

【ムーンショット目標 1】

「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」
研究開発構想（案）

令和 2 年 月
文 部 科 学 省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和 2 年 1 月 23 日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」

- 誰もが多様な社会活動に参画できるサイバネティック・アバター¹基盤
 - ・ 2050 年までに、複数の人が遠隔操作する多数のアバターとロボットを組み合わせることによって、大規模で複雑なタスクを実行するための技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築する。
 - ・ 2030 年までに、1 つのタスクに対して、1 人で 10 体以上のアバターを、アバター 1 体の場合と同等の速度、精度で操作できる技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築する。
- サイバネティック・アバター生活
 - ・ 2050 年までに、望む人は誰でも身体的能力、認知能力及び知覚能力をトップレベルまで拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を普及させる。
 - ・ 2030 年までに、望む人は誰でも特定のタスクに対して、身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を提案する。

¹サイバネティック・アバターは、身代わりとしてのロボットや 3D 映像等を示すアバターに加えて、人の身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張する ICT 技術やロボット技術を含む概念。Society 5.0 時代のサイバー・フィジカル空間で自由自在に活躍するものを目指している。

2. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）での議論を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

少子高齢化が進展し労働力不足が懸念される中で、介護や育児をする必要がある人や高齢者など、様々な背景や価値観を有する人々が、自らのライフスタイルに応じて多様な活動に参画できるようにすることが重要であり、そのためには、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現することが鍵となる。

人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現するため、図1に示すように、サイバネティック・アバター基盤とサイバネティック・アバター生活の実現を目指し、サイボーグやアバターとして知られる一連の技術を高度に活用した、人の身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張するための技術の研究開発を推進していく。これらを推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域とする。



図1. 人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会の実現に必要な研究開発の主な分野・領域

（２）目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発プログラムにおいては、図１に示す通り推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域を定め、ムーンショット目標である、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会の実現に貢献する挑戦的な研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発に活かす。

具体的には、以下のような研究開発を推進する。

＜誰もが多様な社会活動に参画できるサイバネティック・アバター基盤＞

社会の至る所に配備され、遠隔操作により様々な仕事を行うことが可能となるようなアバターやその運用等に必要な基盤を実現するための研究開発が想定される。

＜サイバネティック・アバター生活＞

身体的能力、認知能力及び知覚能力をトップレベルまで拡張できるような技術を実現するための研究開発が想定される。

サイバネティック・アバター基盤とサイバネティック・アバター生活の実現に必要な研究開発については共通するものが多いことから、十分に連携しながら進めることとする。

なお、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

（３）目標達成に向けた研究開発の方向性

○ 2030 年

＜誰もが多様な社会活動に参画できるサイバネティック・アバター基盤＞

1つのタスクに対して、1人で10体以上のアバターを、アバター1体の場合と同等の速度、精度で操作できる技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築する。

＜サイバネティック・アバター生活＞

望む人は誰でも特定のタスクに対して、身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を提案する。

○ 2050 年

＜誰もが多様な社会活動に参画できるサイバネティック・アバター基盤＞

複数の人が遠隔操作する多数のアバターとロボットを組み合わせることによって、大規模で複雑なタスクを実行するための技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築する。

＜サイバネティック・アバター生活＞

望む人は誰でも身体的能力、認知能力及び知覚能力をトップレベルまで拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を普及させる。

2050 年までに人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現するためには、サイバネティック・アバター基盤とサイバネティック・アバター生活の実現が必要である。

サイバネティック・アバター基盤については、例えば、まず 1 人で複数のアバターを操作して 1 つのタスクを処理する技術を確立した上で、複数人が同時に操作できるアバターの数を増やすとともに、同時に複数のタスクを処理できるようにすることで、最終的には複数の人が多数のアバターを同時に操作して複数のタスクを処理できるようにする必要がある。このため、2030 年時点における目標を、1 つのタスクに対して、1 人で 10 体以上のアバターを、アバター 1 体の場合と同等の速度、精度で操作できる技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築することとする。

サイバネティック・アバター生活については、例えば、まず特定のタスクに対して身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張できる技術を開発した上で、最終的には身体的能力、認知能力及び知覚能力を選んだ分野のトップレベルまで拡張できる技術を開発する必要がある。このため、2030 年時点における目標を、特定のタスクに対して、身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張できる技術を開発することとする。

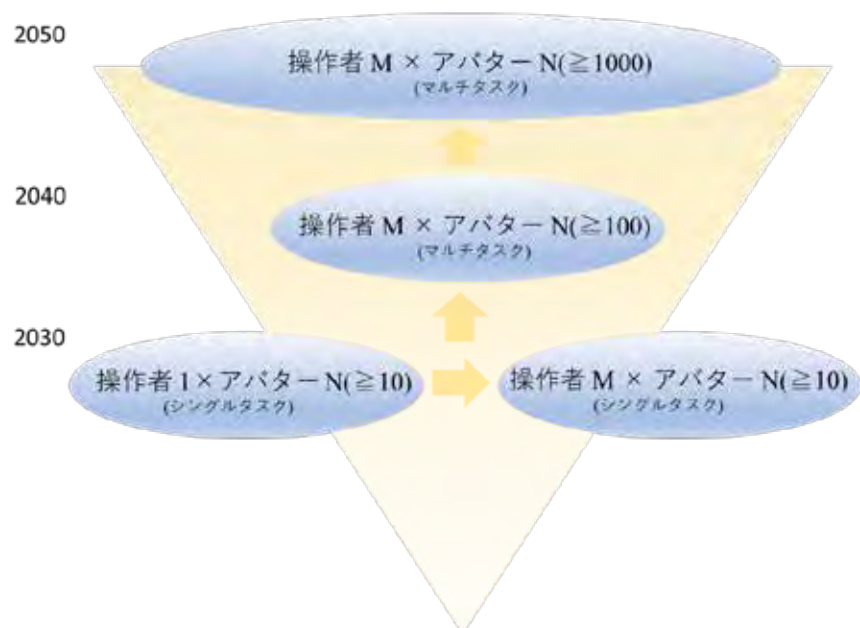


図2．サイバネティック・アバター基盤の実現に向けた研究開発の進め方の例

<参考：目標達成に向けた分析>

ムーンショット国際シンポジウムの Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

(1) 目標に関連する分野・技術群の構造

図3は、サイバネティック・アバター基盤及びサイバネティック・アバター生活を実現するために必要な要素技術を、「身体の制約からの解放」、「脳の制約からの解放」、「空間、時間の制約からの解放」に分類して示したものである。このように、材料、ロボティクス、人工知能、ライフサイエンス等の様々な研究分野において必要な技術要素の研究開発を行うとともに、それらを統合する必要があり、挑戦的な研究開発が求められる。

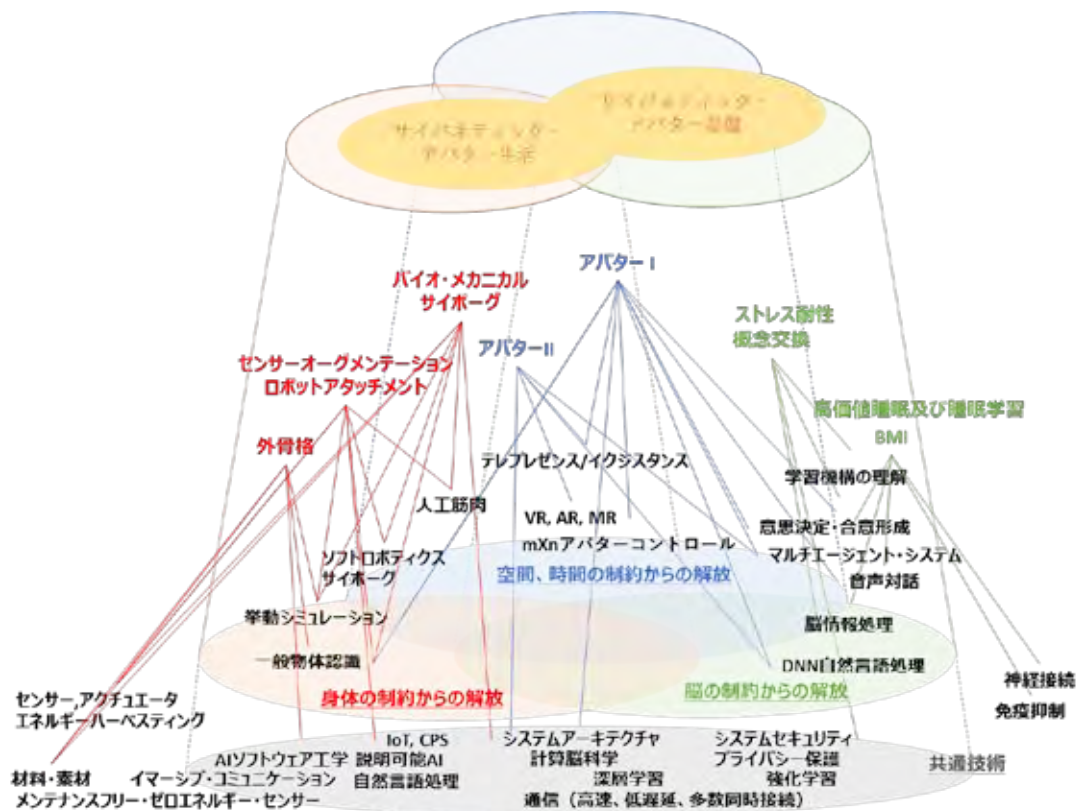


図3．サイバネティック・アバター基盤、サイバネティック・アバター生活に関連する主な分野・技術群の構造

（２）関連する研究開発の動向

関連する技術の動向を図４に示す。これらの技術は、人の計算能力や記憶力を補助し、空間や時間の壁を越え、人の身体を補うために発明され、開発されてきた。

こうした基本的かつ汎用的な共通技術をベースに、身体、脳、空間、時間の制約を軽減し、あるいはそれらの能力をさらに拡張・強化するための応用技術と、それらを利用したシステムやサービスが社会に提供されてきた。

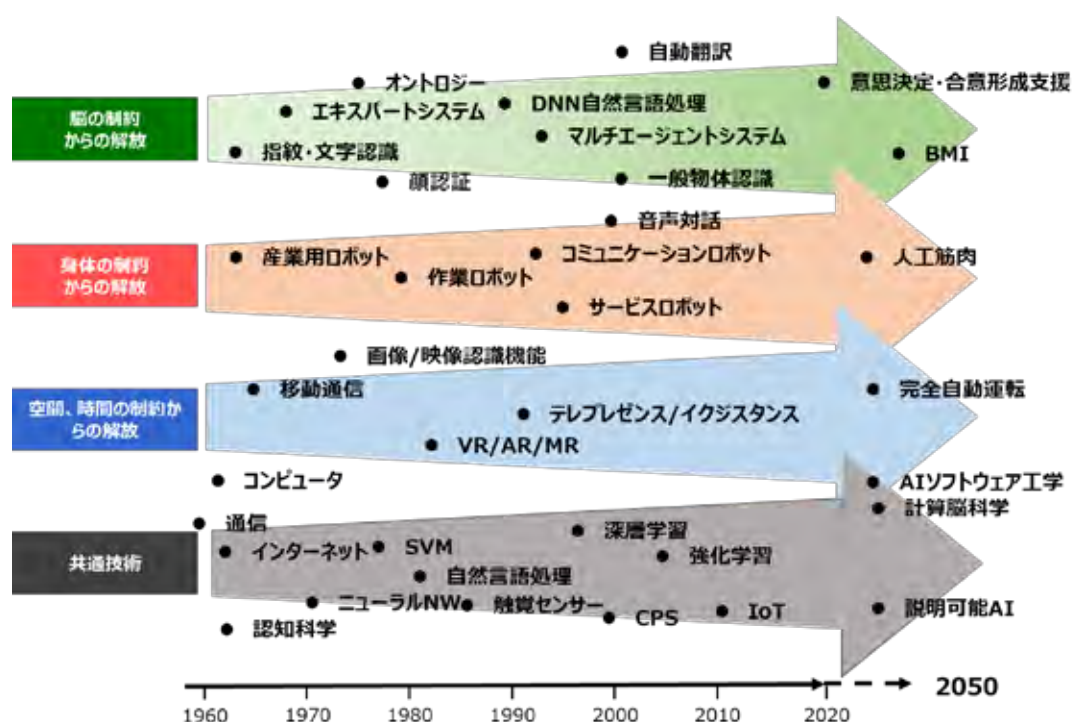


図４．これまでの関連する研究開発の動向

人の能力を拡張し、身体、脳、空間、時間の制約から人を解放するという観点からは、計算脳科学や機械学習の新理論が特に重要であり、それらの理論に裏付けされた新しい応用の開発が必須である。また、人との関わりが非常に強いいため、社会との関係、意思決定・合意形成、人工知能の安全性などにも注意を払う必要がある。

さらには、同様の観点からは、生活支援・福祉・医療ロボットも重要である。これまで我が国が最先端を走ってきた工業用ロボットとは異なり、これら人を相手にするサービスロボットには、優しさや柔らかさ、臨機応変さなど新たな特性を持たせなければならない。そのためにも、ソフトロボティクスや、生物規範型ロボティクスなどの基礎的な研究領域が重要である。

(3) 日本の強み、海外の動向

図5に、人の能力拡張に関する国際会議である Augmented Human International Conference における国別発表数の年次推移を示す。

我が国は高い存在感を示しており、我が国において研究コミュニティが形成、充実されつつあることが見て取れる。

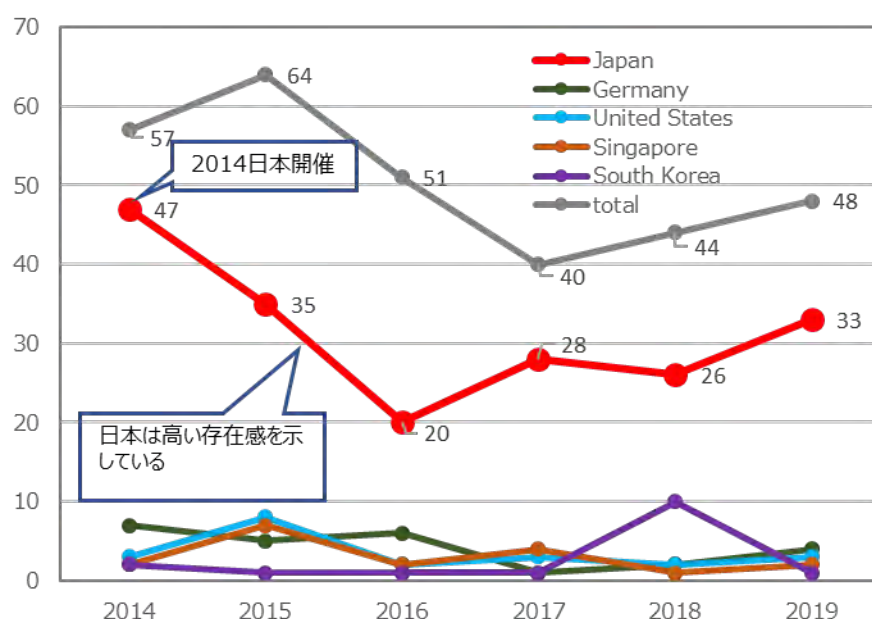


図5. Augmented Human International Conference における国別発表数

(出典) エルゼビア Scopus カスタムデータを元に JST 作成

※国際共同発表については重複カウントしている。

図6に、人の能力拡張技術に関連する個別の要素技術をキーワードとして、世界全体の文献数(国際会議 Proceedings の発表数)を横軸に、そのうちの日本のシェアを縦軸にプロットし、日本の強み弱みを抽出した。特に、点線で囲んだ分野は、日本の強みが見られる5つの分野を示している。我が国は、国際的な科学賞を受賞するなど研究の質においても世界をリードしている。これらの要素技術はムーンショット目標達成の重要な基盤であると考えられる。

図7は、人の能力拡張において重要な要素技術になると考えられる BMI を加えた合計6分野について、各国(各要素技術における発表数上位4カ国)発表件数の年次推移をグラフにまとめたものである。

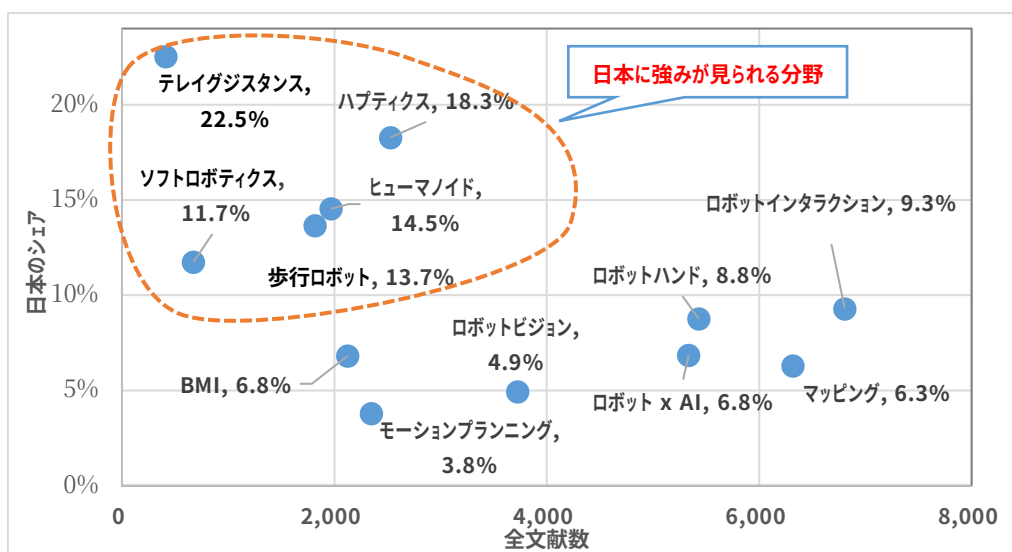


図6．人の能力拡張関係キーワード毎の全文献数と日本のシェア(2016-2018)
(出典) エルゼビア Scopus カスタムデータを元に JST 作成

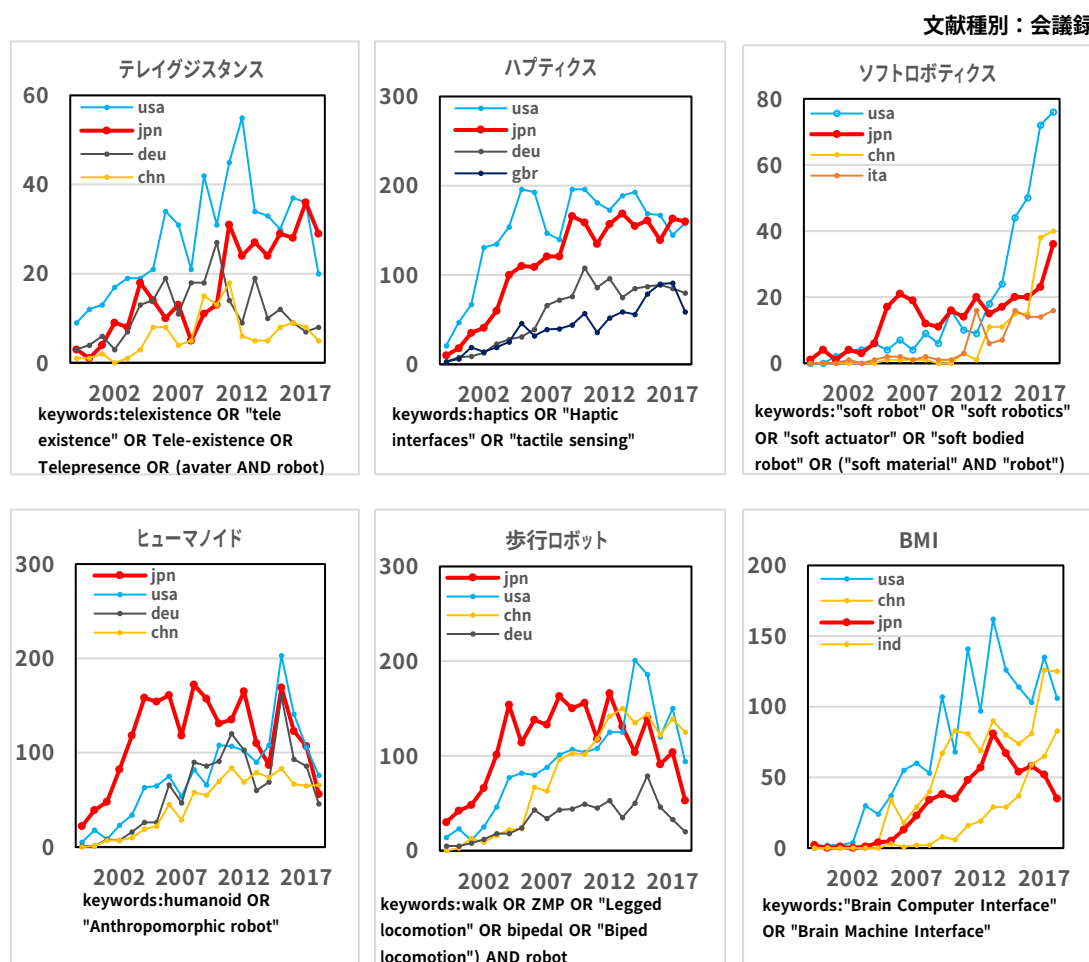


図7．人の能力拡張関係キーワード毎の文献動向
(出典) エルゼビア Scopus カスタムデータを元に JST 作成

表1は、CRDS 研究開発の俯瞰報告書より、関連する技術分野の国際比較をまとめたものである。BMI の基盤となる「計算脳科学」について、我が国は基礎研究において強みを発揮している。DecNef 法、京による全脳シミュレーション等、脳情報処理を計測・理解するための基本的手法の創出を主導してきた。国として脳科学の基礎研究プロジェクトを多階層で推進し、Brain/MINDS 等、国際的にも認知されている。

