

今後、ロボティクス技術が発展していくことはとりもなおさず、その技術自体よりもその技術を目的達成のために活用するかというスキルが重要になることを示している。そしてのスキルは、実際に技術を入手し、トライ&エラーを重ねていくことでしか得られないものである。

ロボティクスの発展は民生利用における技術の位置づけや利用をこのように変えていくのである。

5. 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ

日本においてこうした技術の喪失・搾取・劣位が発生することで生じるリスクは全体的には 2 点ある。第一に、先述したように“スキルの時代”に突入しつつあり、この“スキル”が実際に技術を活用し試行錯誤する中で得られるものである以上、技術を失うことは技術の使い方すらわからなくなる。これは換言すれば、スキルがなければ、その技術があっても意味がないということだ。もしもこのスキルの蓄積が技術を活用せず、もしくは技術自体を喪失することで蓄積できなければ日本は民生上も軍事上も何ら成果を出せない国になる。これは 19 世紀の清朝やオスマン帝国のような最新技術を導入したが、宝の持ち腐れになった国と同様の運命になることを意味している。

第二は、こうした第四次産業革命の成果を喪失・搾取・劣位した場合、過去の産業革命で同様の憂き目にあった国と同じ運命を辿ることになる。第一次産業革命である蒸気革命に乗り遅れた清朝は、欧米列強に軍事的にも経済的にも蹂躪され、後発的に産業革命を自家薬籠中のものとした日本にも負けた。かつては東ローマ帝国を滅ぼし、ハプスブルグ帝国という欧州の列強を軍事的に圧迫したオスマン帝国も第一次産業革命に遅れた結果、崩壊へと追いやられた。

しかし重化学工業や電気テクノロジーを中心とする第二次産業革命になると、日本は主に電気テクノロジーで劣後し、それが第二次大戦におけるレーダーや通信といった分野での劣位となり、敗戦の大きな一因となった。世界を米国と二分したソ連もまた第二次産業革命に対応できず、その命数を失った。

一方、日本は戦後はこの第二次産業革命を再び自家薬籠中のものにする、日本は経済大国として 1980 年代には世界のトップに躍り出たが、やはり第三次産業革命の電子工学や情報技術になると当初は優位性を発揮したが 90 年代から怪しくなり、失われた 30 年と共に没落を迎えた。

このようにその時代における産業革命を先取できるか、もしくはキャッチアップできるか、継続的に自家薬籠中の物にできるかは、国家の軍事上も経済上も命運を左右するものとなっている。換言すれば、第四次産業革命を代表するドローン等のロボティクス技術の喪失・窃取・劣位は、かつてのソ連や清朝と同じ運命を日本に強いるものとなる。

次に個別の技術だが、①非 GPS 環境における AI による画像認識や物体検出による飛行、②複数の群れでの飛行、③拡張現実との連携については、いずれもリスクは高い。

まず①が存在しなければ民生利用においては陸海空ともに閉所環境での運用や人的コストの削減が図ることが出来ない。例えば配管や地下の共同溝といった空間における無人アセットの活用は難しくなる。軍事的にも GPS 妨害は市販品でも可能となっている以上、非 GPS 環境下での無人アセットの活用が出来なければ陸海空宇宙いずれにおいてもまともな軍事利用はできない。

また AI が自律的に無人アセットを運用可能になれば、それは電子戦に対する強靭性を無人アセットが手に入れることになる。逆にいえばこうした技術が無ければ、まともな運用は難しくなる。

特に陸における無人アセット UGV は戦場の地形—デコボコしており起伏や障害物だらけ—における自律運用—人間による遠隔操作がかなり必要—が課題となっており、こうした技術は有用性に大きくかわる。

次に②については民生利用においては、複数の無人アセットをサイバーフィジカルシステムを通じて運用することの効率性や効果はいうまでもなく、民生利用でも必須である。特にこの点では特許数でみる限りでは日本にも可能性はなくはない。個別によるバラバラの運用とチームワークによる運用のどちらが優位性があるかは明らかだ。この技術で劣後した場合、経済的な損失が大きくなることは明白だ。

軍事利用においても同様であり、個別のバラバラの運用とチームワークによる運用では後者に一日の長があることは説明するまでもない。喪失した場合、第二次大戦の中期以降において通信機能がまともに機能しない日本軍の航空戦力が、高性能な通信機で連携する米軍の航空戦力に一方的に撃墜されたことの二の舞になりかねない。

最後に拡張現実との連携だがこれは民生も軍事も、扱う人間の能力を飛躍的に向上させる。これが可能となれば、個人が目前の状況を把握しながら、しもべのように複数の無人アセットを扱いつつ、またそれらが得た生情報をサイバー空間で処理したインテリジェンスとして判断できるようになるからだ。

多くの技術があるがロボティクスにおいてはこの三点を 100 点として優先していくのが肝要だろう。しかしながら繰り返しになるが、この技術それ自体よりもそれを扱うスキルが重要であり、そのため技術開発や漏洩防止であるということをお忘れにならない。

第 9 節 バイオテクノロジー (Biotechnology)

生物学から発展したバイオテクノロジーは、基礎科学分野として長い研究の歴史を有すると同時に、あらゆる技術領域で極めて重要な要素技術として注目されてきた。生命の遺伝情報を司る遺伝子の核たる高分子生体物質、デオキシリボ核酸 (DeoxyriboNucleic Acid、DNA) の解析やタンパク質など、生

命体や物質の要素を解析することによって発展を遂げてきた。そうした解析的アプローチによる知見の蓄積や物質の解明が進むことで、それらの物質を組み替え、あるいは合成、創出する技術の研究開発が進められてきた。

今日では合成的アプローチによる生命体や物質の再合成、製造、創出が可能となっている。そうした生命体や物質を再合成、製造、創出する技術を応用した研究領域として、「合成生物学」が欧米を中心に定着しつつある。とりわけ近年、合成生物学分野の研究蓄積が進み、ゲノム編集技術が社会を大きく変革し得る新興技術として注目を集めている。

ゲノム編集技術をはじめとするバイオテクノロジーは、ウイルスや生物兵器などの軍事用途はもちろんのこと、医療や食糧分野等の民生用途で技術革新をもたらすことが期待されている。たとえば、後述のタンパク質合成に関する研究は、医療分野の感染症ワクチン開発等に重要なイノベーションをもたらしてきた。また、遺伝子配送 (Gene Delivery) の研究はウイルス・遺伝子研究の分野でこれまで盛んに行われてきた経緯があり、こうした生物工学的な研究蓄積が、医療はもちろんその他の先端科学技術分野で幅広く応用されることが期待されている。

このように、合成生物学とその応用技術は、生物学における新たなブレークスルーをもたらし、あらゆる分野のライフサイエンス研究を発展させている。既存の生命体や物質を再合成、製造するだけでなく、生命体と人工物からなる人工細胞を創出するハイブリッド生命システムなどの研究開発によって、医療はもちろん、動植物の品種改良や材料の開発をはじめ、さまざまな分野への応用可能性が広がりにつつある。

また、近年では AI 技術やマシンラーニング等の関連する先端科学技術を用いて、シミュレーションやモデリングを行う等の研究も進められており、先端科学技術としてのバイオテクノロジーへの期待と注目は益々高まっていると言って良い。

