

ICT 俯瞰報告書

2.0 版

2026



目次

報告書の構成	iii
2.0 版改定にあたって	iv
第1章 はじめに	1
1.1. 最近の世界情勢	1
1.1.1. 世界規模での ICT の普及とその余波	1
1.1.2. 世界状況の変化と ICT	1
1.2. 世界各国・地域の状況	2
1.2.1. 北米の状況	2
1.2.2. 欧州の状況	4
1.2.3. アジア・オセアニアの状況	6
1.3. AI 技術の発展とその安全性に関する世界の動向	9
1.3.1. 近年の AI 技術の発展と各国の動向	9
1.3.2. AI の安全性を巡る世界の動向	9
1.3.3. 今後の展望	11
第2章 注目分野の動向	12
2.1. 分野横断的な基盤技術	12
2.1.1. 取り巻く環境	12
2.1.2. 現在の研究開発動向	13
2.1.3. 将来展望	13
2.2. 電磁波の利活用	14
2.2.1. 取り巻く環境	15
2.2.2. 現在の研究開発動向	16
2.2.3. 将来展望	20
2.3. 通信ネットワークインフラストラクチャー	22
2.3.1. 取り巻く環境	23
2.3.2. 現在の研究開発動向	23
2.3.3. 将来展望	25
2.4. ICT デバイス技術	26
2.4.1. 取り巻く環境	27
2.4.2. 現在の研究開発動向	27
2.4.3. 将来展望	29
2.5. サイバーセキュリティ	30
2.5.1. 取り巻く環境	31
2.5.2. 現在の研究開発動向	35
2.5.3. 将来展望	37
2.6. 量子 ICT	37
2.6.1. 取り巻く環境	37
2.6.2. 現在の研究開発動向	39
2.6.3. 将来展望	41
2.7. ユニバーサルコミュニケーション	43
2.7.1. 取り巻く環境	43
2.7.2. 現在の研究開発動向	43
2.7.3. 将来展望	46
2.8. バイオ ICT と脳情報通信	47
2.8.1. 取り巻く環境	48
2.8.2. 現在の研究開発動向	48
2.8.3. 将来展望	52

2.9. 注目すべき新技術動向	54
2.9.1. 物理系コンピューティング	54
2.9.2. 生体機能活用型デバイス	54
2.9.3. 代替的 PNT 技術	55
第3章 おわりに	56
付録 A 用語集	I
付録 B 参考文献	III
付録 C 補足情報	XIV
C-1. 欧州の状況について (1.2.2 章関連)	XIV
C-1-1. 欧州デジタル未来の形成について	XIV
C-1-2. 欧州の ICT 分野に関する地政学的動向	XIV
C-1-3. スマート・ネットワーク・サービス共同事業	XIV
C-1-4. 欧州各国における研究開発	XIV
C-1-5. 欧州内連携の事例	XIV
C-1-6. グリーン ICT 分野の動向	XIV
C-1-7. 半導体分野の研究開発動向	XIV
C-2. 電磁波の利活用について (2.2 章関連)	XIV
C-2-1. 電磁波の歴史	XIV
C-2-2. 50 年後の長期的展望	XV
C-3. ICT デバイス技術について (2.4 章関連)	XVII
C-3-1. 国内外の研究開発事例	XVII
C-3-2. 空間光変調器 (OPA) の研究開発動向	XVII
C-3-3. トランジスタやダイオードの研究開発動向	XVII
C-4. 量子 ICT について (2.6 章関連)	XVII
C-4-1. 量子計算精度を高める研究開発	XVII
C-4-2. 衛星を使った量子暗号技術について	XVII
C-5. ユニバーサルコミュニケーションについて (2.7 章関連)	XVII
C-5-1. 大規模言語モデルの補足	XVII
C-5-2. GPT-3 についての補足	XVIII
C-5-3. 対話 AI の補足	XVIII
C-5-4. 対話 AI に関する課題	XVIII
C-5-5. NICT における LLM の開発	XVIII
C-5-6. 実世界のモデリング・画像生成技術	XVIII
C-5-7. 都市デジタルツインについて	XIX
C-6. バイオ ICT と脳情報通信について (2.8 章関連)	XX
C-6-1. AI と脳・神経科学の共進化	XX
C-6-2. 脳融合 AI・ニューロモルフィック計算	XX
C-6-3. 全脳モデル・大規模脳シミュレーション	XXI
C-6-4. BMI/BCI と脳情報通信	XXI
C-6-5. 生命科学デジタルツイン	XXI
C-6-6. ナノ・分子 ICT デバイスについて	XXII
C-6-7. 生体実装型ツイン:オルガノイドおよびオーガン・オン・チップについて	XXIII
C-6-8. 生体知能の実装と活用に関する研究動向	XXIII

更新履歴

謝辞

報告書の構成

コンピュータやソフトウェア等の情報技術（Information Technology）、光ファイバーや携帯電話・スマートフォンに代表される通信技術（Communication Technology）は、20世紀末から爆発的な普及・発展の段階に入り、いまや ICT は社会を支えるなくてはならない存在へと変貌しつつある。また、気候変動等の外的環境変化や、持続可能な経済社会への要求の高まり、さらには先進国を中心とする少子高齢化等の社会的変化が同時進行しており、我々の生きる現代社会は数多くの課題に直面している。このような背景の下で、種々の課題を解決しつつ 21 世紀の社会・経済基盤を実現する重要な要素として、ICT 分野には大きな役割が期待されている。

本報告書は、ICT 分野の研究開発において、現在の潮流を俯瞰的な視点で語ることで、その最新動向と将来展望に関する洞察を提供することを狙いとしている。この狙いの下、本書は下記のような構成としている。

まず 1 章では、導入として ICT 分野をとりまく世界の状況を概観する。世界的な感染症の流行や地政学的変化等、我々の置かれた社会環境は激変しており、ICT がその中で重要な役割を担っている。本章では特に、北米、欧州、アジアに着目して、ICT 分野を取り巻く各国・地域の最新動向について述べる。また、昨今発展著しい AI 関連の国際動向については、1.3 章で取り上げている。

続く 2 章では、具体的な ICT の各分野の中から、注目すべき分野に関して最新動向を述べる。まず 2.1 章では、分野横断的な基盤技術として、将来の Society 5.0 社会の基盤としての役割が期待されている Beyond 5G について概観する。続いて 2.2 章では、ICT の各技術を実現させる重要な媒体である電磁波について、その利活用に関する研究開発動向を述べる。さらに 2.3 章では ICT 基盤の中核をなす通信ネットワークインフラストラクチャーについて述べ、2.4 章ではそのために必要な ICT デバイスの最新動向について述べる。2.5 章では、技術的にも社会的にも重要度が増しているサイバーセキュリティ分野の最新動向について述べる。2.6 章では、新しいパラダイムとして期待されている量子 ICT 分野について、最先端の研究開発動向について述べる。そして 2.7 章では、昨今進展著しい生成系 AI を含む翻訳・対話技術を、ユニバーサルコミュニケーションという切り口で取り上げた上で、2.8 章では究極のコミュニケーション形態の一つと言える脳情報通信技術や、生命科学と ICT 分野の新しい融合形であるバイオ ICT 分野の最新動向について述べる。最後に 2.9 章には、注目すべき新技術動向として新たな潮流を取り上げている。巻末には付録として、用語集や参考文献、および本文中には書ききれなかった詳細な情報を付している。

2.0 版改定にあたって

本書の冒頭「報告書の構成」にも述べている通り、情報通信技術（ICT）は社会を支える、無くてはならない存在となっている。本 ICT 俯瞰報告書は 2023 年 7 月に第 1.0 版を、続く 1.1 版を 2025 年 3 月に発行してきた。この間から現在に至るまで、ICT 分野とそれを取り巻く社会環境には様々な変化が起きている。特に、2 章の各技術分野については 1.0 版執筆時点での最新動向や、2030 年頃をイメージした将来展望が記述されており、執筆から 3 年弱が経過したことで様々な展望の変化が生じてきた。

そのような認識のもと、本 2.0 版の改定にあたっては、第 2 章の各技術トピックを含め、全面的に更新を行った。特に今回は、作成過程で各分野の有識者アドバイザーの方々との意見交換を実施することで、より俯瞰的な視点の獲得に努めた。なお、将来展望に関しては 2035 年頃を意識して記述することとした。さらに、新しい観点として、最新の注目すべき新技術に関する章を 2.9 章に追加した。

第1章 はじめに

ICT 分野は現在、従来からの社会のデジタル化の流れに加えて、全世界規模での感染症の流行を経て技術の普及が急速に進展するとともに、国際的な紛争の発生、さらに新たな AI 技術の登場と普及によって、その変化が加速している。本章では、ICT 分野を取り巻く社会の状況や、世界各地の動向について、いくつか主要な事例を取り上げながら述べる。

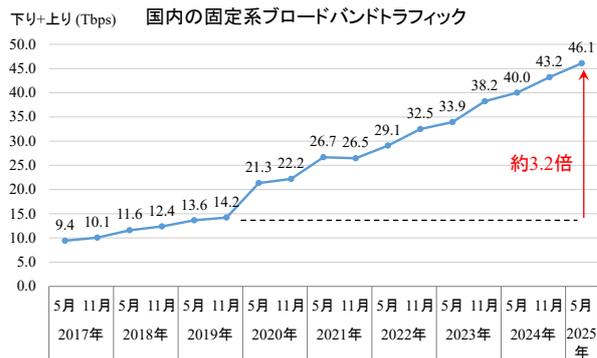


図 1.1-1 インターネットトラフィック推移¹⁾

1.1. 最近の世界情勢

1.1.1. 世界規模での ICT の普及とその余波

世界規模で流行した新型コロナウイルス感染症によって、2020年1月に WHO から緊急事態 (Public Health Emergency of International Concern, PHEIC) が宣言され、2023年5月にこの緊急事態の終了宣言が出されるまでに3年を要した。この世界的な感染症流行は ICT 分野にも大きな影響を及ぼし、この間に生じた非対面活動の要請増加は、社会生活のデジタル化を大きく加速することになった。日常的な勤務における Web 会議利用や、ストリーミングサービス等を通じた動画視聴が普及したことで、インターネットトラフィックは現在に至るまで増加し続けている。下り方向のトラフィックの4割近くが動画視聴や SNS 閲覧であるという調査結果もある⁵⁾。日本国内においても、2020年以降インターネットトラフィックの増加ペースは衰えていない (図 1.1-1)。

ICT の普及、および後述する AI 技術の急速な発展と普及は社会のデジタル化を推し進めた一方で、ICT 関連の消費電力はますます増加傾向にある。2024年には年間の AI を含むデータセンター関連電力消費量は世界の全消費電力の1.5%、400TWh を超え、さらに2030年までに倍増すると予測されている²⁾。我が国が国際公約として掲げている2050年カーボンニュートラル実現に向けては、情報通信分野においても技術革新による省電力化 (Green of ICT) に加え、ICT を様々な場面で積極的に活用することで業務効率化等を図る (Green by ICT) も一層必要性が増している。

1.1.2. 世界状況の変化と ICT

2022年2月から続くロシアのウクライナ侵攻に際しては、当初よりウクライナ国内で Starlink による衛星通信サービスが利用され続けている。民間市場においても、同サービスの世界のユーザ数は2025年11月時点で800万以上と報告されており⁶⁾、Amazon 等他社の衛星通信サービスも試験導入が進められる等、従来の地上網だけでなく上空や宇宙を含む Beyond 5G/6G 世代の通信網 (Non-Terrestrial Network) が、社会インフラとして急速に進展してきている。

国際社会における安全保障を巡る状況の緊迫化に伴い、各国で政府機関や重要インフラを狙った攻撃も数多く発生している。この流れを受けて様々な国際協力強化が進む中で、IoT 機器の安全性における認定基準の国際相互承認に向けた動き等、より具体的なサイバーセキュリティ対策が進められている³⁾。

また、量子技術分野においては、地政学的な環境変化と技術的な進展が相まって、量子コンピュータ分野のスタートアップ投資が活発化している。量子コンピュータの登場を前提とした耐量子計算機暗号等の標準化および産業界の対応の動きも進んでいる。また、量子通信技術についても欧州で商用サービスが始まる等、社会実装が加速しつつある。

AI 分野においても、2022年11月の米 Open AI による ChatGPT リリース以降、急速に生成 AI 技術とサービスは普及し続けており、同分野での企業投資も2020年に倍増して以来、2024年まで同規模以上の額が続いている⁴⁾。AI 分野を取り巻く動向については、1.3章に記述している。

1.2. 世界各国・地域の状況

前述のような社会状況の中で、ICT分野にはこれまでにない注目と期待が集まっている。以下では北米、欧州、アジアに分けて、世界各地域のICT分野を取り巻く最新動向について述べる。

1.2.1. 北米の状況

米国は現在に至るまで長期にわたり科学技術・イノベーション活動における世界のリーダーを担っている。昨今の米国の科学技術・イノベーション政策における基本的な潮流を俯瞰すると、米国と緊張関係にある中国が急速な経済発展を背景に科学技術・イノベーションに関する指標で米国に迫り、一部では上回る状況となってきたこと⁷⁾を念頭に、①競争力強化と②経済安全保障の両輪の推進を基調としている。①は(1)国立研究所を含む連邦出資研究開発センター(FRDC)による連邦投資、(2)州政府による民間企業や研究開発拠点の誘致、(3)大学等の高等教育機関における高度人材育成や研究成果のスピンアウト、(4)ビッグテックやスタートアップ企業との共同研究・人材交流が重層的に組み合わせられたエコシステムの形成であり、②は各技術(量子情報科学技術(QIST)／Beyond5G・6G／人工知能(AI)／サイバーセキュリティ)に共通する横串として、セキュアバイデザインやデュアルユース(軍民両用)、重要インフラ保護、耐量子計算機暗号(PQC)への移行が重視されている。また、ICTのデュアルユース技術としての期待から、国防関係機関によるハイリスク研究支援や実証等も盛んに行われている⁸⁾ほか、ホワイトハウス科学技術政策局(OSTP)や米国国立科学財団(NSF)等の主導の下で同志国との連携強化も積極的に図られている。

この潮流を踏まえて昨今の動向を述べると、第1次トランプ政権では科学技術・イノベーションの底上げに基づく競争力強化や経済安全保障に関する議論が高まりを見せた。続くバイデン政権では、CHIPS及び科学法(CHIPS and Science Act)の実施や地域イノベーション拠点の推進等による大型予算及び「米国雇用計画」の推進を通じて、上述のエコシステムが制度的に結節し始めるとともに、AIに関する政府横断ガバナンス整備や耐量子計算機暗号(PQC)の標準化など、競争力・安全保障を両輪で進める枠組みが前進

した。第2次トランプ政権では、AIや量子技術を含む先端技術が重要という姿勢は崩していないものの、執行済の助成金の取り消し、エネルギー・環境分野やDEI(多様性・公平性・包摂性)に関する予算や職員の削減を試みるなど混迷を極めている。第2次トランプ政権の方針に一貫性は見出しにくいだが、公的資金の削減は基礎研究やリスクを伴う研究開発の減退や人材の流出を加速しかねないものであり、世界のリーダーとして機能してきた米国の立場を危うくするものであると警鐘を鳴らす動きもある。

以上の流れを踏まえ、個々の情報通信技術における我が国が特に注目すべき最近の動きについて述べる。

①量子ICT

量子ICTについては2018年の量子イニシアチブ法(National Quantum Initiative Act)の枠組みのもと、ビッグテックやスタートアップ企業間の競争や、州を巻き込んだ量子研究開発の拠点形成の動きが活発になっている。

まず、ビッグテックやスタートアップ企業の動きとして、IBM、Google等のビッグテックが超伝導量子ビット方式で量子コンピューティング開発を牽引する一方、スタートアップ企業においてもイオントラップ(IonQなど)方式等の自らの強みを活かした開発を進め、世界初の量子メモリの商用化⁹⁾や、地域系通信事業者と連携したテストベッドの構築¹⁰⁾など、先進的な成果が生まれつつある。

また、地域における量子拠点形成の動きとして、連邦政府が早期から量子ネットワークの青写真を示し、国立研究所・大学・産業界が連携して都市圏ファイバや商用回線を用いた実運用志向のテストベッド整備が、各地¹¹⁾で進められてきた。

② Beyond 5G/6G

2022年からT-MobileやApple等が衛星通信事業者と提携を開始したことで、2024～2025年は非地上系ネットワーク(NTN)直収と端末間直接通信(D2D)が並行して進展した時期となった。

政府による研究開発に対する支援として、NSFは、2021年4月、「RINGS(Resilient & Intelligent NextG Systems)」を通じて、民間企業9社の協力の下、採択された42件の研究提案に3年間で最大100万ドルを提供している。また、地域におけるテストベッド

整備の試みとして、PAWR (Platforms for Advanced Wireless Research) を通じて、都市・郊外・農村スケールの大規模無線テストベッドを運用しており、Open RAN の検証・統合試験やエッジ／スライシング等の次世代ネットワーク機能の実証を加速している¹²⁾。さらに 2025 年 6 月には、日本を含む多国間プロジェクト VINES (Verticals-enabling Intelligent Network Systems) を発表した。VINES は、NextG におけるインテリジェントネットワークの社会実装を産業垂直 (パーティカル) の観点から加速することを目的とし、基礎と応用・実装の 2 トラックで研究開発を支援するプログラムである。

周波数政策では、連邦通信委員会 (FCC) の有識者 WG¹³⁾ で 6G の主要技術、候補周波数帯、ユースケース等について議論が行われ、2025 年 8 月には最終報告書が公開され、セキュリティ・プライバシー・オープン化・周波数候補に関する提言が整理された。特に 6G がメタバースを実現する基盤システムの 1 つとして認識されつつある点は興味深い。そのほか、第 2 次トランプ政権下の 2025 年 7 月には One Big Beautiful Bill Act により、FCC による周波数オークション制度が復活することとなった。

③ AI

2022 年 11 月の ChatGPT の発表と、それに続くビッグテック間の AI をめぐる競争激化は、AI の急激な進化が広く一般に認知されたと同時に、現時点での技術的限界も知らしめたと言える¹⁴⁾。AI 開発においては、ビッグテックが巨額投資を通じて、スタートアップ企業の合併・買収等を行い、自らの AI 開発に不可欠な要素を取り込む動きが活発的に行われている。

政策面では、バイデン政権は、科学技術における倫理的、法的、社会的課題 (ELSI) への対応を重視し、AI によるイノベーションと、市民権の保護の両立を掲げ、連邦政府横断でのリスク管理・安全性評価・調達の原則や国際連携の方向性を明確化した。しかし、第 2 次トランプ政権では、就任直後にバイデン政権で講じられた AI 政策のうち規制簡素化とイノベーション促進の方針と相容れないものの撤回・見直しを各省庁に指示した。2025 年 7 月には「AI 行動計画」を公表し、イノベーション・インフラ・国際 (外交・安全保障) を三本柱に、データセンタや人材育成、海外展

開に向けた規制障壁の除去を強調した。一方で、行動計画ではバイデン政権時に講じられた研究機会創出やレポート等といった一部取組は直ちに消滅せず、各省の見直し次第で継続・置換が分かるとの整理も示されている。

NIST は 2024 年に AISI (AI Safety Institute) と大規模な AISI コンソーシアムを立ち上げ、能力評価やレッドチーム、ウォーターマーキング等の手法整備を産学と推進している。後継の CAISI (Center for AI Standards and Innovation) においては、AISI の評価・実験機能を継承しつつ、標準化や試験、ガイドライン策定を中核に、モデル提供企業や国際機関と連携した実務的な評価フレームを推進している。

④ サイバーセキュリティ

サイバーセキュリティでは、重要インフラの防護、セキュア開発 (セキュアバイデザイン / デフォルト)、暗号基盤の近代化、国際協調を柱に、政策・標準・調達を連動させる実装が進む。

バイデン政権は 2021 年に、連邦政府と広範なサプライチェーンに対するログ管理や脆弱性共有、ソフトウェア部品表 (SBOM) の推進、クラウド利用の安全性向上を包括的に指示した。続く 2022 年には行政管理予算局 (OMB) が連邦ゼロトラスト戦略を示し、同年成立の「重要インフラ向けサイバー事故報告法 (CIRCIA)」により、重要インフラ事業者に対する重大インシデント等の報告の枠組みが整備された。2023 年には「国家サイバーセキュリティ戦略 (NCS)」が公表され、責任の転換 (個人からプラットフォーム提供者へ)、セキュアバイデザインの市場実装、国際連携の強化が図られると見込まれる。を明確化した。

実装段階では、NIST はサイバーセキュリティフレームワーク (CSF) 2.0 で経営ガバナンス機能を新設して経営レベルの統治を強化した。さらに、量子計算時代を見据えた暗号技術として、NIST は 2024 年に耐量子計算機暗号 (PQC) に関する標準を策定し、この PQC への段階的移行が始動している。消費者領域では、FCC のサイバートラストマークが 2025 年に本格運用に入り、適合機器にロゴと QR コードで実装状況を提示する仕組みが導入された。

これらの政策群は、国家サイバー長官室 (ONCD) が司令塔となり、NIST/CISA (サイバーセキュリティ・インフラストラクチャ・セキュリティ庁) /

FCC/OMB 等が役割分担する体制の下で進められている。一方で米国のサイバーセキュリティ分野では、クラウドや AI の普及に伴う脅威の高度化を背景に、市場の統合も急速に進んでいる。とりわけ Google、Microsoft、Amazon などのビッグテックや大手セキュリティベンダーが、スタートアップや専門企業の買収・出資を通じて、クラウドセキュリティや脅威インテリジェンス等、自社のサイバー防御やサービス提供に不可欠な機能を取り込む動きを活発化させており、官民両面からサイバーセキュリティは個別技術の付随要件ではなく、米国のイノベーション・エコシステムの中核に組み込まれつつある。

前述のとおり、米国における科学技術・イノベーション政策の重要性が高まる中、日米政府間や日米豪印 (QUAD) 間でも新興技術分野での連携強化が確認されている。こうした動きに加え、量子、Beyond 5G/6G 等では業界コンソーシアム間の協力覚書締結が進められており、さらなる連携の深化が期待される。

1.2.2. 欧州の状況

欧州の特徴の一つは、経済的及び政治的協力関係を有する民主主義的国家の集まりである「欧州連合 (EU)」が形成されていることである¹⁵⁾。各加盟国は主権国家であるが、その主権の一部を他の機構に譲るといふ、世界で他に類を見ない仕組みに基づく共同体をつくっている (EU の人口は現在約 4 億 5000 万人、現在 27 か国が加盟¹⁶⁾)。加盟国は、EU の動きを踏まえつつ、様々な取組を積極的に進めている。

2024 年 12 月、フォン・デア・ライエン氏を委員長とする欧州委員会の第二次体制 (2024 年～2029 年) が開始された。同氏は新しい政治指針『欧州の選択』¹⁷⁾ (2024 年 7 月発表) で、欧州の中心にある民主主義の維持、そして、安全保障、気候変動、競争力強化という課題に向けて、連合 (Union) の重要性を強調している。ICT 分野について、同ガイドラインは、デジタル技術による生産性の向上の他、サイバーセキュリティの強化、民主主義と欧州の価値を守るためディープフェイク対策や外国による情報操作対策なども目標として含む内容となっている。また、前欧州銀行総裁マリオ・ドラギ氏による報告書¹⁸⁾に基づいて策定された EU の新経済戦略『競争力コンパス』¹⁹⁾

(2025 年 1 月発表) は、欧州が競争力を取り戻すため、イノベーション (欧州と米国及び中国の間に開いた格差を是正)、脱炭素化と競争力強化の両立、安全保障・レジリエンス (欧州の戦略的自律のため EU 域外への依存減少など) を三本柱とし、ICT 政策に大きな影響を与えている。

EU の ICT 分野の研究開発及び実装・展開の助成支援は、研究・イノベーション活動を対象とする「ホライゾンヨーロッパ (枠組みプログラム)」²⁰⁾、EU 内のデジタル変革 (DX) を支援する「デジタルヨーロッパ」²¹⁾ の他、国境を越えるネットワーク・インフラ整備を支援する「コネクティング・ヨーロッパ・ファシリティ」²²⁾ などのプログラムを通じて行われ、各種プロジェクトが実施されている。

EU の ICT 政策の特徴は、以上の研究開発及び実装・展開の助成支援の他、個人データの取り扱いや AI の規制等の手法も交えた取組を推進していることである。両者は互いに補完的な関係にあり、共に EU の政治目標を達成する手段となる。加えて、EU では、ロシアのウクライナ侵攻などの影響を受けて、サイバーセキュリティに係る域内で統一的な法や仕組みが積極的に整備されていることが大きな特徴である。

以上を踏まえ、欧州における各分野の動向について概観する。

① Beyond 5G/6G (B5G/6G)

