」を実現し、社会実装に向けた道筋を描くことができる。

[I]-3-4. Benefits for industry and society

(当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化)

バイオ産業は 2030 年には約 200 兆円に成長すると予測され、その原動力となるのが、バイオ×デジタルの融合である⁶。ゲノム解読コストの低減・短縮化により生物情報を安価にデジタル化し、IT・AI 技術を駆使した解析によりゲノム配列と生物機能の解明が進み、ゲノム編集によって狙った生物機能の発現が可能となる未来が期待されている。

一つのゲノムデータ量だけでも数十 GB 程度あり、地球上に約 870 万あると言われる生物種やその個体数を鑑みると、その超ビッグデータを保存可能な革新的なメモリ技術が必要となる^{7,8}。

デジタル生物圏の構築により、集積されたバイオデータを世界中の誰もが利用できる環境を整えることができ、様々な人が自由な発想で新たな解析を行うことができるようになる。これにより、誰もがイノベーション創出の担い手となり、革新的なサービスが次々に生み出されるような社会・産業構造へと大きく転換することが期待される。

これにより、新型コロナウイルス感染症のような新たなパンデミックが起こった際の迅速な検査体制の構築や特効薬となるバイオ医薬品の開発、そして地球温暖化による環境変化にも適応できる新品種作出など、人類が直面する様々な課題を解決することが期待される。

世界に先駆けてデジタル生物圏を構築することで、我が国が強みとしてきた「ものづくり」をアップデートして、米国・中国をはじめ世界と伍する我が国の科学技術力の再興、そして産業競争力の強化を実現することができる。

この期待される社会・産業構造の変化に向け、今ここで我が国が強いリーダーシップを発揮し、人類の叡智を結集して取組みをスタートさせることが必要不可欠である。

[II]. Analysis(統計・俯瞰的分析)

[II]-1. Essential scientific/social components

(当該 MS 目標を達成するための課題(科学技術的・社会的課題)や必要な取組み)

我々が提案する MS 目標を達成するために、そこからバックキャストして、どのような研究開発プロジェクトを実施すべきか調査研究を行った。

我々の描く社会像を実現するためには、ゲノム編集×デジタル技術のコンセプトを軸に、次世代通信、ストレージ、AI、量子コンピュータについて、科学技術的な課題を克服する必要がある。

同時に、“デジタル化”した遺伝資源をどのように取り扱うか、生物の“プログラミング”をどこまで行うべきか、といった倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) について人類の英知を結集して取り組む必要がある。

MS 目標を達成する過程で、これらの異分野融合による新結合=“New Innovation”が創出され、デジタル生物圏を構築するイメージを図4に示す。

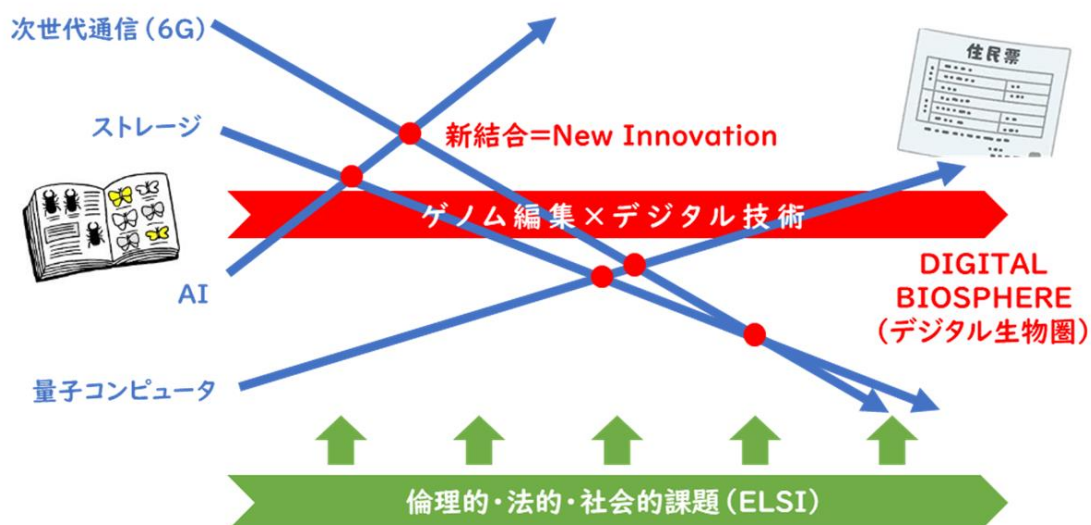


図4 MS 目標を達成するための課題:俯瞰図

デジタル生物圏は、ゲノム（遺伝子）、トランスクリプトーム（転写物）、プロテオーム（タンパク質）、メタボローム（代謝物）などのバイオデータに加え、環境条件による遺伝子発現の変容（環境応答）、生物間の相互作用など、生物種と環境も含んだ超ビックデータを収集することで実現される。このデジタル生物圏を構築するには、生物の“デジタル化”と“プログラミング”を実現する「バイオテクノロジー」、「コンピューティング」、「ロボティクス」が重要である。

[II]-2. Science and technology map

(当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰)

科学技術により克服すべき課題は、「バイオテクノロジー」「コンピューティング」「ロボティクス」であり、図 5 に関連する分野・技術群の構造をまとめた。

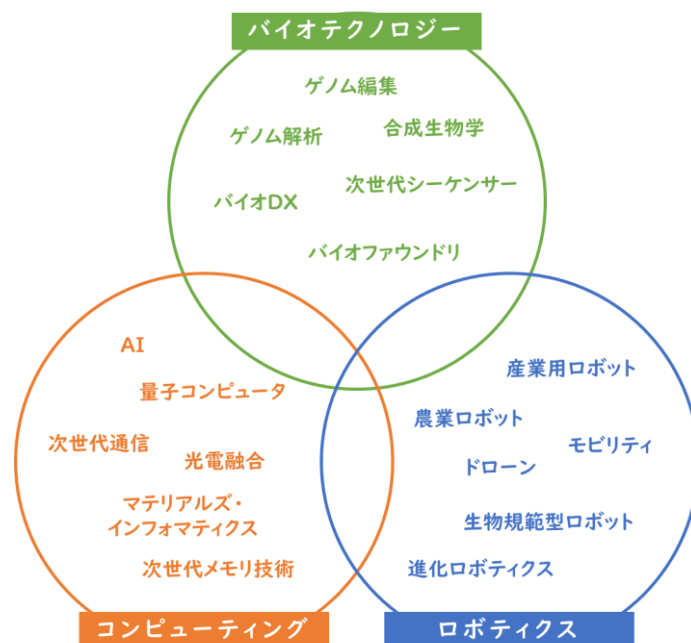


図5 関連する分野・技術群の構造 (Structure of research fields and technologies)