「生活支援ロボット」は、従来から我が国の強みであったロボット技術に、人との共生に向けた人間行動の適切な理解や適切な介入といったインタラクション技術が有機的に連携する必要がある分野である。

対人親和性の向上、新材料を用いたロボット要素技術の開発などの基礎研究において、我が国は強みを発揮している。

「ソフトロボティクス」は、将来のレイグジスタンスロボットが、人と同等以上の多自由度、柔軟性を有し、人と生活空間を共有するための基盤技術として重要である。2014 年創刊の Softrobotics 誌がロボット関連誌でトップのインパクトファクターを示すとともに、国際会議 IEEE RoboSoft が 2018 年に発足し、世界的に当該分野は急速に発展しつつある。

我が国は、2000 年代には先駆的な研究例があるにも関わらず、現状では米国や欧州の急速な研究の拡大に十分追従できていない状態にあるが、2017 年に日本ロボット学会 ソフトロボティクス研究専門委員会が設立され、科研費新学術領域「ソフトロボット学」(2018～2022)が発足するなど、今後研究が加速するものと期待される。

表1．関連する技術分野の国際比較

	国・地域	日本		米国		欧州		中国	
	フェーズ	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発	基礎研究	応用研究・開発
計算脳科学	現状	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	○
	トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	↗
生活支援ロボット	現状	◎	○	○	◎	◎	◎	△	○
	トレンド	↗	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗
ソフトロボティクス	現状	○	○	◎	◎	○	○	△	×
	トレンド	→	→	↗	→	→	→	→	→

(出典) JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2019 年)

(註 1) フェーズ 基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註 2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：特に顕著な活動・成果が見えている、○：顕著な活動・成果が見えている、

△：顕著な活動・成果が見えていない、×：活動・成果が見えていない

(註 3) テレンド ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

【ムーンショット目標2】

「2050 年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」
研究開発構想（案）

令和 2 年 月
文 部 科 学 省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和 2 年 1 月 23 日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050 年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」

- ・ 2050 年までに、臓器間の包括的ネットワークの統合的解析を通じて疾患予測・未病評価システムを確立し、疾患の発症自体の抑制・予防を目指す。
- ・ 2050 年までに、人の生涯にわたる個体機能の変化を臓器間の包括的ネットワークという観点で捉え、疾患として発症する前の「まだ後戻りできる状態」、すなわち「未病の状態」から、健康な状態に引き戻すための方法を確立する。
- ・ 2050 年までに、疾患を引き起こすネットワーク構造を同定し、新たな予測・予防等の方法を確立する。
- ・ 2030 年までに、人の臓器間ネットワークを包括的に解明する。

2. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年 12 月 17、18 日開催）を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

少子高齢化が進展する中で、健康寿命を延伸することが重要であり、そのためには、疾患が発症した後で治療するという従来の考えから脱却し、疾患の超早期状態、さらには前駆状態を捉えて、疾患への移行を未然に防ぐという、超早期疾患予測・予防ができる社会を実現することが鍵となる。

超早期疾患予測・予防を実現するためには、図 1 に示すような技術（観察技

術、操作技術、計測技術、解析技術、データベース化技術)の研究開発を推進するとともに、これらを統合して臓器間ネットワークの包括的な解明を進める必要がある。これらを推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域とする。

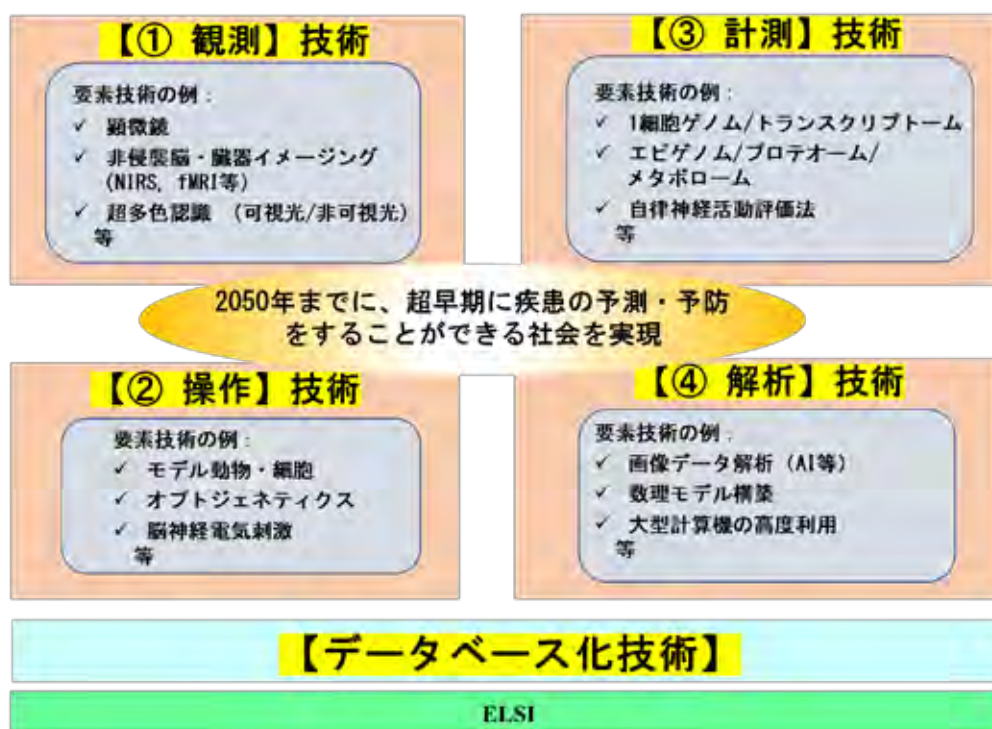


図1. 超早期疾患予測・予防の実現に必要な研究開発の主な分野・領域

(2) 目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発プログラムにおいては、図1に示す通り推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域を定め、ムーンショット目標である、超早期疾患予測・予防の実現に貢献する挑戦的な研究開発を進める。なお、最も効果的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発の推進に活かす。

具体的には、臓器間のネットワークの関係性を統合的に解析し、その情報に基づき臓器間のネットワークをシミュレーションするシステムを開発することが想定される。さらに、このシステム開発に基づき超早期疾患予測・予防を目指す課題も想定される。

なお、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

○ 2030 年

人の臓器間ネットワークを包括的に解明する。

○ 2050 年

臓器間の包括的ネットワークの統合的解析を通じて疾患予測・未病評価システムを確立し、疾患の発症自体の抑制・予防を目指す。

人の生涯にわたる個体機能の変化を臓器間の包括的ネットワークの変化という観点で捉え、疾患として発症する前の「まだ後戻りできる状態」、すなわち「未病の状態」から、健康な状態に引き戻すための方法を確立する。

疾患を引き起こすネットワーク構造を同定し、新たな予測・予防等の方法を確立する。

2050 年までに超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現するためには、まずは臓器間ネットワークを包括的に解明し、さらに、それら全臓器間の一細胞レベルでのネットワークを記述したデータベースの構築を経て、それらをシミュレーションするシステム開発（シミュレーター）に基づき超早期疾患予測・予防技術を開発・実用化する必要がある。したがって、2030 年時点における目標を人の臓器間ネットワークの包括的解明とする。図2に、本研究開発構想の実現によりムーンショット目標の達成を目指すための研究開発の進め方を示す。

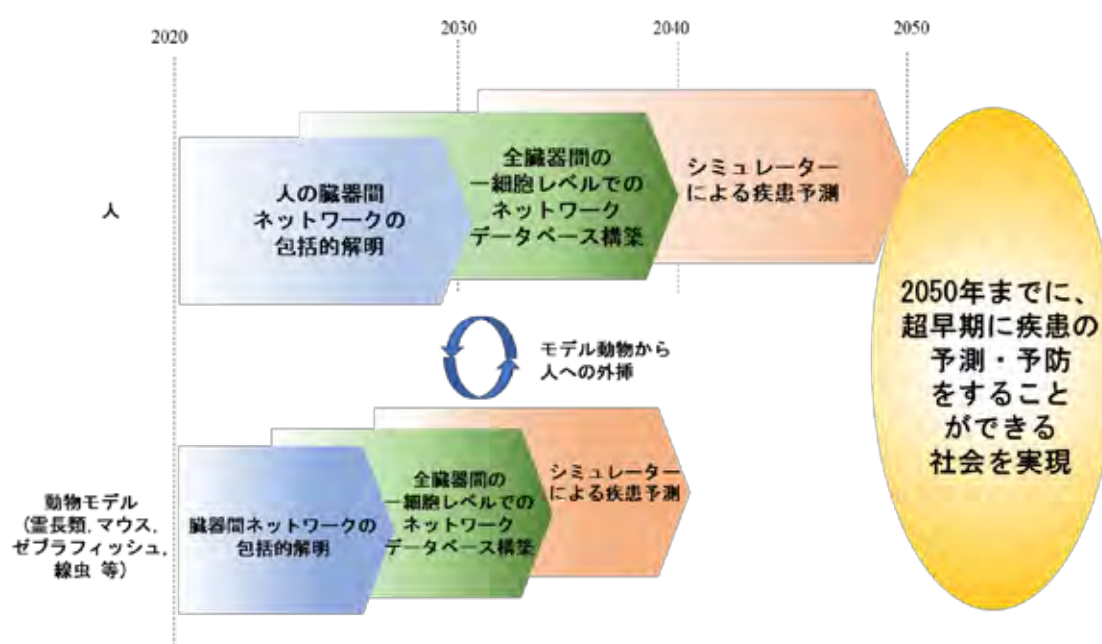


図2．超早期疾患予測・予防の実現に向けた研究開発の進め方

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウムの Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

(1) 目標に関連する分野・技術群の構造

本目標は、近年急速に存在感を増しているデータ研究を駆動力とし、革新的基盤技術（観察、操作、計測、解析）群を開発・活用し、健康・疾患の理解の本質的位置づけとして近年注目を集めている臓器間の包括的ネットワークを解き明かし、病気の発症を非常に早期に検出し、発症を予防することを目指すものであり、挑戦的な研究開発が求められる。

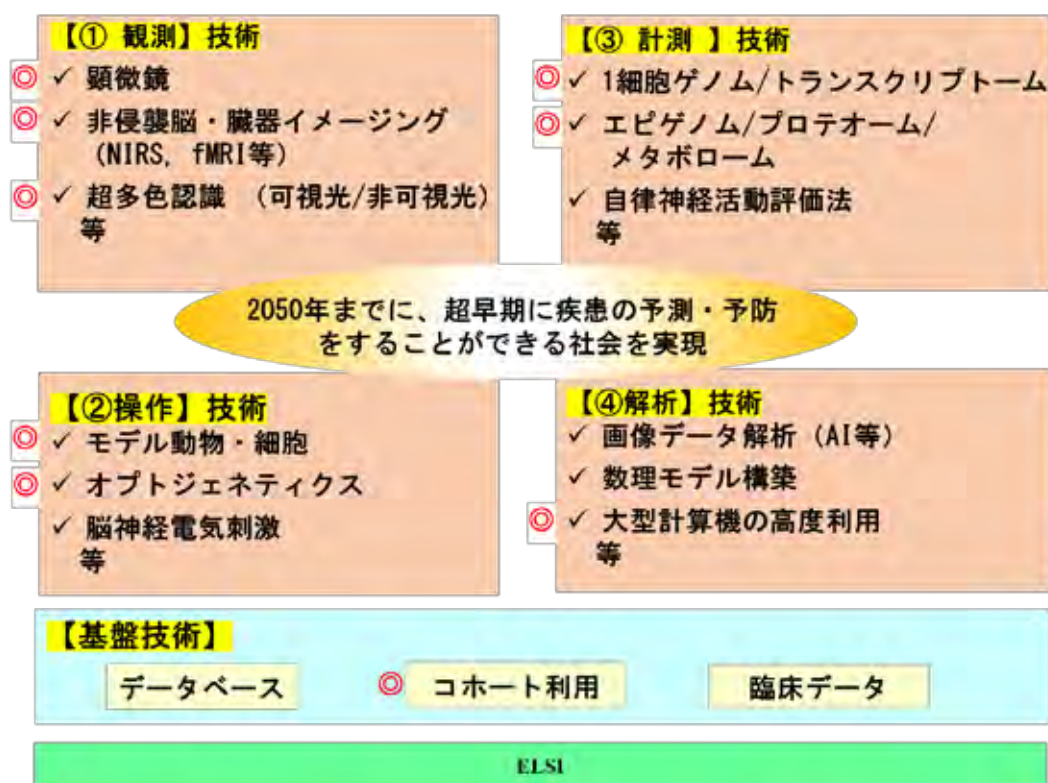


図3．超早期疾患予測・予防に関連する主な分野・技術群の構造

図3に超早期疾患予測・予防に関連する主な分野・技術群の構造を示し、日本の強みとなる領域に二重丸を付した。総じて、我が国は各技術要素において世界を先導している。またそれらを活用した健康・医療技術につながりうる様々な生命現象の発見においても同様である。図3に示す基盤技術のうちデータベースや臨床データに関しては、世界的にも不足している分野であり、我が国は特にその傾向が強い。しかし、コホート利用に関しては、例えば超高齢者で構成される

比較的大規模なコホートは我が国にしか存在しないものであり、またゲノムコホートについても、世界有数の規模・品質を有しているなど、我が国に優位性がある。

以上の研究・技術面及び基盤技術における我が国の優位性は、本目標を実現させる強力な駆動力となるものである。そして、それらの優位性を更に伸ばしつつ、戦略的統合を計ることで、インパクトの大きな成果創出が期待される。

（２）関連する研究開発の動向

世界の大型プロジェクトとして、脳機能研究に関しては、米国の Brain Initiative、欧州の Human Brain Project、日本の Brain/MINDS があり、また、人間の体の全細胞に関しては、Human Cell Atlas がある。

① 米国の大型プロジェクト『Brain Initiative』

- ・2013 年 4 月、オバマ大統領（当時）が“Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative” を発表し、2014 年からプロジェクトが開始された。
- ・ミッションは、「人間の脳機能の理解のための技術開発と応用」である。個々の脳細胞と神経回路の相互作用を通じて脳が機能する様子を解明するための新技術の開発・応用、さらに大量の情報の記録・処理・利用・貯蔵・引出を可能にする脳と行動の複雑な関係の解明を目指すものである。

表 1. 米国『Brain Initiative』概観

研究分野	参画研究機関等体制	実施期間及び予算等
1. 神経、脳研究の成果を活用した技術開発	・連邦政府機関 NIH、NSF、DARPA、IARPA、FDA、DOE	・2014 年～2025 年 ・FY2019 は約 4.3 億 \$
2. ダイナミックイメージングの促進による脳機能の視覚化	・私設財団、研究所、民間企業 National Photonics Initiative、Brain&Behavior Foundation、シモンズ・財団、カブリ財団、アレン脳科学研究所、ジャネリア研究所、ソーク研究所、Google、GlaxoSmithKline、GE 等	・21st Century Cures Act により FY2017-FY2026 の 10 年間で合計約 15 億 \$ 拠出予定、FY2019 予算は本法案による 1.2 億 \$ を含む
3. 脳機能の調査解明研究		
4. 脳機能と行動の統合的理解		
5. 患者への利用促進		

② 欧州の大型プロジェクト『Human Brain Project』

- ・2013 年 EU-FET にて Human Brain Project が開始された。目的は脳科学、情報通信技術、医療の統合と、ICT 統合基盤研究プラットフォームの構築及びデータ統合である。実験的基礎研究はそのためのデータ提供という位置付けにある。

表 2. 欧州『Human Brain Project』概観

研究分野	参画研究機関等体制	実施期間及び予算等
1.Mouse Brain Organization 2.Human Brain Organization 3.Systems and Cognitive Neuroscience 4.Theoretical Neuroscience 5.Neuroinformatics Platform 6.Brain Simulation Platform 7.High Performance Analytics and Computing Platform 8.Medical Informatics Platform 9.Neuromorphic Computing Platform 10.Neurorobotics Platform 11.Central Services 12. Ethics and Society	・ EU-FET (Future and Emerging Technologies) フラグシップ・プログラム、 24 カ国 112 機関 ・ 日本からは沖縄科学技術大学院大学と理化学研究所が参加	・ 2013～2023 年 ・ 110 億€／10 年間

③ 日本のプロジェクト『Brain/MINDS』

(Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies)

- ・目的は、脳の構造と機能を様々な階層でマッピングすること、及び霊長類（マーマセツ）の遺伝子操作技術、光学系技術等のさらなる効率化・高度化を行うこと。それらを通じ、霊長類の高次脳機能を担う神経回路の全容をニューロンレベルで解明し、精神・神経疾患の克服や情報処理技術の高度化等に貢献すること。

表 3. 日本『Brain/MINDS』概観

研究分野	参画研究機関等体制	実施期間及び予算等
・統合失調症／うつ病／認知症／パーキンソン病／自閉症などの画像データの取得と集約 ・人間の疾患画像データとの比較／人間とサルの相違点／類似点の対応づけ ・人間の精神活動にとって重要な神経回路の同定 ・人間につながるトランスレータブルな脳行動指標の開発 ・マーマセットを活用した脳や神経回路の解明	【代表機関】 ・理化学研究所 ・京都大学 ・慶應義塾大学 【臨床研究グループ】 ・東京大学 ・京都大学 ・東京医科歯科大学 他	・2014 年度から 10 年間 ・政府予算 3,225 百万円（FY2019）