EU は欧州パートナーシップの枠組みで、企業や研究機関等とともに、「スマート・ネットワーク・サービス共同事業 (SNS JU)」²³⁾ を設立し、産官学連携で 6G の開発及び 5G 網展開を推進している。同共同事業では公募を行い、モバイル無線技術だけではなく、セキュリティや NTN、省エネルギーなどを含む、様々な研究プロジェクトが実施されている。また、EU のコロナ危機復興基金の中核となる「復興レジリエンス・ファシリティ」も 6G も含むデジタル移行に一部利用される²⁴⁾。その他、EU は 6G 開発の国際連携にも力を入れており²⁵⁾、アメリカ²⁶⁾、韓国、日本²⁷⁾などと連携している。

欧州の各国関係者は EU のスマート・ネットワーク・サービス共同事業の研究プロジェクトへ積極的に参加すると同時に、各国政府の支援のもと、6G 開発をそれぞれ進めている。

②量子 ICT

EU 及び欧州諸国は、量子領域における米国と中国の台頭を強く意識するとともに、特に量子技術の商用化を課題として認識しており²⁸⁾、様々な取り組みを実施している。

EU は 2018 年、「量子技術フラッグシップ」²⁹⁾ を立ち上げ、研究開発のため、10 年間で 10 億ユーロを投資することを掲げる。また、EU は同時期に、欧州のデジタル主権確保の他、量子産業強化などを目的として「EURO QCI イニシアチブ」³⁰⁾ を開始し、安全な量子通信インフラストラクチャの構築と展開を支援している（量子鍵配送の実装試験など）。EU が構想する量子通信インフラストラクチャは地上部分と宇宙部分に分かれ、後者では欧州宇宙機関（ESA）³¹⁾ と協力して、低軌道光衛星通信網（IRIS²⁾）³²⁾ を整備することが目標とされている。EU の新しい「量子戦略」³³⁾（2025 年 7 月発表）では、EU と加盟国の間で研究とイノベーションに係る共通アジェンダを作成し、優先事項などを共有することが目標の一つとされており、欧州では今後さらに量子領域の研究開発が一丸となって進められていく見込みである。

欧州では、英国が 2014 年、世界に先駆けて、量子技術に係る国家的な取り組みを開始したが、2023 年には新たに 10 年間で対象とする国家戦略が新たに策定され³⁴⁾、量子通信分野を含む量子ハブが設置されている³⁵⁾。他の欧州国もそれぞれ、英国に続き、国家戦略を策定している（ドイツは 2018 年、フランスは 2021 年）。

③サイバーセキュリティ

欧州では、AI の悪用や量子コンピューティングにより従来の暗号技術が無効化する恐れなどの理由の他、コロナ危機やウクライナにおける戦争などの社会・地政学的理由で、サイバーセキュリティに対する危機感が強く、域内で統一した法整備が進められている。

EU では、デジタル技術製品全般にサイバーセキュリティ要件を規定し、CE マークの貼り付けを求める「サイバーレジリエンス法」³⁶⁾ が発効している（2027 年 12 月から履行義務発生）。また、ロシアのウクライナ侵攻後、EU は、域内でのサイバー脅威の検知・分析・対応の強化を目的に、セキュリティオペレーションセンターを接続した警報システムの設置などを行う

ため、「サイバーセキュリティ連帯法」³⁷⁾ を施行している（2025 年 2 月）。法整備の他、EU はホライゾンヨーロッパやデジタルヨーロッパなどで、関連技術の研究開発及び実装・展開も支援している。上述した「EURO QCI イニシアチブ」も、EU の将来的なサイバーセキュリティ戦略の要の一つである。仕組み作りという点では、欧州の技術主権を強化するため、サイバーセキュリティ領域で戦略的に投資を行う欧州サイバーセキュリティコンペテンスセンターが新設され（2021 年）、助成支援制度を所管している³⁸⁾。

欧州各国でもそれぞれサイバーセキュリティ国家戦略が策定され、様々な取り組みが進められている。例えば、フランスでは 2022 年、イノベーションや教育・トレーニングのため 160 以上の関係者が集まるサイバーキャンパスが創設されている。

④ AI

EU 及び欧州諸国は量子技術と同じく、AI についても、アメリカ及び中国の台頭を強く意識し³⁹⁾、AI へ投資に積極的であるが、同時に安全で信頼可能な AI の開発が進むように法整備にも力をいれている。

欧州委員会は 2025 年 2 月に開催されたパリ AI アクションサミットの際に、官民合わせて 2000 億ユーロの投資イニシアチブを発表した（EU 拠出分は 500 億ユーロ）⁴⁰⁾。これを踏まえて、同年 4 月には、技術主権を意識しデータ・コンピュータインフラストラクチャへの投資や企業による AI の採用促進を含む包括的な AI 戦略「AI 大陸行動計画」⁴¹⁾ が発表されている。その一方で、EU は AI が安全で信頼可能であることを目標とし⁴²⁾、リスクベースアプローチに基づく「AI 法」⁴³⁾ も整備している（2024 年 8 月発効、2026 年 8 月までに全面施行）。

英国では、2024 年 7 月に誕生したスターマー新政権が、AI 活用を推進するため、データセンターへの投資などを含む新戦略「AI 機会行動計画」⁴⁴⁾（2025 年 1 月）を発表している。これに続き、AI リスクについて政府に科学的知見を与える AI セーフティ庁（AISI）が AI セキュリティ庁（AISI）⁴⁵⁾ へと名称変更され、AI のバイアスなどの問題よりも、安全保障及び犯罪利用に係る AI リスク対策に力が入られることになった⁴⁶⁾。

⑤グリーン ICT

欧州では環境問題への意識が高く、グリーン ICT 分野（ICT のグリーン化及び ICT を活用したグリーン化）でも多様な取組がなされている。

EU は、2050年までに温室効果ガス排出を実質ゼロにするなどの厳格な目標を含む、戦略「グリーンディール」⁴⁷⁾ の後、脱炭素化と競争力強化の両立のため、エネルギー集約型産業とクリーンテックに焦点を置いた「クリーン産業ディール」(2025年2月)⁴⁸⁾ を発表している。これらに対応して、ホライゾンヨーロッパで低消費電力技術などの研究開発に助成されるとともに、エネルギー部門での AI の活用も検討されている⁴⁹⁾。

加えて、EU では、米国及び中国と比べて、AI の活用に必要なデータセンターの容量が少ないことが危惧される一方で、データセンターの電力消費の増大も問題視されている。EU は「AI 大陸アクション計画」で、民間投資を呼び込みデータセンターの容量を5-7年後に少なくとも3倍にまで増大させることを目標としているが、持続可能なデータセンターの設置が優先される⁵⁰⁾。このため、欧州委員会はクラウドと AI 向けのコンピュータインフラストラクチャとデータセンターのグリーン化の研究及びイノベーションの推進を目標の一つとする「EU クラウド・AI 開発法」⁵¹⁾ 案を準備している。

⑥その他

最後に欧州における規制及びデータ活用を概説するとともに今後の欧州における研究開発に大きな影響を与えるファンディング制度の最新動向を見ていきたい。

欧州では、特に米国や中国のプラットフォーム事業者などに対抗し、欧州の競争力とデータ主権を強化するために、規制及びデータ活用が実施されている。

規制について、EU は、オンライン上の違法なコンテンツに対する消費者保護（「デジタルサービス法」⁵²⁾ 2024年2月全面施行）やデジタル市場の公正競争の促進（「デジタル市場法」⁵³⁾ 2023年5月施行）等に力を入れている。データに関しては、利用ルールを厳格化するだけでなく、データを有効利用し、社会経済にインパクトを与えることも目指し、EU の公共機関が保管するデータの再利用を簡便化することなどで、信頼に基づいてデータ共有を促進する「欧州デー

タガバランス法」⁵⁴⁾ (2023年9月施行)、そして、コネクティッドデバイスなどに由来するデータの活用に係る「データ法」⁵⁵⁾ が施行されている（2025年9月）。なお、欧州委員会は、AI 開発に活用可能なデータを増大させるため、新たに「データ連合戦略」⁵⁶⁾ を準備している。

EU のファンディング制度の最新動向として、2025年7月に発表された EU の予算案となる多年次財政枠組み案⁵⁷⁾ (2028年～2034年) では、新経済戦略『競争力コンパス』の実現手段として「欧州競争力基金」⁵⁸⁾ の創設が提案されている。同基金は現在多数ある EU の助成プログラムの窓口を簡素化し、資金調達を迅速化して、民間投資と公的投資を呼び込むことを狙いとしている。また、防衛・宇宙分野のデュアルユース研究の推進が予定される点も注目される。なお、新予算案では、ホライゾンヨーロッパの予算が955億ユーロから1750億ユーロへと大幅に増額されている。予算案の審議は2年間に渡って行われる予定である。

1.2.3. アジア・オセアニアの状況

ASEAN 加盟国（10カ国）は日本の約5.4倍に相当する約6億7,945万人を抱え、近年の一人当たりの所得も向上する中、GDP については約3兆6,223億米ドルとなっており、これは日本の85.6%、全世界 GDP の3.6%に相当する⁶¹⁾。この他、この地域には2023年に人口が世界最大となったと推計されるインドや、一人当たり GDP の高い先進国型の経済であるオーストラリアなど、我が国との経済の結びつきが深い国を擁する。この地域における我が国が戦略的に進めるべき研究領域において、注目すべき最近の動きを以下に記載する。

① Beyond 5G/6G

シンガポールでは、2022年9月から、情報通信メディア開発庁 (IMDA) が、シンガポール工科デザイン大学 (Singapore University of Technology and Design, SUTD) と連携して、東南アジア初となる6Gに関する研究所 (Future Communications Connectivity (FCC) Lab) を同大学内に設置している⁶²⁾。AI を活用した新たな無線通信プラットフォームの創出を目指す「AI-RAN Alliance」には、シンガポールからは、SUTD の

他、BROADRADIO、CloudRAN.ai、SynaXG が加盟している⁶³⁾。

ベトナムでは、2021年1月に、第6世代移動通信システムの研究を同年内に開始する方針を同国のグエン・ミン・フン情報通信大臣が表明⁶⁴⁾し、2022年2月には、6Gの研究、商用化に向けたロードマップ作成に向けて、情報通信大臣を委員長とする委員会が設置されている⁶⁵⁾。

この他、インドでは2023年3月モディ首相が、産学官連携の6G技術革新グループ「6G Technology Innovation Group (TIG)」が取りまとめた「6G Vision」を発表⁶⁶⁾ ⁶⁷⁾。テストベッドへの資金提供、インド全土の学術機関に5Gラボを認可、6G関連研究の承認、「Bharat 6G Alliance」の設立等を実施した⁶⁸⁾。

② AI

シンガポールでは、輸送・ロジスティクス、スマートシティと不動産、ヘルスケア、教育、安全とセキュリティの分野で国家レベルのAI化の実現を目指す、「国家AI戦略」(National Artificial Intelligence Strategy)の策定⁶⁹⁾を通じて、AI開発とAI導入支援等の取組が進められており、2023年12月には、改訂版である「国家AI戦略2.0」が公表された⁷⁰⁾。世界181カ国・地域を対象に行われた各国政府の人工知能(AI)に対する準備状況の調査⁷¹⁾において、米国に続き2位に位置づけられている。

シンガポールにおける近年のAI分野の研究開発としては、国立シンガポール大学が2024年5月にArtificial Intelligence Instituteを設置し、AIの実社会応用、AIガバナンス・政策、AIシステム・理論の分野における研究開発に取り組むとしている⁷²⁾。また、AI Singaporeによる東南アジアの多様な言語・文化・背景に対応したLLMであるSEA-LIONを開発・公開している⁷³⁾。SEA-LIONは、Version 1ではMosaicML、Version 2～3.5ではLlama3又は3.1、Version 4ではQwen3の各LLMモデルを利用している⁷⁴⁾。この他、A*Star Institute for Infocomm Researchによる音声入力インターフェースを有する東南アジア多言語LLMであるMERaLiONの開発⁷⁵⁾等が行われている。

ASEAN地域のその他の国としては、インドネシア⁷⁶⁾、タイ⁷⁷⁾、マレーシア⁷⁸⁾、ベトナム⁷⁹⁾、フィ

リピン⁸⁰⁾において、AIに関する国家戦略・計画が策定されている。タイでは、タイ国立科学技術開発庁(NSTDA)の主導の下、タイ国立電子コンピューター技術研究センター(NECTEC)によりタイ語対応のLLMであるPathumma LLMが開発されており⁸¹⁾、Version 2ではQwen3のLLMモデルを利用している⁸²⁾。

また、インドでは、2018年に国家AI戦略「National Strategy for Artificial Intelligence #AIFORALL」⁸³⁾を策定した。2024年3月、インド政府は、AIスタートアップ支援及びAIインフラ構築プログラムである「IndiaAI Mission」への1,030億ルピー(約1,785億円)の予算配分を認め、AIコンピューティングインフラの構築、AIスタートアップへの資金支援、IndiaAI Innovation Centerを通じた大規模言語モデル(LLMs)開発、IndiaAIのIndependent Business Divisionを通じた公共部門データセット開発、IndiaAI Future SkillsプログラムによるAI教育の拡大等を行うと発表した⁸⁴⁾。AIガバナンスに関しては、2025年11月に電子情報技術省が7指針、6推奨事項、アクションプラン、実用ガイドラインからなる「India AI Governance Guidelines」を発表した⁸⁵⁾。民間部門の動きとしては、2024年1月、インド発の生成AIスタートアップであるKrutrim SI Designs社が米国系ベンチャーキャピタルなどから資金を調達し、これにより同社の企業価値が10億ドルを超え、インドAI開発企業初のユニコーンとなったと発表した⁸⁶⁾。

オーストラリアでは、2025年12月に産業科学資源省が、スマートインフラの構築、AIの広範な導入・人材育成、AIの安全確保の3つを目標とする「国家AIプラン」が公表された⁸⁷⁾。オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)は、同国のAI研究の中心として、責任あるAI、AIアプリケーション開発等のプロジェクトを実施している⁸⁸⁾。

なお、「人間中心」の考えに基づく責任あるAIの開発と使用に取り組む国際的なイニシアティブである「AIに関するグローバルパートナーシップ」(GPAI: Global Partnership on Artificial Intelligence)については、アジア・オセアニア地域からは、オーストラリア、インド、日本、ニュージーランド、韓国、シンガポールが、2020年6月時点の創設メンバーとして参加している。2024年の議長国を務めたインドは、2023年12月にGPAIサミット2023を開催した⁸⁹⁾。

③量子 ICT

オーストラリア産業科学資源省は、2023年3月に、(1) 量子技術の研究開発・投資・利用の活性化、(2) 重要な量子インフラと材料へのアクセスの確保、(3) 熟練した量子人材の育成、(4) 国家の関心を支える標準化とフレームワーク、(5) 信頼できる・倫理的で包括的な量子エコシステムの5テーマからなる「国家量子戦略」(National Quantum Strategy) を策定した⁹⁰⁾。2024年9月、オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)は、QuintessenceLabs社の提供によりオーストラリア初の量子鍵配送(QKD)テストベッドを確保し、試験・開発が可能と報じられた⁹¹⁾。また、2025年10月には、CSIROが、QuintessenceLabs社及びAARNet(研究教育ネットワーク)と協力し、12.7 kmのファイバーループによるQKDシステムの実証に成功したと発表した⁹²⁾。

インド政府は、2023年4月、「国家量子ミッション」(National Quantum Mission)を承認し、量子コンピューティング、量子通信、量子センシング・計測、量子材料・デバイスといった量子技術の研究開発に対し2030-31年度までの期間に総額600億ルピー(約1040億円)の予算を割り当てると発表した⁹³⁾。2025年3月の発表には、国家量子ミッションとして、インド国内で2000 kmを超える2地点間の衛星ベースの量子セキュア通信の確立、2000 kmに及ぶQKDネットワークの実装、各ノードに量子メモリ等の量子技術を組み込んだマルチノード量子ネットワークの開発といった量子通信分野を含む量子技術の開発目的が盛り込まれている⁹⁴⁾。

インドにおける近年の量子通信分野の研究開発としては、2025年4月、インド通信省傘下のテレマティクス開発センター(C-DOT)とSterlite Technologies Limited社が共同で、インド初の4コアマルチコアファイバーによるQKD伝送の実験に成功したと発表した⁹⁵⁾。加えて、2025年11月、国家量子ミッションの支援を受けているスタートアップ企業であるQNu Labs Pvt Ltd.が、インド陸軍の支援を受け、既存の光ファイバインフラ上に構築された500 kmを超えるネットワークによりQKD実証に成功したと発表した⁹⁶⁾。

2022年2月、シンガポール国立研究財団(NRF: National Research Foundation)が国家量子安全ネットワーク(NQSN)と呼ばれるテストベッドイニシア

ティブを創設し同年末までに稼働開始予定であると発表したと報じられた⁹⁷⁾。NQSNウェブサイトによれば、NQSNは、地域と世界規模での量子安全通信サービスの発展を促進するため、政府機関および民間企業による試験運用のための商用技術の導入、システムのセキュリティに関する詳細な評価、企業によるこれらの技術導入を支援するガイドラインの策定を行うことにより、パートナーのための全国規模のプラットフォーム、量子安全通信技術の探究のための実証型テストベッドの構築、そのセキュリティ評価、量子安全アプリケーション、ベストプラクティス、ユースケースの統合の実証を目指すとされている⁹⁸⁾。2023年には、シンガポール政府ヘン・スイキャット副首相から、国家量子安全ネットワーク・プラス(NQSN+)を構築することが発表された⁹⁹⁾。この取り組みでは、通信事業者(Singtel社、SPTel社)と量子技術企業であるSpeQtral社の共同事業で開始され、あらゆる企業にサービスを提供できる相互運用可能な全国規模の量子安全ネットワークを構築するとされている。この取組において、東芝デジタルソリューションズは、SpeQtral社と協業関係を強め、実証プロジェクトに連携して取り組むと発表した¹⁰⁰⁾。

シンガポールにおける近年の量子通信分野の研究開発としては、2025年11月、SpeQtral社が、英国科学技術施設評議会(STFC)参加のRAL Space社と提携し、量子もつれ光子対光源と検出器モジュールを搭載したSpeQtreキューブサットの打上げと展開に成功したと発表した¹⁰¹⁾。同社は、衛星QKDの実証を目的とするSpeQtral-1の打上げを2026年に予定している¹⁰²⁾。

④サイバーセキュリティ

IBMの報告書¹⁰³⁾によれば、2024年、アジア・オセアニア地域は、全世界の34%のサイバー攻撃を受けており、サイバー攻撃を最も受けた地域となっている。同地域に対し攻撃者は、マルウェア・ランサムウェア(全事例件数の22%)、偵察・スキャンツール(同11%)、サーバーアクセス(同11%)を主な攻撃手段として利用した。業種別にみると、製造業が最も攻撃を受けており(全事例件数の40%)、次いで多く攻撃を受けた金融保険業、運輸業(それぞれ同16%、11%)を大きく引き離している。また、同地域における事例件数は、日本が66%を占めており、続いて

フィリピン、インドネシア、韓国、タイがそれぞれ 5% を占めた。加えて、Microsoft の報告書¹⁰⁴⁾によれば、2025 年 1 月から 6 月にかけて、顧客がサイバー脅威の影響を頻繁に受ける上位の国として、アジア・オセアニア地域においては、日本（7 位）、オーストラリア・台湾（10 位）が報告されている。

このような状況に対し、オーストラリア（1988 年）、フィリピン（2012 年施行）、マレーシア（2013 年）、シンガポール（2013 年施行）、タイ（2022 年施行）、インドネシア（2022 年）、ベトナム（2023 年）、インド（2023 年施行）において個人情報保護法・規則が施行されている^{105) 106)}。また、フィリピン（2012 年施行）、シンガポール（2018 年施行）、タイ（2019 年施行）、マレーシア（2024 年施行）、インドネシア（2024 年施行）、オーストラリア（2024 年施行）においてサイバーセキュリティ法・規則が施行される^{105) 107)}など、アジア・オセアニア地域では個人情報保護やサイバーセキュリティに関する規則整備が進みつつある。

このような中、ASEAN 各国のサイバーセキュリティ人材育成のため、2018 年に日本の総務省によるサイバーセキュリティ関連の協力の一環として設立された「日 ASEAN サイバーセキュリティ能力構築センター」(AJCCBC)¹⁰⁸⁾において、政府機関及び重要インフラ事業者を対象に「実践的サイバー防御演習」(CYDER)等が実施されてきた。2022 年 2 月には、国際協力機構 (JICA) とタイ政府との間で、これらの取組を更に充実させ、同地域全体のサイバーセキュリティ対応能力向上を目指す技術協力プロジェクトに関する署名が行われた¹⁰⁹⁾。

1.3. AI 技術の発展とその安全性に関する世界の動向

1.3.1. 近年の AI 技術の発展と各国の動向

本書 2.7 章でも述べている通り、2022 年末の米 OpenAI による ChatGPT の公開を契機に、生成 AI と呼ばれる AI 技術が注目され、研究開発や投資が活発化するとともに、急速に社会に浸透しつつある。

科学技術分野においても、AI 技術が注目を集めている。2024 年のノーベル物理学賞は、人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network) を用いた機械学習に関する先駆的な業績を理由に、John J. Hopfield 氏と Geoffrey Hinton 氏が受賞した。また、

ノーベル化学賞は、深層学習と Transformer アーキテクチャ²⁰⁸⁾を用いた AlphaFold2 が劇的に高速なタンパク質の構造予測を可能とし、実際に新しいタンパク質を設計することに成功した業績を理由に、David Baker 氏、Demis Hassabis 氏、John Jumper 氏が受賞した。いずれも AI 関連の研究成果が受賞理由となっており、AI 技術が科学技術の発展に対しても大きく寄与することが示された。

生成 AI 登場以降も、生成 AI を活用した複数の外部プログラムと連携可能な AI エージェントのサービス提供が始まりつつあり、さらにはロボティクスへの適用や五感情報への対応、また本書 2.8 章にも述べている通り、生成 AI の膨大な消費電力の問題解決にも資するであろう脳融合 AI の開発が模索されている。このような急速な AI 技術の発展に伴い、その安全性への懸念が国際的に高まっており、次章に述べるような安全性確保に関する取り組みが世界的に進展している。

1.3.2. AI の安全性を巡る世界の動向

前述の通り、近年の AI 技術の急速な進歩・普及に伴って、AI の安全性等の懸念にどう対応していくべきか、世界規模で議論が活発化している。特に、従前より格段に性能の高い生成 AI 等の技術と社会がどう向き合うべきか、世界中で議論が加速されることになった。ここでは、これらの国際的な動向を概観し、近年新たに創設された 2 つの枠組みである Global Partnership on Artificial Intelligence (GPAI) と AI Safety/Security Institute (AISII) について述べる。

図 1.3-1 に、G7 主要国首脳会議と両枠組の関係性を表している。2018 年の G7 加シヤルルボワサミットでは、AI の安全性や経済発展をもたらすポテンシャル等について共通ビジョンの宣言がなされた¹¹³⁾。続く 2019 年の G7 仏ビアリッツサミットにおいて、カナダとフランスより、人間中心の AI の開発と利用促進に向けたイニシアティブとして GPAI の設立が提唱された¹¹⁴⁾。翌 2020 年の G7 科学技術大臣会合でその立ち上げが合意され、同年 6 月に GPAI が発足した。

また、2023 年 5 月に開催された G7 広島サミットの結果を踏まえ、生成 AI をはじめとする高度な AI システムに関する国際的なルール作りのために「広島 AI プロセス」¹¹⁵⁾が立ち上げられた。その後、同年 9 月の中間閣僚級会合、10 月の IGF 京都 2023 を経て、

12月の閣僚級会合において、安全・安心で信頼できる高度な AI システムの普及を目的とした指針と行動規範からなる初の国際的政策の方向性やルールを共有する仕組みとして「広島 AI プロセス包括的政策枠組み」¹¹⁶⁾ が G7 首脳に承認された。

並行して、2023年11月の AI 安全性サミットに合わせて英国が正式に AISI を設立し¹¹⁷⁾、同時期に米国でも AISI の設立を宣言した¹¹⁸⁾。そして、その3か月後の2024年2月に日本にも AISI が設立され¹¹⁹⁾、以降は AISI、或いはそれに類する機関が各国に設置されるようになった（シンガポール；2024年5月¹²⁰⁾、カナダ；2024年11月¹²¹⁾、韓国；2024年11月¹²²⁾、フランス；2025年1月¹²³⁾、オーストラリア；2025年11月¹²⁴⁾ など）。

