



(図 8-4 SGR-A1²⁹¹)

(2) ドローン

先述したような経緯で航空分野はその嚆矢として、また本流として注目されている。より具体的に詳述すれば、航空における自律システム及びロボット技術は、世界的には既に民間社会実装が進みつつある。

研究開発状況として特に注目すべき、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拡張現実との連携が注目され、軍民の垣根を越えて研究が進んでいる。

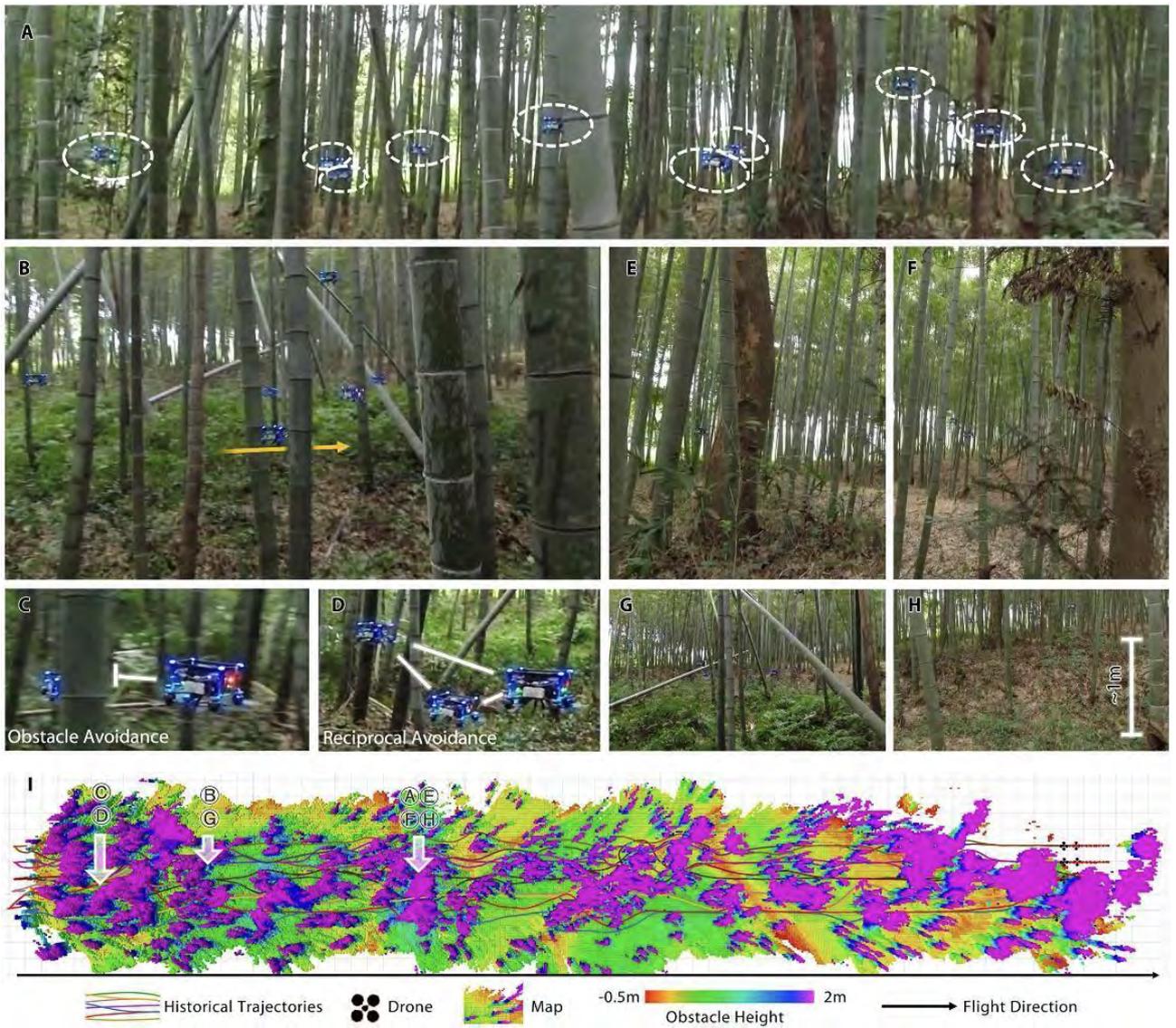
まず①については、既に商用品として米 skydio 社の skydio 2+ が米本土ではコンシューマー向けが 1000 ドルで販売されている。この機体には 6 つのビジュアルセンサーが備わっており、それから得た映像を AI が判断して、GPS を使わずに自動的に飛行していく。

また浙江大学の研究者は、後述するスウォーム技術と組み合わせ、10 機の各ドローンの AI が自律分散協調アルゴリズムにより、竹藪においても相互通信して難なく編隊飛行しながら障害物を回避し、目標の人間を追跡する技術を完成させている(図 8-6)。

²⁹¹ https://www.phonearena.com/news/Did-you-know-that-Samsung-used-to-make-military-and-security-technology_id72844



(図 8-5 ドローン)



(図 8-6 ドローンの編隊飛行)

これは地下や狭隘な空間などにおけるドローンの運用を可能とするだけでなく、軍事的にも今や民生品でも存在する GPS 妨害という初歩的な電子妨害の環境下でも重要であり、軍民双方での研究が盛んとなっている。

②については、いうまでもなく自律的に編隊を組んで飛行するスウォーム技術だが、ロボット工学における重要なイノベーション分野とされるもっとも重要な技術だ。これも進捗が著しい。

既に紹介したように厳密な意味での自律制御によるスウォームはイノベーションの勃興期を迎えつつある。数機単位の自律制御は既にトルコの自爆ドローン KARGU のように実装されている。特に先述の浙江大学の研究は注目すべきもので、スイス連邦工科大学ローザンヌ校のドローン群研究者のエンリカ・ソリアは「ドローン群飛行が、構造化されていない環境、野生の外で飛行に成功したのはこれが初めてであり、非常に印象的だ」としている。

もちろん、東京五輪の開幕式で展示されたようなプログラムの方式であれば、数百機の運用が出来る現状にある。

最後に③についてはドローンで得た情報や映像をGoogleなどに表示することで、人間の目の現実と重ね合わせ、かつそれで操作する技術である。ただし、拡張現実の一部の人間に“酔い”を発生させるため、機器もしくは人間自体を改良する研究が進められている。

また Global Data の調査によれば、将来のドローン技術の基幹をなすものとして 180 以上ある中で、代表的な物を 23 個あげている。第一は、Robots-as-a-service (RaaS) である。これはロボットとそれを制御するシステムを外部サービスとして利用する仕組みだ。ロボットをリースしてクラウドベースのサブスクサービスに入ることによって企業はロボットを所有することなしにその機能を利用できる仕組みとなっている。

第二は Collision avoidance for robots であり、これはロボットのための衝突回避技術となっている。ロボットの移動中に何かにぶつかりそうになった時にそれを回避する能力である。

第三は AI-guided forklifters である。これは AI 誘導フォークリフトで、無人搬送フォークリフトや AI が駆動させるもので、AI の使用により、作業速度の高速化が見込めることを目的とする技術である。

第四は、Remote-controlled excavators で、文字通り遠隔操作型ショベルカー。

第五は Aircraft anti-collision systems。文字通り航空機用衝突予防システムで、複数の機体をスウォームさせるためのものだ。

第六は、Computer vision for autonomous navigation で、直訳すれば自律ナビゲーションのためのコンピュータービジョンである。このコンピュータービジョンとはシステムがデジタル画像といった

視角的入力から情報を取り出し、その情報に基づいて行動を実行できるようにする AI の分野であり、それを自律ナビゲーションのために応用する技術だ。

第七は、Autonomous control system で、自律制御システムである。人工知能、機械学習、データ収集を使って設計された、不確実性の高い環境下で人間の介入をほとんど、もしくはまったく必要とせず自動で動作させるためのソフトウェアである。

第八は、Robo-taxis で、いわゆる自動運転タクシーである。中国では実際にテストが進んでいる。

第九は Remote-controlled pick-up drones で、遠隔操作により物を回収できるドローンのことである。

第十は、Satellite constellation control systems で、衛星コンステレーション制御システムである。

第十一は、Aircraft power load balancing であり、航空機の電力システムにおける負荷分散の技術である。

第十二は、Remote-controlled drone imaging であり、これは遠隔操作するドローンに搭載されたカメラを使用して、リアルタイムもしくは遅れて画像を提供するものである。

第十三は、Multi-axis drone gimbals。これは多軸ドローンジンバルであり、2 軸ジンバルなら縦と回転、3 軸ジンバルなら縦、横、回転の動きに対してカメラを制御可能である。

第十四は、Drone launching techniques。これはドローン発進技術であり、ドローンをどのようにして発進させるかに関する技術。固定翼タイプを打ち上げるためのカタパルトシステム等が該当する。

第十五は、Remote-controlled drone launchers であり、これは遠隔操作ドローン搭載型発射機である。遠隔操作ドローンに何かしらの物体を発射する能力を意味している。

第十六は、Autonomous Parking、自動駐車である。文字通り、人の介入なしに自動で駐車する技術だ。

第十七は、UAV swarm control でドローンスウォームの制御技術だ。

第十八は、LiDAR imaging、光検出と測距を利用した画像化だ。LiDAR とは、Light Detection and Ranging の略であり、物体の形や距離をレーザーを使ってはかる技術で、非 GPS での駆動やスウォームのために必要な技術となっている。LiDAR imaging とはこの LiDAR から得られた情報を画像化することだ。

第十九は、Drone flight control system、ドローンフライトコントロールシステムである。これはドローンの速度や姿勢を制御するために、搭載されている各種センサーからの情報等を処理して機体を制御するシステムで、ドローンの基盤となる技術だ。この技術によって、荒天などの不安定な環境下や急制動などがどれだけ可能になるかが決まる。

第二十は、Imaging sensors in vehicles、車載画像処理システムである。

第二十一は、Rader for vehicle anti-collision、車両用衝突防止レーダーシステムだ。これは車両に搭載されたレーダー、赤外線距離測定器等を組み合わせることで車両の衝突を防止するシステムである。特に興味深いのは音響を使ったシステムである。

第二十二は、AV on-board control systems、AVによる制御システムである。

第二十三は、Aircraft stowage ejectorsで、ドローンの積載物を排出する技術となっている。

これらは後述するように、ロボティクスの高い汎用性を示している。すなわちこれらの技術は、陸海空の無人アセットのいずれにも当てはまる技術だからである。例えばスウォーム技術や姿勢制御技術や衝突回避技術は陸海空宇宙を問わず必要な技術であることから、これは明白だ。

3. 公的利用・安全保障における利用

現状自律型の兵器では最後の意思決定において人間の関与が必要とされているものの、防衛面では自動化に近い形での防衛行動をとれるため安全保障上の優位性は高いといえる。他方で、ターゲティングに関しては中に内蔵するAIの画像認識やディープ・ラーニングの精度に著しく依存するため、ハードウェア自体というよりも中のソフトウェアの技術を向上させるかが争点となる。自律型致死兵器システム(LAWS)に関して、特定通常兵器使用禁止制限条約(CCW)の政府専門家会合(GGE)において現在も議論されている内容であるが、現状では完全自律型(Fully Autonomous)の兵器はまだ誕生していなく、そこに至るまでの過程でどの程度国際的に規制をしていくかのコンセンサスが重要となる。

民生利用

(1) ロボット

自律型ロボットにおける経済産業・民生上のインプリケーションは多岐にわたると考えられる。基本的には人間にしかできない行動の代替が可能であることや一般的に人間が立ち入るのが難しい場所においてもロボット介して作業ができるという主な利点がある。例えば、農業分野においてはドローンによる農薬散布や人型ロボットによる作物の回収が考えられる。そして、一般生活においても害獣駆除も可能である。またVTOLの例のように大規模フェス会場における様々な検知・探索活動も可能であり、災害時にはZephyrなどを使った通信インフラの頑健性を強化できると考えられる。

・最高速度 100km の垂直離着陸型ドローン QTW VTOL UAV

QTW VTOL UAV は JAXA の新技術を投入した最高速度 100km の垂直離着陸型ドローンである。

JAXA は新技術の設計と運用を研究し、この研究成果を民間企業が製品化することで新技術の社会実装を進めている²⁹²。宇宙科学分野ではロケットの開発や打ち上げを担っていることで有名だが、航空技術の分野では次世代を担うドローンも例外ではなく、ドローンの技術開発に取り組んでいる。ドローンは多岐にわたる業務で利活用が進んでいるが、そのほとんどがマルチコプター型だ。いくつか課題は残されているものの、マルチコプター型の構造設計は確立しつつある。JAXA は市場で確立されていない新技術の研究開発を目標としているため、日本では確立されていない固定翼機および垂直離着陸機（VTOL 機）を開発しており、日本市場で確立されていない VTOL 機の設計と運用と研究を進めている。2kg の機器や荷物を搭載することができ、同機の最高速度は 100km/h 出すことが可能である。例えば、30 分の飛行であれば約 50km を移動する計算となる。



(図 8-7 チルト翼小型無人 VTOL 機「QTW VTOL UAV」²⁹³)

・太陽光動力の無人飛行機（UAV）Cai hong(彩虹)

中国は太陽光動力で動くの無人飛行機（UAV）である Cai hong（彩虹）を開発し、高度 2 万 m での 15 時間を超えるテスト飛行に成功した。通常の航空機では大気の薄さによりエンジン性能が低下する、準宇宙空間での飛行となる。この太陽光動力ドローンは、準衛星としてデータ中継や、空中における Wi Fi ハブとして辺地や島しょ部への通信環境の提供などを担う予定で、土地測量や地震、洪水時の災害監視も可能になる。またマルチユースとして太陽光動力ドローンは軍事目的にも利用可能である。

²⁹² JAXA の新技術を投入した最高速度 100km の垂直離着陸型ドローン「QTW VTOL UAV」ドローンジャーナル

²⁹³ <https://drone-journal.impress.co.jp/docs/event/1184519.html>

彩虹は通常の UAV よりも滞空時間が長く、偵察衛星よりも正確な情報を取得することができるからである。彩虹はまた、UAV 空中磁気・空中放射能応用システムを搭載しており、放射能調査においても活用されている。²⁹⁴



(図 8-8 彩虹²⁹⁵)

・ソーラーUAS「Zephyr」

Ai rbus 社は成層圏も飛べるソーラーUAS「Zephyr」の飛行実験を成功させた。Zephyr は成層圏も飛行できる仕様で、「成層圏プラットフォームシステム (HAPS)」として観測や通信の基地の役割も担うことができる²⁹⁶。また、この HAPS として活用した低遅延接続サービスを提供開始することを発表している。この Zephyr は太陽光発電でき、日中は太陽光で稼働しながらも、夜間は、バッテリーに充電した電力を使って飛行を続ける。そして民生活用として低遅延の 4G/5G モバイル通信サービスを提供する予定であり²⁹⁷、これまで世界の防衛産業として活動してきた Ai rbus 社の民生分野における目覚ましい事例として挙げられる。

²⁹⁴ Cai hong UAVs make changes to serve more missions in modern warfare.

<https://www.globaltimes.cn/page/202211/1278928.shtml>

²⁹⁵ <https://www.globaltimes.cn/page/202211/1278928.shtml>

²⁹⁶ Zephyr: The first stratospheric UAS of its kind

<https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>

²⁹⁷ Ai rbus、HAPS 活用の低遅延接続サービス提供開始 DRONE

<https://www.drone.jp/news/2022071918084055540.html>

Zephyr

Pioneering the stratosphere



(図 8-9 ソーラーUAS「Zephyr」²⁹⁸)

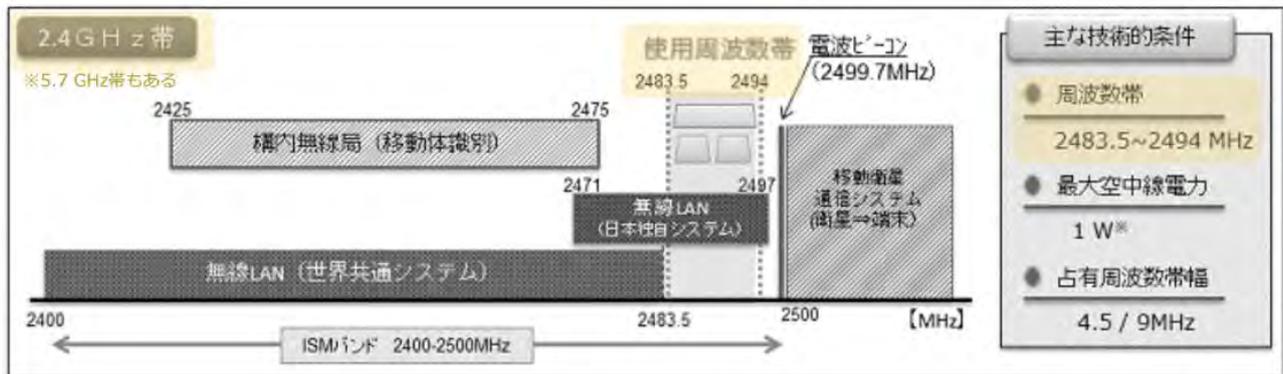
(2) ドローン

想定・想像される用途としては、あらゆる用途が想定される。一言でいうならば、ドローンとはスマートフォンの延長とされるように、きわめて汎用性が高い。スマートフォンの用途が一概に指摘出来ないようにドローンもまた同じである。

むしろドローンを扱う際の弊害としては用途を想定し、決めることにある。例えば陸上自衛隊は、民生の小型ドローンを防災用として調達したが、何よりも防災用として調達したために、電波法の規制もあり、1km、電波環境によっては数百mしか電送距離が及ばないものとなっている。同じ機体が諸外国では8km飛ぶのに異常な性能劣化を起している。

ここで注目すべきは用途を事前に決めることによる電波法が特に深刻な技術の発展と社会実装に障害を引き起こしていることだ。総務省は2.4GHz帯の中でもさらに狭隘な2.483と2.494の間しかドローンの通信領域を用意しておらず、同じ2.4GHz帯の携帯電話や無線LANよりも貧弱な状態で、容易に不安定化する状況となっている。

²⁹⁸ <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>



(図 8-10 2.4Hz 帯の周波数)

さらに周波数のみならず出力に関しても 10 ミリワットときわめて貧弱な出力しか許可していない。これもドローンの距離が短くなる原因となっている。無線局の開設許可と無線資格三級を取得しても 1 ワットしか出せず、ほとんどドローンが無意味化する状況となっている。しかもカウンタードローンも同様の憂き目となっており、ある外国製の軍用カウンタードローン装置は電波環境が複雑な市街地では射程が 100m までに低下しほとんど役に立たなくなっている。

これらは周波数帯をドローンに割り当てた 2016 年当時の際のドローンの利用目的と性能を前提としたもので、まるで 3 歳児の服を 10 歳に着せるようなものとなっている。これもいたずらに想定・想像される用途を官僚主義的に当てはめた結果となっている。

他方、ウクライナでは農業用に導入したドローンの光合成を分析するセンサーで偽装網を見破ったり、映画撮影用ドローンで爆弾を投下したり、10 万円のおもちゃのキットに 400 万円のコストをかけて強力なバッテリーとモーターに変更した機体が次々と小型爆弾を戦車や装甲車に爆撃して撃破するなど、想定・想像される用途を塗り替える使用が為されている。

この意味でドローンとは、想定・想像される用途を考えるのではなく、何をさせるかを能動的かつ臨機応変にアイデアを出して使うアセットと評せよう。その意味で必ず用途を定めて生産された 20 世紀の工業製品とは本質的に異なるものなのだ。

実用化に伴う戦術・戦略レベルの影響

さてドローンの実用化は、戦術・作戦・戦略レベルでのゲームチェンジャーとなっている。

戦術レベルでは、これまで軍事の大きな要素であった地形効果を相対化する効果を発揮している。

ドローンの軍事的特徴としては、第一に高性能で安価なセンサーを積載して飛行することで、理論上はあらゆる地上における動きを感知し地形効果を相対化できることだ。これまでの偽装や陣地構築

は無意味にはならないが、ドローンによって効果を減殺され抜本的な変革を余儀なくされるということだ。

実際、英王立国際問題研究所のジャック・ワトリングは、アゼルバイジャン軍のドローン戦がアルメニア軍を圧倒した、2020年のナゴルノ・カラバフ紛争の分析において「ドローンのセンサーは、異常な地形上の動き、物体間の人為的な間隔、および民間道路からの逸脱によって昼夜を問わずに軍用車両を捕捉できる」「偽装が車両を敵のドローンから隠ぺい可能という希望は非常に楽観的だ。赤外線及び熱画像カメラの急増により、昼夜を問わず隠蔽は困難になる。また、対サーマル偽装下にある車両でさえ、乗員が排尿などで偽装下から外出すること、多くの場合、発見される可能性がある」と指摘している。しかもワトリングは西側の軍隊は作戦において無線を豊富に使うことを前提にしている為に、位置を露呈しやすいとも指摘する。

米ハドソン研究所もウクライナの戦例を根拠に「ドローンは、隠蔽もしくは機動するアセットに対し、火砲及びロケット砲をより正確に標的にし、敵の損害をリアルタイムに評価して迅速な追撃を可能にする」と評価している。

各国軍ではこうした戦訓を取り入れた試みも行われている。一つは対サーマル防護の充実である。中国軍は赤外線反射を誤魔化す為と思われるパネルを装甲車両に追加で取り付けたり（図 8-11）、トラックの上部を平坦になるように板（図 8-12）を取り付けている。



(図 8-11 中国の対サーマル防護)



(図 8-12 中国の対サーマル防護)

もう一つはこれまで主流だった自然物への偽装ではなく、人工物への偽装だ。ワトリングの指摘に加えて、民生品の農業用ドローンですら植生の光合成を分析する機能をもっており、対サーマル偽装網を看破してしまう状況下で自然物への偽装は心もとない。

そこで台湾軍は装甲車両を自動車などのスクラップの中に隠したり、工事車両への“コスプレ”を演習で行っている(図 8-13)。ロシア軍も燃料補給車を小麦車両にコスプレさせる試みを行っていた(図 8-14)。





(図 8-13 工事車両への“コスプレ”)



(図 8-14 ロシアの小麦車両にコスプレされた燃料補給車)

これは 2022 年 2 月に勃発したロシアのウクライナ侵略でも同様であり、軍用のみならず 10 万円程度の DJI 等の民生ドローンによって、両軍の装甲部隊や陣地がつまびらかに発見されている。残骸などをみても市街地に隠れた車両が破壊された形跡があり、現代戦における大量のドローンが積載する安価かつ高性能レーダー、赤外線センサー、光学カメラの威力を証明している。

第二に、作戦レベルへの影響である。まず打撃力の向上（要打撃、同時複数打撃、縦深打撃）を低コストで実現していることが挙げられる。相対的に旧来の軍用アセットよりも安価であり、4K 動画を即座に展開可能であり、即座に位置座標を送り、場合によっては自らも攻撃でき、しかも人的リスクもコストも低く、ネットワークでつながった陸海空の無人アセットは、縦深攻撃・敵の要所を発見特定しての打撃を低コストで複数で可能とする。

この打撃力の向上は、20 世紀末から 21 世紀初頭にかけて米軍が夢見た「情報 RMA」や「トランスフォーメーション」が示した構想そのものである。

例えば平成 12 年に防衛省が整理した情報 RMA の定義は「軍事力の目標達成効率を飛躍的に向上させるために、情報技術の中核とした先進技術を軍事分野に応用することによって生起する、装備体系、組織、戦術、訓練等を含む軍事上の変革」とし、その背景として「将来においては情報技術が軍事力の優劣を決する中核的な要素となること。個別の装備システムを連携させ、全体としてシステム化することによって、それらシステム間の相乗効果を発揮させ、飛躍的に効率的な戦闘が可能になること。単に軍事技術上の変革にとどまらず、組織、戦術、訓練等にわたる広範な変革が伴うべきこと」としている。これはウクライナが今、ロボティクス技術によって展開している戦いとその背景そのものである。

クリントン政権による情報 RMA、そしてそれをブッシュ政権が名称変更したトランスフォーメーションは、結局は当時の技術レベルとコストでは実現が困難であり、全軍への配備は至難であった。実際、フューチャーコンバットシステムなどの諸構想は悉く頓挫もしくは修正を余儀なくされ、イラクにおける安定化作戦の泥沼化による技術優勢への信頼崩壊と予算不足によって片隅へと追いやられた。

それがドローン等のサイバー空間と一体となったロボティクス技術がスマートフォンの大量普及によって安価にあふれたことによって実現した。アゼルバイジャンやウクライナのような小国が 90 年代に米軍が夢見て果たせなかった戦い方を実現していることになる。

第二の作戦レベルの影響は、我の機動力の向上と敵の機動力の阻害である。通常、部隊が進撃する際には、威力偵察部隊を先行させ、敵の待ち伏せや地形上の障害がないかを確認しつつ、本隊が動く。当然ながら移動速度は低下する。これがウクライナではドローンを先行させることで 20 分かかる偵察を数分にまで短縮している。これによって、ドローンの優勢が確保できれば、機動力は劇的に増える。

他方で私のドローンは敵の機動も阻害する。ドローンに見つかった場合、数分で砲弾が飛来するとされており、ウクライナの戦場では敵のドローンが優勢な場合、藪や雑木林などを移動することを余儀なくされている。ウクライナ側の切り札であるハイマースもドローンを探知した場合、退避を余儀なくされていると報じられている。

作戦レベルでは第三に他のアセットによる戦術と組み合わせ、効果的な作戦を展開している。2020年のアゼルバイジャンとアルメニアによるナゴルノ・カラバフ紛争では、アゼルバイジャン軍によるアルメニア軍を壊滅させる作戦『カラバフの棺』が実施されたが、それはドローンと在来兵器の組み合わせによる8段階の戦術の組み合わせからなっていた。

第一段階：敵の防空網には入らず、既存の航空機を大規模空爆をするフリをして、敵の地对空ミサイルを探る

第二段階：複葉機を無人で突入させて地对空ミサイルを発射させる

第三段階：自爆タイプの複葉機を突入させる

第四段階：高価な地对空ミサイルを射耗及び温存するようになり、安価な手段で迎撃してくる敵に対し、自爆ドローンや武装ドローンを突入させ、敵の地对空ミサイル網を破壊させる。

第五段階：自爆ドローンや武装ドローンの突入を支援するために電子戦で支援

第六段階：電子戦で敵の地对空ミサイルに対する囮目標を作る

第七段階：ヘリから射程30kmの対地ミサイルで敵の防空ミサイルシステムを破壊。

第八段階：完全に敵の防空網を破砕した状態（初日に6割、数日で9割破壊）で自爆ドローン、武装ドローン、航空機で敵の兵站や機甲部隊や司令部を破壊。

この結果、アルメニア軍はアゼルバイジャン軍の侵攻に抵抗できず、かつてアゼルバイジャンから奪取したナゴルノ・カラバフ地域の多くを明け渡すことになり、屈辱的な講和に追い込まれた。

このように無人アセットは、他のアセットによる戦術と組み合わせ、効果的な作戦を可能としている。

最後に戦略レベルの影響を論じる。これは認知領域が挙げられる。戦場に陸海空の大量の無人アセットを両軍が投入しているウクライナの戦場では、戦果や敵軍の残虐行為が大量の高画質動画が撮影され、それがSNSに放流されることで戦略レベルの認知領域の打撃を実現している。自国軍の士気を高め、敵軍の士気を低下させ、日本を含む国際社会の態度を変更させている。

また中国軍は新型の無人アセットを連続して日台の防空識別圏に侵入させるほか、積極的にSNSや出版物に無人アセットを使った演習や運用の情報を投下している。これもまた認知領域における打撃を狙ったものと評価できる。

また、ドローンは、コストの低さとそれに伴う消耗戦を可能とする。ドローンは人的・開発・生産・改良・展開・教育・整備のコストが在来兵器よりも低い。これは米国防大学の上席研究員のトーマス・ハメスが「小型ドローンは空軍の民主化をもたらす」と 2016 年に予見したように、個人や発展途上国であっても効果的なエアパワーを保有できることを意味する。そして、イスラエル国防大学教授のエアド・ヘクトが示唆したように中級国家であればアゼルバイジャンが米軍やイスラエル軍と同じエアパワーを発揮できるようになる。さらに指摘すれば、これが中国のような大国であれば、そのエアパワーはドローンを追加することによって恐ろしく巨大かつ効率的な存在となる。このようにドローンは小国やテロリストにこれまでにない能力を与え、大国はその国力が嫌がおうにも高める。

またこうしたコストの異常な低下は消耗戦術を可能とする。例えばウクライナでは英 RUSI がドローンの平均寿命を回転翼機は 3 回の出撃、固定翼機は 6 回の出撃で損耗するとしている。しかしウクライナ軍は常時 6000 機の保持を可能としているという。

日中、中台間でもこうした現象は生起している。例えば中国軍が日台に侵入させているドローンの運用コストはほぼ同じ大きさの MQ9 リーパーと同じと推測するのであれば、1 時間当たり 8.8 万円になる。他方で日本側は国防総省の資料を参考にすれば、F-15 戦闘機の 1 時間 320 万円を 2 機要撃しているので、640 万円となる。パイロットや整備員の消耗はさらにドローン側が有利となる。

こうした状況は英 RUSI は中国軍によるドローンを使った台湾航空消耗戦を 2021 年に予見していたが、すでに実現してしまっている。こうした使い方はコストパフォーマンスに優れた形で相手を消耗させることが可能となる。今後、海中・海上・陸上ドローンの発展が本格化すれば、同じ現象が起こることは間違いない。

(3) 経済産業・民生上のインプリケーション

第一にサイバーフィジカルな社会への移行を促すということに尽きる。現代と将来の無人化とは、単に人間をその場から消去し、ロボティクスに置き換えるというのではなく、サイバー空間とフィジカルな現実空間がほぼ一体化することを意味している。

つまり単に無人化するのではなく、無人アセットとサイバー空間における膨大な情報と演算能力が組み合わさることで経験値が集合・積算され、行動が絶えずアップデートされていくことを意味する。これは最近のお絵描き AI や chatGPT といった身近な AI が急速に性能を向上させていることから分かる。

例えば chatGPT は、既にフランスの最高学府であるパリ政治学院は chatGPT の学生や教員の使用を禁止し、米国の複数の公立学校でも禁止の動きが広がっている。これらは chatGPT の性能があまりに高

く、もっともらしい—このもっともらしいが曲者で、それらしい間違っただけの内容も人間同様に出力するが—回答を作成できるからだ。

米陸軍も chatGPT を採用し、2023 年 2 月 8 日には米陸軍の AI 導入の施策に関する、chatGPT に記述させた最初の記事を配信している。その内容はほとんど他の人間による記事と見分けがつかず、遜色がない。

このように軍事面からも社会全体のサイバーフィジカルシステム化が促進され、実行されていくことになる。

第二は、技術それ自体よりもスキルが重要になる時代になるということだ。第四次産業革命における技術とは、軍事と民間の境目が限りなく薄くなり、ハイテクとローテクの違いも薄まっていくプロセスだと位置づけられる。元空将で NATO 連絡官を務めた長島純はウクライナにおける戦争を観察し、ロシアの 20 世紀のハイテク技術がウクライナの 21 世紀の民生技術の前に蹉跌を踏んだと評しているが、これは現状を説明する言葉として正しい。

確かに開戦前のロシアは軍事技術に関する一部のハイテクでは世界のトップクラスに伍し、冷戦時は米国と世界の覇を争った武威の余韻を感じさせていた。特に 2014 年のクリミア侵攻ではハイブリッド戦争という新しい戦い方の有効性を示し、加えて様々な新兵器を示すことで航空宇宙関連の重厚長大な分野では一目置かれていた。

それがロシアのウクライナ侵略では敵の首都の喉元に迫りながらも陥落させられずに撤退を余儀なくされるという戦史に数少ない事態にまで追いやられた。しかもキーウ北方における戦力比はロシア軍が 12 倍、砲兵戦力では 2 倍という戦力差でありながら、民生技術の優位性がこの戦力差を埋め合わせた。

このことは現在の技術が軍事や民生の差が限りなく薄くなり、ハイテクとローテクの違いも—ハイテクとされたもの、ローテクとされたものは残り続けるが、その優位性や区分けが相対化されていく—同様になる。つまり技術とは近代におけるそれ単体に意義があり、目的に特化したものではなく、近代以前がそうであったように使い次第で汎用性の高い“道具”としての存在に回帰していくことを意味している。

こうした時代において重要となるのはスキルといえよう。技術それ単体の汎用性が極めて高くなれば、その意義を決めるのは技術それ自体ではなく、使い方である。実際、chatGPT やお絵描き AI では、使用者が望む成果を出すための“設問”がカギとなっており、お絵描き AI では望む画像を作り出すための“設問”集があたかも魔導書のように販売されている。

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。そしてそのスキルは、実際に技術を手に入れ、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はならない。

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

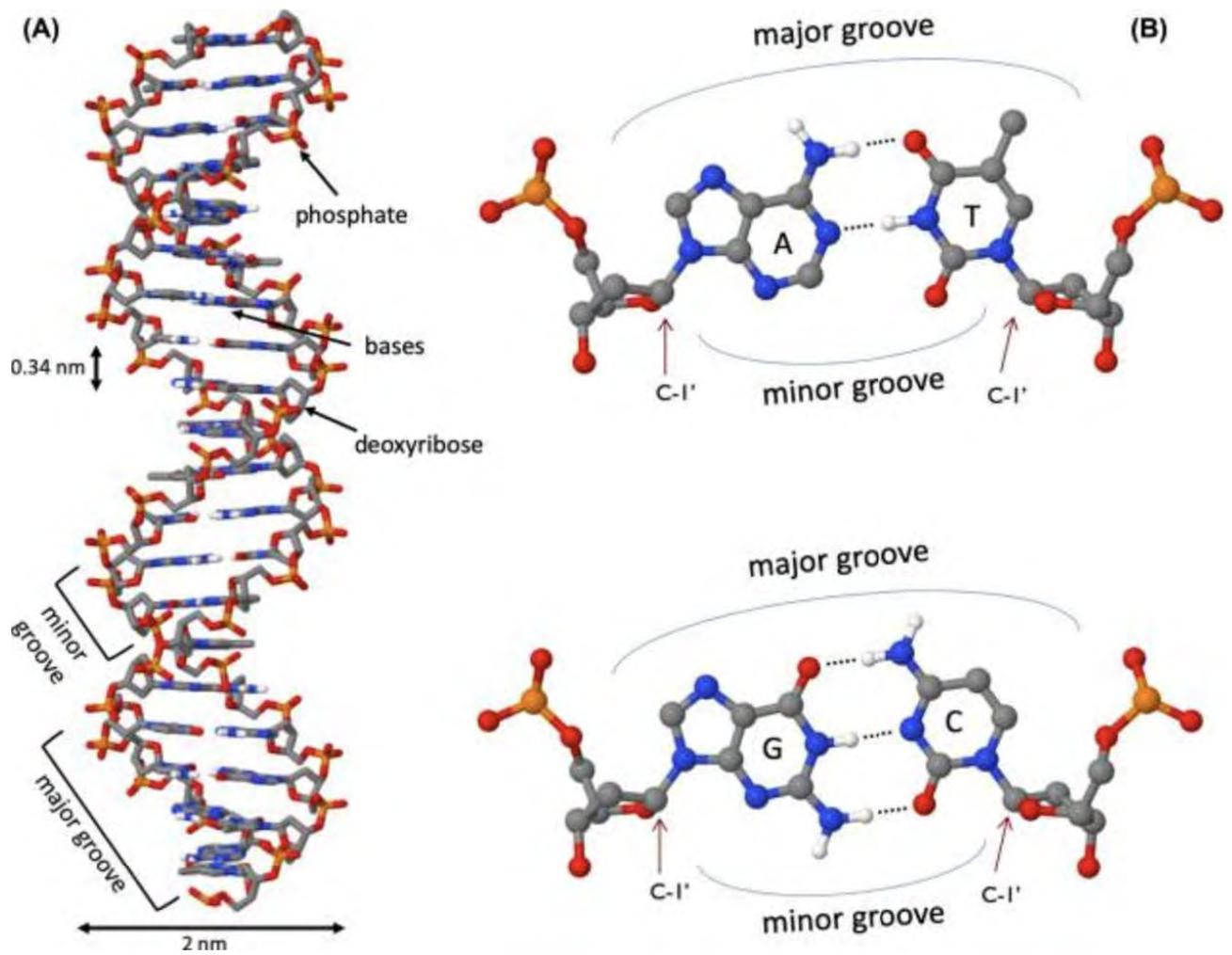
(1) 核酸とタンパク質合成 (Nucleic acid and protein synthesis)

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)。

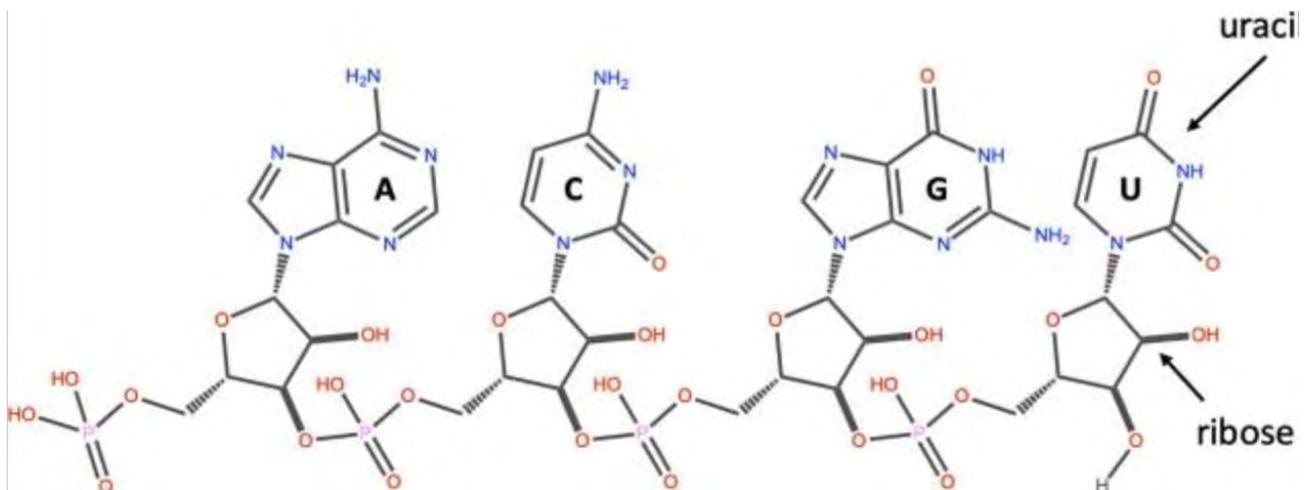
一方で、RNA は、その情報の一時的な処理を担い、DNA と比較して、合成・分解される頻度が高い核酸である。身体を形成するための遺伝子情報は、「DNA→→RNA→→タンパク質」という流れで伝達され、タンパク質によって実際の身体の形状が形作られる仕組みになっている。DNA から RNA に伝達された遺伝子情報は、RNA で処理工程を経る(図 9-3)。その後、遺伝子情報は「翻訳」(translate) され、実際にタンパク質が形成される。RNA はタンパク質合成時の遺伝的メッセンジャーとして理想的である。

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。

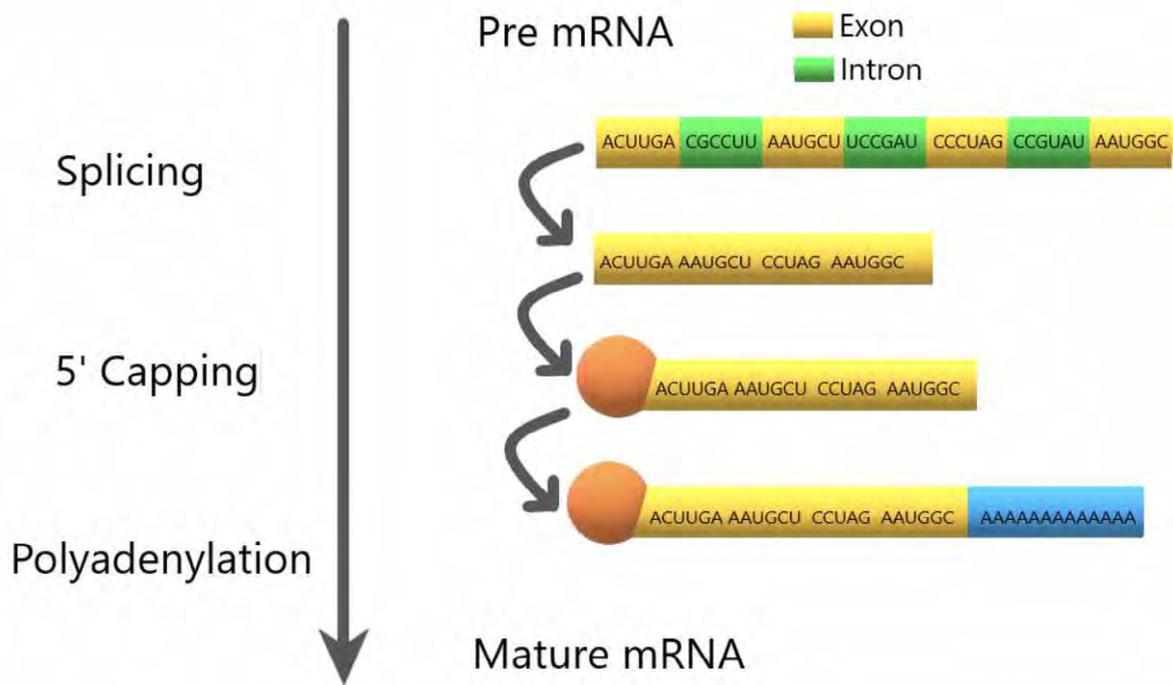
合成生物学は、デザインされたタンパク質と核酸ポリマーを生産するために既存の生物学的システムをプログラミングすることに焦点を当てている。この分野は、遺伝子コードの拡張や、生細胞におけるタンパク質合成の間違いやマイクロ RNA 活性の観察のための新しい蛍光プローブなど、多様な応用がある。さらに、RNA 治療薬の提供も進展しており、米国 FDA は RNA 医薬品を承認しつつある。



(図 9-1 DNA の構造)



(図 9-2 RNA の構造)



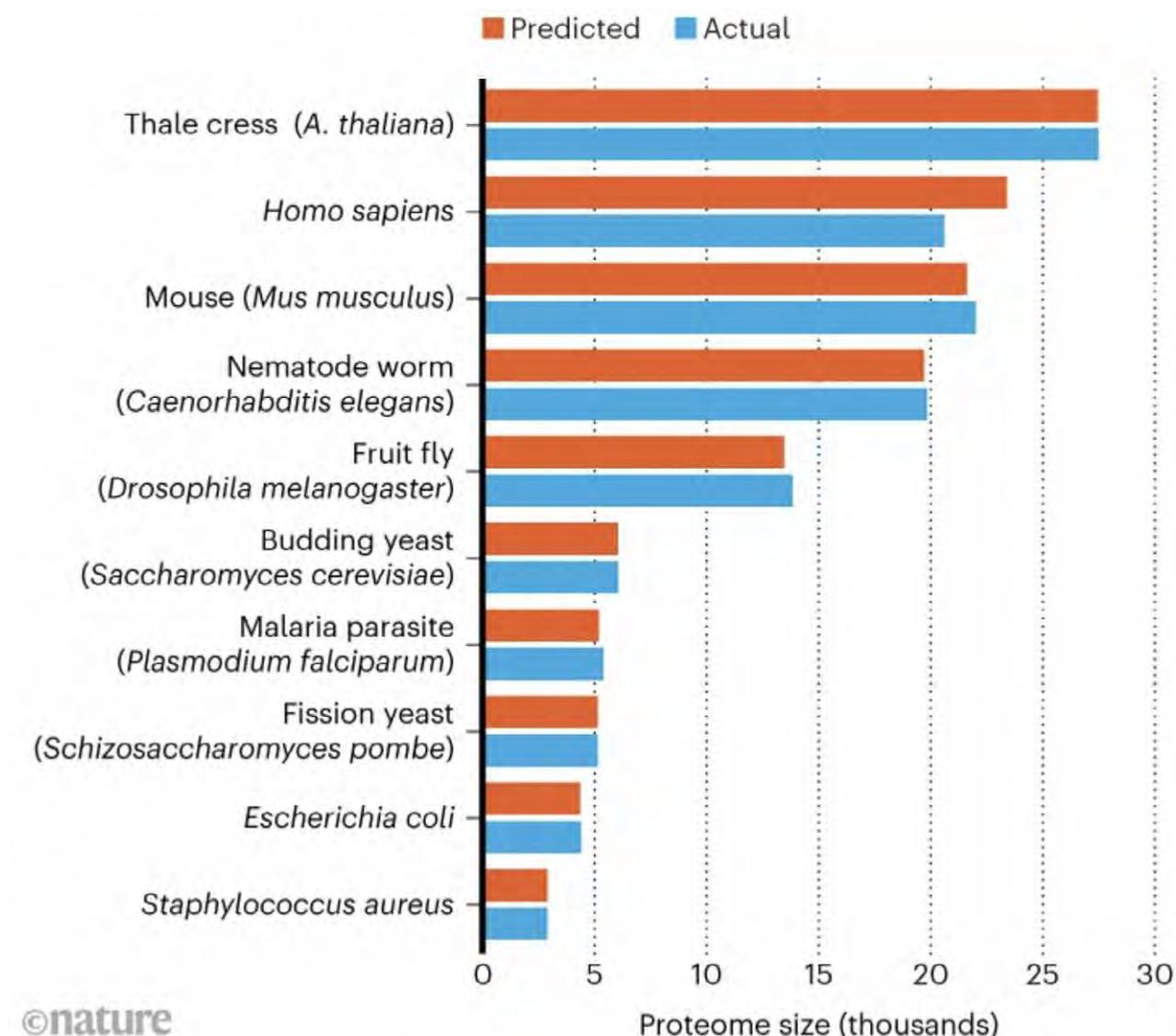
(図 9-3 RNA での処理の過程)

(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300万人民元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。

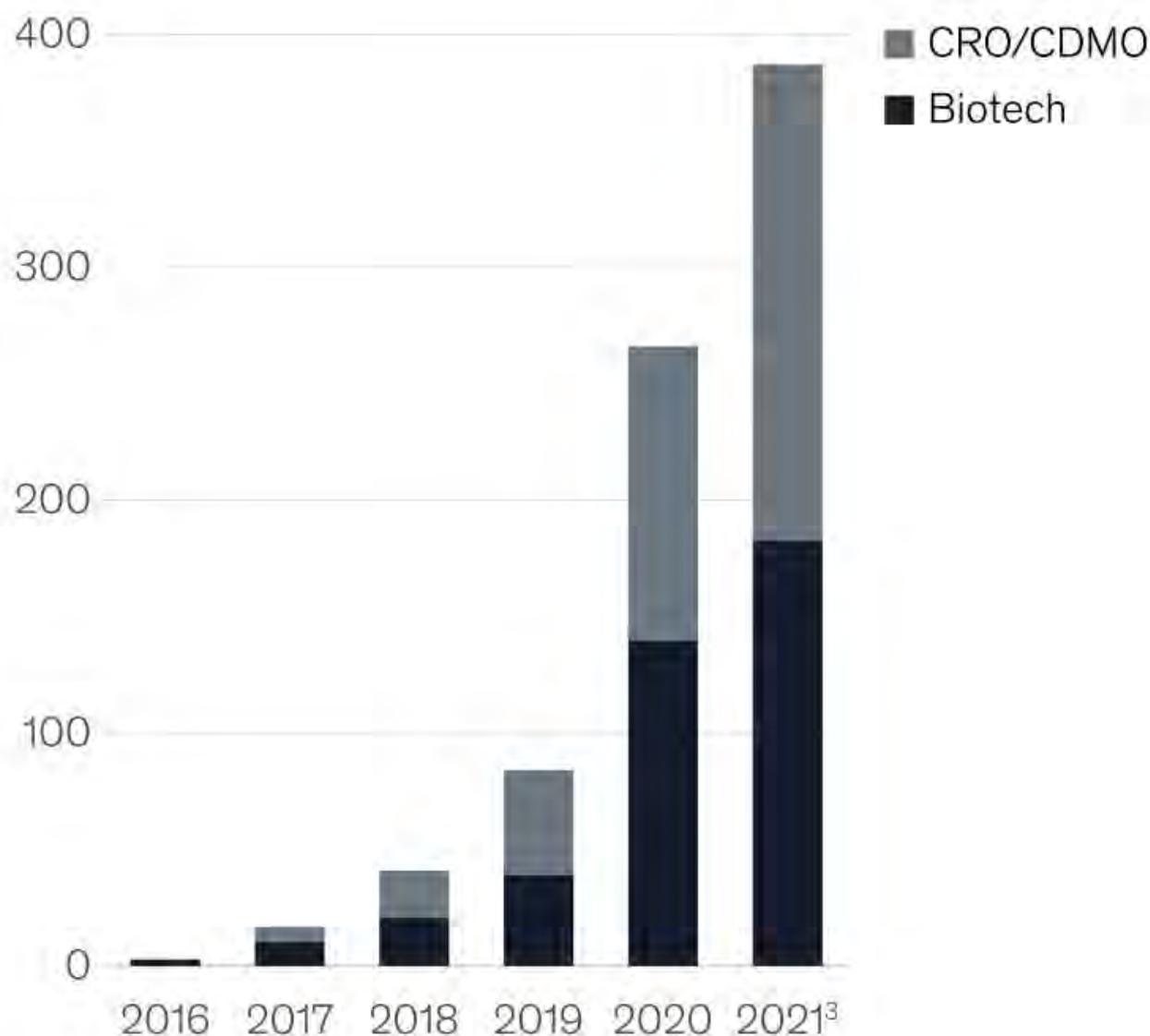
こうした研究事例からも見てとれるように、中国では、合成生物学とその応用技術を軍事・安全保障分野にも直接的あるいは間接的に応用することを念頭に、研究開発が進められており、その技術獲得のスピードは他国を圧倒するものである。

(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

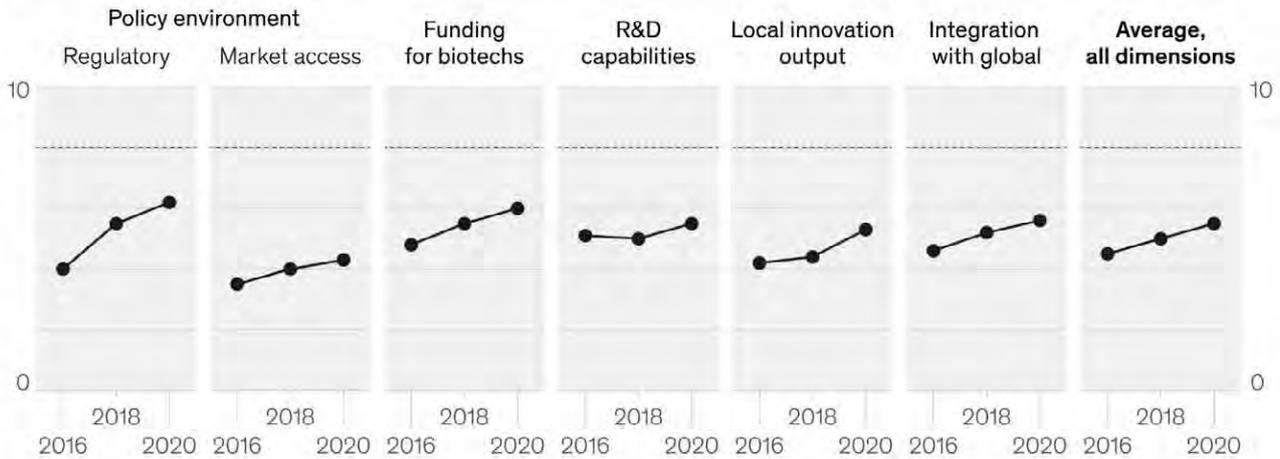


(図 9-5 中国における革新的なバイオテック企業及び CRO/CDMO*に株取引額の推移)

*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

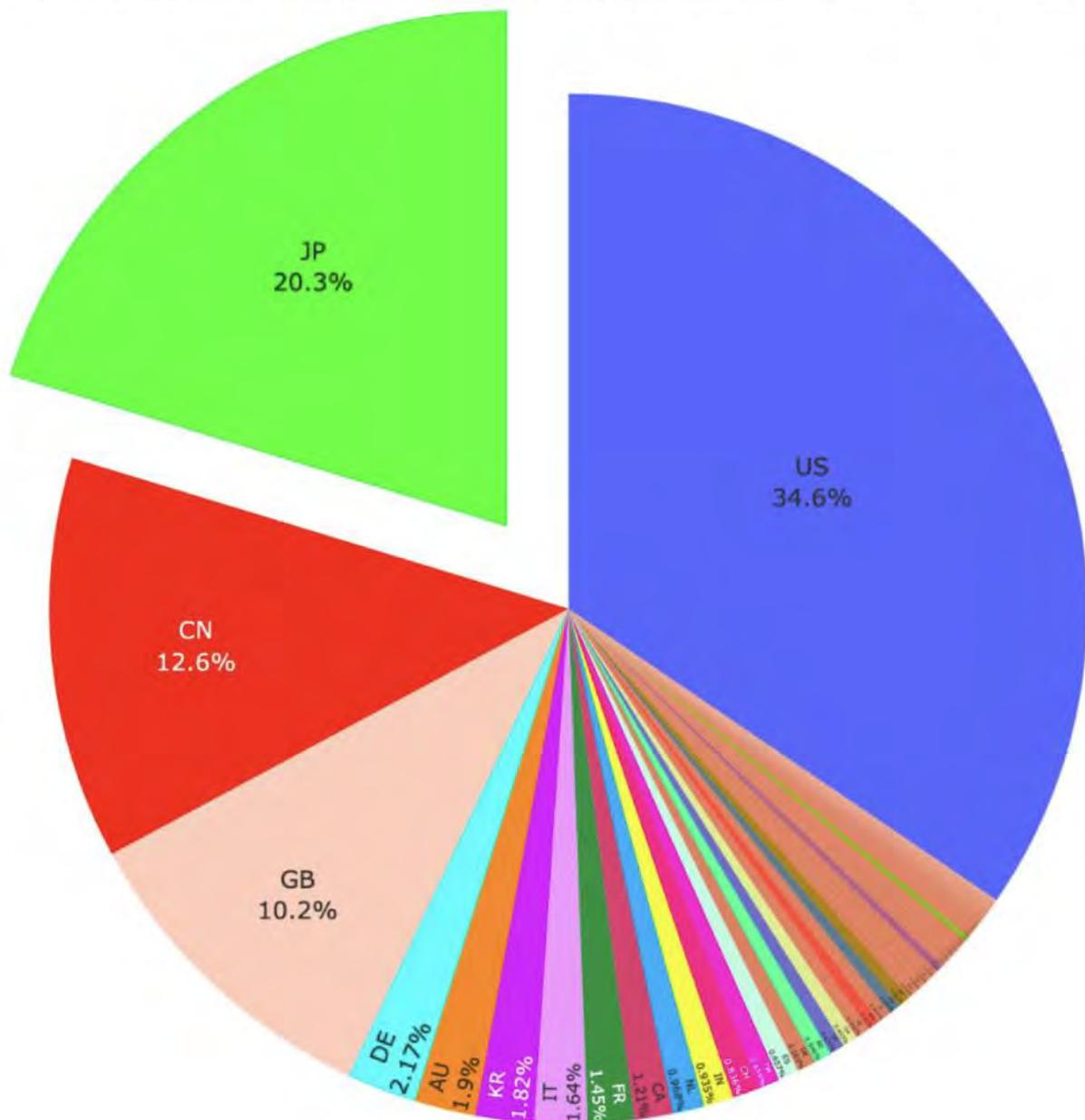
日本では、2000 年から 2005 年にかけて、経済産業省が「新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を通じて実施した「生物機能活用型循環産業システム創成プログラム」が合成生物学研究の先駆的事例となっている。同プロジェクトでは、生物機能の非水系での活用を目的に微生物等の抜本的な機能改変を行う研究開発が行われ、代謝のシミュレーションや細胞のモデリングなど、計算機を活用した研究開発が進められた。

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

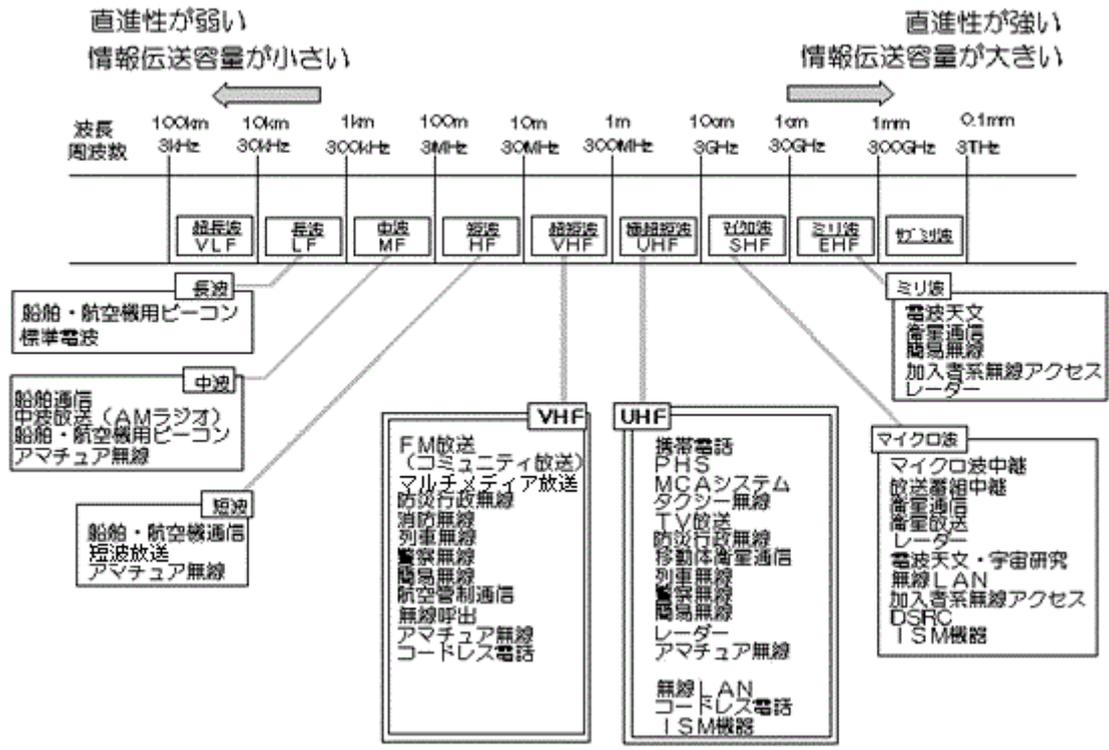
(1) 技術の概要

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な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>

出カマイクロ波」(HPM)兵器の本格的な研究開発に乗り出すことを明らかにしている³⁰⁴。この兵器は狙った目標に光速で到達し、命中率が高く、低コストであることがメリットとして掲げられており、戦闘機のスクランブルと比べ死傷リスクが減る利点もあるとされている。

3. 次世代ワイヤレスネットワーク (5G・6G)

(1) 技術の概要

移動通信システムは、1980年代以来、約10年ごとに発展を続けてきた(図10-2参照)。1979年に利用が開始された1G(第1世代移動通信システム)に始まり、現在では5G(第5世代移動通信システム)と呼ばれるワイヤレスネットワークが、2019年から段階的に運用されている。5Gでは、従来のネットワークより幅広い帯域の周波数を利用することで、より速く大容量のデータ通信が可能となる³⁰⁵。また、高速かつ大容量の通信を活かして、スマートシティ、VR・AR、自動運転、遠隔技術など、様々な分野における新サービスの躍進が期待されている。さらに、2030年代には6G(第6世代移動通信システム)によるさらなるシステム向上が予想される。6Gでは「超カバレッジ拡張」(自然、遠隔地域、宇宙にまで電波が及ぶ範囲を広げること)や「超多接続」(1平方キロメートルあたりの多接続を約1000万台に広げること³⁰⁶)が可能になるとされており、デジタル世界と現実世界の融合がさらに進むとされている³⁰⁷。他にも、通信による時差がほぼなくなるため、リアルタイムで電話の相手が3D投影や、ネットワークで人間の感覚を拡張する「人間拡張(Human Augmentation)」³⁰⁸。そしてそれによるロボット遠隔医療も可能となってくる。あらゆるものがネットワークにつながっている現在、次世代ワイヤレスネットワークの開発状況が及ぼす影響は多岐に渡るといえるだろう。

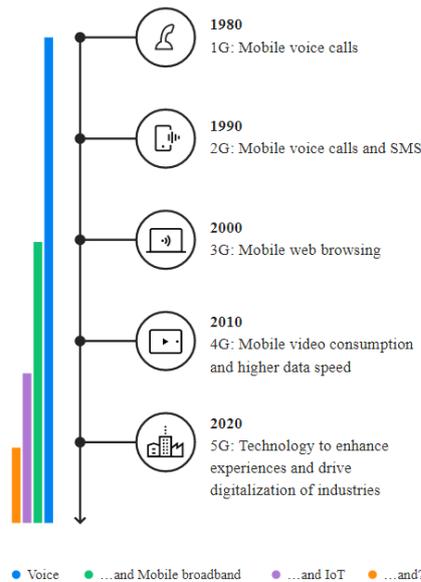
³⁰⁴ 読売新聞 「防衛省、『高出カマイクロ波』兵器を開発へ…軍用ドローンを無力化」

<https://www.yomiuri.co.jp/national/20220205-0YT1T50129/>

³⁰⁵ 周波数によっては、4Gの約100倍の通信速度を達成する。

³⁰⁶ 4Gでは約10万台、5Gでは約100万台とされる。

³⁰⁷ HITACHI 「5Gの次に来る通信規格『6G』とは？」 Retrieved from: <https://www.hitachi-solutions-create.co.jp/column/mobile/6g.html>



(図 10-2 ワイヤレスネットワーク時系列³⁰⁸⁾)

(2) 公的利用・安全保障における利用

5G・6G などの次世代ワイヤレスネットワークは、多様な社会インフラの基盤となり、膨大な情報のやり取りの場となるため、自国あるいは同盟国によって提供されるサービスを利用することが安全保障上望ましい。特に米国では、Huawei を始めとする中国の 5G・6G サービスへの警戒が強く、技術競争のなかでも要となる重要な分野だとされている³⁰⁹。

(3) 民生利用

5G は多様な分野において応用の可能性が示されており、すでに世界の一部の地域で実用化が始まっているサービスも少なくない。例としては、スマートシティ、自動運転、スポーツ観戦時のネットワークサービス向上及びサービス多様化、スポーツ実況、AR/VR を利用した没入型エンターテインメント、農業のデジタル化、リモート診療を含む遠隔医療、エネルギー資源の効率的な分配、などが挙げられる³¹⁰。5G の利用者が世界で最も多い中国では、2019 年に成都で世界初の医療用 5G ネットワークが開始されている³¹¹。

³⁰⁸ U. S. Department of Homeland Security “5G/6G Wireless Networks”