バイオ技術は極めてマルチユースの性格が強い科学技術である。後述のとおり、米国を例に取っても、バイオ技術は医療機関等での研究が重ねられてきた一方で、国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Planning Agency : DARPA) が軍事技術への応用の研究を進めるほか、エネルギー省 (Department of Energy) も傘下の研究所でバイオエネルギーの分野で積極的な研究を行っている。また、2000年の炭疽菌事件以降は、テロ対策の分野でもバイオ技術に関する研究が推進されてきた。

中国も、こうしたマルチユースな性格から、欧米に引けをとらないスピードで研究開発を進めており、政府直轄の研究はもちろんベンチャー企業を含む民間企業の台頭も目覚ましい。以下、軍事技術及び民生技術を含むマルチユースの観点からバイオテクノロジーにおけるこれまでの研究動向を概観するとともに、今後の研究開発が期待される技術領域についても分析を試みる。またこうしたバイオ技術の研究開発動向及び技術政策について米国と中国を対象に分析する。

1. バイオ技術の研究動向

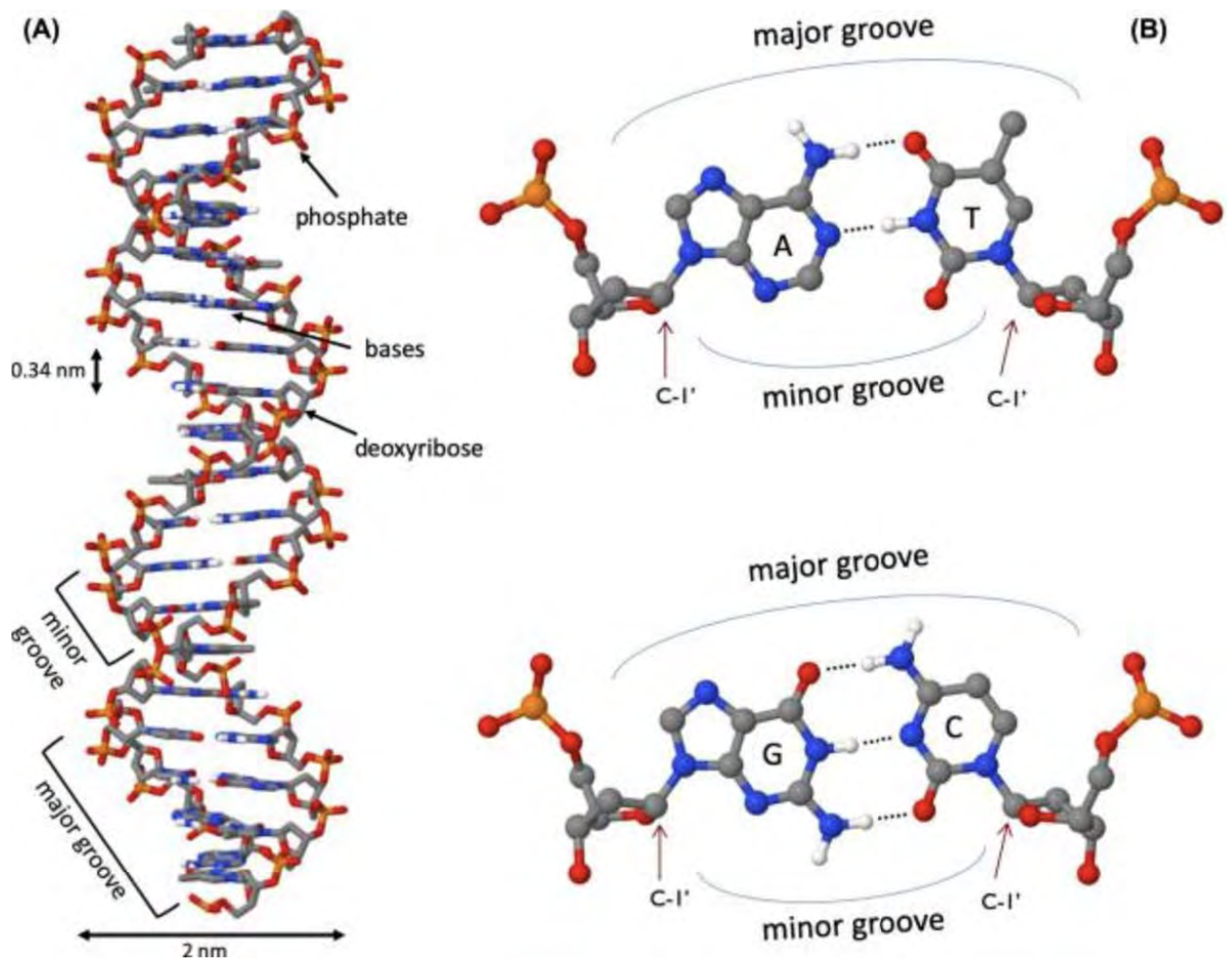
(1) 核酸とタンパク質合成 (Nucleic acid and protein synthesis)

核酸には、(デオキシリボ核酸(Deoxyribonucleic acid: DNA)とリボ核酸(Ribonucleic acid: RNA)の2種類がある。DNA は遺伝子情報の集まりであり、いわば我々の身体を作るための設計図の役割を果たす(図 9-1、9-2)。

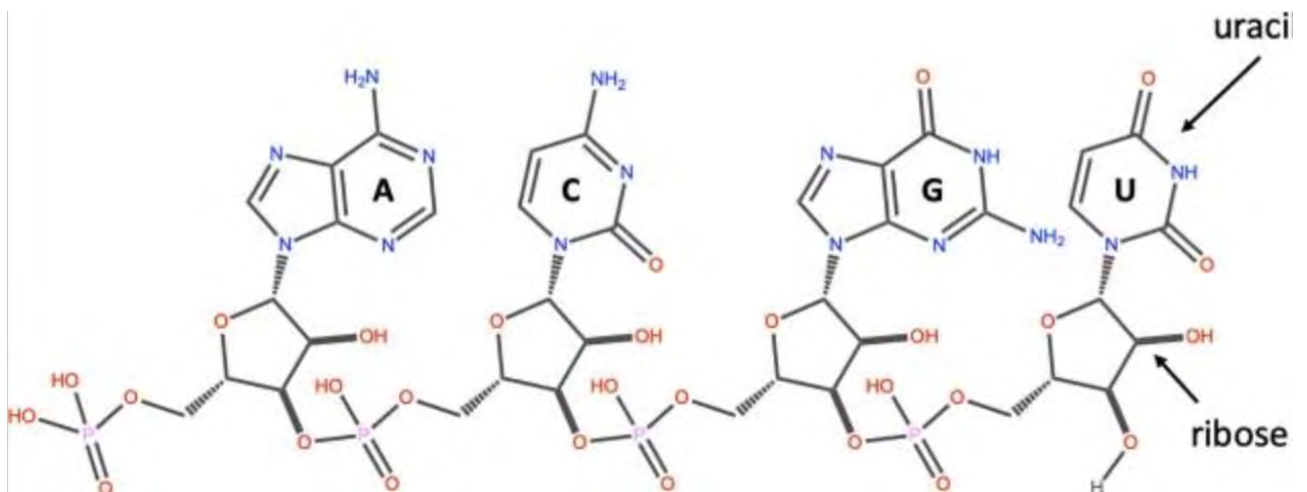
一方で、RNA は、その情報の一時的な処理を担い、DNA と比較して、合成・分解される頻度が高い核酸である。身体を形成するための遺伝子情報は、「DNA→RNA→タンパク質」という流れで伝達され、タンパク質によって実際の身体の形状が形作られる仕組みになっている。DNA から RNA に伝達された遺伝子情報は、RNA で処理工程を経る(図 9-3)。その後、遺伝子情報は「翻訳」(translate) され、実際にタンパク質が形成される。RNA はタンパク質合成時の遺伝的メッセンジャーとして理想的である。