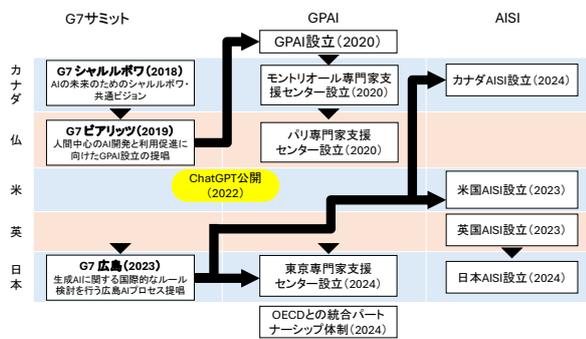


図 1.3-1 近年の主要国首脳会議と AI 関連の動き

① GPAI

The Global Partnership on Artificial Intelligence (GPAI) は、人間中心の安全で安心な AI の開発・利用・社会実装を目的とする、政府・国際機関・産業界・学界・市民社会の専門家から構成されるマルチステークホルダー型国際イニシアティブである。2016年の G7 香川・高松情報通信大臣会合以降の議論を経て、2019年 G7 デジタル大臣会合（フランス）で設立が提唱され、2020年6月に発足した。日本は設立時から参加している。

GPAI の活動は、経済開発協力機構（OECD）と、フランスの Inria、カナダの CEIMIA、日本の情報通信研究機構（NICT）内の3つの専門家支援センターを中核として推進されている。各センターは、OECD 事務局主導の GPAI プロジェクトや各センター主導の GPAI 関連プロジェクトを通じ、AI に関する国際指針や行動規範の実現に資する調査・研究を産学官民の専門家と連携して進めている。

NICT 内の GPAI 東京専門家支援センター（東京センター）は、以下の3つの柱を基本に、中長期的視点でプロジェクトを企画・推進している。

- ① GPAI ネットワークを活用した国際ルール形成枠組み（広島 AI プロセス等）の持続的発展・拡大
- ② 日本が強みを有する多言語・マルチモーダル AI 等に関する知見を踏まえた国際的情報発信
- ③ AI に関わる国際的産学官コミュニティ基盤の形成・サポート

2025年度の主な成果として、SAFE（Safety and Assurance of Generative AI）プロジェクトでは、汎用 AI のリスクと対応策を整理した汎用 AI 安全性ツールキットを作成し、公開した¹³⁴⁾。

GPAI プロジェクトである Agentic AI システムの進捗状況の追跡では、東京センターとして Agentic AI の定義・分類整理や事例収集を進めるとともに、11月の GPAI 全体会議専門家ワークショップで進捗を報告した。

GPAI 関連プロジェクトでは、東京イノベーションワークショップ（東京 IW）を5月に開催し、グローバルサウスでの AI 利活用、多言語・多文化対応 AI、国際 AI ガバナンスの相互運用性などについて議論した。11月の GPAI 全体会議では、東京 IW の成果展開として多言語・多文化対応 AI を GPAI の事業計画 2026 に基づく GPAI 関連プロジェクトとして実施することが OECD 事務局から提案された。

同じく GPAI 関連プロジェクトである Student Communities では、東京大学、同志社大学、東洋大学の学生主体による調査・研究の運営体制を整備し、議論が進められている。11月の GPAI 全体会議では3センター共同で進捗状況を報告し、学生が国際的な AI ガバナンスに関する議論に参加できる仕組みを構築した。2026年2月のインド AI インパクトサミットに合わせ、学生が主体となるワークショップの開催が検討されている。

このほか、東京センターは国内外の会合にも参加しており、それらの AI 関連動向を踏まえ、産学官民の専門家と連携した調査・研究を通じ、AI に関する国際指針や行動規範の実装に資するプロジェクトを着実に推進している。

② AISI

前述の GPAI が、世界規模でのマルチステークホルダーの取り組みであるのに対し、AISI は各国の事情に応じた活動をする点が特徴である。このため、AI モデルの安全性評価を国際的に協調するとして、2024 年 5 月の AI ソウル・サミットでは AISI 国際ネットワーク¹²⁵⁾ が立ち上げられ、日本、英国、米国、韓国、イタリア、オーストラリア、カナダ、シンガポール、ドイツ、フランス、EU が参加することが合意された。

各国 AISI の政策方針には、それぞれの特徴が現れ始めている。例えば、英国では 2025 年 2 月に AISI を「AI セキュリティ・インスティテュート (AI Security Institute)」へ改称し、組織名の「安全性 (Safety)」が「セキュリティ (Security)」に置き換わった¹²⁶⁾。これは取り組みの大幅な見直しではないとしているが、AI による化学・生物兵器の開発や、サイバー攻撃、詐欺や児童性的虐待などの悪用といったセキュリティへ焦点をより明確にする変更であった。

次に、米国では 2025 年 6 月に組織名から「安全性 (Safety)」を取り除き、「標準化 (Standards)」と「イノベーション (Innovation)」を強調する名称として「Center for AI Standards and Innovation (CAISI)」へ改称した。これはバイデン政権が重視していた「安全性第一」からトランプ政権による「イノベーション促進」への明確な転換を示している。商務長官ハワード・ラトニックは、「国家安全保障の名目で検閲や規制が行われてきた。イノベーターたちはもはやこうした基準に制限されることはない。」と述べ、CAISI が米国のイノベーションを評価・促進しながら、国家安全保障基準の安全性を確保すると説明した¹²⁷⁾。

一方、日本では 2025 年 12 月の第 3 回人工知能戦略本部において、高市総理大臣から信頼できる AI による日本再起を実現するための施策の一つとして、日本 AISI の抜本的強化が関係閣僚に指示され¹²⁸⁾、日本 AISI が国内における AI 安全性の中心的組織として一層機能を強化していくことが期待されている。

1.3.3. 今後の展望

AI を巡る動向は非常に動きが早く、新たな技術やそれに対応するためのガバナンスの取り組み等が

次々と発表され、国際的な競争も一層激しくなっている。2025 年 1 月には、中国の DeepSeek 社がリリースした DeepSeek-R1 が、学習コストを大きく抑えつつ OpenAI 社の推論モデル o1 に匹敵する性能を記録したとされ¹³¹⁾、従来の高額な GPU 環境に対する需要が減少するとの思惑から、米 NVIDIA 社の株価が一時急落した¹³²⁾。また米国内の企業間でも、2025 年 12 月に OpenAI 社が Google 社の Gemini3 サービス公開を受けて社内に緊急事態 (Code Red) を宣言する¹²⁹⁾ (※ 2022 年末には逆に Google 社が OpenAI 社の ChatGPT 公開を受けて社内に Code Red を宣言していた¹³⁰⁾) 等、ますます競争が激しくなっている。

より自律性を高めつつある生成 AI・マルチモーダル AI においては、AI と他システムとの連携が重要であり、これはロボット等を含むフィジカル AI (物理空間を認識・理解して動作する AI) にとっても核となる。現在 MCP (Model Context Protocol) というオープンソースベースの標準規格が存在感を増しつつある。MCP は 2024 年に米 Anthropic が発表した、生成 AI と他システムを接続する際のやり取りを定めたもので、「AI アプリケーションにおける USB-C ポート」のようなものと表現されている¹³⁵⁾。オーバーヘッドの大きさ等の課題も指摘されているが、MCP は 2025 年に Linux Foundation 傘下の Agentic AI Foundation に寄贈され、GitHub 上で日々更新されており、OpenAI、Google 等各社が自社製品へ組み込んでいる。

AI 技術は我々の社会を根底から大きく変える可能性を秘めており、同時にそのリスクも一部は顕在化しつつある。最新の AI 技術が、コンピュータや携帯電話といった従来の情報通信技術と大きく異なる点は、技術を社会に普及させる際に、倫理的、法的、社会的課題 (ELSI) についても検討が必須となる点である。GPAI や AISI といった AI 安全性に関する国際的な動きは、このような側面を反映したものである。我が国においても、研究開発・産業化を推進するとともに、このような課題の検討と対策の実践が引き続き重要だと考えられる。

また、現在の企業・組織が開発する生成 AI モデルの提供形態には、オープン型とクローズド型、およびその組み合わせのハイブリッド型がある。オープン型は、学習モデルのアーキテクチャやパラメータを公開し、研究・産業利用を促進するもので、Meta

の LLaMA 等が知られている。クローズド型は、OpenAI の GPT、Google DeepMind の Gemini 等が該当し、安全性の確保やメンテナンスを含めたコントロールがしやすい、各組織独自の競争力確保がしやすい等の利点がある。また、Mistral AI は一部のモデルは公開するが、高性能版は非公開とするハイブリッド型を採用している。社会に多大な影響力を持つ生成 AI の開発においては、クローズド型戦略の持つ推進力と、オープン型戦略の持つ透明性や学術的発展の促進の双方が重要と考えられる。これに加えて、生成 AI の出力を左右する学習データについて、そこに含まれるバイアスがもたらす問題や、不正なデータによるセキュリティリスク等が指摘されている。しかし、著作権等の問題もあり学習データセットが公開されている例は少なく、偽・誤情報対策や透明性確保は依然として大きな課題であると言える。

生成 AI に限らず、AI 技術の進展と普及は確実に進んでおり、米国サンフランシスコでは、Google 傘下の Waymo が、2024年6月から完全無人の自動運転タクシーサービスを一般向けに提供している¹³³⁾。この実現には、公道試験や段階的なユーザー拡大など、10年単位での継続的な試行と社会受容性の醸成が不可欠であったと思われる。生成 AI を含む最新の AI 技術の普及においても、技術的な信頼性の向上だけではなく、社会との協調と慎重な導入プロセスが成功の鍵となることを示唆している。

第2章 注目分野の動向

本章では、前述した社会動向の中での ICT 研究開発分野を「取り巻く環境」、「現在の研究開発動向」、および「将来展望」について述べる。注目分野の動向として、分野横断的な基盤技術となる Beyond 5G/6G からスタートし、8つの専門分野に分類して、その動向について述べる。

2.1. 分野横断的な基盤技術

Beyond 5G は、5G に続く次世代の移動通信システムとして、もはや単なる通信基盤としてではなく、社会基盤としての役割が期待されている。現在の日本の情報通信業界を取り巻く閉塞感を打ち破り、資本力が必ずしもトップではない日本が巻き返すためには、Beyond 5G の理念として、2030年以降における産業分野を横断した先端技術の一体的な活用が求められる。

本節では、日本における現在の通信システムを取り巻く環境の課題を示し、Beyond 5G 技術の研究開発に向けた取り組みを俯瞰するとともに、期待される将来展望を述べる。

2.1.1. 取り巻く環境

日本における 5G ビジネスに向けた取り組みの反省として、技術で勝っても市場では勝てなかった、と言われることが多い。これは、先端技術の研究開発能力は優れているものの、先端技術を活かした社会基盤としての移動通信システムアーキテクチャとして捉える広い視座と、それをビジネス化する見通しと実行力が欠如していたということである。そもそも現在の日本では、情報通信業界に限らず、努力したことが外的要因によって報われないことや、努力する環境が提供されていないことなど、産業における閉塞感があると思われる。この原因の一つには、社会的な課題が多様化し、産業界が独自の取り組みだけでは解決することが困難になっていることが挙げられる。

多様化した社会的課題の例として、子育てとキャリアの両立、家族の経済力による教育格差、画一的かつ受動的な教育による没個性化、居住地や身体制約による雇用制限、不健康長寿に依る社会保障費の増大や介護疲れ、などが挙げられる（図 2.1-1）。これらの課

題を解決し、人間本来の豊かさを享受しやすい社会にするために、Beyond 5G による情報通信システムを基盤とした社会実装に期待できるのではないだろうか。

2030 年以降の社会実装においては、社会課題を解決する新たなサービスを創生するため、各産業や事業者が柔軟に連携し、適切な役割分担のもと一体となって、ワクワクと活躍していく環境が求められる。そのためには、技術の融合や業種を越えた連携を促進していく仕組みの確立が必要である。

このようにして生まれた新たなサービスは、社会の在り方や人間の生き方に関わる価値観にまで影響を与える可能性がある。例えば、AI による人間の行動変容や無形資産の分散型交換においては、革新的な価値をもたらす可能性がある反面、倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues, ELSI）が生まれる可能性も併せ持つ。Beyond 5G により実現されることは幅広いため、このような側面を併せた議論が一体的に必要なためである。



図 2.1-1 多様化する社会課題と Beyond 5G

2.1.2. 現在の研究開発動向

日本国内には Beyond 5G の実現に向けた複数の活動が行われている。ビジョンに関しては、2020 年 12 月に Beyond 5G 推進コンソーシアム¹³⁶⁾ が設立され、白書の作成や国際連携を模索するための情報発信が行われていたが、2024 年 3 月に第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF) と統合し、XG モバイル推進フォーラム (XGMF) として新たな活動が開始されている。XGMF では、学术界や産業界の有志がリーダーを務め、多様なテーマの単位でプロジェクトが形成されており (2026 年 2 月現在で 23 プロジェクト)、それぞれのコミュニティでの議論を活性化させるだけでなく、外部連携を強化しているものも多い。XGMF 自体も海外の研究機関と MoU を締結するなど着実に

連携を進めている。また、Beyond 5G 新経営戦略センター¹³⁷⁾ では、知財や標準化に関するセミナーの開催や啓発ガイドブックの公開のほか、企業の枠を超えて集まったリーダーが未来社会に向けた提言を行う活動を行っている。

次に、研究開発に関して、Beyond 5G の要素技術をいち早く確立するために、NICT が革新的情報通信技術 (Beyond 5G (6G)) 基金事業¹³⁸⁾ を実施している。ここでは、総務省の補助金に基づき NICT が基金を設け、企業や大学等に研究開発を委託している。この委託研究開発は、半導体からデジタルツインまで幅広い分野をカバーしており、その研究成果の連携や社会実装、海外展開が強く期待されている。なお、NICT では長期的に自ら研究を行ってきた強みを持つ分野があり、Beyond 5G の実現に貢献するため技術の融合やニーズに適合させるための研究開発も行っている。

Beyond 5G につながるフォーラム等のコミュニティについても、いくつかの動きが始まっている。IOWN は、光通信技術を中心とした通信と計算リソースのネットワーク基盤に関する構想であるが、Global Forum を設立してユースケースや実証に関する議論を国際的に行っている¹³⁹⁾。テラヘルツシステム応用推進協議会¹⁴⁰⁾ は、テラヘルツ技術をもとにしたシステム開発の課題検討やユーザーニーズの調査などを行っている。スペース ICT 推進フォーラム¹⁴¹⁾ は、宇宙通信技術に関して情報共有、協調・戦略領域の整理、戦略検討などを行っている。ワイヤレスエミュレータ利活用社会推進フォーラム¹⁴²⁾ は、仮想空間上に電波利用環境を構築して無線システムを模擬することが可能なワイヤレスエミュレータの情報交換、普及啓蒙活動などを行っている。

2.1.3. 将来展望

2030 年代には、どんな企業や個人であっても、Beyond 5G システムにおいて主体的かつ平等に活躍できることが望ましく、そのような環境を整備することによりオープンイノベーションを通じて新しい価値が生み出されていく。この主役となる企業や個人は、例えば情報通信分野だけというように同一の業種に閉じたものだけではなく、複数の業種をまたいで参画されるべきである。

これにより、様々なリソース (通信、計算、時間、

空間、周波数、など)が一体として有効活用され、新しい価値を生み出すサービスの創成につながる。そのためには、要素技術の高度化のみならず、それらをつなぐ仕組みが必要であり、これが Beyond 5G の重要な理念と考えられる。

図 2.1-2 は、Beyond 5G システムがあらゆるシステムの集合体として構成される概念を示したものである。利用者が要求するサービスを実現するためには、業種をまたいで複数のシステムを組み合わせ、適切に設定することが必要である。ここでは、地上系移動通信システム、HAPS、衛星通信システム、メタバース、デジタルツインの各業種が描かれているが、それぞれの業種には複数の事業者が存在する。したがって、同一業種から一つあるいは複数のシステムが提供される。また、サービスを構成するために複数の業種がシステムを提供する。

図 2.1-2 に示したオーケストレータは個々の業種では解決し得ないような、大きな社会課題の解決や、高い付加価値をもたらすための全体調和をする役割を担う。例えば通信やコンピューティングリソースの最適配置、動的稼働により、エネルギーの業種間、地域間での偏在をなくし、大きな社会課題である ICT 業界のエネルギー爆発などの課題解決に資することができる。

留意が必要なのは、図 2.1-2 は様々なシステムを組み合わせる新たなサービスをつくる概念であり、様々なデータやコンピューティングリソースをすべて集中管理する技術の方向性を示しているのではない点である。AI 技術が進化し、個々の業界が管理するエッジ側での AI 処理 (エッジ AI) が進むと予想でき、多くのデータはエッジで保持、処理される方向に進む。このことから業界を超えたデータやコンピューティングリソースを活用する仕組みはますます重要となるであろう。

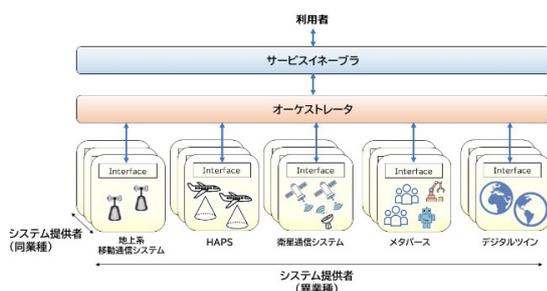


図 2.1-2 異業種をつないで実現する Beyond 5G のサービス

これを実現するためには、利用者の要求するサービスに応じてシステムを発見・選択・設定するなど、システムをまたいで調整役が必要である。図 2.1-2 ではこれをオーケストレータと示しており、オーケストレータは各システムと共通のインターフェイスによりやりとりを行う。また、利用者にとってはこのような複雑なシステムを直接扱うことは不可能であるため、その仲介役としてサービスイネーブラが存在する。サービスイネーブラは、利用者とサービスレベルの要求を交換するインターフェイスを持つとともに、それをブレークダウンしてオーケストレータに受け渡していく。このような概念を Beyond 5G のアーキテクチャとして定義し、必要な機能やインターフェイスを具体化していく作業が必要となる。

このようにして、Beyond 5G は単なる通信基盤としての移动通信システムから、サービス創成を担う社会基盤としての役割を果たしていくことが期待される。このような考え方が浸透すれば、現在の情報通信インフラのビジネスにゲームチェンジが起きる可能性が生まれてくる。これに勝ち抜くためには、アジャイルな研究開発の強化とイノベーション創生のための取組が必要なことは言うまでもない。また、社会のシステムとして組み込むためには、技術者が経済、法律、倫理を含めたあらゆる分野の有識者と議論する場が必要であり、大きな変化に対する社会への受容性を確認していくための実証など、様々な活動が求められる。

2.2. 電磁波の利活用

電磁波は周波数に応じて光から電波までの様々な性質を持ち、通信やエネルギー伝送やセンシングなど多様な目的に利用できる特性を備えている。空間を介して非接触でエネルギーや情報を伝送できるため、19世紀後半の電磁気学の発展以降、通信、計測、医療、産業など、現代社会の基盤技術として普及し、不可欠な役割を果たしている (付録 C-2-1)。また、物理的な媒体を必要とせず高速かつ大容量の伝送が可能であることから、利便性と効率性の両面で優れ、幅広い分野で利用が進んでいる。通信はもちろん、気象の観測と予測、インフラシステムの維持、生活に溶け込む電気電子機器の安全な動作、さらに災害対策に至るまで、現代社会は電磁波の活用を支えられている。また、リモートセンシングや GNSS 測位などの軍事・

民生のデュアルユースとしての利活用も進んでいる。一方、電磁波の周波数は限られた資源であり、未利用の周波数領域の開拓や同じ周波数の電磁波を異なる用途で共用する技術などの研究開発が進められている。

本章では、Society 5.0¹⁴³⁾ の実現に向けて必要となる電磁波を活用した基盤技術に関して、以下の5つの技術に着目してその研究開発動向を述べる。すなわち、①フィジカル空間からサイバー空間へ受け渡す情報を得るために必要な「リモートセンシング技術」、② Beyond 5G/6G に不可欠な地上、海洋、上空(成層圏含)、宇宙空間をシームレスに繋ぐネットワークシステム(非地上系ネットワーク、NTN: Non-Terrestrial Network)の安定運用に必要な「宇宙環境を把握・予測する技術」、③電波利用の大きな変化に対して、電波を効果的かつ安全に利用するために必要な「電磁環境技術」、④ ICT の基盤であり、時間だけでなく位置の正確な計測を実現する「時刻と周波数を生成・計測・供給する技術」、⑤アクチュエーションによる行動変容を引き起こす次世代のコミュニケーション環境を創る「デジタル光学基盤技術」である。なお、我が国の電波法では3THz以下の電磁波を電波と定義しているが、本章ではより高い周波数の光領域の電磁波の利活用も対象としている。

Society 5.0 を実現するデジタルツイン(サイバー・フィジカルシステム)において、これらの技術がセンシング・プロセッシング・アクチュエーション及び標準計測基盤技術のどこに位置づけられるかを図2.2-1(a)に示す。また、我々の生活における電磁波技術として航空機における電磁波技術の利用について図2.2-1(b)に示す。

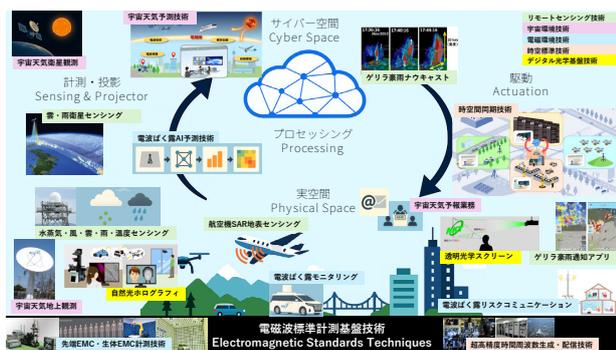


図 2.2-1 (a) デジタルツインにおける電磁波技術の概念図



図 2.2-1 (b) 航空機で利用されている電磁波技術の例

2.2.1. 取り巻く環境

① リモートセンシング技術

日本を含む世界各地で異常気象や気象災害が多発している。特に、近年の豪雨災害の激甚化は、「疑いの余地なく」進行している地球温暖化の影響であることが IPCC (International Panel on Climate Change) によって報告されている。このような地球環境・気候変動問題をはじめ、生活の安心・安全、防災・減災、国土強靱化などが今後益々重要な課題となる。このような課題に対してはデジタルツインを用いたアプローチ(図2.2-1(a))が有効であり、リモートセンシング技術は、フィジカル空間からサイバー空間への情報の取込み口として重要度を増している。また、膨大なリモートセンシングデータに基づくサイバー空間における豪雨予測や注意喚起など、デジタルツインにおけるプロセッシングやアクチュエーションへの利活用も進んでいる。

② 宇宙環境を把握・予測する技術

また、太陽活動を源として発生する X 線などの電磁波や高エネルギー粒子、コロナガス噴出の影響により生じる地磁気や電気を帯びた超高層大気(電離圏)などの宇宙環境の変動、すなわち宇宙天気は、現在の高度に ICT 化された社会において、通信・放送、宇宙システム運用、航空機運航、衛星測位、電力などの社会インフラへ大きな影響を及ぼし、時として安定利用に障害を引き起こすことがある(図2.2-2)。約11年の周期をもつ太陽活動は、2025年頃に極大期を迎え、太陽フレアの規模や頻度が高い状況が続いており、低軌道衛星の高度低下やロケット打上げ延期、航空機航路の変更、GNSS 測位誤差増大など社会的影響も出ている。こうした社会活動への影響を事前に予測し、障害を最低限に抑えるべく、国際協力のもと宇宙

天気を正確に把握・予測して配信する宇宙天気予報が実施されるとともに、その高度化に向けて宇宙環境をより精度よく把握・予測する技術の研究開発や宇宙天気予報をユーザーに適切に伝えるための取組みが推進されている。

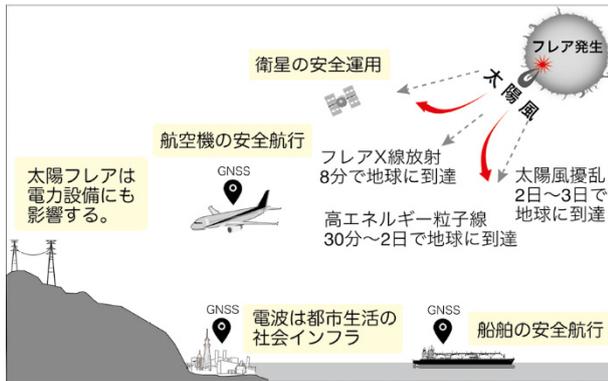


図 2.2-2 宇宙環境の変動とその影響

③電磁環境技術

一方、近年の高度に電化・情報化された社会生活環境の中では、我々の身の回りには、さまざまな電磁波が存在しており、これらによって作られる環境（電磁環境）の問題がある（図 2.2-3）。特に高効率パワー半導体を用いた省エネ家電等からの電磁雑音が周辺の無線通信機器の通信に干渉を及ぼすことが問題となっている。加えて、現在、普及が本格化している 5G や研究開発が進む Beyond 5G/6G システム等から放射される電波に対して、人体ばく露の視点から安全性を適切に維持・管理することが必要とされている。また、フェイクニュースなどによる電波の安全性に対す