④ 国際プロジェクト『Human Cell Atlas』

- ・目的は、人間の全細胞について、種類・状態・系統などを分類し、カタログ化すること。
- ・人間の体を構成する全主要組織での一細胞トランスクリプトームによる、細胞種、細胞 3 次元位置、地理的・人種的な違いを考慮した人間の細胞の細胞地図を構築することを目指す。
- ・本プロジェクト開始の背景の 1 つに、計測技術の進歩がある（個別の細胞ひとつひとつの詳細なプロファイルを解析するシングルセル解析が高いレベルで実施可能になったこと）。

表 4. 国際プロジェクト『Human Cell Atlas』概観

研究分野	参画研究機関等体制	実施期間及び予算等
・脳/免疫/消化管（胃腸） / 皮膚/組織サンプル調整技術/ 解析技術 ・ソフトウェアツール等	・米国主導で全世界的に進行 ・英国 EMBL-EBI、米国 Broad Institute、米国 UCSC、Genomics Institute ほか ・日本からは理化学研究所	・2017 年～ ・Zuckerberg 財団を筆頭に、官民の様々なプロジェクトで支援

（３）日本の強み、海外の動向

表 5 に、本目標に関連する研究・技術分野における、日本と他の主要国の現状と動向の比較を示す。

脳神経科学の分野は日本が世界をリードする状況にある。その歴史的背景と

しては、「大学と研究機関に人材と研究リソースがバランスよく配置され、他国では維持しにくい脳科学研究に必須の生理学的解析技術などが高い水準にあること」や、「融合的研究の展開に必要な研究グループの形成が日本独自の班研究制度（特定領域研究、新学術領域研究）によって培われてきたこと」などがある。近年では「マーマセット（霊長類）の脳全容解明プロジェクト」が大きく進められ国際的にも広く認知されている。そして、特に脳の重要な機能分子のノックアウト動物解析を通じて顕著な業績を多く創出している。

また、イメージング（生体／光学）の分野についても、イメージングに用いる有機小分子型プローブ開発などにおいて、有機合成化学の伝統的な強みもあり、日本が長らく世界を先導し続けている。また、PET、MRI、NMR等のイメージング技術においても活発な研究開発が我が国でなされており、例えば脳機能解明等の強力な観察ツールであるfMRIは我が国で原理が発明されるなど、大きな強みとなっている。

計測データ解析の分野について、日本では医用画像処理等の基礎研究は活発であるが、扱うデータの制約や参加研究者の絶対数などが不足している。我が国でも様々な施策で強化・加速がなされてきたが、世界各国は更に巨額の資金を投下し、強力に推し進めており、我が国が強みを有するとは言い難い。しかし、あらゆるサイエンスの推進における必須領域となっており、戦略的に取り組んでいく必要がある。

表5．関連する研究・技術領域の国際比較

国、地域	フェーズ	脳神経科学		イメージング 光学		イメージング 生体		計測データ解析（AI）	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎研究	◎	→	◎	→	◎	↘	○	↗
	応用研究	○	→	○	→	○	→	△	→
米国	基礎研究	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗
	応用研究	◎	→	○	↗	◎	→	◎	↗
欧州	基礎研究	○	→	◎	→	◎	→	○	↗
	応用研究	○	→	◎	→	◎	→	○	↗
中国	基礎研究	△	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
	応用研究	△	↗	△	↗	○	↗	◎	↗

（出典）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（2019年）

（註1）フェーズ 基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：特に顕著な活動・成果が見えている、○：顕著な活動・成果が見えている、

△：顕著な活動・成果が見えていない、×：活動・成果が見えていない

（註3）トレンド ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

【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」

研究開発構想（案）

令和2年 月
文部科学省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「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」

- ・ 2050年までに、人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボットを開発する。
- ・ 2030年までに、一定のルールの下で一緒に行動して90%以上の人が違和感を持たないAIロボットを開発する。
- ・ 2050年までに、自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットシステムを開発する。
- ・ 2030年までに、特定の問題に対して自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットを開発する。
- ・ 2050年までに、人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長するAIロボットを開発する。
- ・ 2030年までに、特定の状況において人の監督の下で自律的に動作するAIロボットを開発する。

2. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）での議論を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

(1) 挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

少子高齢化が進展する中で、危険な現場や人手不足の現場における労働、人類のフロンティア開発、生活のサポートなど、社会のあらゆる場面においてロボットを活用できるようにすることが重要であり、そのためには、AI とロボットの共進化によって、自ら学習・行動するロボットを実現することが鍵となる。

自ら学習・行動する AI ロボットを実現するためには、ロボットがセンシングにより入力した感覚情報を、AI が情動・注意・共感の情報として受け取り、知識・意図・学習として記憶し、それに従って認識・判断・制御を行い、運動情報を出力することにより、ロボットがアクチュエーションを実行するという、AI とロボットが協調した一連の動作を実現することが必要である。

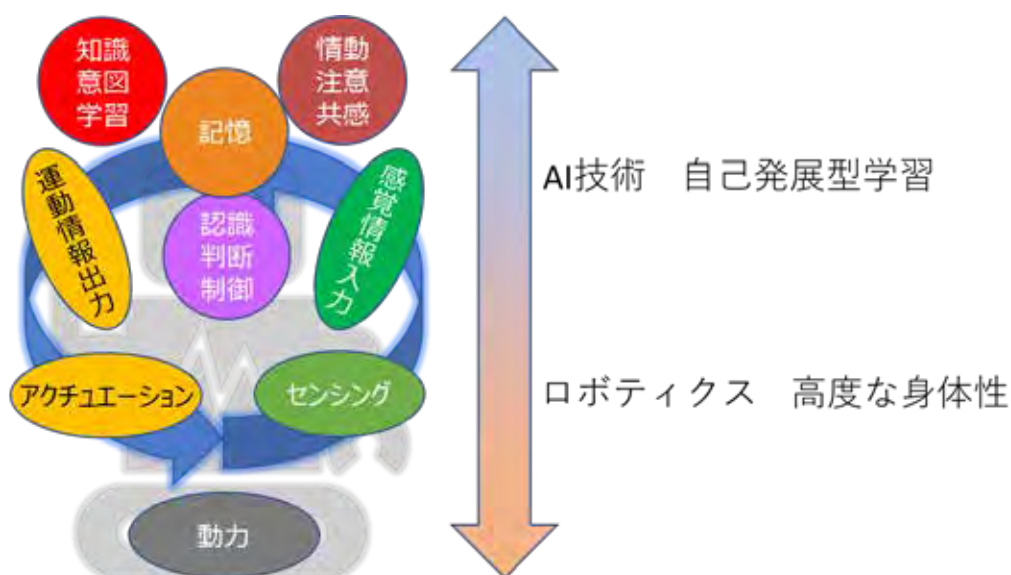


図1．自ら学習・行動する AI ロボット

これを実現するためには、図2に示すような技術要素を研究開発しつつ融合し、共進化させていく必要がある。これらが推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域である。

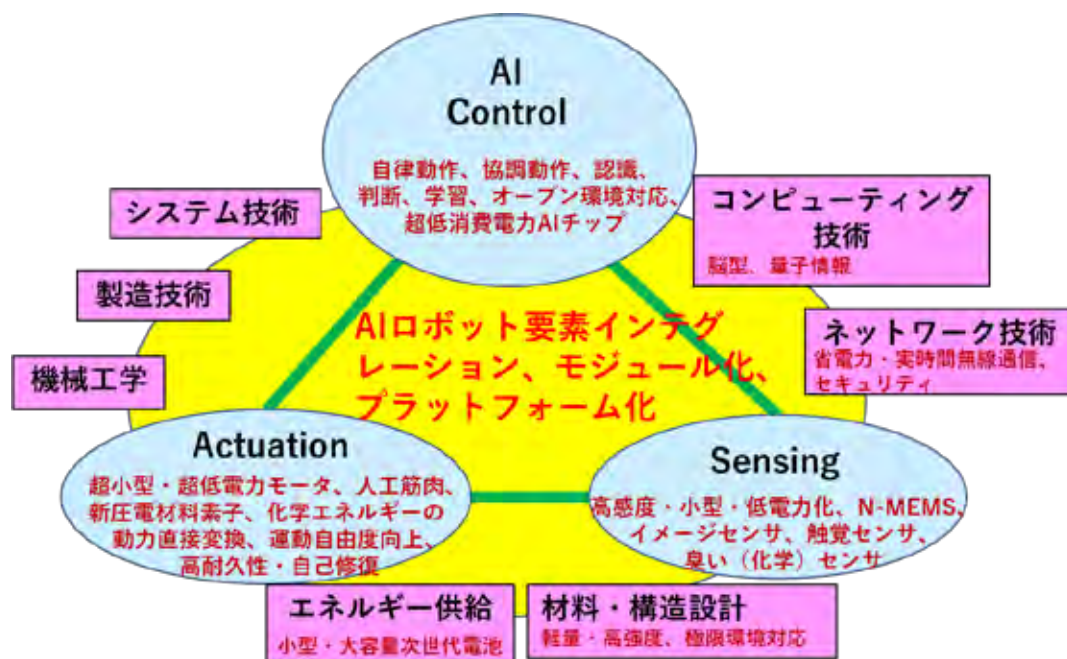


図2．自ら学習・行動するAI ロボットの実現に必要な研究開発の主な分野・領域

（2）目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発プログラムにおいては、図2に示す通り推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域を定め、ムーンショット目標である、自ら学習・行動するAI ロボットの実現に貢献する挑戦的な研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発の推進に活かす。

具体的には、以下のような研究開発を推進する。

＜①人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長するAI ロボット＞

人が生活の中で違和感なく接することができ、自ら学習・行動し成長することにより、個々に最適なサポートを提供し、人のQOLの向上を行うことが可能となるAI ロボットの開発が想定される。

＜②自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAI ロボットシステム＞

今まで人が行っていた実験や作業を代替し、膨大な可能性を非常に速く探索・選択することで、自律的に科学的原理・解法を発見するAI ロボットシステムの開発が想定される。なお、ここで開発されるAI 技術については、①や③のAI ロボットの実現にも活用できるものとする。

＜③人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長する AI ロボット＞

人が活動するには危険な場所（宇宙、災害現場、高所、深海等）や今後人手が足りなくなる場所（建設業や農林水産業の現場等）等で、人の代わりに仕事を行う AI ロボットの開発が想定される。

①～③のいずれも AI とロボットの融合・共進化を志向した研究開発であり、基盤的な AI 技術、ロボット技術等の研究開発については十分に連携しながら進めることとする。

なお、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

（3）目標達成に向けた研究開発の方向性

○ 2030 年

＜人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長する AI ロボット＞

一定のルールの下で一緒に行動して 90%以上の人が違和感を持たない AI ロボットを開発する。

＜自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットシステム＞

特定の問題に対して自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットを開発する。

＜人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長する AI ロボット＞

特定の状況において人の監督の下で自律的に動作する AI ロボットを開発する。

○ 2050 年

＜人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長する AI ロボット＞

人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長する AI ロボットを開発する。

＜自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットシステム＞

自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットシステムを開発する。

＜人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長する AI ロボット＞

人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長する AI ロボットを開発する。

2050 年までに自ら学習・行動し成長するロボットを実現するためには、技術要素を開発しつつ、それらの融合・共進化を経て、モジュール化・システム化を達成することが必要となる。これらを迅速に達成するためには、サービスの現場や産業界が必要とするロボット技術やロボット機能の要求に対し、それらを実現するために有望と考えられる技術要素を集め、それらを融合・共進化するための研究開発を推進し、その機能性を確認するプラットフォームを構築することが有効と考えられる。図 3 に、本研究開発構想の実現によりムーンショット目標の達成を目指すための研究開発の進め方を示す。

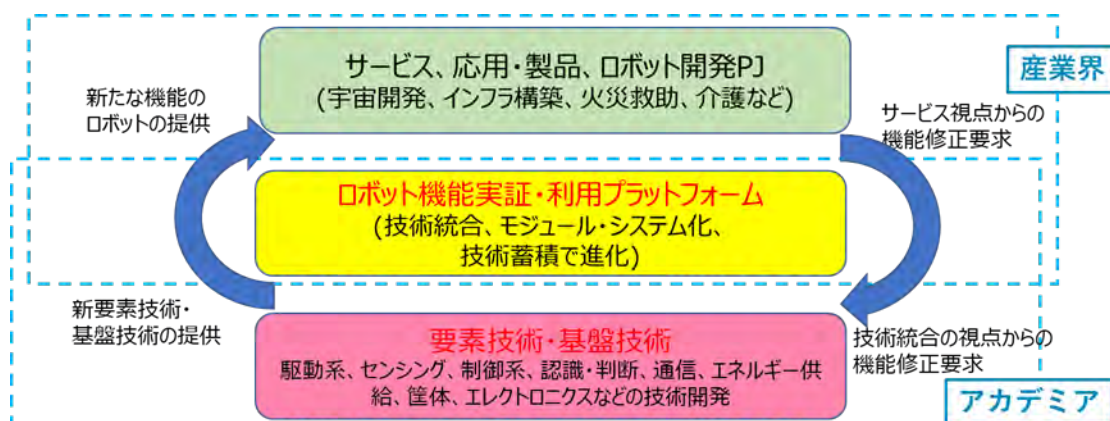


図 3．自ら学習・行動する AI ロボットの実現に向けた研究開発の進め方

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウムの Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

（１）目標に関連する分野・技術群の構造

図４において、自ら学習・行動する AI ロボットの実現に関連する技術群を示した。本目標においては、必要な技術要素の研究開発を行うとともに、それらを統合して利活用する必要がある、挑戦的な研究開発が求められる。

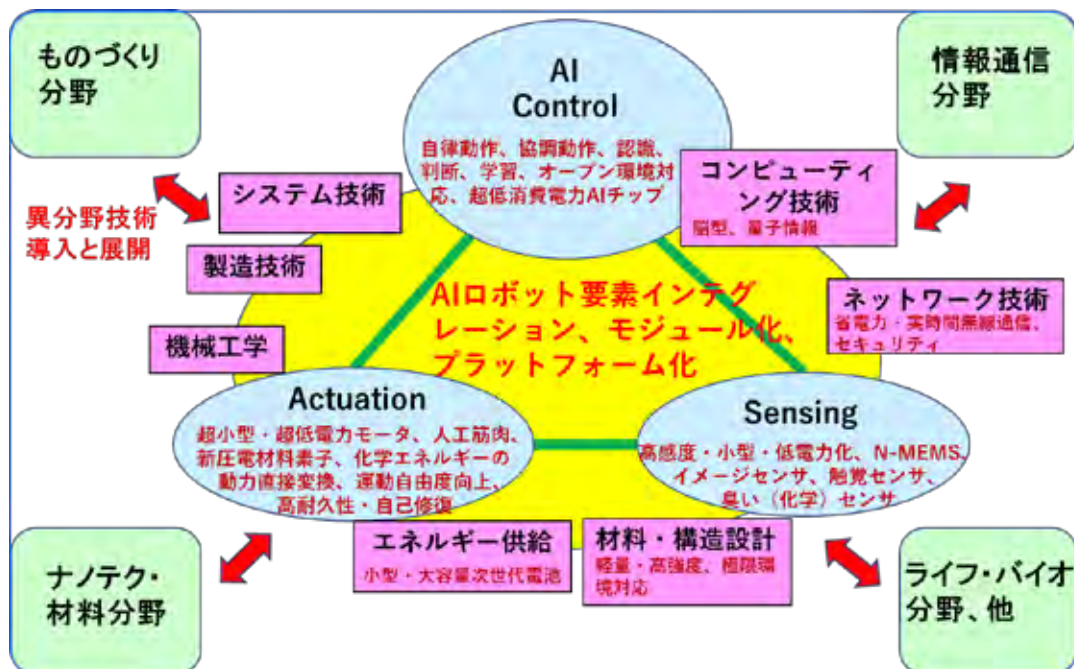


図４．自ら学習・行動する AI ロボットに関連する主な分野・技術群の構造

（２）関連する研究開発の動向

図５に、AI 技術とロボット技術の進展を示す。

第１次 AI ブーム（1950 年代後半から 1960 年代）に AI に関わる基礎的概念が提案され、AI が新しい学問分野として立ち上がった。第２次 AI ブーム（1980 年代）では、人手で辞書・ルールを構築・活用するアプローチが主流となり、エキスパートシステム、指紋・文字認識、辞書・ルールベース自然言語処理等（カナ漢字変換等）が実用化された。現在は第３次の AI ブームを迎え、インターネットやコンピューティングパワーの拡大を背景として、一部のタスクでは人間に追いつき／上回る性能を示し、さまざまな AI 応用システムとして社会に普及し始めている。また、センサー、IoT（Internet of Things）デバイスの高度化と普及によって、さまざまな場面で実世界ビッグデータが得られるようになった。このような実世界ビッグデータの収集・解析技術は、実世界で起きる現象・活動

の状況を精緻かつリアルタイムに把握・予測するための技術としても期待される。

ロボット技術は、1962 年の産業用ロボットに始まり工場内の工程の自動化の実現を目指し、画像認識や学習機能を実装することで定型的な作業を正確に休まず実施できるレベルになってきた。また人間や動物の運動能力を模倣するロボットも登場し、1990 年代になると産業ロボットだけでなく、一般社会や家庭で働く知能ロボットの研究開発が盛んになった。

2000 年代に入ってロボットの適用はさらに広がり、手術支援ロボットやロボット掃除機も開発された。また、2010 年代には一段と進歩した AI を搭載し自らの行動を判断、決定し動作する家庭用ロボットや人型ロボットなどの知能ロボットが、人間と知的なインタラクションが可能なパートナーとなる存在として期待が高まっている。

ムーンショット型研究開発プログラムでは、2050 年に向けて、AI 技術とロボット技術との融合・共進化のための研究開発を推進し、ムーンショット目標の達成を目指す。