<https://www.dhs.gov/science-and-technology/5g6g>

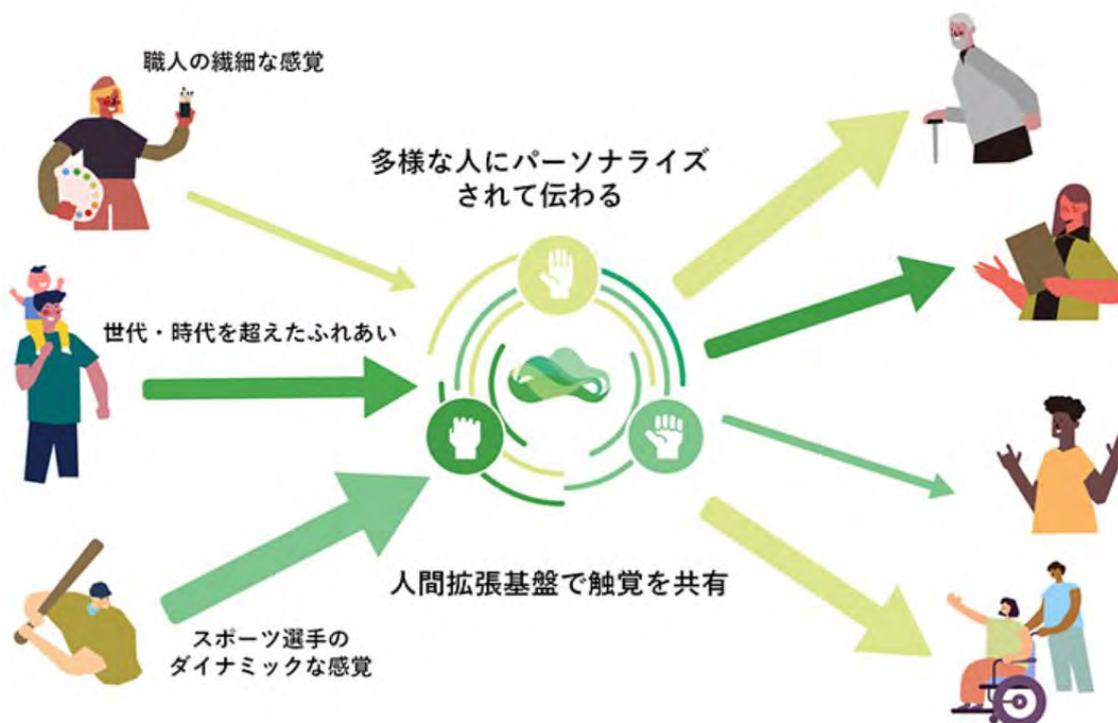
³⁰⁹ CSIS, “How 5G Will Shape Innovation and Security”

<https://www.csis.org/analysis/how-5g-will-shape-innovation-and-security>

³¹⁰ Ericsson, “5G Cases” <https://www.ericsson.com/en/5g/use-cases>

³¹¹ JETRO

6G においては人間と IoT の融合がさらに進化すると予想される。NTT ドコモは 2022 年、H2L 株式会社、FCNT 株式会社、および富士通株式会社の協力を得て、6G を活用したネットワークで人間の感覚を拡張する「人間拡張」を実現するための基盤を開発したと発表した³¹²。またその 1 年後には、慶應義塾大学、国立大学法人名古屋工業大学とともにこの基盤を利用して、モノに触れた時の触覚を「人間拡張基盤」で相手の感じ方に合わせて共有する技術「FEEL TECH」を開発している³¹³。相手の触感に対する感度特性を踏まえて触感を共有する基盤技術の開発は世界初だという。これらの感覚共有を通して、ロボットの遠隔操作やゲーム操作だけでなく、技術の伝承やスキルの共有などへの活用も考えられる。



(図 10-3 「FEEL TECH」イメージ)

4. 光ファイバー

(1) 技術の概要

光ファイバーとは、透過率の高い石英ガラスやプラスチックなどで構成される光の伝送路を指す。この光ファイバーをナイロンやシリコンなどの物質で保護して束ねることで、大容量の光信号を通す

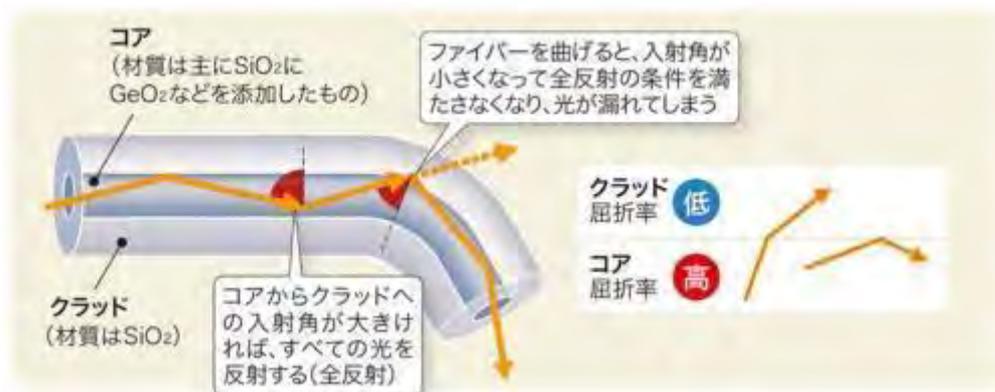
³¹² NTT docomo 「6G 時代の新たな提供価値「人間拡張」を実現する基盤を開発」

https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/01/17_00.html

³¹³ 世界初、6G 時代に新たな価値を提供する『人間拡張基盤』によって相手の感じ方に合わせて触覚共有する技術『FEEL TECH』を開発」

https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2023/01/25_00.html

光ファイバーケーブルとなる³¹⁴。光ファイバーケーブルは、従来の銅を用いた同軸ケーブルと比べて信号損失率が低く、高帯域であるため、現在の海底ケーブルではほとんどの敷設に採用されている。光ファイバーは細くて軽く、素材の希少性が低いことが、敷設のコスト削減にもつながっている。



(図 10-4 光ファイバーの仕組み)

その特徴を活かして、光ファイバーは超伝導スーパーコンピューターや医療用のファイバースコープセンサなど、通信以外の様々な分野にも応用されている。また、5G の整備が進むにつれて、光ファイバーの需要も世界的に高まっていき、研究開発・他分野への応用もさらに活発化されることが予想される。一例としては、量子暗号通信の分野では、量子暗号鍵配送において、光ファイバーの活用が注目されている³¹⁵。

(2) 公的利用・安全保障における利用

日本では光ファイバーによる超高速ブロードバンド基盤が広く普及しており、2021 年時点でその整備率（世帯カバー率）は 99.3%に達している。総務省は今後離島や過疎地などの未整備地域での整備を補助することで、2027 年 3 月末までに 99.9%とすることを目標としている³¹⁶。また、同様に光ファイバーを利用した海底ケーブルでは、政府が日本を周回する海底ケーブル網「デジタル田園都市スーパーハイウェイ」の構築を発表している。海底ケーブルの安全保障上のインプリケーションについては、次項目の「地下・海底ケーブル」で詳述する。

³¹⁴ NTT Communications 「光ファイバーとは？」

https://www.ntt.com/business/services/network/internet-connect/ocn-business/boen/knowledge/archi ve_109.html

³¹⁵ TOSHI BA 「量子暗号通信で世界最長 600 km以上の通信距離を実証」

<https://www.global.toshi ba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/21/2106-02.html>

³¹⁶ 総務省 「令和 4 年版 情報通信白書」

<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitpaper/ja/r04/html/nd242310.html>

(3) 民生利用

一般的には通信目的の利用が連想されやすい光ファイバーだが、医療分野においても重要な技術となっている。特に侵襲度の低い医療行為（低侵襲性治療）に使用されるレーザーや発光ダイオード（LED）では、手ごろで使いやすく、かつ人体に対して負担が少ないことから重宝されている³¹⁷。また、患部を観察する細径の内視鏡においても、多機能化するために光ファイバーの技術は欠かせない。

他にも、光ファイバーセンサーを利用することで、高速（1秒周期）、高分解能（1m単位）、長距離（1km、最大5km）で、光ファイバー上の温度・歪み分布をリアルタイムで測定することが可能だ³¹⁸。このセンサーは、製造装置の内部温度分布をタイムリーに測定することで、製品の品質管理やトレーサビリティ管理に活用したり、工場など大規模な空間の温度分布をリアルタイムで測定することで空調管理に活用したりすることができる。

5. 地下・海底ケーブル

(1) 技術の概要

地下ケーブル・海底ケーブルは、電柱などの設備を用意できない場所（都市部や海洋など）において、電気や通信をつなげるために利用されている。特に海底ケーブルは、現代において国際通信に欠かせないインフラとなっており、日々大容量の情報がやり取りされることから³¹⁹、安全保障上の観点からも注目が高まっている。

世界で初めての海底ケーブルは1851年、英国～フランス間のドーバー海峡に敷設された³²⁰。以来、海底ケーブル網は増加し、現代では南極大陸を除くすべての大陸を結んだ複雑なケーブル網が構築されている。2022年現在、世界で運用・敷設されている海底ケーブルの数は530に上り、その全長は2021年の時点で1300万キロメートルにも及んでいる³²¹。海底ケーブルの芯線には、1980年代後半から石英ガラスを利用した光ファイバーが使用されており、その周囲を覆うように何層かの膜によって保護されている³²²。海岸の近くでは特に損傷の可能性が高いため、保護膜は分厚い。

海底ケーブルに光ファイバーが利用されるのは、従来の銅を素材とした同軸ケーブルより多い情報を、安定して、より安価に運ぶことができるからだ。光ファイバーは信号損失率が低く、同軸では一

³¹⁷ NAI. Retrieved from: <https://www.nai-group.com/what-is-the-future-of-fiber-optics-in-medicine/>

³¹⁸ OKI「光ファイバーセンサー」. Retrieved from: https://www.oki.com/jp/sensing/optical_fiber/

³¹⁹ インターネットの国際通信の99%は海底ケーブルが担っている。

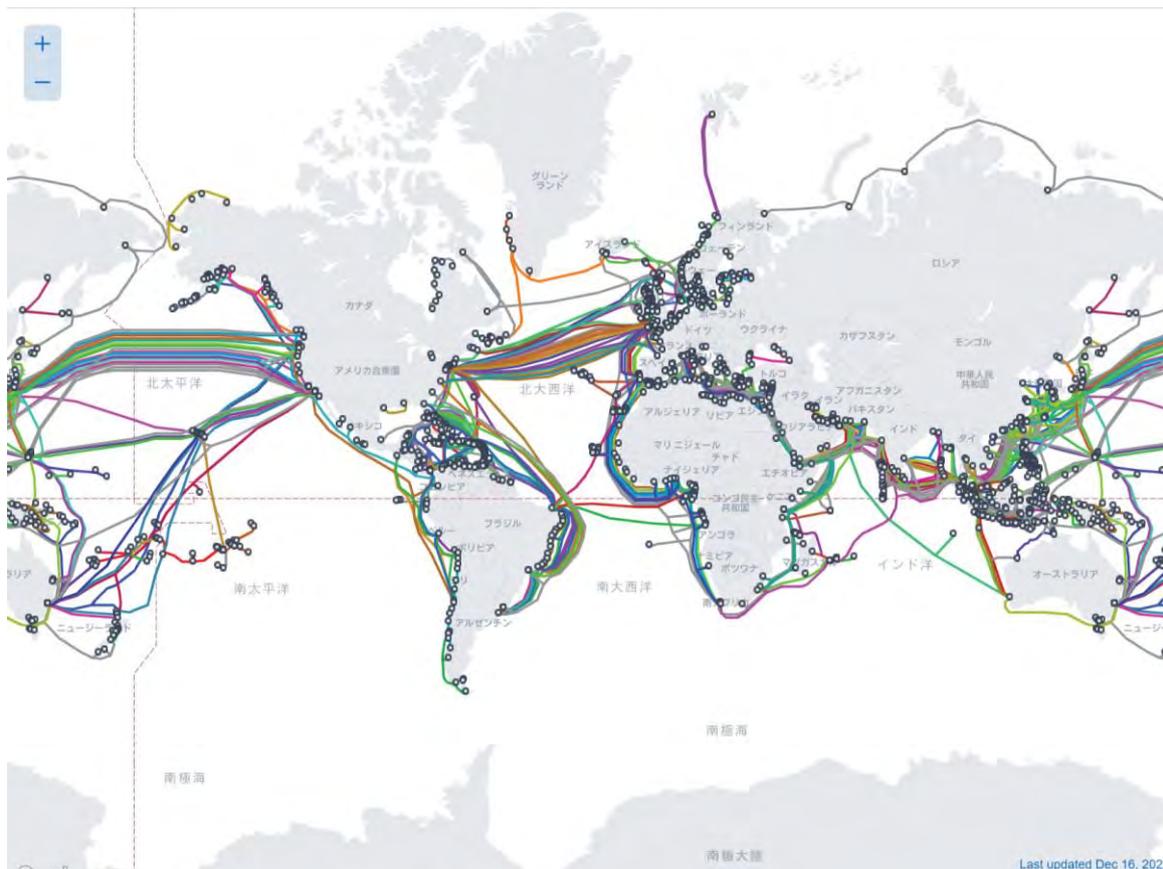
³²⁰ Burns (2017) *Origins of the Submarine Cable Industry in Britain*. Retrieved from: <https://atlantic-cable.com/Article/Origins/index.htm>

³²¹ telegeography, "Submarine Cable 101" Retrieved from: <https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>

³²² CABLExpress "What Are Fiber Optic Cables Made Of?"

<https://www.cablexpress.com/education/blog/what-are-fiber-optic-cables-made-of/>

般に中継器（劣化した信号を増幅する回路）を数 km ごと³²³に設置するのに対して、50～100km 間隔で済む。



(図 10-5 世界の海底ケーブル網³²⁴)

(2) 公的利用・安全保障における利用

米国では中国と覇権を争う世界の海底ケーブルにおいて、諜報や妨害の対象となることへの危機感が高まっており、安全保障上の観点からグーグル社やフェイスブック社（現在のメタ社）などが進めていた、ロサンゼルスと香港を結ぶ太平洋横断海底ケーブル敷設に米政府が変更を求めるなど、その懸念はすでに現場の敷設に影響を与えている³²⁵。2013 年にはエジプトで意図的に海底ケーブルが切断

³²³ 太平洋横断では 35km 程度。

³²⁴ Submarine Cable Map. Retrieved from: <https://www.submarinecablemap.com/>

³²⁵ INSIDER “The Trump administration’s mission to wall off the Chinese internet has officially killed a US-Hong Kong undersea cable project from Facebook and Google” Retrieved from:

<https://www.businessinsider.com/facebook-and-google-kill-off-hong-kong-undersea-cable-2020-9>

されるなど、物理的に破壊することも可能であり、海底ケーブルが安全保障上大きな存在となるにつれ、海底ケーブルが破壊のターゲットになる可能性について広く認識されるようになってきている³²⁶。

日本でも、安全保障面での懸念を踏まえ、他国のインフラに頼らないケーブル網の構想が進められている。2021年12月には、岸田首相が臨時国会の所信表明演説にて、日本を周回する海底ケーブル「デジタル田園都市スーパーハイウェイ」を向こう3年程度で完成させると表明した³²⁷。

(3) 民生利用

米調査会社のテレジオグラフィの調査によると、海底ケーブルの主なユーザーは大手通信業者から巨大IT企業へと移行しており、2010年では7割近くを通信事業者が占めていたのに対して、その後インターネット上でコンテンツやサービスを提供するコンテンツ事業者の利用が急伸し、ついにはその割合が逆転した³²⁸。その中でも特にGoogleとMetaは、それぞれYouTube、Facebookとリアルタイム性が高いネットサービスを提供しており、海底ケーブルへの需要が高い。上記2社に加え、AmazonやMicrosoftも、世界各地に自社サービスを利用するためのデータセンターを建設し、その拠点を繋ぐために海底ケーブルを丸ごと借りるケースもある³²⁹。それにとどまらず、上記の企業はこぞって自ら海底ケーブル建設のコンソーシアムに参加し始めており、2022年時点で確認されている建設計画中の20本のプロジェクトのうち、2割前後に巨大IT企業の名前が確認される³³⁰。巨大IT企業は特に長距離プロジェクトに出資することが多く、総延長に占める割合は5割近くを占めている。このように、今後も海底ケーブルにおいては各国政府だけでなく、GoogleやAmazonを始めとする巨大IT企業がプレイヤーとして存在感を増していくと考えられる。

³²⁶ 土屋大洋 「海底ケーブルをめぐる国際関係」, Retrieved from: <https://www.jiia.or.jp/research-report/post-10.html>

³²⁷ 首相官邸 「①成長戦略」 Retrieved from: https://www.kantei.go.jp/jp/headline/seisaku_kishida/seichousenryaku.html

³²⁸ 大矢博之「大手通信会社が没落しグーグル・フェイスブックが主役に、海底ケーブル敷設の牽引役交代」 Retrieved from: <https://diamond.jp/articles/-/310530>

³²⁹ 堀越功「GoogleやMetaがのみ込む海底ケーブル、超巨大ITのイントラ網に」 <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01943/00001/>

³³⁰ Ibid.



(図 10-6 海底ケーブルのデータ流通量の利用割合の推移³³¹⁾)

6. 衛星通信

(1) 技術の概要

衛星通信とは、静止軌道上の衛星に向けて送信局から情報を送信（アップリンク）した後、地球にある受信局に向けて一斉配信（ダウンリンク）する、衛星を介した通信システムのことである³³²。衛星通信には「広域・同報性」、「大容量」、「柔軟性」といった特徴があるほか、災害時や有事の際、地上の通信が途絶してもバックアップ回線として利用できることも大きな強みとして挙げられる。また、世界では現在でもインターネット接続のない地域が多くあり、そのようなインターネット回線を繋げにくい地域にもサービスを提供することが可能だ。

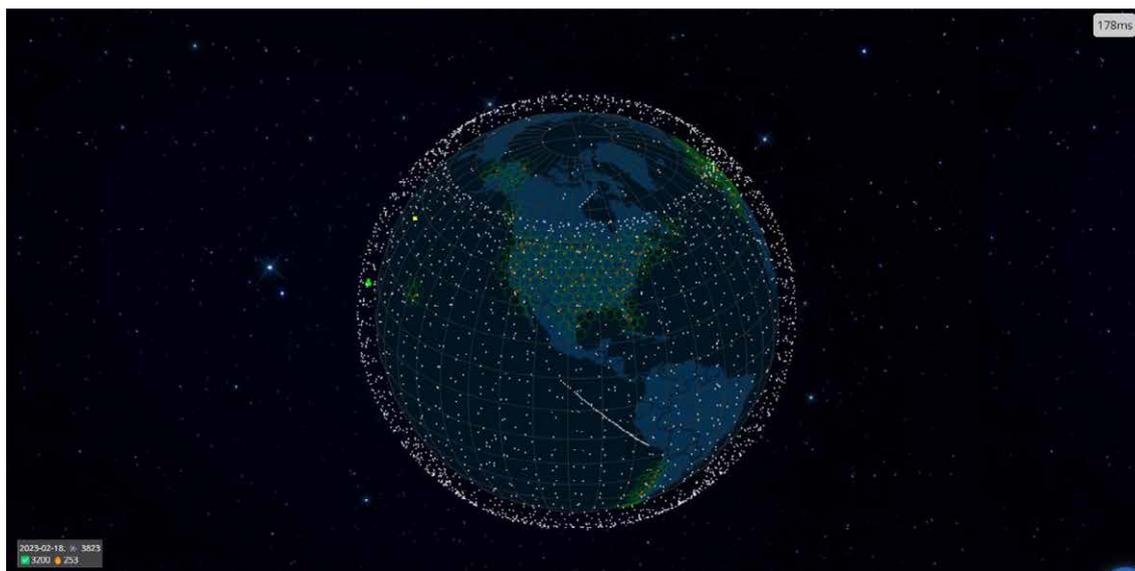
近年、衛星通信を通して大容量の通信接続を行う衛星ブロードバンドが開発されており、なかでも衛星コンステレーションと呼ばれる技術に各国の企業が次々と参入している。衛星コンステレーショ

³³¹ 大矢博之「大手通信会社が没落しGoogle・フェイスブックが主役に、海底ケーブル敷設の牽引役交代」 Retrieved from: <https://diamond.jp/articles/-/310530>

³³² JSAT「衛星通信とは」. Retrieved from:

https://www.skyperfectjsat.space/jsat/satellite_communications/#:~:text=%E8%A1%9B%E6%98%9F%E9%80%9A%E4%BF%A1%E3%81%AF%E3%80%81%E8%B5%A4%E9%81%93%E4%B8%8A%E7%A9%BA,%E7%90%86%E6%83%B3%E7%9A%84%E3%81%AA%E6%89%8B%E6%AE%B5%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82

ンとは、地上 2000km 以内に配置された数十基～最大数千基という数の人工衛星を連携させ、地球全土をカバーした通信網を構築する衛星ブロードバンドだ。例え一基が不具合を起こしたり、妨害されたりしても、全体のネットワークを維持することができるため、各国は次々と衛星コンステレーションの構築を進めようとしている。米国の SpaceX は地球低軌道に 3000 基以上の通信衛星を打ち上げ、starlink という衛星コンステレーションを形成している³³³。starlink は低コストの衛星バスや、再利用可能なローンチヴィークルによってコストを抑えて軌道に打ち上げられ、すでに地球上のほとんどの地点からもアクセス可能な衛星通信の提供を始めている。



(図 10-7 starlink 衛星分布・サービス対象地域)

(2) 公的利用・安全保障における利用

地震や津波災害などが発生した際、電話等の通信がつながりにくい状況になりやすい。日本では、衛星通信と GPS トラッキングシステム機能を持つ LPWA 端末 (Low Power Wide Area) を組み合わせた災害救助活動支援ネットワークを構築するなど、災害時の実証訓練が行われている³³⁴。また、米国ではガソリン、ディーゼル、液化天然ガスなどの燃料を輸送するパイプラインにおいて、異常を感知するための衛星通信を活用したモニタリングシステムが一部導入されている³³⁵。

³³³ starlink Retrieved from: <https://www.starlink.com/technology>

³³⁴ 「インターネット白書 2020」

<https://wparchives.jp/files/pdf/wp2020/wp2020-ch03-05-p173.pdf>

³³⁵ HUGHES “Satellite Communications Help Ensure Pipeline and Public Safety”

<https://www.hughes.com/resources/insights/satellite-broadband/satellite-communications-help-ensure-pipeline-and-public>

(3) 民生利用

衛星通信は通信が届きにくい地域におけるインターネット接続の可能性をもたらすとともに、航空機や船舶などの移動体における高速インターネットの提供のように、インターネット体験の質を向上させるうえでも重要な手段となる³³⁶。具体的には、航行・飛行中のストリーミングサービス、ライブ配信、音楽や映画のダウンロード、VNP 接続などが可能となる³³⁷。また、飛行機において航空会社側においてもソフトウェアやアプリを使用することによって効率化・コストカットを行い、地上との交信において代替案を提供することができるなど、導入のメリットが存在する³³⁸。

7. ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェア

(1) 技術の概要

ハードウェアはパソコン本体などの物理的な機器を、ファームウェアはパソコン本体などに最初から組み込まれているソフトウェアを、ソフトウェアはパソコンなどに命令を出すプログラムのことを指す。サイバー攻撃が増加している昨今、これらはいずれも電子機器を作動させるために重要な要素であり、それぞれが信頼できる作り手・サプライチェーンを経て利用されるかどうかは、消費者の安全、ひいては国家の安全に大きく関わってくる。

国家にとっては、インフラの管理、国防上の機密情報の保持、有事の情報戦などにおいて、重要な関心ごとになりつつある。米国バイデン大統領は 2021 年 5 月、同月に発生した大手石油パイプライン企業コロニアル・パイプラインに対するランサムウェア攻撃を受けて、サイバーセキュリティの強化を命じる大統領令に署名した³³⁹。その中で、サイバーセキュリティを強化するためには、サイバー空間を構築する個々の要素を透明化し、信頼のおけるものにする必要があるとの方針が示された。日本においても、「サイバーセキュリティ 2022（2021 年度年次報告・2022 年度年次計画）」にてマルウェア「Emotet（エモテット）」などによるランサムウェア被害の拡大が報告されており、関係省庁の連携・企業への注意喚起が必要とされている³⁴⁰。

³³⁶ JSAT

<https://www.skyperfectjsat.space/jsat/satellitecommunications/>

³³⁷ Aerospace HONEYWELL “5 Ways Satellite Communications Can Benefit Your Aviation Business”

<https://aerospace.honeywell.com/us/en/about-us/blogs/5-ways-satellite-communications-can-benefit-your-business>

³³⁸ Ibid.

³³⁹ The White House *Executive Order on Improving the Nation's Cybersecurity*.

<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/05/12/executive-order-on-improving-the-nations-cybersecurity/>

³⁴⁰ 内閣サイバーセキュリティセンター 「サイバーセキュリティ 2022（2021 年度年次報告・2022 年度年次計画）」。

Retrieved from: <https://www.nisc.go.jp/pdf/policy/kihon-s/cs2022.pdf>

(2) 公的利用・安全保障における利用

2022年10月31日、大阪急性期・総合医療センターでランサムウェアによるシステム障害が発生し、長期的な影響を及ぼした³⁴¹。患者の給食を納入している事業者からウイルスが侵入したことが原因だった。他にも、同年12月3日には金沢市にある金沢西病院がサイバー攻撃を受けて電子カルテの一部が閲覧できなくなるなど、医療機関での被害は急増している。大阪急性期・総合医療センターで起きた攻撃では、サーバーのセキュリティーシステムをアップデートしていなかった取引先の事業者から感染する「サプライチェーン攻撃」によるものだったことが判明しており、公的な機関におけるセキュリティーの確保のためにも、民間の企業へのセキュリティー・リテラシーの徹底した周知が課題として浮き彫りになった。

(3) 民生利用

上記のようなランサムウェアの被害は、民間企業にも広まっている。被害を事前に防ぐためには、最新のセキュリティーシステムにアップデートする他、近年ではハードウェア側面から、「ルートオブトラスト（信頼の起点）」でデバイスそのものの信頼性を高めようとする動きもある。これは、IoT機器のシステムに改ざんがされているかどうかなどをチェックする仕組みを、ICチップなどのハードウェアで保護することで、その認証情報を保護するというものである³⁴²。その他にはAIを活用した監視・早期検知がMicrosoftなどによって模索されているものの、同時にAIを活用した新しい形態のサイバー攻撃も増加しており、今後も地道な対策が必要とされる³⁴³。

8. 通信・ネットワークセキュリティ

(1) 技術の概要

通信・ネットワークが日々の生活や仕事に必要不可欠なものになっている現在、あらゆる情報はデジタル空間を介してやりとりされており、そのセキュリティーの向上は公的・民生利用を問わず喫緊の課題となっている。冷戦期に米ソ間で行われていたとされる海底ケーブルの通信傍受や、ロシアのウクライナ進攻におけるサイバー攻撃・通信障害に見られるように、通信・ネットワークのセキュリ

³⁴¹ 読売新聞オンライン 「大阪の病院で電子カルテシステムに障害、「ランサムウェア」によるサイバー攻撃か」。

Retrieved from: <https://www.yomiuri.co.jp/national/20221031-0YT1T50162/>

³⁴² EWON *Hardware root of trust: what and why?*. Retrieved from:

<https://www.ewon.biz/ja/all-resources/ewon-iiot-blog/hardware-root-of-trust-what-and-why>

³⁴³ Microsoft. *Improving AI-based defenses to disrupt human-operated ransomware*. Retrieved from:

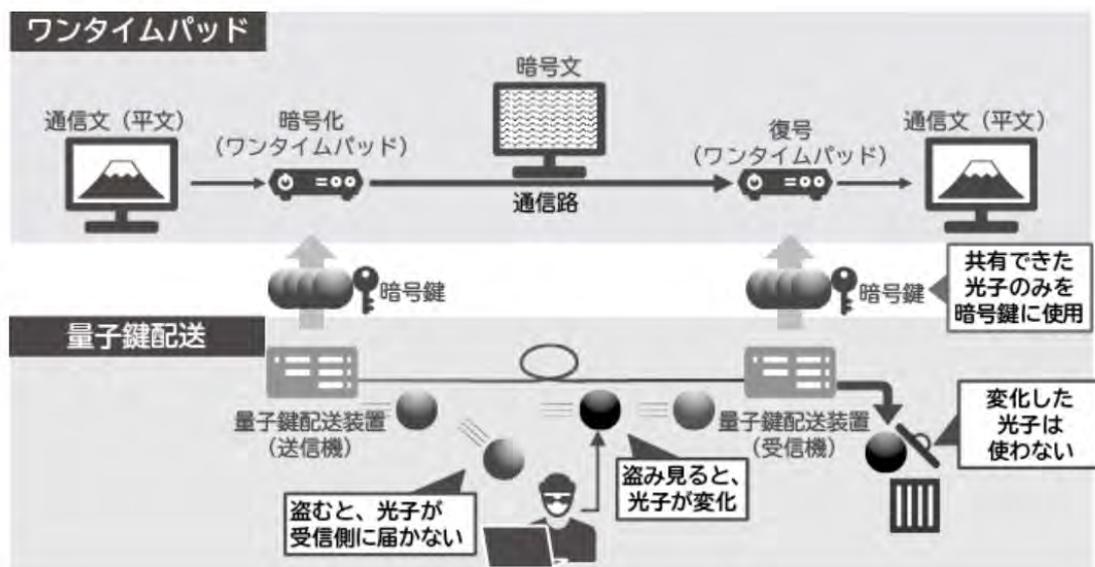
<https://www.microsoft.com/en-us/security/blog/2022/06/21/improving-ai-based-defenses-to-disrupt-human-operated-ransomware/>

ティは安全保障上とても重要な分野であるといえる³⁴⁴。また、量子コンピューターなどの新技術の台頭は、これまでの通信・ネットワークセキュリティの常識を覆しかねない。

(2) 公的利用・安全保障における利用

公的機関の通信・ネットワークセキュリティを強化するためには、常に新技術に利用・及び新技術への対応が必要となってくる。米国 DARPA は 2022 年 10 月、サイバー攻撃を防ぐために AI を活用するプログラム CASTLE (Cyber Agents for Security Testing and Learning Environments) を発表した³⁴⁵。このプログラムでは、現実的なネットワーク環境を想定し、標的に対する持続的な攻撃 (APT 攻撃) をシミュレーションすることで、AI にネットワークの弱点を自動学習させることを目指している。

また、現在の通信で利用されている RSA 暗号は、量子コンピューターの出現によって早晚、限界を迎えると言われており、米国と中国を筆頭に新たな暗号の手法—量子暗号の開発が急がれている。量子暗号は「ワンタイムパッド」と「量子鍵配送」と呼ばれる 2 つの部分からなり、量子力学の性質を利用して、盗聴の検知と防止を行う³⁴⁶。



(図 10-8 量子暗号の仕組み³⁴⁷)

³⁴⁴ 土屋大洋 「海底ケーブルをめぐる国際関係」. Retrieved from: <https://www.jiia.or.jp/research-report/post-10.html>

³⁴⁵ DARPA *DARPA's CASTLE to Fortify Computer Networks*. Retrieved from: <https://www.darpa.mil/news-events/2022-10-24>

³⁴⁶ NEC 「光が導く次世代の暗号技術『量子暗号』」. Retrieved from: <https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210124.html>

³⁴⁷ I b i d.

民生利用

在宅ワーク環境の整備が進んだことや、サプライチェーン攻撃によるランサムウェア被害が増加したことにより、日本では今後通信・ネットワークセキュリティの市場は大きくなっていくと予想されている。2022年の富士キメラ総研の国内市場調査によると、2027年度のネットワークセキュリティビジネスは2021年度と比べて50%増加するとされている³⁴⁸。一方、米国ベルファーセンターが発表した「国家サイバーパワー・インデックス(NCPI)」では、日本は世界のなかで16位に位置づけられた一方で、「商業性」の項目では6位と比較的高い評価を受けている³⁴⁹。今後、世界的に拡大する通信・ネットワークセキュリティの市場において、商業性及び競争力をいかにつけていくかという戦略が求められている。

9. メッシュネットワーク

(1) 技術の概要

メッシュネットワークとは、複数の中継器が発した電波を交差させて、網目状に電波を張り巡らせることで、データをバケツリレー式に転送するシステムである³⁵⁰。個々のノードをクラウドに繋げていた従来の手法に対して、個々のノード間で対等にデータをやり取りすることで、抗たん性・効率性の改善が可能になる。また、センサー内蔵型の無線機を利用した省電力無線メッシュネットワークの開発などにより、公共インフラの監視サービスやIoTサービスの消費電力削減が期待される³⁵¹。第5節で触れた衛星コンステレーションは、メッシュネットワークの概念を宇宙に拡張し、衛星同士をメッシュ状に接続したものだということができる。これらのシステムはいずれも、個々の機器への依存を減らしているがゆえに、抗たん性が強みとなっている。

(2) 公的利用・安全保障における利用

メッシュネットワークの活用事例として期待されているものの一つがスマートシティである。公園などの公共施設において、灌漑システムをメッシュ状に繋げることで、水資源を60%以上減らすこと

³⁴⁸ 富士キメラ総研 「2022 ネットワークセキュリティビジネス調査総覧 市場編」

<https://www.fcr.co.jp/report/223q03a.htm>

³⁴⁹ Belfer Center “National Cyber Power Index 2022”

https://www.belfercenter.org/sites/default/files/files/publication/CyberProject_National%20Cyber%20Power%20Index%202022_v3_220922.pdf

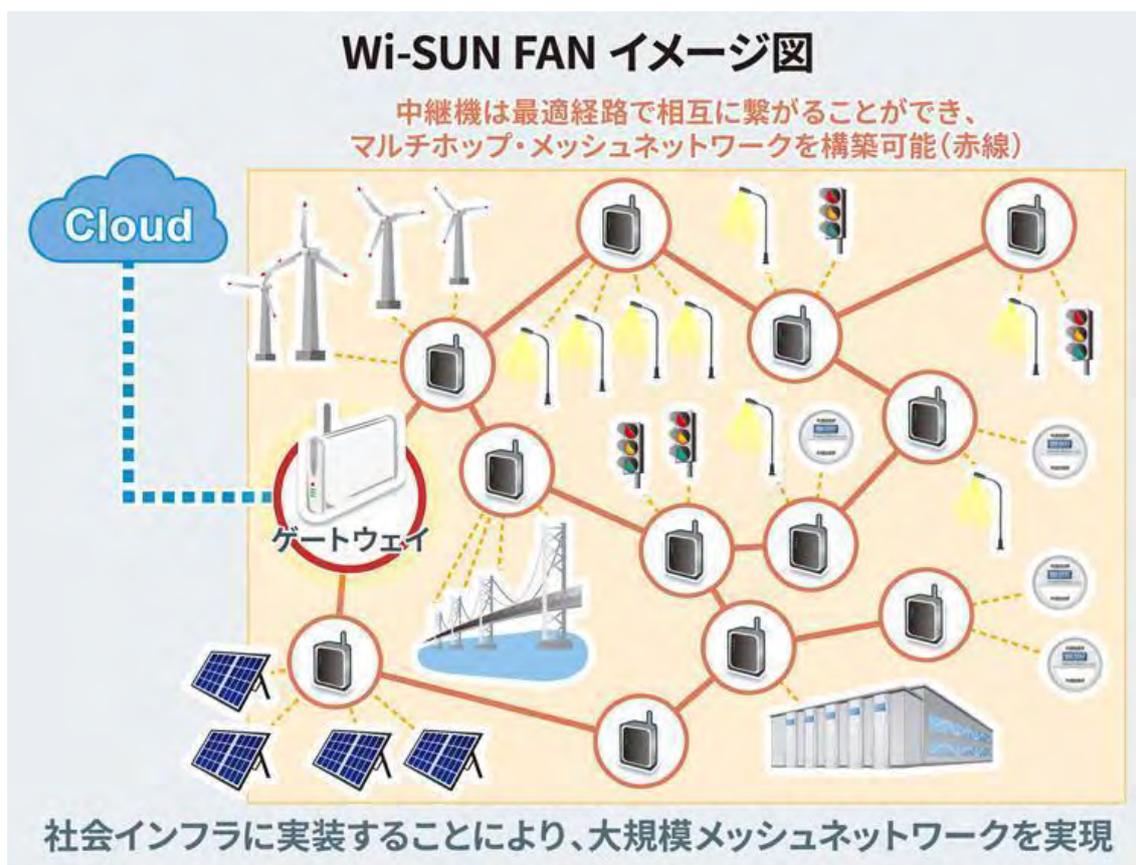
³⁵⁰ Ruijie 「メッシュネットワークについて」. Retrieved from: https://www.ruijie.co.jp/blog/mesh-network_436930466073018368.html

³⁵¹ TOSHIBA 省電力無線メッシュネットワーク + IoT クラウドサービス. Retrieved from:

https://www.tjsys.co.jp/embedded/iot-infrastructure/index_j.htm

ができる³⁵²。街灯にはネットワーク接続型街路灯を使用することで、消費エネルギーや周囲の光量・交通量を瞬時に共有し、効率的な稼働を可能にする。実際にこのようなネットワーク接続型街路灯を世界で最も多く導入しているマイアミでは、日本発の無線規格「Wi-SUN」の技術を活用した街路灯が50万個弱活用されている³⁵³。IoT Analyticsによると、ネットワーク型街路灯の市場は2023年に36億ドルを超え、年平均成長率21%で成長すると予測されている。日本でも、Wi-SUNを利用した1000台規模の大規模メッシュネットワーク構築が可能なサービス提供が、社会インフラへの実装を通して始められている³⁵⁴。

また、メッシュネットワークの抗たん性という側面からは、米国DARPAを筆頭に衛星通信やワイヤレスネットワークのメッシュ化の研究開発が各国で進められている。



(図 10-9 メッシュネットワークの社会インフラ活用イメージ³⁵⁵)

³⁵² ACi iST *Mesh Networking in Smart City Technology*. Retrieved from: <https://www.aciist.com/mesh-networking-in-smart-city-technology/>

³⁵³ Wi-SUN Alliance 「スマートシティ」. Retrieved from: <https://wi-sun.org/ja/smart-cities/>

³⁵⁴ ROHM 「業界初、1000台のメッシュネットワークを構築可能な『Wi-SUN FAN』対応モジュールソリューションを提供開始」

https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2021-01-26_news_wi-sun-fan&defaultGroupId=false

³⁵⁵ 同上

(3) 民生利用

上記に挙げた社会インフラへの活用以外にも、メッシュネットワークの応用事例は多岐に渡る。例えば医療の現場において、各病室の患者のモニタリングへの活用、工業用機械のモニタリング、セキュリティシステムへの活用、インターネット接続がない場所におけるチャットサービス、メッシュ Wi-fi の構築などである³⁵⁶。

メッシュ Wi-fi は壁の多い建築物や RC 造の住宅において、よりスムーズな同時多接続を可能にする。家庭内での同時接続や無線 LAN の電波は、無線 LAN ルーターから離れたり、間に障害物が存在したりすると、弱くなる。中間に無線 LAN 中継器を設置すればある程度改善できるものの、接続台数が多い場合の全体の通信速度低下や、中継器が 1 機でも故障した場合ネットワークが途切れてしまうという弱点を有している³⁵⁷。これに対して、メッシュネットワークを活用したメッシュ Wi-fi は快適な通信速度の提供を可能にし、通信網を構築する機器が一部機能しなくなっても、ネットワーク全体としては機能し続けることができる。

10. まとめ

これまで、通信・ネットワークにおける各技術の開発動向と、それぞれの公的・民的インプリケーションを概観してきた。最後に日本の近年の政策動向を整理し、まとめとしたい。

2020 年 3 月に商用化が始まった 5G に関しては、必要な基地局の数の多さから環境整備に時間がかかると予測されていたものの、政府の後押しもあり 2022 年 3 月時点で 5G 人口カバー率が 93.2%、都道府県別では東京都、埼玉県、神奈川県、大阪府は 99%を超えている³⁵⁸。一方、2022 年 9 月時点で、5G 契約者数は 5736 万と携帯電話契約者数に占める割合が 28%と、徐々に増加しているものの、人口カバー率に比して一般ユーザーへの普及が進んでいないのが実態だ³⁵⁹。その要因としては、5G 対応の端末が十分に普及していないことと、5G を利用した商業サービスがまだまだ開発途上であることが考えられる。5G、そしてその先の 6G いずれにおいても、環境整備後の実用化の側面を強化していく必要があるだろう。

³⁵⁶ Spi ceworks *What Is a Mesh Network? Meaning, Types Working, and Applications in 2022*. Retrieved from: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-mesh-network/>

³⁵⁷ 日経 XTECH 「無線 LAN の新潮流、メッシュネットワークの威力」. Retrieved from: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00421/090400006/>

³⁵⁸ 総務省 「5G の整備状況（令和 3 年度末）の公表」. Retrieved from: https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ki ban14_02000561.html

³⁵⁹ 総務省 「電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表（令和 4 年度第 2 四半期（9 月末））」. Retrieved from: https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ki ban04_02000212.html

通信・ネットワークについては、2014年にサイバーセキュリティ基本法が成立し、2015年に閣議決定された「サイバーセキュリティ戦略」が3年ごとに累次決定されている³⁶⁰。対策が進む一方、脅威も増加しており、2022年にはランサムウェアによる被害が病院という社会的に重要なインフラで多発した。政府は省庁を始めとする公的機関のランサムウェア対策を強化することはもちろん、社会インフラを担うサプライチェーン全体の強度を固めるべく、民間企業とも積極的に連携をとる必要がある。また、2022年5月に開催された日米豪印首脳会談（QUAD）の共同声明には、サイバーセキュリティに関して脅威情報の共有とインド太平洋地域における能力構築（キャパシティ・ビルディング）プログラムによって協力していく方針が示された³⁶¹。米国、オーストラリア、そしてインドなどの友好国と、このような情報共有や技術協力を深めていくことが、国際的なルール作りを主導するためにも重要になってくるであろう。

³⁶⁰ 内閣サイバーセキュリティ戦略 「サイバーセキュリティ戦略本部」 . Retrieved from:

<https://www.nisc.go.jp/council/cs/index.html>

³⁶¹ 外務省 Quad Joint Leaders' Statement. Retrieved from:

https://www.mofa.go.jp/fp/nsp/page1e_000401.html

第 11 節 指向性エネルギー技術 (Directed Energy)

指向性エネルギー技術は米国における兵器開発の中で発展してきた。「指向性エネルギー兵器」は電磁気エネルギーによって標的を破壊もしくは無力化する兵器として構想され、半世紀以上もの年月をかけて研究開発が進められてきた³⁶²。標的の破壊を目的とした従来の兵器がミサイルや銃弾のように動的かつタンジブルな物質であるのとは対照的に指向性エネルギー兵器は、静的でかつ物質的に触れられるものではない点が特徴である。指向性エネルギー兵器は一見 SF 映画に出てくるような非現実的な兵器のようにも思われるが、実はその開発は 1950 年代にさかのぼり、冷戦期の米国ではロシアの大陸間弾道ミサイルを迎撃するための新興軍事技術として指向性エネルギー兵器の開発がレーガン政権で議論に上がる等³⁶³、半世紀以上の年月をかけて技術革新と挫折を繰り返しながら着実に実用化に向けての研究が進められている³⁶⁴。一方で、指向性エネルギーは、民生用途でも広く活躍している技術でもある。例えば、医療現場では、指向性エネルギーの一種である粒子線(Particle beam)によるがんの治療が進められたり、近年では 3D プリンティング技術との組み合わせにより、製造業でもその応用の場を広げつつある³⁶⁵。

本章では、指向性エネルギーの軍事用途と多様な民生用途の両面に焦点を当てて、近年の技術動向について分析する。軍事用途に関しては、研究開発が盛んに行われてきた高出力エネルギーレーザー(high-energy Laser: HEL)、高出力マイクロ波(High-power Microwave: HPM)兵器そして粒子線エネルギー兵器(Particle Beam Weapon: PBW)について解説する。民生用途に関しては、特に他の新興科学技術との関係性を意識して、3D プリンティング技術に代表される、アディティブ・マニュファクチャリング技術(Additive Manufacturing)における粒子線技術の応用について解説する。

1. 指向性エネルギー兵器

ここでは、高出力エネルギーレーザー(high-energy Laser: HEL)と高出力マイクロ波(High-power Microwave: HPM)兵器に焦点を当てて、その技術の特性、用途そして研究開発動向について解説する。両者は共に指向性エネルギー兵器に位置付けられるが、その飛距離と範囲で大きく異なるため、各々異なる標的やオペレーションで使用されることを想定している(図 11-1 及び 11-2)。一部の専門家に

³⁶² Joint Chiefs of Staff, *Joint Electromagnetic Spectrum Operations*, Joint Publication 3-85, May 22, 2020, p. GL-6.

³⁶³ Richard M. Roberds, Introducing the Particle-beam Weapon. *Air University Review* 35(5) (1984).

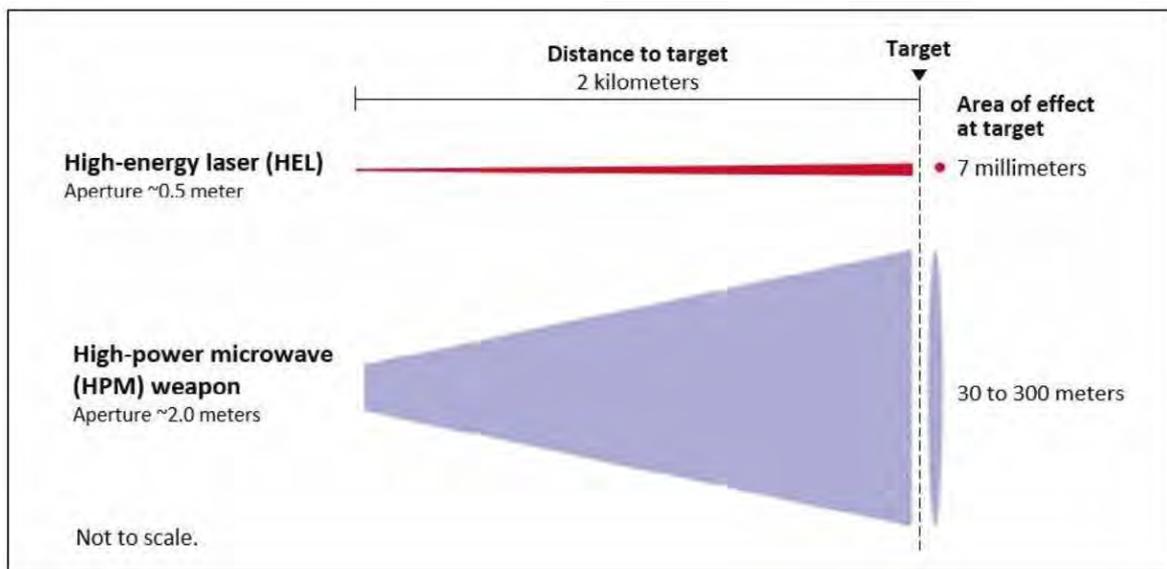
³⁶⁴ GlobalData Thematic Research, Directed Energy Weapons: Timeline. *Army Technology* (11st August 2020). Retrieved from <https://www.army-technology.com/comment/directed-energy-weapons-laser/>

³⁶⁵ *Design, products and applications*, Harvesting particle beams for use in 3D printing. March 18, 2019. <https://www.dpaonthenet.net/article/168928/Harvesting-particle-beams-for-use-in-3d-printing.aspx>

よると HPM の方がより広範囲の領域を攻撃の対象にできるため、ドローンのような無人飛行システム (UAS) への対処兵器としてより有用となるという見解を示している³⁶⁶。

	HEL	HMP
範囲	狭い	広い
用途	ミサイルの迎撃・無力化	複数の UAS の迎撃
強み	ターゲットを確実に照射	<ul style="list-style-type: none"> ・ 広範囲のターゲットに照射可能 ・ 致死に至らせない程度の反撃が可能
弱み	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天候や大気の状態によっては効果が弱まる。 ・ 集中砲火には対応できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ シールドを張った敵には無効 ・ シールドを張っていない味方も巻き添えになる可能性有。

(図 11-1 HEL と HPM の比較)



(図 11-2 HEL と HPM の性能比較)

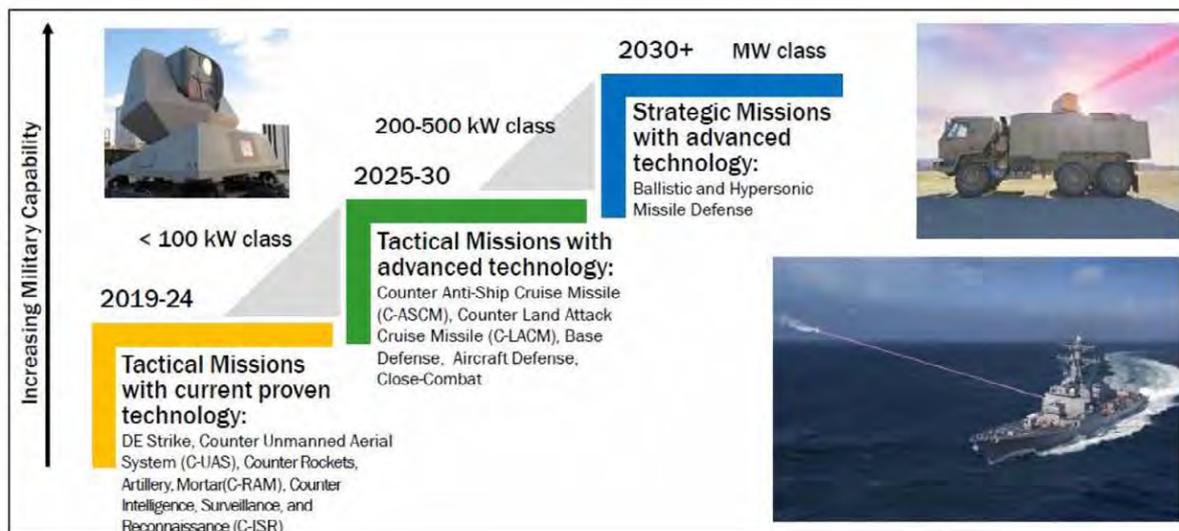
(1) 高出力エネルギーレーザー (high-energy Laser: HEL)

高出力エネルギーレーザー (HEL) は主にミサイル等の迎撃の他に、ドローンのような無人飛行システム (UAS) を撃墜したり、また衛星やレーザーを無力化ないし破壊する目的で使用されることが想定され

³⁶⁶ Kelley M. Saylor, *Department of Defense Directed Energy Weapons: Background and Issues for Congress*.

(Congressional Research Service, 28th September 2021).

ている³⁶⁷。米国国防省は HEL の出力向上に関する明確なロードマップを策定しており、2030 年までの出力 200-500kW 級の、2030 年以降には出力 MW クラスの強力なエネルギーレーザーが登場することが期待されている(図 3)。



(図 11-3 米国国防省の HEL 開発ロードマップ)

HEL の代表的な用途として開発が進んでいるのは、海軍が保有する戦艦に搭載し、弾道ミサイルを迎撃するというものである。米国海軍は戦艦等を攻撃対象にする巡航ミサイルの迎撃を目的に「ソリッドステートレーザー技術成熟」(Solid State Laser Technology Maturation: 通称 SSL-TM) 計画を現在進めている。2020 年にはノースロップ・グラマン社が開発した 150kW の半導体レーザー砲 LWSD(Laser Weapons System Demonstrator)をドック揚陸艦「ポートランド」(USS Portland: LPD-27)に搭載し、ターゲットを破壊する実証実験を実施し、成功している³⁶⁸。

³⁶⁷ i b i d.

³⁶⁸ DoD Joint Intermediate Force Capabilities Office, USS Portland conducts Laser Weapon System Demonstrator Test. (22nd May 2020). Retrieved from <https://jnlwp.defense.gov/Press-Room/In-The-News/Article/2213219/uss-portland-conducts-laser-weapon-system-demonstrator-test/>



(図 11-4 USS Portland から照射される LWSD³⁶⁹)

同様の試みは空軍でも見られる。米国空軍は Self-Protect High-Energy Laser Demonstrator (SHiELD)をというプロトタイプシステムを空軍研究所(AFRL), ボーイング社(Boeing), ロッキード・マーチン社(Lockheed Martin)、そしてノースロップ・グラマン社(Northrop Grumman)で共同開発しており、第4世代の F-15 戦闘機から現在開発中の第5世代の戦闘機にレーザー兵器を搭載して、対空または対地ミサイルの迎撃を試みている³⁷⁰。またボーイング社もボーイング 747-400F の機体を改良しレーザー砲-ABL を搭載した YAL 1A を開発している。2010 年 2 月には地上発射型ミサイル MARTI の迎撃に成功しており、その後も実装に向けた研究開発が進められてきた³⁷¹。

³⁶⁹ <https://www.pacom.mil/Media/News/News-Article-View/Article/2197905/uss-portland-conducts-laser-weapon-system-demonstrator-test/>

³⁷⁰ Joanne Perkins, AFRL's SHiELD Set to Receive Critical Assembly. (Air Force Research Laboratory Public Affairs, 23rd February 2021). Retrieved from <https://www.afrl.af.mil/News/Article-Display/Article/2511692/afrl-s-shield-set-to-receive-critical-assembly/>

³⁷¹ Aircraft Technology, Airborne Laser System (ABL) YAL 1A. Retrieved from <https://www.airforce-technology.com/projects/abl/>



(図 11-5 F-16 戦闘機に搭載されたレーザー兵器(ロッキード・マーチン社))



(図 11-6 レーザー砲-ABL を搭載した YAL 1A(ボーイング社)³⁷²⁾

(2) 高出力マイクロ波(High-power Microwave: HPM)兵器

HPM はドローンのような無人飛行システム(UAS)の撃墜や無力化に効果を発揮する。米国のレイセオン・テクノロジーズ(Raytheon Technologies)社が開発している Phaser™ high-power microwave system は比較的近距离を飛行する UAS の撃墜を目的とした高出力マイクロ波兵器であり、光速でドローン等の飛行物体を打ち落とすことができる。レイセオン社は、Phaser に続き、長距離の UAS の撃墜を目的とした HPM である Counter-Electronic High Power Microwave Extended Range Air Base Defense (通称 CHIMERA)の実証を 2020 年 10 月に空軍研究所から受注しており、これにより長距離の UAS の撃墜と無力化が可能となる³⁷³⁾。

³⁷²⁾ <https://www.airforce-technology.com/projects/abl/>

³⁷³⁾ Sara Sirota, AFRL to award Raytheon sole-sourced contract for directed-energy weapon. *Inside Defence* (29th October 2020). Retrieved from <https://insidedefense.com/insider/afri-award-raytheon-sole-sourced-contract-directed-energy-weapon>



図 11-7 Phaser™ high-power microwave system (レイセオン・テクノロジーズ社)³⁷⁴

HMP はまた海軍でも積極的に研究開発が進められている。米海軍海上戦闘センター (Naval Surface Warfare Center Dahlgren Division: NSWCDD) は HEL と組み合わせて使用する HMP の開発を進めている。この HMP は敵の船舶の集団に向けて照射することで電子障害を引き起こし、無力化させることができる。LEL や HMP は物理的なミサイルや銃弾よりも 1 照射あたりのコストが低いことから海軍のあらゆるオペレーションでの活躍が期待されている³⁷⁵。



(図 11-8 戦艦に搭載された HMP のイメージ (NSWCDD)³⁷⁶)

また、マイクロ波を用いた兵器は空軍研究所とカートランド空軍基地の指向性エネルギー局及び米国ボーイング社は、Counter-electronics High Power Microwave Advanced Missile Project (通称 :

³⁷⁴ <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/what-we-do/counter-uas/effectors/phaser-high-power-microwave>

³⁷⁵ Brett Tingley, The Navy Is Betting Big on High-Power Microwave Weapons. *The Warzone* (7th January 2022). Retrieved from <https://www.thedrive.com/the-war-zone/43795/navy-is-betting-big-on-high-power-microwave-weapons>

³⁷⁶ <https://www.thedrive.com/the-war-zone/43795/navy-is-betting-big-on-high-power-microwave-weapons>; 実際のオペレーションの様子は以下の動画が詳しい。 <https://www.youtube.com/watch?v=TzBWAXARE-Q&t=38s>

CHAMP) のミサイル技術デモンストレーションを 2012 年に実施した。CHAMP はミサイルの形状をした高出力マイクロ波兵器であり、敵地を通過することでその電子システムを人体に物理的な影響を与えることなく無力化させることができる。このデモプロジェクトは米国の HPM の中でも最も成功したデモの一つとされている³⁷⁷。



(図 11-9 CHAMP のイメージ(ボーイング社))

2. 粒子線エネルギー兵器 (Particle Beam Weapon: PBW)

粒子線エネルギー兵器(PBW)は、大量の亜原子粒子(subatomic particles)あるいは原子を光速にまで加速させることでレーザービームを作り出し対象物を破壊する兵器である。PBW は、そのエネルギーの形状において他の指向性エネルギー兵器とは異なる性質を持つ。PBW には電子、プロトンあるいは水素原子といった粒子が図 4 のような陽極と陰極の関係からエネルギーを生み出す仕組みとなっている。これら 3 つの粒子が電荷を帯びることで、光線を作り出すわけである。米国は、HEL のような他の指向性エネルギー兵器と同様に PBW に関心を持つようになったのは、1958 年と比較的に早い。DARPA の前身である Advanced Research Projects Agency (ARPA)が発足し、PBW の研究開発に関心を寄せ始めた³⁷⁸。さらに、冷戦期の 1980 年にもロシアの大陸間弾道ミサイルの防衛技術として PBW の研究開発が進められた。DARPA でも PBW の研究開発プロジェクトが立ち上がる等、冷戦時のミサイルの脅威に対抗するための新興科学技術として検討が進められた³⁷⁹。1989 年には米国エネルギー省傘下の研究所であるロスアラモス国立研究所(Los Alamos National Laboratory: LANL)が、宇宙空間から照射する中性子

³⁷⁷ James Benford, John A. Swegle, and Edl Schamiloglu, *High Power Microwaves, third edition*. (CRC Press, 2007).

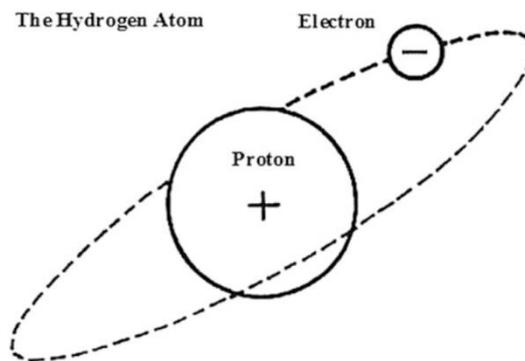
³⁷⁸ Lee Grodzins Footnotes on, Particle-beam Weapon History

³⁷⁹ The US Army Centre of Military History, *Department of the Army Historical Summary, FY 1981*. (Washington D.C.: U.S. Army Center of Military History, 1983).

ビーム(Neutral particle beam: NPB)の実証実験を実施し、大気圏外からミサイルの撃墜が可能であることを示した。この実験は、今日でも「最も成功した実験」として認識されている³⁸⁰。



(図 11-10 PBW イメージ³⁸¹)



(図 11-11 PBW の粒子の関係性³⁸²)

こうした PBW は 2000 年代に一度下火なるもののここ数年でさらに注目を浴びるようになった³⁸³。2019 年頃から米国のミサイル防衛局(Missile Defense Agency: MDA)が宇宙空間で使用する PBW の研究開発を進めるために中性子ビーム(NPB)の詳細な計画を提示し、米国陸軍が推進する Technology

³⁸⁰ Morris B. Pongratz, Los Alamos Participation in Active Experiments in Space. (New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 11st September 2017). Retrieved from

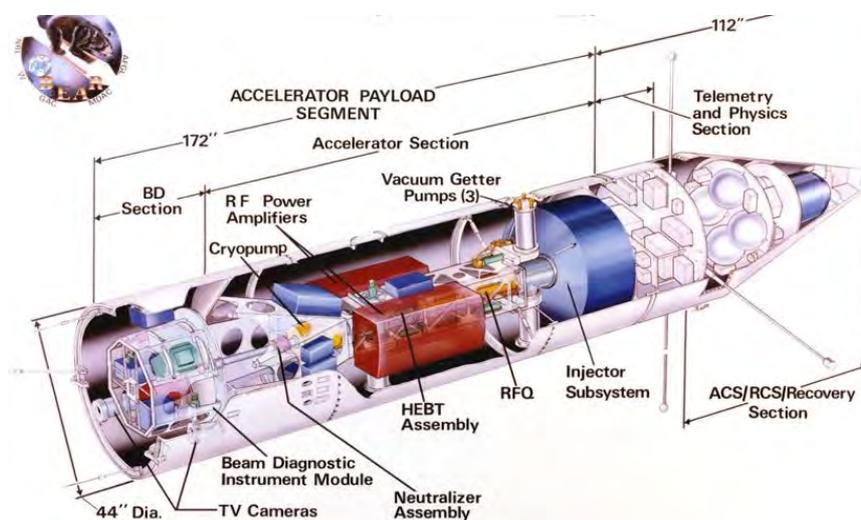
<https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-18-20883>

³⁸¹ <https://www.extremetech.com/extreme/153585-a-deeper-look-into-lasers-particle-beams-and-the-future-of-war>

³⁸² Zohuri, *Directed-Energy Beam Weapons*. p. 311.

³⁸³ Bahman, Zohuri, *Directed-Energy Beam Weapons*. (Berlin: Springer, 2019); John Parmentola and Kosta Tsipis, Particle-Beam Weapons. *Scientific America*, 240 (April 1979).