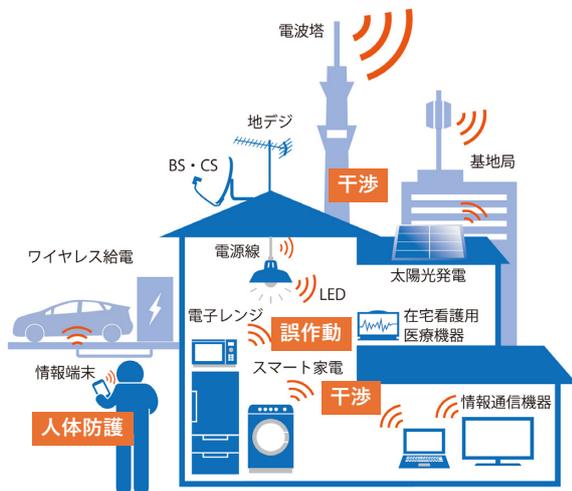


図 2.2-3 電磁環境の概念図

る不安増大などを防止するための取組も必要とされている。さらに、無線通信機器の性能を試験・点検するための測定器の性能向上も進んでおり、それらを管理する技術も必要になる。電磁環境技術はこれらを解決に導くための技術である。

④時刻と周波数を生成・計測・供給する技術

また、高度な科学技術の上に成り立っている現代社会においては、時刻や周波数の基準を社会が共有していることが必須である。周波数の基準があることで無線通信が可能になり、時刻基準があることで、交通機関の運行、高速電子商取引、通信、放送等が成立する。我が国では NICT が運用する標準電波局、NTP、光テレフォン JJY により広く標準周波数・時刻情報が配信されている。高精度な時刻は、まず原子時計に代表される高精度な周波数基準を用意し、継続動作させることで得ることができる。高精度な周波数基準は前世紀半ばより原子時計によって実現されており、原子時計の出現は GNSS（全地球測位システム）測位を現実のものとした。GNSS は携帯電話ネットワーク基地局間の高精度な時刻同期にも利用されている。時刻と周波数を生成・計測・供給する技術はこれらを実現するための技術である。

⑤デジタル光学基盤技術

デジタル光学基盤技術は、近赤外～可視光における電磁波の伝搬を数値的に忠実にエミュレートする技術をコアとし、回折光学分野をアップグレードする技術である。Society5.0 の実現に資する技術として、現実世界のセンシング（自然光ホログラフィ）、及びアクチュエーション側の AR/VR 向け半透過光学素子の製造が含まれる。

2.2.2. 現在の研究開発動向

①リモートセンシング技術

日常生活に馴染みの深い気象予報（天気予報）は、技術的にはデジタルツインを用いたアプローチの身近な例とも言えるが、まだ課題は多い。10分程度先までの豪雨であれば、短時間降水予測によってかなり良い精度で予測が可能になってきたが、例えば数時間から 1日先の線状降水帯の予測には精度が不足しており、特に雨雲の発生前の水蒸気の供給から雨雲の発生・発達までを総合的に観測するシステムが求められてい

る。このため、数値予報モデル・観測・現象の解明など様々な観点から研究が行われているところである。

大気現象をセンシングするセンサーの1つである降雨レーダーでは、風速を観測できるドップラーレーダーや定量観測に強い偏波レーダーが現場の業務にも浸透しつつある。一方、最先端の研究では、時間・空間的に高密度の観測が可能なフェーズドアレイレーダーの開発が進んでいるが、まだ各国とも研究開発の段階に留まっている。NICTなどが開発した、ドップラー・偏波・フェーズドアレイ技術を兼ね備えたマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）は、実用に最も近い世界最高性能の降雨レーダーの一つである（図2.2-4）。

また、降雨のない晴天大気を観測する有用な技術としてライダーがある。様々な方式が提唱されているが、気象観測用としてはドップラーライダー、水蒸気ライダーなどが試験的に使われ始めている。風速・水蒸気・CO₂など複数のパラメータを同時に観測可能なマルチパラメータ差分吸収ライダー（MP-DIAL）の開発も進められている。また、量子技術を活用したライダーの高性能化も進められている。

電波の伝搬速度が水蒸気量によって僅かに変化するという特徴を使って、放送波の伝搬遅延から水蒸気量を測定する技術開発も進められている。2022年には九州地方に整備した水蒸気観測網による観測を開始しているほか、2025年からは台湾でも実証実験が行われている。

日本が有するウィンドプロファイラの優れた技術と運用経験に加え、NICTが研究開発を進めてきた分解能向上技術（レンジイメージング）や測定データ品質向上技術（アダプティブクラッター抑圧）を含んだウィンドプロファイラに関するISO国際規格（ISO 23032 Radar wind profiler）が2022年に発行されている。

地表面の様子を高精度に観測する合成開口レーダー（SAR）では、高分解能化が進んでいる。NICTでは航空機搭載SAR（Pi-SAR X3）によって15cm分解能を達成した。衛星SARでは、民間企業が複数の小型衛星SARを打ち上げ、全球の地表面の状態を数時間毎に観測し商用利用するような計画も進んでいる。防衛分野においても小型SAR衛星の宇宙実証に向けた取組みが進められている¹⁴⁴。2024年よりK-Programにおいて開始されているHAPSを用いた海洋状況把

握技術に関する研究開発¹⁴⁵の評価対象にSAR技術が含まれており、2028年頃のサービス導入が計画されている¹⁴⁶。

大型衛星を利用した地球観測は国際協力のもとで推進されている。2024年5月に打ち上げられた地球観測衛星EarthCAREは衛星初のドップラー観測を行う雲レーダーを搭載しており、外部校正や検証作業を経て2025年1月より定常運用に移行している。また、衛星降水観測では、現在運用中の全球降水観測（GPM）計画の後継ミッションで、高精度な鉛直ドップラー観測を実現するための検討が進んでいる。

各センサーの高性能化に伴い、取得されるデータ容量も膨大になってきている。このようなデータの利活用を推進するためのデータ圧縮・復元や配信システムの研究開発も行われている。2024年にはMP-PAWRの膨大なデータを効率的に配信するためのプラットフォーム「きゅむろん」¹⁴⁷が開発・公開されており、2025年の大阪・関西万博において来場者への高精度気象予測情報の提供が行われた。



図2.2-4 NICT未来ICT研究所に設置されているマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）

②宇宙環境を把握・予測する技術

宇宙天気はその発生と規模をより早く把握・予測し、適切な情報発信を行うことで、影響を最小限に止めることが最重要である。激甚宇宙天気災害に備えるため、宇宙天気予報の基盤となる現況把握及び予測技術の高度化が進められている。2025年頃にピークをむかえた太陽活動極大期において複数回の大規模な宇宙天気現象が発生しており、測位精度の低下から自動運転の事故の発生¹⁴⁸、航空機航路の変更¹⁴⁹、打上げ変更¹⁵⁰など宇宙システムへの影響などの社会的影響¹⁵¹があった他、日本など低緯度でもオーロラが観測され

社会的にも話題になった。また、2022年には宇宙天気現象の影響を受けた多数の低軌道衛星が大気に落下して喪失するという経済的な被害も発生している¹⁵²⁾。

現況把握技術として、地上からの観測については、国内外機関が協力し、広範な領域を分担して観測している。国内ではNICTが唯一電離圏定常観測を行っている。また、国内外研究機関との連携し、東南アジア域電離圏観測網の高密度化・広域化や、太陽風観測衛星の24時間データ受信等が進められている。太陽風観測衛星としては、宇宙からの観測としては国際的に宇宙環境センサを搭載した静止衛星による観測が行われており、国内では、気象庁・総務省・NICTが連携し、2030年打上げ予定の次期静止気象衛星（ひまわり10号）搭載を目指して宇宙環境センサの開発が進められている。

宇宙天気の予測技術については、高速計算機を利用したシミュレーションやデータ同化、AI（機械学習）等を利用した技術の高度化が世界的に進められている。大気圏・電離圏結合モデルでは、国内ではNICT主導により「GAIA: Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy」のデータ同化モデル開発が進められている他、米国等でもその開発が進んでいる。磁気圏モデルは、国内外研究機関で開発が進められており、国内ではNICTが唯一極端現象を再現できるモデルを構築している他、衛星深部帯電の要因となる放射線帯電子の予報モデルの開発が進められている。太陽風モデルは、国内外で研究開発が進んでおり、国内ではNICTの「SUSANOO: Space-weather Usable System Anchored Numerical Operations and Observations」の開発が進められている。機械学習を用いた太陽フレア発生予測は国内外で熾烈な競争となっており、NICTにおいて世界トップクラスの的中率である「Deep Flare Net」が開発されている。

近年、宇宙天気予報のユーザーは、従来の宇宙・通信分野にとどまらず、航空、電力、測位（GNSS）、防災、さらには一般産業分野へと広がりつつある。太陽活動が社会インフラや経済活動に与える影響への理解が進み、リスク管理や安定運用のために宇宙天気情報を活用する業界が増加している。宇宙天気の現況・予測情報をわかりやすくユーザーに提供するためのサービス・アプリケーションの開発も進んでいる。国内では、太陽放射線被ばく

警報システム「WASAVIES: WArning System for AVIation Exposure to Solar energetic particle」、衛星表面帯電リスク評価システム「SECURES: Space Environment Customized Risk Estimation for Satellites」、短波帯電波伝搬シミュレータ「HF-START: HF Simulator Targeting for All-users' Regional Telecommunications」などが開発されている。2025年6月には様々なユーザーが宇宙天気予報の情報を適切に理解・運用することで効果的に社会インフラなどへの影響を軽減させることを目的に、社会的影響をふまえた新しい警報基準に基づく宇宙天気イベント通報「SAFIR: Space weather Alert For social Impacts and Risks」を開始するとともに、宇宙天気情報利用ガイドライン及び入門的な利用の手引きの公開¹⁵³⁾が行われている。

また、地球規模の宇宙天気現象の監視及び予報については、国際協力が必要不可欠であり、21か国が加盟する国際宇宙環境サービス（ISES）等で連携して予報サービスを実施している他、観測のデータや機器等の標準化や基準策定が国際機関ITU-R、WMO、ISO、CGMS等で進められている。ICAOでは民間航空運用における宇宙天気情報の利用が進んでおり、日本も参画するグローバル宇宙天気センターから情報が提供されている。

さらに、防衛分野においても宇宙天気の重要性が増しており、2025年7月に公表された宇宙領域防衛指針¹⁵⁴⁾においても衛星の防護能力の構築において宇宙天気の正確な把握や予測の重要性が記載されている。

③電磁環境技術

複雑な電磁環境における電気電子機器と通信・放送の円滑な相互運用に向けて、共通の電源線により多数接続・同時使用される電子電気機器における電磁雑音発生・伝搬のメカニズムについて、理論検討、数値シミュレーション、実験を合わせ、5G等の無線通信端末に対する電磁干渉において支配的となる電磁雑音のパラメータ評価法を構築するための研究開発が進められている（図2.2-5）。国際無線障害特別委員会（CISPR）では複数雑音源からの電磁干渉の統計理論に基づく新しい電磁雑音許容値モデルの策定が進んでいる。また、ドローンのような自動・自律運転システムを対象とした電磁干渉・対策技術についての研究開発も行われている¹⁵⁵⁾。

Beyond 5G/6G 等の新たな無線システムからの電波へのばく露の安全性を適切に評価するために、ばく露評価技術の開発、人体に対する電波ばく露特性の解明、さらに電波防護指針の拡張および最新の無線通信技術に対応した適合性評価手法の実現に向けた研究開発が進められている。これらの研究成果の国際標準化や国内規制への反映、データベースの公開なども進められている。

電波防護に関するリスクコミュニケーションや疫学調査に利用可能な信頼性の高いデータを提供するために、電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・分析が行われている。さらに、取得・蓄積したデータを長期に渡り管理・運用するための取り組みが始められている。取得された電波ばく露レベルモニタリングデータの一部は Web 上で可視化・公開されている¹⁵⁶⁾。

2024年には、NICTと産業技術総合研究所が、合同でBeyond 5G/6G時代に利用が本格化するテラヘルツ帯（100GHz～）を含む周波数領域の計量標準及び較正技術のロードマップを公表している。また、2025年には、総務省情報通信審議会より今後の生体電磁環境研究や電波のリスクコミュニケーションに関するロードマップが改定されている。

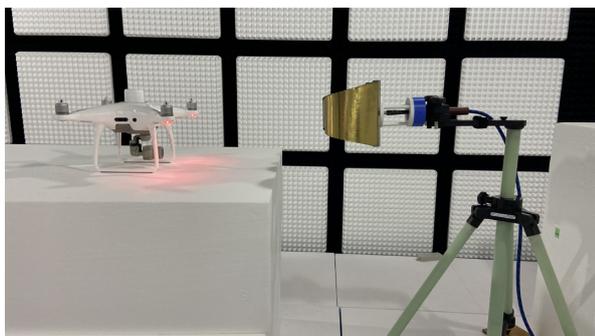


図 2.2-5 ドローンからの漏洩電磁界測定

④時刻と周波数を生成・計測・供給する技術

時刻や周波数の基準は現在半世紀ぶりの大きな転換点に向かっている。これまでの原子時計はGHz領域にあるアルカリ金属の超微細構造遷移を利用しており、このマイクロ波原子時計に属するセシウム原子の当該遷移が国際単位系の秒の定義を担ってきた。しかし、2000年頃より周波数が4-5桁高い光領域の電磁波による原子遷移を用いた光時計が、長足の性能向上を遂げている。その精度は従来の原子時計と比べ2桁

以上の向上を見せ、これを受けて2022年に開催された国際度量衡総会では、2030年に秒の定義を変更できるようにメートル条約加盟国が今後一層の努力をしていくことが決議された。また、2025年には、島津製作所から世界初の商用光格子時計の販売が開始され、海外でもドイツ、米国等でイオントラップ方式の光時計が購入可能となっている。

一方、マイクロ波原子時計はその発展の過程でGNSSによる位置測位を可能とした。我が国が運用する準天頂衛星システムでは、2027年頃目途としてGPS（米国のGNSS）に頼らずに自らが持つ衛星のみで測位が可能となる持続測位の実現を目指している。このため、2024年に公表された宇宙基本計画工程表改定版において、複数の光格子時計による日本標準時の信頼性向上が追加されている。

GNSSにおいては衛星に原子時計を搭載するが、携帯端末においては原子時計が組み込まれていない。そこで携帯端末や自動運転車等クライアント側にも、従来の水晶発振器でなく原子時計を搭載し、時刻や測地の精度を上げようという動きが出てきている。「いつでも」「どこでも」「だれでも」必要に応じた精度とコストで時刻を共有することができ、またそこから空間的な位置も把握可能となる時空間同期技術の実現が期待されている。原子時計を携帯端末に搭載するために、原子時計のサイズ・コストを抑えること以外にも、時刻・基準周波数の自律・分散供給技術によって多数の原子時計を使いこなすアーキテクチャ等が期待されている（図2.2-6参照）。2025年度までに時空間同期技術を実現するための装置が開発・実証されており、一部は製品化されている。

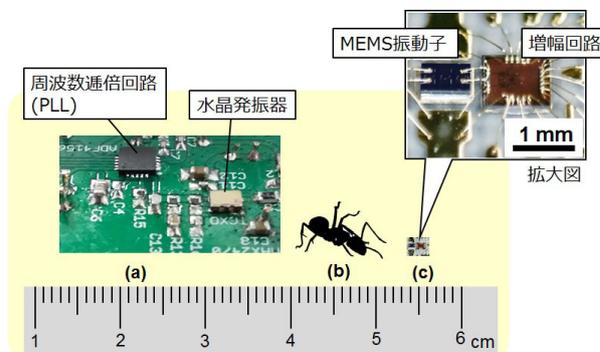


図 2.2-6 原子時計用発信回路の小型化

- (a) 従来の水晶振動子型マイクロ波発振器
- (b) クロオオアリ（体長7mm～12mm）
- (c) 新規に開発したマイクロ波発振器

⑤デジタル光学基盤技術

生命科学、材料科学、産業、芸術、日々の暮らしに至るまで、その場のありのままの情報を3次元画像センシングする技術・システムに関する研究開発が、世界的にすすめられている。自然光ホログラフィセンシングの分野は、フレネルインコヒーレント自己相関ホログラフィ（FINCH）の登場に伴い研究が進み、現在では大別して顕微鏡、カメラ、波面センサ応用に向けた研究開発が盛んである。FINCHを発明したイスラエル Ben-Gurion 大学では、3次元的な空間分解能の原理的な向上、3次元断層計測等の基礎研究に注力し、エストニアや豪州の大学と連携するなど国際ネットワークを広げている。また、他の FINCH 発明者が設立したベンチャー企業 CellOptic 社では、FINCH に基づく分解能 100nm 程度の3次元蛍光顕微鏡装置を市場へ提供している。他に、米国 Virginia Tech 大学のグループは、単一画素センサを用いるホログラフィの研究開発を40年以上にわたり継続しているが、ここ数年は中国、台湾、香港と連携しながら進めるなど、国際ネットワークを重視した活動を行っている。国内では、FINCH の登場に伴い研究拠点が著しく増大した。我が国は、自然光デジタルホログラフィの研究拠点の最も多い国の一つである。神戸大学的場教授のグループは、蛍光顕微鏡観察に採用するなど、顕微鏡分野への積極的な活用を示している。東京農工大学高木教授のグループは、内視鏡への応用を提案するなど新しい計測応用を拓いている。NICT では、太陽光でフルカラーホログラフィ動画の記録再生系の開発と実証に世界で初めて成功した。また、持ち運び可能な新しい波面センサシステムを開発している。

また、透明光学スクリーン製造と応用も進んでおり（図2.2-7）、ホログラム技術を用いた透明光学スクリーンの有望な応用先に車載用の AR-HUD が開発されている。2022年に NICT は、ホログラフィックフィルムと複数台の安価な小型プロジェクタのみの簡易な構成により、裸眼で3D表示を体験できる透明 AR ディスプレイシステムを開発している。ホログラフィック投影技術を有する DigiLens は、自動車部品メーカー Continental との連携を通じて独自のホログラム導光板ディスプレイ技術を確立させた。その後、2023年にその技術を発展させた表面レリーフグレーティング（商品名：SRG+）を発売し、米国系のスタートアップである MojoVision（MicroLED ディ

スプレイ製造技術などを持つ企業）と組んでスマートグラス向けの導波路開発を進めている。またスタートアップ企業の Ceres Holographics も、2024年に米国の Eastman、ドイツの Covestro とホログラフィック透明ディスプレイの商業生産検討のための覚書を調印するなど、実用化に向けた動きが盛んになっている。国内では、近年 Sony の空間再現ディスプレイ（Spatial Reality Display）が展示会などでも注目を集めるようになっており、2023年には27インチのディスプレイが発売され文化、芸術、製造、医療分野など幅広い分野に導入されつつある。

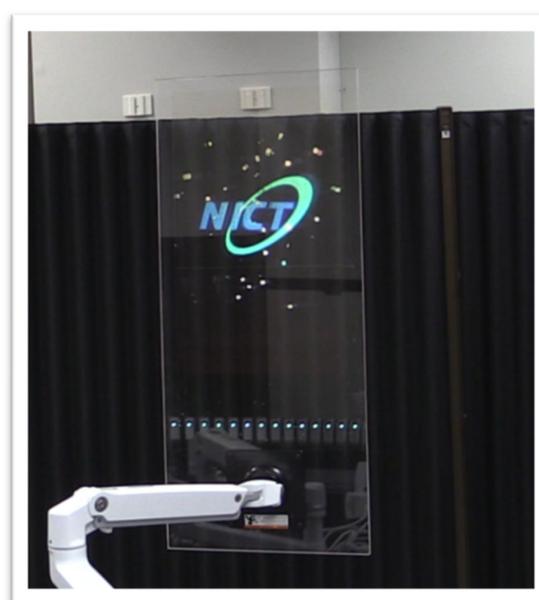


図2.2-7 AR用の透明フルカラーアニメーションの3Dディスプレイ

上記①～⑤の技術に横断する技術として電磁波を利用した材料物性計測があげられる。Society 5.0を実現するための様々な高機能材料の評価で電磁波技術が活用されており、近年では量子コンピューター用デバイスのための極低温から室温までの広範囲で電気的特性を評価する技術が開発されている。また、車載ミリ波レーダーの普及を背景としたミリ波帯での誘電率・透磁率評価方法や、医療・半導体・文化財などを対象としたテラヘルツ帯非破壊検査技術などの研究開発が進んでいる。

2.2.3. 将来展望

本章冒頭に述べた通り、次世代の社会基盤を支える電磁波の利活用技術は、今後ますます重要になっ

ていくと考えられる。将来の方向性として、通信とセンシングの融合（ISAC: Integrated Sensing and Communication）、量子技術の導入といった分野融合的な動き、また ICT インフラに甚大な影響を与える可能性もある地磁気嵐・電離圏嵐等の宇宙天気分野の研究開発等が進んでいくことが予想される。また、それぞれの技術を如何に融合させ、実社会に反映していくかも重要である。例えば、センシング技術により得られた情報を処理し、可視化・予測する技術を駆使することで、最終的には行動変容に繋げることが重要となる。

①リモートセンシング技術

Beyond 5G/6G 社会で益々利用が進む通信の電波は、通信だけに留まらずセンシングにも利活用可能である。今後は前述した ISAC のシステム検討も進むと考えられる。機械学習は、短時間降水予測、データの品質管理、圧縮・復元やデータ解析などすでに様々に利用されており、今後も利用が広がっていく。

量子技術を用いたセンシングについてはまだ各国で研究開発が始まったばかりだが、単一光子検出器を利用してライダーの検出感度を大幅に改善する技術の開発が今後大きく進展すると想定される。

②宇宙環境を把握・予測する技術

宇宙インフラの活用がさらに発展した未来社会（NTN が実現する社会）では、宇宙天気の影響が深刻化するため、宇宙天気予報に応じた対策をとることが必須となる。Beyond 5G/6G 時代に不可欠な低軌道通信衛星メガコンステレーションにおける衛星帯電や軌道の変化への対応、民間宇宙機などの交通手段の発達や宇宙旅行における放射線や通信障害への対応、各産業分野で普及が進む自動運転やドローンや HAPS における衛星測位障害への対応などの社会的なニーズに応えるために、現在の気象情報のような位置づけで、日常的に宇宙天気情報が求められる（図 2.2-8）。そのための研究開発に加え、宇宙天気予報をより効果的にユーザーに配信し、適切な対応につなげるための取組も必要となる。また、将来は地球以外の月や火星といった領域での宇宙天気予報を可能とするデータ観測・予測・通報に向けた研究開発や、国際的な枠組みの構築などの取組が必要になると想定される。

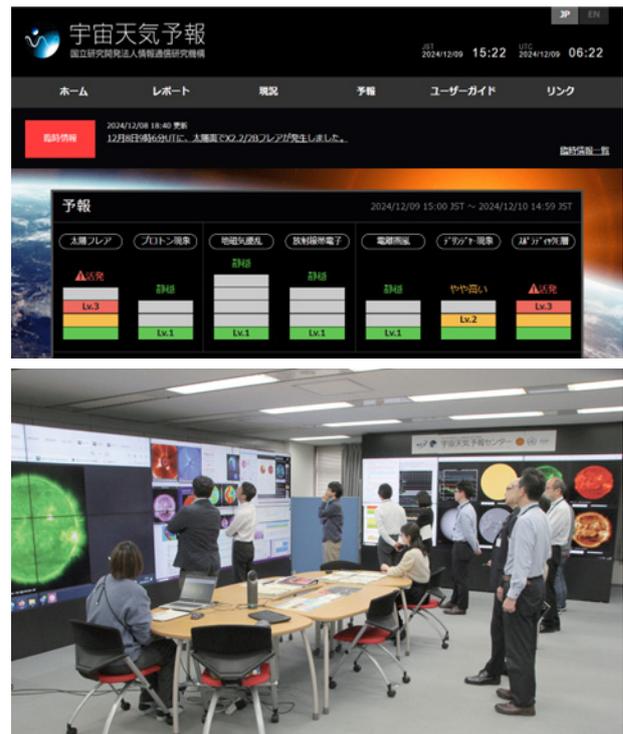


図 2.2-8 宇宙天気予報センター

③電磁環境技術

一方、今後のテクノロジー発展による与干渉側（電子電気機器）の構造の変化、被干渉側（通信・放送）の高度化、そして生活様式の変化に対して、適切な電磁環境を常に維持構築するために、電磁雑音評価技術を産業界へ展開する源とするべく、研究開発の発展が期待される。長波からテラヘルツ波までの人体ばく露量を高精度に評価するための基礎基盤技術の研究開発等を推進し、電波ばく露レベルのモニタリングを継続・拡大することにより電波のリスクコミュニケーションの推進に貢献することで、引き続き国内外の安全・安心な電波利用環境を維持していくことが期待される。