核酸研究は、こうした核酸の代謝および/または相互作用に関与する核酸およびタンパク質の物理的、化学的、生化学的および生物学的側面に関する研究を中心に行われている。

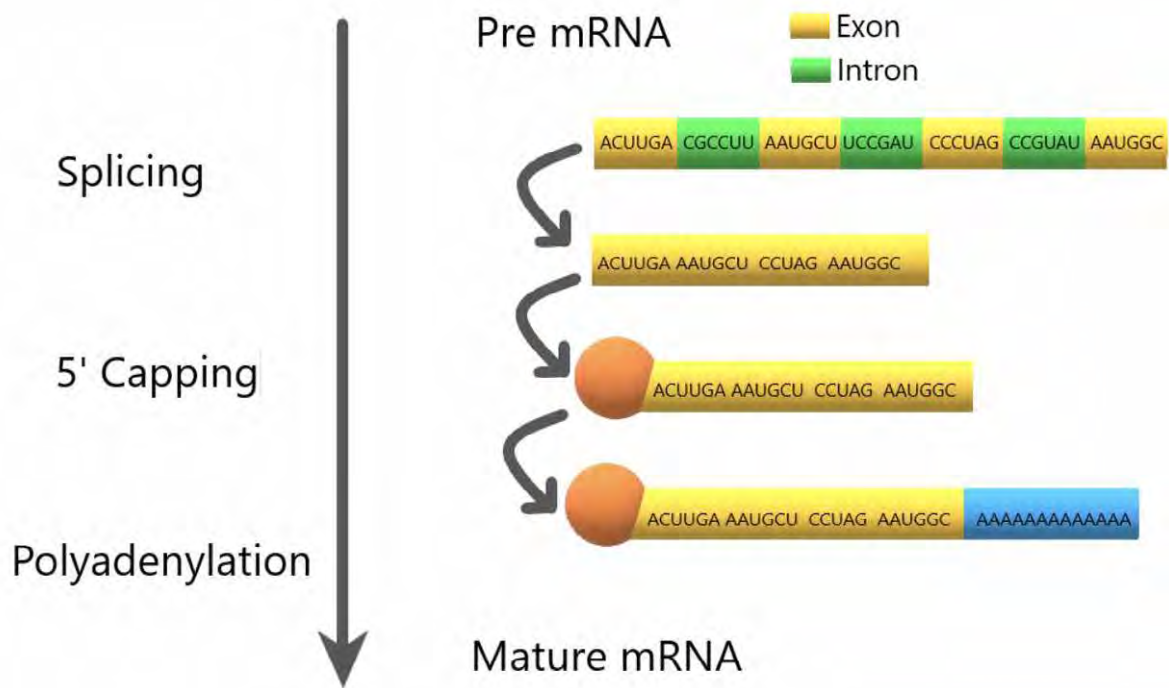
合成生物学は、デザインされたタンパク質と核酸ポリマーを生産するために既存の生物学的システムをプログラミングすることに焦点を当てている。この分野は、遺伝子コードの拡張や、生細胞におけるタンパク質合成の間違いやマイクロ RNA 活性の観察のための新しい蛍光プローブなど、多様な応用がある。さらに、RNA 治療薬の提供も進展しており、米国 FDA は RNA 医薬品を承認しつつある。



(図 9-1 DNA の構造)



(図 9-2 RNA の構造)



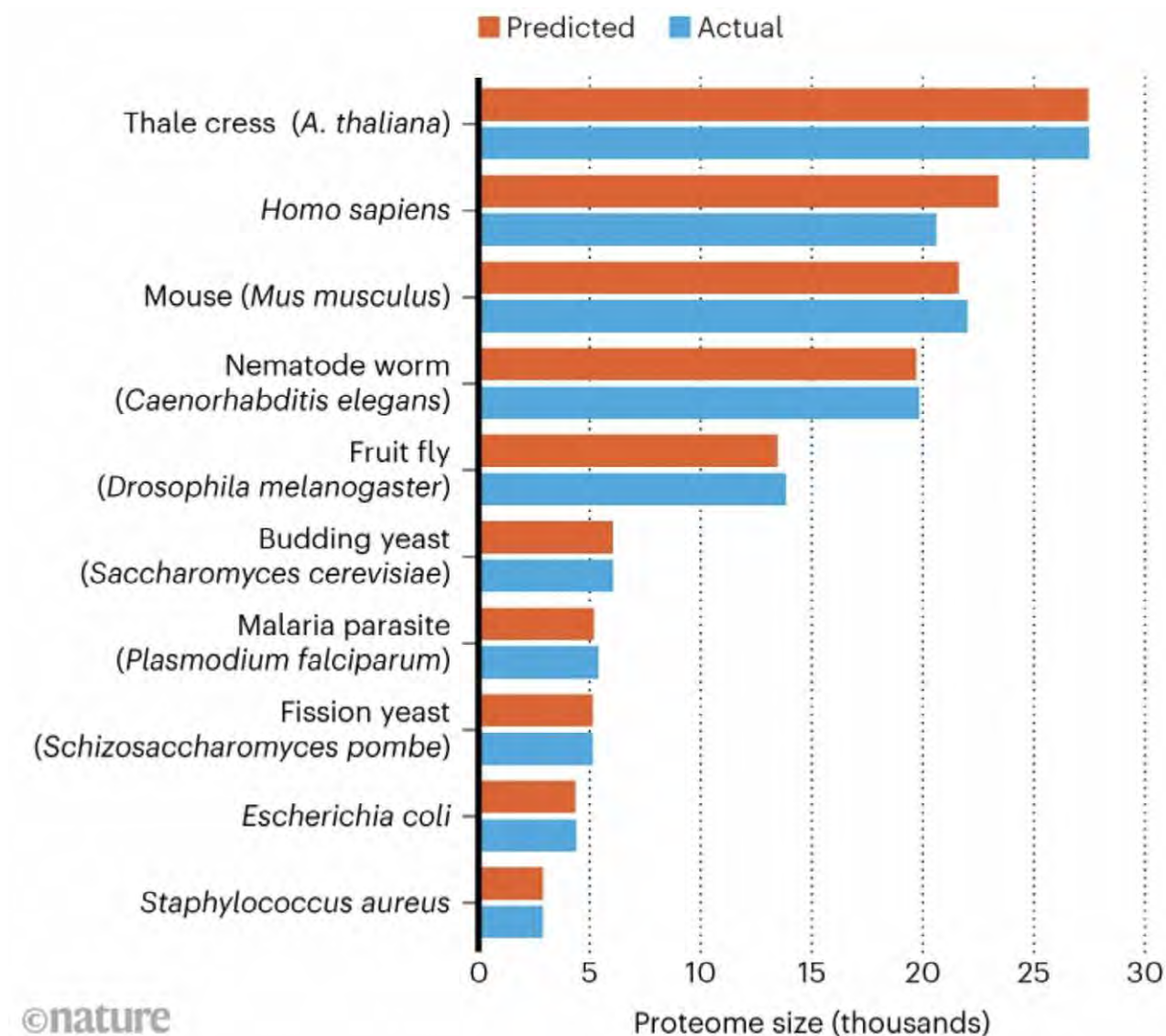
(図 9-3 RNA での処理の過程)