「バイオテクノロジー」では、国内外の公共 DB に蓄積したデータを自らの研究に利用する Bio-Digital Transformation (バイオ DX) がブレークスルーとなる。広島大学大学院統合生命科学研究科の坊農秀雅特任教授らは、公共遺伝子発現データと文献データから、バイオ DX により、新規の低酸素応答性遺伝子を複数発見したと報告した⁹。これはデータ駆動型研究の実践例の先駆けであり、デジタル生物圏に集積される超ビッグデータをどのように活用すべきかを示す道標となる。

「コンピューティング」では、デジタル生物圏の超ビッグデータをまるごと保存可能な、次世代メモリ技術がブレークスルーとなる。チームリーダーの西原禎文は、世界に先駆けて単一分子で強誘電的な挙動を示す「単分子誘電体」を開発し、超高速・超大容量メモリ開発を行っている。この成果はアカデミアのみならず産業界からも多くの注目を集めている^{10,11}。

「ロボティクス」では、環境からバイオデータを収集するプロセスを自動化・ロボット化するためのブレークスルーも必要となる。我が国のものづくり産業の強みを活かして、新たにこの領域にチャレンジすることが期待される。

[II]-3. Japan's position in overseas trends

(当該目標に関連する研究開発の動向(全体)、海外動向及び日本の強み)

① バイオテクノロジー

バイオテクノロジーにおいて日本が強みを有している技術要素について、JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」ライフサイエンス・臨床医学分野（2021 年）のデータを元に、図 6 にまとめた¹²。

国	フェーズ	高分子創薬 (抗体)	微生物分子 生産	植物工場	水産	ゲノム編集・ エピゲノム編集	合成生物学
日本	基礎	◎↗	○→	◎→	◎→	○↗	◎↘
	応用	○↗	○↗	◎↗	◎→	△→	○→
米国	基礎	◎→	◎↗	○↗	○↘	◎↗	◎→
	応用	◎→	◎→	○↗	△→	◎↗	◎→
欧州	基礎	◎↗	◎→	△↗	○↗	○→	◎↗
	応用	◎↗	◎↗	△↗	◎↗	○→	○↗
中国	基礎	◎↗	○↗	○↗	○↗	○→	△→
	応用	○→	○↗	○↗	△→	◎↗	○↗

図 6 研究開発の動向(バイオテクノロジー)

「高分子創薬（抗体）」では、AI と臨床ビッグデータを用いた新規パスウェイ解析技術、AI や分子動力学を駆使したインシリコ分子設計の重要性が増しており、ロボティクス、AI の利用など、機械工学や情報工学分野から医薬品開発に参画するプロジェクトが進められている。

「微生物分子生産」では、米国・欧州を中心に、バイオ（生物化学）とデジタル（AI）の融合、さらに、ロボティクスによる自動化や遺伝子クラスターの一括合成など、バイオフィファウンドリーの取組みが進められており、日本もキャッチアップしていく必要がある。

「植物工場」「水産」といった、産業生物の栽培・育種の領域では、日本の強みがあるため、デジタル生物圏によって、さらなる競争力強化を図ることが必要である。

「ゲノム編集・エピゲノム編集」では、2020 年にノーベル化学賞を受賞した CRISPR-Cas9 によって基礎研究が活発に行われているが、事業化を進めるためには、海外の複数の知財ホルダーからライセンスを得る必要があり、また知財紛争も勃発し

ている。このように、権利関係が不透明であることが産業利用の足かせになっている。そんな中、広島大学ゲノム編集イノベーションセンターの山本卓教授は、日本ゲノム編集学会会長として日本のゲノム編集研究を牽引し、2019年にNature Biotechnology誌「ゲノム編集の最多論文発表者15人」の中で、世界第2位にランクインしている¹³。彼らが開発した独自技術「Platinum TALEN」は産業利用に最適なゲノム編集ツールとして、産業界での利用事例が拡大している。

このゲノム編集と、人工細胞の構築を目指す「合成生物学」の強みを掛け合わせ、生物のプログラミングを可能とする技術開発を進める必要がある。

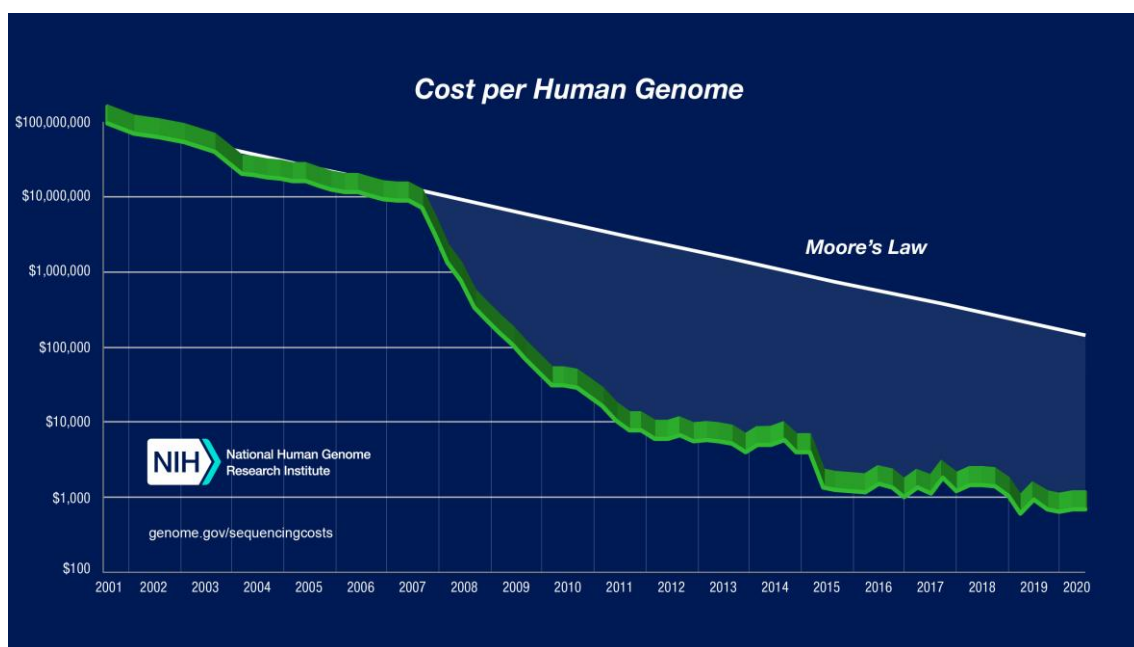


図7 ヒトゲノム解読コストの推移

次世代シーケンサー（NGS）の登場によってゲノム解読コスト・時間が大幅に低下し、膨大なデータの産出が可能となった。例えば、ヒトゲノムの解読にかかる費用は、1サンプルあたり1000ドル以下となっている（図7）¹⁴。