④時刻と周波数を生成・計測・供給する技術

光格子時計を利用した標準時の高信頼化に加え、より高精度な時刻・周波数基準による新しい応用技術分野が開拓されると予想される。有線または無線のネットワークで接続されたユーザー・デバイス等が時間と空間の座標軸を共有する時空間同期が実現すると、ネットワーク全体が同期系に移行し、GNSS がゲームチェンジをしたレベルの時刻精度がネットワークの隅々で得られ、遅延保証通信、暗号通信、量子通信等の基盤となることが想定される。量子計算・量子暗号

が実現しつつある今、これら新技術の恩恵を広く行き渡らせるためには、量子状態を遠方に伝送する、量子伝送が必要となる。量子伝送の研究開発においては、光時計レベルの安定した時刻を二地点間で共有することが必須の前提であることが分かっている。また、様々な方法で時空間同期が実現すると、これまで行っている時刻の供給方法も大きく様変わりすることが予想される。このような高精度な時空間同期インフラが構築されることで、GNSSに過度に依存した現代の無線通信ネットワークの脆弱性を改善し、レジリエンスが向上することが期待される。

⑤デジタル光学基盤技術

自然光ホログラフィセンシングについては、飛躍的な研究進展や応用開拓に至る手前の段階の研究結果が多く見られる。黎明期に提案された顕微鏡、波面センシング技術等については、すでに新しい計測器として実用化されている。透明光学スクリーン AR ディスプレイを含む、XR 市場は、日本国内で 2028 年度に約 1 兆 8,700 億円と予測されており、XR に加え e コマース、ゲーム、ヘルス&フィットネス等を含む世界全体のメタバース市場では 2030 年には約 5,078 億ドルの規模が見込まれており¹⁵⁷⁾、今後もさらなる成長が見込まれる。

材料物性計測技術については、テラヘルツ利用の研究開発を背景としたより高周波数領域での材料物性計測技術の開発が進むとともに、量子技術の宇宙利用を見据えた、より極限環境における材料物性計測技術が必要とされる。また、測定だけでなく分子レベルのシミュレーションを用いた材料評価・改良・設計技術なども進展することが見込まれる。さらに、材料物性計測技術が製品の品質評価・モニタリングなどに広く普及することも想定される。

電磁波の利活用技術①～⑤が連携・融合し、新たな電磁波利用を開拓することも期待される。特に高度な通信ネットワークが利用される NTN 環境では、各分野の技術を連携させることで、宇宙から地上までのネットワーク環境を包括的に評価・改善することが可能になると期待される。このようなシステムを構築運用することで、今まで以上に高機能かつ高信頼性が要求とされる社会インフラシステムの安心安全な運用に貢献することが求められる。

さらに、50年後のような長期未来展望を見据えた場合、ICT 利活用の進展や気候変動による災害激甚化が想定され、災害対策のための電磁波技術開発を長期的に取り組んでいく必要が望まれる（付録 C-2-2）。

2.3. 通信ネットワークインフラストラクチャー

広帯域広域通信や低遅延、高信頼という通信ネットワークインフラの根本的な要求性能は時代とともに高くなる。それらを実現するべく、光通信・無線通信（地上・衛星）およびネットワークング等の基礎・システム技術を高める研究開発はいつの世代でも不可欠である。現に、4G から 5G、Beyond5G への変遷において、基本的な方向性は変わらないまま目標や機能が高くなり、加えて、新たなベクトルの機能が追加されている。ここでは、2030 年から 2050 年までに期待される社会を実現するため、Beyond 5G で望まれる通信ネットワークインフラを取り巻く環境、現在の研究開発動向、将来展望を俯瞰する。図 2.3-1 に本節で対象とする将来の通信インフラ全体像を示す。地上には無線システムがあり、また、クラウドやユーザに近いエッジには計算装置や蓄積装置（サーバ）が配置される。これらの装置は仮想化されて複数のサービスで共用される。幹線や基地局を構成する機器間、データセンタ内外のサーバクラスタ間を光ファイバが繋ぐ。上空にはドローンや HAPS、さらに上空には非静止衛星と静止衛星が通信網の中継点となり、また、直接ユーザへの通信が可能となる。上空においても、無線のみならず光通信も登場する。電波で運べるデータ量には限りがあり、圧倒的なデータ転送能力を備える光通信技術が支える。

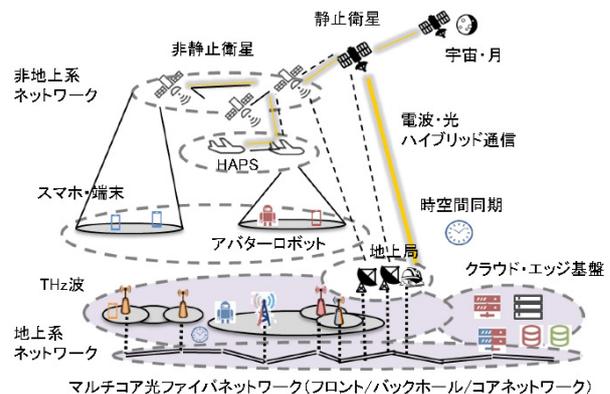


図 2.3-1 将来の通信ネットワークインフラ

2.3.1. 取り巻く環境

家庭でのインターネットアクセスについて、1990年代のインターネットの民生利用が始まったころはモデムをつかって9.6kbps程度でネットワークアクセスしていたが、その後、ISDN、ADSL、CATV、FTTHなどを利用してアクセス速度も増加し、現在、10Gbpsの光アクセスサービスも利用できるようなっている。この間、通信速度は100万倍に増加したことになる。

このような高速通信を支える光基幹網におけるファイバ1本あたりの伝送容量は、1990年代に10Gbpsに到達し、2000年代に1Tbps、2010年代に10Tbpsとなり、20年間で1000倍以上に増加している。その間、時分割多重技術、波長多重技術、帯域一括光増幅技術、直交振幅変復調技術、デジタル信号処理技術等の技術が成熟した。

無線アクセスは、1999年に11Mbpsの規格（IEEE 802.11b）として登場したWi-Fiが、2021年に策定されたIEEE 802.11ax規格においては9.6Gbpsと20年で約1000倍速くなった。直交周波数分割多重技術、直交振幅変復調技術、MIMO技術等の技術が成熟した。さらに、2025年に策定されたIEEE 802.11be規格においては、23Gbps～最大46Gbpsと規定されている（それぞれ8x8、16x16MIMO）。

移動通信システムは、1990年代に2G（デジタル化）で64kbpsだった通信速度が、384kbps程度（3G）、100Mbps～1Gbps（4G）を経て10Gbpsの5G世代となった。こちらも約20年間で10万倍に伸びている。高い周波数への対応、直交振幅変復調技術、MIMO技術等の技術が成熟し、機能分離の考え方が浸透した。

衛星通信については、ハイスループット衛星通信システム（HTS）を例にすると、2004年頃から毎秒ギガビット級の静止衛星のHTSの打ち上げが開始され、2005年、2012年にはそれぞれ10Gbps、100Gbps級のHTSが打ち上げられた¹⁶¹⁾。近年は数百Gbpsの通信容量にまで向上している。また、Viasat社は2026年以降にTbps級の衛星通信サービス提供を計画している¹⁷⁵⁾。

ネットワークのソフトウェアについては、従来、ドキュメントによる勧告・標準が中心だったが、オープンソースソフトウェアとして利用できるものが増えていった。例えば5Gについて、複数のオープンソースソフトウェアが公開されており、利用可能である。

インターネットの民生利用開始当時は、利用者あるいはその組織がサーバやソフトウェアを設置して利用するオンプレミス型が主流だったが、2000年代半ばにクラウドサービスが始まり、2010年代に仮想化技術が進展しクラウドにおけるコンピュータやストレージ、ソフトウェア利用が加速した。モバイルサービスの一部も自社でなくクラウドのソフトウェアを利用するものも登場している。

我が国では、FTTH等の超高速ブロードバンドの利用可能世帯は2015年で99.98%、移動通信については4Gの加入数が人口を超え、5Gの人口カバー率が2025年3月で98.4%になっている^{162) 163)}。

今後、Beyond 5Gに向けて、無線アクセスは10倍、基幹網は100倍の容量を求めるとBeyond 5G推進戦略等で示されており、それに対処するため、研究開発レベルで1000倍の向上を目指し実施する必要がある。また、上空のネットワークについては後述するように広範囲や低遅延での通信路提供が期待されており、ノード間で毎秒テラビット級の3次元ネットワーク提供が期待される。

2.3.2. 現在の研究開発動向

ここでは、まず、空間多重光ファイバ通信、非地上系ネットワークに着目し研究開発動向を記す。その後、計算基盤を包含した通信インフラの動向に言及する。

①空間多重光ファイバ通信

空間多重光ファイバ通信の一つに、一つの光ファイバに複数の光の通り道を設けるマルチコア光ファイバ伝送の研究開発が進んでいる。その伝送能力の進展はめざましく、2011年3月に、NICTが109Tbpsの伝送容量世界記録を達成し、2012年9月に、NTTが1Pbpsで記録更新した。その後、2015年9月にNICTが2.15Pbps伝送を達成した後、2017年9月にKDDIがさらに世界記録を更新し10.16Pbpsを達成した。容量のみならず、距離も含めた挑戦がなされており、2013年9月にNTTとKDDIが同時に容量距離積1Exa bps×kmを達成した。2020年3月にNICTが、38コアファイバで10.66Pbps及び結合3コアファイバで172Tbpsの2040km伝送を達成した。2023年10月にNICTが、38コアファイバで22.9Pbps伝送を達成した。

マルチモード光ファイバ伝送に関して、2019年9月にKDDIが10モードファイバを用いて標準外径ファイバ（125マイクロメートル）の伝送容量世界記録となる407Tbps伝送を実証した。その後は、2020年9月にNICTが、標準外径の15モードファイバを用いて、マルチモードファイバで初めて伝送容量1.01Pbpsを達成した。近年では多モードへの挑戦として、2022年9月にNICTが、標準外径55モードファイバを用いて、C帯にて1.53Pbpsを達成した。さらに、早期実用化を睨み、NICTは、国際規格である外径125マイクロメートルの標準外径光ファイバ伝送の記録の更新を続けている。たとえば、下記のような実績が出ている。

- ・2021年6月：標準外径ファイバにおける容量距離積の世界記録（319Tbps × 3001km=957Pbps km）を達成。その時点での最高はTE Subcomの881Pbps km（シングルモードファイバ）[2017年9月]。
- ・2022年5月：標準外径の4コア光ファイバで1Pbps大容量伝送実験に成功。20THzの周波数帯域（801波長）を使用¹⁶⁴
- ・2023年3月：標準外径の19コア光ファイバで1.7Pbpsの大容量伝送実験に成功。
- ・2025年4月：標準外径の19コア光ファイバで1.02Pbps、1,808kmの大容量長距離伝送実験に成功。

なお、TPU（Taiwan-Philippines-United States）海外ケーブルにおいて、世界で初めて2コアファイバが商用導入され、2026年中の運用開始予定が報じられている¹⁷⁶。さらなる大容量化の社会実装に向けた研究開発の進展が期待される。

②非地上系ネットワーク

次に、非地上系ネットワークの研究開発の動向を記す。非地上系における光通信の媒体はすべて無線である。中国は、2019年12月末に実践（Shijian）20衛星の打ち上げに成功した。同衛星には、伝送速度4.5Gbpsの光衛星通信機能が装備されている。NASA（米国）は、2013年に月を調査する衛星LADEEから地上へ622Mbpsの光通信に成功し、2014年にはISSへ光通信装置OPALSを搭載した実験が行われた。また、1.244Gbpsの通信速度による光データ中継衛星システムLCRDの静止軌道への打上げを2021年度に実施した。ESA（欧州）は、静止衛星Alphasat、EDRS、Sentinelシリーズへ、ドイツTESAT社が

製作した1.06μm帯コヒーレント通信を行う光通信装置を搭載し、Sentinel-1A、Sentinel-1B、EDRS-A等の衛星を用いた実証試験を継続的に実施している。DLR（ドイツ）は、小型光通信端末OSIRISをシリーズとして開発し、2017年打ち上げのFlying Laptop衛星等に搭載し、波長1550nmでの光通信実験を実施している。

民間企業に着目すると、2025年時点で1万機以上の衛星を打ち上げたSpaceX社（米国）は、低軌道の大規模衛星コンステレーション計画であるStarlink計画を進めているが、V2と呼ばれる世代の衛星群には衛星間の光通信機能が搭載されている。Amazon（米国）の衛星インターネット計画「Amazon Leo（旧Kuiper）」では、Amazon社が主導となってLEO（低軌道衛星）コンステレーション用の衛星やユーザ向けターミナルを開発している。同計画では、2023年12月に1,000kmの距離で100Gbpsの衛星間通信に成功したと発表しており、2025年10月までに合計129機の打ち上げに成功している。また、AWSではクラウドの提供のほか衛星向け地上局の従量課金サービスを行っている。この他、Amazon社の創業者であるJeff Bezos氏が所有するBlue Origin社はロケットを開発しており、Amazonと衛星打ち上げ契約を締結している。

国内では、NICTが2025年に小型衛星間通信を指向した2Tbpsの地上光通信実験に成功した。また、非静止起動のキューブサットおよびHAPSに搭載する10Gbpsの光端末をそれぞれ開発し、2026年の実証を目指している。さらに、スペースICT推進フォーラムが宇宙基本計画改定（衛星開発・実証プラットフォーム構築）を踏まえ、我が国における革新的技術の研究・開発・利用を促進する体制構築の一環として2020年に設立された¹⁶⁵。新たな展開を見せつつある宇宙分野で、異業種企業やベンチャー企業を含め関係者が広く参加する民間コミュニティの形成を目的としている。最新動向把握や将来の戦略等の検討を通じ、日本における取組みの方向性を議論できる場として、また政府の動きにも呼応し補強できる民間フォーラムとして、2025年3月現在の会員数で170者が加入している。本フォーラムにおいて、国内の通信事業者が以下の構想を共有している。

スペースコンパスは、宇宙RANや宇宙データセンターを構想し、2024年に光データリレーサービス、

2026年にHAPS通信サービスを計画している。NTTドコモとソフトバンクはそれぞれ、地上系に加え、HAPS、低軌道衛星、静止衛星を組合せ、HAPSについては国内全域をカバーしスマートフォンと直接通信するサービスを構想している。楽天モバイルは、スペースモバイル計画を推進し、低軌道衛星により国土全域をカバーし、衛星と端末の直接通信を構想している。KDDIは静止衛星サービスのみならず低軌道衛星によるスターリンクを用いたモバイルサービスを2022年に開始し、2025年にはスマートフォンと直接通信できるサービスを始め、洋上や山間部へ展開している。

NTN分野は、新しい産業分野としての開拓余地が大きく、災害時における強力な通信確保手段となる一方で、地上系と非地上系のシステムをどう接続するか、周波数をどのように活用するか、さらにはどのようなビジネスモデルが有効かといった課題もあり、産学官連携の取り組みが重要である。

③計算基盤を包含した通信インフラ

最後に、計算基盤を包含した通信インフラについて記す。まず（モバイル）エッジコンピューティングと2010年代前半に言われた形態は、今はNetwork for AI、AI-RANなどに構想が広がっている。ネットワーク運用管理へのAI活用として、AI for Networkという切り口も進んでいる。さらにはコンピュータ間の遅延を減らす光電融合の取組もなされている。例えば、Network for AIは、コンピュータ群をクラウドに分散配置して、オンプレミス（自社）にデータを置きながら、必要な計算を遅延が確定しているが遠方にあるクラウドに委ねるAPN（All Photonics Network）などの取組が注目されている¹⁶⁶⁾。AI-RANについては、コンピュータ資源をRAN近傍に集約することで、RAN機能の高速化とユーザ向けのサービス処理の低遅延化を両立させ、より効率的に資源を利用できる^{167) 168)}。いずれも、大都市に集中しがちな大規模データセンタを小規模かつ地方の都市に配置させ、都市計画やワットビット連携などとも相性を良くさせる可能性がある構想である。AI for Networkに関しては、障害・トラフィック流量・セキュリティ等の監視、さらには、ネットワーク設計や混雑回避にAIを活用する取組^{169) 171)}であり、また、サービスの要求をネットワークの設定へ翻訳する生成AI等を活用し

たインテント解釈の研究開発も進む^{170) 172)}。光電融合については、デジタル処理の省略や同一基板へ光電変換素子の実装による消費電力や遅延の大幅削減を目指し、データセンタやアクセスネットワークへの適用を想定した研究開発が進められている^{173) 174)}。

2.3.3. 将来展望

通信ネットワークインフラはその高度化高性能化を通じて社会生活基盤の安定化に寄与する。たとえば、2.1.3章に示したネットワーク全体で円滑にサービスが行なわれるようオーケストレータを構築することは必須であるが、少子化やネットワークに接続される機器増加に対応するためには、大規模ネットワーク制御運用管理の容易化が重要となる。このため、AI for Networkとして、異なるサービス事業者が異なる種類の装置を用いてネットワーク構築・運用する時代の要求を先取りし、該当環境において、自動制御のためのAI機能の更新・連携を行う技術やユーザやオペレータの意図を適切に解釈する技術を研究開発し、ユーザの通信サービス満足度を向上させること、具体的には、2030年代のBeyond 5Gネットワークのサービス性能維持向上、機器故障の未然防止、および即座の影響回避に寄与する必要がある。例えば、KDDIが2024年に自社のモバイルネットワークの故障監視にAIを導入したことが発表されている¹⁶⁹⁾。NICTは同社およびNECと共同で、複数のAIを連携させたネットワーク故障発見から再構築までの自動化実証に成功している¹⁷¹⁾。AI-RANの動きも、国内ではソフトバンク、海外ではノキア・NVIDIA連合等により広まっている^{167) 168)}。Network for AIについて、IOWN等のAPNはその簡潔な解法であり、また、NTTはIOWNの特長を活かし独自の生成AIの普及を目指している¹⁶⁶⁾。

次に、地上基幹網の大容量化と通信範囲の拡大について展望を示す。

空間多重光ファイバ通信は、移動通信網、ブロードバンド網、データセンタ網の基幹回線に必須である。国内5Gサービス開始の2020年を基準とし、基幹ネットワークの通信容量が10年で10倍増を要求されるとして、2040年には100倍が必要となる。余裕を見てさらに10倍の1000倍を備えるべきとして、また、2020年の基幹ネットワークのファイバあたりの通信容量を10Tbpsとする（2.3.1参照）と、2040年

には数10ペタビット級の基幹ネットワークを備える必要がある。そこには、空間・波長領域を活用した光ファイバ通信技術は欠かせない。また、通信需要の伸びが停まることはまだ想像しにくいいため、継続した研究開発が必須である。これを解決するために、空間多重や広帯域化、それらの長距離化などの技術は引き続き求められる。これらの技術の底上げにより、国際間、データセンタ、地上幹線などの大容量化が実現する。

非地上系ネットワークは、カバー範囲拡張、極限遅延サービス、バックアップ用の回線として新たな媒体となる。XGMFでは、地上系と非地上系の融合に関する議論も始まっている。2030年ごろには新たなLEOコンステレーションサービスや低遅延（HAPS1ミリ秒内、低軌道衛星数10ミリ秒で地上と通信）や広カバレッジを活かしたアプリケーションが普及し始める。ユーザ端末が地上の基地局だけでなくHAPSや低軌道衛星と直接通信するサービスも広がりを見せる。また、2030年代に、3次元の統合ネットワーク制御によりシームレスに繋がる通信サービス環境が実現する。さまざまな高度での光衛星通信が進み、より広帯域のサービスも広がりを見せるであろう。今後、NTNが普及するにつれて無線周波数の枯渇が懸念される。実際、移動通信システム等電波利用分野に目をむけると、あらゆる空間において電波利用の急拡大が進んでいる。総務省では、2040年までに70GHz幅の周波数幅の確保を目指すとしており、また、デジタルビジネス拡大に向けた電波有効利用方策として、2024年にRADIOイニシアティブを立てている。

世間全体でデジタルツインの活用が有望といわれているところ、限りある周波数資源の有効利用や未開地域での迅速な無線環境整備のためには、シミュレーションやエミュレーション技術の活用が効果的と考えられる。サイバーフィジカル空間上で無線通信システムを構築し、電波モデルや無線機の軌道等を与え、実無線環境での測定・評価をせずとも無線システムの検証が可能なワイヤレスエミュレータ技術を早期提供しつつ、2030年代に本格利用する必要がある。さらに、広帯域通信性能や相互干渉を評価できる環境を構築整備し、AIを活用した通信制御技術の検証に活用する展開も必要となろう。こうして、電波干渉予測や制御など複数の要素技術を高度かつ知的に組み合わせ、環境や利用の変化を利用者に悟らせない無線ネットワーク環境を構築する。そこでは、上空で運用される無線

機を対象とした3次元周波数共用の仕組みも必須となる。流通データ量を減らし消費エネルギーを抑え持続可能効果も得る。

電波周波数は一般に高周波になるほど、到達性（距離・見通し外）に問題をかかえる。そこで、電波反射体（RIS）や光電変換（RoFや波長回折）、信号回復（非再生中継や信号再合成）などの技術により高周波電波の到達範囲を広げる機能強化が必要となろう。さらに、無線資源の枯渇を無線以外の資源利用によって解決するため、光波と電波を調和的に利用する中短距離テラビットアクセスICT基盤を2040年ごろには実現する必要がある。

また、通信ネットワークインフラを支えるデバイスの研究開発も重要である。情報通信において求められる計算処理能力や大容量化する通信性能に対応して、新たなデバイス開発も進められている。詳細は2.4章にて述べる。

さらに次世代の通信ネットワークインフラという観点からは、現在研究開発が進められている量子ICT分野の動向も重要になってくる。現代のインターネットを支えるインフラは有線・無線ネットワークそれぞれに技術革新を伴いながら発展してきたが、量子ICT技術はそこに根本的な革新をもたらす可能性が期待される。同分野の動向については2.6章にて詳述する。

2.4. ICTデバイス技術

情報通信分野において、情報処理能力の向上や通信の高速・大容量化は継続的に進められており、常に限界や必要性の議論が並行しておこなわれているが、結果としてその需要や能力の増大は留まることなく進歩し続けている。今後も、必要性についての議論は引き続き注視していく必要はあるが、情報システムのクラウド化やIoT、AIの進展、5Gの普及からBeyond 5Gへの発展により、今後も進展は続いていくものと思われる。情報通信システムの性能向上を根底で支えているのは、それに用いられるデバイス（ICTデバイス）であり、従来デバイスの性能向上のみならず、これまで異なる技術が用いられていたデバイス間の融合や、従来の概念にとらわれない新規デバイスの活用によって新たな世界観が形成されることも期待される。

本章では、これらICTデバイスについての俯瞰を述べる。

2.4.1. 取り巻く環境

①情報処理や通信の高速・大容量化

クラウド化やIoT、AIの進展、5G普及拡大により、データセンタ（DC）やハイパフォーマンスコンピュータ（HPC）におけるデータ処理能力の高速・大容量化が求められている。また、マルチメディアサービスの拡大やモバイルトラフィックの増大、また Society 5.0 において提唱されているサイバーフィジカルシステム（CPS）の実現に向けて、超高速・大容量の情報通信を実現することが求められている。これらの社会的要求を受けて5Gの導入・普及が進みつつあり、さらに次世代の無線通信技術として Beyond 5G/6G の研究が活発化している。また、AIを活用した自動運転システムは事故の防止、渋滞緩和など現在の車に関する課題の解決に役立つと考えられる。このような自動運転システムではレーダー/ライダーなどが搭載されており、将来的には、より高い精度の測距が求められる。さらにCPS実現で重要な時空間同期という観点では、精密なクロックを持ち運びしやすい形態で設置する必要があり、これらに共通して必須である小型かつ高安定（低雑音）な信号源が求められる。一方で、増大するデータ処理能力や通信速度への対応を従来デバイスのまま行くと、必要な消費電力も増大の一途をたどることになってしまう。処理性能を向上させながら消費電力の増大を抑えることが求められる。