Maturation Initiatives (TMI)の対象技術に含めた。ミサイル防衛局は、宇宙空間からミサイルを迎撃する NPB が戦略的ミサイル防衛のためのゲームチェンジャーとなることを宣言し、2023 年に軌道上での実験を行うという野心的なターゲットを掲げている³⁸⁴。



(図 11-12 PBW の構造)

3. 公的利用・安全保障における利用

ここまで、ミサイル防衛や無人飛行システム(UAS)への対抗兵器技術として開発が進められてきた「指向性エネルギー兵器」について、高出力エネルギーレーザー(high-energy Laser: HEL)と高出力マイクロ波(High-power Microwave: HPM)兵器そして粒子線エネルギー兵器 (Particle Beam Weapon: PBW)の3つの技術分野に焦点を当ててその開発の経緯や近年の開発動向について解説をしてきた。指向性エネルギーの開発構想自体は、1950年代に遡り、半世紀以上の時間をかけながらようやく実証実験に成功する段階に入ったというところである。しかし、その開発も一筋縄にはいかず、技術開発が下火になることもあった。例えば、HELの技術開発は1990年代に停滞期を経験し、2000年以降に劇的に技術開発が進んだ一方で、PBWは2000年代には下火となり、2010年以降により注目を浴びるようになった。元々は冷戦期のソ連の弾道ミサイル防衛を目的に期待が高まった指向性エネルギー兵器であるが、近年ではドローンのようなUASへの対応措置として、またさらにはPBWのように大気圏外からミサイルを迎撃する技術が開発されようとしている。このように、新たに出現する安全保障上の脅威に対抗すべく指向性エネルギー兵器はその核心的な設計思想を維持しながらも、この半世紀を通じて野心的に発展を続けてきた技術開発分野だと言えよう。映画「スターウォーズ」のようなレーザー兵器が現実に姿を現す日はそう遠くないのかもしれない。

³⁸⁴ Joseph Trevithick, Pentagon Aims to Loft Particle Beam Anti-Missile Weapon into Space in Four Years. The Warzone, 19th March 2019. Retrieved from <https://www.thedrive.com/the-war-zone/27039/budget-docs-show-pentagon-aims-to-loft-particle-beam-anti-missile-weapon-into-space-in-four-years>

4. 民生利用

指向性エネルギーの中でも特に粒子線を用いた技術が民生技術分野でも活用が期待されている。粒子線技術は、原子力技術の研究にこれまで大きく貢献してきたプラズマ物理学や核融合技術と極めて近い関係にあることから、関連する先端科学技術の発展とともに、技術革新が進められてきた³⁸⁵。主な応用領域としてはがん治療等に関連した医療技術や製造業が挙げられる。ここでは、この2つの領域に焦点を当てて、粒子線技術の開発動向とその応用について概観したい。

(1) 医療分野における粒子線技術—癌治療を事例に

医療分野では、特にがん治療の用途として粒子線治療の研究が進められてきた。癌の治療ではX線による放射線治療が有力な治療法として採用されてきたが、最近では重荷電粒子を用いた治療法がより効果的な治療法として有力視されている。2000年以降、プロトン(陽子)や炭素イオンを用いた放射線治療の研究が飛躍的に進み、癌治療に大きく貢献してきた³⁸⁶。昨年2022年には、インペリアル・カレッジ・ロンドンの研究者らが、英国研究技術革新機構(UK Research and Innovation: UKRI)から新たな研究資金を獲得し、イオン治療のための研究施設(Ion Therapy Research Facility)の設立を進めていることが報告されている³⁸⁷(図11-13)。従来のX線の代わりにプロトンや炭素の粒子線を用いて、腫瘍を摘出するものであり、よりの確かつ効果的に腫瘍の摘出が可能となると期待されている。プロトンの粒子線は現状あまり普及しておらず、今回新たに研究施設ができることで、癌治療におけるイオン粒子線の利用が益々加速することとなる。また、2019年には、英国の研究チームが、ヘリウムや炭素といった重荷電粒子を用いた治療技術の検討を開始し、英国政府もこうした新たな粒子線治療をサポートする体制を構築してきた³⁸⁸。

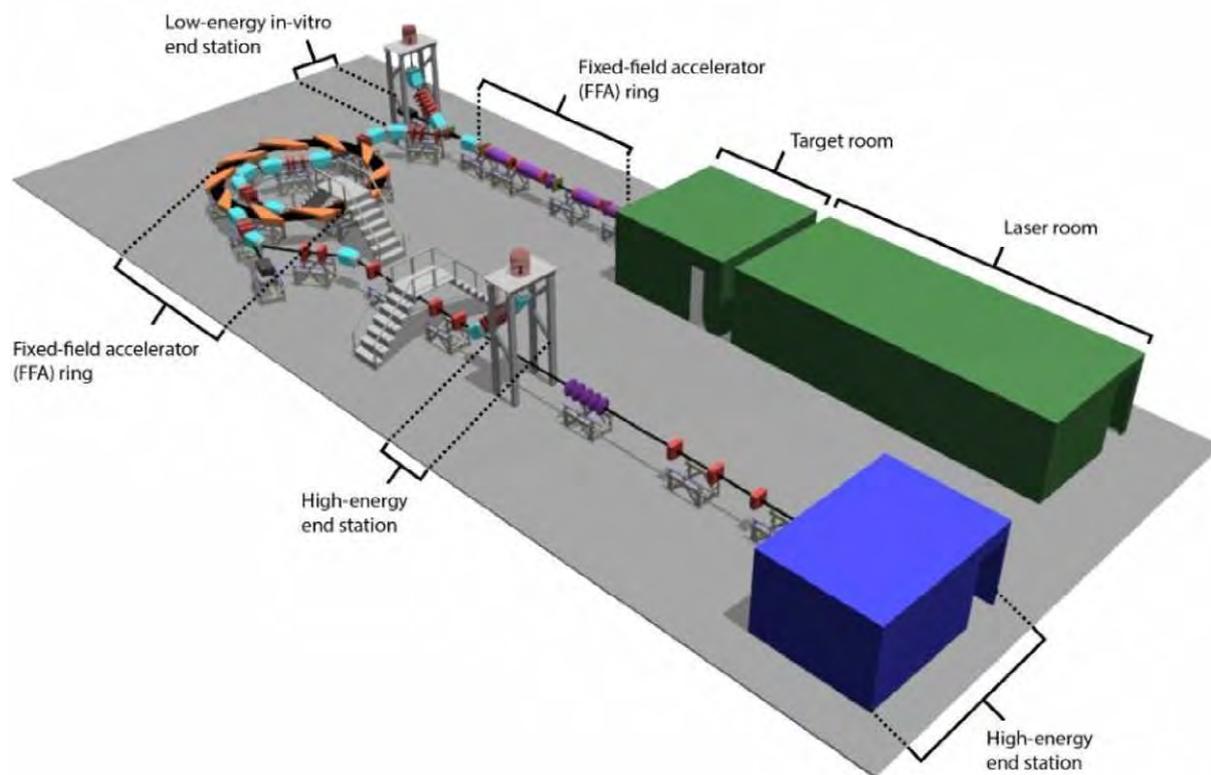
³⁸⁵ MIT PSFC, “Waves & beams”. Plasma Science and Fusion Center, MIT.

<https://www.psfc.mit.edu/research/topics/waves-beams>

³⁸⁶ Polf, Jeremy and Parodi, Katia. “Imaging particle beams for cancer treatment.” *Physics Today* 68 (2015). <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.2945>

³⁸⁷ Dunning, Hayley, “Ion beam cancer therapy facility gets a £2m development boost.” Imperial College London (October 19, 2022). <https://www.imperial.ac.uk/news/240731/ion-beam-cancer-therapy-facility-gets/>

³⁸⁸ Kirkby, Karen Joy, et al. “Heavy charged particle beam therapy and related new radiotherapy technologies: The clinical potential, physics and technical developments required to deliver benefit for patients with cancer.” *The British journal of radiology* 93(1116) (2020).



(図 11-13 Ion Therapy Research Facility の概念図³⁸⁹⁾)

(2) 製造業における指向性エネルギー技術の応用—3D プリンティング技術を事例に

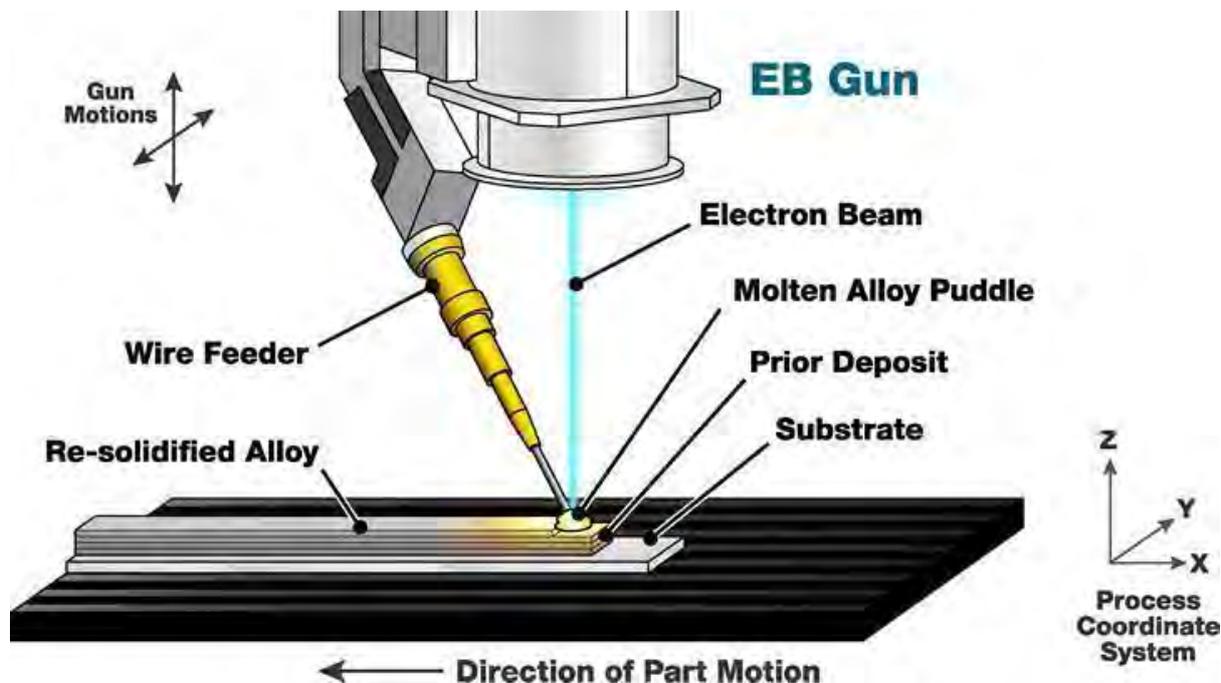
指向性エネルギー技術はまた製造業においても活躍の場を広げている。特に3D プリンターに代表されるアディティブ・マニュファクチャリング技術の開発と実装が進む中で、粒子線や電子線 (Electron Beam) への関心と期待が高まってきた。当該領域では、Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) という電子線を用いたアディティブ・マニュファクチャリングの研究が進められており、電子線の技術革新が3D プリンターの性能の向上とコスト削減に大きく付与すると考えられている(図 11-14)³⁹⁰。米国で3D プリンターの開発と製造を手掛ける Sciaky 社 (Sciaky, Inc.) はこうした EBAM 技術分野で有望な企業の一つである。Sciaky 社は、レーザー技術を用いて自由自在に鉄素材を切断する技術も用いて、鉄鋼業・製造業向けに3D プリンターを提供している(図8)。特に大きな鉄鋼部品をプリント製造できることから航空宇宙産業に多くのクライアントを有する。近年では、米国ロッキード・マーチン

³⁸⁹ Ibid.

³⁹⁰ Sciaky Inc., “Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) - Advantages of Wire AM vs. Powder AM.” *AM*.
<https://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>

社に宇宙システム向けのターンキーEBAM を納入しており、航空宇宙メーカーの製造効率性とコスト削減に貢献してきた³⁹¹。

また、英国では、ハダースフィールド大学は Innovate UK より 2.25 百万ポンドもの研究資金を得て、D プリンティングにおける粒子線の研究に着手している³⁹²。この研究プロジェクトは次世代型 EBAM machines プログラムの一環で進められているものであり、粒子線技術が 3D プリンターのさらなる用途拡大につながることを期待されている。



(図 11-14 Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) イメージ³⁹³)

³⁹¹ Sciaky, “Sciaky, Inc. to provide turnkey electron beam additive manufacturing system to Lockheed Martin space systems.” (September 24, 2014) <https://www.sciaky.com/news/press-releases/sciaky-to-provide-turnkey-electron-beam-additive-manufacturing-system-to-lockheed-martin-space-systems>

³⁹² Thomas, “Innovate UK £2.25m funds particle beams in 3D printing innovation.” www.3ders.org. (March 18, 2019). <https://www.3ders.org/articles/20190318-innovate-uk-225m-funds-particle-beams-in-3d-printing-innovation.html>

³⁹³ Sciaky Inc., “Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) - Advantages of Wire AM vs. Powder AM.”



(図 11-15 Sciaky 社の EBAM 作業工程の様子³⁹⁴)

5. まとめ

指向性エネルギー技術は、ミサイル防衛等の軍事用途として研究開発が進められてきた先端科学技術である。その歴史は古く、実に半世紀以上前から米国を中心に研究開発が進められてきた。1990 年以降実証実験等が重ねられる中で徐々に実用化へと進みつつある。また指向性エネルギーは民生用途でもその活躍の場を広げてきた。医療分野では、癌治療のための粒子線技術の開発が進められてきた一方で、より近年では、3D プリンティング技術の発展に伴い、電子線や粒子線を用いたより効率的かつ低コストなプリンティング技術の研究開発と実装が進められてきた。こうした技術は製造業中でも航空宇宙分野で極めて重要な技術の一つとして利用されてきた。

最後に、海外では、中国やロシアの研究機関で当該分野の研究者が多く在籍しており、また国籍別に見ると米国、中国について英国が多いことがアスタミューゼ社の調査で明らかにされた。特に医療分野への応用では英国の研究機関での研究が盛んなことを考慮すれば今後英国との共同研究の機会を設けていく等、より一層英国とのパートナーシップを強化すること重要となるだろう。

第 12 節 フィンテック (Financial Technology)

1. 分散型台帳技術 (Distributed Ledger Technologies)

(1) 分散型台帳技術の基本概念

³⁹⁴ Sciaky Inc., “Make Metal Parts Faster & Cheaper with EBAM® Metal 3D Printing Technology.”

<https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>

Bitcoin や Ethereum 等で知られる仮想通貨に用いられている技術は、Ledger Technologies (DLT、分散型台帳技術) というブロックチェーン技術である。ブロックチェーン技術とは、取引ひとつひとつをハッシュ関数を介在させた数値 (=ハッシュ値) とともに記録し (=ブロック化)、これがひとつ直前に実施された取引のハッシュ値をも含めて保存される (=情報のチェーン化) という仕組みである。

分散型台帳技術は、ハッシュ値とともに保護された取引記録を分散して保存することで各々のこれらの仕様は取引記録の改竄を防ぐ効果が高いとされている³⁹⁵ ³⁹⁶。金融取引や重要データの授受などは、このような技術的信頼性を特に必要とすることから、仮想通貨にとどまらず、金融資産や不動産、絵画、宝石など資産性を帯びる取引やその記録への応用が期待されている。

(2) 分散型台帳技術の課題 (安全性・プライバシー確保³⁹⁷)

通常の金融取引は、第三者にその情報を開示しないというプライバシーや機密性が確保されている。このため、現存の銀行間金融取引は、各国の中央銀行等信頼できる中立的第三者が運用するシステムを使って決済するのが一般的である。他方で分散型台帳はその性質から、取引内容をどこまで、どの参加者に対して開示するかという機密性の保持の観点と対立する。また、取引情報が一元管理されず複数に存在することになるため、同じくプライバシーの保護と加えて効率性の観点からも改善の余地がある³⁹⁸。各取引の識別子を公開した上で、参加者間を順に周回して処理する等の対応が求められるなど、既存の中央銀行が有する信頼性と取引の介在という意味での独立性を分散型台帳でも担保するための提案が待たれるところである。

(3) 国際決済銀行 (BIS) による規制

分散型台帳技術はデータの中央集約を止めて分散することによってデータの改竄防止や追跡を可能にするものであるが、分散先のセキュリティが脆弱であったことによってサイバー攻撃を受けて資産を失うといったケースも存在した³⁹⁹。国際的には、決済・市場インフラ委員会 (CPMI) と証券監督者

³⁹⁵ Chiu, Iris H-Y. (2017). A new era in fintech payment innovations? *Law, Innovation & Technology*. Dec2017, Vol. 9 Issue 2, p190-234. 45p.

³⁹⁶ DARPA. (2022). *DARPA-Funded Study Provides Insights into Blockchain Vulnerabilities*. Retrieved from: <https://www.darpa.mil/news-events/2022-06-21>

³⁹⁷ Mills, David et al. (2018). Distributed Ledger Technology in Payments, Clearing and Settlement. *Journal of Financial Market Infrastructures*, Special Issue 2018, v. 6, iss. 2-3, pp. 207-49.

³⁹⁸ MOONEY JR., CHARLES W. (2017). *Law & Contemporary Problems*. 2018, Vol. 81 Issue 1, p1-20. 20p.

³⁹⁹ Filip Caron. (2017). *Blockchain: Identifying Risk on the Road to Distributed Ledgers*.

<http://www.isaca.org/en/resources/isaca-journal/issues/2017/volume-5/blockchain-identifying-risk-on-the-road-to-distributed-ledgers>

国際機構（IOSCO）によって「金融市場インフラのためのサイバー攻撃耐性に係るガイダンス⁴⁰⁰」が公表されている。このガイダンスは例えばサイバー攻撃の検知に用いるツールの活用、②サイバー攻撃によるインシデント発生後、2時間以内に業務を再開し、当該インシデント発生日の終了までに決済が完了できるようシステムとプロセスを設計することの必要性（2HRT0⁴⁰¹）等について提唱しており、サイバー攻撃を未然に防ぎ、サイバー攻撃を受けた際に迅速かつ効果的に対処し復旧するよう、金融界における取り組みを促している。こうした国際的に合意された目線は、分散型台帳技術を応用した金融インフラの堅牢性を高める上でも基礎的な考え方として捉えられる。

米国「ブロックチェーン・イノベーション法」⁴⁰²と「デジタル・タクソミー法」⁴⁰³

米国では、2021年にブロックチェーン・イノベーション法とデジタル・タクソミー法が成立した。この法律は、連邦取引委員会にブロックチェーン技術とその消費者保護への利用について研究・報告させるためのもので、米国主導の規制を確立させることを想定したものとされている。

米国国防省では、分散型記帳技術を、空域管理や戦闘機パイロットの安全性と戦闘能力を確保するために役立てる研究もされている。これによって指令・制御システムを集中管理するのではなく、分散化する狙いがあるとされている。また、航空機部品やミサイル等機密性の高いもののサプライチェーン管理⁴⁰⁴におけるブロックチェーンの研究⁴⁰⁵も進められている。輸送中のリアルタイム監視が可能になるなど安全保障に関わる場面での運用も十分に担保できるとの背景である。

⁴⁰⁰ BIS *CPMI and IOSCO publish final guidance on stablecoin arrangements confirming application of Principles for Financial Market Infrastructures.*

<https://www.bis.org/press/p220713.htm>

⁴⁰¹ BIS *Guidance on cyber resilience for financial market infrastructures* : <https://www.bis.org/cpmi/publ/d146.pdf>.

⁴⁰² Heather Morton. (2022). *Blockchain Legislation 2022*. <https://www.ncsl.org/research/financial-services-and-commerce/blockchain-2022-legislation.aspx>

⁴⁰³ U. S. Congress (2021). H.R. 3638: Digital Taxonomy Act. Retrieved from:

<https://www.govtrack.us/congress/bills/117/hr3638/text>

⁴⁰⁴ Central Data and Digital Office. (2022). <https://www.gov.uk/government/publications/roadmap-for-digital-and-data-2022-to-2025/transforming-for-a-digital-future-2022-to-2025-roadmap-for-digital-and-data>

⁴⁰⁵ James Gatto and Townsend Bourne. (2019). *Blockchain Tech Has Numerous Applications for Defense*.

Retrieved from: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/12/11/blockchain-tech-has-numerous-applications-for-defense>

欧州連合「EU デジタル金融パッケージ」⁴⁰⁶

2020年に公表されたEU デジタル金融パッケージは、EUにおける金融セクターのデジタルトランスフォーメーション（DX）と新しい金融商品の開発・利用を支援し、同時に消費者保護と金融の安定を守ることを目的に、今後5年間のEU デジタル金融戦略について定めている。この中で、分散型台帳技術の全面的な運用を前に、係る技術にまつわる障害を洗い出すことを目的に実証試験を行うことが決められている。分散型台帳技術は大量のエネルギーを消費すること、また、既存の高速決済システム（TIPS）が24時間365日稼働して十分対応できていること等この技術の導入の要否については今後の検証を待つこととなる⁴⁰⁷。

2. デジタル資産 (Digital Assets)

(1) 中央銀行デジタル通貨 (Central Bank Digital Currency : CBDC) ⁴⁰⁸

中央銀行デジタル通貨は、既存の中央銀行券と異なる、新たな形態の電子的な中央銀行マネーである。CBDCは、金融にまつわるコスト削減やファイナンシャル・インクルージョン（金融包摂）⁴⁰⁹の拡大、既存のデジタル決済システムに対する安定性の確保等、さまざまなメリットが指摘されている。

米国を例にとると、2022年1月、米国連邦準備制度理事会（Federal Reserve Bureau, FRB）が「中央銀行発行によるデジタル通貨についてのディスカッション・ペーパー」を発表⁴¹⁰し、CBDCのメリットやデメリット、他国の状況などについて解説している。

このFRBのディスカッション・ペーパーを受けて、米国財務省は2022年9月「デジタル通貨（米ドル）についての報告書^{411 412}」を発表した。現状の課題と将来に向けての目標を暗号通貨などのデジタ

⁴⁰⁶ European Commission. (2020). *Digital finance package*. Retrieved from:

https://finance.ec.europa.eu/publications/digital-finance-package_en

⁴⁰⁷ The European Central Bank. (2022). *Demystifying wholesale central bank digital currency*. Retrieved from:

<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2022/html/ecb.sp220926-5f9b85685a.en.html>

⁴⁰⁸ Ilijevski, Andrej. SHAPING THE FUTURE OF FINTECH: FROM A PERSPECTIVE OF CENTRAL BANKS.

. *Horizons Series A*. dec2020, Vol. 27, p147-158. 12p.

⁴⁰⁹ World Bank *Financial Inclusion*. Retrieved from: <https://www.worldbank.org/en/topi/c/financial-inclusion>

⁴¹⁰ Federal Reserve Bureau. (2021). *Money and Payments: The U.S. Dollar in the Age of Digital Transformation*.

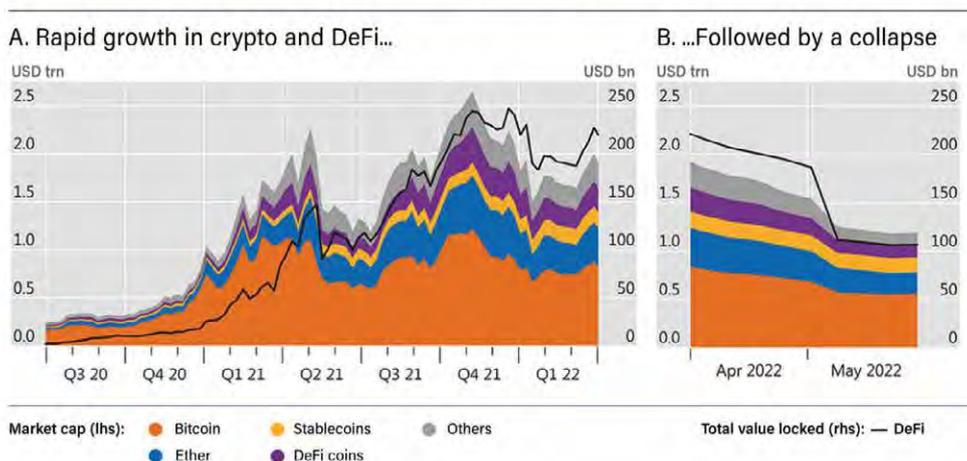
Retrieved from: <https://www.federalreserve.gov/publications/files/money-and-payments-20220120.pdf>

⁴¹¹ The U.S. Department of Treasury. (2022). Statement from Secretary of the Treasury Janet L. Yellen on the Release of Reports on Digital Assets. Retrieved from: <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy0956>

⁴¹² The White House. (2022). *Technical Evaluation for a U.S. Central Bank Digital Currency System*. Retrieved from: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/09/09-2022-Technical-Evaluation-US-CBDC-System.pdf>

ル資産の時価総額が、2021年には3兆ドルに達した一方で、2022年におけるその時価総額はピーク時の3分の1になるなどデジタル資産の価値が変動する点を指摘、加えてデジタル資産に関する詐欺被害が急増している⁴¹³ことなどを挙げて、監視や取り締まりの努力を強化すべきと提言している。また、CBDC研究を推奨することとして、デジタル金融・決済システムのための技術的基盤の研究開発に資金を提供する。既存の金融・決済システムが抱えるセキュリティ、個人情報、レジリエンスなどの課題に対処するための様々なシステムソリューションを支援し、監督上のガイダンス、シンポジウム、FinCEN Innovation Hours⁴¹⁴などを通じて、新しい金融技術を開発する米国のフィンテック企業を支援するという行動目標を掲げている。

Market size of cryptocurrencies and DeFi



Sources: CoinGecko; DeFi Llama; BIS.

(図 12-1 デジタル資産の時価総額の推移⁴¹⁵)

2022年3月、バイデン大統領が暗号資産（仮想通貨）に関する大統領令に署名したことを受けて、同年7月に米国財務省が発行したレポートでは、暗号資産にまつわる課題の克服と将来に向けた取り組みについてまとめられている。グローバル金融システムにおけるアメリカのリーダーシップを強固にすること、また、CBDCの国際標準の設定の重要性についても触れられている。

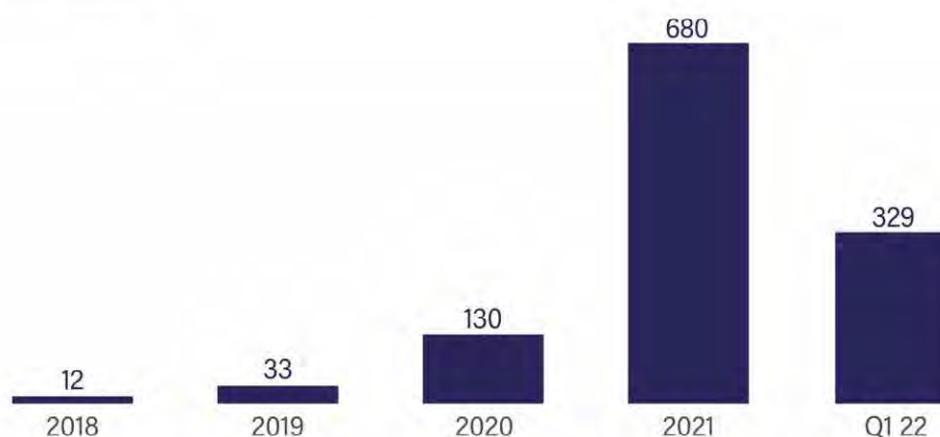
⁴¹³ i b i d

⁴¹⁴ 金融サービスのイノベーションを促進し、国家の安全保障を強化する目的で設立された政府機関。FinCEN's Innovation Initiative. *FinCEN's Innovation Initiative*. Retrieved from: <https://www.fincen.gov/resources/fincens-innovation-initiative>

⁴¹⁵ i b i d.

バイデン政権によって打ち出された金融資産やデジタル通貨に関する大統領令は、あくまでも広く透明性のある議論を促進するためで、特定の政策の推進を意図するものではない、と強調されている。しかしながら本格的な検討や法整備を始めたとも言え、このような動きの背景は、世界の基軸通貨としてのドルに対する中国によるデジタル人民元を意識したものと理解できる。

Reported Cryptocurrency Fraud Losses by Year (USD MM)



Source: FTC, (Jun. 2022)

(図 12-2 暗号資産をめぐる詐欺被害の総額)

そのため、世界の基軸通貨であるドルのデジタル化に向けた動きに注目が集まる背景には、2020 年に開催された G20 会合では、クロスボーダー送金の改善に向けたロードマップが承認される等、既存の決済インフラが抱える即時性に関する課題が強く意識されていることがある。長い決済チェーンの短縮やコストの低下等の改善が進む可能性がある一方で、複数の法律や規制をまたいだ決済流通の基盤を構築する際の調整の難しさなどがある一方、中央銀行の決済通貨がデジタル化することで、これまでの物理的な通貨と同程度の信頼性が担保され、結果民間のデジタル通貨が収斂されデジタル化が加速度的に進むことも十分に考えられる。

我が国は、現時点で CBDC を発行する計画はないとするものの、「CBDC は現金と並ぶ決済手段としての役割に加え、民間の事業者が、イノベーションを発揮して様々な決済サービスを新たに提供する基盤となり得る」とし、「実証実験と制度設計面の検討を進めるべく、デジタル社会にふさわしい決済

システムのあり方について、幅広い関係者とともを考えていく必要がある」としている⁴¹⁶。2020年に日米欧の中央銀行によって取りまとめられた、CBDCの開発に関する原則⁴¹⁷も、日米欧がCBDC発行に関して協調した姿勢を取るための動きといえる。

3. (Digital payment technologies)

(1) 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

電子決済を明確に定義するものはない。一般社団法人キャッシュレス推進協議会が毎年取りまとめる「キャッシュレス・ロードマップ」によると、電子決済は「物理的な現金（紙幣・硬貨）を使用しなくても活動できる状態」と定義しており、さしずめ「クレジットカード決済」「デビットカード決済」「電子マネー決済」「コード決済（バーコード決済、QRコード決済）」による支払いとされている。



(図 12-3 電子決済のイメージ)

(2) 我が国の電子決済をめぐる状況

⁴¹⁶ 日本銀行決済機構局. (2023). 「中央銀行デジタル通貨に関する 日本銀行の取り組み」. Retrieved from: <https://www.boj.or.jp/paym/digital/dig230217c.pdf>

⁴¹⁷ Bank of Canada, European Central Bank, Bank of Japan, Sveriges Riksbank, Swiss National Bank, Bank of England, Board of Governors Federal Reserve System, Bank for International Settlements (2020) Central bank digital currencies: foundational principles and core features. Retrieved from https://www.bis.org/publ/othp33_summary.pdf

我が国の電子決済は諸外国と比べると遅れている、と言われている。2020 東京オリンピック・パラリンピックを踏まえて政府内でキャッシュレス化に向けた対応策の検討が始まったのが、2014 年の日本再興戦略である⁴¹⁸。訪日外国人の利便性向上と電子決済で得られたビックデータの利活用を推進することを目的として方策の検討が進められてきたが、2017 年、未来投資戦略における「支払い方改革宣言」の設定と 2019 年閣議決定された「成長戦略フォローアップ⁴¹⁹」において、2025 年大阪・関西万博までに我が国のキャッシュレス比率を 40%程度の水準にし、さらには世界水準の 80%にするとの目標が掲げられている。

経済産業省が国民経済計算等から算出した 2021 年の日本の電子決済比率は、32.5%（図 12-4）⁴²⁰のおよそ 95 兆円と、前年比 2.8%の伸び率を示しており、概ね堅調である。

（図 12-4 キャッシュレス支払額及び決済比率の推移）

図に示されるように、クレジットカード決済は相変わらず高い割合を占めているが、これはクレジットカード決済が、比較的高額の決済に使用されることが多いという背景がある。デビットカード決済、電子マネー決済の割合はほぼ横ばいであるが、ここ数年の傾向として、コード（バーコード決済、QR コード決済）による決済比率が急激に伸びている。コード決済が増加した理由としては、スマートフォンの普及や、QR コード決済事業者による導入の促進、マイナポイント⁴²¹に代表される、行政による電子決済の普及促進に向けた取り組みによるものと考えられる。

他方、電子決済の比率を主要国と比較すると我が国は総じて低い水準（図 X）⁴²²に留まっているといえる。国際決済銀行（Bank for International Settlements, BIS）発行の Redbook によると、我が国の 2019 年時点におけるキャッシュレス決済比率は、29.8%と、アジアの主要国の中では最低の比率を示しており、G7 の中ではドイツに次いで 2 番目に低い水準となっている。2020 年から始まる新型コロナウイルスの感染拡大によって、感染症対策として対面での会話や物理的な現金の受け渡しを避ける対

⁴¹⁸ 首相官邸。「日本再興戦略」改訂 2014 「未来への挑戦」。（2014 年 6 月 24 日）. Retrieved from <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisai/pdf/honbun2JP.pdf>

⁴¹⁹ 首相官邸。「成長戦略フォローアップ」（2019 年 6 月 21 日）. Retrieved from <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisai/pdf/fu2019.pdf>

⁴²⁰ 経済産業省「2021 年のキャッシュレス決済比率を算出しました」（2022 年 6 月 1 日）. Retrieved from <https://www.meti.go.jp/press/2022/06/20220601002/20220601002.html>

⁴²¹ 総務省「マイナポイントとは」 Retrieved from <https://mynumbercard.point.soumu.go.jp>

⁴²² 一般社団法人キャッシュレス推進協議会「キャッシュレス・ロードマップ 2022」（2022 年 6 月）. Retrieved from <https://paymentsjapan.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/roadmap2022.pdf>

応が広まったことから、非接触型（コンタクトレス）の電子決済はますます広がりを見せるものと予想する。

電子決済が普及する国々にもそれぞれ特徴がある。例えば韓国は、電子決済の中でもクレジットカード決済が主流である。1997年のアジア通貨危機を経て脱税防止を目的に国を挙げて電子決済に関する取り組みを行った⁴²³。利用者に所得控除の優遇を与えるなどし、普及率は90%を超えている。

英国では、デビットカード⁴²⁴が最も普及している電子決済である。コロナ禍においては、感染症対策として現金の受け渡しや暗証番号の入力、署名などの物理的な接触を避けるため、コンタクトレス決済の上限額引き上げ等の取り組みを実施した。利用上限を30ポンドから40ポンドへ引き上げ⁴²⁵、現在はその上限が100ポンドにまで達している⁴²⁶。

図 12-5 2019年 主要国における電子決済比率)

(3) 電子決済に利用される技術

これまで我が国における電子決済の利用状況を概観した。これらの電子決済に利用される技術は、近距離無線通信（Near Field Communication、NFC）⁴²⁷である。電子決済に利用されるカード、スマートフォンに搭載されているICチップと、アンテナを媒体にして端末同士を近づけて、一対一の通信に適しているHF帯の13.56MHzの周波数帯を用いて端末間的高速情報通信をする、近距離の無線通信技術である。

(図 12-6 近距離無線通信⁴²⁸)

⁴²³ Moon, Woosik. (2017). A Coinless Society as a bridge to a Cashless Society: A Korean Experiment. *Cash in East Asia*, pp. 101-115. DOI: 10.1007/978-3-319-59846-8_7

⁴²⁴ デビットカードとは、自身の銀行口座から利用と同時に現金が引き落とされるカードのことをさす。

⁴²⁵ UK Finance. (2020). *Contactless limit in UK increase to £45 from today*. Retrieved from <https://www.ukfinance.org.uk/press/press-releases/contactless-limit-uk-increases-%25C2%25A345-today#:~:text=From%20today%20%5B1%20April%202020,higher%20limit%20of%20%2%A345>.

⁴²⁶ The Guardian. (2021). *UK Contactless Card Limit more than doubles to £100*. Retrieved from <https://www.theguardian.com/money/2021/oct/15/contactless-card-limit-to-more-than-double-to-pounds-100-from-friday>

⁴²⁷ Vedat Coskun, et al. (2015). The Survey on Near Field Communication. *Sensors* 2015, 15(6), 13348-13405; <https://doi.org/10.3390/s150613348>

⁴²⁸ Wama. *The Advanced Guide to Near Field Communication*.

NFCの技術仕様は、ISO/IEC国際標準規格に基づいてNFCフォーラムが策定している。Type Aは、オランダ・Philips社が開発したMifare⁴²⁹、米国・Broadcom社のTopazなど、Type Bは、米国・Motorola社が開発したもの、ソニー株式会社が開発したFelicaは、NFCフォーラム⁴³⁰が定めるISO/IEC 14443 (Type A、Type B)、ISO/IEC 18092 (NFC-F) およびISO/IEC 15693 (NFC-V) にも属さない独自仕様とされている。かつて、Felicaを新しい国際規格TypeCとして標準化申請したものの、ISOの認証から見送られ、現在では国際標準規格と互換性を確保した「NFCに準拠した」技術として、流通している。

プロトコル	ISO/IEC 14443/18092	ISO/IEC 14443	ISO/IEC 18092	ISO/IEC 15693
名称	Type A NFC-A	Type-B NFC-B	Type-F	
通信規格	Mi fare Topaz		Felica	
日本国内での用途	taspo	運転免許証 マイナンバーカード パスポート 在留カード	交通系 IC カード nanaco WAON QUI CKPay	物流 RFID タグ

(図 12-7 NFC フォーラムのプロトコルー覧)

それぞれの特徴として、Type Aは、生産コストが安く、世界で一番流通している規格、Type Bは他の規格と比較してセキュリティ性も高いことが挙げられる。これらの特性を考慮して、日本国内でも、マイナンバーカードや運転免許証、パスポート、在留カードなど、行政情報の電子化に対しては、Type Bの通信規格が採用されている。諸外国で主流となっているType A、Type Bに対して、通信が暗号化され、処理速度が他と比べて2倍のFelicaは、その特性から我が国の交通系ICカードや小売店の電子マネーをはじめ電子決済の半数以上に利用されているものの、やはり非接触型電子決済を利用する場面に処理の速さはさほど求められないこと、セキュリティ性の観点でいえば、Type Bが既に国際基準となっていること、これらからFelicaは「国際標準に準拠する技術」であるという位置付けからまぬかれず、Felicaの普及展開エリアは日本、香港などアジア地域に限られている。

⁴²⁹ MYFARE. Retrieved from: <https://www.mifare.net/en/>

⁴³⁰ NFC Forum. *What NFC does*. Retrieved from: <https://nfc-forum.org/learn/what-nfc-does>.

NFC Forum *Device Requirements*. Retrieved from: [https://nfc-forum.org/uploads/Certification-](https://nfc-forum.org/uploads/Certification-Files/NFC%20Forum-DevicesRequirements---3.2.00-20221129.pdf?_cchi d=165dd7209e697944ee50cf60ebf2e840)

[Files/NFC%20Forum-DevicesRequirements---3.2.00-20221129.pdf?_cchi d=165dd7209e697944ee50cf60ebf2e840](https://nfc-forum.org/uploads/Certification-Files/NFC%20Forum-DevicesRequirements---3.2.00-20221129.pdf?_cchi d=165dd7209e697944ee50cf60ebf2e840)

(4) API (Application Programming Interface)

電子決済取引が多様な形で広がりを見せる中、金融機関がこれまで一体的に提供してきたサービスだけではなく、利用者が接する非金融企業のサービスを金融に組み入れる組込型金融 (Embedded Finance) の動きが加速している⁴³¹ ⁴³²。従来金融機関は、閉鎖的で特定のパートナーとのみ提携を組むことが当たり前であった⁴³³が、シームレスで利便性の高いサービスを提供することが不可欠になっていることを受けて、異業種プロバイダーと提携して多種多様なソフトウェアやアプリケーションを組み込んで、独自性や利便性で差別化を図る段階にきている。

API は、異なるサービスを媒介するプログラムのことを指し、API で提供された金融機能を自社サービスに組み込むことで、より付加価値の高いサービスを、自社ユーザーに提供することが可能になる。このように、異業種サービスに金融機能が組み込まれた (Embedded : エンベデッドされた) 状態が、組込型金融 (エンベデッド金融) と呼ばれ、既に様々な取り組みがなされている。組込型金融は、消費者や企業の金融生活におけるテクノロジー企業の新たな役割を生み出しながら、金融サービスを再構築するものであり、既に各国が API の整備を進めている⁴³⁴。

EU では、2007 年の決済サービス指令⁴³⁵以降、一般データ保護規則 (GDPR)⁴³⁶による個人データ移管制度の整備を進め、諸外国の中で先駆けて基盤を整えた⁴³⁷。英国は、EU 離脱前から EU の枠組みで API

⁴³¹ The Economist. (2020). *How the digital surge will reshape finance*. Retrieved from:

<https://www.economist.com/finance-and-economics/2020/10/08/how-the-digital-surge-will-reshape-finance>

⁴³² McKinsey & Company. (2022). *Embedded finance: Who will lead the next payments revolution?* Retrieved

from: <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/embedded-finance-who-will-lead-the-next-payments-revolution>

⁴³³ Competition and Markets Authority. (2016). *Retail banking market investigation*. Retrieved from:

<https://www.gov.uk/cma-cases/revi-ew-of-banki-ng-for-smal-l-and-medi-um-si-zed-busi-nesses-smes-i-n-the-uk>

⁴³⁴ BIS Representative Office for the Americas. (2022). *API standards for data-sharing (account aggregator)*.

Retrieved from: <https://www.bis.org/publ/othp56.pdf>.

⁴³⁵ The European Central Bank. (2018). *The revised Payment Services Directive (PSD2) and the transition to*

stronger payments security. Retrieved from: [https://www.ecb.europa.eu/paym/intro/mip-](https://www.ecb.europa.eu/paym/intro/mip-online/2018/html/1803_revisedpsd.en.html)

[online/2018/html/1803_revisedpsd.en.html](https://www.ecb.europa.eu/paym/intro/mip-online/2018/html/1803_revisedpsd.en.html)

⁴³⁶ GDPR EU. *Complete guide to GDPR Compliance*. Retrieved from: <https://gdpr.eu>

⁴³⁷ Euro Banking Association. *Open Banking Working Group*. Retrieved from: <https://www.abe-eba.eu/thought->

[leadership-innovation/open-banking-working-group/](https://www.abe-eba.eu/thought-leadership-innovation/open-banking-working-group/)

の整備を進めてきたが、2018年には、プラットフォームの標準化⁴³⁸をもって大手金融機関にAPI公開を義務化し⁴³⁹、英国の金融庁にあたるFCAから認可を受けた決済サービス事業者（Payment initiation service provider, PISP）や銀行口座提供事業者（Account information service provider, AISP）などFintech事業者に対してAPI接続を可能にしている⁴⁴⁰。

米国では、Wells Fargo、JP Morgan Chase、Bank of Americaなど銀行大手が共同で、オンライン決済システム稼働に向けて検討を始めている⁴⁴¹。Zelle⁴⁴²と呼ばれる個人間送金サービスを運営するEarly Warning Servicesがプラットフォームを提供するとされている。Early Warning Servicesは、Bank of America、Truist、Capital One、JPMorgan Chase、PNC Bank、U.S. Bank and Wells Fargoが共同出資したフィンテック企業で、決済サービスで最有力とされたPayPal⁴⁴³の提供するモバイル決済サービス（Venmo）に対抗する形でZelleを提供している。ApplePay⁴⁴⁴やGooglePay⁴⁴⁵などモバイルウォレットと呼ばれる決済手段は、銀行口座やクレジットカード情報を登録することによって利用できるが、金融機関はその決済の用途に関する情報を取得することができないことが長く苦痛であった。このような米国大手銀行による動きは、決済サービスで先行するフィンテック事業者に対抗するものとも言え、資金移動手段、決済手段に利便性が求められるようになった結果、既存の銀行が提供するサービスが後塵を拝することの証左といえる。

⁴³⁸ Token. *Token*. Retrieved from: <https://token.io>

⁴³⁹ The Open Banking Implementation Entity (OBIE). *Open Banking*. Retrieved from: <https://www.openbanking.org.uk/about-us/>

⁴⁴⁰ Financial Conduct Authority. (2017). *Account information and payment initiation services*. Retrieved from: <https://www.fca.org.uk/consumers/account-information-and-payment-initiation-services>

⁴⁴¹ The Wall Street Journal. *Banks Plan Payment Wallet to Compete With PayPal, Apple Pay*. (23 January 2023). Retrieved from: <https://www.wsj.com/articles/banks-plan-payment-wallet-to-compete-with-paypal-apple-pay-11674433472>

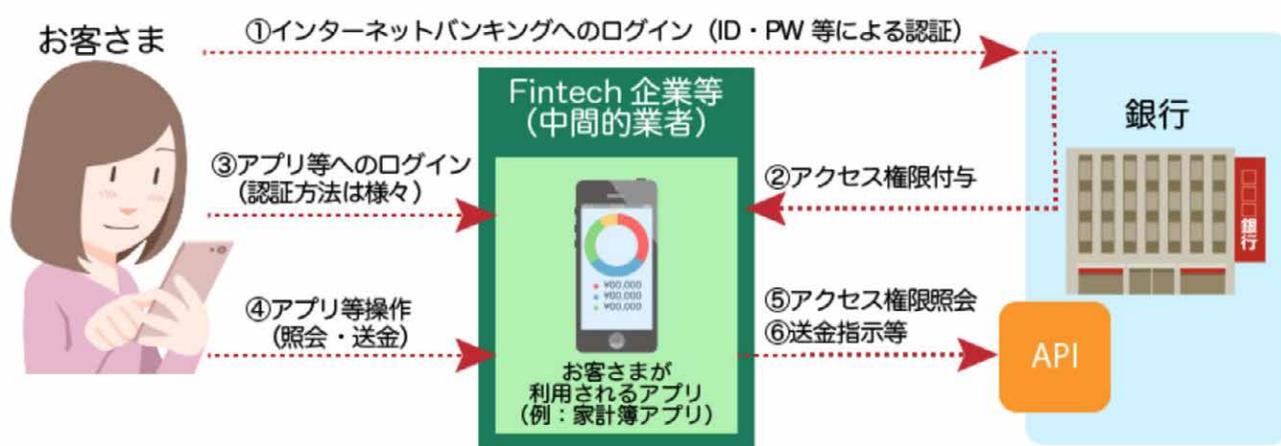
⁴⁴² Early Warning Services. *ZELLE PERSON TO PERSON PAYMENTS (PtoP)*. Retrieved from: <https://www.earlywarning.com/products/zelle-person-person-payments-p2p>

⁴⁴³ PayPal Holdings. *About us*. Retrieved from: <https://www.paypal.com/jp/webapps/mpp/about>

⁴⁴⁴ Apple. *Apple Pay*. Retrieved from: <https://www.apple.com/apple-pay/>

⁴⁴⁵ Google. *Google Pay*. Retrieved from: <https://pay.google.com/about/>

我が国においても 2017 年以降、銀行法や資金決済法の改正が進められ、金融機関による API の公開が進んでおり⁴⁴⁶ ⁴⁴⁷、電子決済事業者は API に接続して金融機関と繋がることができるようになっていく。加えて、国内の銀行間の送金システム「全銀システム（全国銀行データ通信システム）⁴⁴⁸」を、2024 年中を目途に、決済サービス事業者など異業種に利用を拡大することを決めた。全銀システムは、これまでは、銀行・信用金庫・信用組合などの金融機関のみが利用できるものであったが、昨今のデジタル化の進展に伴って異業種の送金アプリ資金移動業者がこのシステムを利用できるようになることで、異なる決済アプリ同士での送金のほか、銀行口座と決済アプリのアカウントの間での送金が可能になるほか、利用者の負担する手数料の引き下げにもつながると期待されている。



(図 12-8 API の基本的な仕組み⁴⁴⁹)

4. デジタル ID インフラストラクチャー (Digital identity infrastructure)

(1) デジタル ID とは

⁴⁴⁶ 金融庁. (2017). 「『銀行法施行令等の一部を改正する政令等 (案)』」の公表について. Retrieved from:

<https://www.fsa.go.jp/news/28/ginkou/20170324-1.html>

⁴⁴⁷ 金融庁. (2022). 「令和 4 年資金決済法等改正に係る政令・内閣府令案等の公表について」. Retrieved from:

https://www.fsa.go.jp/news/r4/sonota/20221226_3/20221226_3.html

⁴⁴⁸ 一般社団法人全国銀行協会. 「全国銀行データ通信システム (全銀システム)」. Retrieved from:

<https://www.zenginkyo.or.jp/abstract/efforts/system/zengin-system/>

⁴⁴⁹ 全国銀行協会. 「オープン API とは」. Retrieved from: <https://www.zenginkyo.or.jp/article/tag-g/9797/>

COVID-19 の感染拡大を受けて、デジタルでのやり取りがかつてないほど増加する中、個人と認識できる情報はデジタル化され、共有されるようになった。我が国では 2016 年に導入されたマイナンバーカード、パスポート、運転免許証⁴⁵⁰や健康保険証⁴⁵¹などの公的証明でもデジタル化が導入され始めている。オンライン上で本人であることを特定でき、安全に取引を行うための手段として、行政機関や民間企業においても導入されるほどデジタル ID が不可欠となっている一方で、個人情報もデジタル化され共有されるようになると、要配慮個人情報（センシティブ情報）が意図せず漏洩するリスクも拭い去れないことから一定の懸念が示されるなど、インフラとして定着させるためには課題も多い。

金融とデジタル ID の関係性は特に新興国で深みをみせている。2015 年に国連で採択された SDGs⁴⁵² に「2030 年までに全ての人々に身分証明を提供する」という目標が掲げられている。世界銀行によれば、多くの途上国で戸籍や住民登録のような基本台帳が整備されておらず、身分証明を持たない人が世界中で 8 億 5000 万人いると推計している⁴⁵³。このような背景のもと、当機関が主導する ID4D イニシアチブ（Identification for Development）⁴⁵⁴は、デジタル ID による金融アクセスを広げるとともに、社会保障や納税制度などの社会基盤の形成に繋げ、支援が届きづらい最貧困地域に対する活動にも寄与するというプロジェクトである。

このプロジェクトがターゲットとするもう一つ目標が、マネーロンダリング防止とテロ資金供与対策（Anti Money Laundering/Combating the Financing of Terrorism, AMT/CFT）と呼ばれる国際基準の強化である。本人確認システムが整備されていない国家では、信頼性の測定に困難を極め、融資の実行にも支障をきたすなど、金融機関にとっても新興企業にとってもビジネスモデルの構築を難しくしている側面がある。このような背景を踏まえて、デジタル ID の普及が AMT/CFT の実現をより効率的に導くことができ、ひいては金融包摂に繋がるものと期待されている。

⁴⁵⁰ 警察庁。「特集 3 新型コロナウイルス感染症をめぐる警察の取組」. Retrieved from:

<https://www.npa.go.jp/hakusyo/r03/honbun/html/xf313000.html>

⁴⁵¹ 厚生労働省。「マイナンバーカードの健康保険証利用について」. Retrieved from:

https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_08277.html

⁴⁵² UNCTAD. (2018). *Digital Identity in a New Era of Data Protection*. Retrieved from:

<https://unctad.org/meeting/digital-identity-new-era-data-protection>

⁴⁵³ The World Bank. *ID4D Global Dataset*. Retrieved from: [https://id4d.worldbank.org/global-](https://id4d.worldbank.org/global-dataset#:~:text=Globally%20an%20estimated%20850%20million,Saharan%20Africa%20and%20South%20Asia)

[dataset#:~:text=Globally%20an%20estimated%20850%20million,Saharan%20Africa%20and%20South%20Asia](https://id4d.worldbank.org/global-dataset#:~:text=Globally%20an%20estimated%20850%20million,Saharan%20Africa%20and%20South%20Asia).

⁴⁵⁴ The World Bank Group. (2020). *G20 Digital Identity Onboarding*. Retrieved from:

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/362991536649062411/pdf/129861WP-10-9-2018-17-26-21->

[GDigitalIdentityOnboardingReportLowres.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/en/362991536649062411/pdf/129861WP-10-9-2018-17-26-21-GDigitalIdentityOnboardingReportLowres.pdf)

Figure 9: Benefits of Digital ID



(図 12-9 デジタル ID⁴⁵⁵)

デジタル ID インフラについては、各国様々な政策を施している。米国では、国立標準技術研究所 (NIST) が、デジタル ID を利用する利害関係者をパスワードを必要としないリモート ID による認証のためのバイオメトリクスを組み込む新しいガイドラインを策定した⁴⁵⁶。EU では、2021 年 3 月に発表されたデジタル戦略を基本的なフレームワークとしつつ、デジタル・コンパス⁴⁵⁷ (2030 Digital

⁴⁵⁵ World Economic Forum. *Global Issue: Digital Infrastructure*. Retrieved from:

<https://intelligence.weforum.org/topics/a1G0X000005JJGcUA0>

⁴⁵⁶ NIST. (2022). *NIST Drafts Revised Guidelines for Digital Identification in Federal Systems*. Retrieved from: <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/12/nist-drafts-revised-guidelines-digital-identification-federal-systems>

⁴⁵⁷ European Commission. (2022). *Europe's Digital Decade: digital targets for 2030*. Retrieved from: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en

Compass: the European way for the Digital Decade) を策定した。この中で、2030年にはEU市民の80%がデジタルIDを使用することを目指すとされており、EU市民がEUの国境を越えて様々な公共および民間サービスへのデジタルアクセスを可能にするためにデジタルIDウォレット (European Digital ID Wallet) 導入に向けて走り出した⁴⁵⁸。利用者のID属性を収集する必要がある銀行、通信サービスプロバイダーなどの事業者は、単一のシームレスな環境でデータを保存およびリンクすることができることを期待されていた。ところが、このような利便性は個人データを十分に制御するだけの担保がなく、詐欺やサイバーセキュリティの脅威の軽減が困難になっている現状があるという理由で、EU議会はデジタルIDウォレット計画の正式承認を保留している⁴⁵⁹。



(図 12-10 ID4D イニシアチブの概略⁴⁶⁰)

⁴⁵⁸ The European Commission. (2021). *REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL*. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0290>

⁴⁵⁹ The European Commission. *MEPs back plans for an EU-wide digital wallet*. (9 February 2023). Retrieved from: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230206IPR72110/meps-back-plans-for-an-eu-wide-digital-wallet>

⁴⁶⁰ *Ibid.*

(2) 生体認証

生体認証とは、顔、指紋、静脈、虹彩などの身体的特徴、声紋や署名などの行動的特徴を用いて個人を認証することである。これらの特徴を事前にデータ登録しておき、認証時にあらかじめ登録したデータと照合して本人であるかどうかを認証する。生体認証は、広く一般的に用いられている ID とパスワードによる認証と異なり、利用者の ID の紛失やパスワードの記憶なども必要なく、管理者側にとっても情報漏洩や盗難等のリスクが低い。加えて、身体的・行動的特徴は、なりすましや偽造などが特に困難とされており、したがってセキュリティレベルも高いと言われており、後述の不正利用や情報漏洩による被害を抑えるもののひとつとして数えられる。

種類	認証方法	用途
指紋認証	指紋の模様	スマートフォンや PC のロック解除
静脈認証	血管の方向や分岐点	銀行 ATM
虹彩認証	虹彩のパターン	企業の ID 認証
顔認証	顔の特徴点	ライブ会場、空港の入退場
音声認証	周波数	スマートスピーカー
DNA 認証	遺伝子	犯罪捜査
行動認証	筆跡などの特徴	署名

(図 12-11 生体認証の種類⁴⁶¹)



(図 12-12 : 実際にマイクロチップが埋め込まれた例⁴⁶²)

⁴⁶¹ 日本コンピュータビジョン株式会社. 「生体認証とは？」. Retrieved from:

<https://www.japancv.co.jp/column/2899/>

⁴⁶² BBC. (2022). *The microchip implants that let you pay with your hand*. Retrieved from:

<https://www.bbc.com/news/business-61008730>

(3) 不正アクセス・不正使用

世界でも先進的なデジタル ID 国家とされているエストニアでも問題が起こっている。エストニアは 2002 年に日本のマイナンバーカードにあたる eID を導入⁴⁶³した。eID はエストニア政府が運営する技術プラットフォーム X-Road⁴⁶⁴により運用され、運転免許証や健康保険証など公的身分証としての機能はもちろんのこと、契約書などへの電子署名、納税申告、銀行口座開設や送金・決済などにも利用され、国民と事業者の双方が利便性と安全性を享受している。2017 年には、公開鍵暗号に脆弱性が見られるとして、政府の対応が求められた事例もある⁴⁶⁵。

米国では、デジタル ID にまつわるサイバー犯罪と詐欺事件が、パンデミック以降急増している⁴⁶⁶。Covid-19 の感染拡大を受けた同国の政府支援プログラムへの受給申請のうち、デジタル ID の不正利用によって 20% の数百億ドルが詐欺に向けられ、また支援が必要な対象者約 160 万件に対するローン申請がデジタル ID の不完全性によって滞っていると報告されている⁴⁶⁸。

他方で、安全性を過度に重視するあまり、本来の利点である利便性や効率性が損なわれることにもなってしまう。導入しても使われないものとなってしまう恐れがある。

⁴⁶³ e-Estonia. *e-Identity*. Retrieved from: <https://e-estonia.com/solutions/e-identity/id-card/>

⁴⁶⁴ Ibid. X-Road プラットフォームは、フィンランド、アイルランド、ウクライナといった国々にも提供されている。

⁴⁶⁵ eDRI. Estonian eID cryptography mess - 750000 cards compromised. (November 15 2017). Retrieved from: <https://edri.org/our-work/estonian-eid-cryptography-mess-750000-cards-compromised/#:~:text=In%202017%2C%20a%20flaw%20causing,cards%20%20%20completely%20secure> .

⁴⁶⁶ The Mercury News. *Lawmaker: US failed to stop COVID loan program fraud*. (14 June 2022). Retrieved from: <https://www.mercurynews.com/2022/06/14/lawmaker-us-failed-to-stop-covid-loan-program-fraud/>

⁴⁶⁷ The Washington Post. *The Cybersecurity 202: Coronavirus pandemic renews debate for hacker-proof IDs*. (2 February 2022). Retrieved from: <https://www.washingtonpost.com/politics/2021/02/05/cybersecurity-202-coronavirus-pandemic-renews-debate-hacker-proof-ids/>

⁴⁶⁸ The White House. (2022). *Fact Sheet: President Biden to Announce New Steps to Combat Criminal Fraud and Identity Theft in Pandemic Relief Programs*. Retrieved from: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/03/01/fact-sheet-president-biden-to-announce-new-steps-to-combat-criminal-fraud-and-identity-theft-in-pandemic-relief-programs/>

5. まとめ

(1) 公的利用・安全保障における利用

分散型台帳技術は、指令・制御システム管理に応用できるものとして研究されている。また、サプライチェーン管理においても、ブロックチェーンによる輸送中のリアルタイム監視など安全保障に関わる場面での運用も担保できるとされている。また、マネーロンダリング防止とテロ資金供与対策（Anti Money Laundering/Combating the Financing of Terrorism, AMT/CFT）と呼ばれる国際基準も、金融面から安全保障に貢献できるうる一部の機能であるといえる。

総じてフィンテックに当てはまるのが、安全性の担保である。資産を扱う金融は、なりすまし、詐欺、情報漏洩、機密情報窃取など様々な犯罪ターゲットになりやすく、金融機関も相応の対策を施してきている。ここで取り上げた4分野の技術導入にあたっては、サイバーセキュリティ、AI、暗号化技術なくして安全な運用は成立しない。

(2) 民生利用

これまで概観したとおり、フィンテックが捉える範囲は国家から個人までと幅広い。

BIS レッドブック（BIS Redbook⁴⁶⁹）によると、2020 年に見られたデジタル決済の力強い成長は、クレジット決済と非接触型のカード決済の飛躍的な増加が成長の主な原動力となったと分析している。他方で、デジタル化が進む中、国民の需要や、利用者・顧客の需要にどのように対応するかという課題も認識されている。多くの中央銀行が中央銀行デジタル通貨（Central Bank Digital Currency, CBDC）発行の可能性を探っているが、現在の決済インフラや決済習慣の違い、そして社会的・経済的状況の違いにより、中央銀行が CBDC の発行の可能性を検討する目的は様々である。CBDC 導入にあたっては、デジタル通貨所以に生じてしまう個人情報を含んだ取引データの取り扱いも焦点となるであろう。決済手段の多様化が手伝って物理的な紙幣や硬貨に対するある種の執着は若年層に向かって希薄化しているものの、発行体である中央銀行が CBDC 発行に際して強靱性（セキュリティ基準）やユニバーサル・アクセス等といった物理的な通貨と同等以上の要件を十分揃えられるかが課題となっている。

フィンテックの恩恵を受けるうえで、利便性と安全性はトレードオフの関係であることも忘れてはならない。利用者の IT リテラシーの向上も十分に進んでいると言えない中、セキュリティ不正アクセス、個人情報の漏洩や悪用につながる問題も存在する。金融事業者側も、利用者の購買履歴から決済方法まで、ビッグデータが収集できるようになった結果、多様なソースからのデータを組み合わせる

⁴⁶⁹ Bank for International Settlements. *Payments and financial market infrastructures (updated on 31.*

January 2023). Retrieved from <https://stats.bis.org/statx/toc/CPMI.html>

ことで、サービスのパフォーマンスと価値を向上させることが可能となった。データ活用と同時にプライバシーの確保と制御に関するシステムが必要である。

送金の高速化 (Faster payment Service, FPS) については、G20 のクロスボーダー決済プログラムでも議論されている通り、その多くは国内決済にしか利用できていないことが課題である。特徴的なのは、既存の金融機関と比較して決済サービス事業者の方がクロスボーダー決済を見越した技術の実装と経営戦略を立てていることである。これらの事業者は大きな可能性を秘めており、先に述べた米国の既存の大銀行が一致団結して決済サービス事業を立ち上げるといった大胆で即効的な戦略を打つところも、いかに競争が激化しているかを知る例といえるだろう。

このようなフィンテック企業には新興企業が多い。彼らの目的は革新性や技術力で企業価値を高めてユニコーン企業となることである。日本のフィンテック企業は、米国や中国と比較して資金調達の方法が限られることも相俟って、エグジット戦略を描くことが難しい環境に置かれている。我が国のように、多数の決済サービス事業者が存在し、また事業者側（この場合小売店側）も顧客獲得に向けて独自の決済サービスを提供するなど、乱立の様相である。金融のあり方がこれまでの銀行主導から変わりつつある中、フィンテック企業の持つ技術力と革新性を、国内の一定の水準でとどめてしまうことなく、このような状況を鑑みて相互運用性（互換性）を持たせたシステムの構築を進めることが求められる。

6. さいごに

金融業界、とりわけ銀行業界の競争力、イノベーションの不足が指摘されてこの方、金融システムにイノベーションが求められているのは周知のとおりである。しかしながら、イノベーションを礼賛し、それがもたらす影響について十分な検討や分析を施さないままイノベーションを行ってしまうと、金融システムや個人に大きな混乱を招き、社会的弱者に大きな損失を与えてしまうことは歴史が証明している。殊 CDBC 発行の議論をとっても、基軸通貨のドルを扱う米国が、主要国の中で研究スピードが最も遅い⁴⁷⁰ ことを見てもわかるように、どの国も反対派賛成派が拮抗し、CDBC の発行の可否に

⁴⁷⁰ 英国では、2015 年から Digital currencies: response to the call for information. の検討を開始 (Retrieved from:

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/414040/digital_currencies_response_to_call_for_information_final_changes.pdf)。EU では、2020 年から Digital Euro

Project を開始している。(Retrieved from:

https://www.ecb.europa.eu/paym/digital_euro/html/index.en.html#:~:text=This%20investment%20phase%20started%20in,process%20of%20actual%20development%20it.)

向けての議論は一進一退である。フィンテックは、政府と中央銀行と民間事業者の三者がそれぞれに動き、相互に作用しながら可変している。金融・通貨のみならず、サプライチェーンも捉えたフィンテック技術をめぐる覇権争いが今後より一層激化するものと予想する。

第13節 ヒューマンマシンインターフェース (Human-Machine Interface)

エンジニアリング分野における技術革新が急速に進む一方で、オペレーションの自動化と同時に、人間による操作が必要となる場合、的確かつシームレスな操作システムが求められるようになっていく。ヒューマンマシンインターフェース(Human-Machine Interface: HMI)は、こうした産業機械と人為的な操作との間で生じる情報伝達や情報処理を最適化するための先端科学技術としてこれまで注目されてきた。HMI 技術は特に製造工場での産業機械の操作や発電所等でのオペレーションで活躍をしてきた。こうした分野では、操作ミスやヒューマンエラーによるミスが大きな事故につながることが多く、HMI 技術はそうした操作ミスを最小限にする上でも極めて重要なシステムである。また、近年では工場や発電プラントのオペレーションの可視化が進められており、作業工程の全てを人が俯瞰できるようになっている。こうすることで、どの過程で問題が生じているのか等を瞬時に把握することができる⁴⁷¹。より最新の研究では、人間の脳とロボットアームとを接続して人が自分の手足を動かすように、ロボットを動かすことができる Brain-computer interface 等の開発も進められており⁴⁷²、こうした技術が実装されれば、例えば医療分野や工業分野はもちろん、軍事技術へのインプリケーションも大きいものと推察される。本章ではこうした最新の HMI 技術を概観するとともに、マルチユースの観点から今後期待される技術革新について分析する。

1. ヒューマンマシンインターフェース (Human-Machine Interfaces: HMI)

「ヒューマンマシンインターフェース」(Human-Machine Interfaces: HMI)は、人間と機械との接続(human-machine interaction)に関する機械装置等にかかる技術である。この技術は、グラフィカルユーザインターフェイス、タッチスクリーン、音声認識、ジェスチャー認識等により、人間の五感(視覚、聴覚、嗅覚、触覚、味覚)に代表される知覚、思考、脳波や神経反応、身体能力を、コンピュータや機械装置によって解析し、入出力することで、それら人間の機能の縮小・拡張、修復・破壊等を行うものである。HMI 技術は、主に(1)人間の視覚や聴覚を中心とする知覚に関する「エクスアール」技術(2)脳波や神経反応に関する「ブレイン・コンピュータ・インターフェース」もしくは「ブレイン・マシン・インターフェース」、(3)身体能力に関する「身体センシング・制御」や「身体機能拡張」、(4)またそれら人間の機能をコンピュータや機械が支援・代替することに関する「人間と機械のチーム化」もしくは「ヒューマン・マシン・チームング」に分類される。

(1) 「エクスアール」、もしくは「クロスリアリティ」(Extended Reality: XR)

⁴⁷¹ Inductive Automation, What is HMI?. August 10, 2018.