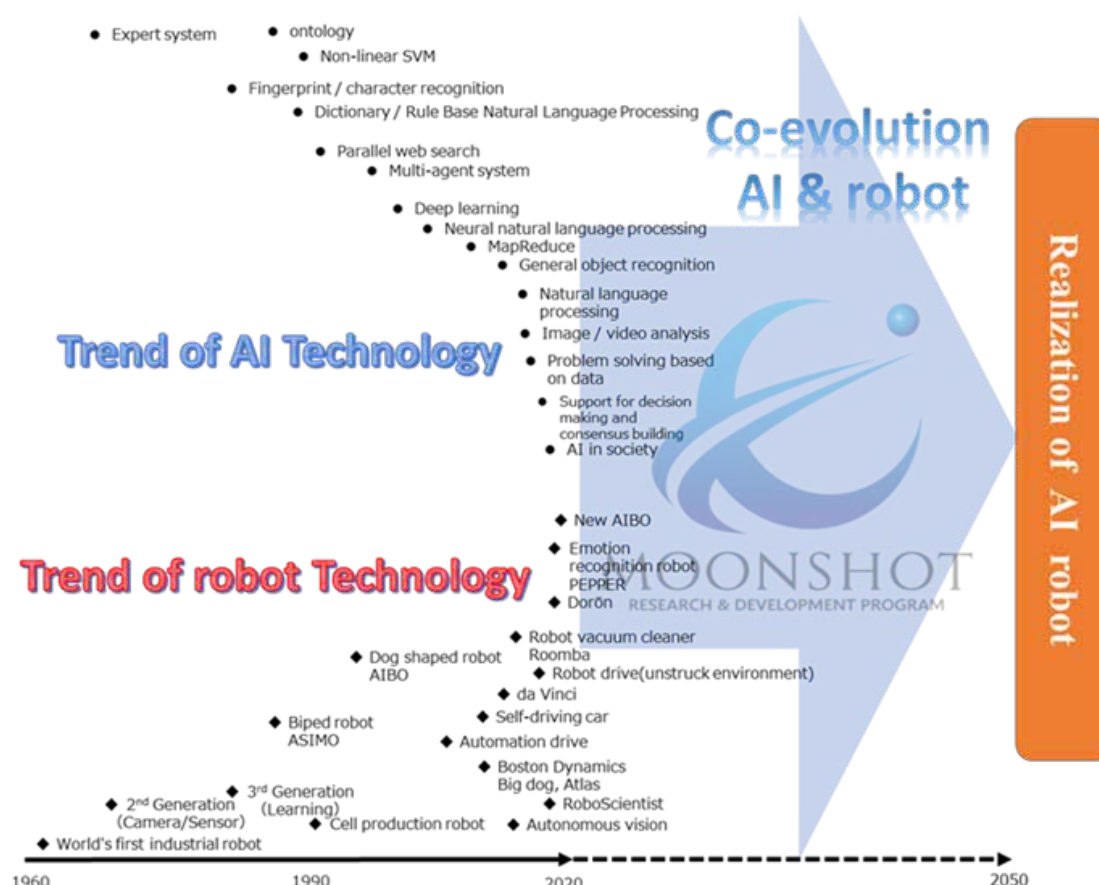


図5．AI 及びロボットに関する技術動向

(出典) JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2019 年) を元に作成

(3) 日本の強み、海外の動向

① 特許出願、論文発表の動向

図6に、AI技術とロボット技術の両技術が含まれる国別特許出願数を示す。

出願数は世界的に2000年以降増え続けているが、2015年と2016年の出願数を見ると、2014年までに比べて増加率が上がっている。

このことから、産業界では、この分野が注目されていることがうかがえる。

近年日本の出願数は減少しているが、特許出願の総数は、中国、米国に次いで日本は第3位となっており、依然日本のこの分野での産業競争力は高いと考えられる。

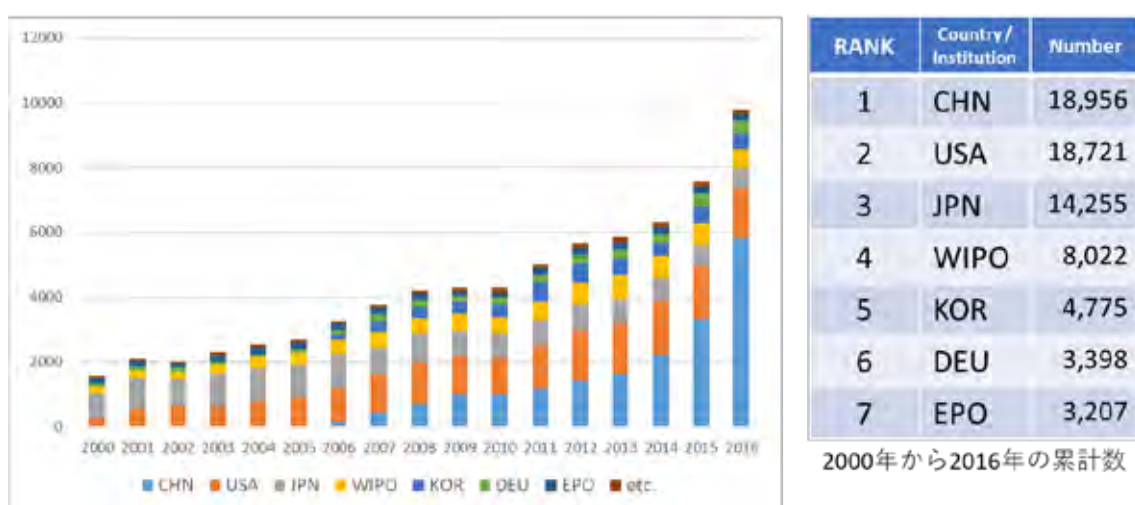


図6．国別特許出願数

(出典) Derwent Innovation™ での検索結果を元に NEDO TSC 作成 (2018 年)

図7にAI技術とロボット技術との両技術が含まれる論文発表動向を示す。論文数は2007年以降で、一旦論文数は減少したものの、2010年以降は増加している。

知的財産権と同様に、この分野が科学コミュニティにおいても注目されている分野であることがうかがえる。

国別に見ると、特許出願数と同様に日本の累積数は第3位となっている。

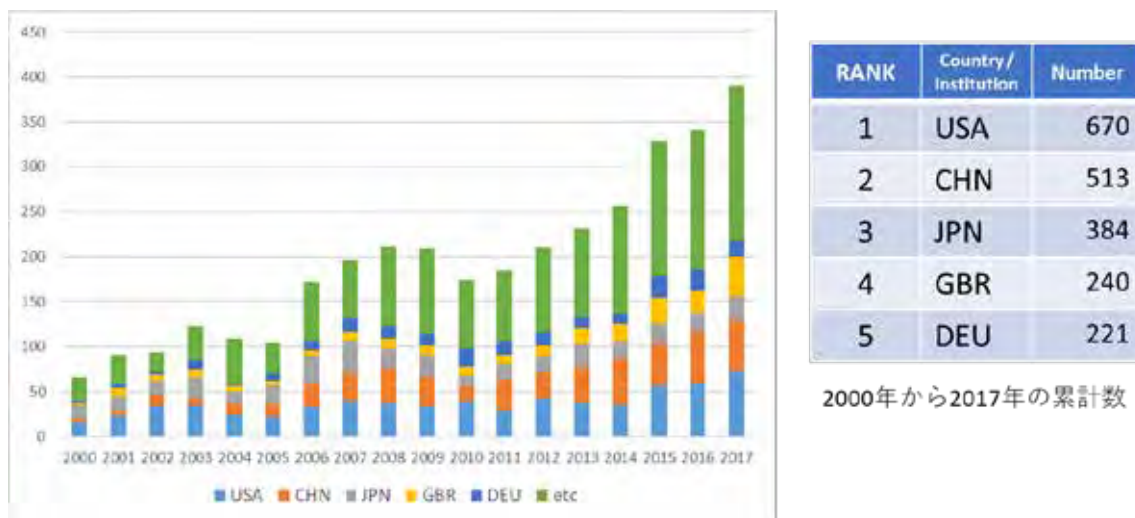


図 7 . 国別論文発表数

(出典) Web of Science™ での検索結果を元に NEDO TSC 作成 (2018 年)

論文数、特許出願数ともに、AI ロボットの分野では増加しており、世界的に注目されている分野の一つであるといえる。

② 要素技術の国際比較

AI・ロボットを構成する要素技術の現時点での国際比較を表 1 に示す。

米国は、基礎研究、応用研究開発とも全般的に優位が顕著である。AI を中心にした産業界と DARPA、NSF など大型な研究開発投資を受けられる研究者層が厚いためと思われる。

また、欧州は、局所的にはあるが基礎研究が強い。米国のような巨大 IT 企業が不在なため応用研究開発が弱い。

近年、中国の伸びが著しく、これは、中国政府の国策による研究開発投資と国内の巨大 IT 産業界が、米国への留学生を活用して、基礎研究と応用研究開発の双方に地道に力をつけていることが背景にある。

一方、日本は AI による技術革新に遅れ気味である。しかし、この表にはないが、特に産業用ロボットの分野におけるシステム化や、製品化時にこれらの技術を、相互に微妙な調整を行うことで、本来の性能を発揮させる、いわゆるすり合わせの技術で圧倒的な競争力を誇っている。

表1. AI 及びロボットに関する技術動向

国	フェーズ	センシング	感覚情報入力 情動・注意・共感		知識・意図・学習		認識・判断 運動情報出力		制御	アクチュエーション・動力
		MEMS	画像・映像解析	自然言語処理	機械学習	データに基づく問題解決	生物規範型ロボティクス	意思決定・合意形成支援	システム化技術*	ロボット基盤技術
日本	基礎研究	○→	○↗	○→	○↗	○→	△↗	○↗	◎→	○→
	応用研究・開発	○→	◎→	○↗	○↗	○↗	△→	○↗	○↗	○→
米国	基礎研究	◎→	◎→	◎→	◎↗	◎→	△↗	◎↗	◎→	◎↗
	応用研究・開発	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	◎↗	◎→
欧州	基礎研究	○→	◎↗	○→	○→	○→	○↗	◎↗	◎→	○→
	応用研究・開発	◎↗	○↗	○→	○↗	○→	○↗	◎↗	○→	○→
中国	基礎研究	○↗	○↗	◎↗	○↗	○→	△→	○↗	○↗	△→
	応用研究・開発	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	△→	○↗	△→

(出典) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2019 年)

(註 1) フェーズ 基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ : 技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 特に顕著な活動・成果が見えている、○ : 顕著な活動・成果が見えている、

△ : 顕著な活動・成果が見えていない、× : 活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド ↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

【ムーンショット目標4】

「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

研究開発構想（案）

令和2年 月
経済産業省

1. ムーンショット目標

経済産業省は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

具体的には、地球環境再生に向け、持続可能な資源循環の実現による、地球温暖化問題の解決（クールアース）及び環境汚染問題の解決（クリーンアース）を目指し、2050年までに、資源循環技術を用いた商業規模のプラントや製品を世界的に普及させる。

○クールアース

2030年までに、温室効果ガスに係る循環技術を開発し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からも有効であることをパイロット規模で確認する。

○クリーンアース

2030年までに、環境汚染物質を有益な資源に変換又は無害化する技術を開発し、パイロット規模または試作品レベルで有効であることを確認する。

2. 関連する政府方針

（1）「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」

- ①政府は、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年6月11日閣議決定。以下、「長期戦略」という）及び「統合イノベーション戦略2019」（令和元年6月21日閣議決定）に基づき、我が国が強みを有するエネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現の上、これを世界に広めていくことで、温室効果ガス（GHG：Green House Gas）の国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献することを目標としている。

- ②長期戦略では、世界の喫緊の課題である気候変動問題に、規制ではなくビジネスベースで対応する「環境と成長の好循環」が提唱され、あわせて1.5℃努力目標を含むパリ協定の長期目標の実現に貢献することも明記された。長期戦略に示された目標を実現するため、我が国においては、2050年に向けて様々な実用化技術開発・実証事業を進めている。しかしながら、これを実現するためには、製品製造工程、エネルギー供給等から排出されるGHG排出抑制だけでは達成不可能であり、一旦、大気中にやむなく排出されたGHGを回収・無害化する技術が重要かつ必要となる。
- ③ムーンショット目標である「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」（以下、MS目標）は長期戦略の目標と方向性を同一にしており、当該目標の達成を目指すムーンショット型研究開発事業においては、パリ協定に基づく目標の達成に寄与することが求められる。例えば、DAC（Direct Air Capture）による炭素循環、工業的な窒素循環などがMS目標を実現するものとして挙げられる。また、GHG排出、GHG排出コストの削減等は、GHG回収のみでなく回収後の利活用までを含めたシステム全体での削減の検討が必要であり、当初からシステム全体を想定した技術開発が必要である。

（２）「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」

- ①プラスチックは軽量かつ丈夫であり加工性に優れるといった特性を持ち、日常生活に利便性等をもたらす素材としてこれまで幅広く活用されてきた。一方で、新興国の経済発展と世界的な生産量の増加に伴い、近年、プラスチックごみによる海洋汚染が問題視されるようになっており、地球規模の海洋プラスチックごみ問題に対する世界的な関心の高まりを背景に、2019年3月の国連環境総会では「海洋プラスチックごみ及びマイクロプラスチック」に関する決議等が採択された。海洋プラスチックごみ及びマイクロプラスチックに対処するための科学的・技術的知見の集積、ワンウェイ（シングルユース）のプラスチックの排出削減や産学官連携による代替素材の開発に向けたイノベーションの促進強化等、国際的な取組が求められることとなってきた。
- ②こうした中で我が国は、「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」（令和元年5月31日閣議決定。以下、「海プラ対策アクションプラン」という）及び「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」（令和元年5月7日経済産業省。以下、「海洋生分解性プラ開発・普及ロードマップ」という）を策定している。

- ③海プラ対策アクションプランでは、経済活動の制約ではなくイノベーションを通じた環境と成長の好循環の創出という考えの下、プラスチックを有効利用することを前提としつつ、新たな汚染を生み出さない世界の実現を目指している。例えば、海洋流出しても影響の少ない素材（海洋生分解性プラスチック、紙等）の開発やこうした素材への転換など、イノベーションを促進していき、世界的に海洋プラスチックごみ対策を進めていくための基盤となるものとして、海洋プラスチックごみの実態把握や科学的知見の充実にも取り組むこと等が示されている。また、海洋生分解性プラ開発・普及ロードマップにおいては、実用化技術の社会実装、複合素材の技術開発による多用途化、革新的素材の研究開発の3段階が示されている。
- ④海洋プラスチックごみ対策に関しては、さらなるプラスチックの回収・再利用など従来のリサイクル技術や市民による取組の強化が有効であるが、こうした取組を超える部分、具体的には回収が困難な場合を想定した素材の開発が重要かつ必要となる。

3. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）^[1]での議論等を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

クールアース・クリーンアースに貢献するいくつかの資源循環技術を、マトリックスで図1にマッピングする。

横軸は、循環する資源の状態を濃度が高いか低いか、または回収が容易か困難かで示している。マトリックスの左側は、対象物質が広く拡散されているか希薄な状態であるため、現在はその回収が難しいものを対象とした技術である。その課題を解決して地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現するためには、主に二つの方法が挙げられる。一つは対象物質を回収し有益な資源に変換する方法であり、もう一つは対象物質を分解または無害化する方法である。

縦軸は現在の技術開発の進捗度を表している。下側は、現在はまだ開発が初期段階で社会実装には道のりが遠いことを示している。従って、マトリックスの左下がムーンショット型研究開発事業において推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域である。

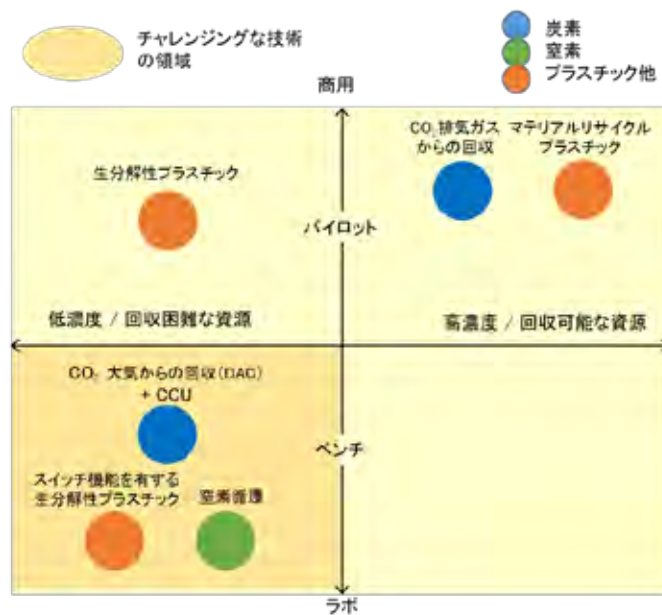


図1. クールアース・クリーンアースのテクノロジーマップ

(2) 目標実現に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発事業においては、図1の左下に位置する部分を推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域として定め、以下の点に留意して研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し、研究開発に活かす。研究開発に当たっては、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

<クールアース>

- ・MS 目標である地球環境の再生に貢献する技術開発であり、現在実施中のプロジェクト（NEDO 先導研究プログラムを除く）で取り組まれていない挑戦的な課題であること。
- ・一例として DAC が挙げられる。その際、回収した CO₂ の活用やエネルギー源を含めたシステム全体での評価を伴う研究開発であることが必要。
- ・また、GHG 削減の視点から CO₂ の他にも温暖化係数が大きく、排出量が多い N₂O 等を対象とした研究開発が考えられる。
- ・システム全体を想定し、コスト、エネルギー収支を考慮して、開発課題における目標を設定すること。

<クリーンアース>

- ・MS 目標である地球環境の再生に貢献する技術開発であり、現在実施中のプロジェクト（NEDO 先導研究プログラムを除く）で取り組まれていない挑戦的な課題であること。
- ・一例として、海洋生分解性プラスチックが挙げられる。海洋生分解性プラ開発・普及ロードマップを踏まえ、海洋生分解性を備え、多様な用途に利用されているプラスチックと比較し同等又はそれ以上の性能を持つ新素材の開発が対象となる。その際、現状実現できていない機能（生分解のタイミングをコントロールする機能、多様な海洋環境でも適切に分解する機能、分解による中間生成物も含めた生物への安全性等）を付加すること。

（３）目標実現に向けた研究開発の方向性

○2030 年（アウトプット目標）

<クールアース>

温室効果ガスに係る循環技術を開発し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からも有効であることをパイロット規模で確認する。

<クリーンアース>

環境汚染物質を有益な資源に変換又は無害化する技術を開発し、パイロット規模又は試作品レベルで有効であることを確認する。

○2050 年（アウトカム目標）

<クールアース・クリーンアース>

地球環境を再生させる持続的な資源循環技術を実現する。これは即ち、資源循環技術を用いた商業規模のプラントや製品が世界的に普及することを意味する。

2050 年における資源循環を大規模に実行するためには、実証設備やパイロット設備の設立、各段階における次に必要となる技術開発課題の解決を経て、大規模設備の普及期間を確保する必要がある。従って、2030 年時点における目標は、パイロット規模や試作品レベルでの技術の確立となる。図 2 は、2030 年、2040 年、2050 年及びそれ以降のムーンショットプロジェクトを通じて実現すべきスケジュールを示す。

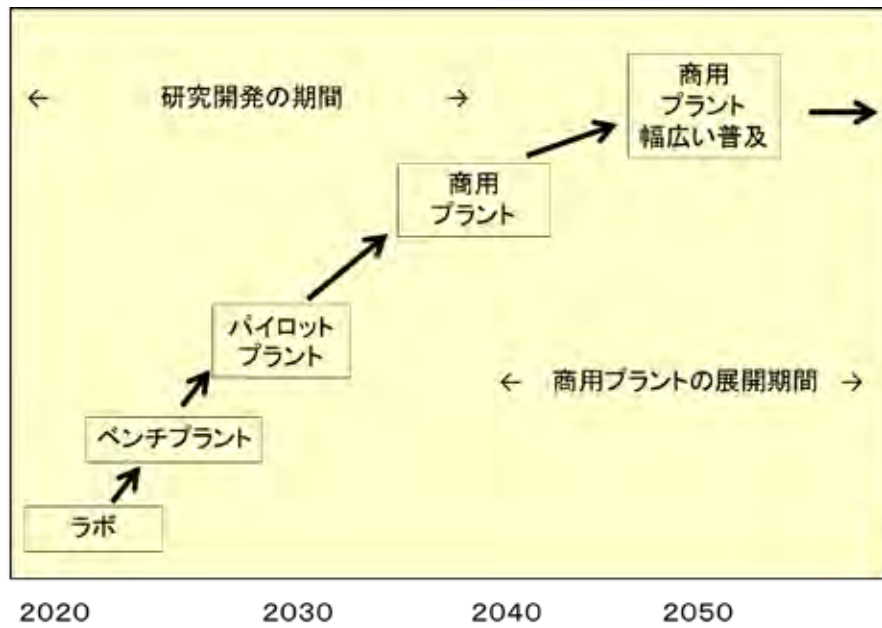


図2．MS 目標実現に向けた計画

＜参考：目標実現に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウム の Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