②従来利活用されていない周波数帯の活用や、新たなICTデバイスによる利用シーンの拡大

高速処理や高速通信を実現するにあたり、ICTデバイスが対応できる範囲（利用環境や対応周波数帯）を拡大することができれば、それによって利活用範囲を広げたり性能を高めたりすることができる。ICTデバイスが処理対象とする電磁波としては、従来利用されてきた電波と光の中間周波数帯であるテラヘルツ波の活用が望まれている。また、波長が280nmよりも短いUVC領域の光は、大気中のオゾン層ですべて吸収されるため、自然界には存在せず（地表の太陽光の中に含まれない）、ソーラーブラインド領域と呼ばれる。このため、太陽光の背景ノイズの影響を受けない光空間通信やセンシングへの活用が期待されている。また、深紫外光が存在しない自然環境下で進化してきた生物のDNAは、UVC領域の中に強い吸収構造を持ち、深紫外LEDを使えば、塩素などの薬剤を用い

ずに、有害な細菌やウイルスなどを効果的に殺菌・不活性化や、光加工・3Dプリンタの高精細化や樹脂の硬化、印刷、環境汚染物質の分解、分光分析、医療応用など、多様な技術領域において今後重要な役割を果たしていくものと期待されている。

従来のICTデバイスで多く用いられている半導体電子デバイスは、高温や強い放射線下での動作が難しいため、このような極限環境でも動作する新たなICTデバイスも求められている。また、従来の半導体ではなく、有機材料を用いた低環境負荷でフレキシブルなICTデバイスの活用も期待されている。

2.4.2. 現在の研究開発動向

①新たな周波数帯の利活用を目指したICTデバイス

Beyond 5G 2.0戦略の重点技術分野として取り上げられた無線アクセスネットワーク（RAN）分野において、5G・ミリ波通信の普及促進などの他に、サブテラヘルツ帯の研究開発への取り組みの推進についても言及された。見通し外通信など実用化への技術課題は多数あるが、利活用が可能な広い周波数帯域を有するサブテラヘルツ帯の無線通信技術は、5Gの機能高度化を実現できる点で期待されている。サブテラヘルツ帯無線通信用回路技術の研究は国内外でより活発化し、ビームフォーミングやビームステアリングなどに必要なMIMO（multiple-input and multiple output）技術などの高機能化が進んでいる。大量生産・普及に適したSi CMOS技術を利用したテラヘルツ帯無線通信用回路技術においてもその傾向は同じであり、University of California San Diegoによる150GHz帯の2次元フェーズドアレーICや、東京工業大学（現・東京科学大学）などのD帯（110-170GHz）で640Gb/sのMIMO通信を実現したRFIC・モジュール、また300GHz帯の2次元フェーズドアレーICなどが報告されている（図2.4-1）。

一方、Si CMOSなどシリコン半導体デバイスと対をなす化合物半導体デバイスである高出力GaNデバイスについては、住友電工が5G基地局用トランジスタ用途でトップシェアをもっているほか、NICTも日本国内最高の最大発振周波数を報告している（付録C-3-1も参照）。国外では、HRL LaboratoriesやUniversity of Notre Dame、Teledyne、Scientific Companyなど多数の機関で研究開発が行われているとともに、特に国外ではファウンドリーによる半導

体チップや MMIC 集積回路チップの製造委託が盛んで、例えば 5G や 6G 通信において重要な役割を果たす FR3 (7.125-24.25GHz) を想定した GaN-HEMT、F 帯 (90-140GHz) や D 帯で動作可能な GaAs-pHEMT、更には G 帯 (140~220GHz) や J 帯 (220-325GHz) を見据えた InP-HBT などのサービスが提供もしくはサービスインに向けた研究開発が行われており、今後、Si CMOS と同様にファウンドリーサービスを利活用することにより研究開発や製品化に必要な半導体チップや MMIC チップを短期間で製造する流れも出てくるものと思われるが、日本国内では一般に利用可能なファウンドリーサービスは少なく、防衛装備開発や経済安全保障上のリスクになる可能性がある。

またテラヘルツ波は、電波と光の中間の周波数で双方の特性を併せ持つ電磁波であり、エレクトロニクス・フォトリソの両分野のアプローチや融合を効果的である。テラヘルツ帯のような高い周波数のシステムに不可欠である高安定な信号源としては、光周波数コムがあり、従来の固体レーザーによるコム発生から光ファイバーレーザーベースに、さらに光変調器ベースの光周波数コムへと進展してきている。最近では更なる可搬性を求めた微小光共振器を用いたマイクロ光コム (μ コム) の研究開発が国外で進んできている。このような小型の可搬な光周波数コムが社会に実装されれば、精密なクロックの実現に貢献することになり、遠隔のデバイス同士の基準の配送や空間的位置の正確な把握、更に光波~テラヘルツ帯までの幅広い通信における大容量化に寄与することが想像できる。日本では、高 Q 値の微小光共振器作製技術を持つ NICT と慶應義塾大学、徳島大学が主に取り組んでいるが、最近では NICT と米国の大学・企業やドイツの企業との連携が進みつつある。

深紫外周波数帯の光源デバイスとしては、従来、産業的には主に水銀ランプが用いられてきた。水銀ランプは高出力且つ安価であるため現在も広く利用されているが、人体や環境に有害な水銀を含み環境負荷の高い製品である。水銀廃絶に向け「水銀に関する水俣条約」が発効され、2020年以降、水銀を含む製品の製造や輸出入の段階的な制限が始まっている。このため、水銀ランプに代わる新しい小型・低環境負荷光源として深紫外 LED への期待が飛躍的に高まっている。しかしながらこれまで、光出力とコストの両面でまだまだ水銀ランプに圧倒的な優位性があり、本格的に代替

が進むような状況には至っていない。今後、光通信応用や水の浄化や感染予防などの殺菌応用 (ウイルス不活性化)、光加工、水銀ランプの代替といった UVC 高出力ニーズに、コストを抑えつつ対応していくためには、深紫外 LED の単チップ当たりの光出力をいかに高めていくかが最重要課題の一つとなっており、欧米中韓を含む世界中で熾烈な研究開発競争となっている。

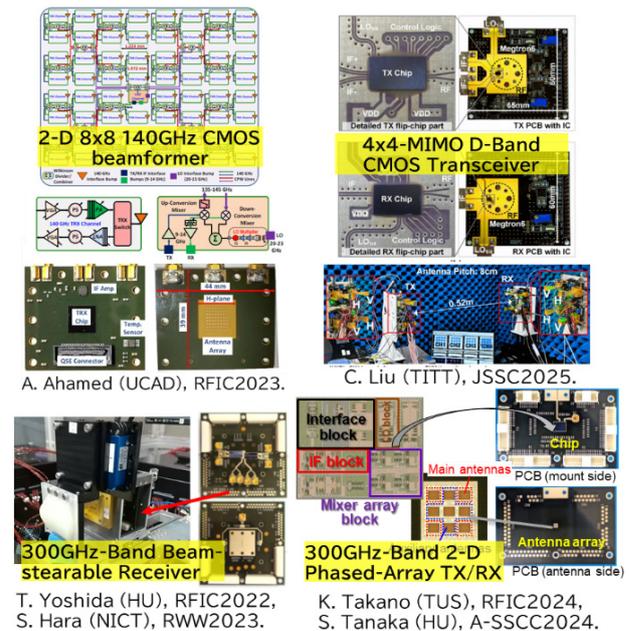


図 2.4-1 テラヘルツ帯無線通信技術

②新たな材料を活用した ICT デバイス

従来 ICT デバイスとして主に用いられてきた無機材料デバイスに対して、組成や性質をフレキシブルに設計できる可能性がある有機デバイスの研究開発が進められている。重要な用途として、高速な光変調や、電気-光変換、テラヘルツ波の生成・受信等が挙げられる。高速光変調器として、薄膜 LN、Si、InP、電気光学ポリマー (EOP) ハイブリッド光変調器の研究開発が進んでいる (表 2.4-1)。

これらの高速光変調器は、応用や用途によって、要求される変調特性 (帯域、 $V_{\pi L}$)、光損失、デバイスフットプリント等が異なっており、単一の材料やデバイス構造により、全ての応用や用途に対して理想的な光変調器とならない状況にある。将来は応用や用途によって住み分けがなされると想定される。これらの高速光変調器は光情報通信速度を決定づけるコアデバイスであり、特に DC や AI-HPC 用光インターコネクト向けに日米欧で熾烈な研究開発競争が進んでいる。

表 2.4-1 高速光変調器の種類

光変調器	薄膜 LN	Si	InP	EOP ハイブリッド
帯域 [GHz]	~ 80	~ 40	~ 80	> 100
V π L [V・mm]	20	2~20	8	0.3~3

高速無線通信利用として、テラヘルツ信号を光信号に直接変換するテラヘルツ変調器を用いる方法において、薄膜 LN を用いた THz 変調器による 100GHz 帯での 70Gbit/s の伝送実験や、EOP を用いた THz 変調器による 100 ~ 150GHz 帯での伝送実験、375GHz での直接テラヘルツ変調が報告されている。

空間光変調器 (OPA) として、有機 EO ポリマーを用いた方式 (EOP-OPA) の研究が進んでいる。シリコンを用いた方式 (Si-OPA) や液晶を用いた Liquid Crystal on Silicon (LCOS) 方式と比べて、光走査速度や消費電力の面でより高い性能が期待されている (付録 C-3-2 参照)。EOP-OPA は日本 (NHK 技研と NICT) を中心に研究開発がされており、デバイス作製プロセス技術も特殊であることから、日本が強みをもって推進できると考えられる。

酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、高効率なパワーエレクトロニクスデバイスや高い放射線下などの極限環境での利用が期待される新たな半導体デバイスである。同分野においては、NICT (当時) の東脇氏によりデバイス研究の先鞭がつけられ、2012年以降学術論文出版数の大きな増加が認められてきた (図 2.4-2)。新しい半導体分野として広く認知され、研究開発分野と

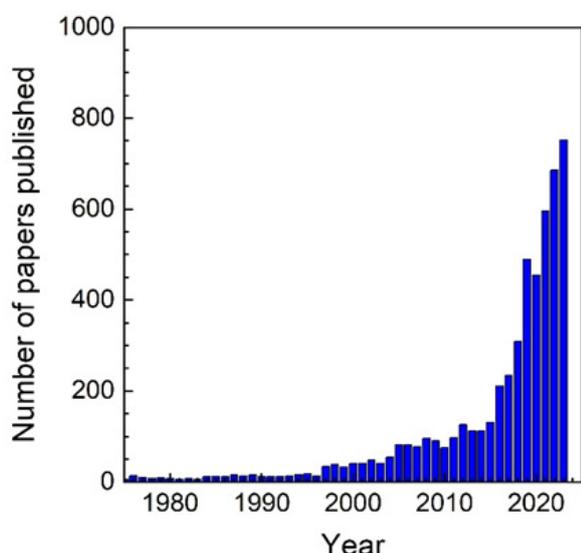


図 2.4-2 酸化ガリウムデバイス分野の論文出版数

しても大きな盛り上がりが見られている。この 1~2年に、 Ga_2O_3 研究で博士学位を取得した若手研究者によるスタートアップ企業の設立が報じられており、例えば、米国コーネル大からのスタートアップ企業 Gallox Semiconductors、独 IKZ からのスタートアップ NextGO Epi などが挙げられる。

最安定結晶構造に相当する $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバルク単結晶融液成長に関しては、ウェハー製造の最大手である (株) ノベルクリスタルテクノロジーなどの以前から製造・販売を行っている会社に加え、同事業への新規企業参入が相次ぎ、複数のベンダーが共存する状況に移りつつある。海外では、特に中国企業 (PAM-XIAMEN など) の躍進が目覚ましい。また、新しい動きとしては、東北大学発ベンチャーである株式会社 C&A から、貴金属ルツボを使用しない新規結晶育成手法による単結晶 Ga_2O_3 バルク育成が報告された。一方、薄膜エピタキシャル成長では、有機金属気相成長法 (MOCVD) 技術の進展が目覚ましく、従来のハライド気相成長法 (HVPE) とどちらが量産用として適しているかについて判断するための技術開発競争になると考えられる。

デバイス開発は、中国の躍進が顕著で、これまで中心であった米国、日本を上回る勢いとなっている。NiOx に代表される p 型アモルファス酸化物半導体を利用した種々のトランジスタ、ダイオード開発が活発化した。縦型トランジスタ開発に関しては、この 2年 で開発を行う機関がこれまでより増加した。(付録 C-3-3 参照)。

2.4.3. 将来展望

2030年代にはテラヘルツ波帯無線通信基盤技術の研究開発が実を結び、Beyond 5G/6G による「超高速・大容量」、「超低遅延」、「超多数同時接続」の機能実装により、テラヘルツ波帯 MIMO 無線 LAN、高精度映像 (8K) 無線配信・伝送技術などを利用した、どこにいても超高速な情報通信の恩恵を受けられる社会が実現できるようになると期待できる (図 2.4-3)。しかし、この目標を達成するためには、送信機の高出力化、多素子アンテナに対応した実装 (パッケージング) 技術、信号同期手法の開発など、数多くの課題がある。これらの技術的な課題に関しては、エレクトロニクス分野におけるテクノロジー統合 (Si CMOS+化合物半導体ハイブリッド)、5G までに確立された

無線通信技術との統合やフォトニクス分野との融合技術の確立などが求められる。また、誘電体等の優れた素材メーカーが多数ある日本の強みを生かし、素材によって差別化を図ることも視野に入れるべきと考えられる。

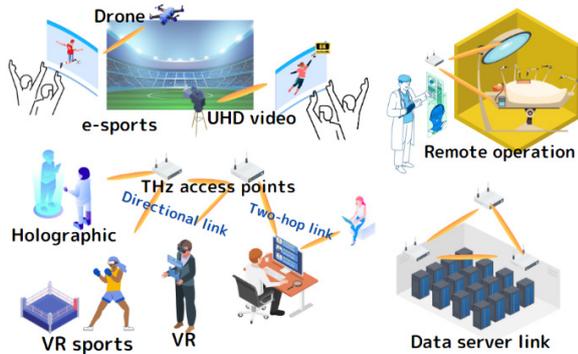


図 2.4-3 将来の超高速無線利用イメージ

深紫外光デバイスでは、今後は低環境負荷、小型・ポータブルで高出力な深紫外 LED デバイス技術のアドバンテージを活かし、光情報通信分野から医療、環境、工業、殺菌分野に至るまで、幅広い分野の生活・社会インフラに画期的な技術革新がもたらされると考えられる。例えば、光情報通信技術に利用可能な光周波数資源の飛躍的な拡大、従来の可視・赤外光技術では達成できないソーラブラインド見通し外 (NLOS: Non-Line-Of-Sight) 光空間通信等の革新的通信技術などが実現されると予測する。このような応用シーンの増大とともに深紫外小型固体光源の更なる高性能化、高機能化、高信頼化に向けた技術開発が進み、深紫外レーザーダイオードや超高感度センシングデバイス等、深紫外光の高度光 ICT 利用に向けたデバイス基盤技術のさらなる高度化が実現されると予想する。

有機材料 ICT デバイスに関しては、データ通信の高速化において 200Gbaud (120GHz 帯域) と駆動電圧 1V 以下の実現、無線通信の高速化においてテラヘルツ変調器の光と無線間の変換効率の高効率化や 100-400GHz 電磁波を用いた高速、大容量、低遅延伝送を目指すとともに、新規方式による情報コミュニケーション技術 (3D 映像再生やスマートグラス) に必要とされる可視光での OPA の実現も期待される (図 2.4-4)。

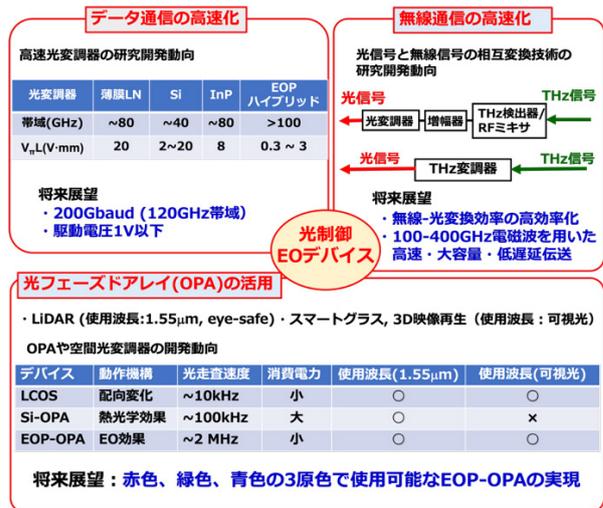


図 2.4-4 有機材料 ICT デバイスの展望

酸化ガリウムデバイスでは、ホール伝導性を有する p-Ga₂O₃ を用いずに如何にデバイス構造を設計するかという課題に対するの解決策を探ると同時に、バルク・薄膜結晶成長、デバイスプロセス共に、基盤技術の更なる開発を、今後の応用を見据えて厚く進めていくことが必要である。その内容は、材料面では、ウェハーの大口径・高品質化、エピタキシャル薄膜の導電性制御、ヘテロ構造、表面・界面制御に代表される基礎的な課題への取り組みが求められる。また、デバイスプロセス開発においても、基板・エピ層エッチング加工技術、ゲート絶縁膜、エッジ終端など多岐に渡る。ユーザー側に相当する装置メーカーは、早く Ga₂O₃ パワーデバイスを組み込んだ電源等を実際にテストしたいという考えであるが、現状 Ga₂O₃ デバイスが市場に出ていないということにジレンマを覚えており、サンプル出荷レベルで良いので、まずは Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードの早期市場導入が切望される。

2.5. サイバーセキュリティ

デジタル技術の急速な進展により、社会構造は大きな転換期を迎えている¹⁷⁷⁾。2.3章に述べているように、通信ネットワークインフラストラクチャーはそれ自体が社会を支える不可欠なインフラとなっている。そして IoT 機器の普及やクラウドの高度化により、サイバー空間と物理空間の結合が一層進展し、産業、医療、交通、エネルギーなどの重要インフラは高度にネットワーク化されている¹⁷⁷⁾。

一方で、こうした接続性の拡大は攻撃対象領域（attack surface）の増大を意味する。ランサムウェアをはじめとする攻撃は高度化・組織化し、重要インフラや医療機関等を標的とする事例も増加している¹⁷⁸⁾。ソフトウェア部品やクラウドを含むサプライチェーン全体を介した侵害も顕在化し¹⁷⁹⁾、従来の境界防御モデルでは対応困難な状況が生じている。このような背景のもと、ゼロトラストアーキテクチャに代表される新たなセキュリティ設計思想が注目されている¹⁸⁰⁾。

さらに、地政学的対立の深まりにより、サイバー空間は国家安全保障上の重要領域として位置づけられ、能動的サイバー防御（Active Cyber Defense: ACD）の在り方が議論されている^{181) 182)}。経済安全保障の観点からも、技術基盤の自律性・信頼性の確保は喫緊の課題である。

技術面では、生成 AI を含む人工知能の進展が攻防双方に影響を及ぼしている^{183) 184)}。また、量子計算機の実用化を見据えた耐量子計算機暗号（PQC）への移行は、長期的な暗号基盤設計の観点から重要である¹⁸⁵⁾。

加えて、これらの複雑化する脅威環境に対応するためには、専門的人材の育成と組織全体のリテラシー向上が不可欠であり、サイバーセキュリティ人材育成は戦略的課題として位置づけられている¹⁸⁶⁾。

このように、サイバーセキュリティは単なる情報保護技術にとどまらず、国家戦略、人材基盤、制度設計を含む総合的研究領域へと拡張している¹⁸¹⁾。本章では、このようなサイバーセキュリティ分野を取り巻く環境の変化を概観するとともに、現在の研究開発動向について述べる。

2.5.1. 取り巻く環境

① デジタル基盤の構造変化と攻撃面の質的拡張

デジタル基盤の変化は、単なる接続機器数の増加にとどまらず、システム構造そのものの変質を伴っている。クラウドネイティブ化や API 連携、マイクロサービス化の進展により、情報システムは動的かつ分散的な構造へ移行し、外部サービスや OSS への依存も高まっている^{187) 188) 189)}。

この結果、攻撃対象領域は「台数の増加」ではなく「依存関係の増大」として拡張している。組織が直接管理しないクラウド基盤、ソフトウェア部品、CI/CD 環境などが実質的な攻撃経路となり、サプライチャー

ンリスクはその象徴である^{179) 189)}。

また、IoT 機器やエッジ環境の普及により、サイバー攻撃が物理システムや社会インフラの運用に影響を及ぼす可能性が高まっている¹⁷⁷⁾。さらに 5G/6G 時代のネットワーク仮想化・ソフトウェア化は柔軟な通信制御を可能にする一方で、管理機能やソフトウェア層を新たな攻撃経路として生じさせ、リスク構造を複雑化させている¹⁷⁸⁾。

多くの組織においてクラウドサービスの利用拡大や外部事業者との連携が常態化し、「内部」と「外部」の境界は流動化している。こうした環境下では、運用の複雑化や設定の不整合が新たなリスクとなり、分散環境における信頼の再設計と依存関係の可視化が重要な課題となる¹⁸⁰⁾。

② 無差別型サイバー攻撃の動向

NICTER は情報通信研究機構が運用する大規模サイバー攻撃観測・分析システムであり、世界の未使用 IP アドレス帯（ダークネット）に届く通信を観測することで、無差別型サイバー攻撃の大局的な傾向を把握している¹⁹⁰⁾。NICTER 観測レポート 2025 によれば、2025 年に同システムで観測されたサイバー攻撃関連通信は約 7,010 億パケットに達し、2024 年から約 2.2% 増加した¹⁹⁰⁾。この観測はダークネット観測網（約 28 万 IP アドレス）を対象としているため、実際の組織やシステムへの直接の攻撃件数ではないが、インターネット上での探索活動や攻撃準備行動が高い水準で継続していることを示している。

年	年間総観測パケット数	ダークネット IP アドレス数	1 IP アドレス当たりの年間総観測パケット数
2016	約 1,440 億	274,872	527,888
2017	約 1,559 億	253,086	578,750
2018	約 2,169 億	273,292	806,877
2019	約 3,756 億	309,769	1,231,331
2020	約 5,705 億	307,985	1,849,817
2021	約 5,180 億	289,946	1,747,685
2022	約 5,226 億	288,042	1,833,012
2023	約 6,197 億	289,686	2,260,132
2024	約 6,862 億	284,445	2,427,977
2025	約 7,010 億	284,305	2,504,680

図 2.5-1 NICTER ダークネット観測統計（過去 10 年間）

観測されたパケットの約 55% は、調査目的と推定される大規模なスキャナーによるものであった¹⁹⁰⁾。また、Telnet（23/TCP）宛のパケットは年々減少傾向にある一方で、多様なポート番号へのスキャンが増

加しており、IoT 機器やネットワーク機器を幅広く探索する活動が顕著になっていることが読み取れる¹⁹⁰⁾。

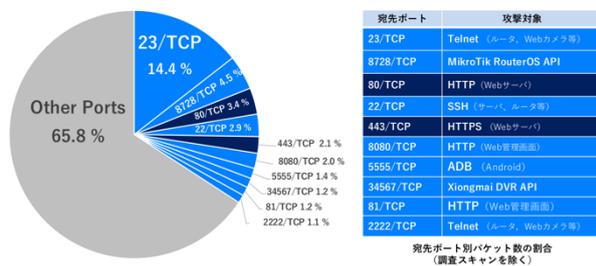


図 2.5-2 宛先ポート別パケット数の割合 (調査スキャン除く)

IoT 機器を狙う攻撃活動においては、従来の Mirai 型とは異なる IoT ボットの感染拡大が確認されている¹⁹⁰⁾。さらに、感染した IoT 機器が単なるボットとして DDoS 攻撃に利用されるだけでなく、Operational Relay Box (ORB) として悪用される事例も指摘されている¹⁹¹⁾。ORB 化した機器は、攻撃者が匿名性を確保するための中継拠点として機能し、標的型攻撃や不正アクセスの踏み台として利用される。正規のネットワーク機器や家庭用ルータが中継点となることで、通信の追跡や発信源特定が困難になり、攻撃の検知・分析を一層複雑化させる。

このように、無差別型の探索活動は単なる自動感染の前段階にとどまらず、感染機器を中継基盤として再利用する構造へと発展している。IoT 機器の広範な分布と管理の難しさは、インターネット全体のリスク構造に持続的な影響を及ぼしている。

③ランサムウェアの高度化とビジネス化

ランサムウェアは依然として主要なサイバー脅威であり、その攻撃手法は高度化・巧妙化を続けている¹⁷⁸⁾ ¹⁹²⁾。単にデータを暗号化して業務を停止させるだけでなく、事前に窃取した情報の公開を示唆する「二重恐喝」や、DDoS 攻撃を組み合わせる圧力を強める多層的な脅迫手法が一般化している¹⁷⁸⁾。

また、Ransomware-as-a-Service (RaaS) と呼ばれる分業型モデルの普及により、マルウェア開発者、侵入担当者、資金回収担当者などが役割を分担するエコシステムが形成されている¹⁷⁸⁾。これにより攻撃の参入障壁は低下し、ランサムウェアは収益性の高いビジネスとして拡大している。