<https://www.inductiveautomation.com/resources/article/what-is-hmi>

⁴⁷² Robotic body augmentation. *Nat Mach Intell* .3, 837 (2021).

XRとは、①拡張現実、オーグメンテッド・リアリティ（Augmented Reality: AR）、②仮想現実、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）、③複合現実、ミックスド・リアリティ（Mixed Reality: MR）の総称である⁴⁷³。特に、ARは現実空間にコンピュータによって生成されたデジタル情報やコンピュータ・グラフィックス（CG）、画像、映像などを重ね合わせて表示させる技術である。たとえば、スマートフォンのゲームアプリケーション Nintendo Pokemon GOなどが代表的な例であるが、パソコンやスマートフォンの機能を有するARグラスも世界各国で数多く登場している。さらには、米 Mojo Vision 社によるスマートコンタクトレンズなども開発が進んでいる。

また、VRはコンピュータによって生成された仮想環境を使用して、人々が実際に身を置いたような体験（没入感）をすることができる技術である。VRグラスやゴーグル型のヘッドマウントディスプレイ（HMD）としては、米メタ（Meta、旧 Facebook）傘下のオキュラス（Oculus）社による Oculus Quest、MRグラスとしては、マイクロソフト（Microsoft）社が提供する Microsoft HoloLens が代表的な例として挙げられる。

実際には、AR環境にVRを投影したり、VRの世界を現実の拡張手段として用いる等、ARやVR、MR等の技術の境目が不明瞭になりつつある。こうしたXR技術が作り出す仮想環境はメタバース（Metaverse）とも呼ばれる。メタバースとは、宇宙（universe）を超越（meta）した空間、すなわち仮想現実空間を意味する造語である。ニール・スティーブンスン（Neal Stephenson）によるSF小説「スノウ・クラッシュ」において、バーチャルな3次元空間の中で、人間がさまざまなソフトウェアとインタラクションする世界として描かれたことに由来する。中国でも同じく劉慈欣によるSF小説「三体」がメタバースを扱っており、近年大きな話題を集めテレビドラマ化もなされている。

さらに、ブロックチェーン技術を基盤としたメタバース・プラットフォームも創出されており、非代替性トークン（Non-Fungible Token、NFT）を生成したり、NFTを仮想通貨で売買することが可能となっている。また、独自のアプリケーションやメタバース空間が乱立するような状況下では、インターオペラビリティが重要な課題となる。

こうしたXR技術は、3Dモデルの生成、ダイナミック環境のモデリング、リアルタイムのモーションキャプチャと高速レンダリング処理などにより、仮想現実空間や現実への重ね合わせによる拡張現実空間の創出、知覚インタラクション、データおよびコンテンツの採集、制作などの開発、開発用ツールおよびソフトウェア、業界ソリューションなどからなる。

XR技術が社会で幅広く実装され、普及するためには、XR技術を搭載したハード、すなわち端末（デバイス）の開発・普及に加えて、XRに対応したコンテンツ等のソフト、そしてそのソフトを遅滞なく

⁴⁷³ このほか、現実世界の画像や映像に過去の画像や映像を織り交ぜて代替表示する「代替現実」（Substitutional Reality）という表現も存在する。

高速処理することができるための通信環境が必要不可欠である。



(図 13-1 AR 技術を利用した Nintendo Pokemon GO (左) と
VR 技術を利用した Meta horizon Workrooms (右) ⁴⁷⁴)
(出典) Nintendo ホームページおよび Meta ホームページ

VR ゲーム、AR カメラアプリ、MR シミュレーションなどをはじめとする XR 技術とその応用である製品やサービスは、民生利用・公的利用を問わず、次世代インターフェースとしての役割を担うことが期待されている。

民生利用としては、ゲーム、エンターテインメント、観光、ソーシャルネットワーキング、教育、スポーツ、医療、商業・ショッピング、工業など、すでに様々な領域での応用がなされつつある。たとえば、ゲームやエンターテインメント、スポーツでは、VR デバイスを使用して、仮想環境を楽しむことができる。VR ヘッドセットやハンドトラッカーなどを使用し、身を置いたような体験をすることができる。医療では手術のシミュレーションやリハビリテーションのトレーニング、遠隔診療等に使用されつつある。また、VR アーケードも増加しており、一般の人々にも利用しやすいようになってきている。観光では、VR を使用して、博物館や遠隔地の景色などを体験したり旅行先を事前に見学することができる。商業・ショッピングでは商品や洋服、不動産の物件などを購入する前に VR を使用して実物大を手に取り、試着し、あるいは体験することができる。逆に、広告やプロモーションを展開することも可能である。工業用途としては、シミュレーションやメンテナンスのほか、工場の自動化や管理の改善にも用いられる。

一方、公的利用としては、軍事、警察、救助、建設、研究、教育、行政サービス等さまざまな領域

⁴⁷⁴ Nintendo ホームページおよび Meta ホームページ

で利用されつつある。具体的には、実際にはシミュレーションすることが困難なバーチャル戦場における軍事訓練やオペレーションの演習やメンテナンスなどの支援、犯罪現場や火災現場、救助活動のシミュレーションなど警察や消防のトレーニング、IoT や AR 技術を用いた現場の情報を収集、建設プロジェクトの設計や見積り、科学研究におけるシミュレーションや遠隔による実験や観察、協業、体験型教育等が挙げられる。

AR/VR の軍事利用については、上記のほか、メタバース事態が軍事攻撃の手段あるいは戦場となり得る。たとえば、中国人民解放軍の機関紙『解放軍報』では、「優勢なパワーを運用した高圧的強制あるいは非対称戦法によって、相手のメタバースシステムの要になる結節点とテクニカルな運行チェーンを攻撃・ブロックし、その運行の阻止、その機能の抑制、その存在の破壊を行う」とし、その攻撃対象はメタバースの「デジタルベース、高効率通信、ブロックチェーンの ID 認証、ホログラフィック AR イメージ、AI、高性能インターネットなど」が可能であると論じている⁴⁷⁵。

(2) ブレイン・コンピュータ・インターフェース (Brain Computer Interfaces: BCI)、ブレイン・マシン・インターフェース (Brain Machine Interfaces: BMI)

BCI/BMI は、脳とコンピュータをつなぎ、脳波信号をデコーディングすることで、アルツハイマー病やうつ病などの神経疾患の予防、回復、更には自己治癒力の増進や、コンピュータを通じて脳波タイピングやロボット、ドローン、動物、ひいてはヒトとヒトの通信や操作を行う仕組みである。

人間の脳とコンピュータを直接接続し、人間の脳活動を読み取り、それをコンピュータに伝えることで、人間の意思をコンピュータに反映させたり、機械を操作する事が可能となる。また、マイクロチップなどを介して、人間が動物や人間に指令を送ったり操作したりすることも可能となる。また、逆に電極を差し込む侵襲型や、頭皮の上などから刺激する非侵襲型、磁気、光、あるいは超音波などの BCI/BMI により、人間の脳に直接刺激を与え、指令を与えることも可能である。

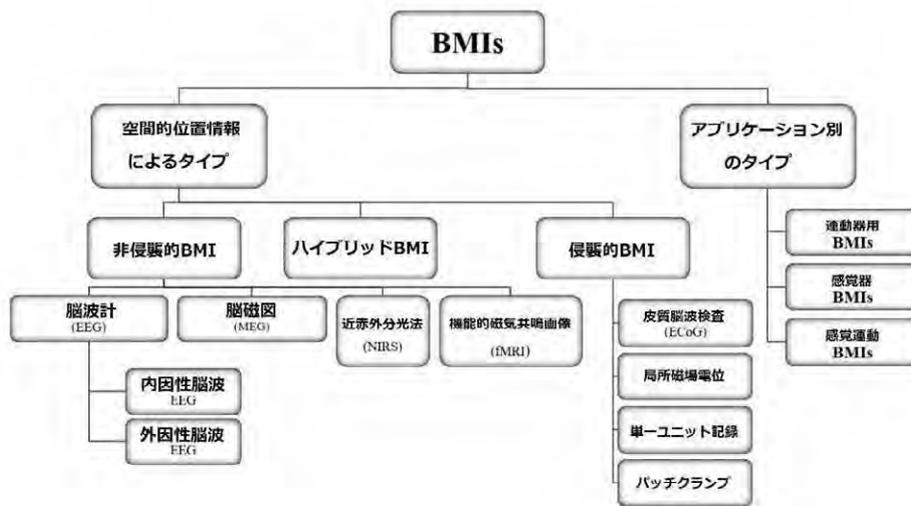
BMI/BCI の基本原理は、被験者の脳波 (Electroencephalogram) や脳磁波を多チャンネルで測定し、そのデータの特徴を解析して被験者のイメージを推定し、それに基づきコンピュータをはじめとする端末、IoT 機器などを操作するものである。つまり、人間の脳をインプットとして捉え、そのアウトプット先としてコンピュータなどの端末を操作する。逆に、外部から脳に刺激を与え、神経疾患の予防、回復、更には自己治癒力の増進などにも活用できる。このように、BMI/BCI は、脳と機械をつなぐための役割を果たすシステムやプログラムの総称であり、究極的には脳とコンピュータがコミュニケーションを取れる双方向性を追求している。

BMI/BCI の方式には、空間的位置 (侵襲型か非侵襲型か、あるいはそれらのハイブリッドか) とア

⁴⁷⁵ 陳東恒、翟嬋、馮亜茹「元宇宙：未来認知戦的新高地」『解放軍報』2022年3月3日。

アプリケーション（用途）によって様々なタイプが存在する（図 X「BMI の空間的位置とアプリケーション（用途）に基づく階層的分類」）。

状における BMI 研究開発の主体は医学分野であるが、技術的な研究開発の方向性としては、①入力型、②介入型、③出力型の 3 種類がある。①の入力型は、脳への信号などを送る技術である。代表例は人工内耳で、実用化され広く利用されている。他に人工網膜などの研究開発が行われている。②の介入型は脳の情報処理プロセスや神経信号伝達プロセスに介入する技術である。この技術はパーキンソン病などの運動障害回復に利用されるなど多くの臨床事例がある。③の出力型は脳内からの信号を外部に送る技術である。



(図 13-2 BMI の空間的位置とアプリケーション（用途）に基づく階層的分類⁴⁷⁶)

こうした BCI/BMI は、医学、特に脳・神経科学や脳機能、あるいは脳と AI に関連した周辺領域の研究を促進するほか、マッピング、支援、増強、または人間の認知および感覚運動機能の修復などの医療・ヘルスケア分野やマーケティング、教育などの一部の分野・用途で実用化に向けた取り組みが進められている。とりわけ、医療分野においては、主として脳波センシングに基づく脳障害や失語症等の認知障害の治療やリハビリテーション、身体障害に苦しむ患者の治療プログラムに組み込まれたり、コミュニケーションに用いられたりしている。

一方、人間と機械を融合するインターフェース技術としても研究開発が進展している。たとえば、脳波の状態を把握しながら脳に微量の磁気や電波を流す経頭蓋磁気刺激に関する研究や、非侵襲性神

⁴⁷⁶ Rezwan Firuzi et al., "Decoding Neural Signals with Computational Models: A Systematic Review of Invasive BMI," Human-Computer Interaction, 7 November 2022.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.03324>, p. 14 を基に筆者作成

経インターフェース技術という脳型インターフェースの開発が進んでいる。BCI/BMI を使用したコンピュータとのサイレントコミュニケーションや自律ロボットの制御により、たとえばロボットや自動車、AI システム等を直接もしくは遠隔から操作することが可能となる。

また、デバイスチップを体内に埋め込み、それが生み出す電流を脳内の特定部位に向けて送るというメカニズムを使ったいわゆる「超人化」の研究も米国を中心に進められている。BCI/BMI を利用して、人間の意思を人工知能が学習、フィードバックすることで、人間の意思をより直接的にコンピュータに伝えることができるようになるだけでなく、人間の脳自体をアップグレードさせることも可能になるかもしれない。

政府や軍での利用用途については、警察や軍など、国家の治安維持や安全保障に関するアプリケーションが挙げられる。例えば、BCI/BMI を活用したドローンをはじめとする無人プラットフォームの操縦や、特殊な任務を遂行するためのロボットのインターフェースなどが考えられる。また、認知領域をめぐる戦いにおいて、BCI/BMI は最も直接的かつ有用なツールとなり得る。さらには、犯罪者の自供や捜査などにも有用であるとして、公的利用が可能であるかもしれない。ただし、米国中央情報局（CIA）がMK ウルトラ計画（Project MK-ULTRA）などで拷問や洗脳の手段として遠隔神経監視（リモート・ニューラル・モニタリング）（Remote Neural Monitoring, RNM）が検討されていたことに対して多くの批判があるように、倫理面での規範化が必要不可欠な分野であり、民生利用はもちろん公的利用であっても、個々人の脳、認知領域という究極の情報にアクセスすることには抵抗が少なくない⁴⁷⁷。

(3) 身体センシング・制御、身体機能拡張

身体センシング・制御や身体機能拡張は、センサーに基づく身体や感覚、筋力、心拍数、呼吸、深部体温、その他の生物物理学的/生化学的メカニズム等の状況・状態の把握・モニタリングとその制御のためのバイオフィードバックや制御、トレーニングによる改善、および機能拡張に関する技術である。

近年、センサ技術の進歩やIoT デバイスの小型化、高速移動通信技術の進展等により、ボディセンサーを搭載したウェアラブルデバイスを用いたデータ収集が身近に行われるようになってきている。

研究者は、医療情報のみならずこうしたボディセンサーから得られたデータを基に、細胞内構造から臓器全体に至るまで、あらゆる規模で人々の身体的状況を理解できるようになった。これにより、移動ロボット、医療機器、義肢、その他の用途のためのより高度なセンシングおよび制御技術の開発が可能となっている。

⁴⁷⁷ United States Congress Senate Select Committee on Intelligence (1977), Project MKUProject MKULTRA, the CIA's Program of Research in Behavioral Modification. U.S. Government Printing Office.

こうした技術は、XR 技術や BCI/BMI、人間と機械のチーム化とも結びついて、それら技術の相乗的な発展を遂げつつある。

たとえば、XR 技術を応用したウェアラブルグラスによる認知・制御支援は、視覚的な情報を提供する。これにより、病気や障害によって損失した視力を補う事が可能となる。また、記憶力や注意力の低下を改善するためのトレーニングプログラムを提供することもできる。

また、パワード・スーツは、人間の身体の状態を測定し、それに応じて特定の出力を生成する装置である。これは、身体障害や疾患によって損失した機能を補うために使用され、脳卒中や多発性硬化症などによって筋力や運動能力が低下した人々に対して、手足の動きを制御する装置を使用することで、歩行や手の動きを改善することが可能となる。また、心臓病や呼吸器疾患等により、呼吸や心拍数が不安定になった場合にも、身体センシング装置を使用して、呼吸や心拍数を調整することが可能となる。

(4) 人間と機械のチーム化／ヒューマン・マシン・チームング (Human-machine teaming: HMT)

HMT とは、人間の役割の一部について AI を搭載した機械に代替させ、共同作業を行うための技術で、マシン・インターフェースやプラットフォームを横断的に人間と結びつけ、共同するためのシステムである。身体的機能を機械に代替させるだけでなく、指揮・命令を含む意思決定についても AI による支援や代替、委任を可能にする。たとえば、自律型ドローンを活用することで、将来の捜索救助 (SAR) ミッションで HMT を可能にするなど、災害救助や消防などの危険な状況での救助作業を機会と共同で行うことが期待される。

特に、米空軍研究所 (Air Force Research Laboratory, AFRL) は、HMT とマシン・インテリジェンスの向上を目指して研究を進めている⁴⁷⁸。HMT の技術的課題として、①人間の状態センシングと評価⁴⁷⁹、②ヒューマン・マシン・インタラクション⁴⁸⁰、③タスク&認知モデリング⁴⁸¹、④人間と機械学習⁴⁸²、⑤

⁴⁷⁸ "Human Machine Teaming," Defense Innovation Marketplace,

<https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/technology-interchange-meetings/autonomy-tim/human-machine-teaming/>.

⁴⁷⁹ ①人間の状態センシングと評価とは、人間の (生理的・能力的・行動的) 状態を客観的に測定・評価することを指す。

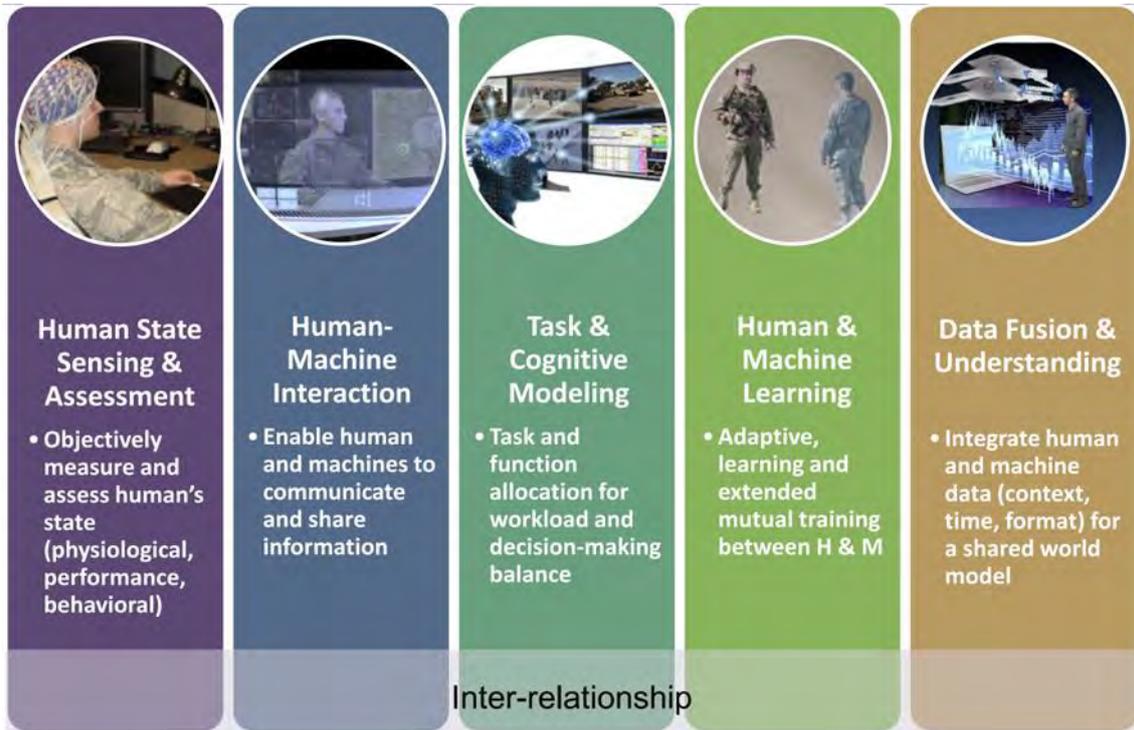
⁴⁸⁰ ②ヒューマン・マシン・インタラクションとは、人間と機械が情報を伝達し共有することを可能にするものである。

⁴⁸¹ ③タスク&認知モデリングとは、タスク量と意思決定のバランスを考慮したタスクと機能の配分をモデリングすることを指す。

⁴⁸² ④人間と機械学習とは、人間と機械との間の適応、学習、および拡張相互トレーニングを指す。

データ融合と理解、を設定している⁴⁸³。

HMT は、AFRL によれば、より少ないエラーでタスクのパフォーマンスの向上や、通信インターフェースとユーザビリティの向上に繋がる。また、チームワークの向上、通信インターフェースの改善、アプリケーションの使いやすさと信頼性の向上により、システムの操作に必要な人員が削減され、設計コストの削減に繋がる。



(図 13-3 ヒューマン・マシン・チームングの技術的課題⁴⁸⁴)

⁴⁸³ ⑤データ融合と理解とは、人間と機械のデータ（文脈、時間、形式等）を統合して世界共有のモデルを実現することを目指すものである。

⁴⁸⁴ "Human Machine Teaming," Defense Innovation Marketplace,

<https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/technology-interchange-meetings/autonomy-tim/human-machine-teaming/>.

第 14 節 極超音速技術 (Hypersonics)

1. 極超音速技術の概要

近年、各国が開発・実戦配備を進めている軍事技術の一つに、マッハ5以上の高速で飛翔する「極超音速兵器」がある。一般論として、ミサイルを従来よりも高速で飛翔させることができれば、相手の先進的な防空システムを突破することが容易になったり、数分後には移動してしまうような時間的制約のある目標 (time-sensitive targets: TSTs) を瞬時に撃破できるようになる可能性がある。

極超音速域で物体を飛翔させることの技術的ハードルは、それほど高いわけではない。第二次世界大戦中にドイツが開発した世界初の弾道ミサイルV-2の最高飛翔速度は、既にマッハ5を超えていたように、大半の弾道ミサイルの飛翔速度は極超音速に達する。同様に、V-2の技術を基に開発された宇宙ロケットやスペースシャトルなどの宇宙機も極超音速で飛翔する。

また、弾道ミサイル防衛が実用化されているように、たとえ速度が速くても、対象の軌道があらかじめ予測できれば迎撃は可能である。弾道ミサイル防衛は、(1) 弾道ミサイルの発射熱を早期警戒衛星が探知、(2) 地上・洋上配備レーダーが目標を追尾し、弾道軌道を解析、(3) 大気圏外で分離されるロケットエンジンや放出されるデコイ (囷) などの中から本物の弾頭を識別、(4) 迎撃ミサイルから放たれた迎撃体が弾頭を直撃、(5) 交戦時の赤外線反応等から迎撃の成否を評価、という手順で行われる。

現在、実用化されている弾道ミサイル防衛には、米国本土を守る地上配備型迎撃システム (GBI) やイージス艦に搭載されている SM-3 のように大気圏外で目標を迎撃する「ミッドコース (中間段階)」迎撃システムと、PAC-3 のように再突入後の大気圏内で目標を迎撃する「ターミナル・フェイズ (終末段階)」迎撃システムの2つがある。ただし、弾道ミサイルの速度は射程に比例するため、マッハ20近くに達するICBMをターミナル・フェイズで迎撃することは質量や相対速度の関係上非常に難しい。このため射程1000km以上の中～長距離弾道ミサイルへの対処には、ミッドコース迎撃が基本となり、ターミナル・フェイズ迎撃は、短射程の弾道ミサイル対処用か、ミッドコース迎撃に失敗した場合の最終手段といった意味合いが強い。言い換えれば、ミッドコース迎撃の成否を分けるのは、弾道軌道解析と目標識別の正確さであり、それがクリアできれば、単発の弾道ミサイルを迎撃するのは現在の技術ではそれほど難しくはなくなっている。

既存の弾道ミサイルもその飛翔速度だけを見れば、広義の極超音速兵器に含まれる。しかし、現在各国が開発・配備を進めているのは、弾道ミサイルとは異なる原理・飛翔特性で極超音速に達する (狭義の) 極超音速兵器 = 「極超音速滑空体 (Hypersonic Glide Vehicle: HGV)」および「極超音速巡航ミサイル (Hypersonic Cruise Missile: HCM)」である。これらの兵器は、現在確立されているミサイル防衛技術では迎撃が難しい点に新規性がある。

2. 超音速兵器のカテゴリ

(1) 極超音速滑空体(Hypersonic Glide Vehicle: HGV)

従来の弾道ミサイルは、液体ロケットエンジンもしくは固体ロケットモーターをブースターとして用いて、搭載した弾頭を弾道軌道で遠方に投射する技術である。これに対し、HGV は同様のブースターを用いるところまでは同じだが、燃焼終了直後から弾道軌道をとらず、滑空体（グライダー/グライドボディ）自体の空力学的揚力によって大気圏上層で跳躍・滑空・横方向（クロスレンジ）への機動を行い、目標に突入する。

HGVは、冷戦期に開発・実用化された終末誘導機動再突入体（Maneuverable Re-entry Vehicle: MaRV）技術を流用した円錐型と、より空気抵抗の少ない鏃のようなグライダー型の 2 つに分けることができる。MaRV は、通常の弾道ミサイル用弾頭と同様に、宇宙空間に飛び出した後、大気圏への再突入時の僅かな時間にだけ機動変更を行うことを狙って設計されたもので、必ずしも長時間の極超音速飛翔や滑空に適した空力形状ではない。しかし、ブースターを切り離すタイミングや再突入時の角度などを変えることで、一定距離を滑空させることは可能である。そのため、MaRV と円錐型 HGV の技術的な境界線は曖昧である。他方、グライダー型の HGV は滑空距離に優れるが、その分飛翔速度が速くなることに加え、機動時の負荷が大きくなることから、高速度域での熱防護や操舵時の安定性の維持など、飛翔速度と命中精度を両立させるための技術的ハードルが高い（後述）。

HGV が飛翔・滑空するのは、射程 1800km 以下であれば高度 20~40km、射程 5000km を超える場合でも高度 30~60km 地点であるため、迎撃高度を 600~1770km に設定している既存のミッドコース迎撃システムでは交戦できない。また通常の弾道ミサイルであれば、発射直後からある程度の軌道や着弾地点の予測が可能であるが、軌道を変化させながら飛翔する HGV は、着弾地点を割り出すための警報時間が極端に短くなってしまい、たとえターミナル・フェイズで迎撃ミサイルを発射できたとしても、交戦機会がその一瞬に限られてしまう。加えて HGV は、大気圏上層を高速滑空する際に生じる摩擦に耐え得る熱防護が施されているため、高出力レーザーのようなエネルギー兵器による迎撃も有効ではないと考えられている。

(2) 極超音速巡航ミサイル (Hypersonic Cruise Missile: HCM)

米国製のトマホークに代表される一般的な巡航ミサイルは、ターボジェットエンジンないしターボファンエンジンを推進機構として用いているため、その飛翔速度はジェット旅客機とさほど変わらず、亜音速であることが大半である。しかし近年では、ロケットブースターによって加速後、超音速燃料ラムジェット（スクラムジェット）と呼ばれるエンジンを使って、超音速または極超音速での飛翔を維持できるタイプの巡航ミサイルの研究・開発・配備が進みつつある。巡航ミサイルは弾道ミサイル

と異なり、飛翔経路を変更出来る他、航空機・艦船搭載型であれば、より柔軟に発射地点を変えられるため、防御側は 360 度全方位を常時警戒しなければならない。また、スクラムジェットエンジンの燃焼のための適切な圧力を得るため、HCM は高度 20~30km を飛翔するよう設計される場合が多く、地上配備レーダーでは遠方からの探知がしづらい。HCM への対処方法は、通常の巡航ミサイルへの対処と同様に、防空レーダーと対空ミサイル/近接防護火器システムを用いればよいが、速度が速い分、飛翔経路の正確な追尾と、その速力・機動に追従しうる迎撃ミサイルが必要となるため、多方面から複数・同時発射された場合の対処がより難しくなるという課題がある。

このように HGV と HCM は飛翔速度が極超音速に達するという以外、技術的に全く異なる兵器システムである。したがって、これらをまとめて「極超音速兵器」と呼称するのは必ずしも適切ではない。ただし、これらの兵器は目標に突入する際の速度が速ければ速いほど、少ない弾頭重量（ペイロード）で高い破壊力を生むという物理特性は共通している。これは、命中精度が伴うならば、炸薬を搭載せず、運動エネルギーだけでも（硬化目標を除く）地下施設などを破壊しうることを意味する。

3. 技術的課題

軍事学においては、「攻撃側は防御側に対して 3 倍の戦力を必要とする」という定説がある。しかし、これは相手の領土を占領するような地上戦を含む戦争全体の特性を説明したものであり、現代（特に大量破壊兵器登場後）のミサイル防空戦には当てはまらない。元々ミサイル戦では、攻撃側は防御側に対して圧倒的優位であるが、極超音速技術の軍事での実用化・拡散が進んだ場合、この特性がより拡大することが考えられる。しかし、極超音速兵器の開発・普及には様々な技術的課題を克服する必要がある。

(1) 速度と熱防護にかかる問題

物体が極超音速＝マッハ5以上の高速度域に達すると、低速度域とは異なる空力学的現象が発生する。例えば、物体表面の加熱が顕著になるほか、物体周囲の空気の流れが滑らかな状態から乱流に変化するのを予測することが難しくなり、空力制御が困難になる場合が多い。

宇宙機は日常的にマッハ5をはるかに超える速度へ飛翔している上、従来型の弾道ミサイルもその飛翔時間のほとんどをマッハ5を超えて移動している。しかし、宇宙機や弾道ミサイルの飛翔部分の大半は大気圏外であり、大気と長時間接触することによる相互作用の影響をさほど考慮する必要はない。宇宙機や弾道ミサイルにしても、大気圏に再突入する段階では極めて高温の加熱に晒されるものの、その時間はごくわずかだからである。

一方、HGV や HCM は大気圏内を長時間飛翔することになるため、あらゆる面で宇宙機や弾道ミサイルよりも高度な熱防護、熱対策が必要となる。具体的には、飛翔体の構造材料は、熱によって大きく変形したり溶けたりすることのないよう、セラミックプレートなどスペースシャトルに使われていたような熱防護材が必要となる。しかし、物体の構造と熱防護の材料に何を使うかは、物体の重量とコストに大きな影響を与えるため、このバランスそのものがハードルとなる。物体の表面温度が 1700 度程度の高温になっても溶解せず、構造の維持できる材料としては超合金がある。また、温度が 3200 度以上に達する場合には、セラミック複合材や炭素繊維などが用いられるのが一般的である。例えば、スペースシャトルに使われていた炭素複合材は、1700 度以上の熱に耐えられることが実証されている。しかしながら、これらの高性能材料は製造が困難であると同時に、高価であることが一般的である。

スペースシャトルや弾道ミサイルの熱防護材は、再突入時の比較的短い時間の間に熱を吸収したり、化学原理によって熱を放散させたりする役割を持っているものの、これらはあくまでも一時的な加熱に対応するためのものに過ぎず、長時間の高温に晒されると、熱を内部に伝えてしまったり、熱防護材そのものが溶け落ちてしまう場合がある。このため、スペースシャトルや弾道ミサイルに用いられている熱防護材は、HGV や HCM のような大気圏内を一定時間飛翔する物体の構造にそのまま転用できるわけではない。

(2) 安定性と機動（マニューバリング）に関する問題

物体の速度が音速を超えると、物体の前方にソニックブームと呼ばれる衝撃波が生じるが、極超音速では、この衝撃波と物体との境界に生じる衝撃層が非常に薄くなる場合がある。また、高速で移動する飛翔体周辺の空気は非常に高温になり、化学変化を起こす可能性がある。これらの要因が組み合わさる中で、衝撃層の挙動を予測するのは技術的に難しい。気流が滑らかな状態から乱流に変化するタイミングを正確に予測できない場合、飛翔体の安定性が損なわれ、急激かつ局所的な温度上昇を引き起こして、ミサイルが空中分解してしまう危険があるからである。

同様に、レーダーや迎撃ミサイルを回避するために、大気圏内で旋回などの機動（マニューバリング）を行う場合、飛翔体にかかる抵抗が増して熱負荷が増加するほか、空気抵抗によって飛翔体の速度が低下したり、射程距離が短くなる可能性もある。

(3) 通信とターゲティングに関する問題

空気の挙動は温度によって変化するが、物体の表面温度が 3700 度を超えると、分子中の原子から電子の一部が失われて電離が生じ、周囲の気体にはいわゆるプラズマが発生する。プラズマは高周波を吸収する特性を持っているため、飛翔体の速度があまりに高速になると、通信やレーダーの使用に制

限が生じる。このため米国防省が開発中の HGV は、GPS などの信号を送受信して精密誘導が可能なように設計されていると言われているが、これらの通信が可能な間は、飛翔速度をプラズマが発生する速度以下に意図的に抑えようとしている可能性がある。

飛翔体内に搭載する繊細な通信用電子機器に対しては、十分な熱防護を施さなければならないが、それと同時に外部と信号を送受信するための電波を通す窓（＝レドーム）を取り付ける必要もある。レドームの材料は、通信に必要な高周波や赤外線を通す一方で、外部からの熱を大幅に遮断するという2つの性質を両立させる必要があり、開発が難しい。これらは精密誘導が可能な極超音速兵器を開発する際の技術的ハードルとなっていると言われている。

(4) スクラムジェットエンジンに関する問題

HCM 開発における課題は、推進機構であるスクラムジェットエンジンの開発である。スクラムジェットエンジンの開発には、ミサイルが高速で飛翔する間に、適切な温度、気圧、密度で、空気と燃料を混合させ続けられるエンジン部品を設計する必要があり、しばしば「台風の中でマッチをつけること」の難しさに喩えられる。

4. 主要国の研究開発・配備動向と運用構想

(1) ロシア

ロシアは、1980年代から弾道ミサイルとは異なる極超音速技術の研究を行ってきた。しかし、2001年に米国が弾道弾迎撃ミサイルの配備を制限した ABM 条約からの脱退を通告し、米国本土防衛を強化、欧州にもミサイル防衛を配備し始めたことで、HGV と HCM の開発を本格化させたと見られている。

アヴァンガードは、2018年3月1日に行われたプーチン大統領による年次教書演説で、「新しい戦略兵器」の一つとして紹介された HGV である。アヴァンガードは、RS-18 (SS-19) B ないし開発中の RS-28 (SS-X-30) サルマート（いずれも発射重量 100 トンを超える重 ICBM）をブースターとする長射程 HGV であり、操舵性を有しつつ最高速度マッハ 20 で米国本土のミサイル防衛網を突破して、確実な戦略核攻撃を行うことが狙いと考えられている。2016年には2回、2018年には1回実験に成功したとされており、2019年12月にはロシア国防省が実戦配備を宣言した。アヴァンガードの滑空距離は6000km を越え、2000kg のペイロードが搭載可能とされる。

またロシアは、3M22 ツイルコンと呼ばれるマッハ 6~8 で飛翔する HCM を開発し、2023年1月4日には、同ミサイルを搭載したアドミラル・ゴルシコフ級フリゲートが地中海への展開を開始したと報じられた。ツイルコンは、アドミラル・ゴルシコフ級フリゲートのほか、キーロフ級ミサイル巡洋艦、

ステレグシチー級フリゲート、ヤーセン級原子力潜水艦など、さまざまな艦艇の垂直発射システム（VLS）から発射可能な対地・対艦攻撃用 HCM とされ、射程は約 400-965km とされる。

この他、ロシアの極超音速兵器として紹介されるものに、Mi g-31 戦闘爆撃機や Tu-22M3 戦略爆撃機に搭載して運用される Kh-47M2 キンジャールがある。2022 年 3 月 19 日、ロシアはキンジャールを初めて実戦で使用し、ウクライナ西部（イワノフランコフスク州デリヤティン）の地下武器貯蔵施設を破壊したと発表した。一部では、これを「世界で初めて極超音速兵器が実戦使用された事例」と報じる向きもある。しかし、情報機関や専門家の多くは、キンジャールを「短距離弾道ミサイル（SRBM）イスカンデル M を改良した空中発射型弾道ミサイル（ALBM）」と評価しており、HGV には分類していない。ロシア側は、Mi g-31 からキンジャールを発射した場合、最高速度はマッハ 10、射程 1930km に達し、大気圏内での操舵ならびに対地・対艦攻撃が可能と主張しているものの、そのような客観的な裏付けはないとする評価も多い。

ロシアにおける極超音速兵器開発に携わっている機関としては、中央航空流体力学研究所およびクリスティアノヴィッチ理論応用力学研究所があり、これらの研究所では極超音速風洞を使った実験が行われている。また、アヴァンガードやツイルコンの製造は、NPO マシノストロエニヤ（ソ連時代に OKB-52 と呼ばれていたロケット設計局）が担当している。

(2) 中国

中国が極超音速兵器を開発し始めたのは、米国の極超音速兵器が中国の核戦力や関連施設に対する武装解滅的な先制第一撃を可能にするかもしれないという懸念や、米国のミサイル防衛能力の向上が、中国の既存の対米打撃力を損なわせるとの懸念からだと考えられている。

このことから、中国の極超音速兵器開発の狙いはロシアと同様に、主として米国に対する確実な戦略核攻撃能力を担保することだと考えられてきた。ところが、中国は 2019 年 10 月の軍事パレードにおいて、長射程の HGV に先駆けて、中距離射程の HGV・DF-17 を初公開した。DF-17 は、従来米国防省で DF-ZF（WU-14）と呼ばれてきた HGV の量産型とみられ、DF-17 のブースターのサイズから 1800-2000km 前後の射程を有していると推定される。2021 年の米国防省年次議会報告では、DF-17 は既に実戦配備段階にあると評価されており、2021 年の時点で配備済み準中距離弾道ミサイル（MRBM）戦力の約 4 割を占めている可能性がある。中国は DF-17 を「通常弾頭型」と説明しているが、より射程の長い DF-26（IRBM）や DF-41（ICBM）などに搭載しうる HGV が別途開発されているとの分析もあり、これらが核・非核の両用になる可能性は否定できない。

中国における長射程 HGV の開発動向については不明な点が多いものの、それを実現するための技術開発を継続していることは確実である。例えば、2020 年 2 月に行われた上院軍事委員会公聴会において、

テレンス・オショネーシー米北方軍兼北米航空宇宙防衛司令部（NORAD）司令官（当時）は、「中国は米国のミサイル防衛や警報システムを回避しうる（核搭載可能な）大陸間HGVの実験を行なっている」と証言している。また中国は、2021年8月に、衛星打ち上げ用ロケット・長征を用いて、地球の軌道上を周回するHGVの実験を複数回行った可能性がある」と報じられている。この実験について、中国の報道官は「再利用可能な宇宙機の実験」と説明しているものの、これはかつてソ連が開発していた地球低軌道に兵器（弾頭）を投入し、目標に接近する際に部分的に地球を周回させる部分軌道爆撃システム（FOBS）と同様の技術である。米国本土のミサイル防衛システムや早期警戒センサーの多くは、ユーラシア大陸から弾道ミサイルが飛来することを想定して、アラスカと西海岸に配備されている。しかしFOBSを用いれば、これらのミサイル防衛網を迂回して南側から弾頭を米国本土に到達させることが可能となる。

また中国は、2018年8月に、DF-17とは異なるStarry Sky-2（星空2）と称する、衝撃波を利用して揚力を生み出すウェーブライダー技術を用いた極超音速システムの実験に成功している。星空2の最高速度はマッハ6に達し、2025年までに運用開始されるとの見立てもある。

中国は極超音速技術に関する様々な研究開発インフラを有しており、地上試験施設に多額の投資を行っている。例えば、中国空気力学研究開発センターは18の風洞を有するとされるほか、中国航空宇宙空気力学研究院は最低でも3つの極超音速風洞を運営していることが知られている。また、DF-17の製造は、ロケットやミサイルの設計・開発・製造を手掛ける中国航天科技集団が担当している。

(3) 北朝鮮

2021年9月28日、北朝鮮は火星8と称する極超音速兵器の発射実験を行なったことを明らかにした。北朝鮮メディアによって公開された画像からは、IRBM・火星12と同様のロケットエンジンがブースターに用いられていることと、中国のDF-17に類似したグライダー型のHGVが搭載されていることが確認できる。しかし、それ以外の詳細はほとんど報じられなかった上、日米韓の防衛当局も発射の詳細を公表していないことに鑑みると、初回の実験は失敗で、外部から飛翔データを分析できるほど長い距離を飛翔しなかった可能性が高い。

その後北朝鮮は、2022年1月5日と11日に、円錐型のHGV（もしくはMaRV）を搭載した極超音速兵器と称する飛翔体を発射した。5日の発射では、700kmを飛翔した上で、120kmのクロスレンジ機動を行い、11日の発射では1000kmの飛翔に加え、200kmのクロスレンジ機動を行なったと発表されている。北朝鮮はグライダー型のHGVの失敗を機に、より技術的に堅実な円錐型の弾頭に設計を切り替えたと考えられる。また、極超音速域での飛行制御技術に関しては、空力制御で軌道変更が可能なロシアのイスカデルMに酷似したKN-23などの運用を通じて、一定程度の蓄積をしたものとみられる。

(4) 米国

米国が極超音速兵器の開発に着手した背景は、ロシアや中国、北朝鮮とは大きく異なる。長らく米国は、遠方に位置するターゲットを短時間（1時間以内）に撃破する手段としては、核弾頭を搭載した長距離弾道ミサイルしか保有してこなかった。しかし、大量破壊兵器の拡散を試みようとするテロリストやならずもの国家の行動を阻止するために、核ミサイルを用いることは現実的ではない。そこで米国ではブッシュ政権時代から、破壊力の大きな核ミサイルを用いることなく、また前方展開に頼らずとも、地球上のあらゆる地点のターゲットを瞬時に打撃できる非核の攻撃手段が追求され始め、2003年5月より「通常型即時全地球打撃（Conventional Prompt Global Strike：CPGS）」構想と呼ばれる極超音速関連技術の開発プログラムが開始された。米国の極超音速関連技術は、CPGSを実現する技術開発プログラムの一環として開発が始まったものの、オバマ政権からトランプ政権の国家防衛戦略（National Defense Strategy：NDS）を経て、脅威認識と運用上の所要が「テロとの戦い」から高度な接近阻止/領域拒否（A2/AD）能力を有する「大国との戦略的競争」に変化したことに伴い、現在では長射程化よりも、むしろ地域紛争で使用が可能な中距離射程のHGVとHCMに関連する技術開発に集中するようになっている。米国が極超音速兵器に求める所要について、ジョン・ハイテン戦略軍司令官（当時）は「即応性があり、射程が長い極超音速兵器は、他の戦力では達成が困難なアクセス拒否環境において、距離の離れた、防護された、あるいは（移動式ミサイルのような）タイムクリティカルな脅威に対する攻撃オプションとなる」と証言している。

米国の極超音速関連技術は、ロシアや中国に後れを取っていると指摘されることが少なくない。しかし、米国と中口とは極超音速兵器に求める所要に違いがあることに留意する必要がある。中口の極超音速兵器は、基本的に米国（とその同盟国）が有する先進的なミサイル防衛を突破する戦略攻撃能力（＝核攻撃能力）の一部として開発が始まったのに対し、米国は一環して非核（＝通常攻撃能力）の極超音速兵器を追求している。このことから、米国が開発する極超音速兵器には、中口に比べて必然的に高い命中精度が求められ、技術的ハードルを高めている。

2019年以降、米国防省は極超音速兵器の開発プログラムに80億ドル以上を費やしてきた。今後、極超音速兵器への投資はさらに拡大することが見込まれており、2023-27年には研究開発に130億ドル、調達に20億ドル近くの予算が投じられる予定である。

現在米国では、海軍が開発を主導する陸海軍共通の滑空体（Common Hypersonic Glide Body：C-HGB）プログラムと、各軍の所要に合わせた個別のHGVないしHCMプログラムが進行中である。

米海軍は、陸軍が2011年と2017年に実験に成功したHGVプロトタイプの開発を引き継ぐ形で、共通滑空体プログラムを主導している。このC-HGBを陸軍と共用する34.5インチの2段式固体燃料ロケットモーターに搭載し、ヴァージニア級攻撃原潜のVLSから発射可能な形で組み合わせたものが、通常即

時打撃 (Conventional Prompt Strike : CPS) システムである。米海軍は、FY2025 までにズムウォルト級駆逐艦に、FY2028 までにヴァージニア級攻撃原潜に配備するための試験を予定している。

米陸軍で進められている C-HGB を用いたプログラムは、Long-Range Hypersonic Weapon : LRHW ダークイーグルと呼ばれる。LRHW は、米海軍の CPS とキャニスターを共用する路上移動式 HGV システムに、陸軍が現在使用している戦闘火器管制システムを統合する計画である。「長距離」という名称がついているものの、これは「現在陸軍が保有する兵器の中では長距離」という意味であり、実際に要求されている射程は約 2770km 程度であり、前方展開を必要とする。LRHW の基本部隊は、二連装の移動発射台 4 両、ミサイル 8 発、オペレーションセンター 1 つで構成される。LRHW は、米国の極超音速兵器プログラムの中でも最も早期に実戦配備される予定のシステムであり、2021 年 10 月にはワシントン州タコマのルイス＝マコード基地に試験用の移動式ランチャーの納入が行われた。クリスティン・ウォーマス陸軍長官によれば、LRHW の生産・配備は計画通り進行中であり、2023 年秋には最初の部隊編成が完了する予定であるという。

一方、米空軍が開発しているのは、AGM-183A Air-Launched Rapid Response Weapon : ARRW と呼ばれる空中発射型 HGV である。陸海軍と異なり、ARRW は DARPA が開発した戦術ブースト滑空体 (TBG) をベースとした弾頭と単段の固体ロケットモーターを使用しており、平均速度マッハ 6.5~8、射程 920km 以上とされている。これまでの試験では B-52 爆撃機を発射プラットフォームとしているが、B-1 や B-21、F-15 などの他のプラットフォームの使用も検討されている。ARRW は、2022 年以内に初期運用能力の獲得を予定していたが、2021 年に 3 回行われた試験に全て失敗したため、計画に遅延が生じた。2022 年に行われた 3 回の試験には成功しており、2023 年以内に初期運用能力の獲得、2024 年には量産が開始される予定である。

このほか、米国防高等研究計画局 (DARPA) が長らく空軍と協力して取り組んでいる HCM 技術＝スクラムジェット開発プログラムとして、Hypersonic Airbreathing Weapon Concept : HAWC がある。2021 年の時点で、HAWC は先進的極超音速エンジンの開発段階であったが、米空軍は 2022 年に同技術を統合した空中発射型 HCM＝Hypersonic Attack Cruise Missile : HACM プログラムを新たに立ち上げている。なお、米国の HCM プログラムは、HGV プログラムに比べて公開情報が限られており、不明な点が多い。

米国には 2014 年の時点で、2030 年までに軍事用途に資する極超音速技術を開発するインフラとして、国防省、NASA、エネルギー省の施設等を含む 48 の重要な極超音速試験施設が存在したが、それらの施設では、マッハ 8 以上での飛行特性を評価するために必要な実物大の空力・熱負荷環境を再現できないと評価されたという。これを受け、現在では複数の研究機関が極超音速施設の建設を進めている。なお、米国の殆どの極超音速兵器の製造はロッキード・マーチンが主契約業者となっている。

(5) 日本

日本の極超音速兵器開発は、防衛装備庁が主体となって進められており、他の主要国と同様に HGV と HCM の 2 種類が開発されている。

日本の国産 HGV とされるのが、島嶼防衛用高速滑空弾である。島嶼防衛用高速滑空弾は、2017 年の防衛省概算要求において、初めてその「要素技術の研究」を進めることが明らかとなった装備品である。同年の事前事業評価によれば、その目的は「我が国の島しょ防衛に万全を期するため、高高度を超音速で滑空し GPS/INS 等により目標に正確に到達した後に搭載する弾頭機能により島しょ部に侵攻した敵を攻撃する」迅速な島嶼間射撃を実現するものと説明され、翌 2018 年の概算要求においては、早期装備型（ブロック 1）と性能向上型（ブロック 2）の開発が計画されていることが明らかになった。この時点で防衛装備庁が公開していたイメージ図では、早期装備型（ブロック 1）については MaRV のような円錐型の滑空体、性能向上型（ブロック 2）についてはグライダー型の滑空体が描かれていた。このことから、配備時期の違いは弾頭の開発進度に応じたものと見られたが、この意味合いはのちに変化することになる。

防衛省は、早期装備型の実戦配備を 2025 年度に予定していたものの、2022 年の概算要求において量産開始時期を 2023 年に前倒しすることが決定された。さらに 2022 年 12 月の事前事業評価では、能力向上型の開発計画が細分化され、大型のロケットモーターを装備して射程を延伸した上で早期配備を図る能力向上型試作型（ブロック 2A）と、より改良されたロケットモーターを装備したブロック 2B の 3 段階の開発が行われる計画であることが明らかとなった。当初防衛省は、能力向上＝弾頭の開発状況と捉え、配備時期とリンクさせていたようであるが、現在では能力向上＝ロケットモーターの開発状況と位置付け直している。これは高速滑空弾に求められる能力が、防空システムに対する突破力のさらなる向上よりも、射程の延伸をより重視するようになったことを示唆しており、コンセプトとしては米国の LRHW との類似性が指摘できる。

防衛省は、島嶼防衛用高速滑空弾のいずれのバリエーションについても、具体的な射程は示していない。しかし、同システムが島嶼間射撃用に開発されてきたことを踏まえれば、南西諸島方面での運用を考慮する場合、ブロック 1 は最低でも 500km 程度の射程を有すると考えるのが妥当であろう。また、ブロック 2A/B については、「敵のミサイル攻撃等から健在しつつ、弾薬等の継続的な補給が可能となる本州等から対処できる射程」を有する極超音速兵器と定義していることに鑑みると、大幅な射程延伸が図られるものと考えられる。すなわち、島嶼防衛用高速滑空弾ブロック 1 は、事実上の MaRV 搭載型の国産短距離弾道ミサイル、ブロック 2 は射程 3000km 前後に達する国産の中距離 HGV と捉えることができる。とりわけ、ブロック 2A/B に関しては、日本のスタンドオフ防衛能力、反撃能力の中核をなす装備として位置付けられていくことになろう。

一方、日本の国産 HCM とされるのが、極超音速誘導弾である。極超音速誘導弾は、2019 年の概算要求の中で、「極超音速で巡航が可能なスクラムジェットエンジンの要素技術の研究」として開発が始まった装備品である。現在その目的は「着上陸侵攻事態等に際して、相手の脅威圏から離れた地域に展開し、遠方の海域の防空能力の高い相手方の重要艦艇等を撃破し、また、上陸した相手の地上部隊等を攻撃するために使用」と説明されており、いわゆるスタンドオフ防衛能力の一環として開発が進められている。

島嶼防衛用高速滑空弾と同様に、防衛省は極超音速誘導弾の射程を明らかにしていない。しかし、2022 年の事前事業評価における高速滑空弾（能力向上型）の説明には、「第 1 段目の大型ロケットモータを極超音速誘導弾のブースターと共通化し、当該事業における設計活動の大幅な低減を図る」との記述がある。先に述べた通り、高速滑空弾の正確な射程は明らかにされていないものの、射程 3000km の中距離 HGV とロケットモータを共通化するという事は、日本の極超音速誘導弾は世界に類を見ない巨大な長射程 HCM になることが考えられる。

極超音速誘導弾は、高速滑空弾と並んで日本が導入を進めるスタンドオフ防衛能力の一翼を担うことが想定されているが、2023 年度にも量産が開始される予定の高速滑空弾と異なり、極超音速誘導弾の現行計画では 2030 年時点においても研究試作段階にとどまっており、実用化時期については明らかにされていない。

5. 極超音速兵器への対抗手段

HGV は大気圏外を飛翔する時間が殆ど存在しないため、既存のミッドコース迎撃システムによる広域防衛（エリア・ディフェンス）は不可能である。滑空段階から機動、目標への精密誘導に至る段階ではある程度減速するため、改良型のターミナル迎撃システムで対処できるとも言われるが、拠点防衛（ポイント・ディフェンス）によって各重要施設を防護するためには、防御側に多大なコストを強いることになる。こうした実情も踏まえ、マイケル・グリフィン国防次官（当時）は、「米国は 2020 年代半ばまで極超音速防衛能力は実現しない」と述べていた。

しかし、HGV 防衛に関する研究は既に始まっている。米ミサイル防衛局は、FY2017 国防授權法において極超音速防衛プログラムを開始し、センサー、迎撃ミサイル、高速飛翔体、レーザー、電子攻撃システムなどの開発を命じている。特に、探知用センサーについては開発・配備が急務である。現在、米国とその同盟国がミサイルの追尾・識別を行うためのセンサーの殆どは、洋上や陸上に配備されており、探知範囲に限界がある。そこで今後はセンサーを宇宙に配備し、ミッドコースでの追尾能力を向上させることを計画している。

これらの宇宙基盤のセンサー計画を主導しているのは、米国防省宇宙開発局およびミサイル防衛局である。宇宙開発局は、早期警戒から追尾、迎撃に至るまでの統合的な宇宙基盤のアーキテクチャとして「PWSA (Proliferated Warfighter Space Architecture)」と称する、550基の衛星コンステレーション計画を進めている。PWSA は(1) 追尾レイヤー、(2) トランスポート(通信)レイヤー、(3) 地上における移動目標のターゲティングを支援するカストディ・レイヤー、(4) 宇宙基盤の指揮統制を提供する戦闘管理レイヤー、「GPS が使えない環境での測位・航法・タイミング」を提供するナビゲーション・レイヤー、深宇宙での潜在敵対行為を検出する抑止レイヤー、他の PWSA レイヤーに対する衛星操作を促進する支援レイヤーから構成される。

このうち追尾レイヤーは、赤外線センサーを搭載した次世代早期警戒衛星を開発する広視野(WFOV)プログラムと、捕捉した飛翔体を迎撃するために必要なより詳細なターゲティング情報を提供するための中視野(MFOV)プログラムからなる。宇宙開発局は、広視野プログラムのトランシェ 0 に 2023 年度に 8130 万ドル、トランシェ 1 に 4 億 9980 万ドルを要求している。中視野プログラムとして、ミサイル防衛局と宇宙軍とが協力して開発しているのが極超音速・弾道追跡宇宙センサー(HBTSS)であり、2023 年度には 8920 万ドルを要求がなされている。

超音速兵器に対応する迎撃ミサイルの開発については、ミサイル防衛局が 2020 年ごろからプロトタイプの研究に着手しつつあったが、当時の計画では開発に移行できるのが 2030 年代とだいぶ先になるため、現在はより早期に実用化が可能なシステムの開発に軸足を移しつつある。2021 年 4 月、ミサイル防衛局は、イージス・システムによって運用が可能で、2020 年代半ばから後半までに極超音速ミサイル防衛能力を提供することを想定した滑空段階迎撃体(Glide Phase Interceptor: GPI)を開始している。ロッキード・マーチン、ノースロップ・グラマン、レイセオンが GPI の概念設計段階の契約を獲得している。また DARPA では、HGV を大気圏上層で迎撃することを目指す「グライドブレイカー・プログラム」と呼ばれる技術開発構想が進められている。

6. 想定される用途

冒頭で述べた通り、現在極超音速技術が世界的に注目を集めているのは、各国が軍事利用を目的として開発・配備を進めているためである。極超音速兵器の開発・配備が進み、その技術拡散が進んだ場合、(1) 飛翔速度の速さ、(2) 従来の弾道ミサイルとは異なる飛翔特性、(3) 低高度を飛翔することによる地上配備センサーでの探知・警報時間の遅れ、(4) 高速域での操舵・機動が可能(になりつつある)という複数の特性が合わさって、ミサイル戦における攻撃側の優位がより拡大し、防御側は従来にも増して多くのコストを強いられる傾向が強まることになる。

(1) 極超音速兵器がもたらす戦略レベルの影響

現在、多くの国々が極超音速兵器に関する研究開発を行なっているものの、それらを既に配備しているのはロシアと中国に限られており、米国や日本は未だ配備には至っていない。もっとも、各種兵器の開発・配備状況は、各国が置かれた安全保障環境や戦略、運用構想に影響を受けているため、技術開発や配備状況の相対的な遅れがある国との関係における戦略的優劣に直結するわけではないことに留意する必要がある（後述）。

ロシアや中国、北朝鮮が開発・保有しようとしている極超音速兵器は、その射程に応じて異なる戦略・戦術レベルの影響をもたらすと考えられる。

長射程＝戦略的 HGV に関して言えば、それらが米露間・米中間の戦略バランス（戦略的安定）に与える影響は限定的である。例えば、ロシアが実戦配備を開始したとしているアヴァンガードが説明する通りの性能を発揮すれば、米国本土のミサイル防衛網を突破して戦略核攻撃を行うことは可能であろう。しかし、そもそも現在米国が配備している GBI は、ロシアや中国からの戦略核攻撃を完全に防止することを前提に設計されているわけではない。オバマ政権期に発表された弾道ミサイル防衛見直し（Ballistic Missile Defense Review : 2010BMDR）では、本土防衛用ミサイル防衛は、あくまで「北朝鮮やイランなどからの限定的な弾道ミサイル攻撃による脅しを阻止するためのもの」と説明されており、「今日、ロシアと中国は米領土に到達する大規模な弾道ミサイル攻撃を行う能力を有するが、その可能性は極めて低く、米国の弾道ミサイル防衛の対象ではない」と述べられている。この説明は、トランプ政権やバイデン政権のミサイル防衛見直し（Missile Defense Review : 2019/2022MDR）でも「ロシアおよび中国の大規模で洗練された ICBM 能力に対しては核抑止をもって対応する」と踏襲されている。

とりわけ、中国は 2021 年に最新型の ICBM・DF-41 用と見られるサイロを 300 箇所以上建設していることが明らかとなった。DF-41 は 1 基あたり最大 10 発もの核弾頭を搭載しうるように設計された多弾頭 ICBM とされている。米国防省によれば、現在中国が保有・配備しうる核弾頭数は 400 発を超えたと見積もられているが、今後はその製造ペースをさらに加速させ、「2027 年までに最大 700 発」「2030 年までに少なくとも 1000 発」「2035 年までに 1500 発」保有する可能性があると予想されている。現在、新戦略兵器削減条約（新 START）が米ロに課している戦略核弾頭の配備上限が 1550 発であることを踏まえると、中国は 2035 年頃までに、現在の米ロに匹敵する規模の「第三の核大国」となる可能性が高い。

つまり戦略的 HGV がなくとも、ロシアと中国は、ミサイル防衛を突破して、米国本土に対する戦略核攻撃を行う物理的能力をすでに備えているのである。したがって、極超音速兵器を従来の米露・米中関係を根本的に覆す戦略的なゲームチェンジャーと捉えるのは適切ではない。

しかしながら、迎撃が困難な戦略的 HGV は、大量の ICBM による大規模核攻撃を伴わない形で、米国に限定的な核・非核攻撃を仕掛けるといふ、これまでにない段階的エスカレーションの一手段を提供する可能性がある。これは「確証破壊能力」というよりも、「確証突破能力」といふべきものである。もし米国本土が容易に脅かされるような状況になれば、極超音速兵器で武装した現状変更国は、たとえば危機がエスカレートしたとしても「米国の核使用を抑止できる」との自信を強めるようになり、結果的に、地域におけるグレーゾーンや通常戦力の睨み合いの中で、リスクを厭わない行動を取るようになる可能性には注意する必要がある。

(2) 極超音速兵器がもたらす戦術レベルの影響

一方、特定の戦域で戦術的に使用することが想定される短・中距離射程の極超音速兵器は、ロシアや中国、北朝鮮の軍事ドクトリンに柔軟性を与え、日本や NATO のような地域の同盟国・パートナー国、同地域に展開する米軍の前方展開戦力にとって、重大な軍事的脅威となる。

飛翔速度の速いミサイルは、防御側が警戒態勢に入ってから実際に迎撃を行うまでのリアクション・タイムを短くしてしまう効果がある。例えば、ロシアが保有する亜音速の巡航ミサイル・カリブルをフィンランド湾から発射した場合、南に約 1900km 離れたブルガリアの首都ソフィアに到達するまでに 2 時間を要する。だが、マッハ 10 で飛翔する空中発射型極超音速ミサイル・Kh-47M2 キンジャーール (ALBM) を同様の地点から発射した場合には、たった 11 分でソフィアを攻撃できてしまう（この同心円状には、ロンドンやパリも含まれる）。言い換えれば、戦域レベルで用いられるマッハ 10 の極超音速兵器はその発射地点が約 1900km 先であっても、約 160km 地点から発射された亜音速の巡航ミサイルを警戒・探知するのと同じような軍事的影響をもたらすことになるのである。

また、HGV や HCM の戦術的効果を最大限に発揮するためには、飛翔速度の異なるミサイルを多方向から同時に着弾させる態勢をとるのが理想的である。例えば、亜音速で飛翔する中国の YJ-83（巡航ミサイル）が 160km 先の目標に到達するタイミングと、マッハ 15 の DF-17（HGV）が約 2400km 先の目標に着弾するタイミングはいずれもおよそ 9 分弱である。この点、中国は既に弾道ミサイルと巡航ミサイルを同時に使用する演習を実施していることには留意すべきであろう。中国が HGV を含めた複数の飛翔体を組み合わせた戦術を高度化させていくと、那覇、築城、新田原といった航空自衛隊の主要基地（格納庫や滑走路）に加えて、嘉手納、普天間、佐世保などの在日米軍基地（弾薬庫・燃料貯蔵庫を含む）、更には周辺に展開する米軍艦艇に対して、殆ど警戒対処の時間を与えずに攻撃を加えることが可能になってくる。

このことは極超音速兵器を実際に使用するかどうかはさておき、その使用可能性をちらつかせることによって、米国に介入の隙を与えずに防御側の抵抗意思を挫くという形で、現状変更国のエスカレーション優位を強化する可能性がある。

7. 本の文脈におけるリスク分析（同盟国の極超音速兵器がもたらす影響）

日本に与える脅威の蓋然性の高い懸念国である中国、北朝鮮は、既に極超音速兵器の有無に関わらず、中国はすでに日本のミサイル防衛能力を飽和しうるだけの、従来型の弾道ミサイルや巡航ミサイルを多数保有している（その上、それらのミサイルの多くには核弾頭を搭載が可能である）。これはこれらの国々が極超音速兵器の本格的な実戦配備に移行するか否かにかかわらず、日本がミサイル防空戦において、既に圧倒的な劣位にあることを意味する。

日本政府は、2027年を目処に今後防衛費を倍増していく方針であるものの、中国や北朝鮮のリスクに同時対処することや、防御側に対して攻撃側の技術優位がますます高くなっていることを踏まえれば、同盟国である米国の情勢を踏まえても、各国が国防に費やすことのできるリソースは直面している挑戦に対して十分な水準に達するということはない。この観点からも、日本は相対的なコストの高い防御能力を追求するだけでなく、反撃能力を組み合わせることによって、相手に対して高いコストを賦課していく防衛態勢を構築していく必要がある。この点、2022年12月に発表された国家安全保障戦略、国家防衛戦略、防衛力整備計画の中で、いわゆるスタンドオフ防衛能力の具体的手段として、複数の長距離打撃能力の取得が決定されたことは前向きな一歩と言えよう。