USB型シーケンサーであれば、約10分で解析が終わることもある。長鎖のDNA配列を解析できる方法として、ナノポアシーケンス法（Oxford Nanopore Technologies社）が利用されており、約30GbのDNA配列データまたは7-1200万回の読み取りを生成でき、長いリード（数百kb）が可能となる¹⁵。この方法を用いれば長い配列を読むことができるが、DNA配列を電位差から読み取るため、その精度が低いことが課題となっている。

地球上の生物の種数は、875 万種と推定されている⁷。ある土地のバイオマスサンプルについて、全生物の質量から個体数を推定する論文が報告されている⁸。

ヒトゲノムのデータ量は約 3Gb であるが、それぞれの生物でゲノムサイズは異なる。ヒト以外でゲノムが解読された生物は一部のモデル生物のみである。例えば、昆虫は約 100 万種存在するとされているが、そのうち 600 種程度 (0.06%) しか、ゲノム解読されていない。

ゲノム情報から表現型に結びつける研究はまだほとんどなされておらず、個体差を把握するには、ゲノム情報とその個体の特徴に関する情報を同時に取得する必要がある。

そこで、国内外の公共 DB に蓄積したデータと、自らの研究に利用する Bio-Digital Transformation (バイオ DX) がブレークスルーとなる。広島大学大学院統合生命科学研究科の坊農秀雅特任教授は、公共遺伝子発現データと文献データから、新規の低酸素応答性遺伝子を発見するマルチオミックス解析した (図 8)⁹。これは、バイオ DX を活用したデータ駆動型研究の実践例の先駆けであり、デジタル生物圏に集積される超ビッグデータをどのように活用すべきかを示す道標となる。

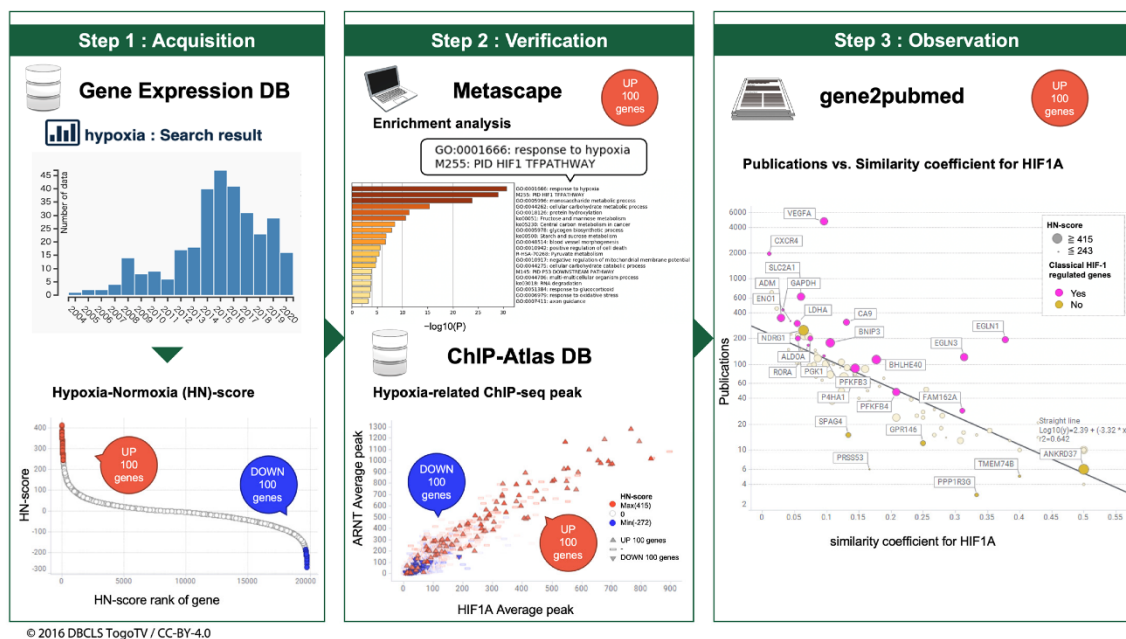


図8 新規の低酸素応答性遺伝子を発見するマルチオミックス解析

② コンピューティング

コンピューティングにおいて日本が強みを有している技術要素について、主に JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」ナノテクノロジー・材料分野 (2021 年) のデータを元に、図 9 にまとめた¹⁶。

国	フェーズ	AIソフトウェア工学	データに基づく問題解決	新機能ナノエレクトロニクスデバイス	量子情報・通信	分子技術	マテリアルズ・インフォマティクス
日本	基礎	○↗	○↗	○→	○→	◎↗	○↗
	応用	○↗	○↗	○→	○→	◎→	○↗
米国	基礎	○↗	◎↗	◎→	◎↗	◎↘	◎↗
	応用	○↗	◎↗	◎→	◎→	◎↗	○↗
欧州	基礎	○↗	○↗	◎→	◎↗	◎→	○↗
	応用	○↗	○→	○→	◎↗	○→	○↗
中国	基礎	△→	○→	○↗	○↗	○↗	○↗
	応用	△→	◎↗	○→	○↗	○↗	○↗

図 9 研究開発の動向(コンピューティング)

AI の分野では、米国を中心とした Google、Microsoft、Facebook 等の巨大 IT 企業が、有能な技術者を全世界から集め、基礎研究から応用研究・開発まで盛んに行っている。

「AI ソフトウェア工学」では、日本で文科省の 2020 年度戦略目標として「信頼される AI」が設定され、JST プログラム (ERATO、MIRAI、CREST、さきがけ等) で AI 信頼性に関する研究課題が推進されている。