侵入経路としては、外部公開された VPN 機器やリ

モートデスクトップ (RDP) サービスが悪用される事例が多い¹⁹²⁾。脆弱性を突いた侵入に加え、窃取された認証情報の利用やパスワードの使い回しによって、正規のリモートアクセス経路から侵害に至るケースも増加している¹⁹²⁾。

企業や公共機関、医療機関など多様な組織が標的となっており、業務停止による経済的損失に加え、顧客情報や機微情報の漏えいが社会的信用の低下につながる事例も後を絶たない¹⁷⁸⁾。ランサムウェアは単なるマルウェアの一種ではなく、情報窃取と脅迫を組み合わせた複合的な攻撃として位置づけられるようになっている。

④ Human-Operated 型攻撃の拡大

サイバー攻撃の動向として顕著なのは、攻撃者が侵入後に手動で活動を進める Human-Operated 型攻撃の増加である¹⁹³⁾。これは、マルウェアを単発で実行する従来型攻撃とは異なり、攻撃者がネットワーク内部に侵入した後、状況を観察しながら段階的に侵害を拡大する手法である。

この攻撃では、VPN や RDP などを足掛かりとした初期侵入の後、攻撃者は内部環境を探索し、権限昇格や認証情報の窃取を通じて管理者権限を獲得する。そのうえで複数の端末やサーバへ横展開し、重要資産やバックアップ環境を特定した後に最終的な攻撃 (ランサムウェア実行や情報窃取) へ移行する¹⁹³⁾。攻撃が「侵入→即時実行」ではなく、「侵入→潜伏→探索→制圧→攻撃」という一連のプロセスとして体系化されている点が特徴である。

また、Human-Operated 型攻撃では、攻撃者が正規の管理ツールや OS 標準機能を悪用することが多い。PowerShell やリモート管理機能など、管理目的で用いられる手段が攻撃にも利用されるため、従来のシグネチャ型検知では識別が難しく、正規操作との境界が曖昧になる。いわゆる Living-off-the-Land 手法は、侵害の発見を遅らせる要因となっている¹⁹⁴⁾。

Human-Operated 型攻撃の拡大は、サイバー脅威が自動化されたマルウェア中心の段階から、人間の判断を伴う侵害活動へと移行していることを示している¹⁹³⁾。攻撃はより標的指向かつ適応的となり、侵害プロセス全体を前提とした監視・分析と、組織横断的な対応能力が重要性を増している。

⑤ AI の普及による攻防の変質

生成 AI を含む AI 技術の普及は、サイバー攻撃と防御の双方に影響を及ぼし、脅威環境の性質を変化させてつつある¹⁸³⁾。AI は単なる新技術ではなく、攻撃の効率化と高度化を促進する一方で、防御の自動化・高度化を支える基盤技術としても位置づけられる。

攻撃側においては、生成 AI の利用によりフィッシングメールや偽装コンテンツの生成が容易になり、従来よりも自然で説得力のある文面が短時間で大量に作成可能となっている¹⁷⁸⁾。多言語対応や文体模倣も可能であり、標的組織の文化や業務文脈に適合した社会工学的攻撃が高度化する懸念がある。さらに、脆弱性探索や攻撃コードの作成支援、マルウェアの変種生成などにも AI が応用されつつあり、攻撃の自動化と低コスト化が進展している¹⁸³⁾。

また、AI は攻撃者にとって攻撃規模拡大の手段となり得る。従来は熟練を要した標的型攻撃や偽装工作が、AI 支援によって効率化されることで、より広範な組織が高度な攻撃に晒される可能性がある¹⁸³⁾。加えて、音声や映像の生成技術は、ディープフェイクを用いたなりすましや偽情報拡散と結びつき、技術的侵害と認知的影響工作が複合化するリスクも指摘されている¹⁷⁸⁾。

一方、防御側では、膨大なログやアラートを対象とした異常検知、脅威インテリジェンス分析、インシデント対応支援などに AI の活用が進みつつある¹⁸³⁾。従来は人手に依存していた分析業務に対して、AI はパターン抽出や相関分析を補助し、検知能力や対応速度の向上に寄与する可能性を持つ。ただし、AI の判断は学習データやモデル設計に依存するため、誤検知や見逃し、説明可能性の不足といった課題も併存している¹⁸³⁾。

さらに重要なのは、AI 技術そのものが新たな攻撃対象となっている点である。学習データを汚染するデータポイズニング、モデルの挙動を不正誘導するプロンプトインジェクション、内部情報を推定するモデル抽出攻撃など、AI 固有の脅威が顕在化している¹⁸⁴⁾。AI が組織の意思決定や自動運用に組み込まれるほど、モデルの信頼性や安全性はシステム全体のリスクに直結する。

このように、AI の普及は「AI で守るセキュリティ」と「AI を守るセキュリティ」という二重の課題を生み出している¹⁸⁴⁾。攻撃と防御の双方が AI によって

変質する環境下では、従来の枠組みに加えて、AI を前提とした脅威評価と信頼性確保が重要な論点となっている。

⑥耐量子計算機暗号への移行と長期的暗号基盤設計

暗号技術はデジタル社会の信頼性を支える基盤であり、通信の機密性確保、認証、電子署名、データ保護など幅広い領域で不可欠な役割を担っている。一方で、量子計算機の実用化が進展した場合、現在広く利用されている RSA や DSA、楕円曲線暗号 (ECC) といった公開鍵暗号方式は理論的に解読可能となることが指摘されており、暗号基盤は長期的な転換期にある¹⁸⁵⁾。

このため、量子計算機による攻撃に耐性を持つ耐量子計算機暗号 (Post-Quantum Cryptography: PQC) への移行が国際的に進められている¹⁸⁵⁾。耐量子計算機暗号は従来暗号とは異なる数学的困難性に基づく方式であり、標準化や実装評価が進展する中で、将来的な暗号移行を見据えた準備が求められている¹⁸⁵⁾。我が国においても、政府機関等における PQC への円滑な移行に向け、2035 年を目標とするロードマップの策定を進めている²⁰⁵⁾。

特に重要なのは、暗号移行が単なるアルゴリズム置換にとどまらず、システム全体の設計課題である点である¹⁸⁵⁾。公開鍵暗号は通信プロトコル、認証基盤、PKI、ソフトウェア更新署名、IoT 機器の組み込み実装など広範な要素に組み込まれているため、移行には相互運用性や性能制約、運用管理を含む包括的な検討が必要となる。

さらに、長期保存データに対しては「Harvest Now, Decrypt Later」と呼ばれるリスクが存在する。すなわち、現時点で暗号化された通信やデータが収集・蓄積され、量子計算機の実用化後に復号される可能性がある。このため、医療・行政・研究・重要インフラなど、長期的機密性が求められる情報については早期から移行計画を考慮する必要がある¹⁸⁵⁾。

また、暗号基盤の設計においては、単一方式への依存を避け、暗号アジリティ (crypto agility) を確保することが重要となる。すなわち、脅威環境や標準化動向に応じて暗号方式を柔軟に更新できる設計が、長期的な安全性と持続性を左右する。

このように、耐量子計算機暗号への移行は将来の脅威に備える基盤的課題であり、暗号技術の研究開発に

加えて、標準化、実装、運用を含む長期的視点に立った暗号基盤設計が求められている¹⁸⁵⁾。

⑦トラスとプライバシーを巡る動向

デジタル技術が社会・経済活動の基盤となる中で、セキュリティ対策の有無だけでなく、組織がどのようにデータを扱い、透明性と説明責任を果たしているかが重要視されるようになってきている¹⁷⁷⁾。信頼（トラス）は技術的安全性に加え、プライバシー保護、ガバナンス、倫理性を含む包括的な概念として位置づけられ、組織の持続的な価値創出や社会的評価に直結する要素となっている¹⁷⁷⁾。

プライバシーを巡っては、各国・地域における規制強化やデータ主体の権利拡充が進み、組織は多様な法制度に対応しながらデータ管理体制を構築する必要がある¹⁹⁵⁾。加えて、AIの活用拡大はデータ利用の高度化を促す一方で、目的外利用や推論によるプライバシー侵害といった新たな論点を生み出している¹⁸³⁾。このため、データの収集・保存・活用の各段階において、設計段階からプライバシーを考慮するアプローチが求められている¹⁹⁵⁾。

また、ゼロトラストや分散型IDなどの技術動向は、「誰をどのように信頼するか」という信頼モデルそのものの再設計を促している¹⁸⁰⁾。クラウド利用やサプライチェーン連携の拡大により、信頼の対象は単一組織内部に閉じず、エコシステム全体へと広がっている。トラスは技術的管理だけでなく、組織横断的なガバナンス体制や責任分担の明確化と結び付いて議論されるようになってきている¹⁷⁹⁾。

このように、トラスとプライバシーはデジタル社会における基盤的要素として統合的に検討されるべき領域である¹⁷⁷⁾。技術革新と社会的期待が交差する環境下において、信頼をいかに設計し、維持し、説明可能な形で運用するかが重要な課題となっている¹⁹⁵⁾。

⑧サイバーセキュリティ人材育成の重要性と動向

サイバーセキュリティを巡る脅威環境が高度化・複雑化する中で、技術基盤の整備と並んで人材育成は重要な基盤的課題となっている¹⁷⁷⁾。ランサムウェアやHuman-Operated型攻撃、AIを活用した攻撃などは、単一の製品導入だけでは対応が困難であり、組織内における専門的知見と運用能力の確保が不可欠である。

一方で、サイバーセキュリティ分野では世界的に人

材不足が深刻化しており、専門人材の需要と供給のギャップが拡大している¹⁸⁶⁾。特に、インシデント対応、脅威分析、セキュア設計、クラウド環境の運用管理など、実務的スキルを備えた人材の確保は多くの組織に共通する課題となっている。

また、人材育成は高度専門職に限られず、経営層を含む組織全体のリテラシー向上とも密接に関係している。サイバーリスクは経営リスクとして位置づけられつつあり、意思決定層がリスク評価やガバナンスの観点を理解することが求められている¹⁷⁷⁾。加えて、サプライチェーン全体での連携が進む中では、組織横断的な対応能力や共通言語としてのスキル標準も重要性を増している。

国際的には、米国NISTのNICEフレームワークに代表されるように、役割定義やスキル体系に基づく人材育成が推進されている¹⁹⁶⁾。国内においても、政府や関係機関による人材育成戦略が進められており、教育機関・産業界・公的機関が連携した持続的な人材エコシステムの構築が求められている。

このように、サイバーセキュリティ人材育成は技術的対策を支える前提条件であり、長期的な競争力と社会基盤の信頼性を確保するための戦略的課題として位置づけられる。

⑨能動的サイバー防御の動向

地政学的対立の深まりにより、サイバー空間は国家安全保障上の主要領域として位置づけられている。重要インフラや政府機関を標的とする高度攻撃が増加する中で、防御の在り方そのものが再検討されている。この文脈で注目されるのが、能動的サイバー防御（Active Cyber Defense: ACD）である¹⁸¹⁾。

ACDは受動的防御に加え、攻撃者の活動を早期に把握し、侵害の進行を妨害・抑止する枠組みである。先制的検知、侵入後の封じ込め、攻撃基盤の特定と無力化支援などが含まれる¹⁸¹⁾。

米国では「Defend Forward」や「Persistent Engagement」の考え方のもと、脅威主体への能動的関与が政策的に位置づけられている¹⁸²⁾。欧州でも、レジリエンス向上や先制的検知体制の整備が議論されている¹⁷⁸⁾。背景には、Human-Operated型攻撃など侵入後の活動が長期化する脅威の拡大がある¹⁹³⁾。

日本でも、能動的サイバー防御の導入に向けた体制整備が進められており、国家サイバー統括室を中心に

対応能力向上の取組が示されている¹⁸¹⁾。国内議論では、1) 重要インフラを担う民間との情報共有など官民連携の強化、2) 攻撃兆候把握のための通信情報の分析活用、3) 攻撃基盤へのアクセス・無害化措置に関する法的整理が主要論点となっている。これらは抑止力向上に資する一方で、通信の秘密や比例原則、誤認時の影響といった制度的課題との均衡が求められる。

このように ACD は、技術的対応にとどまらず、国家戦略・法制度・官民役割分担を含む包括的課題として位置づけられている¹⁸¹⁾。

2.5.2. 現在の研究開発動向

サイバーセキュリティ分野における現在の研究開発動向について述べる。

①サイバー脅威インテリジェンス基盤技術

サイバーセキュリティの高度化には、サイバー攻撃の一次情報を大規模かつ継続的に収集・蓄積するとともに、異種・分散する情報源から得られる脅威情報を横断的に統合・分析し、実効性の高い脅威インテリジェンスへと昇華させる基盤技術の確立が不可欠である¹⁹⁷⁾。

無差別型攻撃の実態把握を目的として、NICTでは2005年より大規模ダークネット観測システム「NICTER」を継続運用している¹⁹⁰⁾。観測・分析結果は政府機関や関連組織と共有され、情勢分析や政策検討に活用されている。さらに、観測・分析の高度化に向けて、リアルタイムで攻撃元の機器を特定するスキャンバック技術や、OSINT (Open Source Intelligence) 情報との統合分析、機械学習による攻撃クラスタリングなどの研究開発を進めている。

標的型攻撃やランサムウェア攻撃などの Human-Operated 型攻撃の観測を目的として、巨大なダミーネットワーク環境を自動生成し、攻撃者を誘引するサイバー攻撃誘引基盤「STARDUST」の長期運用を進めている¹⁹⁸⁾。STARDUST は攻撃者の侵入後の行動、横展開の手法、窃取情報などをステルスに観測することを可能とする。近年は、解析支援機能の高度化に加え、OT (Operational Technology) 環境との結合や、HTTPS 通信の復号機能による観測精度向上等が研究課題となっている。

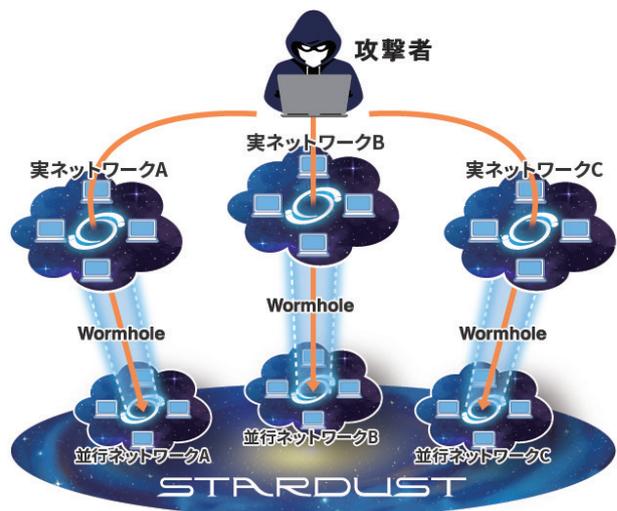


図 2.5-3 サイバー攻撃誘引基盤 STARDUST

収集された多種多様な観測データは、セキュリティ情報融合基盤「CURE」に集約される¹⁹⁹⁾。CUREでは、セキュリティログ、攻撃通信、マルウェア解析結果、OSINT等を統合し、説明性向上のためのデータエンリッチメントを施すことで、セキュリティビッグデータから高付加価値な脅威インテリジェンスを生成する研究開発を進めている¹⁹⁹⁾。

このように、サイバー脅威インテリジェンス基盤技術は、観測・収集、統合・分析、インテリジェンス生成、共有・活用までを一体的に設計する包括的研究領域へと発展している。

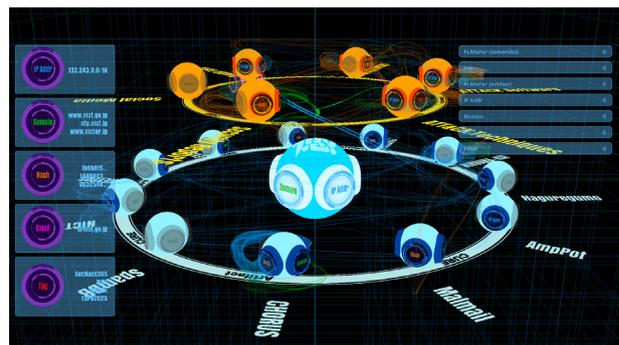


図 2.5-4 セキュリティ情報融合基盤 CURE

②ヒューマン・センタード・サイバーセキュリティ技術

サイバーセキュリティの確保において、人間（ユーザ）は欠かすことのできない重要な要素であり、ユーザの認知や行動がセキュリティ水準を大きく左右する。このため、ユーザが直面する課題に対して適切な理解と行動を促す「ヒューマン・センタード・セキュリティ」の重要性が一層高まっている。特に生成 AI

の普及により、偽情報（Disinformation）や誤情報（Misinformation）、さらには悪意をもって利用される情報（Mal-Information）が容易に生成・拡散される環境が進展し、社会的リスクが顕著になっている¹⁷⁸⁾。NICTでは、技術的対策に加え、心理学・認知科学等を組み合わせた学際的アプローチにより、偽・誤情報の検知技術や人間の認知理解、行動変容を促す技術の研究開発を推進している。また、エンドユーザや開発者などのエキスパートユーザを含む多様な利用者が直面するセキュリティ課題を特定し、効果的な通知手法や適切な対処を支援する情報提示技術の確立を通じて、ユーザビリティとセキュリティを両立する技術の実現を目指している。

さらにNICTでは、ヒューマン・センタード・セキュリティの新たな領域として「脳のセキュリティ」にも取り組んでいる。BMI/BCI技術の発展により脳活動を精緻に計測・制御可能となる未来が近づく中、「脳に対するサイバー攻撃」を含む脅威への備えが重要となる。脳情報通信技術の進展を見据え、計測デバイスの侵襲性や認知・記憶への影響など脳情報通信特有の要素も考慮した網羅的な脅威分析を行い、将来起こり得る脅威の全体マップを明らかにする研究を進めている。その上で、現状もしくは近未来に実行可能な脅威シナリオの検証・安全性評価技術および対策技術の研究開発に取り組んでいる。

③ AI × セキュリティ技術

AIとサイバーセキュリティを融合した研究開発は、近年のデジタル社会における重要課題となっており、NICTではこれまで注力してきたAI for Security（AIを活用したサイバーセキュリティ能力の向上）の継続的な進化に加え、今後はSecurity for AI（AI自体のセキュリティ向上）にも重点的に取り組んでいく。特に生成AIや大規模言語モデル（LLM）の急速な普及により、AIモデルそのものが新たな攻撃対象となり、社会基盤に組み込まれるAIシステムの安全性確保が不可欠となっている^{183) 184)}。Security for AIの分野では、AIモデルやAIシステムに対する攻撃の安全性を検証・評価する技術の研究開発に取り組み、AIモデルの脆弱性を検証するための環境構築技術を整備することで、主要なAIモデルに対する攻撃可能性や影響度を体系的に評価し、効果的な対策技術の確立を目指している。

一方でAI for Securityの分野では、サイバー脅威インテリジェンス基盤とLLM等を連携させ、AI技術を駆使してセキュリティ対策に有用な情報をリアルタイムに導出する技術を研究開発している。さらに、従来は専門家が人手で対応してきたインシデントレスポンスなどのセキュリティ運用をAIによって省力化・自動化することで、迅速かつ持続可能な防御能力の向上を図っていく。

④ 次世代暗号・プライバシー保護技術

暗号技術はデジタル社会の信頼基盤を支える中核技術であり、NICTでは量子時代・IoT時代・AI時代を見据えた研究開発を推進している。特に量子計算機の実用化により、現行の公開鍵暗号が危殆化する可能性が指摘される中、NICTは国際標準化動向を踏まえつつ、PQCの安全性評価に関する研究開発を進めている¹⁸⁵⁾。

NICTは利便性と安全性を両立する高機能暗号の研究開発にも注力している。Verifiable Credentialsを支えるグループ署名や属性ベース署名技術、クラウド環境でデータを秘匿したまま検索・処理を可能とする検索可能暗号など、次世代サービスを支える基盤技術の高度化を推進している。また、IoT機器を想定した軽量暗号技術の研究にも取り組み、低消費電力・小型実装・低遅延といった要件を満たす暗号方式の実装・評価を通じて、実利用を見据えた技術確立を図っている。

加えて、AIや連合学習の普及に伴うプライバシーリスクの高まりを踏まえ、秘密計算技術の研究開発も推進している。準同型暗号による暗号化状態での演算技術、TEE（Trusted Execution Environment）等の耐タンパーハードウェアを活用した安全な実行環境、マルチパーティ計算による分散型処理などを統合的に研究し、高度なプライバシー確保を可能にする基盤技術の確立を目指している。

これらの研究開発と並行して、NICTは電子政府推奨暗号リストを制定するCRYPTRECの暗号技術評価委員会事務局として、CRYPTREC暗号リスト掲載暗号の継続的な状況監視を行うとともに、将来的にリスト掲載候補となる暗号技術の安全性評価を行っている²⁰⁰⁾。特にPQCについてはFIPS 203、204、205をはじめとする方式について専門的観点からの安全性評価を進めている。

2.5.3. 将来展望

国家の関与が疑われる高度なサイバー攻撃やランサムウェア被害の拡大、サプライチェーンを通じた侵害、IoT 機器を踏み台とする大規模攻撃など、サイバー空間を巡る脅威は一層深刻化・巧妙化している^{178) 179) 190)}。こうした状況の下、我が国のサイバー攻撃対処能力の向上とサイバーセキュリティ自給率の向上は、国家安全保障と経済社会の持続的発展を支える重要課題である¹⁸¹⁾。行政、重要インフラ、産業活動、国民生活がデジタル化によりサイバー空間と不可分に結びつく中、実践的対応力の強化、人材育成、産学官連携の深化、IoT を含む新たなリスク領域への対応を総合的に推進することが不可欠である^{177) 186)}。

実践的対応力の強化に向けては、サイバー演習「CYDER」を通じ、最新の攻撃動向を踏まえた演習を実施する²⁰¹⁾。国の行政機関、独立行政法人、地方公共団体、重要インフラ事業者等に広く受講機会を確保し、全国での集合演習とオンライン演習を組み合わせることで、地理的条件による機会損失を最小化する²⁰¹⁾。

若手人材の発掘・育成においては、「SecHack365」を通じ、独創性と実践力を備えた若手セキュリティイノベーターを継続的に育成し、将来の我が国のサイバーセキュリティを担う人材基盤の強化を図る²⁰²⁾。

また、産学官連携拠点「CYNEX」を中核に、国内外の組織と連携し、最新のサイバー攻撃情報の収集・分析・共有、脅威情報の生成・提供、解析者コミュニティの形成を進める²⁰³⁾。加えて、国産セキュリティ技術・製品・サービスの検証評価環境を整備し、民間による開発を加速するとともに、演習基盤の開放を通じて産学官の自律的な人材育成を支援する²⁰³⁾。

さらに、IoT 機器の安全性確保に向けた取組「NOTICE」を推進し、脆弱な機器やマルウェア感染機器の調査を実施するとともに、利用者やメーカー等への助言・情報提供を行う²⁰⁴⁾。関係府省庁や電気通信事業者等と緊密に連携しつつ、IoT セキュリティ向上に資する研究開発を進め、新たな脅威への対応力を強化する²⁰⁴⁾。

このように、演習、人材育成、産学官連携、IoT 対策を一体的に推進することで、社会全体のサイバーセキュリティ水準を底上げし、我が国の持続的な安全と発展を支える基盤強化に取り組んでいく必要がある。

2.6. 量子 ICT

1.2章でも述べた通り、日本を含む世界各地において、量子技術を用いた ICT 分野の研究開発が現在活発に進められている。これらは、量子もつれや量子干渉といった、物質の量子力学的性質を直接操ることで、従来の概念にはない全く新しい ICT スキームを開拓しようとするチャレンジングな試みである。大規模な超並列情報処理を可能とする量子計算技術、通常の通信では実現できない機能を実現する量子情報通信技術、量子力学的効果を用いることにより究極的な計測性能を実現する量子センシング技術等、その可能性は多岐にわたる。実際、量子情報通信の一形態としての量子インターネットや、量子計算技術を実装した量子計算機（量子コンピュータ）などが注目を集めている。その一方、実現には物理学的原理にまで立ち戻るような根本的かつ究極的な技術革新が必要であり、理論、実験の両面から多くの研究グループが様々なアプローチにて研究開発を進めている。本章では、その中から「①量子計算技術」、「②量子通信技術」、「③量子センシング技術」、「④量子デバイス技術」にフォーカスし、技術俯瞰を行う。