しかしながら、リソースの制約が続く状況を考慮すれば、日本はこれらのスタンドオフ防衛能力の中でも、より低コストで、相手に高い負荷を強いるオプションを米国と協力しながら、優先的に開発、配備していく必要がある。ここで重要なのは、二国間の戦略バランスにとって重要となるのは、極超音速兵器同士の開発・配備状況の比較ではなく、A国の攻撃能力に対するB国の防御能力との比較である。中国、ロシア、北朝鮮には、米国とその同盟国が有する先進的な広域ミサイル防衛システムを突破するために、極超音速兵器を開発する強い動機がある。しかし、日米が脅威対象とする中国、ロシア、北朝鮮などは、こうした防御システムを保有していない。そのため、既存の弾道ミサイルであっても、当面十分な戦略上・運用上の目的は達成可能である。

こうした観点から、短期間で中国や北朝鮮に対してコストを賦課するには、技術的難易度の高いHGVなどよりも、ブースターの共用化などを通じて通常弾頭型の中距離弾道ミサイルを先行して再開発の方が費用対効果が高い。この点、防衛装備庁が研究開発を行っている島嶼防衛用高速滑空弾のブロック化は適切である。

一方で、島嶼防衛用高速滑空弾の能力向上型（射程延伸型/ブロック 2）の配備時期は 2030 年ごろになると予想される。一刻も早く中国とのストライク・ギャップを埋めるという観点からすれば、中距離ミサイルの国内配備開始時期は早ければ早いほどよい。この点、米国が開発している LRHW は、2023 年秋には既に初期の部隊編成が完了する見込みであり、米国が開発している地上発射型中距離ミサイルの中では実用化までのタイムラインが最も早いシステムとなりつつある。したがって、日本は独自の技術開発や外国製装備品の取得によって、スタンドオフ防衛能力を獲得するだけでなく、米国の中距離ミサイルの日本配備を受け入れることにより、中国及び北朝鮮に対する抑止力・損害限定能力のギャップを埋めることを検討すべきである。

第 15 節 量子情報技術 (Quantum Information Technologies)

1. 子コンピューティング、量子計算 (Quantum Computing)

量子情報技術は、情報セキュリティおよび計算資源の観点から国力に直結する先端技術であり、米中をはじめ世界各国がその技術獲得に取り組んでいる分野である。

現在、全ての量子コンピュータの計算能力は様々なノイズによって引き起こされるエラーによって制限されており、実用的な素因数分解に必要な水準とは大きな隔りがある。このようなデバイスは、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer、ノイズを持った中規模量子コンピュータ) と呼称される。

そのため、量子超越性実証に続くマイルストーンとして、NISQ を用いた実用的な量子化学計算や量子機械学習の実現、NISQ の対義語である FTQC (Fault Tolerant Quantum Computation、エラー訂正可能な大規模量子コンピュータ) の実現などが目指されている。

なお、現時点で実環境でのプロトタイプ段階にあるのは、重ね合わせの原理などの量子効果に着想を得て最適化計算を行う「量子アニーラ」、その計算方法にインスパイアされた「デジタルアニーラ」などと呼ばれる古典コンピュータを用いた技術である。この技術を用いた無料／商用のクラウド型計算サービスが、「疑似量子計算機」や量子アニーリングマシンの呼称で提供されはじめているが、これらはゲート型量子コンピュータ (NISQ、FTQC) で利用される複雑な量子アルゴリズムを運用できない。

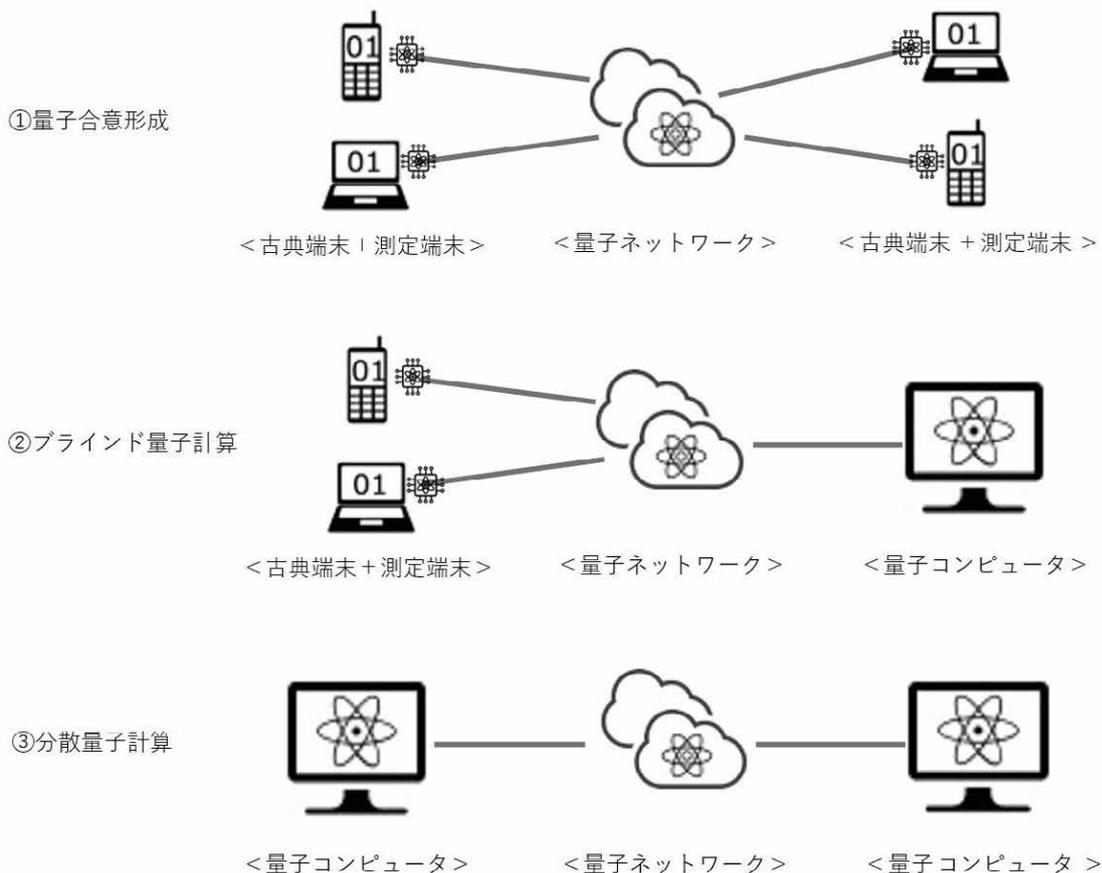
実用的な量子コンピューティングのためには、量子プロセッシング・ユニット (QPU) や量子メモリの開発も不可欠である。なお、後述のように QKD に関する量子衛星の打ち上げが進んでいるが、一方で宇宙放射線耐性を有する量子プロセッシング・ユニット (QPU) や量子メモリの研究開発も今後進められていく可能性がある。欧州宇宙機関 (European Space Agency、ESA) は、宇宙放射線に対して耐性を有する量子メモリを開発するプロジェクトを進めている。このプロジェクトでは、量子ドットなどの系を使用して、宇宙放射線に耐性を持つ量子メモリを開発している。

ただし、量子コンピュータによる計算とネットワーク化を、宇宙空間を通じて行う場合、宇宙線 (Cosmic ray) の命中による QPU の状態破壊は不可避と考えられている。これは、素因数分解などの長時間必要な計算をしている間に、地球上の運用であってもほぼ確実に発生するイベントである。日本電信電話株式会社 (NTT)、九州大学、東京大学、科学技術振興機構 (JST) が共同で、バーストエラーに耐性のある量子コンピュータのアーキテクチャを世界で初めて提案するように、量子コンピュータのアルゴリズム側で宇宙線による情報喪失に耐える (バーストエラーに耐性のある) 設計を行う必要がある。しかし、宇宙メンテナンスの必要性や大量の宇宙線の存在といった問題から、宇宙空間で運用可能な QPU や量子メモリの開発は困難であると見られている。

2. 量子インターネット (Quantum Networking, Quantum Internet)

量子ビット数が飽和することにより、分散型量子コンピュータの必要性が出てくる。そこで必要となるのが、量子コンピュータ同士を接続するネットワーク構築である。これは量子コンピュータと文字通り「量子通信」を行うためのインフラで、古典インターネットと区別して「量子インターネット」(Quantum Networking, Quantum Internet) と呼ばれている。量子インターネットは、安全な通信や、従来のインターネットでは実装不可能なアプリケーションを実現することが期待される。

量子インターネットでは、①測定端末を介して量子ネットワークに接続可能な多数の古典端末間での「量子合意形成」、②古典端末から測定端末（量子情報の読み出し機能を有する比較的簡易な量子デバイス）を介して量子ネットワークに接続することで量子コンピュータのホストに計算内容・結果を隠蔽できる「ブラインド量子計算」、③量子端末～量子ネットワーク～量子端末で行われる「分散量子計算」などのアプリケーション運用が想定される（図 15-1 参照）。

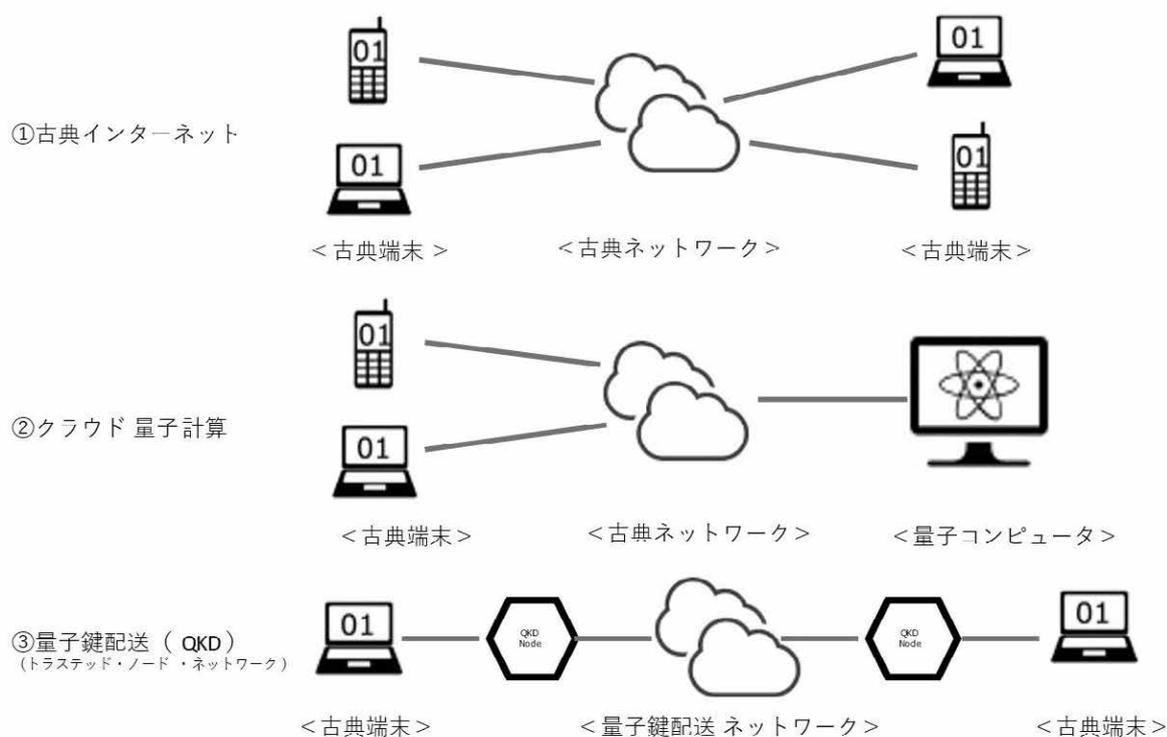


(図 15-1 量子インターネットのアプリケーション例)

(出典) 筆者作成

各国の研究は進展しており、通信距離や品質・帯域に制限はあるがある程度実用的な量子通信が可能な NISQI (Noisy Intermediate-Scale Quantum Internet、ノイズを持った中規模量子インターネット) が近未来に登場することが期待される。

なお、量子インターネットは、現在運用されている古典インターネットや量子鍵配送 (Quantum Key Distribution、QKD) のためのトラステッド・ノード (Trusted Node) ネットワークと異なり、“量子情報”を伝送するネットワークであり、“量子状態に書き込まれたデジタル情報”を伝送するトラステッド・ノード・ネットワークでは実装が不可能な機能である。そのため、①デジタル情報を伝送する古典インターネットや、②古典インターネットを介して NISQ を利用する現代のクラウド量子計算、③トラステッド・ノード・ネットワークの QKD プロトコルは、前述した量子情報を利用する量子インターネット・アプリケーションと量子インターネットは本質的に異なると言える。(図 15-2 参照)。



(図 15-2 古典インターネットとクラウド量子計算と量子鍵配送 (QKD) ネットワーク)

(出典) 筆者作成

加えて、将来の高性能な量子インターネットでは、AI などの大規模計算や人体の情報などの量子ビッグデータ化と量子ニューラルネットワークなどの量子機械学習を進めることが可能となるだろう。量子ニューラルネットワーク (Quantum Neural Network, QNN) などの量子機械学習は、量子コンピュータを使用した機械学習のアプローチである。量子ニューラルネットワークは、伝統的なニューラルネットワークと同様にデータを学習して予測を行うが、さまざまな量子効果により現在のパソコン・ス

パソコンを用いた学習よりも高精度な判断能力の獲得が期待される。そのため、量子機械学習は、複雑な物理シミュレーションや、医療イメージ解析、金融リスク評価など伝統的な機械学習には対応しきれないタスクに適している可能性がある。また、量子機械学習に期待される高精度な予測・判断能力は、政府や軍においても、戦略的な計画やシミュレーションに利用することができる可能性がある。

民間での利用用途には、安全なビジネスコミュニケーション、量子コンピューティングなどがある。たとえば、量子インターネットを使用することで、ビデオストリーミングや重要なデータ転送などを安全に利用することが可能となる。つまり、量子インターネットを使用することで、銀行や商業施設がネットワークセキュリティを強化しながら金融・創薬などの秘匿性の高い入出力が想定される量子計算の、外部に設置された量子コンピュータでの運用にも適していると見られる。

政府や軍での利用用途には、国家の情報セキュリティ、軍事情報、あるいは対外的な情報戦略において有効な手段となり得る。たとえば、量子インターネットを使用することで、国家間や地域間で安全な通信を行うことができるため、国家間の情報共有や軍事計画などに利用することが可能となる。また、量子インターネットを使用した遠隔地との科学研究など、安全な環境下でのオンライン科学研究等にも活用することが可能となる。

3. 量子暗号 (Quantum Cryptography) 、ポスト量子暗号 (Post-quantum Cryptography)

(1) 量子暗号 (Quantum Cryptography)

古典コンピュータ同士の通信においては、量子ビットを用いて秘密鍵を配送する量子鍵配送 (QKD) 技術による量子暗号システムの開発が進められている。ただし、この QKD によって転送される情報は量子ビットに書き込まれた古典ビットである点には留意が必要である。

この分野に関しては、中国が世界に先駆けて 2016 年に量子通信衛星「墨子」号の打ち上げに成功、また北京と上海、浙江を繋ぐ「京滬幹線」(National quantum secure communication backbone network) が 2017 年に完成して以降、その距離やカバー範囲を拡大している。中国はこうした QKD にかかるネットワークインフラを中央および地方政府が整備することで層の厚い産業チェーンを構築している。さらに、QKD ネットワークを用いたオンライン会議システムやデータサーバー、オンライン・ビッグデータ・プラットフォームなど、さまざまなアプリケーションも登場している。

こうした QKD 技術による量子暗号システムは各国でも既に商用段階へ到達しており、中国のほか、欧米や日本などで運用が行われている。量子衛星についても、中国のほか、日本やシンガポールが打ち上げに成功、英国も 2024 年に打ち上げを予定している。日本は QKD の速度や標準化の面で一定の強みがあるものの、上述のとおり中国が規模で先行している分野である。また、QKD ネットワークはどこまで延伸しても QKD しかできないことが欠点でもある。

一方、米国は 2020 年の後半から QKD に着手するも、実質的にはそれを飛び越える形で量子インターネットの研究を進めている。米防衛科学委員会 (Defense Science Board) も、QKD について米軍が任務遂行に使用し得るだけの十分な安全性を達成していないと評価している。これは、米軍が QKD によって自らのセキュリティが向上しないと考えたためであると思われる。QKD ネットワークは、上述のようにトラステッド・ノードと呼ばれる中継ノード間でそれぞれ共有秘密鍵を作成し、量子鍵配送を行う。しかし、その中継ノードが敵に置き換わっていた場合、QKD ネットワークは崩壊し、中身の古典情報を抜き取られる可能性がある。一方、量子インターネットの場合は、情報自体が量子情報であるため、こうした心配がなくなるものと見られる。

(2) ポスト量子暗号 (Post-quantum Cryptography)

一方、ポスト量子暗号 (Post-quantum Cryptography, PQC) が十分に安全であれば、QKD は不要となる。技術進展の加速や何らかのブレークスルーにより、PQC の出番は早まる可能性がある。少なくとも、量子コンピュータ技術の進展によって FTQC が登場すれば、現在の RSA 暗号が解読可能になる。5,000 論理量子ビットあれば、素因数分解が可能となるため、理論的に 2,048 ビットの RSA 暗号を破ることが可能になる。つまり、そのような FTQC が登場してから対策を練るのではなく、解読できないままアーカイブされた現在の通信記録が、そう遠くない将来に解読される危険性を想定した上で準備を進めるべき時代になっている。RSA 暗号の鍵を伸ばすと暗号化・復号化の運用コストが解読時間の増加より大きいペースで増大するため、FTQC 対策としての利得は少ない。そのため、PQC は量子コンピュータによる、今日の秘匿データを含めた暗号解読に対抗する技術として注目を集めている。

2022 年 7 月、米商務省の国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) が 4 つの「PQC アルゴリズム」を発表するなど、PQC についても研究開発が進められている。ただし、デジタルアニーラと同じく、PQC は量子技術を全く使っていないことには注意が必要である。PQC は古典技術であるため、アルゴリズムによって鍵を伸ばせば、解読時間は大きく増大するが、RSA 暗号と同様に暗号化・復号化のためのコストが重くなることは避けられないだろう。また、将来的に効率的な解読が可能な古典・量子アルゴリズムが発見される可能性も否定できない。

(3) 量子センサ、量子測位 (Quantum Sensing)

量子センサ、量子測位のための計測・センシング技術は、ダイヤモンド窒素-空孔中心 (Nitrogen-Vacancy : NV 中心) の量子状態を利用したダイヤモンド量子センサや、物質波の干渉縞を利用した原子干渉計、光波よりも波長や速度が小さい原子波を利用した原子干渉計、冷却量子を用いて重力ポテンシャルを計測する光格子時計等に分類される。

現在、これらの技術について、それぞれ国内外で研究が進められており、とりわけ光格子時計は衛星システムなど様々な技術の基盤となるものとして実証実験が進められている。また、重力加速度計や量子ジャイロは量子慣性センサとしてGPSを用いない航法技術として注目を集める。他方、もつれ光子や磁気センサなどを利用することによって物質の量子状態を計測する量子レーダーは、まだ着想段階にあり技術的には成熟していない。

一方、超長基線電波干渉計（VLBI）は、地球上の電波受信施設を組み合わせ（複数の受信機を分散させ、遠距離から受信した電波を組み合わせることで）、超長距離の量子インターネット接続を行うことで、非常に高解像度な観測を可能にする測地学的手法である。

VLBIは、時間基線干渉計の一種で、天体間の相対距離を測定するために使用されることが一般的で、宇宙論学や天文学において重要な役割を担っている。一般的な使用用途としては、天体の形成や進化を研究するために使用される。VLBIを使用することで、星や星団などの様子を非常に高解像度で観測することが可能となる。

特に、遠くの銀河や銀河系の様子を観測するために使用される。たとえば、銀河中心やブラックホールなどの離れた天体を高解像度で観測することで、それらの天体の性質や構造を明らかにすることが可能となる。また、地球外惑星や星雲などの遠隔天体に関する研究にも利用される。VLBIはまた、宇宙環境を研究するために使用される。たとえば、宇宙中でのプラズマの動きや、銀河間ガスの分布を観測するために使用される。VLBIはまた、地球上の測地学的観測においても重要な役割を担う。たとえば、地球の自転や温暖化などの地球環境に関する研究に利用され、また、地球上の地形や地質構造などを詳細に解析するためにも活用される。

これらの精度を飛躍的に向上させ、宇宙空間に量子もつれを持つことが可能となるVLBIを備えた望遠鏡を多数並べる時代がくるかもしれない。いずれにしても、関連技術の調査とユースケースの開拓は重要であるが、そうした量子センサのデータ処理を行うためには量子インターネット・量子コンピュータが必要である。

た、自動運転の車が大量に走っていて、どう避けるなどの合意形成を行う際に、古典コンピュータだと衝突までに合意形成が終わらない場合があるが、量子インターネットであれば、ビザンチン合意問題⁴⁸⁵の量子解がわずか数ラウンドの情報交換で結論が出せると想定される。そのため、自動運転車の衝突回避といった瞬時の判断が求められる場面で、量子センサと量子コンピュータを組み合わせることで問題を解決し、効率化が図られることも期待される。

⁴⁸⁵ ビザンチン合意問題とは、総合に通信し合うネットワーク上に管理者が存在せず、ネットワーク参加者に悪意を持った個人が紛れ込んでいたりコンピューターの故障があった場合に、全体で正しい合意されない状態になるという問題。東ローマ帝国（ビザンチン帝国）の将軍らの合意形成方法からなぞらえた。

(4) 量子マテリアル (Materials, Isotopes, and Fabrication techniques for quantum devices)

量子デバイスは、さまざまな材料 (Materials)、同位体 (Isotopes)、および製造技術 (Fabrication techniques) を使用して製造される。シリコンは原子の精度で調整できるため、量子デバイスに一般的に使用される材料であるが、特に濃縮シリコンはデバイスの性能を向上させる。2D 層状材料のようなよりエネルギー効率の高い材料も、次世代情報処理やストレージ、量子デバイス等の製造に使用される。レーザービーム後処理は、半導体ナノ粒子に使用される最も一般的な製造技術の 1 つである。一方、原子精度先進製造 (Atomic-Precision Advanced Manufacturing, APAM) は、3D 原子精度でシリコン・ナノエレクトロニクスを調整するための唯一の既知のルートである。

こうした量子マテリアルは、より精度が高くエネルギー効率の高い電子光学技術が求められ、量子インターネットと同様、研究開発の初期段階においては民生利用を想定するよりも、量子デバイス開発、宇宙開発、軍事用途等をはじめとした公的利用の観点から、支援が必要な分野であると考えられる。

第 16 節 再生可能エネルギーの生成と貯蓄 (Renewable Energy Generation and Storage)

2015 年パリ協定で国際社会が気候変動リスクの削減を国際規範として掲げて以降、再生可能エネルギー転換への注目がこれまで以上に高まってきた。特に昨年 2021 年 10 月末から 11 月にかけて英国グラスゴーで開催された「国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議」(通称 COP26)は、パリ協定で掲げられた CO₂ 排出量大幅削減の目標となる 2030 年までの「決定的な 10 年」の最初の会合であり、国際的にも注目を集めたことは記憶に新しい。中国や日米及び欧州を含む主要先進国の多くが COP26 において「より野心的な NDC1」を提出し、主要各国が気候変動リスク低減に向けた国際規範を基軸、新たな抗争を繰り広げている。

こうした気候変動枠組みにおける新しい国際規範の中で、エネルギー産業においても従来の化石燃料から再生可能エネルギーへの転換が進められてきた。こうした国際規範を達成すべく科学技術にも新たなイノベーションが求められている。特に再生可能エネルギーの要となるバッテリー(蓄電池)技術分野においてはこの 10 年で飛躍的な技術革新がもたらされた。こうしたバッテリー技術の開発には民間企業の役割が大きい一方で、そうした研究開発と市場を支える政府の産業政策も必要な役割を担っている。翻って、東アジア域内では水素発電技術の発展が目覚ましい。我が国は水素技術で世界のクリーンエネルギー産業をリードすべく、2017 年に世界初となる「水素基本戦略」を策定、その技術革新に努めてきた。

1. 蓄電池技術動向：その素材とマルチユース

脱化石燃料そしてクリーンエネルギーへの移行が国際規範として掲げられた今日、2030年を一つの重要な節目として、各国でCO2排出量を大幅に削減に向けた取り組みが展開されてきた。そうした中で、リチウムイオンバッテリー等の蓄電技術は、CO2排出量削減に大きく貢献する電気自動車(Electric Vehicle: EV)や風力及び太陽光発電といった再生可能エネルギーの蓄電にコスト削減と効率性を担保する上で重要な技術となる。バッテリーはその効率性とコスト低減そして安全性を要に技術開発が進められてきた。

特にリチウムイオン蓄電池(バッテリー)は、マルチユースの観点からも極めて重要なものである。再生可能エネルギーの蓄電にはもちろん、携帯電話や電気自動車等我々の生活に関わるあらゆるシステムやデバイスに用いられるものであるだけに、その経済的・社会的重要性は極めて大きいと言える。以下の表では主な蓄電池技術について簡単に解説している。

【主要蓄電池一覧⁴⁸⁶】

種類	解説・用途
リチウムイオン蓄電池	正極と負極間をリチウムイオンが移動することで、充放電を行う。主にEVや小型の電機デバイスの充電に最適。リチウムイオン二次電池の発明以降は発電所規模のストレージへの応用も盛んに研究がなされている他、宇宙ステーションへのリチウムイオン電池の利用も進められている ⁴⁸⁷ 。
リチウム空気蓄電池	リチウムイオンバッテリーと比較しても、理論エネルギー密度が圧倒的に高い(~3550 Wh/kg)ことから、軽量性が重視されるドローンやIoT機器への応用が期待される ⁴⁸⁸ 。
コバルト酸リチウム蓄電池	エネルギー密度150~200 Wh/kg程度とそれほど高くはないが、製造が比較的容易であることからラップトップやデジタルカメラ及びスマートフォンといった量産品に用いられる。

⁴⁸⁶ 各蓄電池のイラストは末尾のAppendix Aを参照。

⁴⁸⁷ 従来、宇宙衛星・ステーションの蓄電池はニッケルカドミウム及びニッケル水素電池を利用することが一般的であったが、2000年以降、その多様化する宇宙ミッションに対応するため新たな蓄電池の開発及び応用が研究されてきた。日本国内でもこの20年でリチウムイオン電池の宇宙用電源技術への応用が盛んに議論され、2021年には宇宙航空研究開発機構(JAXA)と日立造船が世界初となる宇宙での全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた実証実験の共同研究契約を締結。実用化に向けた動きが本格化している。詳細は以下を参照。JAXA、「宇宙での全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた実証実験の実施を決定」(2021年2月2日) https://www.jaxa.jp/press/2021/02/20210202-1_j.html

⁴⁸⁸ 国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)・国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)、「リチウム空気電池の実用化を阻む、充電電圧上昇の原因を特定」(2020年8月12日) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200812/pdf/20200812.pdf>

ニッケルマンガンコバルト酸リチウム(Li Ni CoMnO ₂) 蓄電池	ニッケル・マンガン・コバルトを混合した負極がより多様な電力用途への対応を可能にする。EV から産業機器や医療機器に至まで幅広い用途に使用可能。
リチウム硫黄蓄電池	理論上従来のリチウム電池の 5 倍のエネルギーを蓄えられ、かつ環境負荷も少ないことから次世代リチウム電池として期待されている。2021 年 9 月にはオーストラリアモナシュ大学の研究チームが砂糖(Saccharide)を加えることで軽量かつ耐久性に優れた次世代リチウム電池の開発に成功 ⁴⁸⁹ 。EV のみならず航空機や潜水艦等より広範囲な用途が期待される ⁴⁹⁰ 。
レドックスフロー蓄電池	正極負極に循環する電解液に含まれる活物質の酸化還元反応を利用した次世代蓄電池。電解液にはバナジウム等が使用される。電解液が劣化しないため半永久的に使用可能であり、充放電サイクル数も無制限。常温運転が可能かつ不燃・難燃材料でできており、火災の可能性も極めて低い。その耐久性と安全性から電力系統用蓄電池として最適。国内では住友電工が研究開発に着手してきた ⁴⁹¹ 。
液系リチウムイオン蓄電池	従来の全固体蓄電池に対する次世代蓄電池として注目を浴びている。電気自動車(EV)への利用が期待されているが、エネルギー密度が限られていることもあり、より高いエネルギー密度を実現できる技術革新に期待が集まっている ⁴⁹² 。我が国で 2030 年を目標に経産省主導で研究開発支援が開始。
ニッケル水素蓄電池	自然放電の低さと -28~+54℃と幅広い温度環境での耐久性が特徴。宇宙衛星や潜水艦に搭載する電池として利用されてきた。一方で、40~75 Wh/k 体積エネルギー密度が低いことが欠点。

蓄電池技術の質を大きく左右するものとして、その素材が極めて重要な要素となる。例えば、「先端エンジニアリング素材」の章でも言及される耐熱素材 Mxenes は、実はリチウムイオンバッテリーの電極の素材としても利用されている(図 16-1)。これは Mxenes の 2 面構造が、充電と放電とを可能にさ

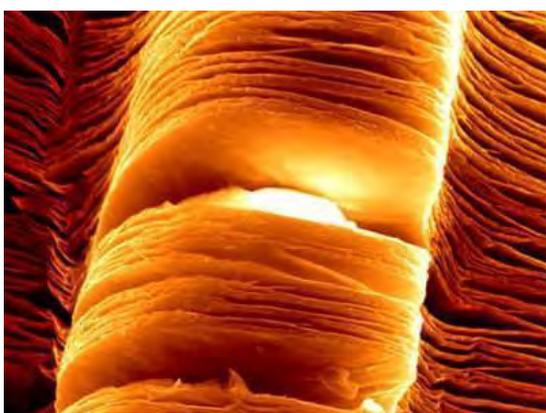
⁴⁸⁹ Huang, Yingyi, Mahdokht Shaibani, Tanesh D. Gamot, Mingchao Wang, Petar Jovanović, Dilusha Cooray, Meysam Sharifzadeh Mirshekarloo et al. "A saccharide-based binder for efficient polysulfide regulations in Li-S batteries." *Nature communications* 12, no. 1 (2021): 1-15.

⁴⁹⁰ Monash University, "A spoonful of sugar opens a path to longer lasting lithium sulfur batteries." (September 10 2021). Retrieved from <https://www.monash.edu/news/articles/a-spoonful-of-sugar-opens-a-path-to-longer-lasting-lithium-sulfur-batteries>

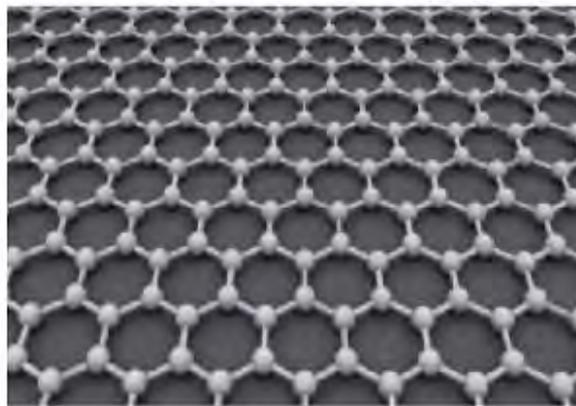
⁴⁹¹ 住友電工(株)「レドックスフロー電池」<https://sumitomoelectric.com/jp/products/redox>

⁴⁹² 石黒恭生「次世代電池:ノーベル賞受賞液系リチウムイオン電池を将来へ繋ぐ全固体電池開発」『学術の動向』(2020年2月)https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/25/2/25_2_26/pdf/-char/ja

せるという機能を利用したものであり、2面の炭素原子の結晶シート構造のグラフェン(Graphene)(図16-2)や酸化グラフェンといった素材も同様の性質から電極に利用がされている⁴⁹³。こうした電極の素材研究は世界各国で進められているものの、往々にして中国がリチウムイオンバッテリーのサプライチェーンを独占している⁴⁹⁴。こうした背景から欧米では、より安価でどこにでもあるナトリウムや硫黄を用いて電極に用いようという動きも見られる。こうした研究に関しては、英国のインペリアルカレッジロンドンが先駆的である。



(図 16-1 MXenes のイメージ⁴⁹⁵)



(図 16-2 グラフェンの構造)

自然エネルギーから電力を獲得する環境発電(Energy Harvesting)についてもマルチユースの観点から言及しておく必要があるだろう。ここでは、中でも特に近年注目されている「圧電ナノ発電機」(Piezoelectric Nanogenerators: PENG)と「摩擦帯電ナノ発電機」Triboelectric Nanogeneratorsである。圧電ナノ発電機(PENG)は、主に高周波数(60-100 Hz)でより効果的に機能する一方で、摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、4Hz以下の低い周波数でよりよく機能する。摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、主に海上の運動エネルギーを利用したいわゆる”blue Energy”等に適している。例えば米国航空宇宙局(NASA)は摩擦帯電ナノ発電機による風力発電を火星探索に用いているほか、ドローンの通信とセンサーのための発電等にも用いられている。圧電ナノ発電機(PENG)は近い将来全ての通ワイヤレス信電子

⁴⁹³ Ali, Asad, Fengxing Liang, Jinliang Zhu, and Pei Kang Shen, "The role of graphene in rechargeable lithium batteries: Synthesis, functionalisation, and perspectives," *Nano Materials Science*, August 26, 2022. As of February 1, 2023:

⁴⁹⁴ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, CC BY 4.0, May, 20

⁴⁹⁵ <https://www.nanowerk.com/mxene.php>

機器の電力供給に用いられることが検討されているが、摩擦帯電ナノ発電機(TENG)同様に商業化にもまだまだ長い道のりを有する⁴⁹⁶。

圧電ナノ発電機(PENG)は、当初酸化亜鉛のナノワイヤーをその主な素材として研究がなされてきたが、最近ではより多様な素材を用いた検証が行われるようになってきている⁴⁹⁷。摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、二つ以上の素材を利用することから、PENGの素材よりもよりバリエーションが多い。しかし、摩擦帯電ナノ発電機で陽極と陰極との間の電子親和力(Electron Affinity)の差異が重要な機能を発揮するため、それぞれで異なる性質を持つ素材が用いられる。主に陰極には複合ポリマーが用いられるが、陽極の方はより鉄やバイオメタル、アルミニウム・銅・ナイロンといった多様な素材が用いられる。

2. 米国バッテリー技術と政策

ここまで近年開発が進められてきた蓄電池技術の中でも特に経済安全保障上重要な技術について概観してきた。ここからは蓄電池開発を取り巻く各国の政策に着目し、その動向を分析するとともに今後の展望を示したい。特に米国及び中国の研究開発動向を比較した上で、我が国の現状にも言及し、今後日本の蓄電池開発についてその位置づけを明確にする。

(1) バイデン政権下におけるエネルギー・レジリエンス

バイデン政権は伝統的な「需要牽引型」(demand-pull)と「供給プッシュ型」(supply-push)のアプローチを採用し、先端バッテリー技術の開発を進めてきた。需要側のプルファクターとしては電気自動車(EV)のさらなる普及と発電所規模のエネルギーストレージ実装を掲げ、一方の供給側ではバッテリー技術のR&D分野への公共投資の増大を目指す。バイデン政権が目指すのは、バッテリー製造に必

⁴⁹⁶ Meyyappan, Meyya & Kang, Jin Ho, “Triboelectric nano generator (TENG) for mars exploration and high altitude power generation on Earth.” NASA.

<https://flightopportunities.ndc.nasa.gov/media/technology/225/222-summary-chart.pdf>

⁴⁹⁷ Mahapatra, Brahmadutta, Krishna K. Patel, Vidya, and Piyush K. Patel, “A review on recent advancement in materials for piezoelectric/triboelectric nanogenerators,” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, No. 11, August, 2021, pp. 5523-5529.

要な重要素材の中国依存からの脱却と国内の電力供給レジリエンスの強化であり、それを可能にする革新的バッテリー技術への投資を加速させている⁴⁹⁸。

エネルギー省(Department of Energy: DoE)は、エネルギー分野のイノベーションハブの一つである Critical materials Institute への公共投資を通じて、EVに用いられるリチウムイオンはバッテリーの海外産コバルトとニッケルへの依存脱却を試みている。海外産の希少金属素材の依存を低減し、国内で十分な埋蔵量が期待されているリチウムを用いたバッテリーをより効率的かつ低コストに運用すべく、次世代リチウムイオン電池やリチウムメタル電池の研究開発支援が進められてきた⁴⁹⁹。特にエネルギー省は Advanced Technology Vehicle Management Loan Program(ATVM)⁵⁰⁰の枠組みで、2017年に北米日産に14.5億ドルを貸付けることで米国に先端バッテリー製造工場誘致をすることに成功している。米国政府は国内のエネジグリのレジリエンスを強固なものにすべく、官民そして学との連携強化に努めてきた。

(2) リチウムイオン蓄電池

米国国内の電力供給を確保すべく、より強力で効率的な次世代バッテリー技術の開発が進められてきた。リチウムイオン蓄電池(Li-ion batteries)は電力送電網機能の幅広い分野で適合性を有したバッテリーであり、特に次世代リチウムイオン蓄電池はグリッドシステムへの応用が期待されている。コスト面でも現状は他の発電オプションよりもコストが高くつくものの、再生可能エネルギーへの移行に伴いそのコストも低減していくことが見込まれている。McKinsey & Company の調査によると、2030年にはリチウムイオン蓄電池の再生可能エネルギー移行に伴うコストは2017年の半分以下になり、他の再生可能エネルギーの発電オプションよりも低コストで発電が可能になることが予想されている(図16-3)。

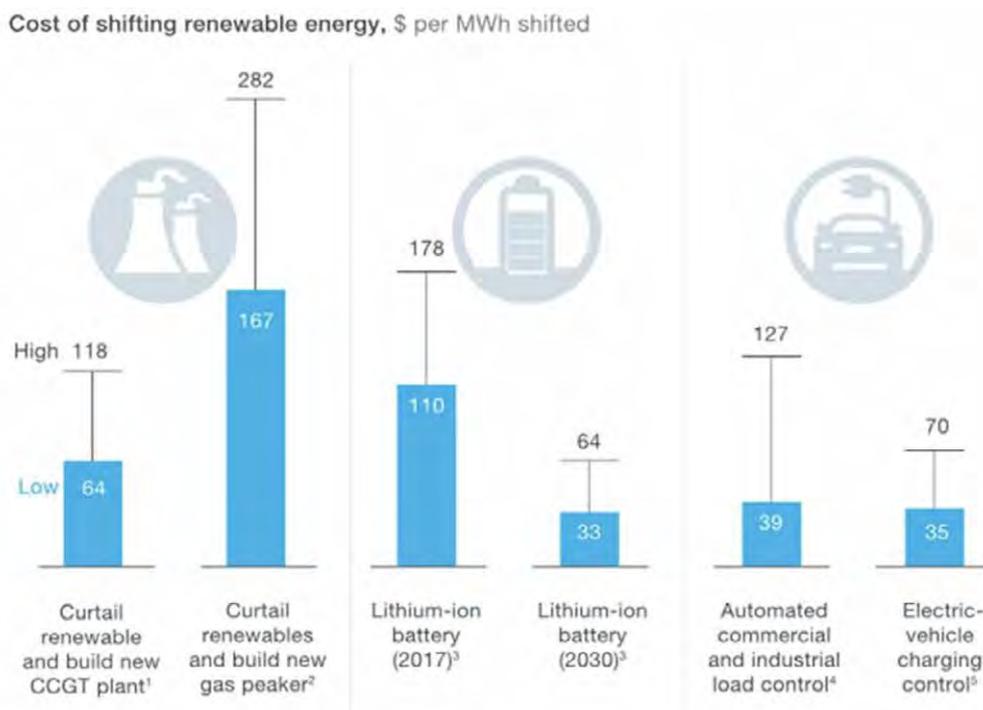
米国エネルギー省は、リチウムイオンに加えてソジウム、フロー電池、鉛蓄電池(Lead-acid batteries)及び亜鉛ベースの電池等が電力グリッドの有力な候補として検討している。それぞれのバッテリーの放電時間と電力は図16-4の通り。リチウムイオン(青ドット)は短い放電時間(0.25-1時間)

⁴⁹⁸ Tsafos, Nikos, & Carey Lachlan, "The United States' industrial strategy for the battery supply chain." CSIS Commentary (Centre for Strategic and International Studies: December 14, 2021). Retrieved from <https://www.csis.org/analysis/united-states-industrial-strategy-battery-supply-chain>

⁴⁹⁹ White House, Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing, and fostering broad-based growth. (Washington DC: the White House, June 2021). Retrieved from <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf>

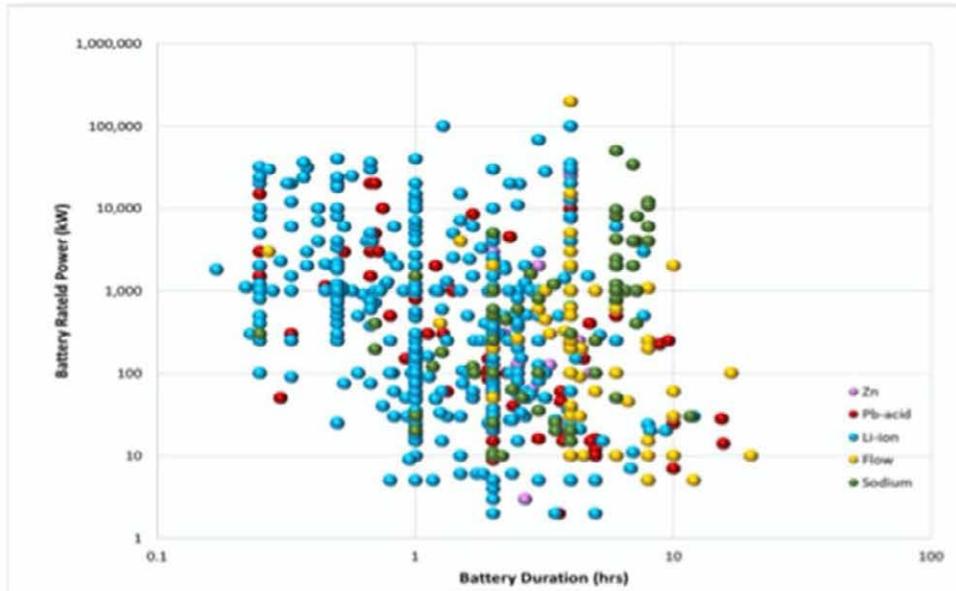
⁵⁰⁰ <https://www.energy.gov/lpo/products-services/advanced-technology-vehicles-manufacturing-loan-program>

の場合に比較的広い範囲の電力を保持することができる、近年ではリチウム硫黄電池やソジウム硫黄電池、フロー電池等が開発され、より多くの電力を長時間に渡って放電できるようになった。既存のバッテリー技術である程度の放電時間と電力を確保できるものの、さらなる技術革新の目標としてより長い放電時間かつ膨大な電力を貯蓄できるバッテリー技術今後の先端科学技術研究の領域として認識されている(図 16-5 黄色部分)。近年の米国の先端バッテリー技術開発は、そうした発電所規模のグリッドに対応できる技術を中心に展開されている。

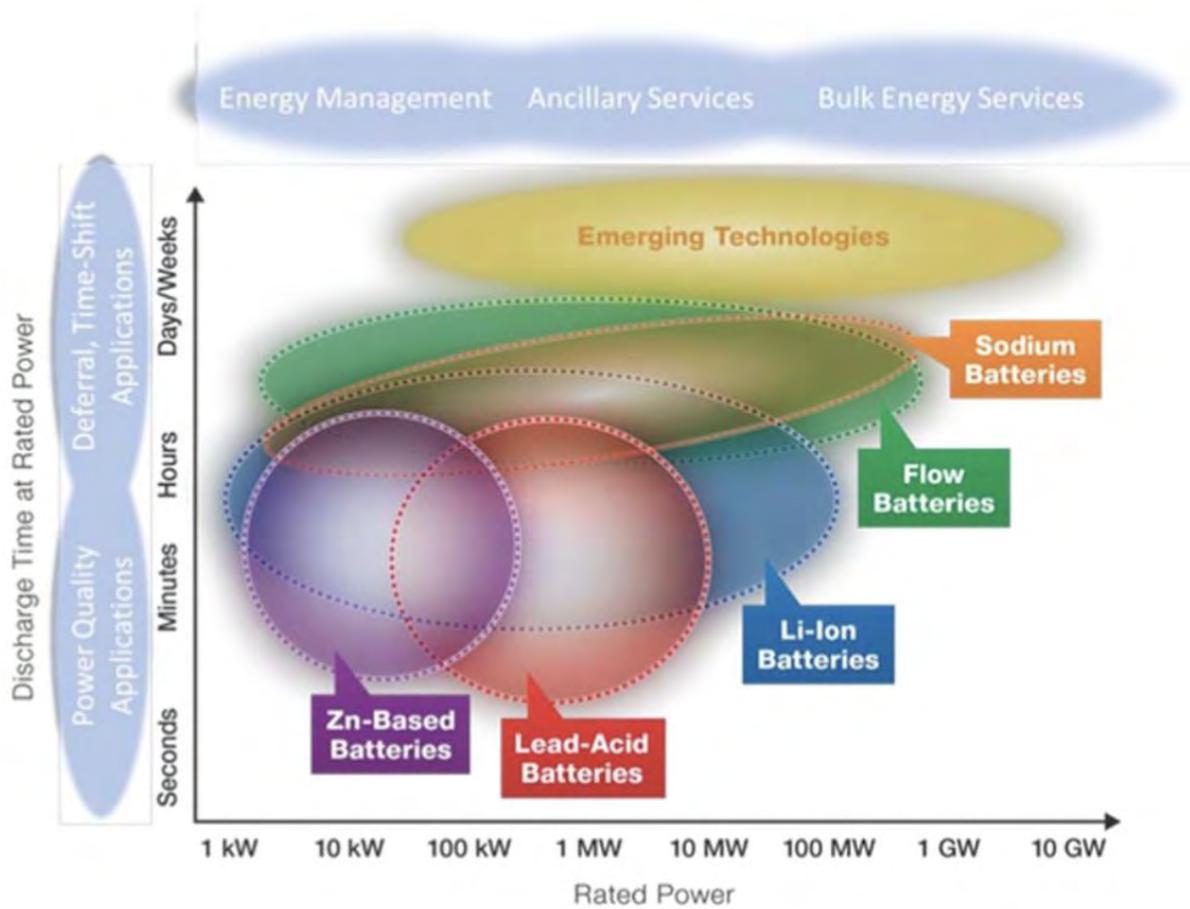


(図 16-3 再生可能エネルギー移行のコスト⁵⁰¹)

⁵⁰¹ McKinsey & Company, “Less carbon means more flexibility: Recognizing the rise of new resources in the electricity mix” (October 1, 2018). Retrieved from <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/less-carbon-means-more-flexibility-recognizing-the-rise-of-new-resources-in-the-electricity-mix>



(図 16-4 素材別放電時間と電力の比較⁵⁰²)



⁵⁰² Department of Energy, *Potential benefits of high-power, high-capacity batteries*. (Washington DC: DoE, January 2020), p. 27.

(図 16-5 放電時間と充電電力毎のバッテリー技術の比較⁵⁰³)

(3) 次世代バッテリー技術開発に向けた体制構築

次世代のバッテリー技術の開発に向けて、米国政府はエネルギー省を中心に官民そして学との連携を強化し、バッテリーの技術の革新及びグリッドのレジリエンス強化に向けた体制を近年急速に構築している。以下は、その中でも特に主要なパートナーシップの枠組みである。

Li-Bridge

米国政府は、またエネルギー分野の官民パートナーシップ構築にも積極的である。エネルギー省はEV 開発や国内のエネルギー・ストレージの拡充に向けて、リチウムバッテリーの国内バリューチェーンの拡大を図っており、近年 Li-Bridge⁵⁰⁴という官民連携のパートナーシップの枠組みを構築した。Li-Bridge は米国内のリチウムイオン蓄電池のサプライチェーン のレジリエンスをより強固なものにする ために、官民そして大学の鍵となるステークホルダをまとめあげ、新たな官民連携の枠組みを提供するものである⁵⁰⁵。

Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB)

エネルギー省は、関連省庁である国防省 (Department of Defense) や商務省 (Department of Commerce) と連携しながら、エネルギー政策立案の要を担ってきた。特にリチウムバッテリー分野において、この 3 つの連邦政府機関は Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB) を組織し、国内のリチウムバッテリーの供給のための強固な体制を構築している⁵⁰⁶。同組織はバッテリー技術の応用や社会実装における技術の標準化にも大きな役割を果たしており、Pre-application Battery Test Manual を発行し、バッテリー技術のアプリケーションのプロトコルの策定を行っている⁵⁰⁷。FCAB

⁵⁰³ 同上, p. 31.

⁵⁰⁴ <https://www.anl.gov/li-bridge>

⁵⁰⁵ Burmahl, Beth, “Bridging the lithium battery supply chain gap – a new alliance in the U.S.” (Argonne National Laboratory: October 27, 2021). Retrieved from <https://www.anl.gov/article/bridging-the-lithium-battery-supply-chain-gap-a-new-alliance-in-the-us>

⁵⁰⁶ Department of Energy, Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB). Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/vehicles/federal-consortium-advanced-batteries-fcab>

⁵⁰⁷ Federal Consortium for Advanced Batteries, Pre-application Battery Test Manual (August 2021). Retrieved from <https://cet.inl.gov/ArticleDocuments/FCABManualRev1Final.pdf>

が掲げるバッテリー開発のロードマップには、2030 年までに同盟国とともにより安全なバッテリー素材と技術のサプライチェーンを構築することが明記されている⁵⁰⁸。

Battery500 Consortium

こうした中で、エネルギー・グリッドのより強固なレジリエンス構築に向けたバッテリー技術の開発がエネルギー分野における米国の科学技術開発の要となってきた。リチウムイオン蓄電池は多様な要件を満たす現状で最良のバッテリー技術であるが、米国の科学者たちはこのリチウムイオン電池のさらなる発展に研究リソースを投じており、次世代リチウムイオン電池の開発が進んで来る。2017 年に設立された「Battery500 Consortium」はそうした次世代リチウムイオン電池の開発に向けた官学のコンソーシアムである。国立研究所とスタンフォード大学をはじめとする大学の研究機関を統合する枠組みであり、先端リチウムイオン電池技術の倍以上の 500Wh/kg のエネルギー密度を達成すべく、Battery “500” と名付けられた⁵⁰⁹。同コンソーシアムには、2019 年に日本の吉野彰教授とともにリチウムイオン二次電池の開発でノーベル科学賞を受賞したスタンリー・ウィットティング教授とジョン・グッドイナフ教授が参画しており、電極素材や電解液の開発をはじめ革新的な電極構造の研究が進められている。以上のように、経済安全保障上のサプライチェーン リスクを低減する目的でバイデン政権は、エネルギー省を旗振り役として民間主導の次世代バッテリー技術の開発に積極的に関与してきた。

⁵⁰⁸ 尚、米国の最新のバッテリー技術のロードマップについては、エネルギー省発行の National Blueprint for Lithium batteries 2021-2030 を参照。 https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf

⁵⁰⁹ Pacific Northwest National Laboratory, “Battery500 Consortium.” Retrieved from <https://www.pnnl.gov/projects/battery500-consortium>

National Labs



Universities



(図 16-6 Battery500 Consortium の参画組織⁵¹⁰)

3. 中国のバッテリー技術と政策

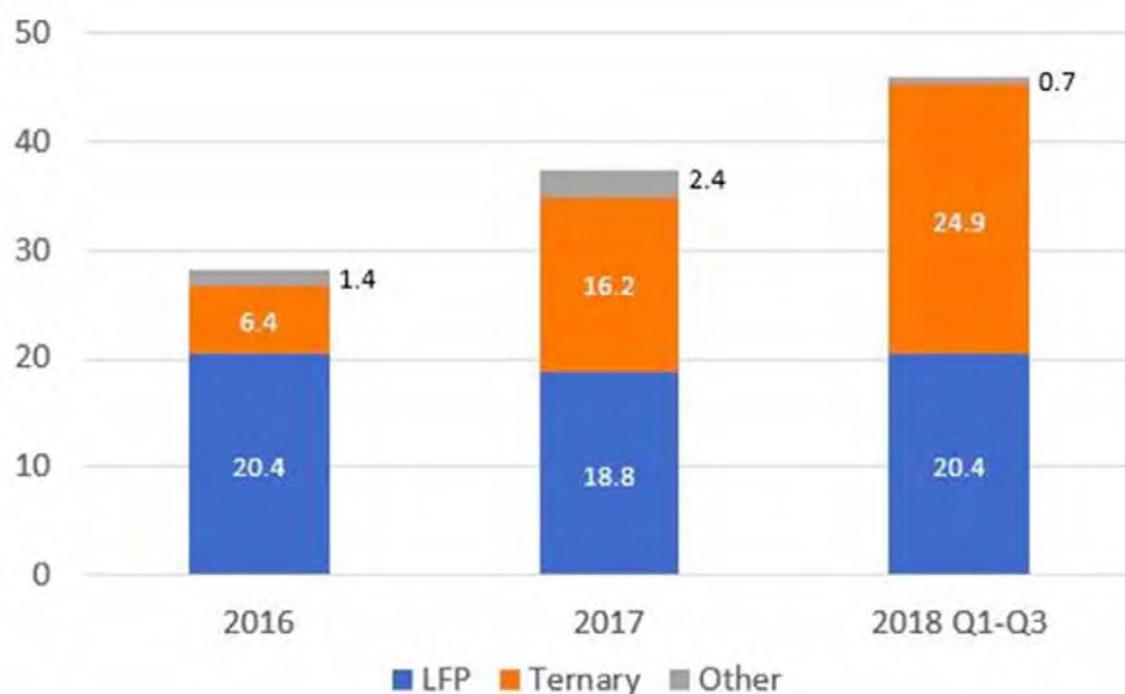
(1) 中国のエネルギー技術政策

中国のエネルギー技術はここ数年で目覚ましい進歩を遂げてきた。2021 年から 2025 年を対象とした「中華人民共和国国民経済及び社会発展 第 14 次五カ年計画及び 2035 年遠景目標綱要⁵¹¹」(以下、第 14 次五カ年計画)では、電気自動車(EV)といった次世代エネルギー自動車のバッテリーの安全性と

⁵¹⁰ Department of Energy, “Battery500: Progress Update” (May 19 2020). Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/articles/battery500-progress-update>

⁵¹¹ 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要。英訳は Centre for Security and Emerging Technology (CSET), Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 (May 12 2021) を参照。

効率性のさらなる強化に加えて、再生可能エネルギーの活用や革新的なエネルギー・ストレージ技術の展開等が掲げられて、クリーンエネルギー移行に伴うバッテリー技術の重要性が中国でも益々増していることがわかる。特に風力や太陽光発電、そしてEVの製造においては、欧米を凌ぐ勢いでその技術改良と進歩が進んでいる。例えば、2018年の段階で、風力タービンの製造の1/3は中国が担っており、2019年には、世界の太陽光電池（Photovoltaics: PV）生産のおよそ70%が同国で製造されている。特に、EV向けのリチウムイオン電池の技術革新は目覚ましい。中国政府は、従来のリン酸リチウムイオン電池からニッケル・コバルト・マンガンを用いたよりエネルギー密度の高い三元系リチウムイオン電池への移行を進めてきた。その移行傾向はここ数年の傾向を見ても極めて顕著である（図16-7）。このように、中国では国内のEVバリューチェーンを支えるために、バッテリー技術の内製化が行われている。こうして、リチウムイオン電池セル(Cell)の3/4近くが中国で製造されるにまで至り、来るべきグリーンエネルギー時代の世界の工場としての地位を確実に固めつつある⁵¹²。



(図16-7 中国における主要素材別バッテリーの利用推移 2016-2018⁵¹³)

⁵¹² Ladislav, Sarah & Tsafos, Nikos, “Beijing is winning the clean energy race.” *Foreign Policy*. (October 2, 2020).

⁵¹³ Li, Jason, “Chinese NEV policies drive transition toward more advanced batteries.” CSIS Blog Post (CSIS: January 16, 2019). Retrieved from <https://www.csis.org/blogs/trustee-china-hand/chinese-nev-policies-drive-transition-toward-more-advanced-batteries>

(2) 民間企業による研究開発

中国の産業政策は、共産党一党独裁というその政治制度構造上、一般的には中央集権的と言われている。しかしながら、EV 産業に目を向けると、政府からの補助金はあるにせよ民間企業の活躍にも注目する必要がある。例えば、リチウムイオン蓄電池の製造で世界 3 位の比亞迪(BYD)は、資源リスクを避ける目的でニッケルやコバルトではなく、地球に豊富に存在するリチウム、イオン、そしてリン酸を用いたリン酸リチウムイオン電池をその黎明期に製造し、安定供給に成功した⁵¹⁴。EV 電池を専門に製造する寧徳時代新能源科技(Contemporary Amperex Technology: CATL)は、世界初 EV 用のソジウムイオン電池の開発に成功し、2023 年までにサプライチェーンの構築を目指している⁵¹⁵。

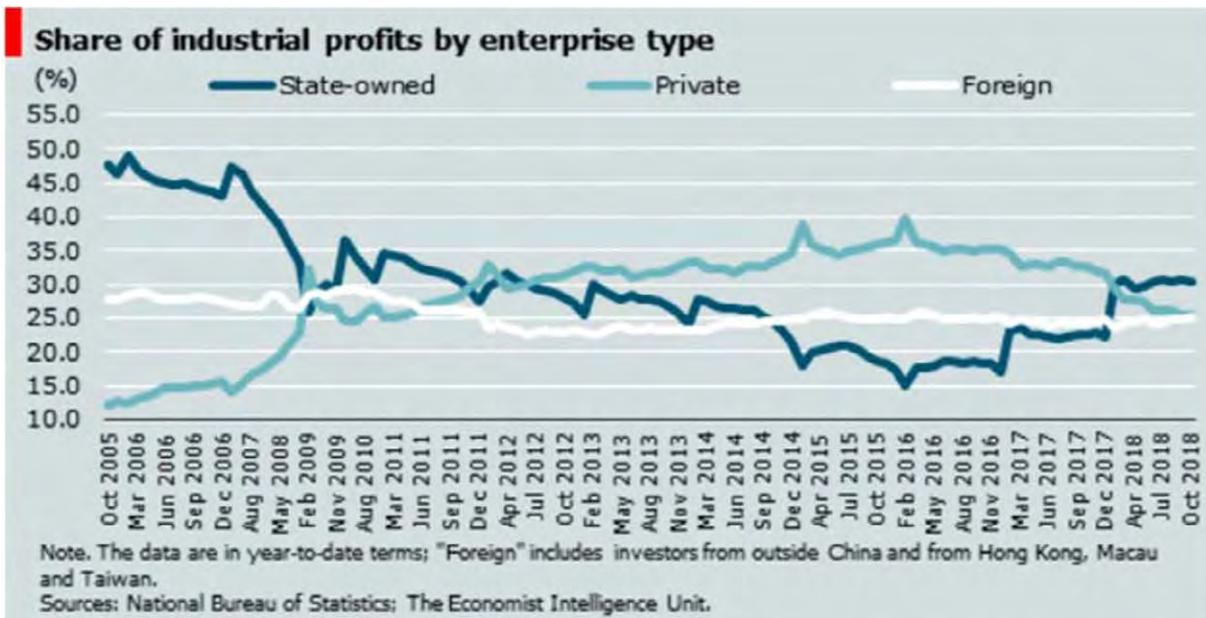
中国は 2000 年以降、国有企業(State-owned Enterprises: SOE)の民営化に積極的に乗り出しており、先端科学技術分野でも BYD や CATL のような民間企業の活躍が目立つようになってきた。実際に、中国の 国有企業と民間企業との産業利益を比較すると 2010 年代を通じて民間企業の利益が国有の企業のそれを上回る傾向にあることがわかる(図 16-8)。経済学者らによる最新の実証研究でも、中国において民間企業の方が国有企業に比べて実に 53%高い生産性を示すことが明らかにされた⁵¹⁶。しかしながら、習近平政権下では、こうした民営化改革に限りが見えてきたこともまた事実である。実際にこれまで中国政府が主導してきた国営企業の民営化は、民間企業とのジョイントベンチャー設立や他の巨大国営会社への買収といったやり方でなされており、本質的に市場の民営化がなされたわけではない⁵¹⁷。特にエネルギーや通信産業といった中核産業では依然として国有企業の利権は大きい。したがって、中国の先端科学技術開発及び関連する産業政策の分析でも、政府主導ないし民間主導という観点についてはセクター毎により注意深い分析が必要となる。

⁵¹⁴ Sanderson, Henry, "Battery technology gives China an opening in electric vehicles. Financial Times." (October 7, 2021). Retrieved from <https://www.ft.com/content/fcbc860b-51cd-40d8-b65f-db97ce9adc57>

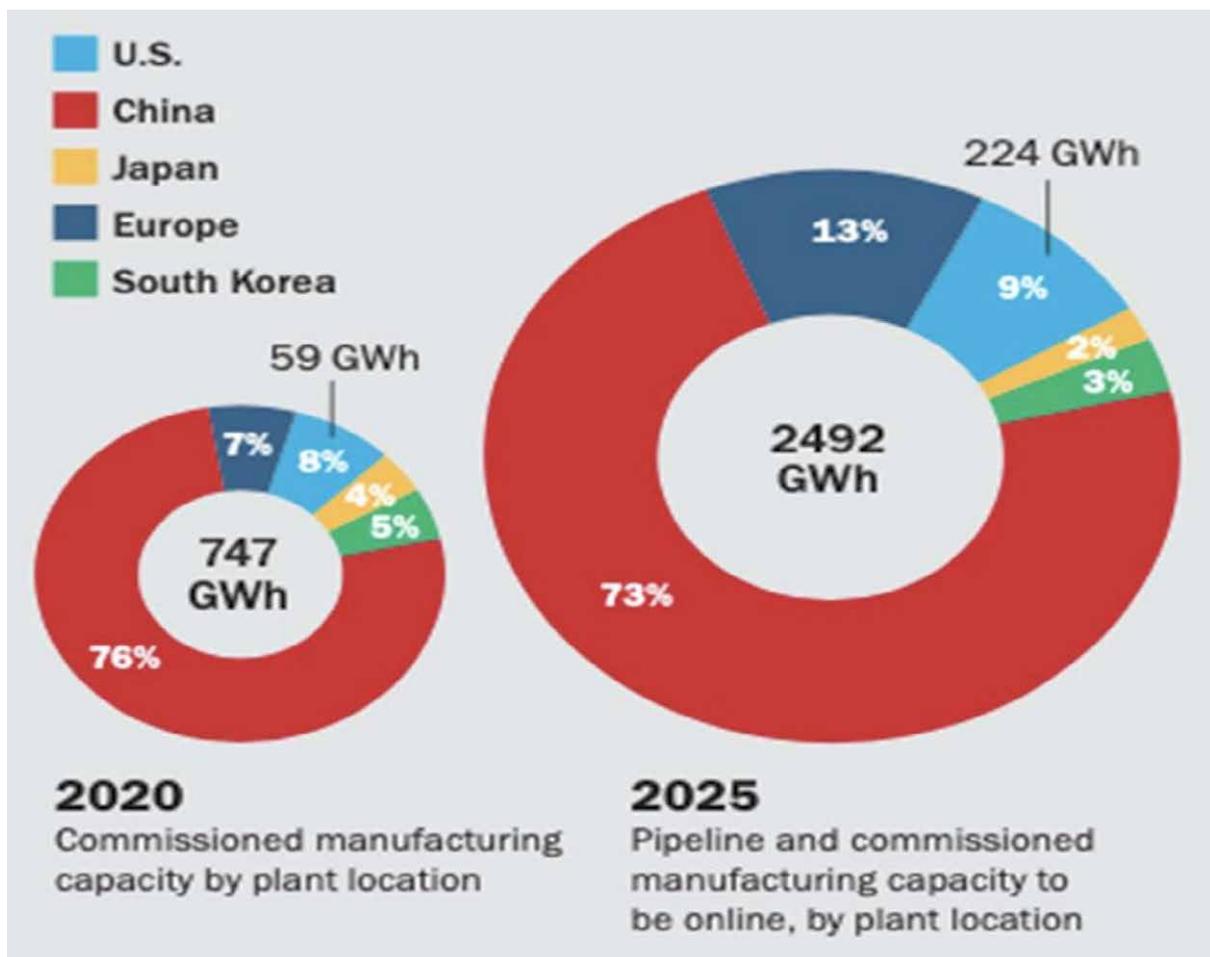
⁵¹⁵ Reuters, "China's CATL unveils sodium-ion battery - a first for a major car battery maker" (July 29, 2021). Retrieved from <https://www.reuters.com/technology/china-top-ev-battery-maker-catl-touts-new-sodium-ion-batteries-2021-07-29/>

⁵¹⁶ Chen, Yuyu, Mitsuru Igami, Masayuki Sawada, and Mo Xiao. "Privatization and productivity in China." *The RAND Journal of Economics* 52, no. 4 (2021): 884-916.