「データに基づく問題解決」では、AI・機械学習を活用して科学的発見の可能性を拡大する取り組みをデータ・AI 駆動科学と呼び、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画においても、データ駆動型研究の推進が掲げられている。

「新機能ナノエレクトロニクスデバイス」では、不揮発性メモリの NAND 型フラッシュメモリでは高積層構造形成プロセスによる大容量化の競争が繰り広げられている。半導体エレクトロニクス分野において日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、その蓄積は急速に散逸し失われつつある。そのため、これを回避して人材や設備等を有効活用する仕組みが必要である。

「量子情報・通信」では、日本でも内閣府により量子技術イノベーション戦略が 2020 年に策定され、理化学研究所を中心とした国内産学連携体制が整いつつある。産業界としては米国 Google や IBM、インテル、マイクロソフトなどの大企業に加えて、米国、カナダ、欧州ではベンチャー企業も参入し存在感を高めている。日本の産業界でも NEC、富士通などハイパフォーマンスコンピューティングに強い企業の参入が始まっている。

「分子技術」は、目的を持って分子を設計・合成・操作・制御・集積することにより、分子レベルで所望の物理的・化学的・生物学的機能を創出し、応用に供するための一連の技術である。日本発の研究開発領域であり、先端材料で優位性がある。

「マテリアルズ・インフォマティクス」(MI)は、高度なデータ科学に基づく機械学習・ディープラーニング(深層学習)を用いた物性予測、ハイスループット材料合成・評価、データマイニングによる特徴抽出などにより、新材料の設計、探索、発見を飛躍的に加速することを可能にする。材料開発の重要なツールであるため、2020年に文部科学省・経済産業省から「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて」が発表され、日本として戦略的にデータを創出・活用するための基盤となるマテリアルDXプラットフォーム構想が打ち出されている。

このような国際情勢の中、我が国が強みとする分子技術を駆使して、DX社会を支える半導体産業の巻き返しを図って行く必要がある。

図10にAI Design Forumの基調講演でGary Dickerson (Applied Materials CEO)が示したデータ量の推移から分かれるとおり、世界のデータ量は指数関数的に増大しており、従来のメモリ技術の延長ではない、ゲームチェンジ技術となる革新的なメモリ技術が求められている¹⁷。

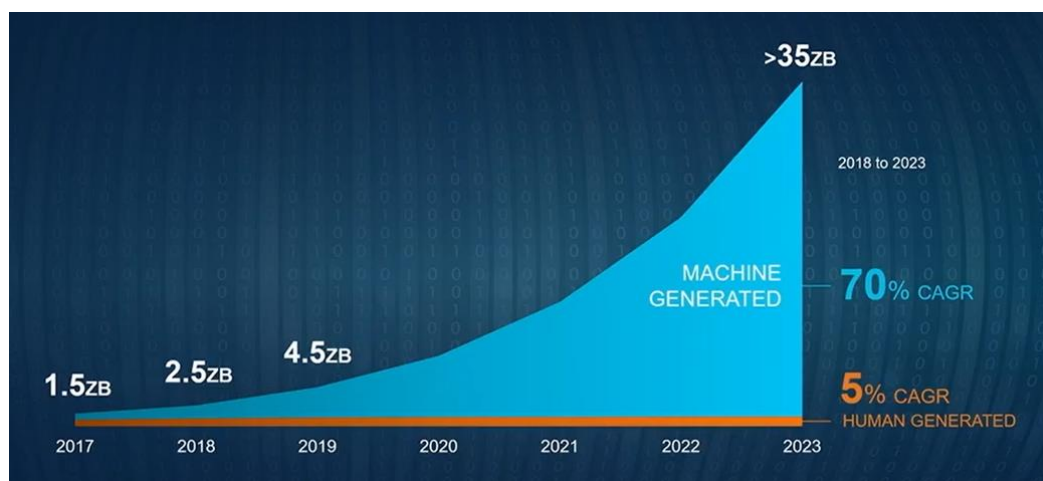


図10 データ量の推移

チームリーダーの西原禎文(広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授)は、世界に先駆けて単一分子で強誘電的な挙動を示す「単分子誘電体」を開発し、アカデミアのみならず産業界からも多くの注目を集めている(図11)。

現在、JST 大学発新産業創出プログラム（START）において、1nm サイズの一つの分子に情報を記録できる籠型分子を用いて、高速・高密度・低消費電力の不揮発性メモリを開発し、AI・ビッグデータ時代を支える革新的コンピュータの実現に貢献する、ベンチャー設立を目指した事業化の取組みを進めている^{10,11}。

この次世代メモリ技術が、デジタル生物圏の構築における、超ビッグデータをまるごと保存可能なストレージを実現する、ブレークスルーとなる。

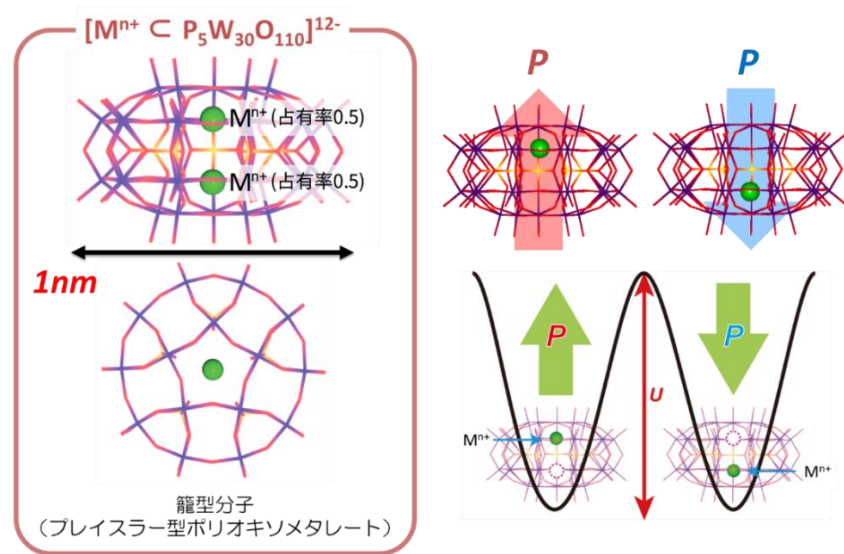


図 11 “単一分子”で情報を記録する「籠型単分子メモリ」

③ ロボティクス

ロボティクスにおいて日本が強みを有している技術要素について、JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」システム・情報科学技術分野（2021 年）のデータを元に、図 12 にまとめた¹⁸。