①クールアース

a)現状

地球温暖化の要因である温室効果ガスと呼ばれるガスは多数ある。報告対象となっている主要な7つの温室効果ガスを表1に示す。

良く知られているように、CO₂ が温暖化に最も影響を及ぼしているが、CH₄ や N₂O も一定の影響がある。

表1．7種の主要温室効果ガスの特性

		排出量:V 億t/年・世界	温暖化係数:K (CO ₂ =1) [2]	温暖化影響度 =V×K
① CO ₂		350	1	350
② CH ₄		3	28	63
③ N ₂ O		0.1	265	31
④ フッ素 化合物	HFCs	0.1>	12,400>	-
	PFCs	0.1>	11,100>	-
	SF ₆	0.1>	23,500	-
	NF ₃	0.1>	16,100	-

図3、4、5は、温室効果ガスの年間排出量の推移、温室効果ガスの大気中濃度の推移、気温上昇の状況を示したものである。気温は一貫して上昇を続けており、そのスピードは、概ね10年で0.1℃程度である。

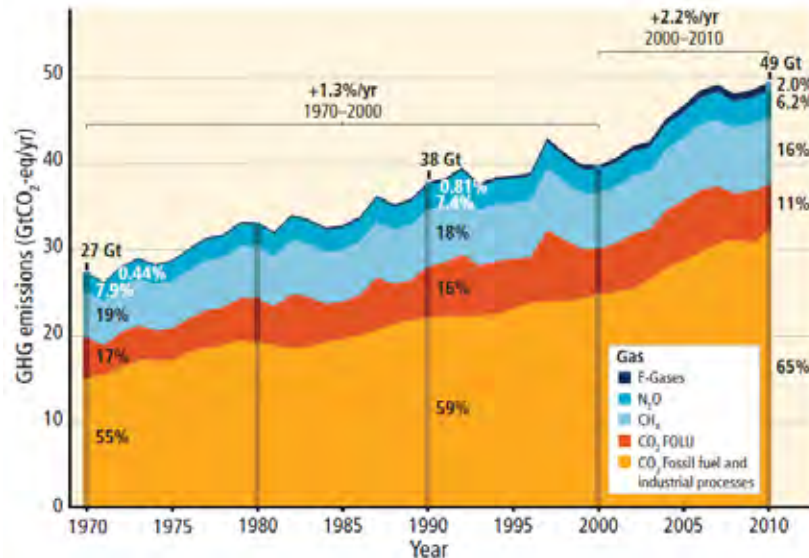


図3．温室効果ガス排出状況 [2]

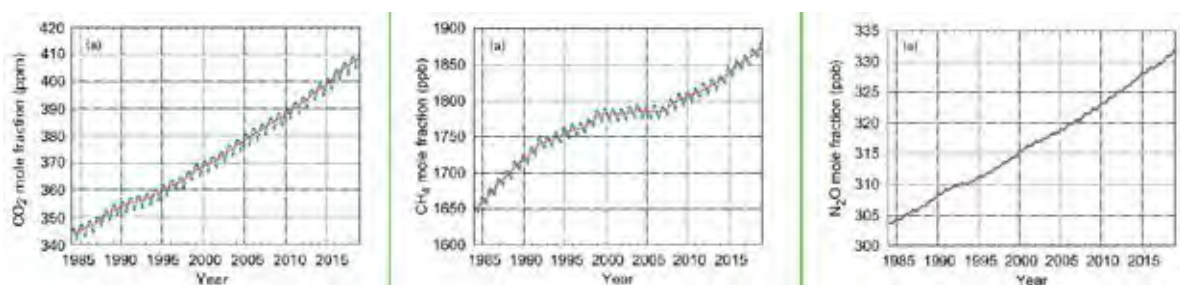


図4．温室効果ガスの大気中濃度 [3]

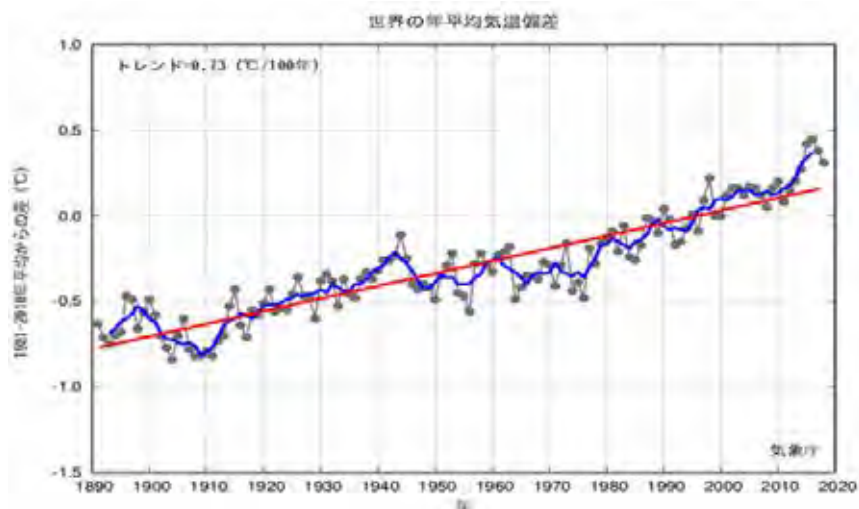


図5．気温上昇の状況 [4]

b) 対策

それぞれの温室効果ガスに対する対策を以下に述べる。

○CO₂

地球温暖化に最も影響を及ぼしている CO₂ の回収から利用に至るまでのフローチャートを図 6 に示す。

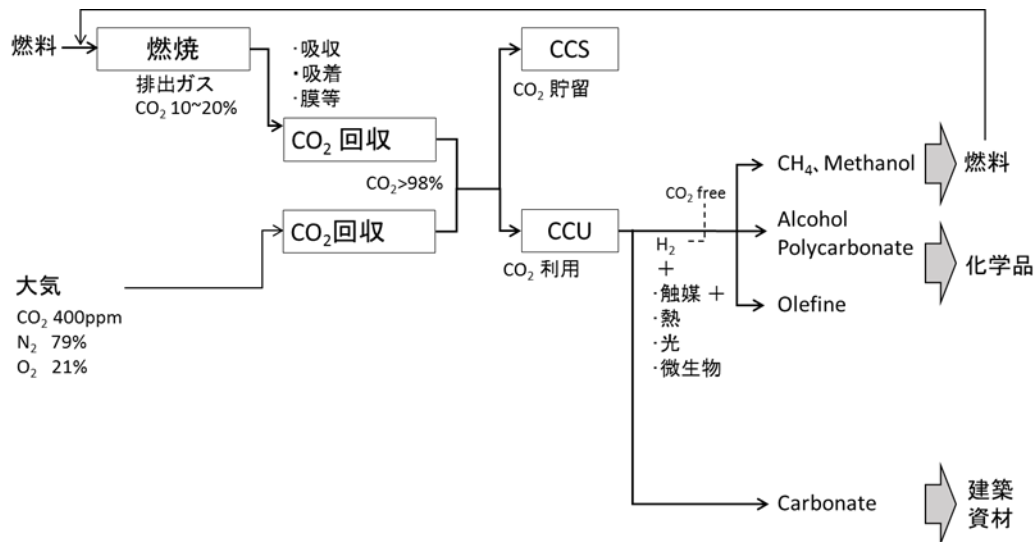


図 6 . CO₂ の回収・利用のフローチャート

高濃度 CO₂ を含有する燃料燃焼の排ガスの回収は、既に吸収・吸着・膜分離などの技術によって行われている。

一方で、大気中の CO₂ はその濃度が 400ppm と薄いため、大気からの CO₂ 回収に関しては、いくつかの研究開発が行われ始めた段階である。

回収された CO₂ は、地下に貯留（CCS）する、あるいは燃料や様々な化学品に転換合成（CCU）する。CO₂ が燃料に転換され燃焼されれば（化石）燃料の消費が循環によって削減される。化学品に転換合成された様々な化学品が市場に投入されれば、従来の化石資源の原料消費も減る。現時点で商業化されたものも存在するが、多くの CCU は研究開発段階であり、更に推進されるべき領域である。

大気からの CO₂ の除去技術（ネガティブエミッション技術）について、表 2 に示されるようにいくつかの事例が存在する。これらの例の中で、DAC は自然環境に対して影響がない技術的な経路である。DAC 以外の他の手法は、いずれも自然環境に対して何らかの不安定あるいは予期せぬ結果を招き得る。それ故、DAC は技術開発の対象として選択されるべきである。

表 2. CO₂回収技術の特徴と技術ポテンシャル [5]

		 Cost	 Energy Requirements	 Land Use	 Water Consumption	 Risk of Reversal	 Verifiability	 Implement Readiness
 NATURAL	Reforestation & Enhanced Forest Management							
	Wetland & Coastal Restoration							
	Soil Carbon Restoration							
 TECHNOLOGICAL	DACS							
	Terrestrial Enhanced Weathering							
	Ocean Alkalinity Modification							
 HYBRID	Hybrid Bioenergy with CCS (BECCS)							
	Bioenergy with Biochar Sequestration (BEBCS)							
LEGEND		 Generally Acceptable/ Available	 Exercise Caution	 Potentially Unacceptable/ Unavailable				

2050 年においても、CO₂ 排出は削減されなければならない。技術的な制約やコスト制約から、すべての CO₂ 排出を止めることはできず、一定量の CO₂ 排出は避けられない。それでも IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2℃シナリオで述べられる今世紀後半における温室効果ガスの正味ゼロ排出を実現するためには、残る排出量に相当するネガティブエミッションが必要である。よって相応の規模の DAC が期待される。

DAC は、表 3、4 に示されるような技術開発が取り組まれている。いくつかの CO₂ 変換と利用に関する様々な研究開発が行われており、いくつかの実施もされている。^[6] しかしながらこれらは、まだ回収効率が低く、回収のためのエネルギー消費が多い。これらの課題の改善によって、DAC と CO₂ 利用は、普及を可能とするコストで実現されるべきであるし、効率を上げてエネルギー的にも LCA を満足するものにしなければならない。

表 3 . DAC 技術開発の一例 [7][8][9]

対象	現状	技術例
DAC	ラボ ～ パイロット プラント	✓ CO₂をアルカリ液に吸収→炭酸塩固定化→焼成により高濃度CO₂回収 ✓ アミンを担持させたハニカムセラミックス吸着剤でCO₂を吸脱着させる ✓ 活性炭とK₂CO₃の吸着剤でCO₂を吸脱着させる

表 4 . DAC パイロットプラントの特性 [5][8][10][11]

Company	Thermal energy/ tCO ₂ (GJ)	Power/ tCO ₂ (kWh)	Heat: Power ratio	Reference
Climeworks	9.0	450	5.6	Ishimoto 2017
Carbon Engineering	5.3	366	4.0	Keith 2018
Global Thermostat	4.4	160	7.6	Ishimoto 2017
APS 2011 NaOH case	6.1	194	8.7	APS 2011

ここまで、CO₂について述べてきたが、IPCC 2℃シナリオ達成のためには、温室効果ガス全体の約 24%を占める CO₂ 以外の温室効果ガスに対する対策も必要である。

○CH₄

CH₄ は CO₂ の次に地球温暖化への影響が大きい。この CH₄ の主な排出源は、化石燃料の採掘時の随伴ガス、畜産、埋め立て地、廃棄物、農業などである。^[12] 天然ガス採掘時の随伴ガスについては、これを回収する試みが行われている。畜産については、一定量を占める牛の胃からの排出がある。こうした畜産からの排出に対する対策としてバイオ技術の利用可能性がある。埋立地廃棄物や農業に対してはバイオ技術の活用に可能性があるが、現時点では有効な解決策が見いだせてはいない。

○N₂O

N₂O の主な人為起源の排出源は、農業で用いられる窒素化学肥料を起源とするものである。(図 7) 世界人口の増加に応じて化学肥料は効率的な食糧生産に用いられており、植物による吸収量を超えて農地に散布されている。農地に残った過剰な肥料は、雨水や地下水によって農地から河川に流出し、その後湖沼や海域に広く流れ出る。N₂O の発生源は広範囲にわたるが、地球規模では CH₄ の発生源ほど薄く広くは拡散していない。それ故に、例えば、農地の化学肥料を起源とする湖底のような環境に排出された N₂O の発生を制御することで窒素に循環させる可能性もある。これらの技術開発はまだ実施されていないが、表 5 に示すような研究開発も行われている。

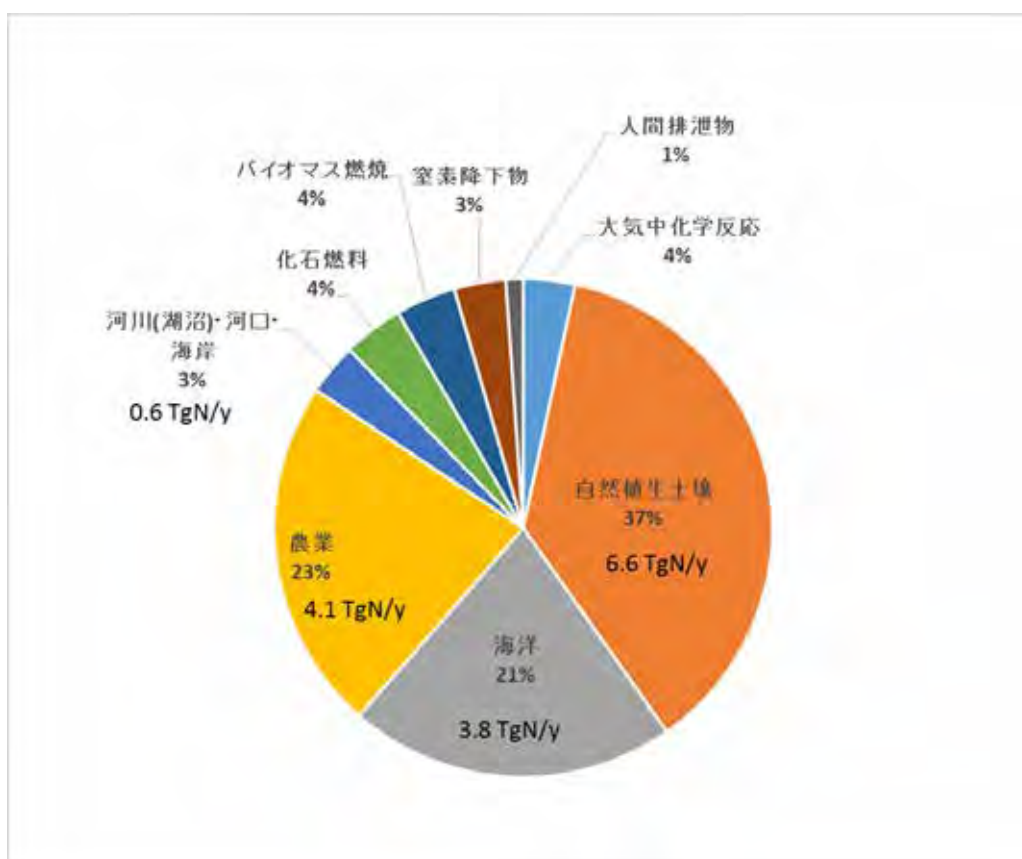


図 7 . N₂O 発生源 [12]

表 5 . N₂O 抑制技術開発の一例 [13][14][15][16]

対象	現状	技術例
N ₂ O	ラボ	✓ 天然酵素または人為改変酵素により、N₂OをN₂に還元 ✓ 触媒を通した化学反応により、N₂OをN₂に還元 ✓ 微生物を利用し、N₂OをN₂に還元 ✓ 吸着剤にNH₃とNO₃を吸着させ、N₂Oの発生を抑制

○フッ素化合物

7 大温室効果ガスの中で、フッ素化合物は 4 種ある。これらフッ素化合物は温暖化係数が非常に大きい（その絶対量が僅かであるため、）温暖化に対する影響は比較的小さい。これらのフッ素化合物は人為的に合成されるものであり、排出源は冷凍機の冷媒のようなものに限られる。これらの特性から、フッ素化合物は、大気に放出される前の適切な回収処理を行うことが合理的である。従って、法規制などによる管理が適切である。

②クリーンアース

a)現状

日本の現状を見ると、排ガス(NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ など)、廃水(油、窒素、リン、有機物等)、土壌汚染(メタル、有機汚染物質等)は法で規制されている。しかしながら、窒素化合物は、法規制下にあっても、一部が環境に流出している。これが、窒素が既にプラネタリーバウンダリーでハイリスク限界値を超えた理由の一つである。図8に示すとおり、化学肥料から生成された N_2O や、排ガス中の NO_x や産業排水に含まれる窒素化合物は、環境に流出している。

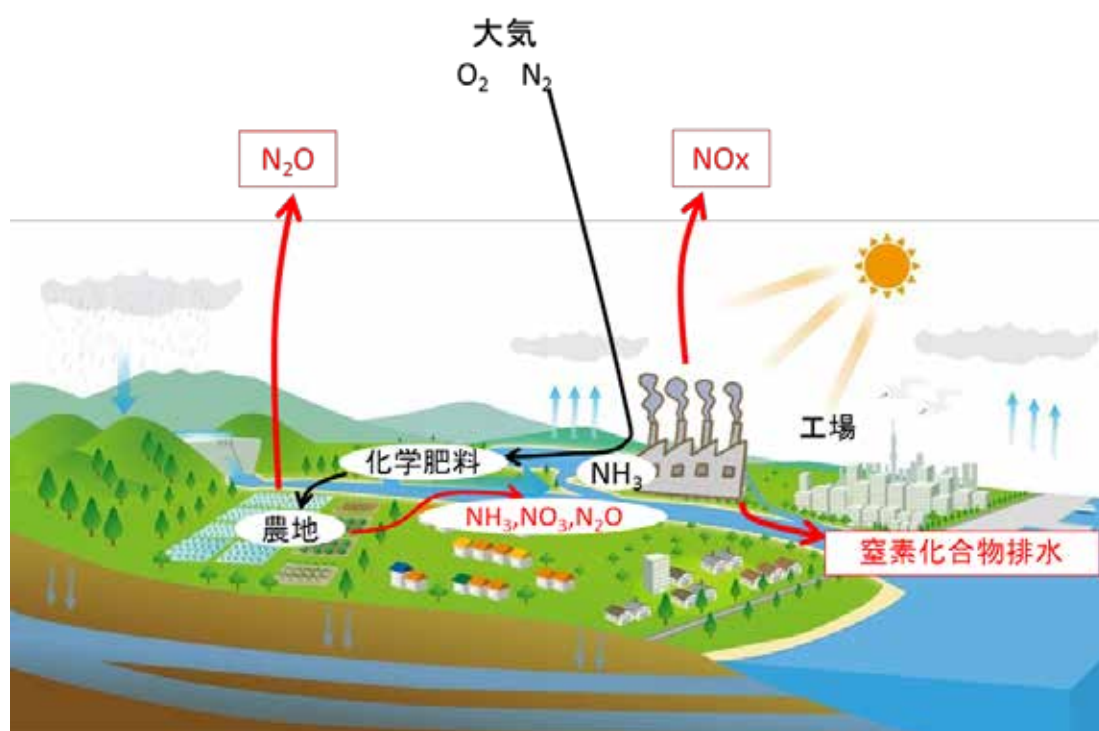


図8．窒素循環模式図

環境中に流出し、社会問題となっているものとして、プラスチックごみが挙げられる。日本のプラスチックの排出状況を図9に示す。

陸から海洋に流出するプラスチックごみは、世界的問題になっている。United Nations Environment Programme (UNEP)は、河川や土地からだけでも年間900万トンのプラスチックごみが海に流出すると推定している(表6)。絶滅危惧種も含め海の700種もの生物がプラスチック製品に絡まったり、意図せず摂取してしまうことによりダメージを受けていると言われており、食物連鎖等を通じた自然界への負の影響への懸念がある。海の豊かさを守ることは、持続可能な開発目標(SDGs)の1つでもある。従って、この問題を解決する技術開発が求められる。