⁵¹⁷ Lardy, Nicholas R. *The state strikes back: The end of economic reform in China?* (Peterson Institute for International Economics, 2019).



(图 16-8 中国国有企業と民間企業の産業利益の比較⁵¹⁸)

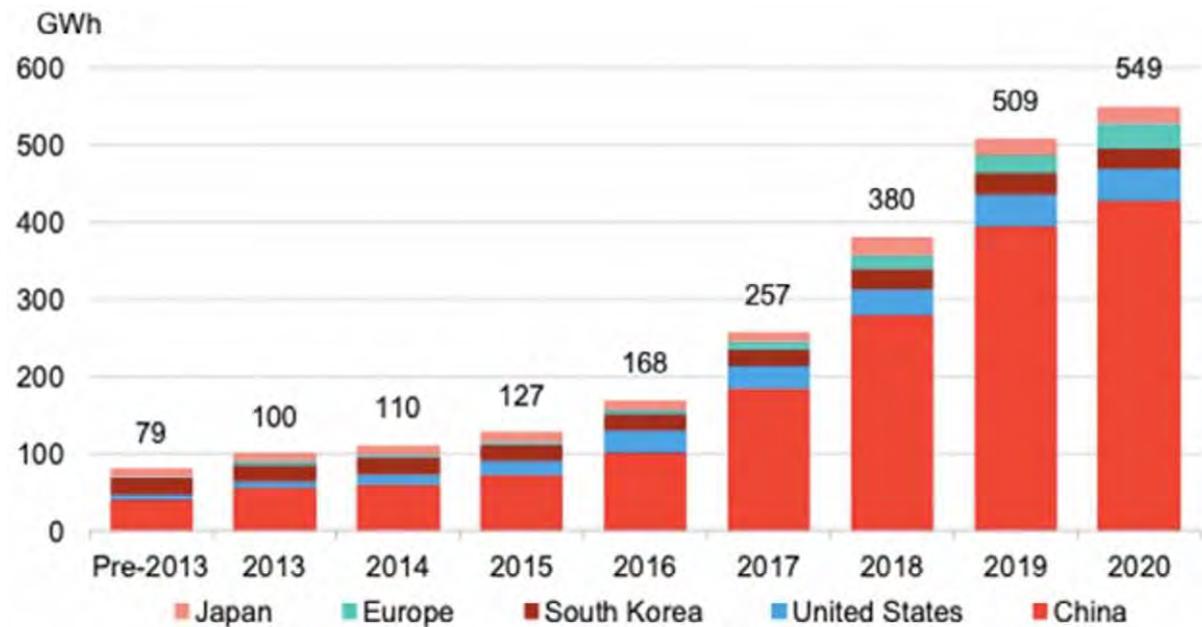


⁵¹⁸ Guluzade, Amir, "How reform has made China's state-owned enterprises stronger." World Economic Forum (May 21, 2020). Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2020/05/how-reform-has-made-chinas-state-owned-enterprises-stronger/>

(図 16-9 国別バッテリーセルの製造力割合⁵¹⁹⁾)

Country	Cathodes Manufacturing (3 M tons)	Anode Manufacturing (1.2 M tons)	Electrolyte Solution Manufacturing (339,000 tons)	Separator Manufacturing (1,987 M sq. m)
United States	—	10%	2%	6%
China	42%	65%	65%	43%
Japan	33%	19%	12%	21%
Korea	15%	6%	4%	28%
Rest of World	10%	—	17%	2%

(図 16-10 リチウムイオンバッテリーの国別部品シェア⁵²⁰⁾)



(図 16-11 世界のバッテリー製造能力(累計)⁵²¹⁾)

⁵¹⁹ DoE, National Blueprint for lithium batteries 2021-2030, p. 13.

⁵²⁰ Ibid., p. 19.

⁵²¹ BloombergNEF. Energy storage trade and manufacturing: A deep dive. (February 2021), p. 13. Retrieved from [https://csi-s-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-](https://csi-s-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/Energy%20Storage%20Case%20Study%20-%20BloombergNEF.pdf?KC0qvXIE3LM6AIBS.IyXF9Ln07GtK5oc)

[public/Energy%20Storage%20Case%20Study%20-%20BloombergNEF.pdf?KC0qvXIE3LM6AIBS.IyXF9Ln07GtK5oc](https://csi-s-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/Energy%20Storage%20Case%20Study%20-%20BloombergNEF.pdf?KC0qvXIE3LM6AIBS.IyXF9Ln07GtK5oc)

	Number of factories / sites	Largest manufacturer (Country)	Market concentration (Country)	Market concentration (Company)	Adjacent industries	U.S. reliance on imports*	Barrier to entry	Value
Battery cell	215	China	Med	Med	n/a	High	Med	High
Battery pack	65	China	Low	Low	n/a	Med	Low	Low
Cathode	131	China	Med	Med	Metallurgy	High	Med	High
Anode	81	China	High	Med	Graphite	High	Med	Med
Separator	93	China	Med	High	Membrane materials	Med	High	Med
Electrolyte	64	China	Med	High	F chemicals & petrochemical	Med	Med	Med
Lithium mining	19	Chile	Med	High	Metallurgy	Med	High	High
Lithium refining	14	China	High	Med	Metallurgy; Lithium chemicals	Low	Med	Med
Cobalt mining	22	D.R.C	High	High	Metallurgy	Med	High	High
Cobalt refining	21	China	High	High	Metallurgy; Co chemicals	Med	High	High
Nickel mining	22	Indonesia	Med	Med	Stainless steel	Med	High	Med
Nickel refining	18	Indonesia	Med	Med	Stainless steel	Low	Med	Med

(図 16-12 部品別の生産拠点とその製造キャパシティ⁵²²)

(3) 中国における水素燃料電池の技術政策

米国がリチウムイオン蓄電池の研究開発に邁進する一方で、中国では近年水素燃料電池の開発が急速に進んでいる。「第 14 次五カ年計画」でも戦略的新興産業として水素エネルギーが盛り込まれており、2019 年には中国初となる「中国水素エネルギー・燃料電池産業白書 36」を発表している。同白書では、2050 年までに水素エネルギーは全エネルギー消費の 10%を占め、水素産業チェーン年産額は約 12 兆元に達すると予想されている⁵²³。また、水素燃料電池車販売台数は 2050 年までに 14%に達すると推測されている。一方で、この白書は水素普及を目指すエネルギー企業が中心にまとめたものであり、その予測が楽観的であるという指摘もある。このように、中国の水素エネルギーの研究開発は中央政府が明確な国家戦略を策定していないことがしばしば指摘されている⁵²⁴。

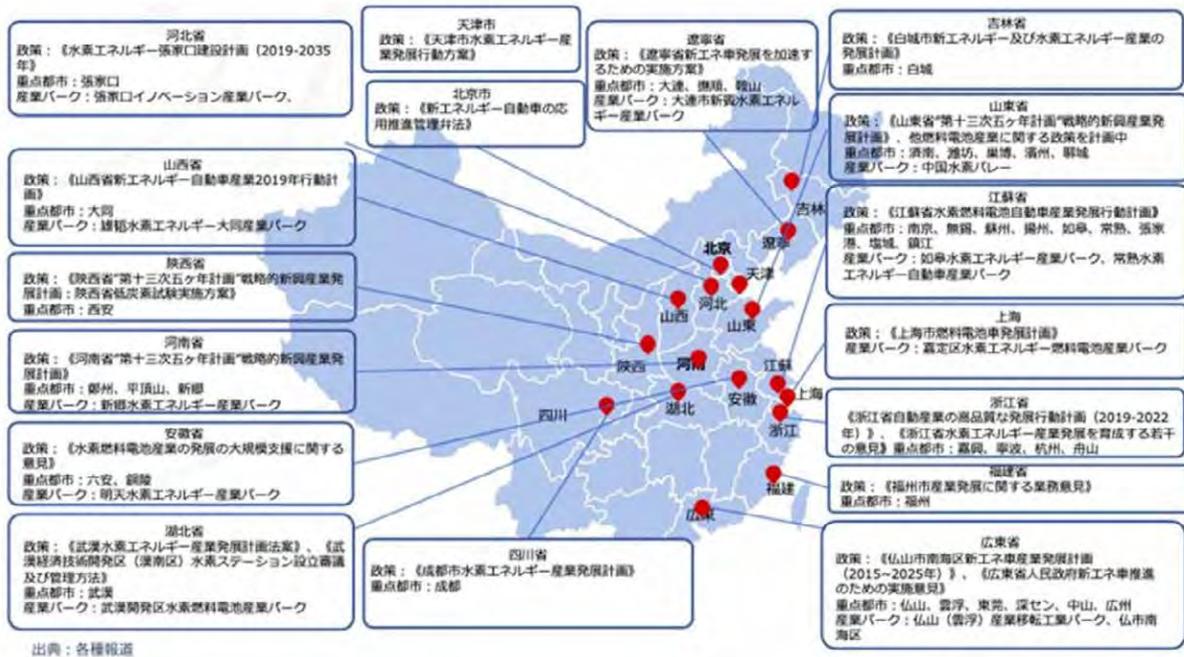
その一方で、地方政府がその産業技術政策で重要な役割を果たしている。例えば、上海市は 2017 年の段階で既に「上海市燃料電池自動車発展計画」を発表しており、広東省の佛山市もこれに続く形

⁵²² 同上, p. 4.

⁵²³ 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) 北京事務所 「中国の水素・燃料電池産業の動向」(2020 年 1 月) <https://www.nedo.go.jp/content/100902859.pdf>

⁵²⁴ Nakano, Jane, “China’s hydrogen industrial strategy.” CSIS Commentary (Centre for Strategic and International Studies: February 3, 2022). Retrieved from <https://www.csis.org/analysis/chinas-hydrogen-industrial-strategy>

で、2018年に「仏山市水素エネルギー産業発展計画(2018~2030年)」を発表。湖北省の武漢市は、中国国内の最先端の水素エネルギー研究開発施設である水素燃料電池産業パークを設立し、100社以上の関連企業のナレッジの集約を目指すとともに、2020年を目処に水素の製造と貯蔵、膜電極、電池スタック等の主要技術分野で国際水準に達することを掲げてきた。このように、中国の水素エネルギー技術開発において、地方政府が主軸となり、関連企業との連携の下に進められていることは注目すべき特徴である(図16-13)。



(図16-13 地方政府の水素燃料電池に係る主な政策⁵²⁵)

4. 日本のバッテリー技術政策動向

(1) 日本のリチウムイオン蓄電池開発

日本は2019年に吉野彰教授がリチウムイオン蓄電池の研究でノーベル化学賞を受賞したことから、バッテリー研究開発の高さが窺える。しかしながら、2010年代に急増したリチウムイオン蓄電池の生産はここ数年急落傾向にある(図16-14)。またその販売金額も輸出が増加を牽引している点も特徴である。特に、海外輸出の半分を米国向けが占めている。リチウムイオン蓄電池の組み立ては東アジアにその拠点が集中していることもあり、日本は米国のバッテリーサプライチェーンの中核を担ってい

⁵²⁵ NEDO 「中国の水素・燃料電池産業の動向」p. 42.

る⁵²⁶。ただし、他国と比較した場合、この5年を見ても車載用そして定置用リチウムイオン蓄電池のシェアは大幅に縮小傾向にあり、高い技術力とは裏腹に、市場の拡大が課題となっている(図 16-15)。

こうした中で日本は、次世代蓄電池の開発にも近年積極的に取り組んできた。例えば、蓄電池のリサイクル関連技術開発の分野では、蓄電池材料として再利用可能な品質でリチウム 70%、ニッケル 95%、コバルト 95%を回収する技術の確立を掲げ、資源リスクと環境負荷の低減を目指している⁵²⁷。EV向けの「革新型蓄電池技術開発」では、2021年度政府予算として新規に23.8億円を計上し、コストと性能の両面でリチウムイオン電池を凌駕する革新型蓄電池の実用化を目指している⁵²⁸。特に、銅、鉄、亜鉛及び炭素等の安価かつ資源リスクの少ない材料を使用し、高エネルギー密度化と安全性の両立を実現可能なフッ化物電池と亜鉛負極電池の開発では日本が世界をリードしている。また従来の全固体型のリチウムイオン蓄電池で高い技術力を誇る一方で、中国や欧州企業の追い上げも顕著である。我が国は、2030年に向けて液系リチウムイオン電池の開発に着手、この10年で液系蓄電池のイノベーションが期待される⁵²⁹。

⁵²⁶ 経済産業省 「社会に貢献するリチウムイオン蓄電池—その国内生産の動向」 https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/mini_kai_setsu/hi_tokoto_kako/20200703hi_tokoto.html

⁵²⁷ 経済産業省 「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」 <https://www.meti.go.jp/press/2021/11/20211111004/20211111004.html>

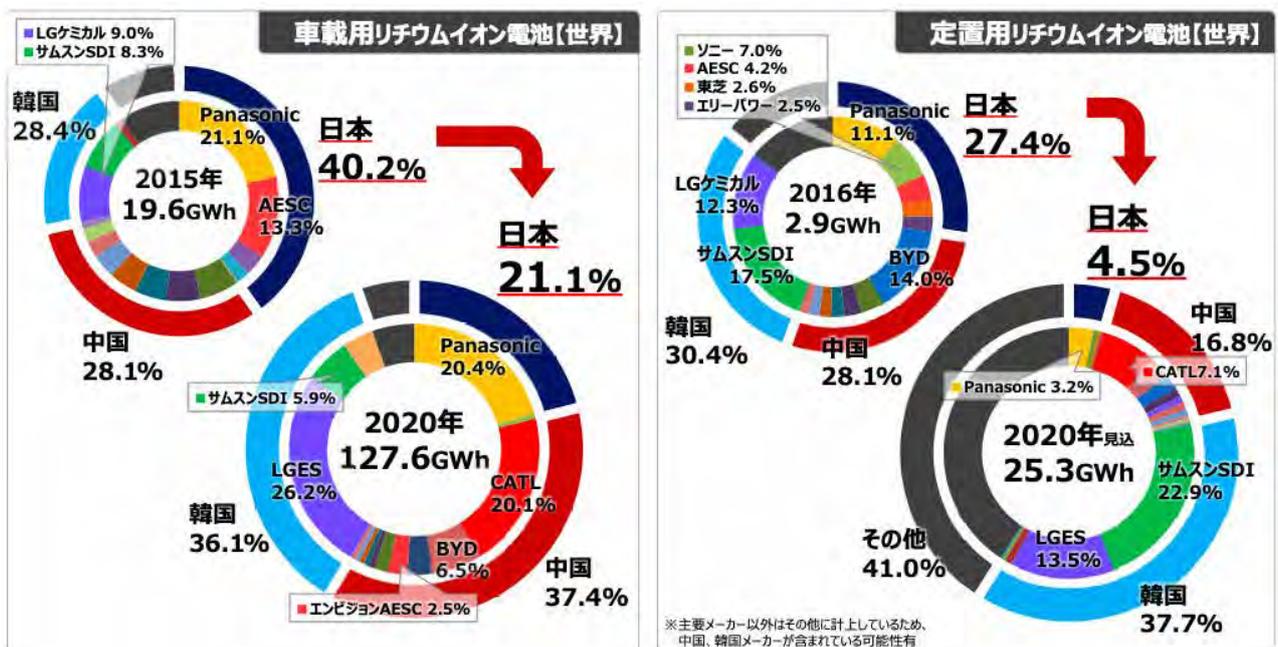
⁵²⁸ 経済産業省 「電気自動車用革新型蓄電池技術開発」 https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2021/pr/en/sangi_taka_16.pdf

⁵²⁹ 経済産業省 「蓄電池産業の現状と課題について」(2021年11月18日) https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/chikudenchi_sustainabilty/pdf/001_s01_00.pdf

(2015年=100,季節調整済)



(図 16-14 リチウムイオン蓄電池の生産推移⁵³⁰)



(図 16-15 リチウムイオン蓄電池 日本の世界シェア⁵³¹)

(2) 日本の水素発電の展望

⁵³⁰ 経済産業省 「社会に貢献するリチウムイオン蓄電池—その国内生産の動向」

⁵³¹ 経済産業省 「蓄電池産業の現状と課題について」

米国が次世代蓄電池の開発により脱炭素を実現しようとする一方で、我が国はより包括的な技術戦略で長期的にモビリティ、発電そしてその他の産業における低炭素化を目指している⁵³²。前述の中国が水素定置燃料電池の開発に着手する中で、韓国や欧州も水素戦略を策定し、新規参入に乗り出している。日本は世界初の水素国家戦略として「水素基本戦略」を2017年の段階で既に策定しており、水素燃料で技術的に世界を牽引することを目指している⁵³³。水素は電力や産業分野等、様々な分野での低炭素化の実現に貢献することが期待される。

定置用バッテリー技術では、水素を用いたより低コストの燃料電池の開発が進められてきた。例えば、水素発電による火力電源の低炭素化等、CO₂排出量削減に向けた取り組みの中で水素が注目を浴びている。また将来的に従来の天然ガスのみならず、水素を燃料とした分散型電源であるプロトン(H⁺)伝導型燃料電池の開発も進められており、基礎研究の段階では発電効率75%の達成が可能であることが実証されている⁵³⁴。

5. 政策提言

(1) 我が国の今後のエネルギー政策の指針

米国と中国との関係性において日本のエネルギー技術の立ち位置を整理してみると、日本を含む東アジアにおいては、国内の電力供給を担う水素発電技術の発展が目覚ましく、一方で、蓄電池技術においては、日本は中国や韓国同様に米国の蓄電池産業の重要なサプライチェーンの一部を担っていると言える(図 16-16)。世界のバッテリーセルの製造メーカーを見ても日本を含む東アジアの企業が有力である(図 16-17)。こうした中で、サプライチェーンにおいては、日米同盟を基軸として米国と強固な連携を継続していくことが求められる。2021年に日米の両首脳は「日米気候パートナーシップ⁵³⁵」を締結済みであり、「クリーンエネルギー技術の開発、普及およびイノベーション」に向けた取り組みを推進していくことに合意している。こうした両国間の枠組みの中で、革新的バッテリー技術の開発とそのサプライチェーンの強靱性の強化に対するさらなるコミットメントが期待される。

⁵³² 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), 「ビリティ/水素分野の技術動向について」(2020年8月21日). https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/002_04_01.pdf

⁵³³ 経済産業省 資源エネルギー庁 「カーボンフリーな水素社会の構築を目指す『水素基本戦略』」(2018年2月13日) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyosuisokihonsenryaku.html>

⁵³⁴ NEDO, 「ビリティ/水素分野の技術動向について」

⁵³⁵ U.S.-Japan Climate Partnership on Ambition, Decarbonization, and Clean Energy. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/04/U.S.-Japan-Climate-Partnership.pdf>

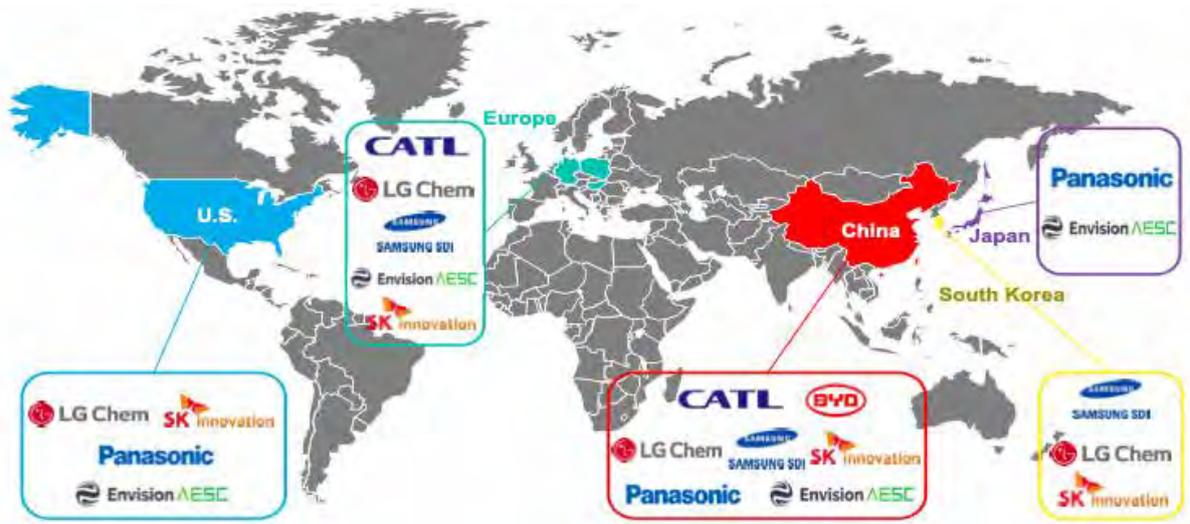
水素発電技術のイノベーションにおいても、技術開発における中国及び韓国とのさらなる連携強化が期待される。日中両国は昨年、「天然ガスに代わるクリーンな燃料技術」の開発で連携をすることに合意しており、水素を二酸化炭素（CO₂）と反応させて都市ガスする技術の開発を対象に官民連携でアジア発の環境技術を育てることを確認した⁵³⁶。民間レベルでも日本の日立造船と中国の榆林化学が実証事業に参画し、両国のクリーン・イノベーションに貢献している。我が国は、世界初「水素基本戦略」を策定した国として、世界の水素技術開発において、強いリーダーシップを発揮しながら、中国や韓国等の近隣諸国との盛んな技術交流の場を設け、水素技術におけるアジア初の技術イノベーションを世界に向けて発信していくことが今後さらに期待されるだろう。



(図 16-16 水素発電とリチウムイオン蓄電池産業における日本の立ち位置、執筆者作成)
技術発展とサプライチェーン)

⁵³⁶ 日本経済新聞「クリーン燃料、日中協力 水素・CO₂ からガス生成」 (2021年12月26日)

<https://www.nikkei.com/article/DGKKZ078790460V21C21A2EA3000/?unlock=1>



(図 16-17 世界7大バッテリーセル製造メーカーとその生産拠点⁵³⁷⁾)

(2) 技術発展とサプライチェーン

再生可能エネルギーに関わる蓄電池技術ではその技術それ自体はもちろん、サプライチェーンの確保がもう一つの大きな課題となる。後者については、中国がバッテリー加工産業の大半を占有していることは他国にとって経済安全保障上の脅威であり、米国をはじめ各国が中国のサプライチェーンに依存しない形でのバッテリーの開発と製造に注力してきた。つまり、蓄電池技術に関しては、単に技術を発展させれば良いのではなく、その技術にはどのような資源が必要なのかということも併せて検討する必要がある。特にニッケルやコバルトといった蓄電池に用いられるレアメタルは、中国を含む特定の国でしか産出されないため、民主主義で我が国に親和的な国と安定したサプライチェーンを確立するという必要もある。

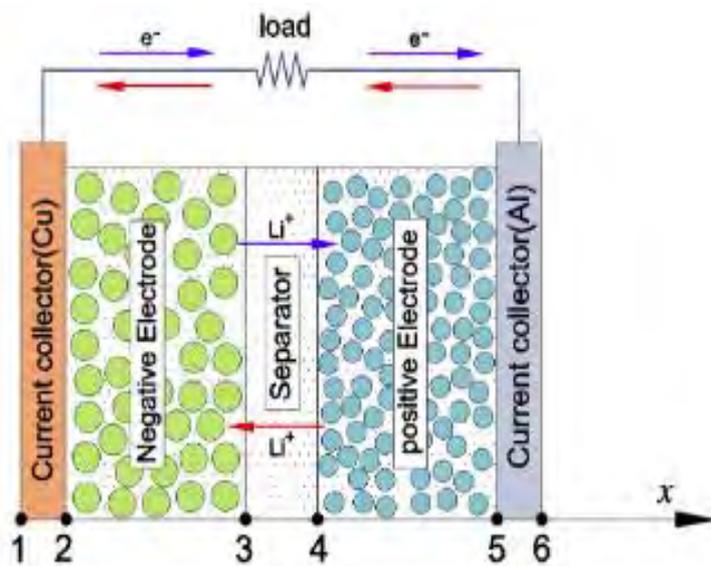
しかし、中国も他国の天然資源獲得に極めて野心的であり、例えば電気自動車等のバッテリーに用いられるニッケル資源はインドネシアがその最大の産出国であるが、その国内産業はほぼ中国が牛耳っているといえる。中国はインドネシア南スラウェシ州に強大なニッケル精製工場群を建設しており、インドネシア政府がニッケルの輸出規制を敷いている間に、インドネシア国内のニッケル精製産業を作り上げつつある。選択と集中で科学技術の発展を目指す一方で、その資源の獲得に関してもより一層にイニシアティブを発揮していくことが求められる。それゆえに、日本の蓄電池技術戦略は再生可能エネルギー資源戦略と足並みを揃えて検討される必要があるだろう。この意味で、先進国との技術協力はもちろん重要であるが、同時にエネルギー資源の産出国となるインドネシアやフィリピン

⁵³⁷ BloombergNEF. *Energy storage trade and manufacturing*, p. 15.

ン、さらにはラテン・アメリカやアフリカ諸国への直接投資や技術協力等も極めて重要な戦略となり得るだろう。

Appendix A: 主要な蓄電池の構造一覧

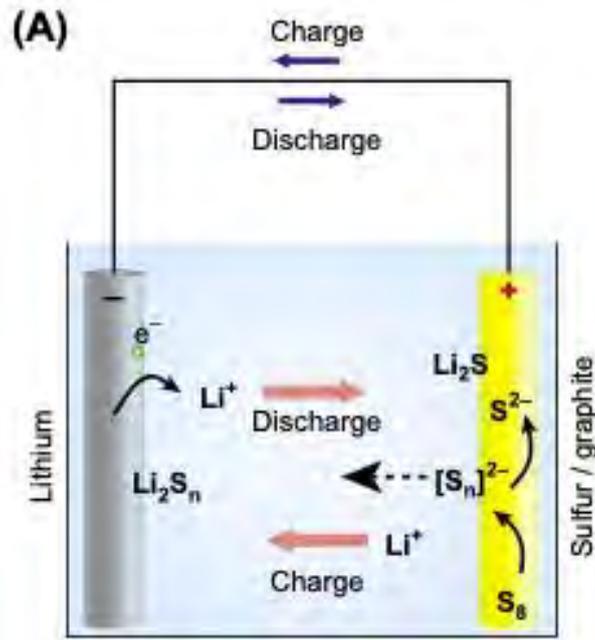
(1) リチウムイオン蓄電池⁵³⁸



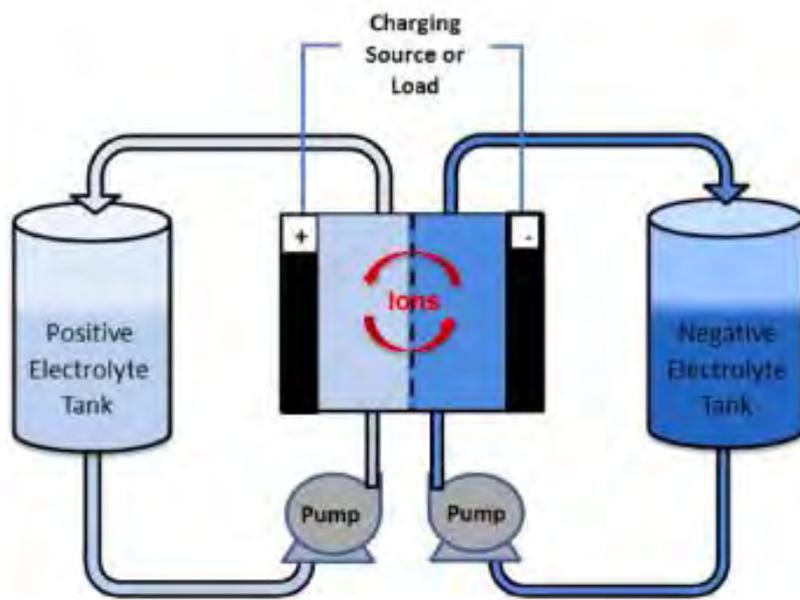
(2) リチウム硫黄電池⁵³⁹

⁵³⁸ Yang, Naixing, Yonghong Fu, Hongya Yue, Jianxiao Zheng, Xuefeng Zhang, Chang Yang, and Juan Wang. “An improved semi-empirical model for thermal analysis of lithium-ion batteries.” *Electrochimica Acta* 311 (2019), p.10.

⁵³⁹ Kurzweil, P., and J. Garche. “Overview of batteries for future automobiles.” Garche, Jurgen, Eckhard Karden, P. Moseley, and David Rand (Eds.), *In Lead-acid batteries for future automobiles* (Amsterdam, oxford and Cambridge: Elsevier, 2017), p. 76.



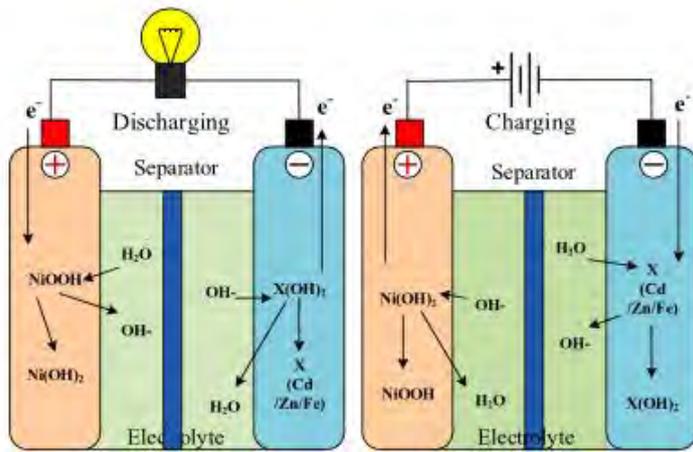
(3) レドックスフロー電池⁵⁴⁰



(4) ニッケル蓄電池⁵⁴¹

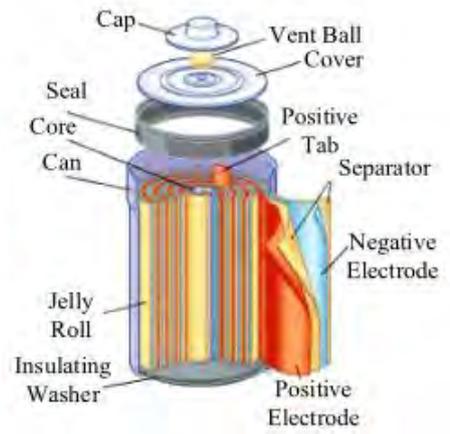
⁵⁴⁰ Bamgopa, Musbadeen, Saif Almheiri, and Hong Sun. "Prospects of recently developed membraneless cell designs for redox flow batteries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017), p. 507.

⁵⁴¹ Hannan, M. A., Md M. Hoque, Azah Mohamed, and Afida Ayob. "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017), p. 776.



(a)

(b)



(c)

		Bidirectional Energy Storage							Other Technologies		
		Batteries				Pumped storage hydropower	Compressed air	Flywheels	Electrochemical capacitors	Thermal storage	Demand response
		Li-ion batteries	Sodium-based batteries	Lead-acid batteries	Flow batteries						
Bulk Energy Services	Electric Energy Time shift (Arbitrage)	●	●	●	●	●	○	○	○	○	
	Electric Supply Capacity	●	○	○	●	●	○	○	○	○	
Ancillary Services	Frequency Regulation	●	●	●	●	●	●	●	○	○	
	Spinning, Non-Spinning, and Supplemental Reserves	●	●	●	●	●	●	●	○	○	
	Voltage Support	●	●	●	●	●	○	○	○	○	
	Black Start	●	●	●	●	●	○	○	○	○	
	Load Following/Ramping Support for Renewables	●	●	●	●	●	○	○	○	○	
	Frequency Response	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
Transmission Infrastructure Applications	Transmission Upgrade Deferral	●	●	●	●	○	○	○	○	○	
	Transmission Congestion Relief	●	●	○	●	○	○	○	○	○	
Distribution Infrastructure Applications	Distribution Upgrade Deferral	○	○	●	○	○	○	○	○	○	
Customer Energy Management Applications	Power Quality	●	○	○	○	○	○	●	●	○	
	Power Reliability	●	●	●	●	○	○	○	○	○	
	Retail Energy Time shift	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Demand Charge Management	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

Key:

- - Technology is highly suitable for the application.
- - Technology may be limited or non-optimized for the application.
- - Technology is not well-suited for the application.

Note: For a more quantitative view of the relationship between storage technologies and grid applications, see the DOE/EPRI Energy Storage Handbook.³⁶

⁵⁴² Department of Energy, *Potential benefits of high-power, high-capacity batteries*, p. 8.

第 17 節 半導体とマイクロエレクトロニクス (Semi conductors and Microelectronics)

半導体の技術開発は、全てのテクノロジー革新の基幹である。とりわけ、資源が限られた日本経済にとって、半導体産業を再燃させることは喫緊の課題である。半導体は、特に米中間においても経済安全保障に直結する重要産業である。近年においては、パンデミックの影響でオンライン化が進んだことや、さらなるグローバル社会の実現に向けて世界的に半導体が不足していることを鑑み、各国で国内量産に向けた技術開発が進められている。中でも、脱炭素化や自動運転、メタバース等の仮想空間の実現のためのセンシング技術の開発にも期待が高まっている⁵⁴³。こうした次世代のテクノロジー産業を可能とするためには、より高性能な 2nm ノード以下の次世代半導体が不可欠であり、そのための研究開発が活発に行われている。

本項においては、2022 年に米国務省が掲げた技術項目リストに基づき、最先端の半導体を開発するための以下 7 項目について、現状の動向や鍵となる事項をまとめる。

- 1) デザイン設計 (EDA)
- 2) 半導体製造装置
- 3) CMOS の次
- 4) 異種統合と先端パッケージング
- 5) AI チップ
- 6) 先端マイクロエレクトロニクスの新材料
- 7) ワイドバンドギャップ・ウルトラワイドバンドギャップ半導体

1. デザイン設計 (EDA)

(1) 技術の概要

1980 年代頃から半導体の集積度が高まるにつれて人手で設計することが難しくなると、コンピューターが自動的に半導体の設計を行うことが主流となった。EDA (electronic design automation) や DA (design automation) は、集積回路やプリント基盤を自動設計することを総称した用語であり、半導体の設計、検証、実装、および試行するための機器を設計することを意味する⁵⁴⁴。

⁵⁴³ 日本経済団体連合会「産業技術立国への再挑戦」2022 年 10 月 11 日。

https://www.keidanren.or.jp/policy/2022/089_honbun.html#s1

⁵⁴⁴ “Electronic Design Automation,” semiconductor engineering, last access on 24.10.2022.

https://semiconductorengineering.com/knowledge_centers/eda-design/definitions/electronic-design-automation/

現在、最先端チップの設計に必要な EDA の世界市場の約 85%は、米国の企業が占めている⁵⁴⁵。特に業界大手 3 社であるシノプシス社、ケイデンス・デザイン・システムズ社、そして（独）シーメンス EDA 社（旧（米）メンター・グラフィックス社）が世界シェアを占める。現状では、この大手 3 社の半導体 EDA 設計ツールなしでは、最先端の 5-7nm のシステム・オン・チップ（System on Chip: SoC）を設計することはできない。さらに、FinFET 量産製品の 90%がシノプシス社の EDA を使用して設計されている（FinFET については CMOS の次技術を参照）⁵⁴⁶。

最新の EDA 技術の開発傾向では、AI 技術を導入してマシン・ラーニング（ML）やディープ・ラーニング（DL）機能を EDA に搭載して効率を高めている。中でも、シノプシス社はいち早く AI 技術を EDA に導入し、2018 年時点で解析ツールである「PrimeTime」を発表している。この解析ツールは、ECO（Engineering Change of Order）に ML 機能を実装することで、解析速度を大幅に向上させたものであり、韓国のサムスン・エレクトロニクス社や台湾の TSMC 社等のデバイス設計に使用されている⁵⁴⁷。さらにシノプシス社は、2020 年 3 月には半導体設計プロセスに自律 AI を搭載した DSO.ai（Design Space Optimization AI）技術を発表し、膨大なデータの中から最適な候補を自律的に探索する AI の推論エンジン機能を用いることで、意思決定を最小化することに成功した⁵⁴⁸。同様に、ケイデンス・デザイン・システムズ社やシーメンス EDA 社でも ML 機能を EDA に適用し、より効率の良い設計を実現している。例えば、ケイデンス社が開発したソリューションでは、大規模集積回路（Large Scale Integration: LSI）のブロック設計を行うエンジニアが目標値を設定するだけで、自動的にパワー・パフォーマンス・エリア（PPA）の目標を満たし、複数ブロックのフローを同時に最適化することができる⁵⁴⁹。米エヌビディア社は、さらに進化した GPU を開発することで DL 技術が実用化され、その DL 技術が EDA をさらに進化させることで、より最適な設計が可能となるとの研究結果を発表しており、具体的に商品化した GPU 「A100」（従来品より 8 ビット整数演算の処理能力が 317 倍に向上）をサムスン等に

⁵⁴⁵ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022. <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>

⁵⁴⁶ Synopsys 「FinFET 設計の 90%を支えるテクノロジー」 <https://www.synopsys.com/ja-jp/implementation-and-si-gnoff.html>

⁵⁴⁷ 「AI 応用設計技術と EDA ツール」 Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。<https://semi-net.com/feature/posts/eda>

⁵⁴⁸ I b i d

⁵⁴⁹ I b i d.

提供している⁵⁵⁰。こうした EDA 技術の発展により、5G や最先端の携帯電話、ハイレベルなコンピューティングなど、さらなる次世代製品の開発が可能となる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

EDA 設計ツールは主に先述した米国企業 3 社が市場を独占しており、この傾向は今後も継続することが予想される。一方で、製造業は主に台湾や韓国に分業されているため、こうした分業におけるサプライチェーンのリスクや、EDA 技術の流出が問題視されている。米国は、半導体技術に関連する知的財産の盗難の可能性、偽造デバイスの導入、自然災害または紛争によるチップサプライチェーンの混乱などは国家安全保障に直結するリスクであると位置付け、特に人工知能（AI）の製作に不可欠な半導体の生産に脆弱性が見られることは深刻な問題であると認識している⁵⁵¹。

さらに 2022 年 8 月 14 日、米国商務省産業安全保障局（BIS）は主に中国等に対して新たに輸出管理の対象として EDA ツールに関連する GAA（Gate All Around）FET⁵⁵²搭載の集積回路（IC）開発に使用される電子コンピューター支援設計（Electronic Computer-Aided Design: ECAD）用ソフトウェアを加えた⁵⁵³。BIS によると、ECAD ソフトウェアは複雑な集積回路を設計するため、軍事および航空宇宙防衛産業の様々なアプリケーションで使用される重要な技術である⁵⁵⁴。特に、GAAFET 回路の設計に適した ECAD は最先端の LSI 設計用の CAD ツールであり、米国が圧倒的に強い分野であるため、この分野での規制は主に中国のファブレスメーカーが最先端のロジック半導体を開発することを防ぐための対策であると考えられている。現状では、米国の上述した 3 社が中国の EDA 市場の 95%のシェアを獲得しており、中国国内で EDA を開発し国産品へ置き換えるには時間がかかる⁵⁵⁵。また、現在の中国の半導体製

⁵⁵⁰ 小島郁太郎「NVIDIA が半導体設計に AI 適用 GPU 活用で設計者を超越」日経エレクトロニクス、2022 年 1 月 7 日。
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/06432/>

⁵⁵¹ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022. <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>

⁵⁵² GAAFET については CMOS の次で説明。

⁵⁵³ 甲斐野裕之「米商務省、半導体関連技術などを輸出管理対象に追加、「ワッセナー・アレンジメント」での合意を反映」JETRO、2022 年 8 月 15 日。<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/60bb3ad37d14bce5.html>

⁵⁵⁴ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220816-2426578/>

⁵⁵⁵ 川尻「米国が EDA の供給断つ、中国の半導体産業が再び「首を絞められる」ことに—独メディア」、dmenu、2022 年 8 月 17 日。https://topics.smt.docomo.ne.jp/article/recordchina/world/recordchina-RC_899572

品は 28-90nm のマチュアなプロセスが主流であるため、この制裁による短期的な影響は少ないが、将来的に GAAFET が主流となる際に制約が生まれることを期待した措置となっている。

一方で、EDA 関連技術の開発は日本が遅れをとっている分野である。上述したような国際情勢に鑑み、2022 年 11 月 10 日にトヨタ、ソニーなど 8 社が共同で設立を発表した Rapi dus 社は、2nm ノード以下の最先端の半導体の量産に向けて日米が共同研究開発することを期待しており、特に EDA 分野での日米の連携が期待できる。

2. 半導体製造装置

(1) 技術の概要

半導体製造装置 (Semiconductor Manufacturing Equipment: SME) 業界は、前工程と後工程に分類される。前工程の SME は、研磨・研削装置、リソグラフィシステム、化学蒸着装置、および計測システムなどのシリコンウェーハ上で機能するチップを作成する製品を指す⁵⁵⁶。後工程の SME は、プローブ、電圧テスター、マシン・ビジョン・システムやオシロスコープなど、最終製品に組み込まれる前にチップの機能を組み立ててパッケージ化し、試行する製品である⁵⁵⁷。SME のメーカートップ 3 社は米国に本社を構えているアプライド・マテリアル社、ラムリサーチ・コーポレーション、KLA コーポレーションであり、オランダの ASML 社と日本の東京エレクトロニクス社を合わせた 5 社が世界の市場の 6.5 割を占めている⁵⁵⁸。中でもオランダの ASML は、5nm 以下の微細化開発を可能とするための EUV 露光技術を採用した半導体製造装置を製造する、世界で唯一の企業である⁵⁵⁹。

SME 関連の技術で現在最も注目され、急成長しているのは、同じ基板上により多くのチップを集積させる 3 次元実装 (3DIC) のための SME である。3 次元実装とは、電子回路を形成して薄片化した半導体ウェーハを 3 次元に積層化して実装する技術のことを指し、この技術を用いることで実装面積を減らして電子回路の層間を貫通電極を使って通電させることで、半導体の小型化・高密度化・省電力化、

⁵⁵⁶ John VerWeij, What's Causing U.S. Semiconductor Equipment Production and Exports to Grow?, U.S. International Trade Commission, January 2019, pp1.

https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_john_verwey_semi_manufacturing_equipment_pdf.pdf

⁵⁵⁷ Ibid.

⁵⁵⁸ Congressional Research Service, "Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy," October 26, 2020, pp.15. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46581>

⁵⁵⁹ NEDO 「TSC トレンド グローバルな半導体競争」2021 年、20 頁。

<https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

さらに信号伝送と処理速度の高速化など、数多くのメリットを生む⁵⁶⁰。チップを3次元方向に集積させて動かすのは後工程の作業であり、日本の企業が得意とする主にチップを切り分けて基板に装着してパッケージする工程を指す⁵⁶¹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

上述した2022年8月の米国による中国への輸出規制は、今後DUV（深紫外線）リソグラフィ装置の輸出を含むように規制範囲を拡大する可能性が示唆されている。前述した通り、現在オランダのASML社が業界で唯一の極紫外線（EUV）・深紫外線（DUV）リソグラフィ装置メーカーである。そのため、米国のアプライド・マテリアル社やラムリサーチ・コーポレーション社の売上げが中国の市場に頼っていることに対する懸念等を背景に、今後米国政府が中国国内の新しいファウンドリーが3nm以下の半導体製造に必要な最先端のリソグラフィ装置を開発できないように、さらなる規制をかけるのではないかという見方がある⁵⁶²。一方で、米国のラムリサーチ・コーポレーション社は自社の売上高の31%を中国が占めていると報告しているため、こうした輸出規制措置が米国企業に及ぼす影響も同時に危惧されている⁵⁶³。

(3) 日本における技術開発の現状

上述した通り、SMEは日本の企業が現在も競争力を維持する分野である。2021年の経済産業省による『半導体戦略（概略）』では、「次々世代の先端半導体製造に必要となる装置・材料等の先導的な研究開発（次世代のEUV向け装置・材料技術、層間・配線間絶縁・放熱・接合材料、三次元接合・張り合わせ技術や評価技術等）を支援する」⁵⁶⁴と具体的な項目が掲げられ、特にポスト5G情報通信システム

⁵⁶⁰ 東京応化工業株式会社「3次元実装分野」アクセス日2022年10月24日。<https://www.tok.co.jp/products/3d>

⁵⁶¹ 田嶋智太郎「次の半導体トレンド「3次元化」で躍進する日本企業5社とは？“技術の日本”に商機到来」、Money Voice、

2022年2月22日。<https://www.mag2.com/p/money/1160478>

⁵⁶² Alan Patterson「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022年9月1日。

https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2209/01/news074_2.html

⁵⁶³ Ibid.

⁵⁶⁴ 経済産業省「半導体戦略（概略）」2021年6月、15頁。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210603008-4.pdf>

強化のため、2nm ノード世代以降（特に新構造トランジスタ、GAA ナノシート等）において必要となる新しい製造プロセスの開発に注力している。

3DIC の実現には基板やパッケージの新しい装置と素材が必要となるため、日本の SME や素材メーカーにとっても好機となる。3DIC 技術に力を入れている日本の企業の例として、ディスコ社のパッケージや封止樹脂を薄く削るための研削装置「グラインダー」や加工品、東京応化工業や JSR 社の感光材（フォトレジスト）、TOWA 社の 3 次元積層向けの封止技術等がある⁵⁶⁵。東京応化工業は長年にわたり本分野の研究を進めてきた企業であり、接着剤やキャリア基板といった材料のほか、半導体ウェーハのキャリア基板への貼付・分離を行うプロセス機器を開発し、独自のウェーハ・ハンドリング・システム「Zero Newton」の開発に成功している⁵⁶⁶。この技術は、3 次元実装プロセスの大幅な効率化とハイコスト・パフォーマンスを可能とするため、半導体のさらなる高性能化に応える最新のプロセス技術として注目されている⁵⁶⁷。この他にも、東京精密社のポリッシュ・グラインダーやプロービングマシン、岡本工作機械製作所の平面研削盤、メイコー社のプリント配線板製造、キョウデン社のプリント配線基板製造、住友ベークライト社のパッケージ材料などが挙げられる⁵⁶⁸。また、茨城県つくば市に設立した台湾の TSMC 社と日本の装置・素材メーカーや研究機関の共同研究センターでは、半導体を樹脂などでパッケージングし、基板上に搭載する等の 3DIC 技術の研究が行われている⁵⁶⁹。この技術を活用した商品開発の研究も進んでおり、例えば東北マイクロテック社は学習機能を備えたチップをセンサー等の端末デバイスと一体化した三次元積層型エッジ AI チップの製品化に成功し、さらに時系列情報や音声認識の機能を高めるためのソフトウェア開発も展開している⁵⁷⁰。（3DIC については先端パッケージングを参照。）

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）によると、省エネルギー化の需要が高まる中で、パワー半導体や SME 分野への各国の参入は著しく、今後国内での安定的な供給を確保す

⁵⁶⁵ Alan Patterson「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022 年 9 月 1 日。

⁵⁶⁶ 東京応化工業株式会社「3次元実装分野」（アクセス日 2022 年 10 月 24 日）。

⁵⁶⁷ 同上。

⁵⁶⁸ 田嶋智太郎「次の半導体トレンド「3次元化」で躍進する日本企業 5 社とは？“技術の日本”に商機到来」、Money Voice、2022 年 2 月 22 日。<https://www.mag2.com/p/money/1160478>

⁵⁶⁹ 「半導体に 3 次元化の波 インテルら「性能向上のカギ」」日本経済新聞、2021 年 12 月 16 日。
<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UC14DMI0U1A211C2000000/>

⁵⁷⁰ 東北マイクロテック株式会社「世界初の三次元積層型 AI チップの製品開発に成功」2022 年 2 月 16 日。
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000009.000096007.html>

ることが難しくなるため、更なる省エネエレクトロニクス技術の開発が求められる⁵⁷¹。革新素材分野等と連携しながら半導体エコシステム全体での改善を必要としている。例えば、NEDO が 2025 年までを事業期間として公募している研究には、新世代パワー半導体の開発として酸化ガリウムパワー半導体と大口径インテリジェント・シリコンパワー半導体の開発、ならびに半導体製造装置の高度化に向けた開発等⁵⁷²が含まれており、こうした幅広の分野を網羅した研究開発を活発化させていくことが競争力を高めることに繋がる。また、NEDO における 3100 億円の資金をかけた「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」⁵⁷³も採択されており、ポスト 5G で使用される最先端の半導体開発、特に前工程で使用されるための技術開発が支援対象となっている。

3. CMOS の次

(1) 技術の概要

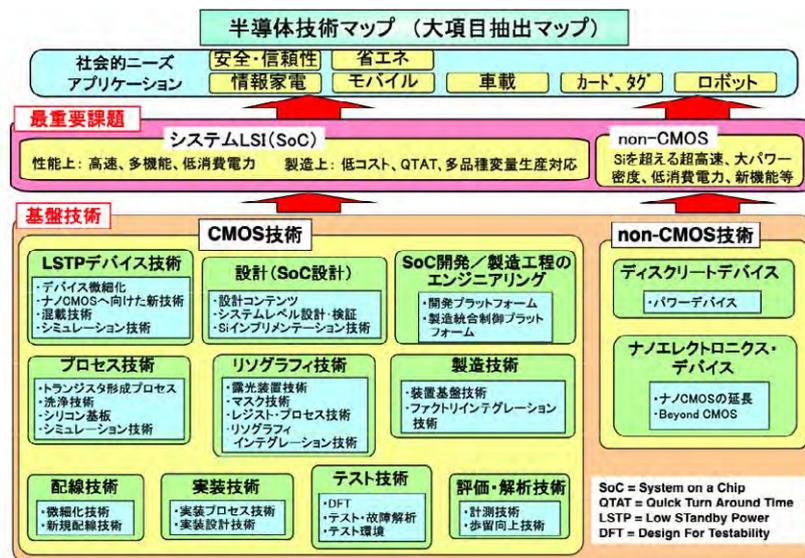
CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) とは、相補型・金属・酸化膜・半導体を指す。これは、n 型 FET と p 型 FET という、オンオフ動作が相互に逆転するタイプのトランジスタを直列につないだ素子のことであり、低消費電力で集積回路の信号処理を行う上で最も基本的なデバイスである⁵⁷⁴。CMOS においてもムーアの法則に基づきナノ技術を用いて微細化されてきたが、シリコン技術には限界が見られるため、元来の CMOS とは異なる CMOS の次 (Beyond CMOS) となる基礎研究が活発化している。一般的に CMOS の次と呼ばれる技術は、ムーアの法則に部分的に沿った形で長期的に開発される新しい素材、構造、デバイスやアーキテクチャを指し、より大きな記憶容量を持つサーキット (回路) を製造するために、磁気デバイス、MEMS、2 次元の材料に基づくデバイスや応答エレクトロニクスなどが研究されている。

⁵⁷¹ NEDO 「省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業」追加公募に係る実施体制の決定について」2022 年 7 月 12 日。 https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100240.html

⁵⁷² 同上。

⁵⁷³ NEDO 「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」2022 年 5 月 18 日。 https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100172.html

⁵⁷⁴ 産総研 「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」2020 年 12 月 8 日。 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20201208/pr20201208.html



(図 17-1 NEDO による半導体技術マップ⁵⁷⁵⁾)

CMOS の次技術の開発は、さらなる低消費電力化や長時間のモバイル機器の駆動を可能とすることを目的としている。例えば、回路とアーキテクチャにおいては、新興デバイスやハイブリッド回路に基づくものがあり、画像処理やパターン認識、無線周波数システムの回路などがある⁵⁷⁶。磁気ロジックでは、新しい磁気デバイスに基づいて提案されている mLogi c 等があり、論理ゲートを独自の不揮発性記憶素子に変換することで 100mV の低電圧で駆動することができる⁵⁷⁷。MEMS はマイクロスケールの微小電気機械システムであり、機械要素部品やセンサー、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に集積化したデバイスを指す⁵⁷⁸。MEMS はナノ化が進み、カーボンナノチューブ等のナノスケール技術を用いたものは NEMS と呼ばれる。また、磁気をもたらずスピンの性質も利用するエレクトロニクスの分野は「スピントロニクス」といい、巨大磁気抵抗効果 (GMR)、トンネル磁気抵抗効果 (TMR)、MRAM、スピン注入磁化反転などの技術が開発されてきた⁵⁷⁹。スピントロニクスは、電子のスピン特性を電磁場で操作することでスピン偏極電流を生成し、電

⁵⁷⁵ NEDO 「半導体技術マップ」 <https://www.nedo.go.jp/content/100085072.pdf>

⁵⁷⁶ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information." International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482., pp.3479. https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n16_02.pdf

⁵⁷⁷ i bi d.

⁵⁷⁸ 株式会社 MEMSCORE 「MEMS とは？」 アクセス日 2022 年 10 月 24 日。 <https://www.memsc-core.com/service/mems.html>

⁵⁷⁹ 佐藤勝昭 「スピントロニクス」 って何？ (その 1) 」 つくばサイエンスニュース

荷のみでは得られない高いデータ転送速度、記憶容量、メモリ密度、処理能力の実現を可能とする⁵⁸⁰。スピントロニクスは CMOS の次の開発で最も使用される技術であり、主にトランジスタの密度と消費電力の問題を解決するために使用されている⁵⁸¹。

情報処理を担う電界効果トランジスタは FET と呼ばれ、平面型の CMOS 構造は、FET を微細化することによって高性能化と低消費電力化を図ってきた。しかし、現在は 2 次元の発展が限界に達し、3 次元の FET 構造が注目されている。現在実用化されているのはヒレ (Fin) 状のゲート構造を持つ FinFET であり、それよりもさらに発展したものが、ゲートをチャネルの上下・左右を完全に覆う GAA (Gate All Around) 構造である⁵⁸²。GAAFET は、2nm ノードの半導体を実現する上で重要な技術である。GAAFET よりもさらに進化した FET 構造は CFET 構造と呼ばれ、n 型 FET と p 型 FET を上下に積層することで従来の単一 FET 素子の寸法で CMOS を構成でき、大幅な面積縮小と高速化を図ることができる⁵⁸³。また、ゲルマニウムはシリコンに比べてホール移動度 (半導体に電場をかけたときの電子や正孔の半導体での動きやすさを示す値) が高く、低電圧動作が可能となり、シリコンプロセスとの親和性が高いことから、n 型 FET は従来のシリコンで、p 型 FET はゲルマニウムで作成できる異種チャネル集積プラットフォームが、FET の高速化技術として期待されている⁵⁸⁴。

2019 年 11 月 01 日。 [https://www.tsukuba-](https://www.tsukuba-sci.com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89)

[sci . com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89](https://www.tsukuba-sci.com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89)

⁵⁸⁰ Merck 「マイクロ・ナノエレクトロニクス」 (アクセス日 : 2022 年 11 月 30 日) 。

<https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/applications/materials-science-and-engineering/microelectronics-and-nanoelectronics>

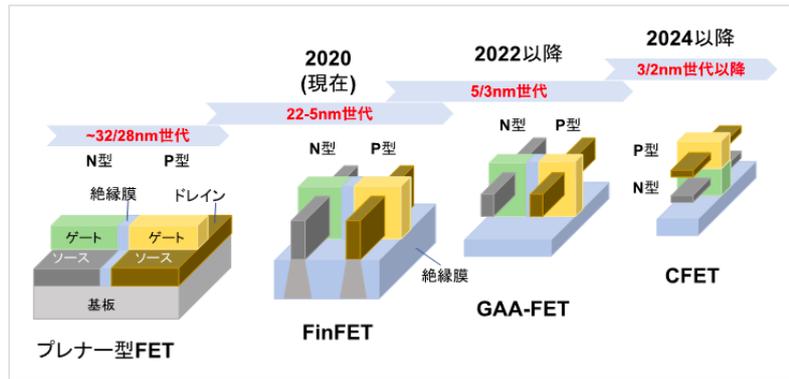
⁵⁸¹ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information." International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482. , pp.3479.

⁵⁸² 産総研 「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」 2020 年 12 月 8 日。

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20201208/pr20201208.html

⁵⁸³ i b i d.

⁵⁸⁴ i b i d.



(図 17-2 FET 構造のロードマップ⁵⁸⁵⁾)

2020 年に、産業技術総合研究所（産総研）と東北大学ならびに台湾の大学チームからなる日本と台湾の国際共同研究グループは、2nm 世代の電界効果トランジスタとされるシリコンとゲルマニウムの異種チャンネル相補型電界効果トランジスタ hCFET（heterogeneous Complementary-Field Effect Transistor）を共同開発している⁵⁸⁶。この研究では、シリコンとゲルマニウムのチャンネル薄膜を上下に集積させる技術を開発し、Si-n 型 FET と Ge-p 型 FET を最短距離で連結する hCFET 構造を実電することで、大幅な集積化の向上とさらなる高速化が期待される⁵⁸⁷。こうした CFET の研究は 2nm ノードの半導体を実現する上で重要であり、今後より技術開発が活発化する分野である。

(2) 公的利用・安全保障における利用

上述したとおり、2022 年 8 月に米国商務省産業安全保障局（BIS）が新たに主に中国への輸出管理対象に加えた半導体技術に、GAAFET 搭載の集積回路（IC）開発に使用される電子コンピューター支援設計（ECAD）用ソフトウェアが含まれた。BIS は、GAAFET 技術は 3nm 以下の最先端の技術ノードを実現するための鍵となる技術であり、商用目的だけでなく、防衛および通信衛星を含む多くの軍事用途を前進させるために重要である⁵⁸⁸と、軍事利用に言及して説明している。こうした輸出規制の措置は、韓国の SK hynix 社が中国にある既存の工業で GAA 技術を拡充する計画を立てていることに対して見直し

⁵⁸⁵ i b i d.

⁵⁸⁶ 産総研「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」2020 年 12 月 8 日。

⁵⁸⁷ i b i d.

⁵⁸⁸ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220816-2426578/>

を強いるなど、中国以外でも影響を及ぼしている⁵⁸⁹。米国は特に中国共産党が最先端の技術を採用して軍事開発する軍事融合（MCF：Military Civil Fusion）イニシアチブに注目しており、TSMC 社やサムスン・エレクトロニクス社が GAAFET 技術を使って 3-2nm ノードの商用化を実現するにあたり、中国を牽制している⁵⁹⁰。

また、2022 年には CMOS のイメージセンサの成長率は 16%減少したと報告されており、その主な原因として世界的なインフレによる原材料価格の上昇、スマートフォン消費の低下、パンデミックによるサプライチェーンへの悪影響などが挙げられている⁵⁹¹。

4. 異種統合と先端パッケージング

(1) 技術の概要

半導体の後工程の生産過程では、完成した半導体をスマートフォンなどの最終製品にパッケージングする前に、正常に機能するかを試行する。この作業は ATP（assembly, testing, packaging）と呼ばれ、最も労力を要するため、比較的賃金の低いマレーシア、ベトナム、フィリピンなどに外注されてきた⁵⁹²。元来、ATP の作業は最も付加価値が低いとみられ分業されてきたが、チップに組み込まれる機能が増加することに伴い、近年はより重要視される傾向にある。

異種統合（Heterogeneous integration）とは、個別に製造されたコンポーネントをより高いレベルのアセンブリ（システム・イン・パッケージ：SiP）に統合することであり、そうすることで全体の機能が強化されて、動作が改善される⁵⁹³。組み合わせるコンポーネントは様々で、例えばシステムレベル（組み立て済みのパッケージやサブシステムなど）での統合、または機能性（専用プロセッサ、DRAM、フラッシュメモリ、表面実装デバイス、抵抗器・コンデンサ・インダクタ、フィルター、コネクタ、MEMS、センサーなど）や技術性（例えば、ダイサイズ用に最適化されたものと、低電力用に

⁵⁸⁹ Alan Patterson 「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022 年 9 月 1 日。

https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2209/01/news074_2.html

⁵⁹⁰ *ibid.*

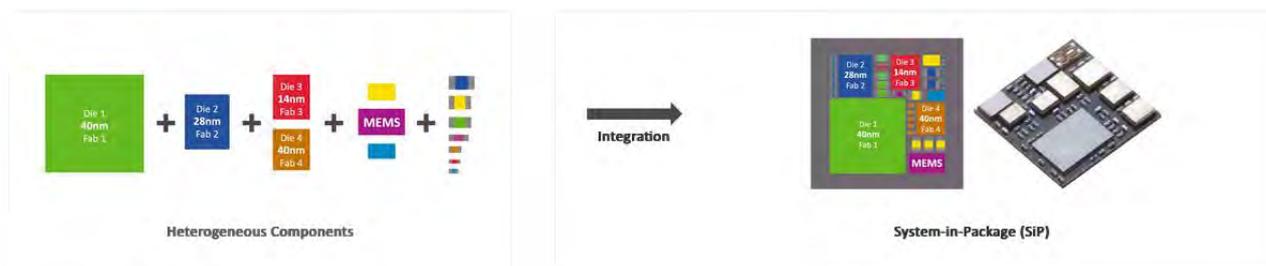
⁵⁹¹ 服部毅「半導体企業売り上げランキング 2022 年第 1 四半期版、Samsung が首位を堅持」マイナビ・ニュース 2022 年 6 月 30 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220630-2384665/>

⁵⁹² Congressional Research Service, “Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy,” October 26, 2020, pp.17. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46581>

⁵⁹³ ASE, “Heterogeneous Integration (HI)”, last access on 24 October 2022.

https://ase.aseglobal.com/en/heterogeneous_integration

最適化されたもの)での統合などがある⁵⁹⁴。複数のダイを同じパッケージに統合することで、小さなフォームでより高度な機能を実行することができるようになる。



(図 17-3 異種統合とは⁵⁹⁵)

異種統合には高度なパッケージング能力が必要である。米国では、バイデン大統領による『就任 100 日間の報告』で半導体政策が見直されたが、先端パッケージング分野は長きにわたりアジア諸国に分業してきたため、米国の半導体企業が改善すべき項目と報告されている。また、米エネルギー省が 2021 年に発表した『半導体-サプライチェーンの詳細な評価-』でも同様に、最先端でエネルギー効率の高い半導体製品を米国内で製造するためには、パッケージング能力の向上に力を入れるべきである⁵⁹⁶と明記されている。一方で、米国内でも異種統合の技術開発は活発に行われている。例えば、米サンディヤ国立研究所は、国家安全保障用に向けた MEMS マイクロ、ハイパフォーマンス電子やオプトエレクトロニクスなどのプロトタイプ製造を可能とするため、最先端のハイブリッド機能を開発している⁵⁹⁷。この技術により、異種材料を緊密に統合することで、コンポーネント全体のサイズや重さ、パフォーマンス等を改善しながら、最適化されたフォトニックデバイス、光学素子、MEMS センサー・アクチュエーター、電子回路等に活用することができる⁵⁹⁸。さらに、2022 年 3 月には Advanced Semiconductor Engineering、AMD、Arm、Google Cloud、インテル、メタ、マイクロソフト、クアルコ

⁵⁹⁴ ASE, “Heterogeneous Integration (HI)”, last access on 24 October 2022.