国	フェーズ	生物規範型 ロボティクス	システム化 技術	モビリティ ロボット	生活支援・ 介護ロボット	サービス ロボット	農林水産 ロボット
日本	基礎	○↗	○→	○↘	◎↗	◎↗	○→
	応用	○→	◎↘	○→	◎↗	◎↗	◎↗
米国	基礎	◎↗	◎→	◎→	◎→	◎↗	◎→
	応用	◎↗	◎→	○↗	○→	◎↗	◎↗
欧州	基礎	○↗	○→	◎→	◎→	○→	○→
	応用	○→	○↗	○→	◎↗	×↘	◎↗
中国	基礎	○→	○↗	◎→	△↗	○↗	◎↗
	応用	◎↗	◎↗	◎→	○↗	◎↗	△→

図 12 研究開発の動向(ロボティクス)

「生物規範型ロボティクス」(bio-inspired robotics)は、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを志向する研究開発領域である。米国では、二脚ロボット(Agility Robotics社)や四脚ロボット(Boston Dynamics社)の市場販売が開始されるなど、物流分野を中心に実社会での本格的な用途拡大が期待される。

「システム化技術」は、複数の要素技術から構成されるロボットシステムを設計・制御する技術である。日本の応用研究・開発は、最高レベルが維持されており、福島原発の廃炉などでも、その技術力の高さが証明されている。ただし、それが事業化や社会実装にはうまくつながっておらず、競争力は低下の傾向にある。ムーンショット目標3「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」のプロジェクトなどによる巻き返しが期待される。

「モビリティロボット」では、ドローン関係の特許出願数で世界の42.4%を占める中国の存在感が際立っており、ドローンの機数でも中国製が世界の7割を占めている。日本では、ドローンの飛行安全向上に向けたAI技術応用に関する研究がNEDOにおいて実施中(2019～2023)など活発な応用研究が推進され、ISO国際標準化活動も活発であるが、特許件数でみると中国、欧米とは大きな差が開いている(出願件数で6.2%)。

「生活支援・介護ロボット」では、移動ロボットやマニピュレーターといったロボットの要素技術、ロボット学会、機械学会、日本生活支援工学会、ライフサポート学会等を中心とした学会活動、基礎研究から社会実装まで段階毎のファンディング

(NEDO、JST)など基礎研究を行うための充実した環境が日本にある。応用研究・開発では、産業ロボットとして世界最高峰の技術力を有するファナックを中心に、多くのロボット会社が存在感を示しており、自動車や半導体のプロセスオートメーション化などに貢献している。コミュニケーションロボットの分野はソフトバンク、ソニーといった大手の応用研究・開発が盛んである。近年ロボット関連のベンチャー企業の増加が見られ、今後はその技術や先進性を中心として人工知能技術と連携しての発展が期待される。

「サービスロボット」とは、家庭における清掃ロボット、公共施設等における警備ロボット、店舗等における接客ロボットや配膳ロボット等を指し、少子高齢化による労働人口の減少に伴い、面倒な家事、屋外での危険な作業、コンビニやファミリーレストラン等での深夜業務などを代替するため、市場の伸びが予測されている。日本は

他の地域に先駆けてエンターテインメント系サービスロボットの研究開発、商品化を進めてきた。ソニーの aibo、NEC のパペロ、癒しロボットのパロ、ソフトバンクロボティクスの Pepper など、人と共存する様々なロボットが販売されており、トヨタ自動車（HSR）など標準プラットフォームロボットの開発が盛んで優位性のある分野になっている。

「農林水産ロボット」は、2018 年に世界に先立ち無人で作業するロボット農機を日本で社会実装し、無人トラクタや無人田植え機が市販されている。ロボット農機は現在、世界に先駆けた複数台の協調作業システムや遠隔監視による無人状態での完全自動走行の実証フェーズにあり、競争力の高い分野となっている。



図 13 ボストン・ダイナミクスの「ロボット警察犬」

米国では、ボストン・ダイナミクスの四足歩行ロボット「Spot」がニューヨーク市警察(NYPD)の「警察犬」として投入されたことが話題となっている（図 13）¹⁹。将来的な応用例として、犯罪現場に入って DNA サンプルを採取することも期待されている。

デジタル生物圏の構築に向けて、ロボティクスと生物学、数理科学が三位一体となった研究プロジェクトを進めることで、環境条件と生物の DNA サンプルを自動収集するロボットの実現など、進化ロボティクスを駆使した新たなブレークスルーが必要不可欠となる。

[III]. Plan for Realization(社会像実現に向けたシナリオ)

[III]-1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals (挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題)

[III]-1-1. Area and field to promote challenging R&D (挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域)

我々が提案する MS 目標は、デジタル生物圏をコンセプトにするものであり、その達成に向けて挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域として、以下の 3 つを設定する(図 14)。

- a) バイオテクノロジー分野：バイオ DX
- b) コンピューティング分野：次世代メモリ技術
- c) ロボティクス分野：進化ロボティクス

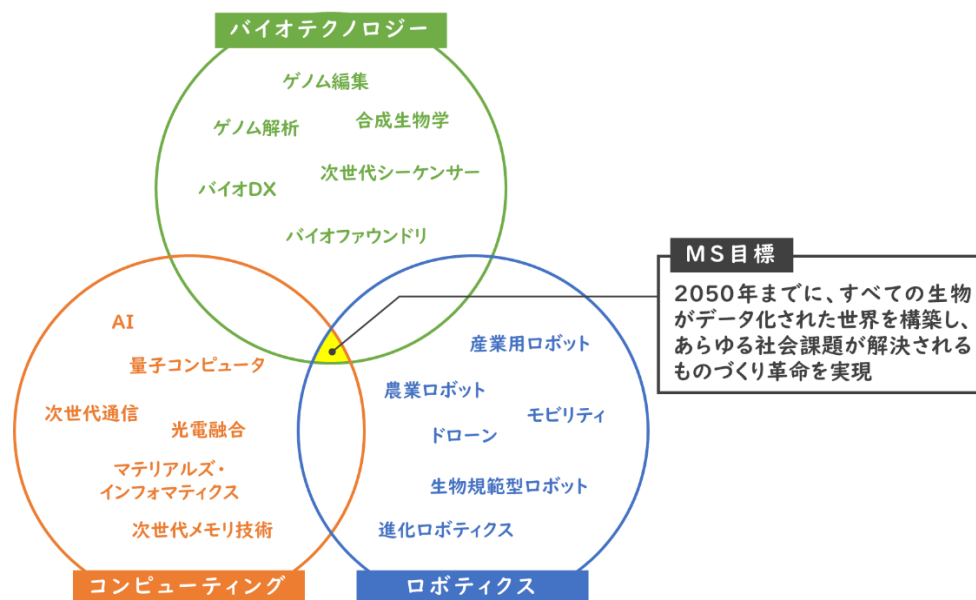


図 14 挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域:俯瞰図

[III]-1-2. Research subject for realization of MS Goal (目標達成に当たっての研究課題)