(2) 設計ツールを含むゲノム・タンパク質工学 (Genome and protein engineering including design tools)

こうしたタンパク質形成を利用して、遺伝子機能を操作しようとするのが、ゲノム・タンパク質工学分野で進められている「ゲノム編集」である。これは、ゲノム内の DNA 配列を意図的に切断し、切断された DNA が修復される機能を利用して、必要な遺伝子の機能が書き換えられることを狙った技術である。近年では、機械学習モデルや AI 技術を駆使した手法が開発される等、他の新興科学技術との接点が多い技術分野である。たとえば、AI 技術を用いて、タンパク質分子の構造を事前に予測する技術が開発されている。AlphaFold と呼ばれるこの AI によって、人体とそのほか 20 の微生物のタンパク質の構造をほぼ正確に予測することにユニバーシティ・オブ・ロンドンの研究者らが成功している(図 4)。このように、他の先端科学技術を用いたより高度なタンパク質工学技術が日々開発されている。

遺伝子やタンパク質を設計するための計算ツールやアルゴリズムも複数開発されており、遺伝子設計ソフトウェアツールは、主に遺伝子最適化を目的として、あらかじめ定義された特徴に基づいて、タンパク質コード遺伝子の再設計を支援することを目的としている。大規模な DNA 合成、クローニング、DNA 配列決定、ビルディングブロックの設計・構築技術の進歩は、遺伝子構造、タンパク質機能、遺伝的組織の理解を広げるための実験を促進するものとなっており、近年では、生命学者が独自の合成遺伝子や構築物を作成できるようにすることを目的とした多数の計算ツールが開発されている。

このように、ゲノム・タンパク質工学は、研究の多くの面で価値のある意味を持つタンパク質を生産することが活発に進められており、そうした研究成果を医学やバイオテクノロジーに顕著な利益をもたらすものへと還元している。



(図 9-4 AlphaFold によるタンパク質構造の予測結果)

- (3) マルチオミクスやその他の生体計測学、バイオインフォマティクス、予測モデリング、機能表現型の分析ツール (Multi-omics and other bio-metrology, bioinformatics, predictive modeling, and analytical tools for functional phenotypes)

人体の機能を司る様々な物質を一括して分析する手法であるマルチオミクス研究は、DNA、RNA、タンパク質、代謝産物などから得られる多様なオミクス層を横断する調節ユニットを明らかにするものである。これによって、生物学的プロセスに関連する分子マーカーを特定し、生物学的プロセスの基

礎となるメカニズムや、分子機能、相互作用、細胞運命を理解するための洞察を得て、分子表現型を明らかにする。

マルチオミクスは、予防医学の時代において、予測または予後のバイオマーカーや新しいターゲット薬の発見を支援することが期待されている。マルチオミクスを応用する究極の目的は、遺伝子型と表現型の関係を理解することによって、健康診断の収量を増加させたり、病気の予後を改善したり、あるいは農業生産高を向上させることにある。

マルチオミクスデータは複雑であり、オミクス駆動生物学、データ科学、情報科学、計算科学の融合を必要とする。複雑なヒト疾患の発見や機能研究のために、マルチオミクスのデータの統合的な分析が必要となる。これらは、異なる種類のマルチオミクスデータに対する分析や、新たなマルチオミクス研究を導くための研究デザインを提供するものとなる。こうしたデータ解析は、AI やビッグデータ解析、量子コンピューティングと組み合わせることで可能となるため、新興技術の複合領域としても今後の研究が期待される分野である。

(4) 多細胞システム工学 (Engineering of multicellular systems)

多細胞システム工学は、合成生物学を応用して、自然組織システムと並んで多細胞システムを研究可能なモデルシステムとして設計するものである。多細胞システムは、器官様の特徴を模倣するために使用される強力なツールとして出現し、その多くは生体内で見られるものと同様に不均一な複雑さを持つ。

細胞同士の相互作用のルールを自由に設計し、細胞集団のふるまいを検証することで、組織形成の仕組みを理解し、新たな組織構築技術の開発が進められている。現在、様々な用途のための合成多細胞システムを構築するための実験が行われており、複雑な多細胞システムがどのように発達し機能するかをリバースエンジニアリングすることは、バイオエンジニアにとって大きな課題となっている。

すなわち将来的には、こうした細胞間の相互作用からなる多細胞システムを作り出すことで、医療分野において細胞のみならず器官をデザインすることが期待される。

(5) ウイルスおよびウイルス（遺伝子）デリバリーシステム工学 (Engineering of viral and viral delivery systems)

遺伝子デリバリーシステム工学は、①ウイルスベース、②非ウイルスベース、③複合ハイブリッドシステムに分類される。

①のウイルスを介した遺伝子デリバリーシステムは、複製に必要な遺伝子領域を欠損するか、肉腫遺伝子のように他の遺伝子で置換されたゲノムを持つウイルスによる。ウイルスの遺伝子導入には、ア

デノウイルス、レトロウイルス、レンチウイルスが用いられる。②非ウイルス性遺伝子導入システムには、エレクトロポレーションやソノポレーションなどの物理的方法、リポソームやポリマーなどの化学的方法、エキソソームなどの生物学的方法がある。③複合ハイブリッドシステムは、遺伝子導入の効率を向上させるために、ウイルスベクターと非ウイルスベクターの両方を使用する。

遺伝子デリバリーシステムの開発における近年の研究では、後天性および遺伝性疾患の治療におけるウイルスベクターおよび非ウイルス性遺伝子デリバリーシステムの潜在的な応用が議論されている。ウイルスベクターの使用は、高い形質導入効果をもたらすが、毒性を引き起こす可能性がある。一方、非ウイルスベクターは、一般に毒性は低い、ウイルスベクターよりも形質導入効率が低いとされている。遺伝子を如何に効率的かつ安全にデリバリーするかがシステム設計上重要であり、そうしたデリバリーシステムは、とりわけ遺伝子治療の発展に寄与することが期待される。

(6) バイオ製造・バイオプロセス技術 (Biomufacturing and bioprocessing technologies)

バイオ製造・バイオプロセス技術は、生物学的製剤を製造し、流通や患者の治療のために精製する製造プロセスに関する技術領域である。次世代バイオ医薬等の製造技術やバイオプロセス技術の発展によって、新たなバイオ医薬品や堅牢で収量の高い細胞株の開発が期待されており、これは生物医学研究や製薬イノベーションの進歩を支えるものとなる。

