

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。

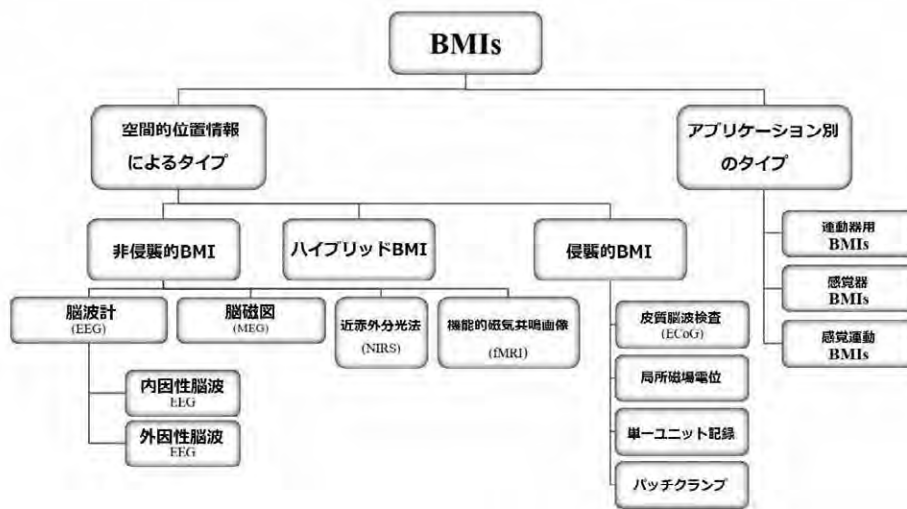
BMI/BCI の基本原理は、被験者の脳波 (Electroencephalogram) や脳磁波を多チャンネルで測定し、そのデータの特徴を解析して被験者のイメージを推定し、それに基づきコンピュータをはじめとする端末、IoT 機器などを操作するものである。つまり、人間の脳をインプットとして捉え、そのアウトプット先としてコンピュータなどの端末を操作する。逆に、外部から脳に刺激を与え、神経疾患の予防、回復、更には自己治癒力の増進などにも活用できる。このように、BMI/BCI は、脳と機械をつなぐための役割を果たすシステムやプログラムの総称であり、究極的には脳とコンピュータがコミュニケーションを取れ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

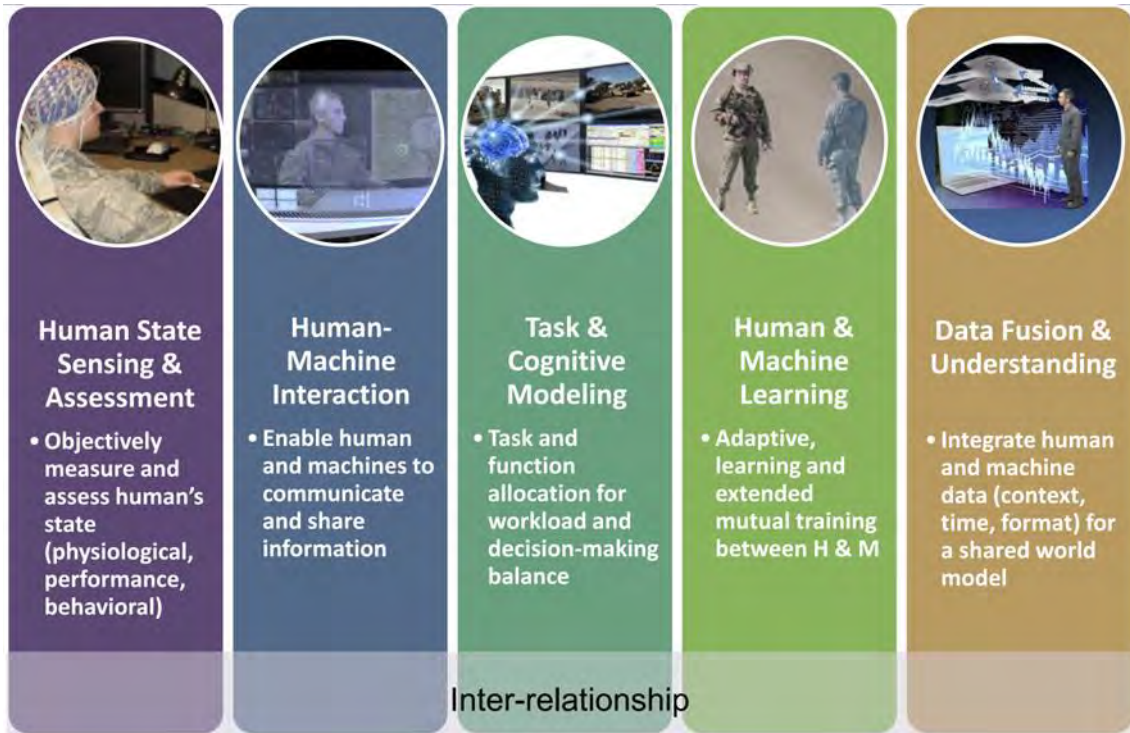
⁴⁸⁰ ②ヒューマン・マシン・インタラクションとは、人間と機械が情報を伝達し共有することを可能にするものである。