海洋プラスチックごみの削減のためには、リサイクルシステムを含む廃棄物管理が必要である。加えて、生分解性プラスチックの導入が効果的である。

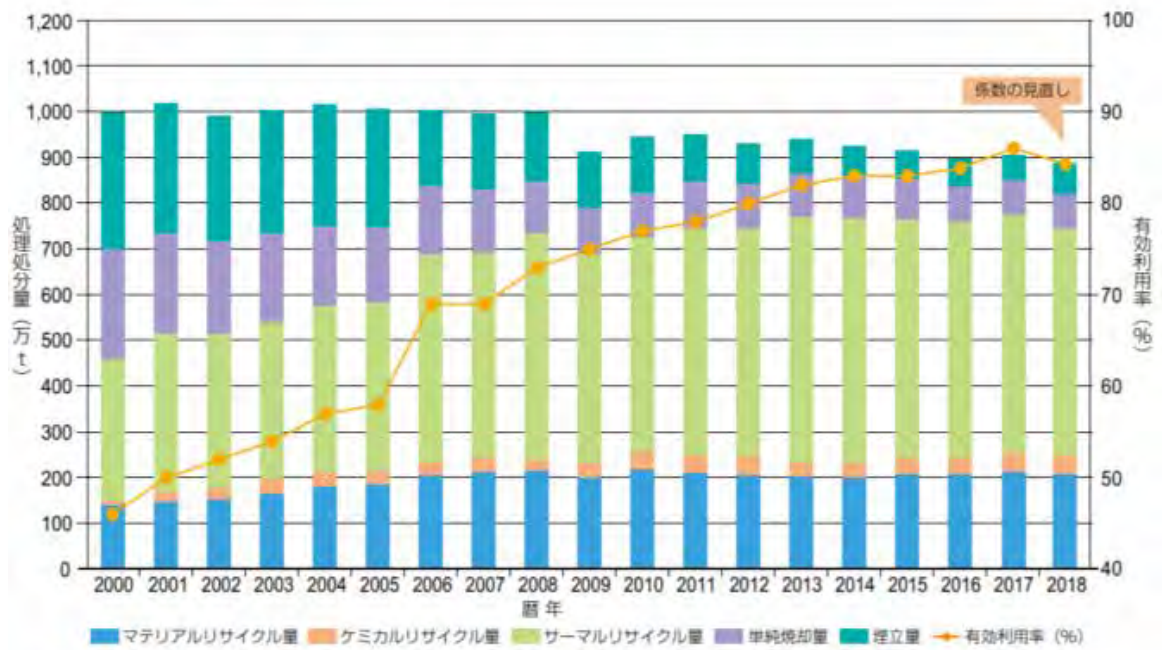


図9．日本におけるプラスチックごみ廃棄処理状況 [17]

表6．海洋プラスチックごみの流出状況 [18]

(千メートルトン/年)

発生源	生態系に入り込むプラスチックの 想定トン数
河川/土地からの流出、土地起源	9,000
直接投棄	1,500
釣り用具	640
船荷の紛失	600
自動車タイヤゴミ	270
産業粒子の流出	230
道路や建物の塗料	210
織物	190
化粧品	35
海洋塗料	16

b)対策

○窒素化合物

従来、排気ガス中の NO_x の多くはアンモニアにより脱硝される。残りの NO_x は低濃度で大気中に放出される。

産業界からの排水に含まれる窒素化合物も低濃度で排出されている。

NO_x や排水中の窒素化合物について、低濃度でも有効な循環技術が期待される。それは未だ研究段階のため、社会実装された例はない。可能性のある循環技術の例を表 7 に示す。

表 7. NO_x 排水中窒素化合物の回収利用研究開発の一例 [19][20][21][22][23][24]

対象	現状	技術例
NO_x	ラボ	✓ 排ガス中の NO_x を、触媒を利用した化学反応により、アンモニアに転換 ✓ NO_x より化学反応により硝酸に転換
窒素化合物 (排水中)	ラボ	✓ 窒素有機物を触媒反応でアンモニアに変換 ✓ 窒素有機物を微生物を利用しアンモニアに変換

○海洋プラスチックごみ

海洋プラスチックごみ対策の取組について、図 10 に生分解性プラスチックを使った資源フローを示す。一般的な難分解性プラスチックのすべてを生分解性プラスチックに置き換える必要はない。難分解性であっても適切な回収と処理がなされ、海洋に流出させない規制や管理が行われればよいからである。一方で、海洋への流出可能性が高い用途やそもそも河川・湖沼・海洋で使用する場合など、生分解性という性質が適する用途には優先して導入を図ることが必要である。

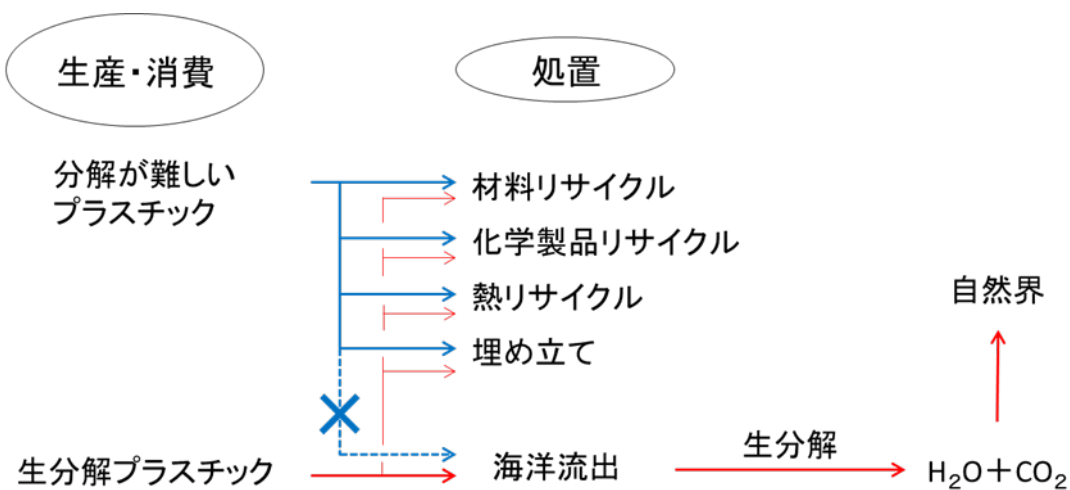


図 10. プラスチック資源のフロー

海洋生分解性プラスチックは、海洋で分解して CO₂、窒素及び酸素になることで環境に戻っていく、つまり、土、大気と海洋の大きな資源循環になる。

土壌中にいる微生物や酵素の量や種類と比べて、海中のそれは圧倒的に少ない。このために、土壌中よりも海中で分解するプラスチックの開発は難しい。そのような状況でも生分解性、プラスチックの無害化の研究開発は始まっているものの、海洋生分解性プラスチックの種類はまだ少ない。プラスチック製品は単体のプラスチックで製造されることもあるが、一般には、複数の種類のプラスチックのブレンドや、複層化することで必要な機能を満たしていることが多い。海洋生分解性を有するプラスチック種類を増やすことで様々な機能を発揮させることができれば、海洋生分解性プラスチックの適用範囲が拡張され、より広い用途に普及を促すことができることから、海洋生分解性を有するプラスチックを新たに開発することも必要である。また、プラスチック製品はプラスチック以外の有機物として添加剤、表面処理剤、顔料・塗料、接着剤等を使用しており、こうした原料についても海洋生分解性に留意した設計が必要である。

以下に既に商用化され市場に出ているプラスチックの例を示す。

- ・ポリ乳酸系
- ・脂肪酸ポリエステル系
- ・ポリビニルアルコール系

加えて、生分解の開始時期やスピードをコントロールする機能（スイッチ機能）を設計段階で追加する最新の取組も、近年開始された。

ここに、いわゆる目的別スイッチ機能を有した生分解性プラスチックの応用例がある。例えば、漁具は巻き取りなどの機械的に厳しい条件で取り扱われるが、網が損傷を受けると意図せず海洋流出することがある。こうした場合に、漁具として使用される間は生分解せずに製品としての機能を維持し、海洋に流出した後に分解が始まる機能を有していれば有益である。

これはまだ研究段階であり、社会実装の例はない。スイッチ機能を持つ生分解性プラスチックに関する研究開発の一例を、表 8 に示す。

表 8．スイッチ機能を有する生分解性プラスチックの開発一例 [24][25][26][27]

対象	現状	技術例
スイッチ機能を有する生分解性プラスチック	ラボ	✓ 分解開始のポイントを制御する技術 ・ pHや塩濃度などの変化によって化学構造が変化することで分解開始 ・ 流出に伴う物理的刺激によって材料内の酵素が活性化することで分解開始 ✓ 分解のスピードを制御する技術 ・ 結晶化度や結晶厚を変えることで分解速度を制御するもの ・ バイオフィームなど微生物による分解速度を制御するもの

<出典>

- [1]内閣府ホームページ ムーンショット国際シンポジウム開催のお知らせ
<https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20191018moonshot.html>
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [3] WMO Greenhouse Gas Bulletin No 15
- [4] 気象庁ホームページ「世界の年平均気温」
(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)
- [5] ICEF2018 ロードマップ： Direct Air Capture of Carbon Dioxide (2018)
- [6] Direct Air Capture of Carbon Dioxide. David Sandalow, Julio Friedmann, Colin McCormick, and Sean McCoy (2019)
- [7] Sanz-Pérez et al., Chem. rev., 116, 19, 11840-11876, 2016
- [8] Keith et al., Joule 2, 1573-1594, (August 15, 2018)
- [9] Li et al., ChemSusChem, 399-903, 2010
- [10] Yuki Ishimoto et al. (2017) PUTTING COSTS OF DIRECT AIR CAPTURE IN CONTEXT
- [11] APS & POPA (2011) Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals - A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs
- [12] Climate Change 2013: The Physical Science Basis, IPCC(2013)
- [13] Zhang et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 116(26), 12822-12827, 2019
- [14] Hinokuma et al., Chem. Lett., 45, 179-181, 2016
- [15] Akiyama et al., Scientific Reports 6:32869, 2016
- [16] Jiang et al., RSC Adv., 60, 34573-34581, 2018
- [17] 一般社団法人 プラスチック循環利用協会「2018 年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」(2019)
- [18] Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Narayan, and Kara Lavender Law, “Plastic waste inputs from land into the ocean”, Science, vol. 347 Issue 6223, pp. 768-771, February 2015.
- [19] Nanba et al., Chem. Lett.,37(2008)710
- [20] Nanba et al., Catalysis Science & Technology., 9(2019)2898

- [21] 「NO_x の吸着・濃縮による 新規脱硝方法の提案と 濃縮 NO_x の水吸収による硝酸製造」安田昌弘、井上 隆（大阪府立大学）JST 新技術説明会資料（2014 年 1 月）
- [22] 北海道大学 大学院地球環境科学研究所 物質機能科学部門 機能材料化学分野 神谷裕一研究室ホームページ
https://www.ees.hokudai.ac.jp/ems/stuff/kamiya/index_En.html
- [23] CHUTIVISUT et al., Journal of Water and Environment Technology, Vol.12, No.4, 2014
- [24] Nduko et al., BIOBASED MONOMERS, POLYMERS, AND MATERIALS, 1105, 213-235(2012)
- [25] Iwasaki et al., Biomacromolecules, 17, 2466 (2016)
- [26] Gan et al., Polymer, 172, p7-12(2019)
- [27] Morohoshi et al., Microbes and Environments, 33, 332-335 (2018)

【ムーンショット目標5】

「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、
地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」
研究開発構想（案）

令和2年 月
農 林 水 産 省

1. ムーンショット目標

ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」

（ターゲット）

- 2050年までに、微生物や昆虫等の生物機能をフル活用し、完全資源循環型の食料生産システムを開発する。
- 2050年までに、食料のムダを無くし、健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法を開発する。
- 2030年までに、上記システムのプロトタイプを開発・実証するとともに、倫理的・法的・社会的（ELSI）な議論を並行的に進めることにより、2050年までにグローバルに普及させる。

（研究推進機関：生物系特定産業技術研究支援センター）

2. ムーンショット目標設定の必要性

我々は、これまで世界人口の増加ペースに合わせ、地球上の農地や林地、海洋を開拓し、様々なテクノロジーを駆使して食料供給を実現してきたが、同時に自然環境の破壊や自然資源の乱獲をもたらし、化学肥料や農薬の多投による土壌劣化や河川、地下水の汚染など様々な問題を引き起こしてきた。また、最近では、温室効果ガスによる地球温暖化が深刻化し、その削減が急務となって

いるが、世界的に見れば、一酸化二窒素やメタンなどを含め温室効果ガスの総排出量の 1/4 は農林業その他の土地利用に起因すると言われている。

2050 年には世界人口が 1.3 倍（2010 年対比）に達し、中所得国における家畜飼料としての穀物需要量の増加等も相まって、食料需要量は 1.7 倍に増大すると予想されており、今後、食料供給のさらなる拡大が必要となる。一方、本来、食料の元となる有機物は、農作物、食品、排出物、土壌物質等として循環しているが、生産効率のみを重視した現行方式の食料生産では、その循環が破綻しており、気候変動、食料供給の持続性への障害等、地球環境に悪影響を及ぼしている。今後、食料の増産と地球環境保全を両立するためには、現行方式の食料生産を抜本的に見直すことが必要である。

一方で、微生物や昆虫等にあっては、未利用な機能が多数存在しているものと推測され、これら未知な「知」を解明して自然・生物が持つ機能を覚醒・最大限活用することにより、新たな社会経済活動のシステム化を図ることが重要である。

したがって、人類が、今後も食料を持続的に確保し、世界人口の増加ペースに合わせて食料供給量の拡大を図るためには、微生物や昆虫等の生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システムを開発することが不可欠である。

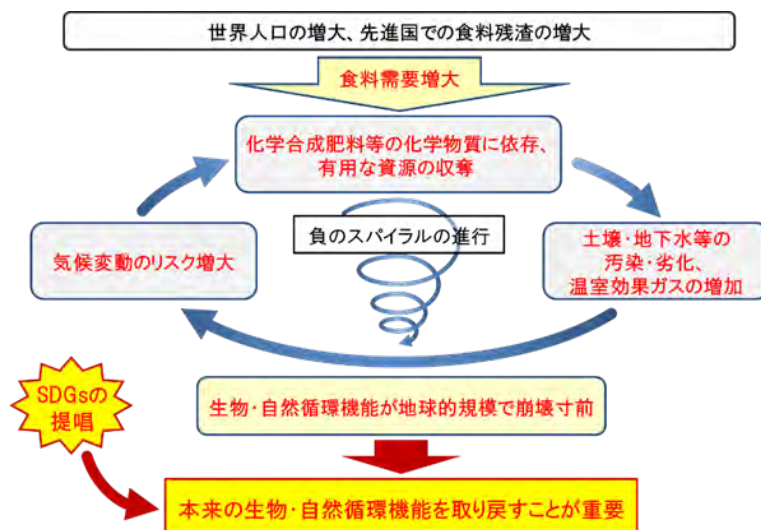


図 1. 食料供給における 2050 年を見通した課題

加えて、今後、我々自らの消費行動も見直す必要がある。現在、先進国を中心に大量の食料が廃棄され、肥満や生活習慣病の増加が社会問題化している。我が国においても、大量の食品が廃棄され、肥満や生活習慣病といった食にまつわる様々な課題が生じている。

したがって、食料のムダを無くし、健康・環境に配慮した合理的な消費行動を促す解決法を開発し、グローバルに展開する挑戦が求められる。

なお、国連の持続的な開発目標（SDGs）においても、

- ①生態系の維持や気候変動に対する適応能力が高い、持続的な農業を促進すること（目標 2）
- ②世界規模で植林等を大幅に増やし、生物多様性の保全を含め山地生態系の保全を進めること（目標 15）
- ③海洋及び海洋資源を保全し、持続的な形で利用すること（目標 14）
- ④食料廃棄や食品ロスを削減し、持続可能な生産消費形態を確保すること（目標 12）

等の重要性がうたわれ、今日、国際的な連携活動が始まりつつある。

以上のことから、今後見込まれる世界人口の増加及び地球環境の保全の両者に対応するため、「2050 年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」することを目標とし、世界中から研究者や起業家の英知を結集し、挑戦的な研究開発を推進することが早急に必要である。

3. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年 12 月 17、18 日開催）での議論等を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

今後見込まれる気候変動に対応しつつ、食料の持続的な増産を達成するためには、植物等の環境適応力を格段に高める必要がある。加えて、生物機能を活用して水や人工物質への依存度を大幅に引き下げ、地球環境への悪影響を予防し、生物多様性の保全に努めることが食料生産の持続化には必要である。このため、昆虫、土壌微生物、人体内微生物、植物等が持つ未利用な生物機能を解明し、完全資源循環型の食料生産へと活用することが不可欠である。

また、食料の供給量の拡大に合わせ、生産された食料がムダなく効果的に活用されることが重要であり、我々の消費行動自体にイノベーションを起こすことが求められる。現在、先進国を中心に大量の食料が廃棄されて環境を悪化させ、肥満や生活習慣病の増加などが社会問題化している一方、未だ飢餓問題は解決されていない。このため、食品ロスを減らし、必要な人々に必要な量の食料を確実に届けることができる、新たな解決法の開発が不可欠である。

以上のことから、未利用の生物機能等をフル活用して食料供給の拡大と地球環境保全を両立できる食料の生産・消費システムを確立することが必要で

あるが、現時点においては、技術的には極めて困難であり、生物機能の解明・利用に関する研究開発も初期段階で社会実装には遠い。このため、「食料供給の拡大と地球環境保全を両立すること」をムーンショット型研究開発制度において推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域として想定する。

（２）目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発制度においては、上記の推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域について挑戦的な研究開発を国内外から広く募り、研究開発を進める。

なお、研究開発の推進においては、ムーンショット目標の達成に資する技術開発、かつ挑戦的な課題を対象とし、技術アプローチについては科学的な検証がなされているものを幅広く取り上げ、ステージゲートを設けて実施する。また、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発に活かす。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

＜食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システム＞

一例として、以下の研究開発事例が想定される。

- ・劣悪な環境に耐える、野生種の「強靱さ」のメカニズムの全容解明
- ・植物等のゲノムをゼロから再構築し、目的の機能を有する系統の開発
- ・土壌微生物環境の完全制御による養分の究極利用と温室効果ガス発生抑制技術の開発
- ・生態系に影響を与えない植物病虫害等の完全制御技術の開発
- ・CO₂吸収力を高めた植物・海藻等の開発とその利用による有機物循環システムの開発

＜食品ロス・ゼロを実現する食料消費システム＞

一例として、以下の研究開発事例が想定される。

- ・あらゆる食料需給ニーズをサイバー空間上で瞬時にマッチング・供給できるシステムの開発
- ・生物機能のフル活用による食材の超長期保存技術の開発
- ・余剰農作物や家庭の食料残渣等をカートリッジ化し再利用する 3D 加工調理システムの開発など環境や健康に配慮した食品等への効果的な転換・再利用技術の開発