2. 米国におけるバイオ技術の用途

バイオ技術は極めて幅広い分野での応用が可能な有望な技術であるため、各国の政府や研究所が研究投資や研究開発を継続して行っている。とりわけ米国は、パンデミックを含むさまざまな生物学的事象に対して広く深い防御を提供するために、さまざまなバイオテクノロジーに投資している。米国における合成生物学の代表的な研究開発主体としては、エネルギー省、国防総省 (Department of Defense)、全米科学財団 (National Science Foundation)、米国国立衛生研究所 (National Institutes of Health)、農務省 (United States Department of Agriculture)、国立がん研究所 (National Cancer Institute) などの政府機関をはじめ、J. クレイグ・ベンター研究所 (J. Craig Venter Institute)、ハーバード大学メディカルスクール、マサチューセッツ工科大学 (MIT)、カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkeley)、カリフォルニア大学サンフランシスコ校 (UCSF)、カリフォルニア工科大学 (California Institute of Technology) などが挙げられる。また、軍事応用面では、DARPA をはじめ、陸、海、空軍の各研究所で研究が進められている。

たとえば、エネルギー省では、先端コンピューティング技術を用いたバイオ技術の研究やゲノム研究、免疫学研究、さらには医療器具やワクチンのサプライチェーンやロジスティクスに関わる研究等分野

横断的な複合的な研究がされている。特に、ゲノム研究に関しては、エネルギー省の統合ゲノム研究所 (Joint Genome Institute、JGI) において、より専門的な研究が行える体制が確立されている。

2018 年には全米アカデミーズが報告書『合成生物学時代の生物防衛』を公表した。同報告書では、合成生物学の軍事・安全保障への応用分野として、①分子バイオリボット、②生物電池、③生体材料、④バイオセンシング、⑤バイオ製造（細胞培養など）、⑥バイオミメティック（生体模倣技術）、⑦バイオ（DNA）コンピューティング、⑧バイオ暗号化、⑨ブレイン・コンピューター・インターフェースを挙げている。このようにバイオ技術は、民間のみならず公的利用や軍事利用を想定したマルチユース性が顕著な分野の1つであると言える。

3. 中国におけるバイオ技術研究

(1) 合成生物学の研究開発を加速する中国

2021 年 5 月 28 日、中国の習近平国家主席は、中国科学院第 20 回院士大会、中国工程院第 15 回院士大会、中国科学技術協会第 10 回全国代表大会の講話において、「量子情報、幹細胞、脳科学の最先端の方向で、多くの重大な独自の成果が得られた」と研究成果を強調した。習国家主席は、「生物科学の基礎研究と応用研究は急速に発展している。科学技術のイノベーション精度は著しく強化され、生物の分子と遺伝子の研究は精確な制御段階に入り、生命の認識、改造から、生命の合成、設計へと歩み、人類に福祉をもたらすと同時に、生命倫理の挑戦をもたらしている」と述べるなど、生命科学や合成生物学の重要性を認識し、同分野における研究が中国で加速していることをにじませた。

前述の 2018 年に全米アカデミーズによる報告書『合成生物学時代の生物防衛』が公表されたことは、中国国内で大きな衝撃を以て受け止められ、軍事・安全保障分野を含む生命科学や合成生物学の研究開発において参考にされている。

中国人民解放軍の機関紙『解放軍報』では、こうした応用分野の研究開発を進めることで、「軍事生物科学技術という新興分野において、機先と主動を制すれば、より大きく、より長期的な軍事技術の優位を求めることができ、国際軍事競争の新たな局面において主導的地位を占めることができる」との論評記事が掲載されている。

(2) 中国における合成生物技術の位置づけ

合成生物学を応用した合成生物技術（シンセティック・バイオテクノロジー）は、イノベーションに力を入れる中国が最も重視している技術分野の1つである。

2006 年に中国政府が策定した「国家中長期科学技術発展計画要綱」では、バイオテクノロジーを中長期的に発展させるべき重点分野の1つと位置づけ、同分野の先端技術として、①標的分子の発見および

び同定技術、②動・植物の品種と医薬品の分子設計技術、③遺伝子操作とタンパク質の工学技術、④幹細胞に基づく人体組織工学技術、⑤次世代の産業バイオテクノロジーを掲げた。さらに、この中長期計画をブレークダウンする形で、「バイオ産業発展第 11 次 5 か年計画」（2006～2010 年）を策定した。バイオテクノロジーはその産業化に向けて、2010 年に戦略的新興産業の 1 つとしても位置づけられ、研究開発が進められてきた。

第 13 次 5 か年計画（2016～2020 年）では、さらに合成生物技術と再生医療技術にも焦点が当てられ、合成生物技術とその関連産業の発展に重点が置かれるようになった。同計画では、バイオ産業に関する重点分野として、①バイオ医薬新体系の構築、②生体医工学の発展水準の向上、③生物農業（バイオ・アグリカルチャー）の産業化の発展、④バイオ製造の大規模な応用の推進、⑤バイオサービスの新業態の育成、⑥バイオエネルギーの発展モデルの創出が掲げられた。

中国がこうした合成生物学の発展に重点を置いていることを象徴するのが、合成生物学に関する国家技術イノベーションセンターの創設に向けた動きである。国家技術イノベーションセンターとは、2017 年 10 月、中華人民共和国科学技術部と財政部、および国家発展改革委員会が発表した、「第 13 次 5 か年計画国家科学技術イノベーション基地と条件保障能力建設特別プロジェクト計画」に基づくものである。この国家科学技術イノベーション基地に中国が特に重点を置く科学技術分野の研究開発を集約することで、クラスターによるイノベーション促進が企図されている。

さらに同年 11 月、科学技術部は「国家技術イノベーションセンターの建設工作ガイドライン」を発表した。このガイドラインに基づいて、これまでに「国家高速鉄道技術イノベーションセンター」、「国家新エネルギー自動車技術イノベーションセンター」が創設されているが、中国が力を入れている高速鉄道や新エネルギーに次いで、第 3 の国家技術イノベーションセンターに合成生物技術が選ばれた。この「国家合成生物技術イノベーションセンター」は、2019 年 12 月に天津港保税區で建設工事が着工しており、総建設規模は約 18 万平方メートル、総投資額は約 20 億元、2022 年に完成予定となっている。

また、これに先立ち、2018 年には国家重点研究開発計画として「合成生物学重点特別プロジェクト」が開始された。同プロジェクトでは、ゲノムの人工合成、高機能のシャーシ細胞、人口転写因子と遺伝子回路、人工細胞の合成代謝と複雑な生態系、実現技術システム、生命倫理・安全評価といったテーマが重点研究開発分野として指定されている。このことから、中国が合成生物学とその応用に国を挙げて取り組もうとしていることが伺える。

(3) 中国による合成生物学とその応用技術の研究

このように国の全面的なバックアップの下で進められている中国の合成生物学に関する研究は、近年、公表ベースでも多くの研究成果が報じられている。ただし、そうした中国の合成生物学の研究には生命倫理を揺るがすようなものも少なくない。たとえば、代表的なのが、CRISPR/Cas9 によるヒト胚のゲノム編集、いわゆる「ゲノム編集ベイビー」事件である。

2018年11月25日、賀建奎・南方科技大学准教授（当時）が国際会議においてゲノム編集による HIV ウイルスに耐性のある遺伝子をもつ双子のクローンを誕生させたと発表した。これに対して、同月29日、米・英・日など8か国14名の研究者らが、賀氏の研究や実験を非難する共同声明を発表するなど、国際的な批判が相次いだ。即日、中国政府は、賀氏の研究活動の中止を命令し、翌2019年1月21日には、広東省が予備調査による結果を公表、南方科技大学が賀氏を解雇処分とした。さらに同年12月30日には、深圳市南山区人民法院による第1審で、賀氏に懲役3年、罰金300万人民币の実刑判決が下された。