⁵⁹⁵ ibid.

⁵⁹⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-”, US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, p. 19 .

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Semiconductor%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>

⁵⁹⁷ Trujillo, Irene, and Jennifer Rose Lake. *Heterogeneous Integration/Advanced Packaging*. No. SAND2015-0712C. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015.

https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/145/2021/10/heterogeneous-integration_SAND-2.pdf

⁵⁹⁸ ibid.

ム、サムスン、TSMC（台湾積体回路製造）の10社でUniversal Chiplet Interconnect Express（通称UCIe）を共同設立し、異なる設計や製造のダイであっても相互接続できる業界標準のチップレットを開発した⁵⁹⁹。チップレットは異なる企業が共通に利用できるため、半導体の市場投入までの時間の短縮やコスト低減が期待されている⁶⁰⁰。

小型・低消費電力化が求められるスマートフォンや高速、高性能化が必要とされるハイ・パフォーマンス・コンピューティング（HPC）分野では、新しい先端パッケージング技術の導入が進められている。特にスマートフォンなどのモバイル情報機器の小型化・省電力化を達成するためには、従来のウェーハレベルパッケージ（WLP）では不可能であり、ファンアウト（FO）構造を採用するFOWLPの需要が高まった⁶⁰¹。FOWLPの手法では、ポリイミド樹脂、金属箔、樹脂材料などを用いてダイをシリコン・ウェーハなどの基板上に再配置し、再配線層を形成して樹脂封止を行った後に、個別のチップに切り分けていく⁶⁰²。日本では、昭和電工マテリアルズ社（旧：日立化成）の製品がポリイミド樹脂のシェアを占め、樹脂封止で使用するエポキシ系樹脂はナガセケムテックスがシェアを占めている⁶⁰³。

数々の研究開発が進められている中で、今後も半導体産業ではシリコンが主流となり、その後は集積回路を積み重ねて三次元構造にした3DIC（3次元集積化）が性能のスケールリングを牽引するとの見方が多い。AIや量子コンピュータならびにポスト5G・6G社会への適応など、新しい半導体システムへの要求が高まるにつれ、研究開発競争が激化し、その中心となる技術に3DICがある。3DIC実装とは、LSIチップの基盤内に貫通するシリコン貫通電極（Through-Si-Via：TSV）を形成することで三次元的にLSIチップを積層する技術である⁶⁰⁴。TSVをもつチップを縦方向に積み重ねることでLSIを立体的に集積できるため、微細加工や集積度を向上することができる⁶⁰⁵。3DICの実現に、TSV技術の開発は不可

⁵⁹⁹ iMagazine「半導体「チップレット」時代の本格到来を告げる業界団体「UCIe」設立、インテル・AMDなど10社、標準仕様「UCIe 1.0」を発表 ～「ムーアの法則を拡張するのはチップレット」」2022年3月7日。

<https://www.imagazine.co.jp/ucie202203/>

⁶⁰⁰ i bid.

⁶⁰¹ 「先端パッケージング材料」SEMI-NET（アクセス日2022年10月30日）。<https://semi-net.com/feature/posts/package-material>

⁶⁰² 「先端パッケージング材料」SEMI-NET（アクセス日2022年10月30日）。<https://semi-net.com/feature/posts/package-material>

⁶⁰³ i bid.

⁶⁰⁴ 菊地克弥. "AI・IoT時代に向けた三次元集積実装技術の研究開発." *表面と真空* 62.11 (2019): 666-671. p. 8

⁶⁰⁵ 傳田精一. "3次元チップ積層のためのシリコン貫通電極（TSV）の開発動向." *表面技術* 58.12 (2007): 712-712, p. 712. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/58/12/58_12_712/pdf/-char/ja

欠である。これらの技術開発により、CPU、メモリ、ロジック等においては、デバイスの高周波特性が大きく改善することが期待される⁶⁰⁶。

(2) 日本における技術開発

2021年に経済産業省が発表した『半導体・デジタル産業戦略』においても、ロジックやメモリ、センサー等の複数チップを三次積層して一つにパッケージ化する3D化プロセスの技術開発⁶⁰⁷を個別戦略の一つとして掲げている。特に、微細化プロセスと3D化プロセスの技術開発を促進するため、産総研を中心にTIA構成機関⁶⁰⁸が立ち上げられ、海外のR&D組織との共同研究などに励んでいる。また同年3月に茨城県つくば市に設立された、TSMC ジャパン三次元積層型集積回路(3DIC)研究開発センターはこの実例であり、産学官が連携して5nmノードで製造したチップを3D積層する研究を行うことで、より安い初期投資で優れた機能を実現できると期待されている。さらに、東北大学は「東北大学半導体テクノロジー共創体」としてスピントロニクス省電力ロジック半導体の開発、ならびに半導体製造プロセス・部素材・イメージセンサ開発実証、MEMS設計・プロセス開発実証のため、産学官の共創を図っている⁶⁰⁹。その一環として東北大学内に3DICの研究開発拠点となる「GINTI」が設立され、シリコントランジスタに代わる技術としてのスピントロニクス、メモリスタ、カーボンナノチューブ、DNAコンピューティング、分子エレクトロニクス⁶¹⁰等の研究が行われている。本分野は米国が弱みと認識しているため、さらなる日米間での企業連携や共同技術開発等が期待できる。

5. AI チップ

(1) 技術の概要

AIチップとは、AIハードウェアやAIアクセラレータとも呼ばれ、人工ニューラル・ネットワーク(Artificial neural network: ANN)というディープ・ラーニング(DL)機能用に特別に設計された

⁶⁰⁶ ibid.

⁶⁰⁷ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021年6月、14-15頁。

https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semi_con_digital/20210603008-1.pdf

⁶⁰⁸ TIAについて <https://www.tia-nano.jp/page/page000095.html>

⁶⁰⁹ 東北大学産学連携機構 総合連携推進部「東北大学半導体テクノロジー共創体の設置 ー東北大学が強みを持つ半導体分野で産学官共創を進め、日本の半導体産業戦略の実行に寄与するー」2021年6月8日。

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/06/press20210608-01-clean.html>

⁶¹⁰ MIT Technology Review, “10 Breakthrough technologies” last access on 24 October 2022.

<https://www.technologyreview.jp/s/273083/10-breakthrough-technologies-2022/>

アクセラレータを指す⁶¹¹。こうした AI を活用した次世代のアクセラレータ・アーキテクチャの開発により、コンピューションの効率を高めたり、メモリやストレージに大規模なデータセットを転送することができるようになる。AI チップは、これまでの CPU と比較して劇的に機能を改善させることが可能なため、高度なセキュリティ関連に AI システムを導入したり、低コストで製品を提供するために不可欠である。

2025 年までに、AI チップ関連は全半導体需要のほぼ 20%（約 670 億ドルの収益）を占めると予測されている⁶¹²。例えばコンピューティングの分野では、中央処理装置（CPU）とアクセラレータ（GPU）、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ（field programmable gate arrays : FPGA）、特定用途向け集積回路（application-specific integrated circuits : ASIC）などの機能によって、パフォーマンスが決まるとされる⁶¹³。今後コンピューティング市場は特定の用途に向けて作られる ASIC が主流になるとみられ、GPU は DL アプリケーションの需要に見合うようにカスタマイズされるようになる⁶¹⁴。米エヌビディア社はすでに GPU 分野で AI を導入しており、半導体企業でも特定の業界のためのソリューションを可能にする AI ハードウェアの開発に焦点が当てられている。また、米国の Mythic 社のように、医療・軍事産業の画像や音声認識アプリケーションのエッジ推論をサポートする ASIC を開発したスタートアップ企業も存在する⁶¹⁵。将来的には、システム・オン・チップ（SoC）に組み込まれた ASIC がエッジアプリケーション需要の 70%、FPGA が同需要の約 20%を占めるといわれる⁶¹⁶。経済産業省の半導体戦略においても、次世代コンピューティング技術開発のうち、具体的に車

⁶¹¹ Gem Dilmegani, "AI chips: A guide to cost-efficient AI training & inference in 2022," AI Multiple, August 24, 2022. <https://research.aimultiple.com/ai-chip/>

⁶¹² Allen, "Understanding China's AI strategy: Clues to Chinese strategic thinking on artificial intelligence and national security," pp. 17.

Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, "Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies," McKinsey and Company, January 2, 2019.

⁶¹³ *ibid.*

⁶¹⁴ *ibid.*

⁶¹⁵ Mythic, <https://mythic.ai/company/>

⁶¹⁶ Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, "Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies," McKinsey and Company, January 2, 2019.

載コンピューティング技術を例に挙げ、最適化するソフトウェア設計、ならびに半導体設計技術や車載光エレクトロニクス技術の研究開発を検討している⁶¹⁷。

メモリの分野では、メモリ上のデータに基づいたアルゴリズム分析によって画像認証が行われること等から、メモリ市場のAI化は2025年には120億ドルに増加すると予想されている⁶¹⁸。現在のメモリは主にCPU向けに最適化されているが、新たなソリューションとして開発が進むのは、TSVを介してメモリの3次元スタックにアクセスすることで大規模なデータセットを最大速度で処理できる高帯域幅メモリ（HBM）と、DLコンピューティング・プロセッサへの対応を見越してチップ上に直接データを保存するに十分なメモリ機能を設計したオン・チップ・メモリである⁶¹⁹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

台湾のTSMC社は、米国のF-35戦闘機で使用される半導体や米防衛システムに使用されるデュアルユース機能のFPGAなど、米国防省で使用される様々な軍事グレードの機器を製造している⁶²⁰。例えば、FPGAを発明した米国のザイリンクス社は、その半導体ウェーハのほとんどをTSMCと台湾のユニテッド・マイクロエレクトロニクス社にて製造している⁶²¹。そのため、米国にとって台湾を含むサプライチェーンの問題は深刻な安全保障問題である。さらには、AIチップの製造は半導体の設計とAIソフトウェアを組み合わせるため最先端の半導体製造技術を用いる必要がなく、最先端のチップ製造に成功していない中国にとっては、低コストのAIチップを使用して様々な製品を製造することでより広範な市場シェアと競争力を拡大する転機とされる⁶²²。清華大学が近年発表した『AIチップテクノロジーに関する白書』でも、AIチップに関連するあらゆる技術と市場について深い理解を示しており、パ

⁶¹⁷ 経済産業省「半導体戦略（概略）」2021年6月、26頁。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210603008-4.pdf>

⁶¹⁸ Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, “Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies,” McKinsey and Company, January 2, 2019.

⁶¹⁹ *ibid.*

⁶²⁰ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022.

⁶²¹ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022.

⁶²² Allen, “Understanding China's AI strategy: Clues to Chinese strategic thinking on artificial intelligence and national security,” pp. 18

イドゥ、アリババ、ファウエイ等の中国企業は、AI チップの開発に焦点を当てた半導体設計部門を設立している⁶²³。

こうした背景から、2021年バイデン政権は、半導体業界のサプライチェーンを監視するための早期警戒システムとタスクフォースを設立し、同年9月、米商務省は半導体のサプライチェーンに関する情報要請（RFI）を開始して、150を超える回答を得ている⁶²⁴。さらに2022年8月10日、バイデン大統領は、米国の半導体生産と研究に527億ドルの補助金を提供する法案に署名し、中国の科学技術の取り組みに対して米国の競争力を高めるための取り組みを後押しする姿勢を強調した⁶²⁵。加えて、上述した2022年8月の米国商務省産業安全保障局（BIS）による主に中国への輸出管理対象に半導体機器や材料が加えられたことは、中国がパワーエレクトロニクスに向けた次世代ワイドバンドギャップ技術や最先端ロジックを開発することを阻止する狙いがあるとみられている。

また欧米では、半導体の資源の調達や製造する際に使用される電力等が、人権や環境問題に配慮しているのか等の側面が、本産業の成長にとって重要であると捉えている。例えば米国エネルギー省では、エネルギー使用率の増加や半導体の使用に関係する炭素排出の増加等のため、半導体を使用する際のエネルギー効率を倍増させること、ならびにインメモリ・コンピューティング等のデータをメモリに通信する際の損失を削減または排除する機能を加えること、先端パッケージングによる正確なコントロール能力を構築すること、アナログや3D画像機能による超エネルギー効率のためのASICの異種統合、自然にインスパイアされたコンピューティング、材料、デバイス、およびアルゴリズム/ソフトウェアの開発などに注目している⁶²⁶。こうした民主主義的な観点を半導体製造に加えることは、中国の生産方式との差別化を図る上で重要であろう。

(3) 日本における技術開発

日本においても多くの中小・ベンチャー企業などがAIチップの開発に取り組んでいるが、必要機材の不足が問題であった。そのため、NEDO、産総研、東京大学が共同で整備した「AIチップ設計拠点」

⁶²³ *ibid.*

⁶²⁴ US Department of Commerce, “Results from Semiconductor Supply Chain Request for Information,” January 25, 2022. [h](#)

⁶²⁵ David Shepardson and Jeff Mason, “Biden signs bill to boost U.S. chips, compete with China,” Reuters, August 10, 2022.

[https://www.reuters.com/technology/biden-sign-bill-boost-us-chips-compete-with-china-2022-08-09/](https://www.reuters.com/technology/biden-signs-bill-boost-us-chips-compete-with-china-2022-08-09/)

⁶²⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, pp.15

では、AI チップの設計に必要な EDA ツールやハードウェアエミュレータ、標準 IP コアなどの設計環境を整えて、2021 年 6 月から試験運用を開始している⁶²⁷。さらに東京大学では、2019 年に東京大学大学院工学系研究科附属システムデザイン研究センター（d.lab）を、2020 年 8 月には産学連携の半導体技術開発拠点「先端システム技術研究組合（RaaS）」を発足させ、d.lab は半導体設計技術開発を行うアカデミズム側の拠点として、RaaS は d.lab の研究成果を実用化し、企業が参加して事業として展開することを支援する場を設けている⁶²⁸。この事業には、凸版印刷、パナソニック、日立製作所、ミライズテクノロジーズ、SCREEN ホールディングス、ダイキン、富士フイルム、パナソニック スマートファクトリーソリューションズなどの企業が参加し、効率を高めた設計技術の開発を目標としている⁶²⁹。産総研は次世代コンピューティング基盤の開発拠点⁶³⁰として、産学官が連携した戦略に基づいた 2030 年を見据えた基礎開発研究を推進している。経済産業省も AI チップの開発を加速するために必要な技術基盤を提供することを提案しており、こうした産学官の連携は AI チップ開発において不可欠である。

6. 先端マイクロエレクトロニクスの新材料

(1) 技術の概要

マイクロエレクトロニクスおよびナノエレクトロニクスとは、電子コンポーネントの標準的な形状サイズが、100-0.1 マイクロメートル（マイクロエレクトロニクス）または 100 ナノメートル以下（ナノエレクトロニクス）のエレクトロニクスを指す⁶³¹。マイクロチップの密度を高めることで、電子機器のメモリストレージ性能がより高度なものになる。さらに、電界効果トランジスタを小型化することで、より多くの部品を集積回路に組み込むことが可能となり、より強力でエネルギー効率の高い、軽量の製品を低消費電力で実現する⁶³²。こうした微細化に欠かせないのが、カーボンナノチューブ、窒化ホウ素ナノチューブ、量子ドット、グラフェンといった革新的な新材料であり、こうした材料を

⁶²⁷ NEDO「AI チップ開発加速のための「AI チップ設計拠点」が稼働開始」2019 年 10 月 7 日。

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101211.html

⁶²⁸ 「AI 応用設計技術と EDA ツール」、Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。

⁶²⁹ AI 応用設計技術と EDA ツール」、Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。

⁶³⁰ 産総研「次世代コンピューティング基盤戦略 第一版」2022 年 6 月 17 日。 <https://unit.aist.go.jp/rp-el/eman2022/NGCI/assets/ngcp-strategy2022.pdf>

⁶³¹ Merck「マイクロ・ナノエレクトロニクス」（アクセス日：2022 年 11 月 30 日）。

⁶³² Ibid.

使用することで極めて高い精度で成形や操作し、原子レベルの精密さで電子材料を堆積・積層することができる⁶³³。

カーボンナノチューブは炭素原子の連なりが中空の円筒状になった材料であり、直径が0.4～2nmであることから、非常に高い密度の集積回路を作ることができる⁶³⁴。例えば、2013年に名古屋大学とフィンランドのアールト大学の共同研究により、世界初の全カーボン集積回路（IC）の共同開発が成功を収め、電子デバイスに熟成型を施すことでプラスチック製品に電子機能を実装してデザイン性を広げることに成功した⁶³⁵。次世代の半導体材料として注目されるカーボンナノチューブを使用したICは、現在は大規模集積回路（LSI）への使用に発展しており、これまで主流だったシリコンと比べてキャリアの移動度と速度が約10倍に達することが期待されている⁶³⁶。

さらに最近では、ナノテクノロジーと量子力学的効果における新しいアプローチが注目されており、たとえば分子エレクトロニクスでは、バルクサイズの電極との電気的接触を確立するために、単一分子が電子部品として使用されている⁶³⁷。CMOS技術に重要な次世代のスピンロニクス機器においても、低消費電力化の実現のため、より小さな電圧で磁化方向を制御する界面マルチフェロイク材料の基礎研究が実施されている⁶³⁸。日本においても、2022年5月に東京工業大学が強磁性体として高いスピン偏極率を有するホイスラー合金磁石の Co_2FeSi と高い圧電性能を有する圧電体の $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ （PMN-PT）を組み合わせ、新しい界面マルチフェロイク構造を作成することに成功し、世界で初めて電界印加による不揮発メモリ状態の繰り返しスイッチングを実証している⁶³⁹。さらに抵抗スイッチングエレクトロニクスの分野では、メモリーセル、非線形二端子選択デバイス、RF信号スイッチ、発振器の緩和、サージ保護装置など、従来のCMOSに新しい機能を提供するため、金属酸化物や相変化カルコゲナイド等の材料が注目されている⁶⁴⁰。2次元の材料に基づく機器にお

⁶³³ I b i d.

⁶³⁴ 福田昭「大規模集積回路の時代に突入したカーボンナノチューブ【前編】」PCWatch、2019年6月20日。

<https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/semi-con/1191481.html>

⁶³⁵ 名古屋大学「世界で初めてカーボンナノチューブのみで集積回路を実現」https://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relationships/researchinfo/upload_images/20130809_engg.pdf

⁶³⁶ 福田昭「大規模集積回路の時代に突入したカーボンナノチューブ【前編】」PCWatch、2019年6月20日。

⁶³⁷ Merck「マイクロ・ナノエレクトロニクス」（アクセス日：2022年11月30日）。

⁶³⁸ 東京工業大学「世界最高性能のスピンロニクス界面マルチフェロイク構造を実証」2022年5月23日。

https://educ.titech.ac.jp/mat/news/2022_05/062540.html

⁶³⁹ 東京工業大学「世界最高性能のスピンロニクス界面マルチフェロイク構造を実証」2022年5月23日。

⁶⁴⁰ 株式会社 MEMSCORE「MEMSとは？」アクセス日2022年10月24日。<https://www.mems-core.com/service/mems.html>

いては、独自の電気・光学的機能を作り出すグラフィンが注目され、ニューラルネットワークやフォロニクスなどに使用されている⁶⁴¹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

中国共産党の第19回中央委員会第5回全体会議にて、半導体の新材料の開発強化が支持され、中でもSiCやGaNベースのウエハ開発を優先的に強化する指示がなされたという報道があった⁶⁴²。こうした新材料は次世代パワー半導体に活用されるため、中国企業がこの市場にいかに参加するか注視する必要がある。また、米国内で使用されているガリウムはほぼ全て輸入に頼っており、世界で使用されているガリウムの90%以上は中国で生産されているため、欧米ではガリウムを使用しないSiCパワー半導体の開発に注力すると同時に、ガリウムをサプライチェーンの中で最もリスクが高い材料と特定している⁶⁴³（SiCパワー半導体については次項を参照）。

また、一般的な半導体の材料において、ロシアとウクライナは、ニッケル、パラジウム、ネオンなどの半導体製造に重要な資材を提供する国であるため、ロシアのウクライナ侵略が長期化することで、世界の半導体サプライチェーンはさらに混乱する可能性が高い⁶⁴⁴。一方で、ロシアの半導体消費は世界の1%にも満たないとされ、JSC ミクロンやMCST、バイカル・エレクトロニクスなどのロシア産半導体メーカーが存在しているものの、従来は中国のSMIC、米インテル、独インフィニオン等から完成品を輸入したり、自社で設計した半導体の製造を台湾や欧州のファウンダリー企業に委託することに頼ってきたため、欧米による輸出規制がロシア国内の市場に与える影響の方が大きい⁶⁴⁵。

⁶⁴¹ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information."

International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482., pp.3479.

⁶⁴² NEDO「TSCトレンド グローバルな半導体競争」2021年、p.21. <https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

⁶⁴³ US Department of Energy, "Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-," US Department of Energy response to Executive Order 14017 "America's Supply Chains," Feb 24, 2022, p.14

⁶⁴⁴ Sarah Kreps, Richard Clark and Adi Rao, "A holistic approach to strengthening the semiconductor supply chain," Brookings, 7 April 2022. <https://www.brookings.edu/techstream/a-holistic-approach-to-strengthening-the-semiconductor-supply-chain/>

⁶⁴⁵ Anna Gross and Max Seddon「半導体が足りない ロシア企業に制裁の直撃」日本経済新聞 2022年6月3日（2022年6月2日付 英フィナンシャル・タイムズ電子版 <https://www.ft.com/>）

<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00CB0313Z0T00C22A6000000/?unlock=1>

(3) 日本における技術開発

半導体材料は日本企業が強みとする分野である。従来の半導体の製造過程で必要な材料として、成膜工程の洗浄液や材料ガス、露光工程のレジスト（感光材）やフォトリソマスク、エッチング工程のエッチングガスなどがあり、日本企業が約5割のシェアを占めると言われている⁶⁴⁶。シリコンは半導体が製造される上で依然として最も広く使用されている基本材料であり、世界のシリコンウェーハ生産の60%を日本の信越社とサムコ社が占めている⁶⁴⁷。5Gの実用のために、住友化学や昭和電工なども関連材料の増産投資を行っている⁶⁴⁸。また、新材料であるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）も日本ベンチャーが先行している⁶⁴⁹。カーボンナノチューブはアジア諸国が強い分野であり、昭和電工やナノシル社等が市場のトップに位置し、日本国内ではF-35A次世代戦闘機や航空宇宙産業で使用されている⁶⁵⁰。しかし前述した通り、中国企業も新材料の開発を強化していることから、経済安全保障の観点から日本企業を守る仕組みづくりがより一層重要となる。

2021年に経済産業省が発表した『半導体・デジタル産業戦略』では、次世代の先端半導体に必要な装置や材料の研究開発への支援を優先事項として掲げており、特に「先端半導体デバイスの前工程に用いられる材料のナノシート等の半導体材料、配線材料、絶縁材料等及び、先端半導体デバイスの後工程に用いられる素材である封止材、バンプ材、三次元パッケージ基板等や、カーボンナノチューブを活用した次世代革新メモリに関する技術等」⁶⁵¹の開発に向けて、半導体装置・製造メーカーとすり合わせて実現するとしている。2022年11月に発表された国内8社の出資によって設立されたRapidus株式会社においても、日米間の共同研究を通じて、日本の強みである半導体装置や材料を担う企業がサプライチェーンを構築することにより、国内で2nm以下の最先端の半導体を製造する体制を強化することを目的としている⁶⁵²。

⁶⁴⁶ 「半導体材料とは 日本企業、シェア5割との試算も」日本経済新聞、2019年7月2日。
<https://www.nikkei.com/article/DGXXKZ046830830S9A700C1EA2000/>

⁶⁴⁷ Congressional Research Service, “Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy,” October 26, 2020, pp.10.

⁶⁴⁸ *ibid.*

⁶⁴⁹ NEDO「TSCトレンド グローバルな半導体競争」2021年、p.10. <https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

⁶⁵⁰ PR Times「カーボンナノチューブ（CNT）のビジネスチャンス、状況、地域の見通し、2028年までの世界予測」2022年2月24日。 <https://japan.zdnet.com/release/30650621/>

⁶⁵¹ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021年6月、16頁。

⁶⁵² NHK「トヨタ・ソニーなど国内8社出資 先端半導体の国産化へ新会社」2022年11月10日。
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20221110/k10013886691000.html>

7. ワイドバンドギャップ・ウルトラワイドバンドギャップ半導体

(1) 技術の概要

現在の半導体の始まりである 1950 年台のトランジスタはゲルマニウムを用いてきたが、その後はシリコンが主流となり、今日まで進化を遂げてきた。シリコンウェーハ自体は、アメリカ、日本、台湾、マレーシア、英国など多くの国で生産されている。これに対し、特にパワー半導体の分野においてシリコンを大きく上回る化合物半導体の材料として注目されているのが、SiC（シリコンカーバイド・炭化ケイ素）や GaN（ガリウムナイトライド・窒化ガリウム）である。ガリウム砒素(GaAs)、炭化ケイ素(SiC)、窒化ガリウム(GaN) などのグループ III から V からそれぞれ 1 つ以上の要素を組み合わせで作られたウェーハから切断される半導体は「III-V 半導体」と呼ばれ、太陽光発電、発光ダイオード(LED)、センサー、オプトエレクトロニクス等の製造に使用される⁶⁵³。また、SiC や GaN はシリコンと比較してバンドギャップが広いいため、ワイドバンドギャップ半導体とも呼ばれ、シリコンよりも大幅に薄い耐圧層で同等の耐圧を実現している⁶⁵⁴。

物性		Si	SiC	GaN
バンドギャップ	eV	1.1	3.3	3.4
電子移動度	cm ² /Vs	1350	700	1500
破壊電界	MV/cm	0.3	3.0	3.3
性能指数	μm ² Ec ³	1	440	1130

SiC・GaNはシリコンに比べて・・・

- 高耐圧 ~10倍
- 高耐熱 ~1000℃
- 小型化 ~1/1000
- 高速 ~100MHz

(図 17-4 シリコン、SiC、GaN の特性⁶⁵⁵)

パワー半導体は、高品質のエピタキシャル層で製造される。SiC および GaN エピタキシャルウェーハの多くはウルフスピード社 や II-VI 社のような米国企業で生産されており、米国が市場を占める分野である⁶⁵⁶。半導体のチップ加工に必要な SiC エピウェーハ製造も同様に、米国のウルフスピード社と II-VI 社、そして日本の昭和電工が強い⁶⁵⁷。一方で、GaN ウェーハのほとんどは台湾で生産されてお

⁶⁵³ サンケン「Part 1. 化合物半導体 SiC、GaN とは？」。 <https://www.semi-con.sanken-el.co.jp/guide/GaNSiC.html>

⁶⁵⁴ 同上。

⁶⁵⁵ 同上。

⁶⁵⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, p.10

⁶⁵⁷ i bid.

り、世界の GaN パワーファウンドリーの 50%以上が台湾によって保有されている⁶⁵⁸。現在、GaN パワー半導体の生産は低電圧セグメントに限定されており、少量のガリウムしか消費しないが、将来的にはバルク GaN 基板の開発に伴いガリウム消費が増すことが予想される⁶⁵⁹。前述したとおり、ガリウムは主に中国により生産される材料であるため、高電圧 SiC パワー半導体の開発は、重要な材料を中国に依存しないという利点をもたらすことから、米国のサプライチェーンにおいて重要な項目となっている。

SiC や GaN よりもさらに絶縁破壊電界の大きな半導体をウルトラワイドバンドギャップ半導体といい、AlN（窒化アルミニウム）、ダイヤモンド、酸化ガリウム（Ga₂O₃）等の材料が使用される⁶⁶⁰。こうした新しい材料が開発されることは、パワーデバイスの性能がより向上することにつながる。

ウルトラワイドバンドギャップ半導体

	Si	4H-SiC	GaN	β-Ga ₂ O ₃	Diamond	AlN
バンドギャップ (eV)	1.1	3.26	3.4	4.5	5.5	6.0
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	8.0	10	12

表1. 半導体材料のバンドギャップと絶縁破壊電界。

(図 17-5 ウルトラワイドバンドギャップ半導体の種類⁶⁶¹)

(2) 公的利用・安全保障における利用

前述したとおり、2022 年 8 月に国商務省産業安全保障局（BIS）が新たに中国に対して輸出管理対象として加えた半導体技術には、ウルトラワイドバンドギャップ半導体の製造に使用される酸化ガリウム（Ga₂O₃）とダイヤモンドが含まれた⁶⁶²。BIS によると、酸化ガリウムとダイヤモンドはより高い電圧

⁶⁵⁸ i b i d . , p. 11

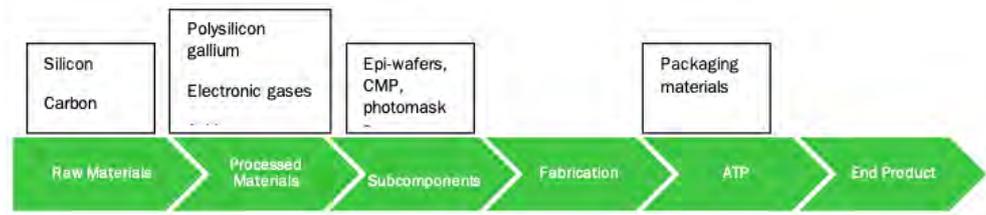
⁶⁵⁹ i b i d . , p. 14

⁶⁶⁰ NTT「世界初、窒化アルミニウムトランジスタを実現～カーボンニュートラルに貢献する次世代パワーデバイスの本命登場～」2022 年 4 月 22 日。https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html

⁶⁶¹ 同上。

⁶⁶² 甲斐野裕之「米商務省、半導体関連技術などを輸出管理対象に追加、「ワッセナー・アレンジメント」での合意を反映」JETRO、2022 年 8 月 15 日。https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/60bb3ad37d14bce5.html

や高温などの条件下で機能することが可能なため、軍事的な可能性を大幅に高めるために重要な技術である⁶⁶³。



(図 17-6 WBG 半導体のサプライチェーン⁶⁶⁴)

(3) 日本における技術開発

2021 年の経済産業省による『半導体・デジタル産業戦略』においても、革新素材である SiC、GaN、Ga₂O₃ による省エネ・低消費電力化は、グリーン・イノベーションを促進するため及び国内産業の強みを維持、強化するために重要である⁶⁶⁵と認識されており、製造基盤強化への支援が掲げられている。こうした政策に伴い、日本の様々な企業や研究機関がウルトラワイドバンドギャップ関連の技術開発に注力している。例えば、日本電信電話株式会社（NTT）は、2002 年に世界で初めて AlN の半導体化に成功し、2022 年には AlN を用いたトランジスタ動作に成功した⁶⁶⁶。この技術により、高品質の AlN が作成され、良好なオーミック特性を有する電極形成や理想的なショットキーが実現できる⁶⁶⁷。また、産総研は 2016 年に世界で初めてダイヤモンド半導体を用いた反転層チャネル MOSFET の動作実証に成功している⁶⁶⁸。さらに 2020 年より、産総研と名古屋大学が連携して研究プラットフォームである「GaN-

⁶⁶³ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。

⁶⁶⁴ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, pp. 9.

⁶⁶⁵ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021 年 6 月、18-19 頁。

⁶⁶⁶ NTT「世界初、窒化アルミニウムトランジスタを実現～カーボンニュートラルに貢献する次世代パワーデバイスの本命登場～」2022 年 4 月 22 日。 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html>

⁶⁶⁷ Ibid.

⁶⁶⁸ 産総研「世界初！反転層型ダイヤモンド MOSFET の動作実証に成功」2016 年 8 月 22 日。

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20160822/pr20160822.html

01L」を立ち上げ、窒化物半導体を用いたパワーデバイス技術と発光デバイスの開発に注力している⁶⁶⁹。2022年6月にはNEDO、名古屋大学、Mipoxが連携し、非破壊・低コストで半導体結晶ウェーハ内部の結晶欠陥を可視化し、製品の耐圧特性を劣化させる「キラークラック」を自動検査するシステムの共同研究を行った⁶⁷⁰。この技術は、SiCやGaNなどのパワー半導体の検査コストを低減し、業務効率を向上するために役立つとされ、シリコンウェーハの他に単結晶試料（SiC、GaN、ダイヤモンド、AlN、サファイアなど）の内部の転位、ウェーハ内部のひずみ、エピウェーハ内部の転位などの観察における活用が可能となる⁶⁷¹。

まとめ

脱炭素化社会からメタバースの実現に至るまで、次世代半導体の技術開発はデュアルユース全ての技術革新の鍵となっている。現状では、米国企業がEDA、GAAFET、AIチップ、ウルトラワイドバンドギャップ等の技術開発をリードしているが、日本企業も3DICのための半導体装置やマイクロエレクトロニクスの新材料の開発において重要な地位を占める。今後、2nmノード以下の次世代半導体の国内量産に成功できるかは、産学官が連携し、米国や台湾等の諸外国から最先端技術を学びながら、共同で半導体エコシステム全体の競争力を高めていくことが必須である。

⁶⁶⁹ GaN-O1L 「GaN-O1Lについて」（アクセス日2022年11月11日）。<https://unit.aist.go.jp/gan-oil/information/index.html>

⁶⁷⁰ 波留久泉「NEDOなど、半導体ウェーハ面内の転移分布やひずみ分布を可視化する技術を実用化」マイナビニュースTECH、2022年7月1日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220701-2385564/>

⁶⁷¹ Ibid.

第18節 宇宙技術とシステム (Space Technologies and Systems)

第二次世界大戦の末期に初めて使用された弾道ミサイルは、ローンチ・ヴィークルの開発につながり、戦後米国とソ連の宇宙開発競争を促進させた⁶⁷²。1957年にはソ連が初めての衛星であるスプートニク1号を打上げ、「スプートニク・ショック」が世界を駆け巡り、1969年には米国がアポロ11号の月面着陸に成功させた。この時代、宇宙での技術開発競争は、国の威信に直結していたのである。冷戦後、宇宙開発は競争から協調へと転じ、2011年には国際宇宙ステーションが完成する。国際宇宙ステーションでは、日本を含め多くの国々によって運営され、現在に至るまで様々な観測・実験が行われている⁶⁷³。他方、宇宙技術を巡る競争は近年再燃している。米国を筆頭に、各国は衛星コンステレーションの形成を目指し、いまだかつてない量の衛星が打ち上げられている。軍事・民生ともに、宇宙技術の影響を今まで以上に受けることは免れないだろう。

本稿では、現在とこれまでの宇宙技術と宇宙システムの各技術を簡潔に紹介し、その展望を示したうえで、軍事・国防／民用的利用のインプリケーションを提示する。各技術の利用用途はまだ実現されていないものも含め、包括的に取り上げ、各技術の重要性を判断する材料としたい。また、近年は政府主導のプロジェクトだけでなく、民間のスタートアップが主導するなどの新しい挑戦が増えてきている。特に米国では民間の宇宙ビジネスの拡大は目覚ましい。これらアクターの変化についても留意しながら、今後の方針や優先順位を踏まえ、政策提言としたい。

1. 軌道上の保守・組み立て・製造サービス (OSAM: On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing)

(1) 技術の概要

On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing (OSAM) とは、軌道上における衛星等の機器の保守・組み立て・製造のサービスを指す⁶⁷⁴。地球上から打ち上げられる衛星や探査機には、サイズ・重量・アップグレードの限界等、数々の制約があり、それらが自ずと宇宙空間における活動を制限し

⁶⁷² Aerospace, *A Brief History of Space Exploration*

[https://aerospace.org/article/brief-history-space-](https://aerospace.org/article/brief-history-space-exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20(about%20202%20miles).)

[exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20\(about%20202%20miles\).](https://aerospace.org/article/brief-history-space-exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20(about%20202%20miles).)

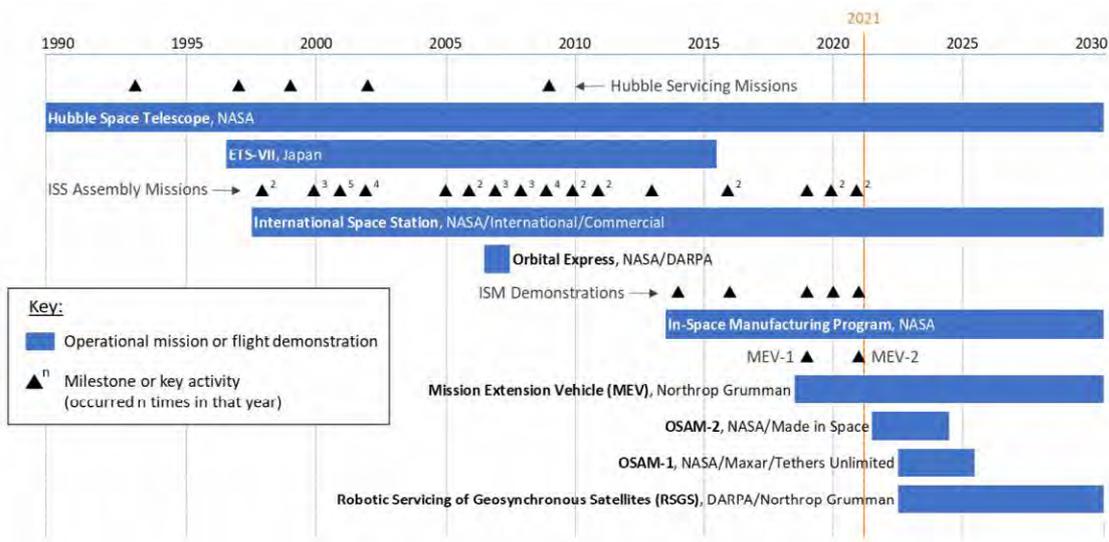
⁶⁷³ JAXA 国際宇宙ステーション(ISS)とは. Retrieved from: <https://humans-in-space.jaxa.jp/iss/about/>

⁶⁷⁴ 2022年4月、米国の国家科学技術会議はISAM (In-Space Servicing, Assembly, Manufacturing) に関する戦略を発表している。ISAMは軌道上だけでなく、月面を含む宇宙空間における活動を指す。対して、本節はあくまで軌道上におけるサービスについて取り上げていることを留意されたい。 [https://www.whitehouse.gov/wp-](https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf)

[content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf](https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf)

てきた。しかし、OSAM 技術の発展により、宇宙空間における活動の幅が広まり、より持続的で低コストの活動が可能になると考えられている⁶⁷⁵。具体的には、衛星の持続的な機能のアップデート・寿命の延長によるコスト削減が可能になるほか、研究目的の大型の探査機をより容易に地球上へ送り出すこともできる。

これまでも、1980 年代から国際宇宙ステーションやハubble宇宙望遠鏡において、宇宙飛行士の船外活動による保守や機器の取り換え作業が行われてきた。OSAM ではこれらのような作業を、地球から遠隔操作されたロボットによって完遂されることを目指している。現在、NASA は、OSAM-1、OSAM-2、Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) といった OSAM プロジェクトを予定している（図 18-1 参照）。



(図 18-1 NASA における OSAM 開発の経緯とこれから⁶⁷⁶)

また、日本では JAXA が静止軌道上で軌道上サービスを行う機能分散型のプラットフォーム構築を構想している⁶⁷⁷。

(2) 公的利用・安全保障における利用

⁶⁷⁵ NASA, “On-Orbit Servicing, Assembly, And Manufacturing (Osam) State Of Play, 2021 Edition “

https://aerospace.org/sites/default/files/2021-08/FY21_10570_CT0_State%20of%20Play_Emerging%20in%20Space_r7.pdf

⁶⁷⁶ i b i d.

⁶⁷⁷ JAXA 「燃料補給、機器交換～人工衛星の世界が劇的に変わる「軌道上サービス」～」

https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520_in_orbit_servicing/

ロボットアームを用いたスペースデブリの除去や、衛星の保守作業などのいわゆる軌道上サービス (On-orbit Satellite Servicing : OSS) については、他国の衛星の除去、破壊、妨害行為に使用される点が安全保障上の懸念として挙げられる。米国の戦略国際問題研究所 (CSIS) によると、2020 年には中国の衛星 SJ-17 が他の衛星に対して不自然な接近を繰り返していたことが報告されており、破壊・妨害行為のテスト運転なのではないかという懸念が広まった⁶⁷⁸。中国は他にも自身の宇宙ステーションにて、ロボットアームを利用した宇宙貨物の転移試験や船外活動を実施するなど、着実に OSAM のノウハウを蓄積している⁶⁷⁹。一方、米国 DARPA (国防高等研究計画局) は、RSGS (Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites) プログラムのもとで、衛星の修理・機器更新等を目的としたロボットアームの開発研究を進めている⁶⁸⁰。このように各国が研究開発を進める中で、OSAM 技術において優位な開発が進んでいないことにより、ASAT (衛星攻撃兵器) による非常時のリスクに十分対処しきれない状態は大いに想定される。

また、2022 年 3 月には、DARPA が軌道上での製造についてさらなる開発を進めるためのプログラムを始動した。当該プログラムでは、国防省の宇宙システムを制限なく構築するために、地球からの資源と月で採取された資源の両方を用いて、軌道上で製造を行うことを目指している⁶⁸¹。

(3) 民生利用

OSAM によって衛星の寿命を低コストで延長することができれば、それだけ打ち上げなければならない衛星の数を減らすことができ、打ち上げコストを削減することができる。通信衛星、地上測位衛星なども、軌道上で最新の部品を搭載することで高精度のパフォーマンスを維持でき、サービスの向上につながる。一方で、これらのサービスにはコストパフォーマンスの面から今後改善が必要なものもある。たとえばスペース・ロジスティクスが開発した人工衛星 MEV-1 は 2020 年 2 月に通信衛星インテルサット 901 にドッキングし、2025 年までの 5 年間、軌道修正を担うことになった⁶⁸²。しかし、仮に

⁶⁷⁸ CSIS, “Threat assessment 2021” (April 2021).

<https://www.csis.org/analysis/space-threat-assessment-2021>

⁶⁷⁹ 新華社 「中国の宇宙ステーション、ロボットアームによる宇宙貨物船転位に成功」

http://j.p.news.cn/2022-01/07/c_1310413424.htm

⁶⁸⁰ DARPA, “In-space robotic servicing program moves forward with new commercial partner.” (April 3, 2020). Retrieved from <https://www.darpa.mil/news-events/2020-03-04>

⁶⁸¹ DARPA, “DARPA Kicks Off Program to Explore Space-Based Manufacturing”

<https://www.darpa.mil/news-events/2022-03-23>

⁶⁸² 2 機の商業衛星の軌道上のドッキングは世界初だった。

MEV 衛星の寿命を 15 年間とすると、5 年間ずつつきっきりのサービスが必要なため、最大で 3 機にしかサービスを提供できず、コストパフォーマンスの面から新しい衛星を打ち上げた方がいいとする考えもある⁶⁸³。このような補助機能を搭載した衛星の開発がさらに進んでいけば、宇宙事業の参入障壁はさらに低くなっていくだろう。

2022 年には軌道上サービスに取り組む AstroScale（アストロスケール）と、「宇宙のガソリンスタンド」実現に取り組む Orbit Fab（オービット・ファブ）が、アストロスケールの寿命延長衛星 LEXI への燃料補給契約を結んでいる⁶⁸⁴。具体的には、軌道上で最大 1000kg のキセノン推進剤を注入しており、これによって LEXI のサービスミッションの範囲や柔軟性が拡大されるとしている。宇宙ビジネスが多様化していくにつれ、このような軌道上サービス会社間での新たなビジネスモデルも、今後増えていく可能性がある。

2. 汎用衛星バス (Commoditized satellite buses)

(1) 技術の概要

衛星は従来、いわゆる「一品物」であるため製造にはコストと時間が必要とされてきた。しかし、米国 DARPA を筆頭に衛星コンステレーション計画が各国で推し進められるなか、より低コストで手間のかからない衛星製造手段が模索されている⁶⁸⁵。その手段のひとつとして広く活用されているのが、衛星バスの標準化・汎用化だ。

人工衛星の「バス系」あるいは「バス部」とは、人工衛星の動作を支える基本的な部分のことであり、対してそれぞれのミッションを遂行するために必要な部分を「ミッション系」あるいは「ミッション部」と呼ぶ⁶⁸⁶。前者を標準化することで、衛星開発会社は標準のインターフェース上に実験装置を設計することが可能になり、搭載する機器も安価で汎用的なものを使用できるようになる。また、

⁶⁸³ JAXA、「燃料補給、機器交換～人工衛星の世界が劇的に変わる「軌道上サービス」～」

https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520_in_orbit_servicing/

⁶⁸⁴ AstroScale, “AstroScale U.S. and Orbit Fab Sign First On-Orbit Satellite Fuel Sale Agreement”

<https://astroscale.com/astro-scale-u-s-and-orbit-fab-sign-first-on-orbit-satellite-fuel-sale-agreement/>

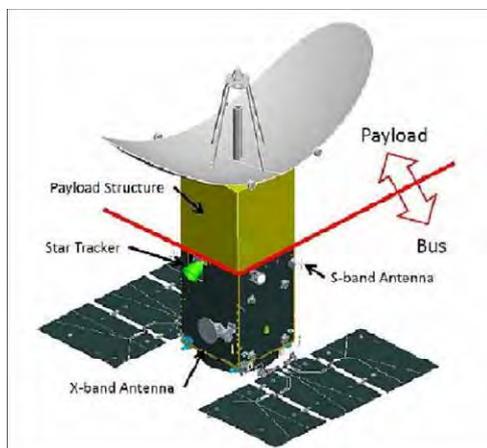
⁶⁸⁵ US Department of Defense “Space Development Agency Director, Dr. Derek Tournear, Holds a Briefing on Tranche 1 Tracking Layer Contract Awards”

<https://www.defense.gov/News/Transcripts/Transcript/Article/3098047/space-development-agency-director-dr-derek-tournear-holds-a-briefing-on-tranche/>

⁶⁸⁶ JAXA「ミッションの決定」サテナビ satellite navigator

<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/satellite-knowledge/satellite/mission/index.html>

使い回しをすることも可能だ。これら要因によって、製造コストと参入障壁の低下が可能になる⁶⁸⁷。量産体制が可能になることによって、軍事・国防用だけでなく、民生のマーケット拡大・サービスの多様化にも貢献しており、現在では主に通信衛星などの商用の衛星には共通の衛星バスが用いられている。



(図 18-2 NEC の ASRARO-2、赤線より下がバス部⁶⁸⁸)

近年では、衛星コンステレーションの需要に伴い、小型衛星の標準バス開発が進められている。米国の Airbus (エアバス) は、小型衛星プラットフォーム「ARROW」の標準バスを開発し、通信衛星・地表測位など多様なサービスに対応するとしている⁶⁸⁹。また、DARPA が進める低軌道上での衛星コンステレーション計画「Blackjack」プロジェクトには、安価で高頻度のアップグレードが可能な標準衛星バスの開発も含まれている⁶⁹⁰。サプライ・チェーン上の問題で当初の予定より遅れたものの、2022 年には Blue Canyon Technologies が Blackjack に使用される小型衛星バスを初納入された⁶⁹¹。

⁶⁸⁷ Alex Knapp “Industry Veteran And Satellite Startup Join Forces To Industrialize Space”

<https://www.forbes.com/sites/alexknapp/2017/03/03/industry-veteran-and-satellite-startup-join-forces-to-industrialize-space/?sh=2795db2a1c09>

⁶⁸⁸ eo portal powered by ESA “ASRARO-2”

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/asraro-2>

⁶⁸⁹ Airbus “ARROW Small Satellite Platform for LEO Constellations”

<https://airbus.com/leo-constellations/>

⁶⁹⁰ DARPA “BLACKJACK”

<https://www.darpa.mil/program/blackjack>

⁶⁹¹ Blue Canyon Technologies “Blue Canyon Technologies and Seakr Engineering deliver first flight unit and payloads for DARPA Blackjack program”

(2) 公的利用・安全保障における利用

低軌道上に小型衛星を多数配置することが可能になれば、世界全域での高速大容量通信が可能になるだけでなく、衛星に対する妨害行為があったとしても、すべての小型衛星を対象とすることは難しくなるため、抗たん性が上がると考えられている。このようなコンステレーションの形成には高性能の衛星バスが必要不可欠である。

(3) 民生利用

衛星バスの量産を利用して、民間にパッケージ化したサービスを提供しようとする動きもある。例えば、日本のアクセルスペースは、2022年4月に小型衛星量産体制を活用した新サービス「Axel Liner（アクセルライナー）」を発表した⁶⁹²。このサービスでは、高性能な汎用衛星バスシステムを開発することで、受注から最短1年以内で軌道上のサービスインを目指せるようになり、さらにミッション系の開発も受け持つことで宇宙事業をパッケージとして売り出す⁶⁹³。これまでは企業が宇宙事業を始めようとするスタートラインに立つまでに時間がかかったが、プロジェクトをパッケージ化することで、衛星データを利用したい企業からの需要が増えることが期待される。

3. 低コストのローンチ・ヴィークル

(1) 当該技術の概要

ローンチ・ヴィークル（衛星打ち上げロケット）とは、衛星を軌道上まで運ぶためのロケットである。ローンチ・ヴィークルは1950年代、60年代にかけて開発された弾道ミサイルが技術的土台となり、その後各国で開発が進められてきた。

各国が衛星コンステレーションの形成を目指すなか、ローンチ・ヴィークルにも低コスト化が求められている。下図は、低軌道（LEO）への1kgのペイロードあたりにかかるコスト（21年度ドル基準）を示したグラフである⁶⁹⁴。最大ペイロードによって色分けされており、濃い青、薄い青、オレンジの

<https://www.bluecanyontech.com/news/blue-canyon-technologies-seakr-engineering-deliver-first-flight-unit-and-payloads-for-darpa-blackjack-program>

⁶⁹² AXELSPACE 「アクセルスペース、日本初となる小型衛星量産体制を活用した新サービス『Axel Liner』を発表」

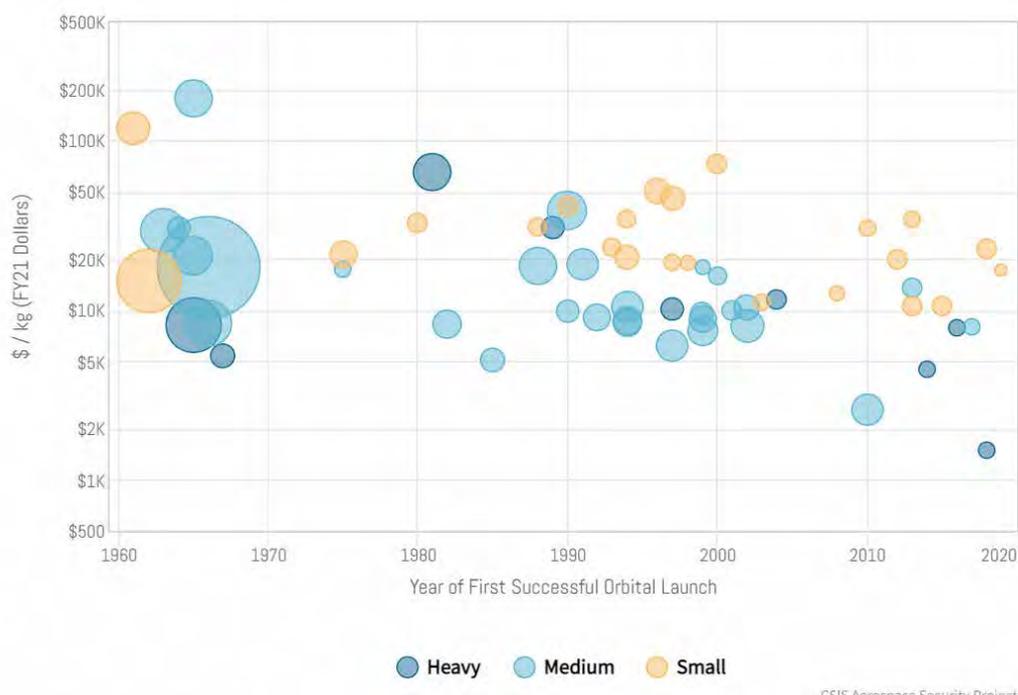
https://www.axel-space.com/ja/news/press_20220426/

⁶⁹³ i b i d.

⁶⁹⁴ AEROSPACE SECURITY “Space Launch to Low Earth Orbit: How Much Does It Cost?”

<https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/>

順に軽量化していく。特に近年は、ペイロードの大きいものに比べて、小さいものの方が kg あたりのコストが高いことがわかる。



(図 18-3 ローンチ・ヴィークルのコスト比較⁶⁹⁵)

(2) 近年の開発動向

ローンチ・ヴィークルのコストを低くする試みは、近年米国の SpaceX の試みによって一つの転機を迎えた。Space X は 1 段ブースターの回収・再利用ができるロケット「Falcon 9」を 2010 年に打ち上げ、2018 年にはより重いペイロードを運べる「Falcon Heavy」を打ち上げた^{696,697}。Falcon 9 は 2022 年 11 月現在、186 回打ち上げられ、そのうち 123 回が再利用による打ち上げとなっている⁶⁹⁸。このように、もっともコストのかかるロケット部分を再利用することで、大幅なコスト低下が実現された。実際に上図で最も縦軸（1kg あたりのコスト）の数値が低い濃い青色の円は Falcon Heavy を、次に縦軸の数値が低い薄い青色の円は Falcon 9 を示している。

また、近年の傾向として衛星コンステレーションを形成するための小型衛星打ち上げ需要の高まりが挙げられる。これに対して、小型衛星用の軽量ローンチ・ヴィークル開発や「相乗り（ライド・シ

⁶⁹⁵ Ibid.

⁶⁹⁶ Space X “Falcon 9” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>

⁶⁹⁷ Space X “Falcon Heavy” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>

⁶⁹⁸ Space X “Falcon 9” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>

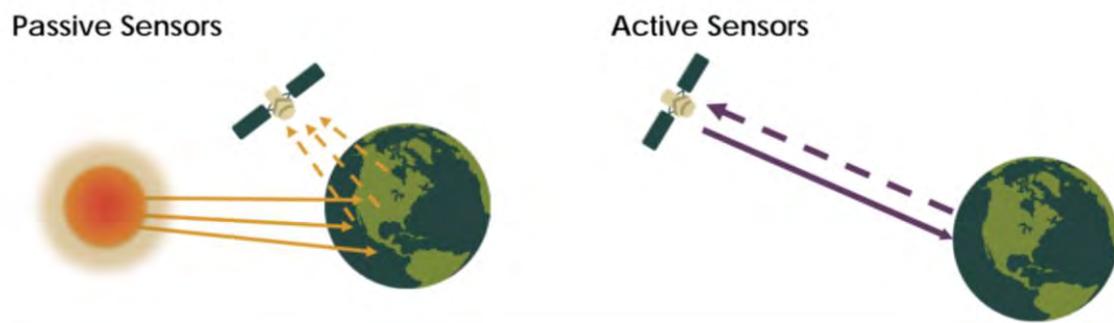
エアリング)」とって複数の衛星を1度の打ち上げでまとめて軌道に送るといった方法が採用されている。

ローンチ・ヴィークルの低コスト化が進むことによって、民間が衛星を打ち上げる際のコストが抑えられ、宇宙ビジネスが参入しやすいものになり、さらに開発が加速化するという正のスパイラルが期待される。

4. 衛星によるリモートセンシング

(1) 当該技術の概要

「物を触らずに調べる」技術であるリモートセンシングのうち、人工衛星に専用の測定器（センサ）を載せて、地球上を観測することを衛星リモートセンシングと呼ぶ⁶⁹⁹。代表的なセンサの種類としては、太陽光の反射を図る光学センサ、センサから発射したマイクロ波を反射させて測定する能動型マイクロ波センサ、対象物が放射するマイクロ波を測る受動型マイクロ波センサなどがある。



(図 18-4 光学センサ（左）と能動型マイクロ波センサ（右）⁷⁰⁰)

センサの種類によって、様々な利用用途が想定される。例えば、受動型の光学センサであれば、砂漠化した土地の識別・都市の表面温度把握・海面温度やエルニーニョ現象発生 of 把握、能動型の光学センサであれば氷河の氷の高さ、大気中の雲、エアロゾル、黄砂の状況把握等である。

⁶⁹⁹ 一般財団法人リモート・センシング技術センター「リモートセンシングとは？」

<https://www.restec.or.jp/knowledge/sensing/sensing-1.html>

⁷⁰⁰ NASA “What is Remote Sensing?”

[https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-](https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#:~:text=Remote%20sensing%20is%20the%20acquiring,record%20reflected%20or%20emitted%20energy.)

[sensing#:~: text=Remote%20sensing%20is%20the%20acquiring, record%20reflected%20or%20emitted%20energy.](https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#:~:text=Remote%20sensing%20is%20the%20acquiring,record%20reflected%20or%20emitted%20energy.)