MS 目標の達成に向けて取組むべき研究課題として、以下の 3 つを想定する。

- a) バイオテクノロジー分野：バイオ DX
「マルチオミックス解析を駆使したデータ駆動型バイオ DX 研究」
- b) コンピューティング分野：次世代メモリ技術
「超ビッグデータをまるごと保存可能なストレージを実現する次世代メモリ技術」
- c) ロボティクス分野：進化ロボティクス
「環境データとバイオデータ自動収集する進化型ロボットの開発」

[Ⅲ]-2. Direction of R&D for realization of goals

(2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標(マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)

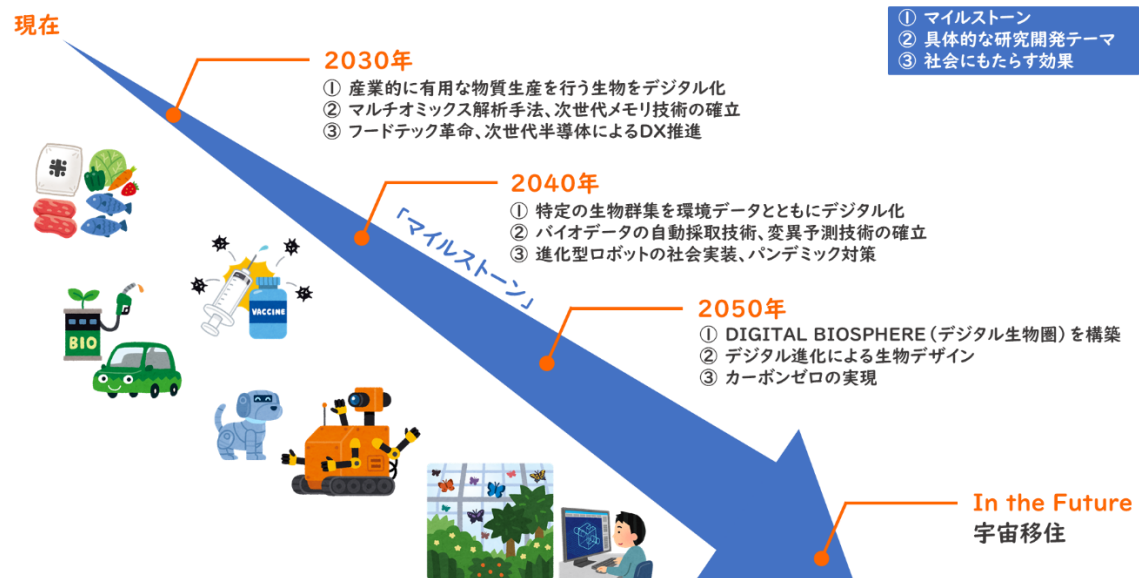


図 15 提案する社会像実現に向けたシナリオ

① 2030 年、2040 年、2050 年のそれぞれにおいて達成すべき且つ達成が見込める具体的な目標(マイルストーン)

2030 年 産業的に有用な物質生産を行う生物をデジタル化

2040 年：特定の生物群集を環境データとともにデジタル化

2050 年：DIGITAL BIOSPHERE (デジタル生物圏) を構築

②マイルストーンの達成に向けて取り組むべき具体的な研究開発テーマ

2030 年：マルチオミックス解析手法、次世代メモリ技術の確立

2040 年：バイオデータの自動採取技術、変異予測技術の確立

2050 年：デジタル進化による生物デザイン

③マイルストーンの達成が社会にもたらす効果

2030 年：フードテック革命、次世代半導体による DX 推進

2040 年：進化型ロボットの社会実装、パンデミック対策

2050 年：カーボンゼロの実現

[Ⅲ]-3. International cooperation(目標達成に向けた国際連携の在り方)

生物の DNA データについては、国立遺伝学研究所が運営する DNA Data Bank of Japan (DDBJ) センターが、欧州の European Bioinformatics Institute (EMBL-EBI)、米国の National Center for Biotechnology Information (NCBI) と共に、国際塩基配列データベース連携 (International Nucleotide Sequence Database Collaboration : INSDC) を実施しながら、それを活用できるスーパーコンピュータシステムを提供している²⁻⁴。

また、バイオデータの共有・整理・統合を進め、データから知識を引き出しやすくするミッションを担う、JST バイオサイエンスデータベースセンター (NBDC) では、ライフサイエンス統合データベースセンター (Database Center for Life Science: DBCLS) と共に国際ワークショップ (BioHackathon) を共催している⁵。これは米国・欧州・日本におけるバイオインフォマティクスのトップランナーが集結 (100 人超の参加者) し、1 週間にわたる合宿形式のワークショップで、バイオデータの標準化や、データベース統合化のための技術開発を目的としている。

デジタル生物圏を実現するプラットフォーム構築にあたり、このような国際連携の枠組みを活用して、その利用拡大を図る取組みが必要である。

[Ⅲ]-4. Interdisciplinary cooperation

(目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方)

MS 目標の達成に向けて、プロジェクトにおいて新たに創出される技術シーズを産業に直結させる取組みを加速する必要がある。そのために、プロジェクトからスピノフしたスタートアップの創出や、産業の各セクターで社会実装を担うプレーヤーへの橋渡しなど、グローバルなビジネス展開の視点と、そこから収益を上げて自立化していく道筋を立てることが重要である。

バイオ産業は、我々の MS 目標が最もインパクトを与えるターゲットであると考えられ、図 16 に示すとおり、フード&アグリテック、創薬・医療、エネルギーなど様々な領域で、国内。海外に大きな市場を切り拓くことが期待される²⁰⁻²⁸。