一方、2019年1月23日、中国科学院神経科学研究所が世界初の体細胞クローン疾患モデル猿の誕生に成功と発表した。これは、ゲノム編集技術と体細胞クローン技術を使い、「コア遺伝子」を抽出することにより、体内時計障害の程度が異なる5頭の猿を作成し、さらにその中から体内時計障害が最も深刻なマカクザルをクローンの「原型」にして体細胞の細胞核を取り出すことで、最終的に体内時計の機能を失わせた全く同じ5頭のクローン疾患猿の作成に成功したという研究内容となっている。

また、2021年4月15日には、学術雑誌「Cell」において、米国ソーク研究所と中国の昆明理工大学の研究チームが、ゲノム編集・細胞混合により、ヒトとサルのハイブリッド（キメラ）胚の作成に成功したことが発表された。これは、カニクイザルから摘出した卵子を受精させ、受精から6日後の受精卵にヒトの人工多能性幹細胞（iPS細胞）を25個注入して培養し、そのキメラ胚が20日目までの成長に成功したという内容である。

このように、中国では、ヒト胚の「ゲノム編集」によるクローン技術を直接行う事例は報じられなくなった一方で、そうした技術をヒトにより近いサルを用いた研究により、その技術的な歩みを止めることなく応用シーンを広げることが試みられている。

このほか、2015年の中国人民解放軍軍事医学研究院における博士論文では、合成生物学に基づく地雷検出法に関する研究が公表されている。同研究は、地雷探知にバクテリアを使用し、バイオセンサーによって、地雷検出に対する個人の主観的な違いの影響を効果的に回避し、地雷検出の客観的精度を向上させ、従来の地雷検出方法で相互に補完して、地雷検出の精度と安全性を向上させるものである。

また、2021年には、国防科技大学文理学院生物・化学系合成生物学研究チームが、宇宙微小重力の生物学的効果に関する研究を学術雑誌「Cell」で公表した。これは、微小重力の生物学的効果をシミ

ュレーションして、微小重力に応答したゼブラフィッシュ胚の自然免疫関連遺伝子を明らかにし、炎症性免疫応答、自然免疫応答、NF- κ B シグナル伝達経路、および抗ウイルス自然免疫におけるウイルス応答メカニズムを発見したとするものである。この研究は、長期の有人宇宙ミッションによる生理学的ストレスの解明につながるものと見られている。

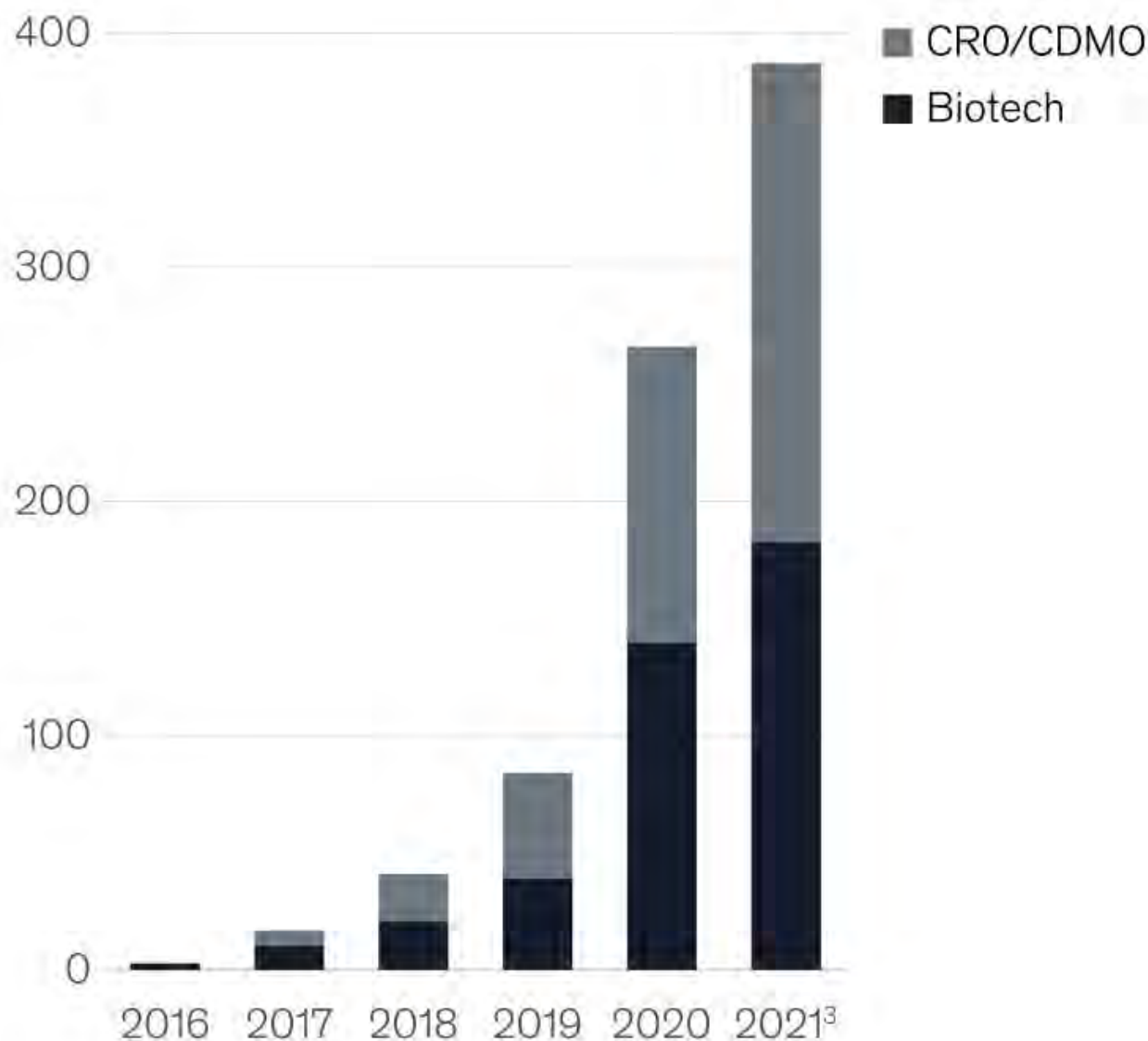
こうした研究事例からも見てとれるように、中国では、合成生物学とその応用技術を軍事・安全保障分野にも直接的あるいは間接的に応用することを念頭に、研究開発が進められており、その技術獲得のスピードは他国を圧倒するものである。

(4) 中国における民間バイオ研究と規制改革

政府機関や軍におけるバイオ技術の研究が盛んに行われている一方で、バイオ技術関連の企業の台頭にも注目する必要がある。特に、中国におけるバイオテック市場の価値の推移を見てみるとここ数年で目覚ましく成長している。

中国の目覚ましいバイオテック企業の台頭の裏には政府の規制改革がある。2015年から中国は国内の製薬産業に関する規制を国際基準に適応させるを目指し、2017年までには、医薬品規制調和国際会議に参画している。こうした規制改革により中国の製薬産業はグローバル市場に統合させるエコシステムが確立され、急速な発展を可能にした（図 9-5）。