種類	観測方法※2	センサ	特徴	利用例
光学センサ	受動型	<ul style="list-style-type: none"> 光学画像センサ スペクトロメータ 	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波センサより高い解像度を持つ画像データを収集できる 細かい波長間隔で特定点のデータを取得(非画像データ)できる 	<ul style="list-style-type: none"> 砂漠化した土地の識別、都市の表面温度把握・海面温度・エルニーニョ発生の把握等 洪水氾濫状況と水稲の被害把握、鉱物マップ作成、乾燥地の植生把握、温室効果ガスの測定等
	能動型	<ul style="list-style-type: none"> ライダー 	<ul style="list-style-type: none"> レーザを光源とし、高度計や距離測定、大気中の雲やエアロゾルや黄砂等の微量粒子測定、原子・分子密度および気温・風速などの空間分布観測まで用途先が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 水河の水の高さ、大気中の雲、エアロゾル、黄砂等の把握等
マイクロ波センサ	受動型	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計(イメージャ、サウンダ) 	<ul style="list-style-type: none"> 地表面観測を目的とし画像データを収集したり(イメージャ)、大気観測を目的とし、観測する方向に1次元的な観測をする(サウンダ)、サウンダの位置/観測方法を変えて3次元的な観測も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 森林火災検知、気象予報の精度向上、漁場情報の提供等
	能動型	<ul style="list-style-type: none"> レーダ(例:合成開口レーダ、マイクロ波高度計、マイクロ波散乱計、降雨・雲レーダ) 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星からパルス状の電波を発信し、対象物からの戻り時間から距離を計測、また対象物の大きさ/電気的性質の違いから散乱(対象物からのパルスの再放射)の違いがあるため、この違いを利用して観測を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 降雨観測(気象予報)、地形図作成(空中写真撮影が困難な離島含む)、ハザードマップ作成、地震の家屋倒壊率、洪水氾濫状況と水稲の被害把握、油汚染状況把握(例:メキシコ湾の原油流出)、洋上風力発電の資源推定、海上風推定、漁場探査等

※1 一般的に、数100MHz～数10GHzの周波数(波長換算で0.001m(=1mm)～1m)の電磁波を指す

※2 受動型はアンテナと受信機で構成され、観測対象自身から放射または反射・散乱される電磁波を観測し、一方で能動型は電磁波送信機と受信機、アンテナで構成され、電磁波を衛星センサから観測対象に向けて放射しその反射を観測するものとする

(図 18-5 利用する電磁波の種類と用途⁷⁰¹)

リモートセンシングの歴史自体は1世紀も前に遡る。当初はバルーンにカメラをくくりつけるような原始的な仕組みであったが、やがて V2 ロケットに搭載されたカメラが静止画像を捉えることに成功し、その後の米国の偵察衛星計画コロナや、1972年に運用が開始された米国の地上観測衛星ランドサットへとつながっていった⁷⁰²。その後、1978年には初の SAR (合成開口レーダー) 衛星である SEASAT が打ち上げられた。夜間や悪天候時でも地上を観測できるこのレーダーは、ノイズが多いうえに、サイズが大きく費用も高額だった。しかし近年、技術革新や部品の汎用化によって、SAR 衛星の小型化・低価格化が進んでいる。加えて、AI による画像処理機能も向上したため、新たなデータ利用方法に期待がかかっている。また、SAR 衛星のコンステレーションによって、準リアルタイムで地球上の詳細な映像データを把握できることになり、多面的な活用が想定されている。

リモートセンシング衛星の打ち上げ数は、米国が他国を大きく離して1位の座を維持している。しかし、近年では、2位の中国がリモートセンシング衛星を積極的に打ち上げている。中国は2022年8月20日に「遥感三十五号04組」を、同年11月15日に「遥感三十四号04組」を打ち上げ、軌道に

⁷⁰¹ NTT DATA 「衛星リモートセンシングデータ活用の現状及び展望」

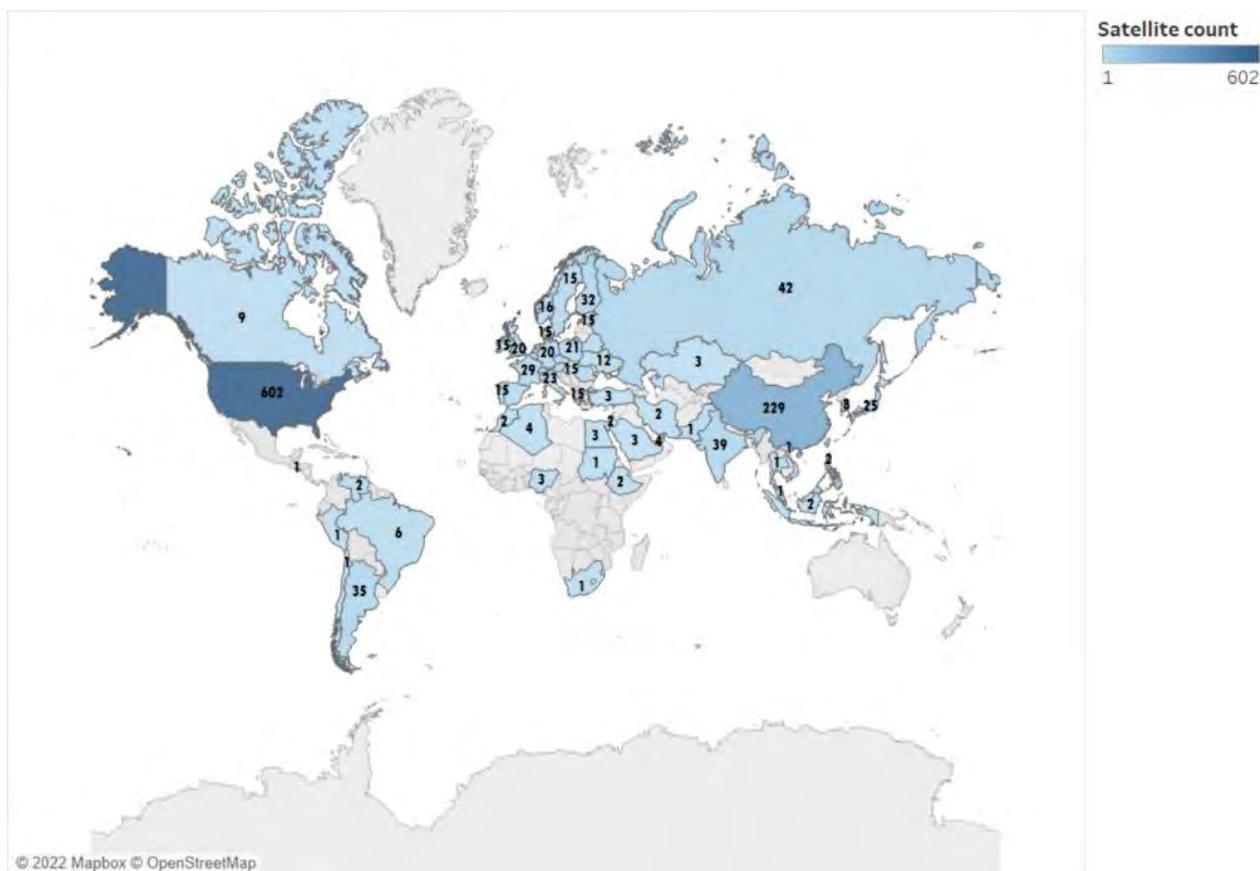
https://www.soumu.go.jp/mai_n_content/000534398.pdf

⁷⁰² DRAGONFLY aerospace “HOW REMOTE SENSING SATELLITES WORKS”

<https://dragonflyaerospace.com/how-remote-sensing-satellites-works/>

送り届けることに成功した⁷⁰³。中国政府によると、リモートセンシング衛星は土地資源調査、郊外開発、農作地の予想、災害の防止や被害軽減のために利用されるとのことだが、軍事利用される可能性も否定はできない。

下図の通り、中国が打ち上げたリモートセンシング衛星の数は米国の 602 基には及ばないものの、229 基と 3 位以下を大きく離している。次いでロシア、インド、ブラジルとなり、日本の打ち上げ数は 25 基となっている⁷⁰⁴。また、政府による打ち上げも増えてはいるものの、増加分のほとんどは民間の打ち上げによるものである。これら民間のリモートセンシング衛星をいかに国防につなげていくかは、各国が直面している課題の 1 つである。



(図 18-5 利用する電磁波の種類と用途⁷⁰⁵)

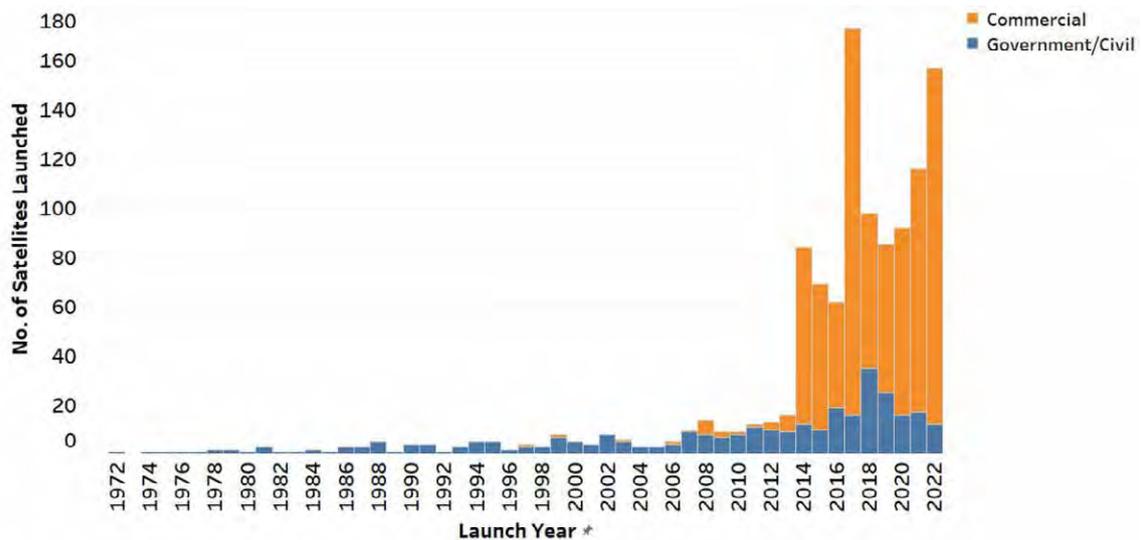
⁷⁰³ Xinhua “China launches Yaogan-34 remote sensing satellite”

<https://english.news.cn/20221115/0e423f640d4a46b8830e65b85632d274/c.html>

⁷⁰⁴ 2022 年 9 月 9 日現在

⁷⁰⁵ NTT DATA 「衛星リモートセンシングデータ活用の現状及び展望」

https://www.soumu.go.jp/main_content/000534398.pdf



(図 18-7 リモートセンシング衛星の内訳 (オレンジが民間、青が政府系) ⁷⁰⁶)

(2) 公的利用・安全保障における利用

リモートセンシング衛星及びそれらのコンステレーションは、戦況把握、弾道ミサイルの早期警戒や海洋状況監視 (MDA)、防災、不審船対策を含める対テロ等に広く活用が見込まれる⁷⁰⁷。また、従来であれば、衛星から取得した画像を生身の人間が確認する必要があったが、AI の画像認識機能が向上するとともに、より大量の画像を処理させて経済安全保障上の脅威を早期に予想・予防することも期待される⁷⁰⁸。しかし、精確な現状把握・予測を行うためには、高精度の衛星画像と処理能力が必要であり、米国では民生のリモートセンシング衛星から画像を買い取るなどの措置が必要だとする主張もある。

日本でも NEC や三菱電機が JAXA と共同で SAR 衛星の小型化・高性能化を進めるなど、官民共同で開発が行われている。リモートセンシング衛星が取得した画像は国防上の利用価値があるため、その取扱いについては十分な議論をする必要がある。最近では、ロシアの侵攻を受けて、ウクライナが日本政府に SAR 衛星の画像データを求めていたことが報じられた⁷⁰⁹。

⁷⁰⁶ USGS “Land Remote Sensing Satellites”

<https://www.usgs.gov/calval/land-remote-sensing-satellites>

⁷⁰⁷ 渡辺 (2020) 「衛星リモートセンシングの活用について -海洋安全保障応用を中心として-

https://www.mod.go.jp/msdf/navcol/assets/pdf/ssg2020_04_09.pdf

⁷⁰⁸ Harrison Todd “Commercial Space Remote Sensing and Its Role in National Security” CSIS

<https://www.csis.org/analysis/commercial-space-remote-sensing-and-its-role-national-security>

⁷⁰⁹ 日経新聞「ウクライナ、日本に衛星データ要請 情勢見極め政府判断」2022年3月17日

<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UA16AXP0W2A310C2000000/>

(3) 民生利用

民間のリモートセンシング衛星の打ち上げは、米国を中心に 2010 年代から急増しているが、日本ではまだ十分に民生で活用されているとは言い難い。実際の用途としては、土地資源の管理・開発（環境保護や都市計画への活用）、海洋資源の管理・開発（漁場予測など）、農作物の収量推定に必要な二次データの提供、洪水モニタリング機能などリスク管理による保険分野への応用、樹木による炭素固定量の把握（カーボン・クレジットへの活用）など多岐に渡り、情報の量と質が向上するほど民生での活用の幅が広がる⁷¹⁰。現在、ネットで蓄積されている個人に紐づく情報がビッグデータとしてターゲティング広告に活用されているように、膨大なデータの収集と自動化された情報分析によって、地球上の些細な変化に基づく様々な予測が可能になっていくと考えられる。リモートセンシング衛星の打ち上げ数だけでなく、これら民間での応用ビジネスがいかに広がっていくかが、今後の日本にとっても重要になってくる。

5. 宇宙機の推進法

(1) 技術の概要

現在、宇宙機の推進法としては①化学推進 ②電気推進 ③推進剤不使用、の3種類が挙げられ、実用化されているのは主に①と②である⁷¹¹。

①の化学推進は、宇宙開発の黎明期より使用されてきた推進法であり、燃焼などの化学反応を利用して推進力を得る方法だ。ヒドラジンを推進剤とするもの、その他推進剤を利用するもの、極低温液体推進剤を利用するもの、ハイブリッド型、固形推進剤を利用するものなどがあり、いずれも化学反応によってガスを噴射させ、その噴射の力を推進力として利用している。化学推進はコンパクトで強力な推進方法として、打ち上げロケットには必須とされてきた。

②の電気推進は、電気ので物質を加速して推進する方法だ。電気推進の特徴は排気速度が大きく取れることにあり、さらに宇宙機の質量を軽くできる点にある。日本のはやぶさ2などに使われているイオンエンジンも電気推進の1つであり、燃料をプラズマ化してプラスとマイナスのイオンに分け、そのうちプラスのイオンを静電気で加速させる⁷¹²。イオンエンジンは、電気推進の中でも特に燃費がいいのが特徴だ。他にも MPD（マグネットプラズマ・ダイナミック・エンジン）アークジェットやホー

⁷¹⁰ 藤井達人 「『宇宙×金融』さまざまな分野で活用が進む衛星データ | お金とテクノロジーの未来 vol.2」 XTECH

<https://xtech.mec.co.jp/articles/7882>

⁷¹¹ NASA “In-space Propulsion” <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/in-space-propulsion>

⁷¹² JAXA 「イオンエンジンだけじゃない、電気推進ってなんだ？」 <https://fanfun.jaxa.jp/feature/detail/10926.html>

ルスラスタ、VASIMR（比推力可変型プラズマ推進器）などがあり、化学推進と比べて活用された実績は少ないものの、それぞれの特徴に合わせて用途別に利用・実験されている。電気推進は、燃費はいいが力は弱いというイメージを持たれがちだが、必ずしもそうではなく、理論的にはエネルギーを投入するだけ力が出せるエンジンのため、光の速さをも超越できるという。また、電気推進の利点として、衛星の軌道維持に利用することで打ち上げコストが抑えられることも挙げられる⁷¹³。

③の推進剤不要のものとしては、太陽の光を受けて推進するソーラーセイル（太陽帆）、自転する惑星との間で惑星の磁場を介して運動量が交換されるエレクトロダイナミックテザー、そして実証には至っていないものの核熱推進（NTP）システムなどが挙げられる⁷¹⁴。



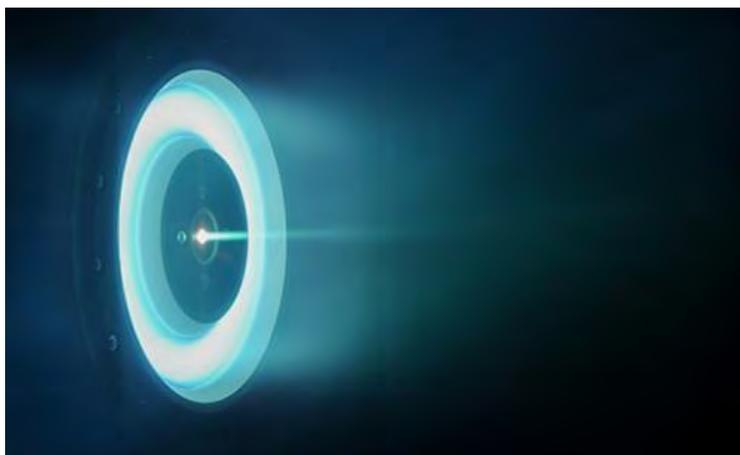
(図 18-8 MPD アークジェット。パワーはあるが、大電力が必要⁷¹⁵)

⁷¹³ mi nsaku 「ロケットエンジンの種類と、電気推進(イオンエンジン)の仕組み～超小型衛星に載せるエンジン開発の最前線(前編)」 <https://mi nsaku.com/arti cles/post819/>

⁷¹⁴ NASA “In-space Propulsion” <https://www.nasa.gov/small sat-i nsti tute/sst-soa/i n-space-propul si on>

⁷¹⁵ JAXA 「イオンエンジンだけじゃない、電気推進ってなんだ？」

<https://fanfun.jaxa.jp/feature/detai l/10926.html>



(図 18-9 ホールスラスタ (イメージ) ⁷¹⁶⁾

日本で大きな注目を集めた小惑星探査機「はやぶさ」で使用されているイオンエンジンの $\mu 10$ エンジンは運転時間が 4 万時間にも及び、推力や耐久性共に「はやぶさ 2」では向上している。今後は電圧を上げてさらに燃費と推力を上げた $10\mu\text{HISp}$ という次世代型エンジンの開発に期待がかかっている⁷¹⁷。また、イオンエンジンの燃焼材として水を使った水推進のエンジン開発も進んでおり、東京大学と JAXA が共同開発した超小型探査機「エクレウス (EQUULEUS)」に搭載されている。

米国では、DARPA が NPT システムの開発を DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations) プログラムとして公表しており、2026 年度の実現を目指している⁷¹⁸。DRACO プログラムによると、NPT システムは原子炉の高熱で推進剤を加熱膨張させ、高温の推進剤を放出することで推進を得る方法で、化学推進の 2～5 倍の効率で推進力を生みだし、地球と月などの長距離の有人飛行には重要な推進方法になるとしている。

(2) 公的利用・安全保障における利用

宇宙空間における推進方法は、衛星コンステレーションのコスト削減、衛星の軌道維持、OSAM への応用などを考慮すると、その技術的影響は多岐に渡る。また、国の威信をかけた宇宙における長距離の有人飛行にも、新しい推進方法の研究開発は大きな影響を持つ。従来の推進方法では惑星間の移動に時間がかかりすぎてしまい、人体に有害な放射線を被ばくしすぎてしまうからだ。DARPA の戦略テクノロジー局のネイサン・グレイナー氏は、「宇宙における機動力は、推進方法の制限によって地球上

⁷¹⁶ Ibid.

⁷¹⁷ Ibid.

⁷¹⁸ DARPA “DARPA Seeks Proposals Leading to In-Space Demonstration of Nuclear Thermal Rocket”

<https://www.darpa.mil/news-events/2022-05-04>

より難しくなっている。宇宙技術分野での優位性を保つためには、DRACO プログラムが提供する躍進的な推進方法が必要だ」としている⁷¹⁹。米国はアルテミス計画で月面に人を、その先には火星に人を送ることを目標としており、日本も日本人宇宙飛行士初の月面着陸や月面探査活動などへの参加に意欲を示し交渉を続けている⁷²⁰。

(3) 民生利用

推進法の開発によって、民間企業は衛星の打ち上げコストを抑えられるだけでなく、ビジネス領域の拡大も図れる。例えば米国が開発する核熱推進（NPT）システムが実現すれば、宇宙での有人飛行がより現実味を帯びてくる。また、宇宙における推進方法の開発は宇宙旅行ビジネスや、現在の移動速度では実現不可能な宇宙サービス提供の可能性も広げ、より多くの人々へ宇宙ビジネスを提供するきっかけとなりうる。

6. 宇宙ベースの測位・航法・タイミング（PNT：Position, Navigation, and Timing）とその抗たん性

(1) 技術の概要

米国の運輸省によると、PNT とは以下の3つの機能を指す。①測位：世界測地系（WGS84）などの標準的なシステム上で、精確に所在地を特定する機能、②航法：目的とすべき所在地を特定し、コースや速度を修正する機能、③タイミング：世界のどこからでも、適した標準時の時刻を精確に特定する機能、である⁷²¹。上記の3機能と地図データなどを合わせたサービスがGPS（Global Positioning System）であり、軍事だけでなく民生においても今や欠かせないツールの一つとなっている。このようなPNTサービスは、宇宙空間にある衛星から発信される信号によって成り立っている。例えば、GPSで現在地を特定する場合、現在地と複数の衛星との距離をそれぞれ電波で測り（電波が発信されてから受信されるまでの時間を測ることによって距離が測定される）、それぞれの衛星を中心とした「球」の交わる場所が現在地であると特定できる⁷²²。

⁷¹⁹ Ibid.

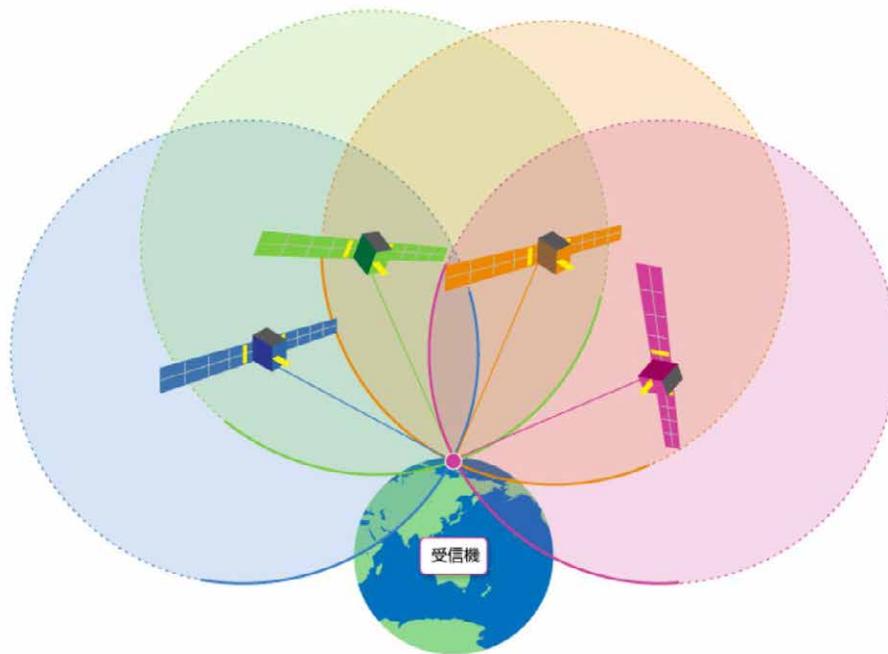
⁷²⁰ 文部科学省 「永岡大臣がネルソン NASA 長官と宇宙分野の協力について意見交換」

https://www.mext.go.jp/b_menu/acti_vity/detail/2023/20230206.html

⁷²¹ U.S. Department of Transportation “What is Positioning, Navigation and Timing (PNT)?”

<https://www.transportation.gov/pnt/what-positioning-navigation-and-timing-pnt>

⁷²² 日経新聞 「GPSでどうして自分のいる位置がわかるの？」



実際には、衛星から受信機までの距離は「円」ではなく「球」で捉えられ、球が交差する点で受信機の位置が特定できる。

(図 18-10 GPS による現在地の特定方法⁷²³)

(2) 近年の開発動向

GPS を生み出した米国では、近年 PNT のレジリエンス（抗たん性）を向上させようとする動きが政府に見られる。例えば 2020 年 2 月 12 日、米国のトランプ元大統領は大統領令 13905 号（PNT サービスの責任ある使用による国家レジリエンスの強化）を発出した。この大統領令では、PNT サービスが様々なインフラ機能に使用されている現在、これらの機能障害・妨害が国家安全保障に大きな影響を与えることを確認し、重要なインフラを担う事業者の責任ある使用を政府が促す必要があるとした⁷²⁴。その後、この大統領令は 2021 年 1 月 15 日の、宇宙ベースの測位・航法・タイミング（PNT）に関する大統領覚書（宇宙政策指令 7 号）によって補足されている⁷²⁵。

PNT の抗たん性を向上させる方法としては、従来の PNT と新技術（AI、5G、量子センサ、高軌道におけるプラットフォームの設立など）を組み合わせることでサービスの信頼性・効率・安全性を向上

⁷²³ 同上

⁷²⁴ NATIONAL ARCHIVES “Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing Services” <https://www.federalregister.gov/documents/2020/02/18/2020-03337/strengthening-national-resilience-through-responsible-use-of-positioning-navigation-and-timing>

⁷²⁵ White House “Memorandum on Space Policy Directive 7”

<https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-space-policy-directive-7/>

させることや、GNSS など PNT サービスに必要な機能の保護・代替機能の準備をしたりすることが挙げられる⁷²⁶。ジャミングを検知するために、近年では GNSS を利用する機器に専用のソフトウェアをインストールし、全体のシステムが汚染される前に PNT の情報を無効化する手法も用いられている⁷²⁷。

その他の国々でも、GPS に依存しない PNT の方法が模索されている。日本では、2016 年に閣議決定された「宇宙基本計画」において、23 年度を目途に米国の GPS に頼る必要がなくなるよう、日本版の GPS を担う衛星「みちびき」の 7 基体制を確立するとしている⁷²⁸。また、中国では 2022 年から北斗衛星測位システムが大規模な応用発展段階に入り、北京市、上海市、江蘇省などの地域は、「北斗」と 5G、IoT、AI、ビッグデータなどとの融合を推奨・支援し、交通、物流、介護、医療など複数の分野で大規模なプロジェクトを推進している⁷²⁹。他にも、欧州宇宙機関（ESA）は NAVISP（Navigation Innovation and Support Program）を立ち上げ、PNT 分野の革新的な開発を目指している⁷³⁰。

(3) 民生利用

PNT サービスは公的利用だけでなく、民生利用にも大きな影響を持つ分野だ。上述した中国の北斗衛星測位システムの発展に伴い、21 年の中国衛星ナビ・位置情報産業の総生産高は 20 年比 16.29%増の 4690 億元に成長し、特許出願件数は 9 万 8 千件を突破したという⁷³¹。中国衛星ナビゲーション測位協会の于賢成会長は、「北斗はスマート交通、スマートエネルギー、スマート農業及び利水・治水、スマート製造業などの分野での応用で形成されたデジタル化シーンにおいて、新たな細分化された市場を絶えず形成し、中国衛星ナビ・位置情報サービスの全体的な市場規模をさらに拡大させた」と述べている⁷³²。

⁷²⁶ orolia “Understanding Resilient PNT for Defense” <https://www.rolia.com/understanding-resilient-pnt-for-defense/>

⁷²⁷ i b i d.

⁷²⁸ 内閣府 「宇宙基本計画」 <https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan3/plan3.pdf>

⁷²⁹ 日経 BP 総合研究所 「中国北斗衛星測位システムが大規模応用発展の新たな段階へ」

<https://project.nikkeibp.co.jp/bpi/atcl/column/19/053100309/>

⁷³⁰ ESA “WHAT IS NAVISP” <https://navisp.esa.int/>

⁷³¹ i b i d.

⁷³² i b i d.

また、日本では「みちびき」が発信する補強信号と呼ばれる特殊な信号を受信することで、位置情報の誤差を6センチ以内にとどめることができるようになり、自動車の自動運転、農作業の無人化、小型無人機ドローンによる配達サービスなど、精緻な位置情報のビジネス利用が期待されている⁷³³。

7. 極低温流体管理技術 (CFM : Cryogenic Fluid Management)

(1) 技術の概要

近年、月・惑星への軌道間輸送機の必要性が高まるなか、極低温液体推進剤を利用した高比推力のロケットエンジンを、いかに長期間利用可能とするかが課題となっている。日本の基幹ロケット H2A (−235°Cの液体水素と、−183°Cの液体窒素を推進剤として採用) のように、極低温液体推進剤を利用したロケットは、タンク内の推進剤が太陽熱などによって容易に蒸発して失われてしまい、長期間の使用に適していないからだ⁷³⁴。例えば、現在では使用前数時間なら保管が可能だが、今後のミッションでは数年間の保管が必要となる場合も想定される。そのため、より長期間にわたり極低温流体推進剤を管理する方法が求められている。

宇宙空間での極低温流体管理技術に関しては、1980年代から NASA を中心に研究が進められてきた⁷³⁵。軌道間輸送機の推進方法として極低温流体推進剤が採用されようが、あるいは前述の核熱推進が採用されようが、極低温流体管理技術 (CFM) は必用不可欠な技術とされていることに違いはない。CFM は、核熱推進を支える技術でもあるからだ。また、極低温流体推進剤は月・惑星の表面においても製造可能であるため、軌道間輸送機などが実現すれば、月周辺のゲートウェイを経由し、他の惑星へ至る道を整備することが可能となる⁷³⁶。



⁷³³ 内閣府 「みちびきを利用した実証事業」 <https://qzss.go.jp/ex-demo/>

⁷³⁴ 名古屋大学大学院 衝撃波・宇宙推進研究グループ 「Cryogenic Liquid Propulsion (極低温液体推進)」
<http://akagi.nuae.nagoya-u.ac.jp/research/cryo/>

⁷³⁵ 河南 (2001)

⁷³⁶ 名古屋大学大学院 衝撃波・宇宙推進研究グループ

(図 18-11 月面の水の電気分解プラントと液体水素・液体酸素貯蔵設備⁷³⁷⁾)

NASA は CFM のうち温度管理（受動的/能動的）、圧力管理などの大きな分野を、さらに細かい 25 の技術に分別し、それぞれのロードマップを作成している⁷³⁸。下記の図は 25 の技術分野を示している。

Technology	No	Technology	No
Advanced External Insulation	1	Propellant Densification	14
Autogenous Pressurization	2	Propellant Tank Chilldown	15
Automated Cryo-Couplers	3	Pump Based Mixing	16
Cryogenic Thermal Coating	4	Soft Vacuum Insulation	17
Helium Pressurization	5	Structural Heat Load Reduction (Active)	18
High Capacity, High Efficiency Cryocoolers 20K	6	Thermodynamic Vent System	19
High Capacity, High Efficiency Cryocoolers 90K	7	Transfer Operations	20
High Vacuum Multilayer Insulation	8	Tube-On-Shield Broad Area Cooling	21
Liquefaction Operations	9	Tube-On-Tank Broad Area Cooling	22
Liquid Acquisition Devices	10	Unsettled Liquid Mass Gauging	23
Low Conductivity Structures (Materials)	11	Valves, Actuators & Components	24
Line Chilldown	12	Vapor Cooling	25
Para to Ortho Cooling	13		

(図 18-12 25 の技術分野⁷³⁹⁾)

8. 大気突入、降下、着陸

(1) 技術の概要

月や火星への探査が本格的に進む中、探査機の大気突入、降下、着陸（EDL：Entry, Descent, Landing）はミッションの成否を決定づける段階の一つである。NASA が行った 2020 年の火星探査ミッションにおいても、探査機の EDL に要する 7 分間は「ミッションの中でも最も短く最も緊迫した時間」

⁷³⁷ i bid.

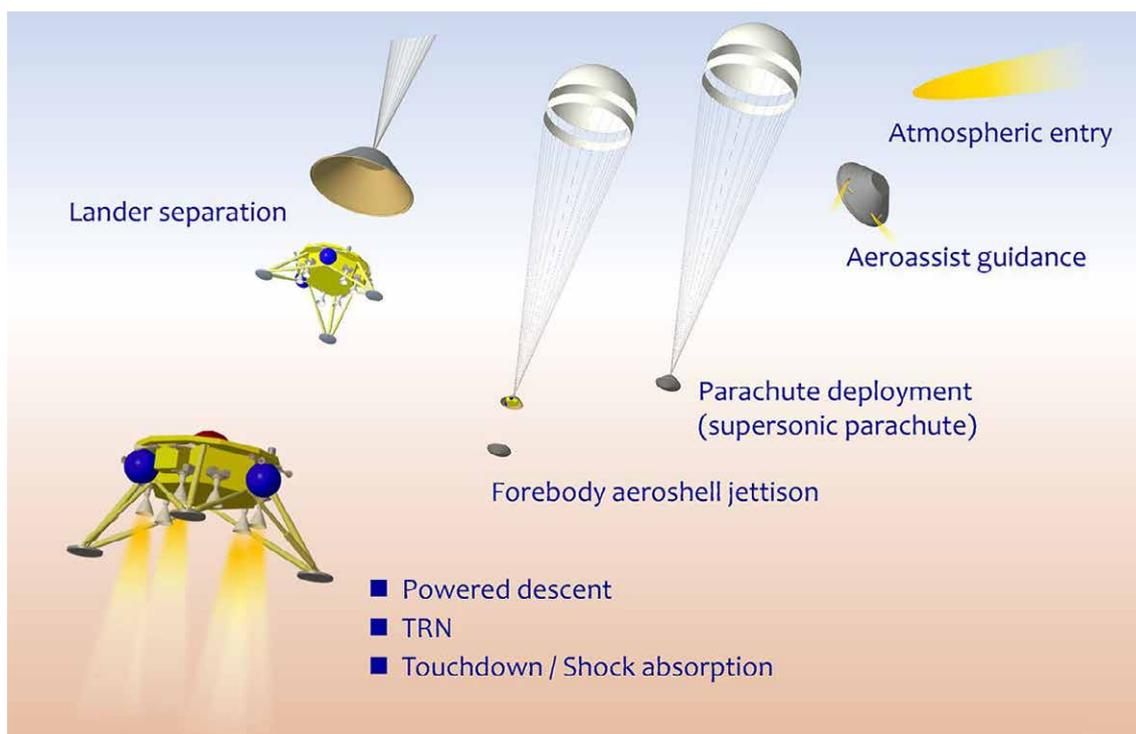
⁷³⁸ NASA “NASA’ s Cryogenic Fluid Management Technology Development Roadmaps”

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190000305/downloads/20190000305.pdf>

⁷³⁹ i bid.

と表現されている⁷⁴⁰。NASA の火星探査機の場合、時速 2 万キロメートルで大気圏に突入し、地表到達までに速度を低減しなければならない。この EDL の難度もあり、これまで火星に送られた火星探査機のうち約 40%しかミッションに成功していない⁷⁴¹。

日本では JAXA を始めとして EDL の開発が行われているが、大気突入ミッションの数が多いとは言えず、着実な技術の継承と発展が難しいのが現状だ⁷⁴²。JAXA では現在、高頻度で継続的なフライト実証機を利用した EDL&R（大気突入・降下・着陸および回収）の研究や、将来の火星探査アーキテクチャの検討が進められている。



(図 18-13 火星探査機着陸の一例⁷⁴³)

2020 年に打ち上げられた NASA の火星探査機「パーシビアランス」は、EDL のために Range Trigger（レンジ・トリガー）、Terrain-Relative Navigation System（地形追従航法装置）、Advanced aeroshell sensor package などの新機能を搭載していた。

⁷⁴⁰ NASA “Entry, Descent, and Landing” <https://mars.nasa.gov/mars2020/timeline/landing/entry-descent-landing/>

⁷⁴¹ i b i d.

⁷⁴² JAXA 『大気突入・降下・着陸および回収（EDL&R）技術の研究』
https://www.kenkai.jaxa.jp/research/edl_r/edl_r.html

⁷⁴³ 同上

火星探査機を火星の地表に向けて放出する際、その着地地点をなるべく調査対象のエリアに近づける必要がある。その際鍵となるのが、機体からパラシュートを広げる「トリガー」のタイミングだ。レンジ・トリガーは機体の現在地と目的地を照らし合わせることで、パラシュートを広げるタイミングを調整し、着地地点の精度を従来よりも 50%以上高めている⁷⁴⁴。

探査機が着陸する際、急斜面や大きな岩は阻害要因となる。これらを避けて着陸するために導入されたのが地形追従航法装置だ。この装置は降下中に地形画像をモニターし、安全な着陸を阻害するような要因があれば、避けてより安全な地点に向かわせる⁷⁴⁵。この技術は、月や火星への有人飛行でも活用されることが期待されている。

Advanced aeroshell sensor package は新型の防護カプセル用センサで、大気突入の際に機体を受ける熱や圧力を測定する。熱シールドとバックシェルに装備される MEDLI 2 (MSL Entry, Descent, and Landing Instrumentation 2) というセンサによって、火星の大気成分への理解が深まるとともに、今後の EDL 研究に応用できるデータが取得される⁷⁴⁶。

まとめ

これまで、宇宙技術における各技術分野の研究開発動向と、公的・民生利用の両側面からの展望を概観してきた。最後に、これまでの日本の宇宙政策を整理し、今後注力すべき方策を考える一助としたい。

日本では 2008 年に「宇宙基本法⁷⁴⁷」、そして 2016 年に「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律⁷⁴⁸」および「衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律⁷⁴⁹」が公布された。2009 年には「宇宙基本法」に基づき「宇宙基本計画」が閣議決定され、現在に至るまで改定を経て宇宙政策の方針を示している⁷⁵⁰。最新の「宇宙基本計画」では、「宇宙を推進力とする経済成長

⁷⁴⁴ NASA “Entry, Descent, and Landing”

⁷⁴⁵ Ibid.

⁷⁴⁶ Ibid.

⁷⁴⁷ 2008 年 5 月 28 日公布、法律 43 号。2008 年 8 月 27 日施行。

⁷⁴⁸ 2016 年 11 月 16 日公布、法律 76 号。2018 年 11 月 15 日施行。

⁷⁴⁹ 2016 年 11 月 16 日公布、法律 77 号。2018 年 11 月 15 日施行。

⁷⁵⁰ 内閣府、「宇宙基本計画」

とイノベーションの実現」のために、衛星データの利用拡大や国のプロジェクトにおけるベンチャー企業等からの民間調達を掲げている⁷⁵¹。一方で、宇宙技術の民的利用には様々な課題が残る。

近年、日本でもスタートアップを中心に宇宙ビジネスの事業領域は拡大しているとはいえ、依然として国内需要の大半が官需であり、米国などと比較して民間市場の拡大はまだ十分といえない。政府主導による官民共同事業や、公共サービスへの積極的な利用はもちろん、そこから宇宙技術によっていかなる民生サービスを創出し、需要を生み出していくかが、将来的なデュアルユースの成否にもつながっていく。その際、政府は新技術の中でも分野を絞った、選択的な援助・補助を行い、国際的な競争力確保の後ろ盾をする必要があるだろう。本稿では、センシング衛星による新サービスの展開や、OSAM 技術における B2B の新ビジネス創出など、分野を横断して活用され始めた宇宙技術の実態を確認してきた。日本はロケットの打ち上げ回数は各国に比べて少ないものの、従来からロボットや小型衛星の製造については国際競争力を有してきた。近年宇宙分野で開発力を伸ばしている中国に公的・民的いずれの面でも対抗するためには、友好国とも連携しながら、国内における宇宙ビジネスの拡充を促し、好循環を生み出す必要があるだろう。

⁷⁵¹ i b i d.

第 19 節 サイバーセキュリティ

1. 技術の概要

国家の重要インフラや企業・個人の機密情報を含む社会のあらゆる領域がコンピュータやインターネットとつながり利便性が飛躍的に向上した一方、サイバーセキュリティの重要性は安全保障の根幹に関わるようになった。

2. 民生上のインプリケーション

民生上最も被害の多いサイバーセキュリティ上の脅威はデータ漏洩であろう。IBM/Ponemon Institute によると、データ漏洩の世界平均コストは 2020 年の平均 386 万ドルから 424 万ドルに増加したことが確認された⁷⁵²。また、11 年連続で平均被害額が最も高いアメリカでは、データ侵害の平均総額は 864 万ドルから 905 万ドルに増加した（世界全体の平均総額は 424 万米ドル）。以下、近年の代表的なデータ漏洩事件を例示する。

(1) SocialArks のデータ流出

2021 年 1 月 11 日、SafetyDetectives のレポートによると、中国のソーシャルメディア管理会社である SocialArks は、400GB を超えるデータが流出する被害に見舞われた。これは、世界中の 2 億人以上のソーシャルメディアユーザーの個人を特定できる情報(PII)に影響を与え、また Facebook や Instagram、LinkedIn のアカウントも含まれていた。

(2) Bykea の設定ミスサーバー

2021 年 1 月 28 日、セキュリティ研究者が、パキスタンに拠点を置く輸送・物流・代金引換決済会社 Bykea のデータセキュリティ事故を公表した。4 億件を超える 200GB のデータを含む同社の完全な本番サーバーが、パスワードや暗号化なしで公開され、2020 年 11 月 14 日に研究チームによって発見された。Elasticsearch サーバーには、同社の Web サイトやモバイルサイトの API ログや PII が保存されていた。保護されていないデータベースに含まれる情報は、フルネーム、電話番号、メールアドレスなどの顧客データや、住所、CNIC (コンピューター化された国民 ID カード)、運転免許証情報、体温などのパートナー (ドライバー) 情報、内部 API ログ、集配場所情報、クッキーの詳細とセッションログを含むユーザートークン ID、特定の GPS 座標、車両情報、ユーザデバイス情報、暗号化された IMEI ナンバーなどが含まれていたという。

⁷⁵² IBM, Cost of a data breach report 2021. <https://www.ibm.com/security/data-breach>

(3) Facebook のデータ流出

2021年4月3日、Bleeping Computer のレポートによると、未知の脅威者が Raid Forums で5億人以上のユーザーデータを流出させるデータ侵害を共有した。盗まれたデータには、ユーザーのフルネーム、電話番号、所在地、電子メールアドレス、Facebook ID、および経歴が含まれていた。

このように、これらの侵害で見つかった情報は、多くの場合、個人情報を含む顧客や従業員のデータで構成されている。攻撃者はこれらの情報を利用して、フィッシングやスパイフィッシング攻撃、総当たり式のパスワードクラッキング攻撃を行うことができる。

2021年、ランサムウェア事業者は大規模な攻撃を行い、アメリカの食品加工会社 JBS や IT マネジメント会社 Kaseya などの著名な被害者に影響を与えた。しかし、この年の最も注目すべき攻撃は、米国のガス会社コロニアル・パイプラインを標的としたもので、同社の業務の混乱は、米国東海岸のガス流通と価格設定に大きな影響を及ぼした⁷⁵³。この攻撃は、ランサムウェアによって甚大な被害が発生することを示し、米国政府や国際的な法執行機関によるランサムウェアの取り締まりの転機となった⁷⁵⁴。

サイバー犯罪者は、価値の高い標的に対する作戦から得られる大きな利益を観察しているため、新しいランサムウェアグループが出現し続けている。新しい脅威は、ほぼ例外なく、二重の脅迫を行うデータ漏洩モデルを採用しており、被害者に身代金の支払いを求める圧力をさらに強めている。また、脅威者は Linux システムを標的とするように戦術を変化させており、Linux システムでは仮想マシンやコンテナをホストしていることが多いため、組織にとってのリスクが高まっている。さらに、ProxyShell や Log4Shell のような脆弱性や⁷⁵⁵、Kaseya に対するランサムウェア攻撃 REvil のようなゼロデイ脆弱性を悪用するグループも現れている⁷⁵⁶。また、企業ネットワークに侵入するために内部関係者を勧誘したり、被害者の顧客に連絡して身代金の支払いを要求したり、ランサムウェアの被害者

⁷⁵³ Turton, William and Mehrotra, Kartikay, “Hackers Breached Colonial Pipeline Using Compromised Password” Bloomberg. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-06-04/hackers-breached-colonial-pipeline-using-compromised-password>

⁷⁵⁴ Romo, Vanessa, “Panic drives gas shortages after colonial pipeline ransomware attack.” NPR. <https://www.npr.org/2021/05/11/996044288/panic-drives-gas-shortages-after-colonial-pipeline-ransomware-attack>

⁷⁵⁵ Cimpanu, Catalin, “First Log4Shell attacks spreading ransomware have been spotted.” The Record, December 14, 2021 <https://therecord.media/first-log4shell-attacks-spreading-ransomware-have-been-spotted/>

⁷⁵⁶ Cimpanu, Catalin, “Kaseya zero-day involved in ransomware attack, patches coming.” The Record, July 4, 2021 <https://therecord.media/kaseya-zero-day-involved-in-ransomware-attack-patches-coming/>

を DDoS 攻撃で脅したり⁷⁵⁷、サプライチェーンやマネージドサービスプロバイダーを標的にして攻撃の影響を増幅させるといった新しい手口も出てきている⁷⁵⁸。

3. 国防上のインプリケーション

近年、サイバー戦、サイバー防衛は、国防上最も重要な領域になりつつある。国家当局や情報機関への攻撃（情報システムへの攻撃や不正操作、情報の窃取など）や、重要インフラ、金融システム、電力・通信ネットワーク、知的財産、軍事施設や兵器へのサイバー攻撃ならびにサイバースパイのリスクが高まっている。

サイバー戦には以下のような種類がある。①マルウェアによる攻撃。マルウェアは、コンピュータ・システムを混乱させたり、損害を与えるように設計されたソフトウェアの一種で、マルウェア攻撃は、機密情報の窃取、重要インフラの破壊、軍事作戦への損害などに利用される。②サービス妨害（DoS）攻撃。DoS 攻撃は、ネットワークやウェブサイトのトラフィックを急増させ、ユーザーのアクセスを遮断する攻撃である。DoS 攻撃は、重要なインフラや軍事作戦を妨害するために使用されることがある。③ランサムウェア攻撃。ランサムウェアは、マルウェアの一種で、被害者のデータを暗号化し、身代金等を支払うまでアクセス不能にするというものである。ランサムウェア攻撃は、金銭の強要や重要インフラの破壊に利用される可能性がある。④サイバースパイ活動。他国の機密情報へのアクセスを得るために、サイバースパイ活動が行われている。サイバースパイ活動は、軍事作戦、政治戦略、または経済活動に関する情報を収集するために使用されることがある。⑤サイバー妨害行為。サイバー妨害行為とは、コンピュータ・システムを意図的に破壊したり、損害を与えたりすることである。サイバー妨害工作は、電力網、交通システム、通信ネットワークなどの重要なインフラストラクチャーを破壊するために使用されることがある。

(1) ウクライナ情勢に見るサイバーセキュリティ

2022年2月初旬、政府系ウェブサイトや銀行を標的とした DDoS 攻撃⁷⁵⁹、ウクライナとロシアの国境での軍事的プレゼンスの強化⁷⁶⁰など、ロシア政府によるウクライナに対する攻撃的なサイバー行動と

⁷⁵⁷ Palmer, Danny, “This new ransomware encrypts your data and makes some nasty threats, too.” ZDNet. (October 14, 2021) <https://www.zdnet.com/article/this-new-ransomware-encrypts-your-data-and-makes-some-nasty-threats-too/>

⁷⁵⁸ Cybersecurity & Infrastructure Security Agency, Kaseya Ransomware Attack: Guidance for Affected MSPs and their Customers. <https://www.cisa.gov/uscert/kaseya-ransomware-attack>

⁷⁵⁹ <https://www.bleepingcomputer.com/news/security/ukrainian-military-agencies-state-owned-banks-hit-by-ddos-attacks/>

⁷⁶⁰ <https://www.nytimes.com/interactive/2022/world/europe/ukraine-maps.html>

して始まったことは、2022年2月24日のロシアによるウクライナへの軍事侵攻で頂点に達する⁷⁶¹。それ以来、ハクティビスト、サイバー犯罪者、国家が支援するグループが、戦争においてロシアとウクライナのいずれかを支援するためにサイバー攻勢を開始した。ロシアは、ハクティビストと国家支援グループからなる十分なリソースを持つサイバー組織であるにもかかわらず、侵攻の過程を通じての影響力行使は、一部のサイバーセキュリティ専門家が予測したほどには大きなものではなかった。

ハクティビスト集団は、ウクライナ戦争に積極的に参加し、国家が支援する脅威行為者が、自国や各国政府の目的のためにサイバー作戦を展開している⁷⁶²。特に、親ロシア派のハクティビスト集団である Killnet は、ウクライナと同盟関係にある西側諸国の組織を標的とし、欧州議会、ブルガリア政府、イタリア政府、米国の各州を含む複数の国家ウェブサイトに対して DDoS 攻撃を仕掛けている⁷⁶³。ハクティビストグループ以外では、ロシア対外情報庁（SVR）が2022年を通じて、ロシアのウクライナ侵略における戦略的目的と政策目標を推進するために、豊富な資金を持つ脅威グループの資源を採用した。例えば、ロシアの APT グループ UAC-0113（Sandworm Team と中程度の信頼性でリンク）は、2022年8月から電気通信プロバイダーになりすまし、ウクライナの組織などを標的にした。

(2) 中国の動向に見るサイバーセキュリティ

中国の APT とサイバー犯罪の活動は、2022年を通じて安定した高いレベルを維持し、近年中国の脅威主体から見られる積極的なサイバー偵察プログラムと同レベルであった。中国の国家支援グループは伝統的に、南シナ海やインド、台湾など、中国のライバルである領土主張者をターゲットに非常に積極的で、活動のテンポはしばしば地政学的緊張を反映することになった⁷⁶⁴。中国は国際関係を管理するアプローチにおいて自己主張が強く、自国の国防、政治的安全、国際的地位、領土保全の追求のために、中国共産党（CCP）は定期的に幅広い強制的な行動に出ている。中国は、台湾、インド、アフガニスタンといった地域の標的に対しても、米国という海外の大きな戦略的敵対者に対しても、サイバー能力を使用している⁷⁶⁵。

⁷⁶¹ <https://www.csis.org/analysis/cyber-war-and-ukraine>

⁷⁶² <https://www.mandiant.com/resources/blog/gru-rise-telegram-minions>

⁷⁶³ <https://www.lawfareblog.com/what-impact-if-any-does-killnet-have?s=09>

⁷⁶⁴ <https://www.recordedfuture.com/chinese-state-sponsored-cyber-espionage-expansion-power-influence-southeast-asia>

⁷⁶⁵ <https://www.recordedfuture.com/from-coercion-to-invasion-the-theory-and-execution-of-china-cyber-activity>

現在活動中の中国の国家支援グループは多数存在するにもかかわらず、グループ間のインフラや能力には顕著な重複が見られる。インフラストラクチャーでは、運用インフラにモノのインターネット（IoT）デバイスを採用する傾向が強まったほか⁷⁶⁶、中国の国家支援組織が使用する仮想プライベートサーバー（VPS）プロバイダーの利用傾向も継続的である。能力面では、中国の国家支援組織は、インターネットに接続された企業向け機器のゼロデイ脆弱性や一般に公開された脆弱性を一貫して利用して初期アクセスを行い、グループ間でエクスプロイトやマルウェア機能を共有している⁷⁶⁷⁷⁶⁸。具体的な活動形態にかかわらず、中国のサイバー活動は通常、政府の敵対者に対する非対称的な優位性を獲得するための情報取得、中国内外の少数民族の標的、中国政府が国内の潜在的脅威に関する情報収集に協力することを目的としている。

地域の競争相手だけでなく、中国のサイバー活動は地政学的な動向や競争にも左右される。ロシアがウクライナに侵攻した後、欧米やロシアのエンティティを標的とした中国のAPT活動が見られたが、これは戦争が敵味方問わず、中国の情報収集イニシアチブの強化を優先させたことを意味する。例えば、2022年6月には、ロシアの政府機関や国家機関を標的とした中国の国家支援型脅威活動グループ Tonto Team に起因する活動を確認された⁷⁶⁹。また、中国のグループ RedDelta、Twisted Panda、Curious Gorge もロシアを標的としたサイバースパイ活動を行っていた⁷⁷⁰⁷⁷¹⁷⁷²。

4. アトリビューション

能動的なサイバー防衛活動に関する議論から明らかなように、これらの手法の多くを効果的に利用するためには、誰がネットワークを攻撃しているのかについてある程度理解し、能動的サイバー防御（ACD）手法を無実の傍観者ではなく、実際の悪意ある行為者に対して適用することが必要だ。

アトリビューションとは、特定の悪意ある行為に関与した脅威者を正確に特定する行為だ。サイバー脅威の行為者の帰属を成功させることは、ネットワーク防御、法執行、抑止力、および外交関係の

⁷⁶⁶ <https://www.cisa.gov/news-events/cybersecurity-advisories/aa22-158a>

⁷⁶⁷ <https://www.mandiant.com/resources/blog/apt41-us-state-governments>

⁷⁶⁸ <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE5bUvV?culture=en-us&country=us>

⁷⁶⁹ <https://www.sentinelone.com/labs/targets-of-interest-russian-organizations-increasingly-under-attack-by-chinese-aps/>

⁷⁷⁰ <https://research.checkpoint.com/2022/twisted-panda-chinese-apt-espionage-operation-against-russian-state-owned-defense-institutes/>

⁷⁷¹ <https://blog.google/threat-analysis-group/trackng-cyber-activity-eastern-europe/>

⁷⁷² <https://www.secureworks.com/blog/bronze-president-targets-russian-speakers-with-updated-plot>

改善を含むいくつかの理由で重要である。アトリビューションがもたらす潜在的なメリットを例示すると以下となる。

- 悪意あるサイバー行為者は、その行為に対して責任を負わされる。
- その行為に責任を負わされることになり、特定され責任を問われることへの恐怖、あるいは単に風評被害を受けることで、攻撃に対する抑止力となる可能性がある。
- アトリビューションが公開されることで、悪意あるサイバー行為者は、今後の追跡を避けるためにデバイスやインフラの使用を中止し、その動きを鈍化させることができる。
- アトリビューションは、攻撃者、ターゲット、TTP について知ることによって、組織のネットワーク防御を強化するのに役立つ。
- アトリビューションは、サイバー防御と運用に向けたリソースの優先順位付けを支援することができる。
- 被害組織に関連する政府は、攻撃者に関連する政府に対して、制裁措置や規制の強化などの措置を講じることができる。
- アトリビューションは、組織が攻撃の責任を誰に負わせるべきかというニーズを満たす。
- 攻撃をある国に帰属させた後、非難している政府は、その国に対する支援のために同盟国を結集させることができる。
- 攻撃を帰属させることで、政府は攻撃者を追跡する能力があることを国民に示すことができる。
- 攻撃を帰属させることで、政府は悪意のあるサイバーアクターに対して、彼らを追跡する能力があることを示すことができる。
- 政府が攻撃を特定の行為者に帰属させると、民間企業は、情報セキュリティの取り組みにおいて政府と接触し、協力する動機付けを得ることができる。
- 帰属は、民間企業がどの法執行機関に連絡すればよいか、また法的な選択肢を決定するのに役立つ。

アトリビューションプロセスでは、技術的、分析的、法的、および政治的な証拠を融合して、悪意のある活動の背後に誰がいるのか、またそれに対して何をすべきかを判断するための全体像を可能な限り明らかにする。技術的な原因究明の努力は必要だが、責任の所在の問題に答えるには不十分である。悪意のある行為者による誤誘導や、攻撃開始時にキーボードを操作していたのが誰であったかを特定できないなどの理由で、技術的証拠の限界を超えるには、法執行機関と情報ソースに基づく従来の分析技術がしばしば必要とされる。法的証拠は、活動が法律に違反しているかどうかを調べ、プライバシーの権利など個人の権利を侵害することなく使用できる技術を決したり、国際法の違反があったかどうかを評価したりすることができるものだ。最後に、政治的証拠は、特定の活動が特定の国家または民間団体と結びついているという判断を可能にする最後の断片を提供することができる。

アトリビューション能力は、プラスとマイナスの両方の意味を持つ可能性がある。オンライン活動の帰属は、システムにアクセスする人がその人であると主張することを確認するための ID 管理機能に

とって望ましい場合がある。たとえば、オンラインで自分の銀行口座にアクセスする個人は、承認されたユーザだけが口座にアクセスできるようにするシステムを望んでいる。したがって、活動を認可されたユーザに帰属させることができる ID 管理ツールは、積極的な使用の一例である。一方、抑圧的な政府は、政府に反対するコンテンツへのアクセスを求めたり作成したりする個人を特定し、そのような活動を停止したりその個人を罰したりするために、属性付与技術を使用することができる。

本章では、他者のネットワークや情報システムに損害を与えようとする悪意ある行為者に対する抑止効果を高めるとともに、悪意ある行為者からの攻撃に対するシステムの防御と応答を改善することを目的としたアトリビューション技術に焦点を当てる。ここでいうアトリビューションとは、ネットワーク上の攻撃者、または攻撃者の仲介者の身元および/または位置、あるいはネットワークに含まれるデバイスを特定することと定義される。

正確なアトリビューションは、防御を強化したり攻撃者に苦痛を与えたりする上で高い価値があるものの、高度に洗練されたアトリビューションは、一般に政府機関や高い能力を持つサイバーセキュリティ企業のみが可能な、時間とコストのかかる活動であることを認識する必要がある。さらに、政府機関以外の団体が責任者に対して意味のある行動を取る能力が限られているため、帰属の価値が損なわれる可能性がある。したがって、包括的な帰属の取り組みを行うかどうかに関するあらゆる決定は、特定の活動を特定の行為者に帰属させることができることから得られる可能性のあるプラスの成果のレベルが、希少なリソースの使用に見合うものかどうかを判断する必要がある。

まとめ——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

サイバー領域は現代の政治・経済・社会・テクノロジー（PEST）の全方面で基幹となっている。したがって、サイバーセキュリティは民生上も軍事上も最も重要なエリアに位置づけられる。この分野でアメリカの圧倒的な優位性がゆらぎ、米同盟国のイスラエルの他にも、敵対している中国やロシア、北朝鮮が高い能力を持っていることは、日本の国家安全保障・経済安全保障上の大きなリスクとなっている。日本はすでに当該技術領域において、中国や北朝鮮に劣後しており、これが大きなリスクとなっている。

研究者の数でも、大半の科学技術領域で日本は世界シェア 3 位圏内にランクインしているのに対して、サイバーセキュリティに関しては 4 位圏外との結果がアスタミューゼ社の調査で明らかになった⁷⁷³。研究者数ではインド人の研究者比率が高い傾向にある。研究者でもても日本がサイバー領域でまだ課題が多いことがわかるだろう。

⁷⁷³ アスタミューゼ社への再委託報告書。

防衛の側面では、日本は自衛隊統合幕僚部にサイバー防衛の部隊を有しているが、たとえばイスラエルのようにレッドチームとパープルチーム（すなわち防衛と攻撃）の双方を保有しているわけではない。ただし、「攻撃」の訓練や実践から防衛へのフィードバックやインプリケーションを得ることは多い。実際にイスラエルでは軍出身のホワイトハッカーが経済界で活躍し、エコシステムを形成している。各国で人材育成・獲得競争が激しさを増すなか、日本は人材育成や活用（報酬を含む）面で国際的に大きく遅れを取っており、今後劣位の差が開くほど、追いつくのが困難となっていくものと考えられる。

第 20 節 医療・公衆衛生

1. 経済安全保障上の課題としての医療・保健（公衆衛生）分野

我が国における特定科学技術での経済安全保障、特に医療・保健（公衆衛生）分野での社会、経済、軍事をも含む影響が考えられ、社会経済上の課題として重要視されている。2020 年に発生した新型コロナウイルス感染症（以下、COVID-19）の流行をきっかけに、一国だけでなくグローバルに感染が広がるその影響から、人々の生活や経済までも脅かすものとなった。この新型コロナウイルスを含む新興・再興感染症に、世界中の人々が脅威にさらされている。そのため世界各国でも早期に感染症対策を行う必要性が増し、ワクチンを含む治療薬や医療品の研究開発（R&D）を促進させることに加え、医療体制やシステムの迅速な対応も求められた。このように感染症は今後もコロナにとどまらず国策として開発支援や整備が必要となってくるであろう。我が国の医療・保健分野での安全保障の位置づけは「人間の安全保障（Human Security）」を基に、人々の安全を確保し国際的な保健に投資することで経済成長へも寄与すると提言されている。日本が率先して質の高い医療・保健制度である国民皆保険（Universal Health Coverage）を提供している恩恵には、世界でもトップクラスの医療保健水準を達成していることから平均寿命も上位を誇っている。このように、日本はあらゆる人々に基本的な保健医療サービスが提供でき健康改善により経済成長を促すような取り組みに自国のみならず世界へ貢献している。2022 年に公表された疾病負荷（Global Burden of Disease : GBD）の論文によると、高所得国である日本の GBD は呼吸器感染疾患で低所得国と同じ 4 位であるが、アルツハイマーや脳卒中は高位であった。このように新型コロナウイルスの世界的感染拡大の教訓により、呼吸器感染症は低所得国と同様の疾病負荷が課されており、医療・保健には社会・経済・安全保障に通ずる国際的な重要課題であると再認識することができた。

さらには、保健・医療分野の重要技術に関して、（グローバル）疾病負荷、いわゆる病気のトレンドに基づいた国の保健政策に関連する。画期的な新興技術であっても、保健・医療分野においては、この疾病負荷の要素を深く取り入れるだけでなく、安全・信頼性を確保した上でのイノベティブな医療技術に素早くアクセスできるようにするための多角的な R&D プロセスが必要となってくる。それによって、それぞれの国における政策（医療・健康、科学技術、経済、環境、国防含む）への影響も鑑み、技術開発へのアクション・選択・優先順位・資源の観点からの政策決定が求められる。そのため資源の確保から先端技術の使用優先を選択し、医療システムや規制・法整備を整えた上で技術開発をさらに推進させることが重要となってくる。各国の進むべき保健政策の方向性による特定科学技術は、それぞれ違う技術を特定していることもある。

アメリカの National Strategy for Critical and Emerging Technologies 2020 においては、医療・公衆衛生分野での（Medical and Public Health Technologies）が新興科学技術リストとして公表され

ている。優先的なアクションとしてアメリカにおける規制や法律に沿って研究や開発を行うことを根底に、あらゆるパートナーと協力しながら新興技術を守ることを目的としている。しかし、医療・公衆衛生分野においては具体的な新興特定技術がどう経済安全保障において守る必要性があるのか明確ではなく、この経験が基となった概念形成を作り出せるのかは今後の課題である。日本においても経済安全保障の重要性が増す中、新興技術開発を推進する中でどのような重要科学技術が研究開発しているのか認識し、技術喪失のリスクを防ぐための検討を行うことが第一優先に必要と考えられる。よって、今後の我が国の経済安全保障戦略へ医療・保健分野の注目すべき重要科学技術を多角的に調査することが必要である。今回調査において医療・保健分野技術での主要なターゲット項目は「Pandemic preparedness/ Public (Global) Health Emergency」と「Medical technology」であり、1) 研究開発状況、2) 産業・民生経済もしくは軍事・国防目的の技術リスト特定とその用途、3) 実用化に伴う研究・開発戦略や国民社会レベルへの影響、4) 技術喪失が考えられる際の生じるリスク、これらの点を包括的に考慮した上で調査を行うことを目的とした。

2. 医療・保健（公衆衛生）分野での重要科学技術

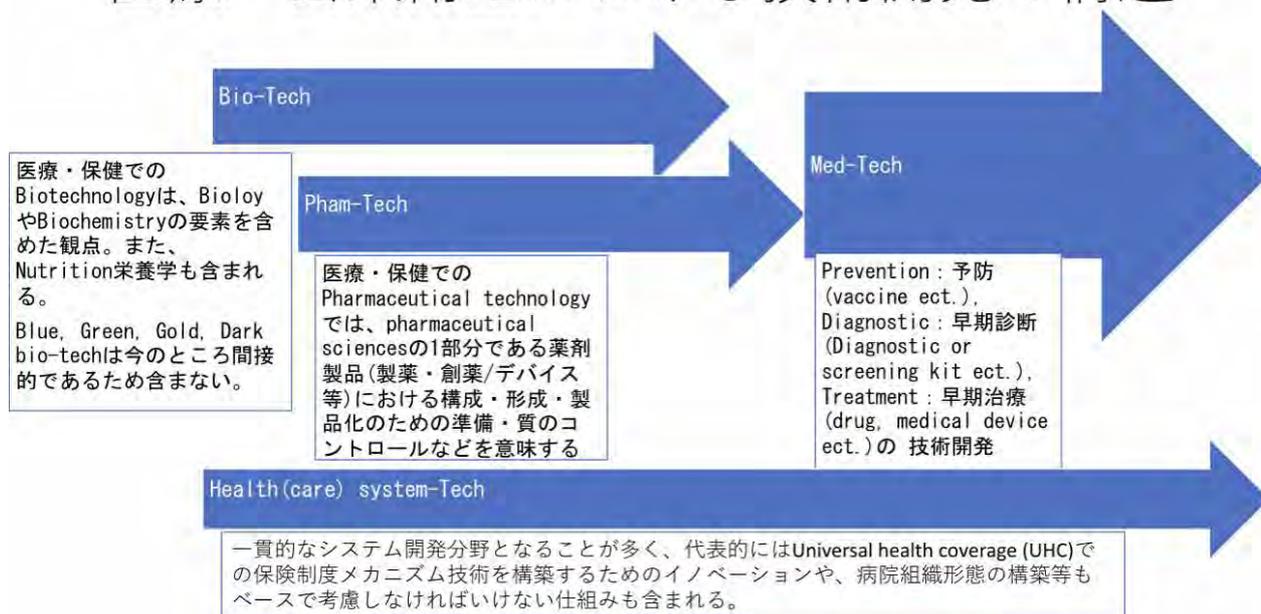
経済安全保障における医療・保健（公衆衛生）分野での重要科学技術の主要ターゲット項目「Pandemic preparedness（世界流行の備え）/ Public (Global) Health Emergency（公衆衛生上の有事）」と「Medical technology（医療技術）」より、個別項目を絞ることを最優先とした。前述で述べた通り、各国の疾病トレンドや政策に左右されるが、感染症等の世界流行の備えや公衆衛生上の有事、今後必要とされる医療技術の新興技術を個別項目として調査した。

第一主要項目である「Pandemic preparedness（世界流行の備え）/ Public (Global) Health Emergency（公衆衛生上の有事）」とは、確固としたヘルスシステムの基盤がある中での疾病の感染対策を流行の備えとして全ての人々へ医療を提供できる体制である。また、WHO では、この疾病流行の備えや公衆衛生上の有事において、医療保健上の必要とされる医薬品・医療機器研究開発や公衆衛生の介入等を含む特異的な疾病への医療体制の能力強化のために尽力することの必要性を提言している。要するに、緊急事態時に対応できるイノベティブな医療技術の能力強化に伴うソフト面の開発促進と、各々の医療システムの基盤が機能しやすくなるような整備を上手く仕組みたてるといふことと理解する。

第二主要項目「Medical technology（医療技術）」とは、医療システムの基、疾病予防や治療・リハビリテーションといった医療介入を通じた技術が含まれている。特に、ワクチン開発や診断に関わる検査機器・治療薬が医療・臨床介入により研究開発が必要とされ、さらには医療機器や健康増進に関

わる分野も含まれる。このように、幅広い医療健康に関わる技術が取り入れられており、技術開発での基礎・応用・介入研究を経て医療技術開発の構造が仕組みだっている（図 20-1）。

医療・公衆衛生における技術開発の構造



(図 20-1 医療・公衆衛生における技術開発の構造)

このようにヘルスケアシステムが基本となり、バイオテクノロジーやファーマテクノロジーの創薬やデバイス等の構成・形成・製品化への開発を経てメディカルテクノロジーでの予防や治療の観点から早期診断・治療へと技術開発を進めていくと理解する。革新的な医療技術であってもヘルスシステムに基づく医療制度のインフラ整備やシステム構築も考慮し、開発を進めていくような戦略モデルを構造化することは重要である。よってサブカテゴリーを選定するにあたり、二層の技術分類 (Technological classification) に分け、それぞれ主要項目での重要な医療技術を特定した。

第一主要項目「Pandemic preparedness (世界流行の備え) / Public (Global) Health Emergency (公衆衛生上の有事)」での、Pharmaceutical technology (Pharmaceutical technology and Biotechnology) シーズ開発を含めた 薬剤・製薬・創薬的観点からは「Vaccine, Precision medicine, Cell and Gene Therapies, Monoclonal Antibodies」を選定し、Health technology ヘルスシステムの観点からは、「Contact tracing, E-health Telemedicine, Smart healthcare, Virtual meeting medical consultation, Medical drone, Essential robot worker, Medical robot」とした(図 20-1)。第二主要項目「Medical technology (医療技術)」での、Pharmaceutical technology (Pharmaceutical technology and Biotechnology) シーズ開発を含めた。薬剤・製薬・創薬的観点からは「Nutrigenomics, 3D food printing, food bioactive ingredients, Food allergies and intolerances, Omics techniques, Next