半導体産業を支える不揮発性メモリの市場規模は、2020 年の 543 億米ドルから 2025 年には CAGR9.0% で成長し 836 億米ドルに達すると予測され、高速・低消費電力・高拡張性のメモリデバイスへのニーズが高まっている²⁹。半導体は、新型コロナウイルスの感染拡大を受けた巣ごもり需要を背景に、デジタルトランスフォーメーション (DX) の中心的な存在として、息の長い需要拡大が続くと予測されている。

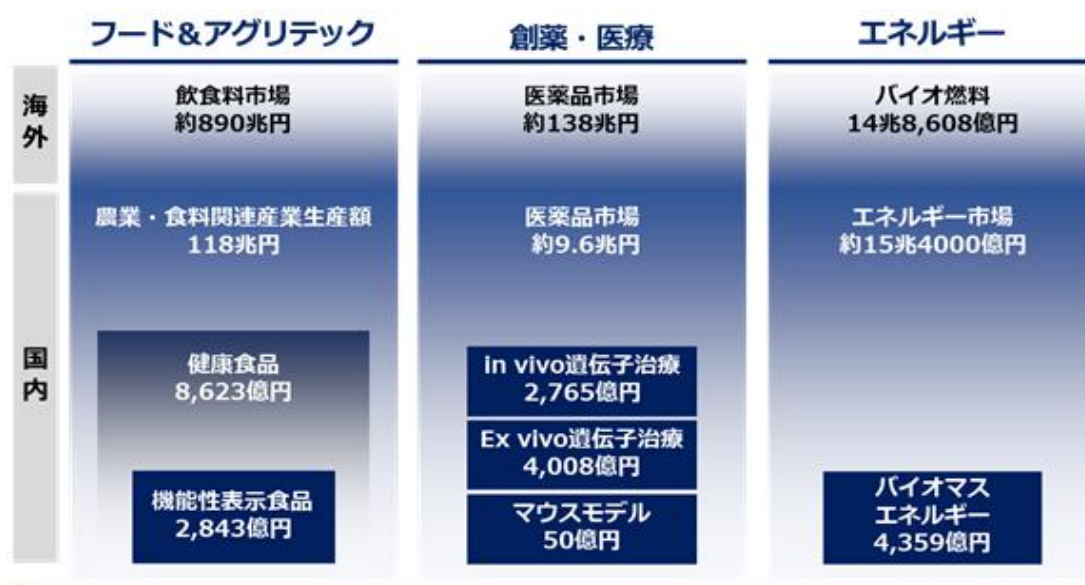


図 16 バイオ産業における TAM (Total Addressable Market)

米半導体大手マイクロン・テクノロジーは、先端メモリ開発で対日連携を強化するため、広島工場など国内の拠点で開発や量産を手掛け、過去3年間の対日投資は70億ドル（約7700億円）に達する。

製造業向けロボットは、世界的な人手不足を背景に拡大が続き、自動車関連やスマートフォン関連などでは自動化が進んでいる。今後さらに、生産性向上を目的としたスマートファクトリー化の進展、5Gの普及によるスマートフォン需要の高まりに伴う企業の設備投資強化、自動運転車の普及による生産ラインの刷新などを受け、2025年の世界市場は約2.3兆円まで拡大すると予測されている³⁰。

業務・サービスロボットは、医療・介護、家庭、建設、インフラ点検、オフィス、店舗など、様々なシーンでの活用が広がっている。少子高齢化の進む日本をはじめ世界各国で人手不足が深刻な課題となり、単純労働や身体的負荷の大きな作業をロボットが代替している。その他にも、危険エリアでの作業、カメラやセンサーによるマーケティングデータ収集など、ロボットにしかできない業務も増加している。2025年の世界市場は約4.7兆円まで拡大すると予測されている。

「DIGITAL BIOSPHERE（デジタル生物圏）」構築により創出される技術シーズは、バイオ産業、半導体産業、ロボット産業に大きなインパクトをもたらすと考えられる。

そのため、最初の10年間、国の支援を受けてMS目標の達成に向けた取組みをドライブすれば、民間投資の呼び込み、民間主導の取組みへと展開し、2050年への残り20年間の取組みを自立化させることも可能となる。

この様なアプローチを実現するため、出口ニーズを的確に捉えながら、産業へ直結するターゲットから取組みをスタートし、研究開発の初期段階から産業界のプレーヤーを積極的に巻き込み、セクターを超えた連携を具体化していくことが必要である。

[Ⅲ]-5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

「DIGITAL BIOSPHERE (デジタル生物圏)」を実現するにあたり、倫理・法的・社会的課題 (ELSI) として考慮すべき事項は、“デジタル化”した遺伝資源の取扱いと、生物の“プログラミング”に対する規制である。

(1) “デジタル化”した遺伝資源の取扱い

現在、海外での生物サンプルの採取に際して、Access and Benefit Sharing (ABS)に関する法令を遵守する必要がある³¹。具体的には、生物多様性条約およびサンプル提供国の法令に従って、遺伝資源を相手国及び地域住民の同意のもとで採集し、また当該資源をもとにした発明について、現地に利益を適切に配分することが義務付けられている。さらに近年では、生物サンプルからDNA解析した情報も資源国の財産とみなされる動きがあり、“デジタル化”した遺伝資源の取扱いについても今後議論を進める必要がある。

(2) 生物の“プログラミング”に対する規制

さらに、生物の“プログラミング”を可能にするゲノム編集技術を利用する際に発生するELSI課題がある。この技術では、微生物、植物、昆虫、動物など、すべての生物の遺伝子を自由自在に編集することができるため、その利用方法と範囲について、十分に議論する必要がある。

例えば、ヒト受精卵でのゲノム編集の基礎研究は、中国、英国、米国を中心に進められている。しかし、中国のデザイナーベビーが社会的に批判されたため、その臨床応用は世界的に禁止となっている。日本では、ヒト受精胚にゲノム編集技術等を用いる研究に関して、文部科学省が「ヒト受精胚に遺伝情報改変技術等を用いる研究に関する倫理指針」を制定している。そこでは、基礎研究目的については審査を経て研究することを認める方針が示されている。

このようにゲノム編集は慎重な取組みを必要とする一方で、人類が直面する様々な社会問題のソリューションとなりうる技術であるため、科学技術コミュニティを超えて、社会全体で議論し、その合意のもとで研究開発を進める枠組みを整備することが重要である。