Total market value of listed innovative China biotechs and CRO/CDMO¹ players on major stock exchanges,² \$ billion

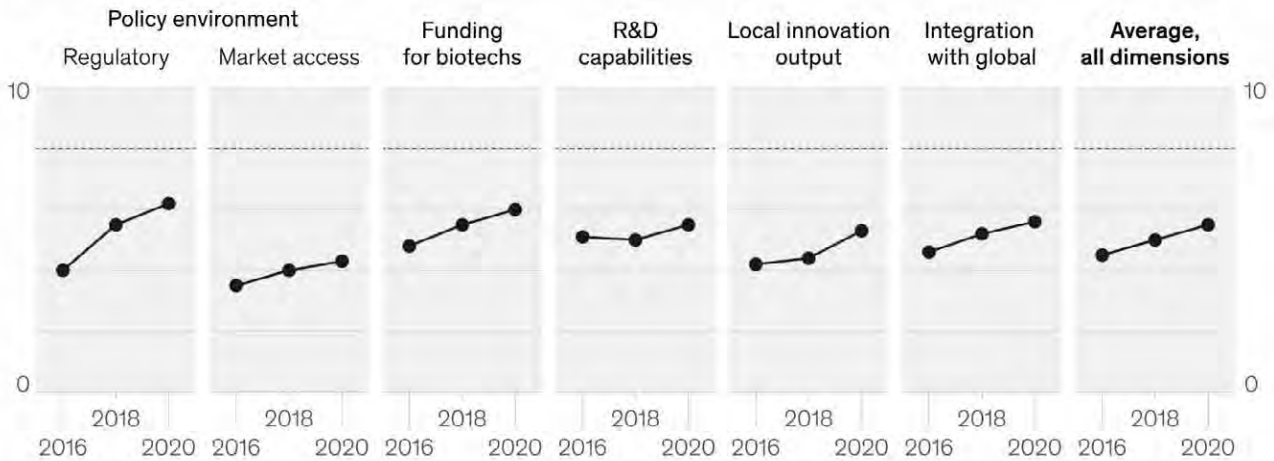


(図 9-5 中国における革新的なバイオテック企業及び CRO/CDMO*に株取引額の推移)

*Contract research organization/contract development and manufacturing.

China Drug Innovation Index (CDII) scores, scale 0–10

----- US (Assumed score of 8 in all metrics)



Source: CDII Survey (2016, n = 65; 2018, n = 109; 2020, n = 129); McKinsey analysis

(図 9-6 中国の製薬研究・産業における成長指数の推移)

0-10 のスケールで 10 に近づく程イノベーション度が高い。

4. 日本の位置づけ

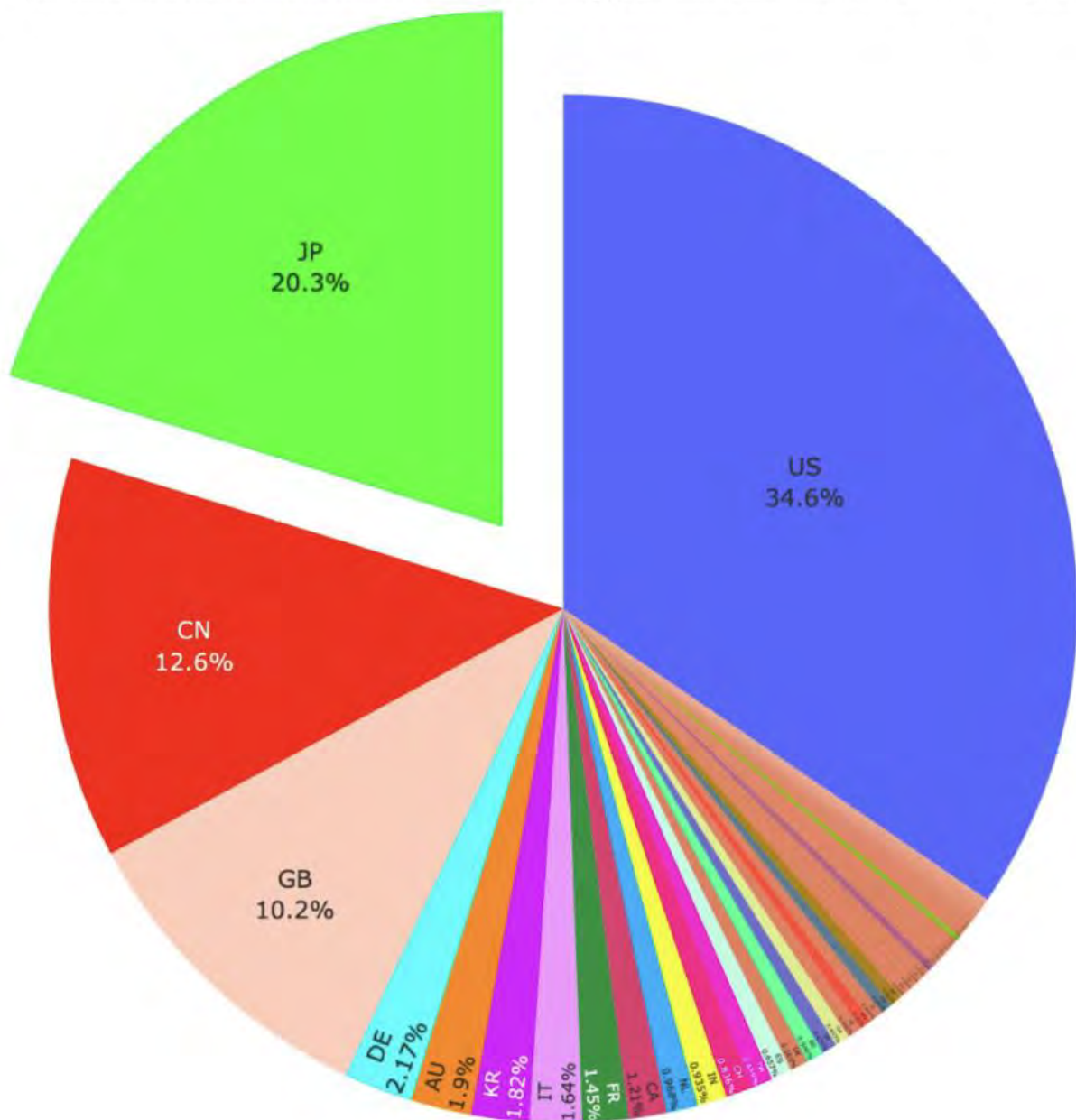
日本では、2000 年から 2005 年にかけて、経済産業省が「新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）」を通じて実施した「生物機能活用型循環産業システム創成プログラム」が合成生物学研究の先駆的事例となっている。同プロジェクトでは、生物機能の非水系での活用を目的に微生物等の抜本的な機能改変を行う研究開発が行われ、代謝のシミュレーションや細胞のモデリングなど、計算機を活用した研究開発が進められた。

また、2009 年から文部科学省で実施された「革新的細胞解析研究（セルイノベーション）」では、高速シーケンサーによるゲノム情報等の解析や細胞イメージングの手法を活用した生命機能の解読を主たる目的として研究が進められた。