- ・生物機能のフル活用による食料残渣や林地残材の食品・養殖飼料等への転換技術の開発

（３）目標達成に向けた研究開発の方向性

○2030 年（アウトプット目標）

<食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システム>

「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システム」のプロトタイプを開発・実証する。

<食品ロス・ゼロを実現する食料消費システム>

「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」のプロトタイプを開発・実証する。

○2050 年（アウトカム目標）

地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出する。これは即ち、「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料生産システム」及び「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」がグローバルに普及されることを意味する。2050 年（アウトカム目標）のイメージを図 2 に示す。

2050 年（アウトカム目標）を達成するためには、「生物機能をフル活用した完全資源循環型の食料供給システム」及び「健康・環境に配慮した合理的な食料消費を促す解決法」について、実証拠点の設置、各段階における次に必要となる技術開発課題の解決を経て、製品やシステムの普及期間を確保する必要がある。加えて、研究開発と併行して、倫理的・法的・社会的（ELSI）な議論も必要である。したがって、2030 年時点における目標は、プロトタイプでの技術の確立となる。



図2．2050年（アウトカム目標）のイメージ

<参考：目標達成に向けた分析>

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年 12 月 17、18 日開催）における Initiative Report 等を踏まえ、目標達成に向けた分析を以下に示す。

（１）食料供給の拡大と地球環境保全を両立する食料生産システムに関連する技術の動向

植物と土壌微生物の相互作用（灰色）および植物と微生物の共生（緑色）の研究は持続的に行われているが、2012 年頃から増加傾向にある。土壌微生物と温室効果ガスについての研究は、2015 年以降わずかに増える傾向にあるが、まだ数は少ない（黄色）（図 3）。微生物のゲノム編集については、2013 年以降増えているが（オレンジ色）、土壌微生物に限ると数が極端に少なく（11 件、データ示さず）、土壌微生物をデザインし改変するという研究はこれからの分野であるといえる。

一方、植物のゲノム編集については 2013 年から急激に件数が増えている（青色）。これは CRISPR/Cas9 が植物に応用され始めた時期に一致する。ゲノム編集の基盤技術の開発やゲノム育種技術を用いた作物創出等の研究成果が出ていると予想される。対して、AI を活用した育種研究はまだ件数が少なく（39 件、水色）、黎明期であることが示されるが、2019 年に数が増え始めており、今後急速に研究が進むことが予想される。

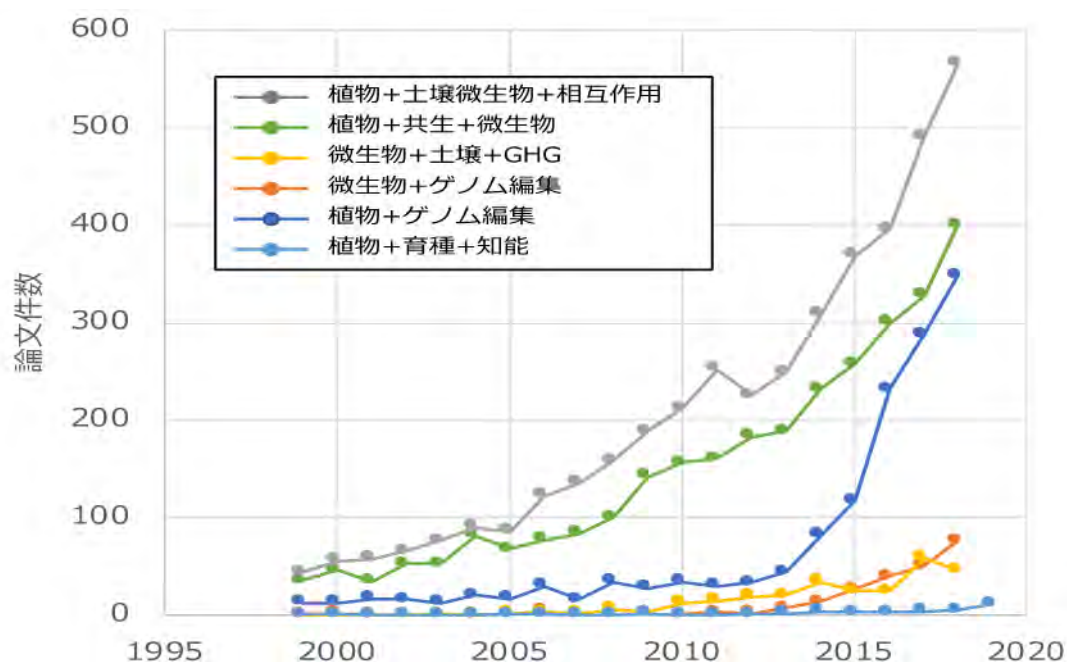


図 3．1999 年から 2019 年における国内外の育種・土壌微生物関連の研究動向
（Web of Science）

害虫制御の手法開発に関する研究動向を俯瞰すると、これまでの論文件数は化学的防除（化学農薬）と生物的防除（天敵利用）の2つが圧倒的に多い(図4-A)。次いで、物理的防除、耕種的防除、抵抗性品種、共生微生物、不妊虫放飼に関する件数が多い。このうち、ここ5年で件数が大きく伸びているのは、共生微生物利用と不妊虫放飼の2つである(図4-B)。一方、ゲノム編集等を利用した害虫制御に向けた研究の件数は、ここ3年ぐらいで急速に伸びており、ドローン、AIを用いた研究についても増加傾向にある。これらの分野については、今後さらに研究が進むと考えられる(図4-C)。

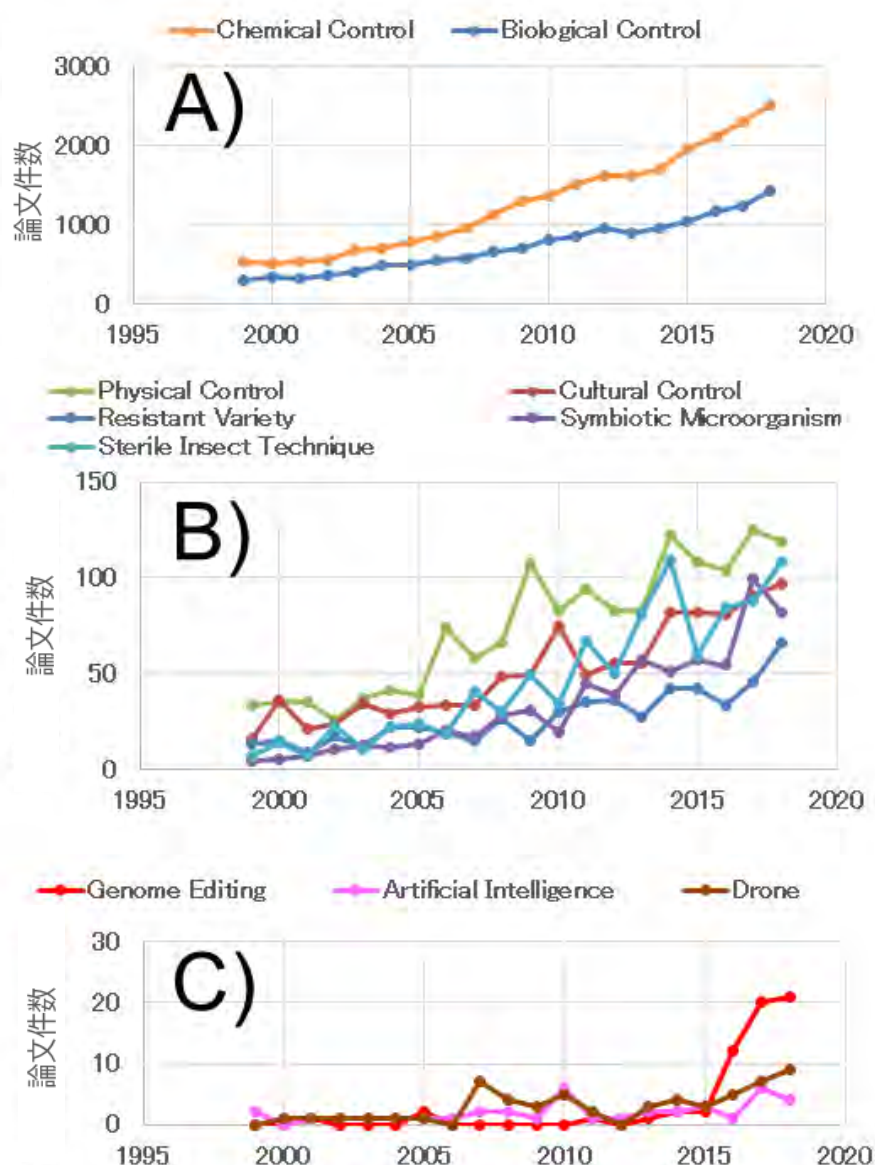


図4．1999年から2018年における国内外の害虫制御関連の研究動向 (Web of Science)

なお、ライフサイエンス分野においては、ここ2～3年で一細胞レベルでのオミックス解析が可能となるとともに、イメージング技術が格段に進展している。さらに、ゲノム編集技術の精度が向上し、医療・食料応用へ展開している。計測技術、AI 機械学習等をはじめとする ICT 技術は自動化、大規模化を通じて生命科学等へ着実に浸透している。さらに、大量の生命現象から法則を発見する「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展している。一方、AI、ゲノム編集、合成生物学等の進展に伴い、ELSI が科学技術の推進上重要な要素として位置づけられている（研究開発の俯瞰報告書 統合版 2019）。

（2）食品ロス・ゼロを実現する食料消費システムに関連する技術の動向

食品ロス・廃棄に関わる研究は増加傾向にあり(図5)、特にここ5年は急激に増加している。また、2000 年前後の研究では動物学、社会学、栄養学、水資源の研究分野での文献が多いが、近年では Transportation Science Technology, Transportation, Telecommunication 分野の研究が伸びてきている。

このことは、食品の廃棄やロスが生産から消費までの移動（フードチェーン）におけるミスマッチに多く起因しており、そのマネジメントを積極的に行おうという気運が高まっていることを示唆している。

一方、食品の廃棄・ロスにかかるフードチェーンのマネジメントには、近年発展著しい AI（特に IoT や ICT）の情報網と連携させることが有用と考えられるが、この分野の研究はまだほとんど進展していない（例えば、2014 年は3件で、2018 年は11 件）。生鮮食品は収穫後の流通過程で品質低下あるいは腐敗が生じ、最終的に価値がなくなるという生鮮物特有の特徴を有しており、特に IoT の食品物流への活用には、食品の量だけでなく質（時間経過に伴う品質変化等）も含めた検討が必要と考えられる。

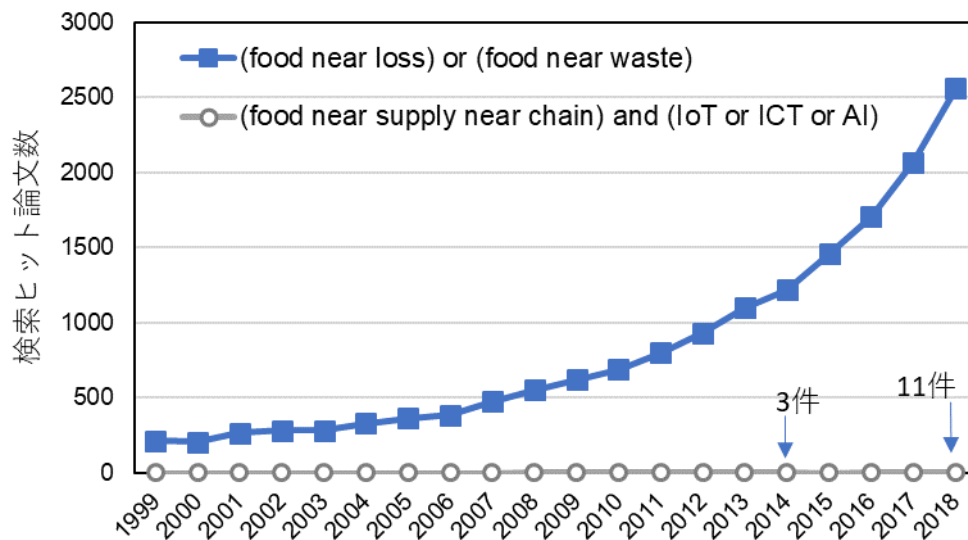


図5．食品ロス・廃棄及びフードサプライチェーン研究の動向

食品の廃棄・ロスの積極的な利用を考える際、エネルギーやマテリアルへの転換が一つの回答となるが、既往の関連研究も食品の廃棄・ロスにかかる研究件数のそれぞれ約24%または14%を占め、比較的多くの関心を集めつつあるものと推察される(図6)。エネルギーやマテリアルへの転換には化学的・物理学的方法に加え、生物機能を積極的に利用することも一手段であり、関連研究も存在するが、その割合はエネルギー・マテリアル転換研究全体の7分の1程度にとどまっている。

一方、食品のロス・廃棄のリサイクルに関しては、発酵リキッドフィーディングのような優良開発事例(Sasaki et al. 2011)があるものの、研究件数が食品のロス・廃棄研究全体の5%にとどまっており、その社会的受容性や技術的困難性から進展しているとは言いがたい状況にあると考えられる。

食品ロス・廃棄の一つのリサイクル手段として、これまでもすでに研究が進められ、一部システムとして定着している畜産への供給(家畜餌など)に加え、日本の強みである広大な海洋を活用した養殖業の可能性については、研究はほとんど行われていない。

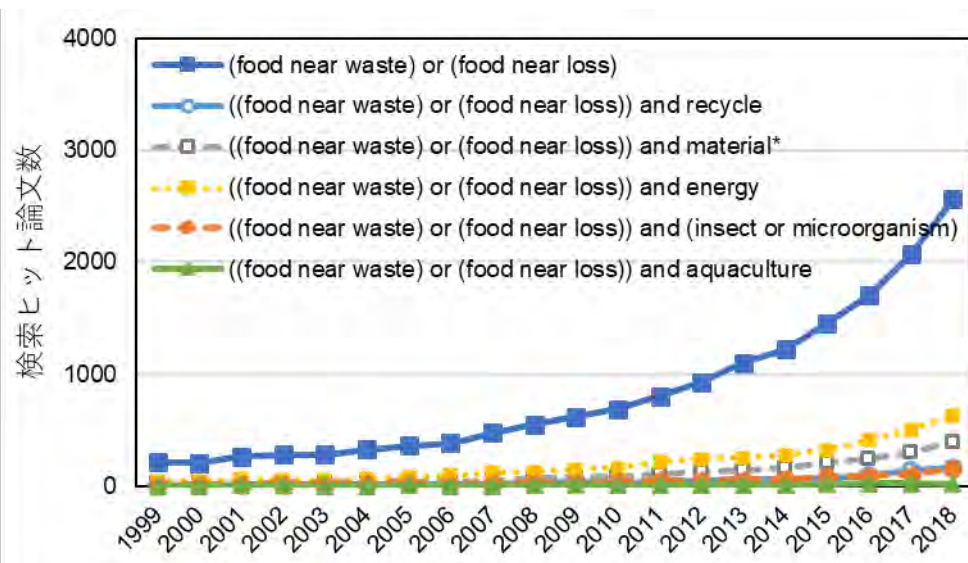


図6．食品ロス・廃棄のリサイクル、マテリアル、エネルギー、昆虫・微生物、養殖研究の動向

食品のロス・廃棄の低減手段として、余剰農産物、規格外、副産物等可食部分を食品素材とし、栄養機能や嗜好性に優れた食品へ『再』加工する方法が考えられる。近年、少量多品目の生産が可能な3Dプリントの技術の進展が著しく、食品分野でも、個人の多彩な食の選択を可能とする有望な手段となり得ると考えられる。しかし、実際は工業分野に比べると食品分野での3Dプリンタの利用研究は少なく（図7中橙色）、取り組みは実際にも進められているが、使用されている食材はプリンタに充填しやすい形状のものに限られている。

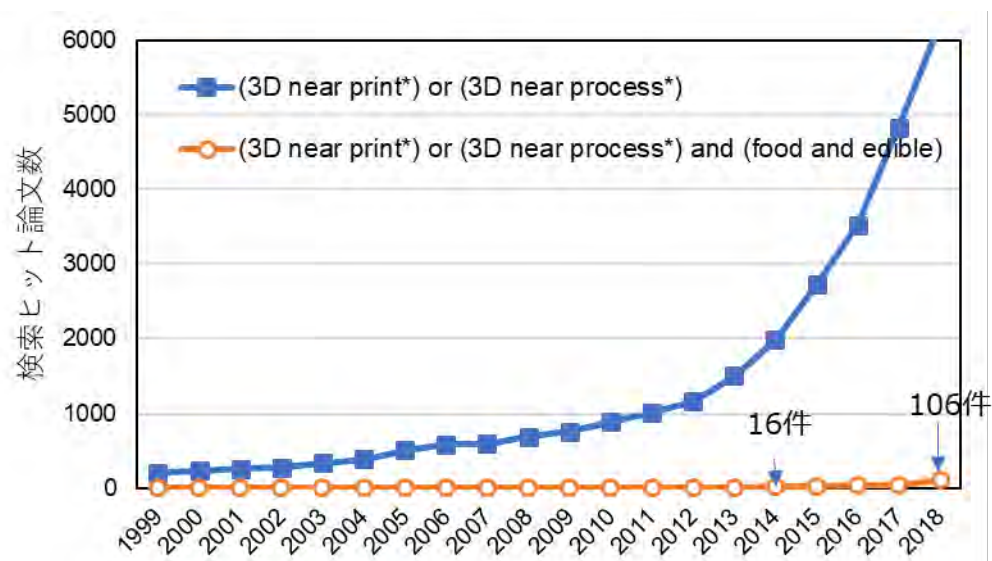


図7．3Dプリンティング技術及びその食品利用に関する研究の動向

【ムーンショット目標6】

「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

研究開発構想（案）

令和2年 月
文部科学省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータ¹を実現」

- ・2050年頃までに、大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する。
- ・2030年までに、一定規模のNISQ量子コンピュータ²を開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

2. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）での議論を踏まえ、研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

従来のコンピュータの進歩が限界に達すると言われている中で、Society 5.0の実現に向けて爆発的に増大する様々な情報処理の需要に対応できるようにすることが重要であり、そのためには、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現が鍵となる。

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するためには、図1に示したハード

¹ 誤り耐性型汎用量子コンピュータは、大規模な集積化を実現しつつ、様々な用途に応用する上で十分な精度を保證できる量子コンピュータ。

² NISQ(Noisy-Intermediate Scale Quantum)量子コンピュータは、小中規模で誤りを訂正する機能を持たない量子コンピュータ。

ウェア、ソフトウェア、ネットワーク及び関連する量子技術の研究開発を広く推進するとともに、適切に統合していく必要がある。これらが推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域である。