第6期科学技術基本計画では、「研究開発の初期段階からの ELSI 対応における市民参画など、人文・社会科学と自然科学との融合による「総合知」を用いた対応が必須となる課題」を重視する方針を打ち出している。

本 MS 目標の達成に向けては、研究開発の推進とともに、社会とのコミュニケーションが必要不可欠である。そのために必要となるのは、市民への信頼と情報公開である。研究初期段階から情報を市民に向けて開示し、新たな技術の使い方を多様なステークホルダーとオープンに議論することで、社会の倫理観と新しい技術の共生成を図る。

IV. Conclusion (結論)



本調査研究は、半導体メモリのゲームチェンジを目指す西原禎文、ゲノム編集技術の社会実装を担うスタートアップ CEO の奥原啓輔、文化人類学を専門として ELSI への対応を検討する中空萌、グローバルビジネスに精通する日下部裕美子、米国シリコンバレーでスタートアップを支援する Devang Thakor、異分野融合をサポートする島原留美子からなるダイバーシティ豊かなチームで行った。

当初、MS 目標を人類が宇宙に進出するためのイノベーション実現に設定して、様々な分野の第一人者にヒアリングを行った。宇宙飛行士や JAXA 宇宙探査イノベーションハブの総括担当へのヒアリングから、デジタル生物圏が宇宙移住で必須技術となる手応えを掴んでいた。その後、VL からのアドバイスを受け、その実現可能性の検討を深めた結果、宇宙移住は 2050 年の MS 目標のその先へ置き、地球上で人類が直面する社会課題の解決へフォーカスすることとした。

そしてデジタル生物圏を、これまでの 30 年で劇的に社会を変革したインターネットのように、新たな科学技術・産業のイノベーションを生み出す“場”として再定義し、さらなる調査研究を行った。具体的には、4 つの MS 目標の達成シーン（パンデミック対策、カーボンゼロの実現、生物のデジタル進化、進化型ロボット）を想定して、3

つの分野（バイオテクノロジー、コンピューティング、ロボティクス）の 18 領域から、文献分析やヒアリング結果等のエビデンスをもとに調査研究を進めた。その結果、3 つの分野からそれぞれ挑戦的研究課題を設定するに至った。

なお、我々が提案するデジタル生物圏は、バイオデータの集積を核とするため、ミレニア・プログラム目標検討チームや、実施中のムーンショット型研究開発事業のうち、バイオデータが関与する研究課題とは、分野・セクターを越えた連携により、シナジー効果を発揮できると考えている。

我々「DIGITAL BIOSPHERE」未来共創チームが、本調査研究を通して得た結論は、「2050 年までに、すべての生物がデータ化された世界を構築し、あらゆる社会課題が解決されるものづくり革命を実現」を MS 目標として設定する、ということである。

以上

V. References(参考文献)

- [1] “Moderate mutation rate in the SARS coronavirus genome and its implications.” Zhao, Z., Li, H., Wu, X. et al., *BMC Evol. Biol.* 2004, **4**:21
- [2] DNA Data Bank of Japan (DDBJ) : <https://www.ddbj.nig.ac.jp/index.html>
- [3] National Center for Biotechnology Information (NCBI) :
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [4] European Bioinformatics Institute (EMBL-EBI) : <https://www.ebi.ac.uk/>
- [5] <http://www.biohackathon.org/>
- [6] OECD, “The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda”
- [7] “How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?” Camilo Mora, Derek P. Tittensor, Sina Adl, Alastair G. B. Simpson, Boris Worm, *Plos Biol.* 2011, 9(8): e1001127
- [8] “The biomass distribution on Earth” Yinon M. Bar-On, Rob Phillips, and Ron Milo, *PNAS*, **2018**, *115*, 6506-6511.
- [9] “Multi-omic meta-analysis of transcriptomes and the bibliome uncovers novel hypoxia-inducible genes” Yoko Ono, Hidemasa Bono*, *Biomedicines* **2021**, 9(5), 582.
- [10] “Giant Hysteretic Single-Molecule Electric Polarisation Switching Above Room Temperature”, C. Kato, R. Machida, R. Maruyama, R. Tsunashima, X. –M. Ren, M. Kurmoo, K. Inoue, S. Nishihara*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 13429-13432.
- [11] “Welcome to the single-molecule electret device”, S. Nishihara, *Nature Nanotechnology* **2020**, *15*, 966–967.
- [12] JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」ライフサイエンス・臨床医学分野（2021年）／CRDS-FY2020-FR-04
- [13] “Collaborative networks in gene editing” Ying Huang, Alan Porter, Yi Zhang and Rodolphe Barrangou, *Nature Biotechnology* **2019**, *37*, 1107–1109.
- [14] <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>
- [15] <https://nanoporetech.com/>
- [16] JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」ナノテクノロジー・材料分野（2021年）

／CRDS-FY2020-FR-03

[17] Applied Materials CEO Gary Dickerson, AI Design Forum 基調講演, 2019 年 7 月

<https://blog.appliedmaterials.com/ai-paradox>

[18] JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書」システム・情報科学技術分野（2021 年）／

CRDS-FY2020-FR-02

[19] ボストン・ダイナミクス社「Spot」：<https://www.bostondynamics.com/spot>

[20] 農林水産政策研究所「世界の飲食料市場規模の推計」

[21] 農林水産省「農林水産基本データ集」

[22] 矢野経済研究所「2021 年版 健康食品の市場実態と展望 ～市場分析編～」

[23] 第一三共株式会社「世界の医薬品市場」

[24] AMED 委託調査「2019 年度 再生医療・遺伝子治療の市場調査」

[25] MarketsandMarkets, “Mice Model Market, Forecast to 2025”

[26] 経済産業省資源エネルギー庁「2019 年度エネルギー需給実績(確報)」

[27] リサーチステーション「バイオエタノールの世界市場」

[28] 矢野経済研究所「2020 年版 バイオマスエネルギー市場の現状と将来展望」

[29] Non-Volatile Memory Market - Global Forecast to 2025, Markets and Markets
(2020)

[30] 富士経済研究所「2020 ワールドワイドロボット関連市場の現状と将来展望」

[31] http://nig-chizai.sakura.ne.jp/abs_tft/top/

(ウェブサイトのアクセス：2021 年 6 月 29 日時点)