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動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たりがある。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。

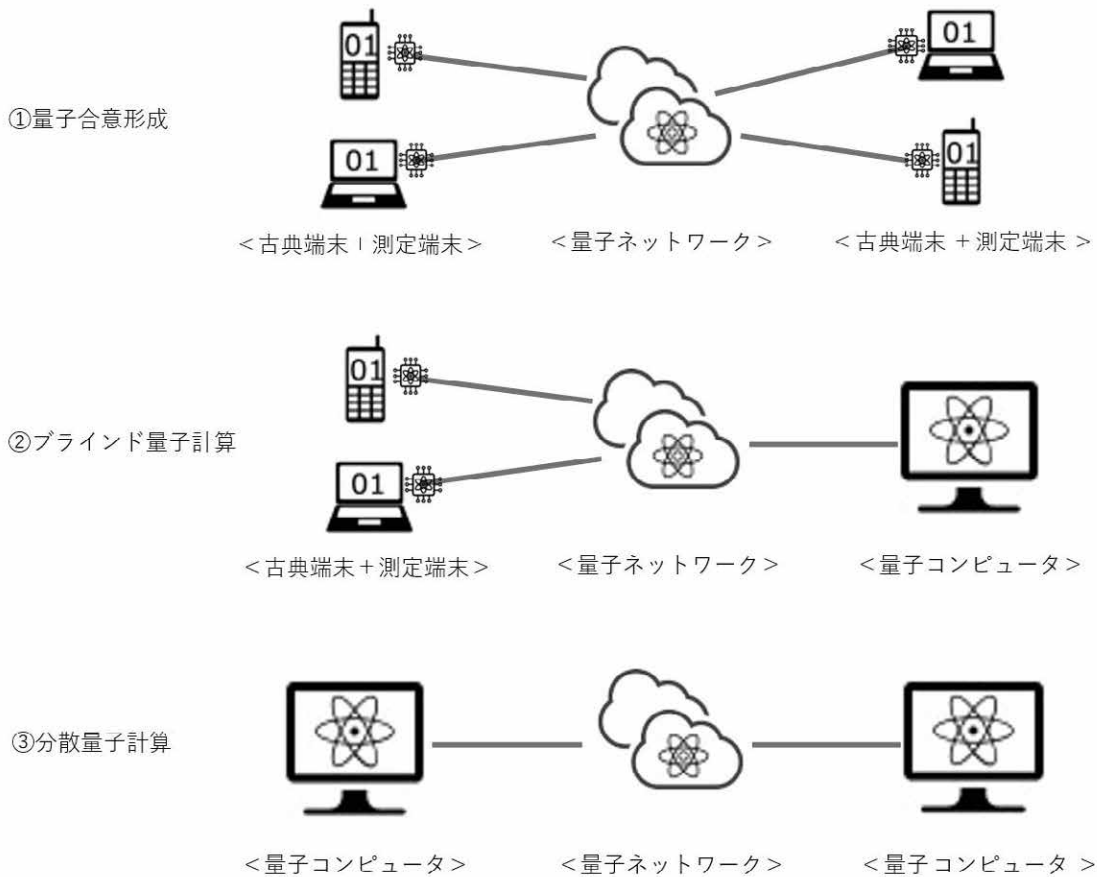
実用的な量子コンピューティングのためには、量子プロセッシング・ユニット (QPU) や量子メモリの開発も不可欠である。なお、後述のように QKD に関する量子衛星の打ち上げが進んでいるが、一方で宇宙放射線耐性を有する量子プロセッシング・ユニット (QPU) や量子メモリの研究開発も今後進められていく可能性がある。欧州宇宙機関 (European Space Agency、ESA) は、宇宙放射線に対して耐性を有する量子メモリを開発するプロジェクトを進めている。このプロジェクトでは、量子ドットなどの系を使用して、宇宙放射線に耐性を持つ量子メモリを開発している。