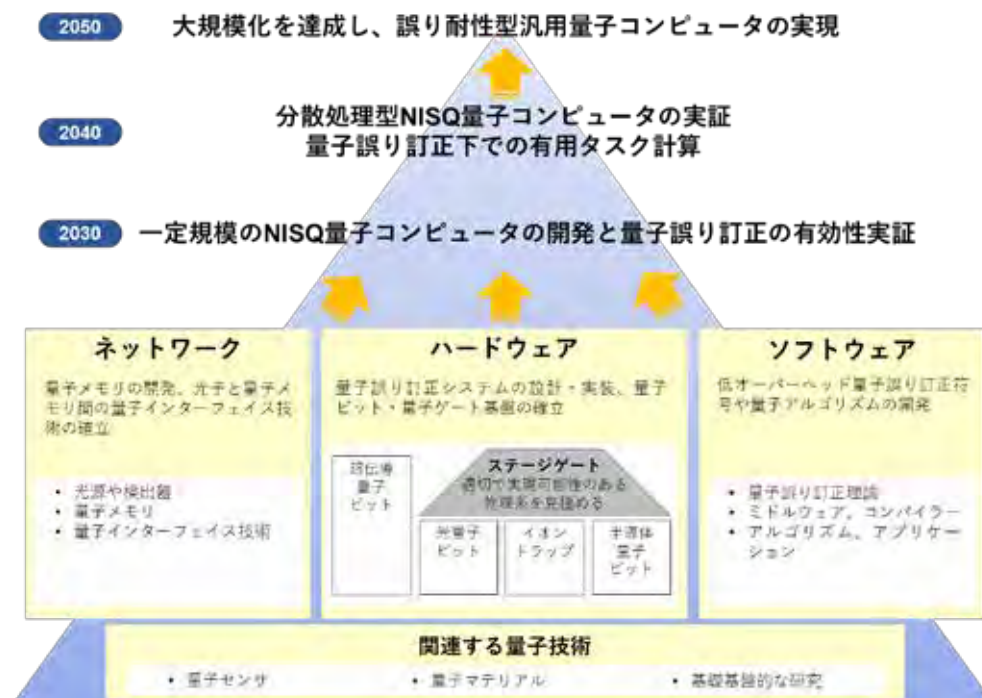


図1．誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に必要な研究開発の主な分野・領域

(2) 目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発プログラムにおいては、図1に示す通り推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域を定め、ムーンショット目標である、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に貢献する挑戦的な研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発の推進に活かす。

具体的には、量子ビット・量子ゲート基盤等のハードウェア、量子誤り訂正理論等のソフトウェア、量子インターフェイス等のネットワークに関する研究開発が想定される。

ハードウェアの研究開発については、超伝導量子ビット方式とともに、光量子ビット、イオントラップ、半導体量子ビット等の各方式の中で有望な複数の方式について並行して研究開発を進め、ステージゲートなどの適切な時期に実現可能性や大規模化の可能性等の観点から最適な方式を見極める。

なお、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課

題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

○ 2030 年

一定規模の NISQ 量子コンピュータを開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

○ 2050 年

大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する。

2050 年までに誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するためには、まず一定規模の NISQ 量子コンピュータの開発と実効的な量子誤り訂正の実証を進める。その上で、分散処理型の NISQ 量子コンピュータの実証と量子誤り訂正下での有用タスク計算の実行を達成し、大規模化に取り組む必要がある。このため、2030 年までの目標は、一定規模の NISQ 量子コンピュータの開発と実効的な量子誤り訂正の実証となる。図 2 に、本研究開発構想の実現によりムーンショット目標の達成を目指すための研究開発の進め方を示す。



図2．誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けた研究開発の進め方

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウムの Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

（１）目標に関連する分野・技術群の構造

量子コンピュータは、量子コヒーレンスや量子もつれといった量子力学的な性質を操作・制御、利活用する量子技術の代表例である。図３に量子技術の俯瞰図を示す。量子コンピュータ・シミュレーション、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアルの主要４領域と、それらを深化、発展させる共通原理・共通ツールや、それらだけではカバーできない新たな量子科学技術の種となる新学理・新技術を含む共通量子技術基盤の領域から構成される。

誤り耐性型汎用量子コンピュータの開発に当たっては、上記に加え、材料技術、マイクロ波技術、半導体集積回路で培われたプロセス技術、設計技術、周辺回路技術等の様々な技術要素を組み合わせる必要があり、挑戦的な研究開発が求められる。



図３．誤り耐性型汎用量子コンピュータに関連する分野・技術群の構造

（出典）JST CRDS 戦略プロポーザル 量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～（2019 年）を元に作成

(2) 関連する研究開発の動向

① 特許マップ

関連する特許 4,088 件の内容の類似度に基づきマッピングし、現在までの量子技術の開発状況を可視化した(図4)。類似特許のクラスターを30個特定し、大域的な構造として「量子コンピュータ」、「量子ビット・量子ゲート」、「量子通信・量子暗号」及び「量子デバイス」を同定した。特に、本目標と関連の深い「量子コンピュータ」区分には173件の特許が含まれ、「量子演算装置」と「超伝導量子コンピュータ」のクラスターを擁する。さらに、「量子ビット・量子ゲート」区分にも量子コンピュータ用途の特許が含まれている。

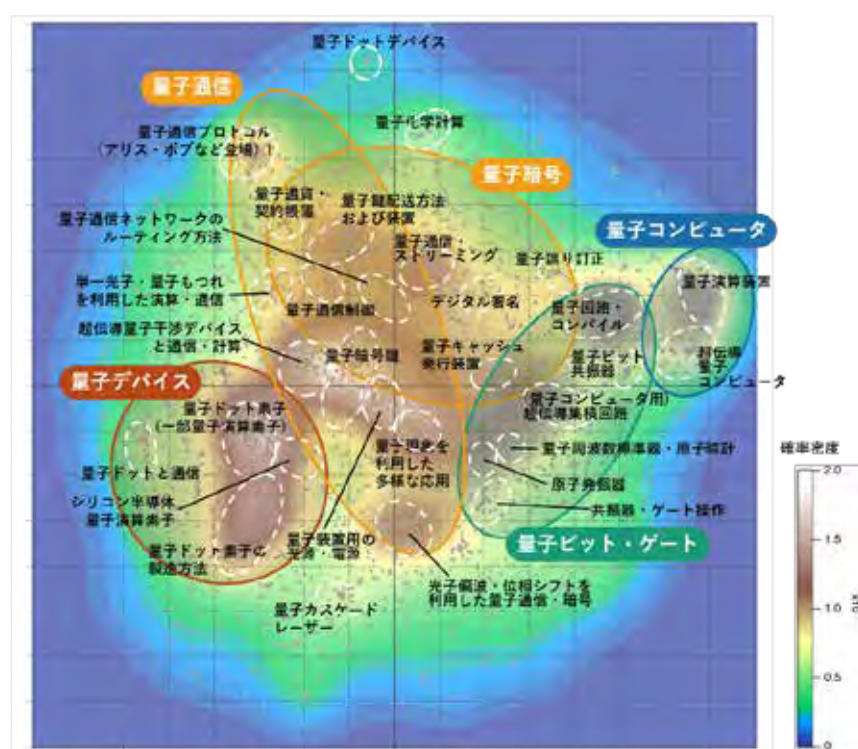


図4．量子技術関連特許マップ（カーネル確率密度推定）

(出典) JST CRDS 調査報告書 世界特許マップから見た量子技術 2.0 (2019 年)

図5には、1990年以降2018年までの29年間で6期間に分けて、それぞれの期間内に公開された特許の件数を技術領域別にプロットした。

近年(2015～18年)は他期間と比べて年数が短いにもかかわらず、公開件数はどの技術区分でも期間中最多となっている。特許マップでは「量子暗号鍵」領域を代表として「量子通信・量子暗号」区分で極めて活発な特許公開活動が行われたことが窺える一方、「量子演算装置」、「量子回路・コンパイル」、「超伝導集積回路」など、「量子コンピュータ」、「量子ビット・量子ゲート」区分においても積極的に特許が公開されている。



図5．量子技術関連特許の技術領域別の公開件数推移

(出典) JST CRDS 調査報告書 世界特許マップから見た量子技術 2.0 (2019 年)

② 論文数動向

量子技術に関する学術論文の動向を Scopus データベースで調査した。「quantum computer」、「quantum communication」、「quantum sensor」又は「quantum sensing」、「quantum simulation」又は「quantum simulator」をそれぞれタイトル・アブストラクト・キーワードに含む論文・プロシーディングス・レビューを抽出し、出版数の年次変化を図6に示した。

その結果から、量子技術の研究コミュニティの活動が世界的に活発化している様子が伺える。特に、量子コンピュータに関する論文は1994年頃から増加し始め、1999年及び2010年に文献数の増加率が変化する変曲点が確認できる。1999年は中村・蔡らによる超伝導量子ビットの発表年であり、文献中の超伝導量子ビットに関する論文はこの年を機に増加傾向にあった。

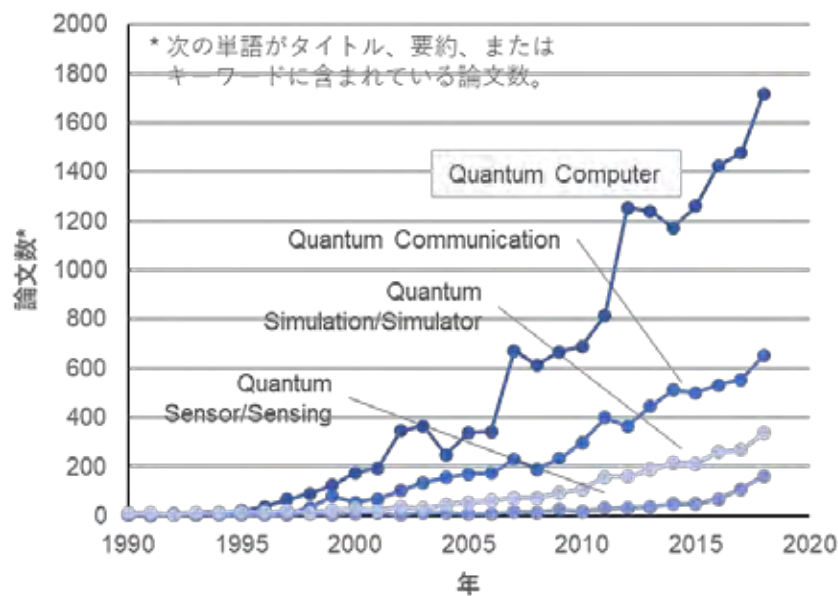


図6．量子技術関連論文数の推移

さらに、「quantum computer」を含む文献を母集団とし、コンピュータ科学に関連する用語 (algorithm、software、compiler、programming、architecture、instruction、device、network) を含む文献を抽出し、経年変化を図7に示した。ハードウェアとソフトウェアの観点からは、「device」及び「algorithm」と比べ、計算機として必須となる「software」や「compiler」に関する論文は相対的に少ない。しかし、全体としては増加傾向であり、とりわけ2010年頃からの傾きの増加は多くの技術分野で共通した傾向である。

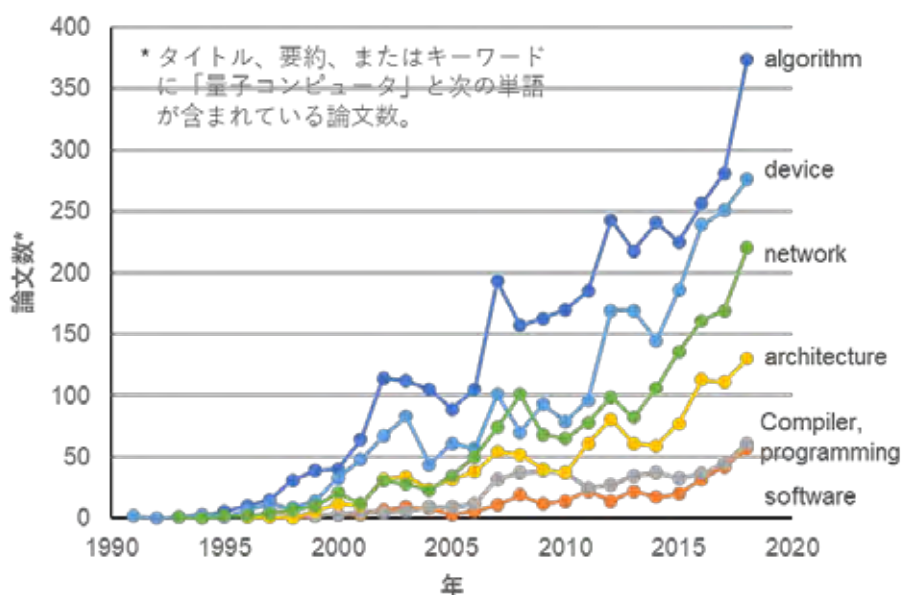


図7．量子コンピュータ関連論文数の推移

③ 量子ビット数の推移

2014 年からこれまでに発表された量子ビット数と発表者の年次推移を図 8 にプロットした。現在の量子コンピュータの研究開発の主眼は、量子誤り訂正符号の実装と、中規模の量子コンピュータの実現である。また、その中でハードウェア的な実現可能性が見えてきた NISQ 量子コンピュータを、量子超越性の実証(概ね 50 量子ビット以上、ゲート誤り率は 0.1%を切る精度が必要) や量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの試行など、何らかの計算タスクに利用する動きも見られる。全体としては、量子誤り訂正符号の有効性実証とその上での計算タスクの実行は、究極のゴールである誤り耐性型汎用量子コンピュータに至る重要なマイルストーンとされている。

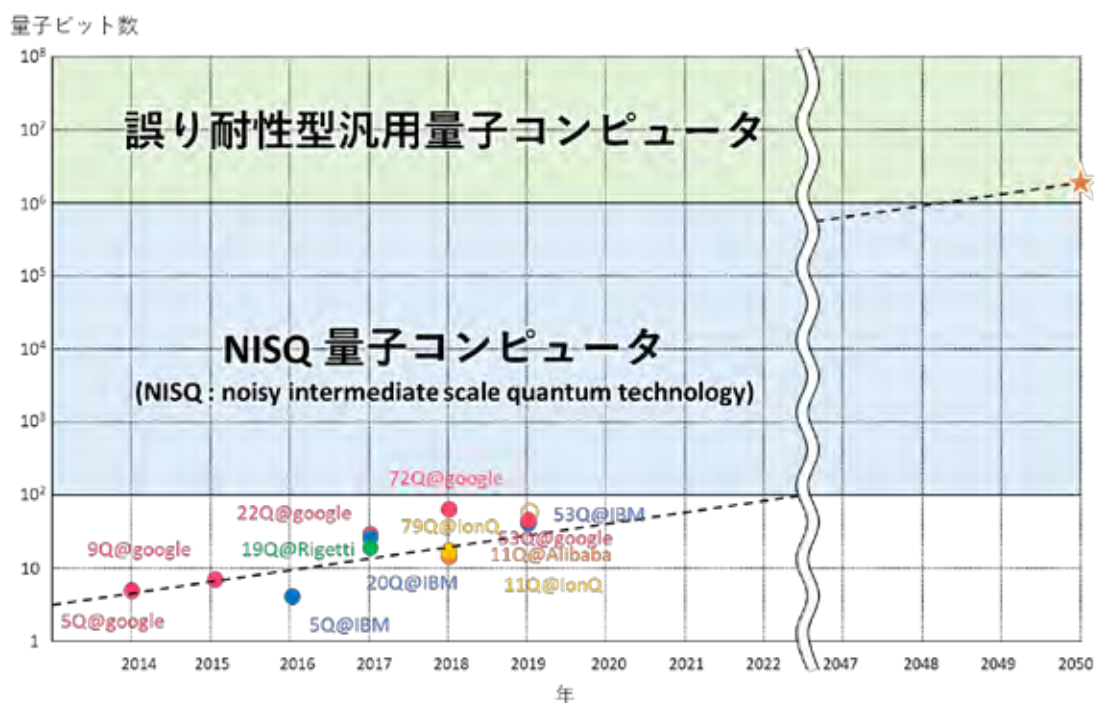


図 8 . 量子版ムーアの法則

(3) 日本の強み、海外の動向

研究開発の実施に当たり、海外の研究機関との連携・役割分担を図るためには、米国や欧州など量子技術に高い研究技術レベルを有する国・地域との間で、我が国の強み・競争力、研究開発に関するメリット・デメリットを勘案した上で、具体的協力を推進していくことが肝要である。そこで、ハードウェア、ソフトウェア及びネットワークの国内外での研究開発について、国内外の取組状況を以下のとおりまとめた。

① ハードウェア

海外では、グローバル IT 企業や大学を中心にハードウェア、ソフトウェアとも米国が強く、超伝導量子ビット、イオントラップ方式の研究開発が複数チームによって進められている。中国は産学官で超伝導量子ビット方式を追従中であり、開発競争が激化している。総じて、国外では全ての量子ビット実装方式で量子ゲートが実現されている。

国内の取組状況として、超伝導量子ビットについては、1999 年に日本が世界で初めて制御可能な量子ビットの実験に成功し、世界的研究者が研究をリードしているものの、多ビット化のためには、量子ビットの小型化、配線、ビット精度の不揃いの解消など、設計・アーキテクチャを含めた工学的課題の克服が必要である。イオントラップについては、日本国内の研究者層は極めて薄いため、研究者の育成・確保が特に重要である。併せて、多体系物理の理解に基づく量子ビット制御方法の確立など基礎研究も必要と認識されている。光量子ビットについては、ループした光回路において常温で安定した量子もつれを大量に発生させることにより、誤り訂正を可能とする汎用な光量子コンピュータを目指した研究が行われている。半導体量子ビットの系は、従来の CMOS 回路技術との整合性が良く、その豊富な技術基盤を量子コンピュータ開発に転用出来ると期待されているが、高忠実度の 2 量子ビットゲートの実装などに課題がある。

② ソフトウェア

米国では、大学やグローバル IT 企業を中心に、ハードウェアと同様、研究開発が盛んに実施されている。米国国立科学財団の支援によるプロジェクトが実用スケールの量子コンピュータシステムの研究やイオントラップ型のアーキテクチャの研究を開始している。IT 企業は量子ソフトウェア開発プラットフォームを公開し、オープンソースのソフトウェアライブラリも拡充している。また、欧州は 2017 年に Quantum Software Manifesto を発表し、ハードウェアと量子ソフトウェアの統合的研究、量子ソフトウェア、アルゴリズムの開発、新しい通信プロトコルの開発を実施中である。

国内の取組状況としては、大学や国立研究所等において量子情報理論やアルゴリズム研究が実施されている。量子コンピュータエミュレータについては、大学やベンチャー企業が開発したものが公開・利用されている。また、ベンチャー企業が、ハードウェア開発企業と使用契約を結んだ上、ソフトウェア開発及びコンサルティングを実施し、社会実装を目指している。国内の研究者やエンジニア等の数は十分ではないが、国際的に高い評価を得ている優秀な日本人研究者がおり、誤り耐性理論などの研究実績がある。

③ ネットワーク

欧州では Quantum Internet Alliance を立ち上げ、都市間の量子通信の実験を組織的に進めるなど、世界中で量子ネットワークに関する研究開発が実施されている。また、中国は人工衛星利用による衛星-地上間 QKD (Quantum Key Distribution: 量子鍵配送) の実験に成功した。

国内の取組状況としては、全長 100km 程度のテストベッド Tokyo QKD Network が 2013 年に構築され、運用評価を継続中であり、分散ストレージとの融合等で世界をリードしている。また、日本では、冷却原子量子メモリと通信波長光子の量子もつれを生成する実験に初めて成功し、世界的に注目されている。日本が高い作製技術を有するダイヤモンド NV センタ等を用いた単一光子源が注目されている。量子中継の基礎技術として、ダイヤモンド中の炭素同位体を量子メモリとして用い、量子テレポーテーションの原理を応用し、光子の量子状態を維持したまま盗聴の可能性なく情報を転写することに成功している。さらに、全光量子中継の実証実験も世界に先駆けて成功している。