こうした先駆的な研究が行われるなど、合成生物学分野における高い技術力を有する一方、研究者の人口が少なく、バイオビジネスのエコシステムの形成やその規模は米国や英国、中国などと比べて小さい。

アスタムューゼ社の調査の結果、研究者数において、日本は「バイオテクノロジー × 医療・公衆衛生」の複合領域において米国に次ぐ世界 2 位である明らかにされた(図 7)。また機関毎の研究者数で見ると、東京大学を中心に日本の上位にランクインしている。日本はバイオ技術人材の数の面では極めて優勢な立場にある一方で、今後こうした国外への人材流出を減らすための手立ても検討される必要があるだろう。

07 Biotechnologies x 19 Medical Technology and Public Health



(図 9-7 バイオ技術と公衆衛生との複合領域における研究者数トップ 10)

第 10 節 通信・ネットワーク技術 (Communication and Networking Technologies)

1. 通信・ネットワーク技術開発の概要

通信はいつの時代もより速く、より遠くに情報を届けられるよう発展してきた。最も原始的な方法でいえば伝言、伝書鳩、狼煙から始まり、1791 年には腕木通信（テレグラム）が考案された。19 世紀に入ると電信の技術が発展し、1837 年にはモールス電信機が、1851 年には海底ケーブルが、そして 1876 年には電話機が開発されるなど、情報伝達の速度と距離は急速に伸びていく。1895 年には無線通信の実験が成功し、20 世紀前半のラジオ・テレビの開発につながった。さらに 20 世紀中頃から後半にかけて、パソコンとインターネットが普及し、海底通信・通信衛星・光ファイバーなどの技術と結びつくことで、今までにない情報量が飛び交うネットワークが形成されていった。

現在では、通信・ネットワーク技術は、国防のみならず国民生活に必要不可欠なものになっている。特に 5G、6G などの次世代ワイヤレスネットワークは、エンターテインメント、医療、交通、都市計画、介護福祉など多様な分野への応用が期待され、民生に及ぼす影響は大きい。また世界の研究者の数もここ数年増加傾向にあり、研究対象としても重要な分野である²⁹⁹。本稿では各技術の概要と展望を述べたうえで、公的・民的利用へのインプリケーションを提示する。

2. 高周波（RF）と混合信号回路、アンテナ、フィルタ、及びコンポーネント

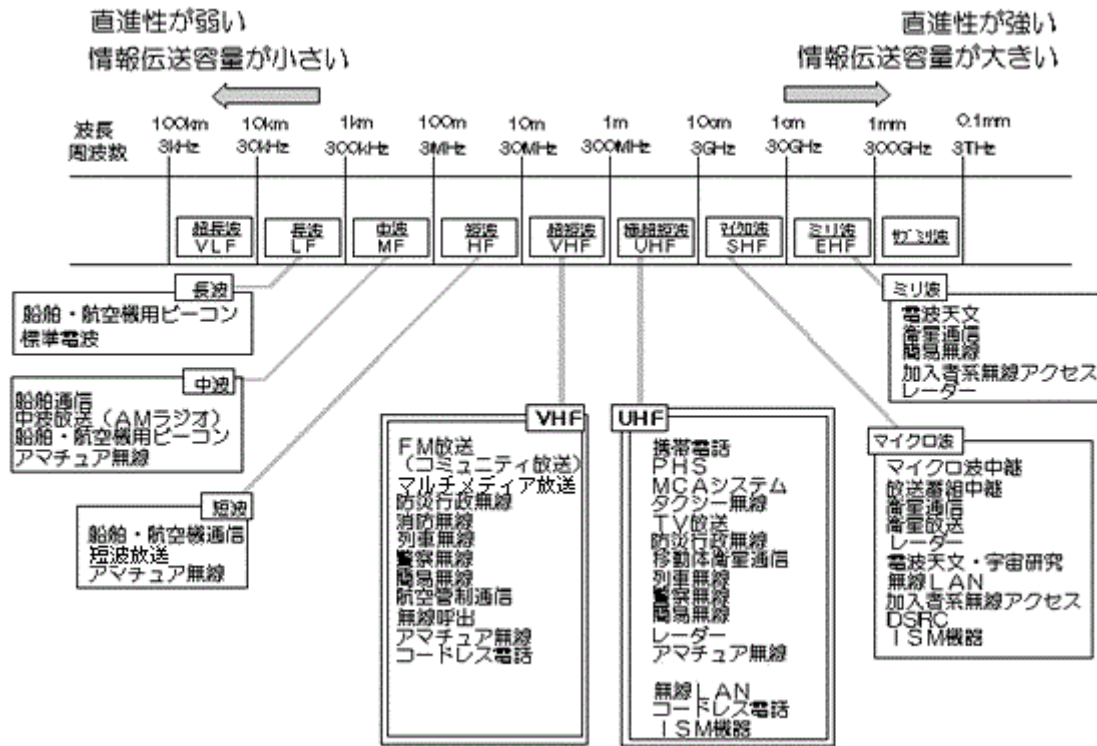
(1) 技術の概要

高周波（RF : Radio Frequency）には、大きく分けて 3 つの用途が存在する：物を温める（電子レンジなど）、物を探知する（レーダーなど）、そして情報を運ぶ（テレビ、ラジオ、Wi-Fi など）ことだ³⁰⁰。高周波は周波数を変えることによって、それぞれ適した機器による受信が可能となる。周波数は低ければ低いほど遠くまで届き、物体を透過しやすくなり、逆に高ければ高いほど遠くへ飛ばしにくくなるが、より多くの情報を運ぶことができる。よって、周波数は用途別に分けられて利用されている。

²⁹⁹ アスタミューゼ社への再委託レポート。

³⁰⁰ Denisowski “Understanding RF - Radio frequency technologies”

https://www.rohde-schwarz.com/jp/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/spectrum-analzers/what-is-rf-radio-frequency-technologies-_256007.html



(図 10-1 電波の周波数と主な用途³⁰¹⁾)

無線通信の用途が増えていくなか、通信を受信するためのアンテナも様々なニーズに応えるよう多様化している。具体的には、衛星通信用アンテナ、レーダー・アンテナ、携帯電話用アンテナ、マイクロ波通信用アンテナなどである³⁰²。また、周波数を受信する際、ノイズを取り除いた特定の周波数のみ抽出するために利用されるのがフィルタだ。代表的なものに、低い周波数のみを通すローパスフィルタ、高い周波数のみを通すハイパスフィルター、その両者を組み合わせたバンドパスフィルタが存在する³⁰³。

(2) 公的利用・安全保障における利用

通信や高周波は軍事的に必要不可欠な技術であり、連絡用の衛星通信・無線通信、偵察用のレーダー、潜水艦通信、マイクロ波兵器などと、その用途は多岐に渡る。通信に関しては第2節以降で詳述するため割愛するが、マイクロ兵器に関しては、日本でも防衛省がドローンを無力化するための「高

³⁰¹ 総務省 「周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴」 Retrieved from:

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>

³⁰² NEC 「アンテナ機器」 .Retrieved from: https://www.necplatforms.co.jp/product/antenna/antenna_kiki.html

³⁰³ オリックス・レントック株式会社「フィルタの周波数特性と波形応答」 . Retrieved

from: <https://go.ori.xrentec.jp/rentecinsight/measure/article-25>