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）。

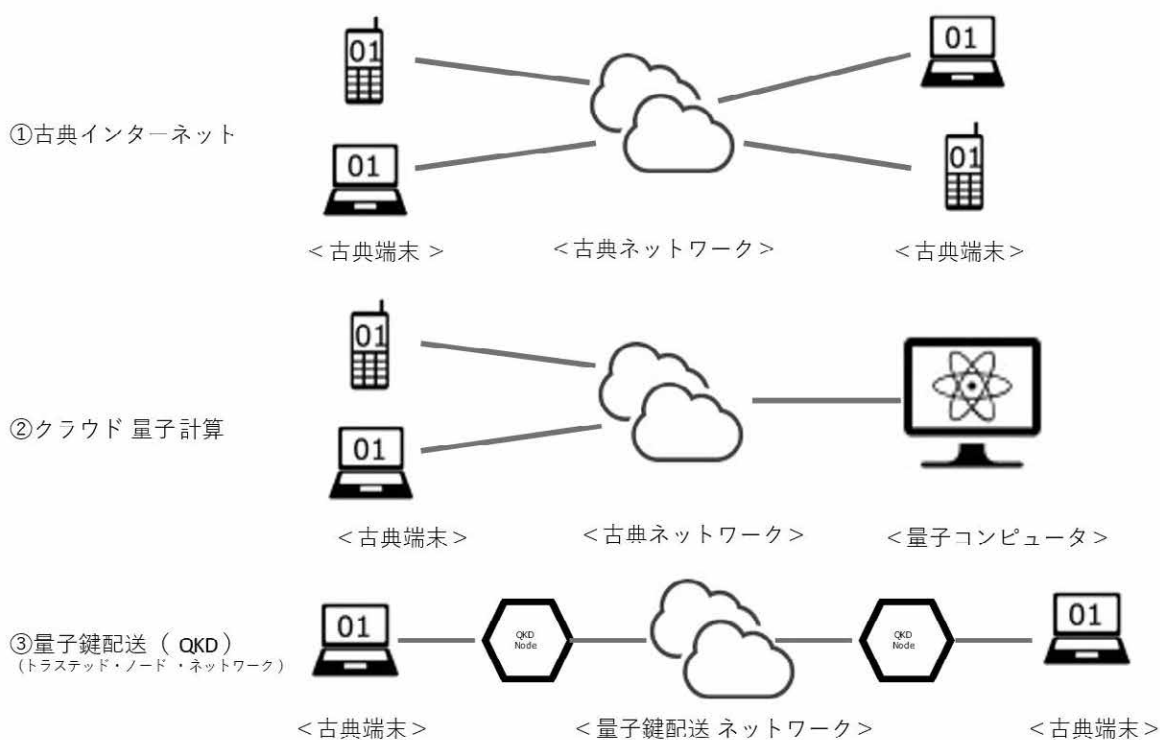


(図 15-1 量子インターネットのアプリケーション例)

(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一つである。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