2.6.1. 取り巻く環境

①量子計算技術

量子計算の方式として知られている、ゲート型量子計算、クラスター状態量子計算、アニーリング型量子計算については、主流であるゲート型量子計算について現在、超伝導、イオン、中性原子、光といった様々な方式の量子計算機がクラウドを介して利用可能となっており、日本においても理研、AIST、NICT、大阪大、富士通、NTT が共同開発した超伝導方式の量子コンピュータや、理研の光量子コンピュータがクラウドを介して利用可能となっている。当初、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) と呼ばれる量子誤り訂正機能のない方式で量子計算の優位性を実証することが目標となっていたが、現在は量子誤り訂正 (Quantum Error Correction: QEC) の実装により計算精度の向上を図りつつ大規模化を進めていくという戦略が主流となっている。また、小規模な誤り耐性量子計算 (Fault Tolerant Quantum Computing: FTQC) でも有用な量子計算アルゴリズム (Early FTQC) の探索も同時並行で進んでいる。量子情報処

理の基礎単位である量子ビットの実装には、「任意の量子ゲート操作を実現できること」、「コヒーレンス時間が十分に長くかつ安定であること」など実現すべき技術要件が多数あるが、その全てを満たす方式はいまだ見出されていない。現在は、超伝導、イオン、光、スピンといった各種方式で実現される量子ビットの数と性能を最大化させる努力がなされるとともに、その技術可能性を見極めている段階にある。量子ビットの数では超伝導方式が先行していたが、中性原子方式でも256ビットの量子計算機の動作が実証されるなど、汎用量子計算機の実現に向けて、熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。

②量子通信技術

量子力学の原理を利用した通信技術である量子通信は、情報の盗聴を量子力学的に検知できる点から、情報秘匿が求められるセキュア通信技術として高い有用性を持つ。中でも量子鍵配送（Quantum Key Distribution、QKD）を用いた完全秘匿通信は、情報理論的に安全な秘密鍵の共有を基盤とすることで、将来的に量子コンピュータが実現した場合でも破られない安全な暗号通信手段のひとつとして注目されている。

実際、商用・実用化の動きも進んでいる。日本では東芝や NEC が、世界的にはスイスの ID Quantique が QKD システムの商用機器を展開している。また、フランスでは通信事業者 Orange が東芝の量子鍵配送装置を活用した商用ネットワークサービスを提供している。さらに、日本、EU、アメリカ、中国、韓国などでは、光ファイバー網上に量子暗号ネットワークのテストベッドが計画・構築されており、量子暗号の研究は、単なる通信実験から、ネットワーク全体としてどのように機能を実装し活用するかというシステム応用研究の段階へと発展している。

一方で、光ファイバーを用いた量子暗号通信には距離制約が存在し、現在の技術では現実的には伝送可能距離は数十 km 程度に限られる。この制約は、量子暗号の利用範囲を限定する大きな要因となっており、距離制限を克服するための技術開発が求められている。

こうした背景から、光ファイバーを使わずに自由空間、特に宇宙空間で直接量子通信を行う衛星量子通信も注目されている。衛星を介した量子暗号通信は、光ファイバーでの伝送距離制限を回避できるため、広

域な量子鍵配送ネットワークの実現に不可欠な技術であり、中国が世界で初めて衛星量子通信を成功させている。これにより、中国は技術面・経験面で優位性を持つとされる。

なお、量子暗号以外の機能を持つ量子通信技術は、現段階では実用化されている例は少なく、多くの技術課題を克服する必要がある。特に、量子光を正確かつ高効率に生成・伝送・操作・検出する技術そのものや量子メモリの高度化が不可欠であり、これが現状の量子暗号を超えた量子通信を実現するための研究開発の最重要課題となっている。

③量子センシング技術

比較的単純な量子系の量子効果を用いて計測精度や計測速度の向上を図る量子センシングにおいては、新たな計測原理の基礎的な研究開発が進められる一方、10年以上の基礎研究開発期間を経て、既存企業やスタートアップ企業による商用化や公共機関による社会実装が進められる段階となっている。

国内で発明されて開発が発展した光格子時計は、日本標準時の生成に組み込まれて配信時刻の精度を向上させるとともに、既存企業により製品として販売が開始されている。原子干渉計を用いた量子慣性センサーを用いた量子航法については、量子センサーからシステムソフトウェアの提供を目的としたスタートアップ会社が国内外で設立され、実証実験を成功させたり部分的に製品を販売したりしている。その他、量子もつれやスクイーズド光等を用いた量子光センサー、ダイヤモンド NV 中心を用いた磁場センサーを含む分野でスタートアップ会社が多数設立されている。

④量子デバイス技術

「量子」をキーワードとした研究開発が世界的に活発化する中、実際に数々の量子状態をどのようにデバイス実装するのかに関して多くのアプローチがあるが、特に超伝導現象を利用したデバイスの存在感が増している。

ジョン・クラーク、ジョン・マルティニス、ミシェル・デボレは、量子力学が巨視的な世界でも成り立つことをジョセフソン接合におけるトンネル効果を使って、1980年代に実証した。この成果に対して2025年ノーベル物理学賞が授与されたことは記憶に新しい。その後、1999年には、中村泰信・蔡兆申が超伝導を

用いた巨視的な系で量子コヒーレンス振動の観測に成功し、超伝導方式の量子コンピュータ研究開発に先鞭をつけた。その後、マイクロ波共振器を介して超伝導量子ビットの内部状態を分散的に読み出す回路量子電磁力学と呼ばれる方式が提案され、これが起爆剤となり研究開発が大きく進展した。2010年以降、Google、IBM が超伝導方式を用いて量子コンピュータの研究開発に乗り出し、イオン、光、スピン、原子、といった数ある量子ビット候補の中でも最も集積化が進んでいる。

単一光子生成・検出技術は量子通信の成否の鍵を握る極めて重要な技術であることから、安定した単一光子源や高感度な受光装置の開発も進んでいる。特に受光装置において、超伝導現象を利用した超伝導ナノストリップ単一光子検出器 (SNSPD) は通信波長帯で高検出効率、低暗計数率 (低ノイズ)、高計数率、低ジッタという優れた性能を有し、液体ヘリウムを使わず連続運転が可能な小型冷凍機で動作することから量子情報通信分野において広く普及している (図 2.6-1)。

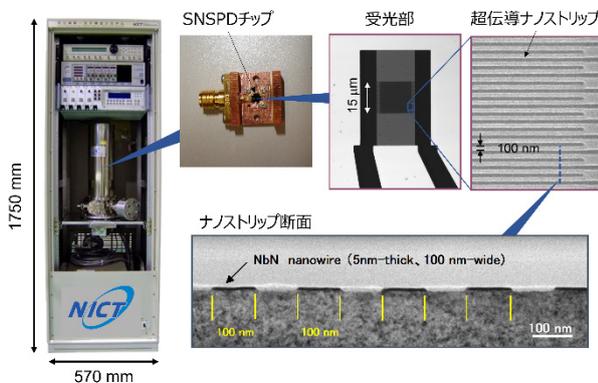


図 2.6-1 NICT で開発された単一光子検出器

2.6.2. 現在の研究開発動向

①量子計算技術

量子ビットの運用技術確立に向け、超伝導、光、スピン、原子、イオンといった各種物理量の利用が検討されており、それぞれの方式やリソースでどこまでスケールの大きな量子計算機が実現できるかを確認している段階にある。意味のある量子計算の実行可能規模を示す指標 (例: Quantum Volume) の拡大や、その基礎となる量子ゲートの演算精度の改善に向けた研究開発が理論、実験の双方から進められている。同時に、FTQC の実現を見据えたアルゴリズムやアプリ

ケーションの研究も進められている。

現在集積化に最も成功している超伝導量子ビットにおいては、冷凍機中の量子ビット数が十万程度に増大する状況を想定して、配線密度の高いケーブルの使用、制御シーケンスの光パルス化による熱流入量の低減、マイクロ波部品の微小化やオンチップ化に向けた検討、さらにアーキテクチャレベルでも量子デバイスの所要数の削減や量子 - 古典情報のインタフェースの通信量削減など、大型の量子計算機実現に向けた複数の取り組みがなされている。コヒーレンス時間が長く、高い演算精度が実現可能なイオンや中性原子方式では、演算精度を極限まで高めることで誤り訂正を介さず物理量子ビットをそのまま用いて、量子計算機を実現しようという動きもある。その他、量子誤り訂正におけるオーバーヘッドを削減する符号の開発や、精度改善に寄与する理論的な試みも行われている (付録 C-4-1) が、いずれの試みにおいても理論的に証明されているような量子計算機の優位性を実用的なレベルで実証する精度・規模の実現にはまだ時間が必要 (早くても 2030 年) であるとの感覚が共通認識である。このような現状のため、現在ある NISQ デバイスのみで実装可能な量子計算アルゴリズムの研究や、小型の量子計算機と従来型のスーパーコンピュータを組み合わせた量子高度計算情報処理の研究など、まずは現有技術を駆使することで実用に耐える量子計算機を実現しようとする試みもなされている。

②量子通信技術

量子暗号の運用可能距離を延ばす手段として提案されている量子中継の実現に向けた実験的研究が、世界各地で進められている。この技術の実現には、量子情報を保持・処理できる量子ノードの開発が不可欠であり、例えば「光」と「物質」といった異なる媒体間で量子情報を変換・伝達する研究に多くのリソースが投入されている。これらの研究は、量子暗号にとどまらず、将来的な量子通信全般の基盤技術としても重要であり、最終的には量子インターネットの実現につながることを期待されている。

また、量子暗号の応用研究としては、量子暗号ネットワークを利用して実用的な機能を実装しようとする試みも進められている。具体的には、中間ノードを経由して秘密鍵を中継する「鍵リレー」によって長距離での鍵共有を可能にする方法や、秘密分散やネット

ワーク符号などの古典的なプロトコルに、量子暗号で供給される秘密鍵を組み合わせることで、従来の古典的プロトコルでは実現できなかった高度な安全性を確保する方法など、さまざまな研究方向が模索されている。

一つの光ファイバー上で、通常の通信と量子暗号を効率的に共存させる技術の開発など、従来技術との共存を見据えた研究も進められるようになってきている。これは、量子暗号を社会実装する際に直面する課題の解決を目指した研究である。

衛星を用いた量子通信技術は、打ち上げコストが非常に高いため、限られた研究拠点でのみ開発が進められている。しかし、各国で着実な技術進展が見られる。たとえば、中国では2016年に量子暗号専用衛星 Micius（墨子号）を打ち上げ、地上局との量子鍵配送（QKD）実験に成功した。さらに2022年には、2基目の衛星 Jinan-1 を打ち上げ、小型化・低コスト化を目指した設計で、複数地上局との量子鍵共有やリアルタイム通信の実証が行われた。これらの衛星では、ロシアやオーストリア、南アフリカなどとの国際協力による量子鍵共有も報告されており、中国は衛星量子暗号分野で先行している状況である。一方、ヨーロッパでも、量子暗号衛星 EAGLE-1 の打ち上げを2027年前半に予定しており、EUの量子通信インフラ計画 EuroQCI の一部として、技術実証を行う計画が発表されている。日本でもJAXAの宇宙戦略基金の一部として2029年の打ち上げを目指した量子暗号衛星の開発が行われている。

③量子センシング技術

量子センシングに用いられる量子物理系は光、原子、イオン、固体等多岐にわたり、測定する物理量に関しても電磁場、時空間、重力場、生体情報等多岐にわたるが、革新的な新方式を含む基礎的研究開発と社会実装を目指した研究開発が並行して行われている。ここでは光周波数領域の精密周波数を生成する光原子時計（光時計）を具体例として研究開発動向を述べる。光時計として光格子にトラップした104個程度の中性原子集団を用いて周波数安定化したレーザー光を生成する光格子時計、イオントラップ中に静止させた原子イオンを用いるイオントラップ光時計が知られており、いずれにおいても周波数誤差が10-19台の確度が報告されている。

光時計に期待される社会実装のひとつとして、2030年に計画されている「秒の再定義」が知られている。それに必要な要件が異なる光時計の相互比較が高い精度で行われることとされている。そのため、光時計を可搬化し、車両に載せて所在地まで輸送して光時計を比較する研究開発が、光格子時計、イオントラップ光時計の双方で行われている。いずれにおいても19インチラック2台分程度へのパッケージ化が達成され、大陸間の輸送も含めた移動と周波数比較が行われている。可搬型光時計は時空標準・時間基準のフィールド運用の用途のみならず、重力ポテンシャルのセンサーとして相対論的測地への応用が期待される。国内ではこれらの技術移転を受けた既存企業の技術開発により製品化された光格子時計の販売が開始された。

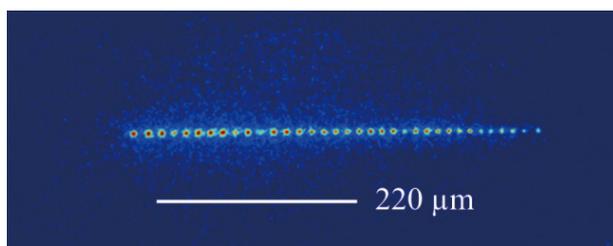
異なる光時計の周波数比較については、光周波数コムを介して光時計に位相ロックした光通信帯波長のレーザーを光ファイバーネットワークを介して1000kmを超える距離の遠方に配信し、周波数比較や協調光動作に用いるコヒーレント光リンクの研究開発が盛んに進められている。温度、振動等の環境外乱による光ファイバー長の変動による位相雑音を補正するファイバー雑音補正や、位相雑音を最低限に抑える光アンプが光ファイバーネットワーク中には設置される必要がある。

従来の光時計の方式では、レーザーを原子に照射して吸収分光を行い、その測定結果をレーザー周波数にフィードバックする方式が主流であった。この方式では、原子の状態準備と吸収分光信号の測定を行うため、レーザーと原子の相互作用時間が途切れることから、測定時間 T に対して周波数変動が $T^{-1/2}$ で減少する。その改善策として、測定とフィードバックを連続的に行う方式や、原子集団自体が超放射によりレーザー発振を行う方式などの従来とは全く異なる光時計の研究開発が行われている。これらの方法では周波数変動が T^{-1} で減少するため、従来では10000秒の測定を必要とした精度が100秒で利用可能となり、大幅な高速化が期待される。

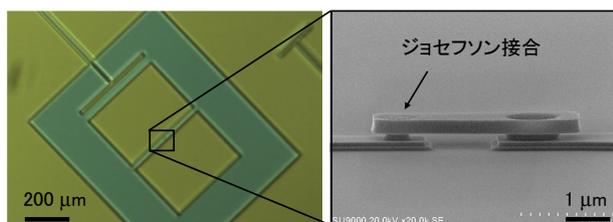
④量子デバイス技術

量子デバイスの候補として多くの物理概念の活用が検討されているが、中でも超伝導方式はもっとも集積化が進んでおり、量子ビット数では超伝導方式が一歩リードしている状況だが、ゲート忠実度のさらなる向

上、設計通りに回路を作り込む精密な回路パラメータ制御が大きな課題となっている。QECの実装は計算精度の向上に必須と考えられるが、物理量子ビットのゲート忠実度が向上することで、QECに必要なハードウェア量を削減することができる。ゲート忠実度は量子状態の保持時間（コヒーレンス時間）とゲート操作時間の比に依存するため、その向上にはコヒーレンス時間の延伸が不可欠である。短いコヒーレンス時間は超伝導量子ビットが克服すべき長年の課題であったが、回路設計、測定システム、材料プロセスの研究開発が進展した結果、コヒーレンス時間は1 msに達しており、ゲート忠実度は1量子ゲートで99.99%を、2量子ゲートでも可変結合器の導入により99.9%が実現している。しかしながら、長時間にわたる測定ではコヒーレンス時間に大きな変動があり、安定性に依然として課題が残っている。この時間変動の抑制には二準位系と呼ばれる材料欠陥の低減が必要と考えられ、その解決に向けて材料プロセスの研究開発が世界中で行われている。一方、1台の冷凍機で動作可能な素子数は、数10mKという極低温環境に導入できる配線本数や、低ノイズアンプ、サーキュレータといった周辺パーツの実装スペース、消費電力等で制約されるため、それらの小型化、低消費電力化、極低温で動作する制御回路等の開発も進められている（図2.6-2）。



(a) イオントラップを用いた量子ビット（NICT 報道資料より
<https://www.nict.go.jp/quantum/about/iontrap.html>）



(b) 超伝導量子ビット

図 2.6-2 量子計算機や量子中継で用いる量子ビット回路の例

2.6.3. 将来展望

①量子計算技術

2030年-2040年には、大規模な実機が実現できると考えられているが、多種ある量子ビット手法のどれが実装技術として結実するのかについては予断を許さない。現時点で方向性を絞りこむことは得策ではなく、むしろ探索的なアプローチによって技術的可能性を広く探る研究が今しばらくは重要である。また、量子計算機を大規模化するにはシステムを分散化する必要があることから、量子媒体変換技術で量子情報を光などに変換して空間的に移動できるようにする技術開発も不可欠となる。冷却マイクロ波ケーブル方式によって隣接した冷凍機間をコヒーレント接続することで、5000量子ビット程度を搭載した冷凍機群にて10万量子ビット程度の量子計算機を5年後ぐらいに実現するというのが、大まかなマイルストーンになると思われる。

②量子通信技術

量子暗号ネットワークを地上の光ファイバーによって世界規模で実現するためには、量子暗号通信の長距離化が不可欠であり、そのための量子中継技術の確立が重要である。これを実現するためには、①単一光子生成デバイスの実用化、②量子媒体変換技術、③量子ビットに対する基本的な量子操作を高精度かつ高効率に実装する技術など、複数の要素技術の確立が求められる。

一方で、中空コアファイバーに代表されるような従来の光通信技術の進展が、量子暗号通信の長距離化に寄与する可能性も指摘されており、こうした周辺技術の発展が量子暗号に与える影響についても注視する必要がある。

なお、量子中継技術が実用的に実現されれば、量子情報そのものを通信する量子インターネットへの技術的發展は、比較的円滑に進展すると期待される。

一方、衛星を使った量子暗号技術は、大陸間で安定的に高秘匿通信を実現する手段として安全保障の観点から日本が独自技術として開発、保有する必要がある。その際、1) 昼間でも通信可能であること、2) 曇りでも通信可能であること、3) 衛星にセキュリティを求めないこと、などが技術要件として重要であり、それぞれが実現できれば可用性と信頼性が飛躍的に向上すると考えられる（付録C-4-2）。

③量子センシング技術

多様な量子センサーについて、既存企業とスタートアップ会社による商用化の試みがなされており、そのいくつかは近い将来製品やサービスとして利用可能になると期待される。ダイヤモンドNV中心NVセンサー、量子航法、量子もつれ光源量子センサーなどがその一例である。また、基礎研究として研究開発が進められている新しい方式の量子センサーが実証されてくるものと期待される。

光時計を一例として将来を展望すると、コヒーレント光リンクで接続された光時計群が秒の再定義により精度を向上させた時空情報を生成し、配信するとともに、それぞれの周波数変動から局所的な重力場の変動等がモニターできるようになるものと期待される。新しい方式の光時計が実現すると、時空情報生成や重力場変動計測が大幅に高速化、高精度化されるものと期待される。地表には現れない微小な地下変動を時間のズレとしてリアルタイムで観測できるようになると、地震・火山のモニタリング、地下水・都市地盤管理、山岳・ダム・インフラの安全監視等の応用が可能になるとも期待されている。量子ネットワークが実現すると、光時計を構成する原子に量子もつれを配信できるようになる。配信した量子もつれを利用した原子の量子状態を一括して測定すると、信号対雑音比が高くなる（通常では原子の個数 N に対して $N^{1/2}$ に比例した信号対雑音比が、 N に比例して増大する）ことが知られており、さらなる高速化に寄与すると期待されている。コヒーレントリンクで接続された光時計への量子もつれ配布は実現しておらず、量子通信技術の発展が重要となる。

④量子デバイス技術

超伝導量子ビットについては、すべての量子ビットで1 ms以上のコヒーレンス時間を長時間安定して保持でき、設計パラメータ通りに回路を作製することが、計算精度の向上に必要不可欠である。現在、レーザーを用いて局所的に加熱（アニール）することでジョセフソン素子の特性のばらつきを素子ごとに個別に調整する手法が採用されているが、将来的な大規模集積化に向けては、例えば数万以上のジョセフソン素子を個別に調整することになり、この手法に限界があることは明らかである。今後、回路方式、材料プロセスの見直しは避けられないと思われる。仮に十分な性

能を持つ物理量子ビットが実現できたとしても、配線からの熱流入や、周辺マイクロ波部品の実装スペースという観点で、1台の希釈冷凍機に実装できる量子ビット数は1,000～10,000程度が限界と考えられ、汎用量子計算で必要となる1,000,000～10,000,000量子ビットとは大きな隔りがある。低温で動作する制御・読出し回路の導入による配線数の大幅な削減、もしくは複数の希釈冷凍機に実装した超伝導量子プロセッサを量子的に接続する技術の開発など、新技術の導入が必須と考えられ、実際にこの方向での研究も進められている。とはいえ、汎用量子計算の実現にはまだ時間を要すると思われる。

④おわりに

これらの諸問題が解決し、将来に量子情報処理が成熟した世界では、現在のネットワーク（古典ネットワーク）と新しい量子ネットワークの融合が進んでいくと考えられる。そこでは、ネットワークの多層化が進み、古典的なネットワークに加えて、量子的ネットワークを利用した究極的セキュアな通信が確立されると共に、量子的ネットワークによる量子コンピューティングの高性能化や量子センサーネットワークが実現されていくと考えられる（図2.6-3）。

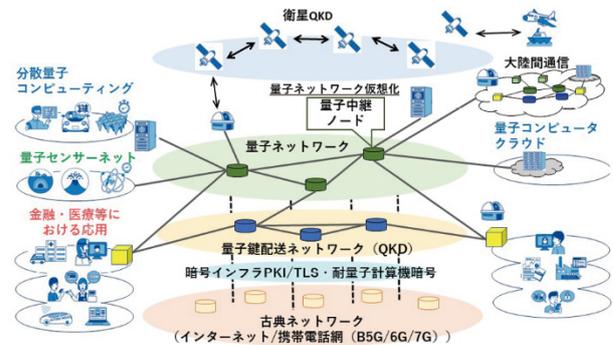


図2.6-3 量子インターネットの将来像 (NICT量子インターネットホワイトペーパーより改変)

以上、量子ICT分野に関する技術俯瞰として、取り巻く環境や現在の研究開発動向、将来展望について述べた。この技術への取り組みはこれまで学術的な視点から語られることの多かった「量子力学」を情報処理や通信に使える技術として「実装」していこうとする野心的な試みとも言える。ひと昔前であれば夢物語であった量子計算や量子暗号、量子通信などが近年の様々な技術革新により、実際に手の届くところまで

来ている。この技術が実際に使われるようになれば、セキュアな情報通信の実現や有用な材料探索の加速、エネルギー的側面からの環境負荷低減への貢献など国民生活に多くの福音をもたらすことは間違いない。日本が優位性を持つ分野のひとつでもあることから、今後も継続的な開発が必須である。

2.7. ユニバーサルコミュニケーション

「ユニバーサルコミュニケーション」技術は、言語および非言語を含むマルチモーダルな情報を用いて様々な壁を超えるための技術領域であり、人と人、人とモノ（ロボットなど）、モノ同士が豊かにコミュニケーションをとることができる、あるいは実世界・仮想世界が統合的に扱えるコミュニケーションを実現するための取組を包含したものである。

これまでは、そのコミュニケーションの形態ごとに個別技術を開発してきたが、近年の傾向として、いわゆる生成 AI によって多様なコミュニケーションを一括して扱うことが増えた。加えて、ここ数年で生成 AI を含めた AI は研究開発の対象である夢の技術から一般市民が普段から使う「日常の技術」へと大きく進化した。これまで言語、文化の壁を超える多言語音声翻訳技術や、社会に広く存在する知識の量、多様性の壁を超えるための社会知解析技術の研究開発が進められてきたが、そうした技術やそれを取り巻く環境、さらには今後の研究開発の方向性にも、いわゆる生成 AI の出現で革新的な変化が起きつつある。本章では、コミュニケーションの観点から、近年の大きな変化として、生成 AI を取り巻く環境、現在の研究開発動向、今後の展望について、生成 AI の正負の両側面に留意しつつ、俯瞰する。また、従来からコミュニケーション技術における主要課題である言語の壁、特に多言語翻訳・音声翻訳についても同様に俯瞰する。

2.7.1. 取り巻く環境

ユニバーサルコミュニケーションを支える AI 技術は、近年急速に発展している。特に最近では生成 AI 技術の進化やその社会への浸透が著しい一方で様々なリスクも顕在化している。また、コロナ禍以降のインバウンドの増加やコンテンツ輸出の増大などを背景に言語の壁の解消も継続して高いニーズがある。以下では、それぞれについて社会的な状況や技術の潮流を概観する。

①大規模言語モデル・生成 AI

2022 年末に出現した OpenAI の ChatGPT は一般社会に浸透した初の生成 AI であり、技術的にはいわゆる大規模言語モデル（以下、Large Language Model, LLM）と称されるものの代表格であって、大きな社会現象を引き起こした。後述するようにそれ以降、様々な企業、組織が様々な LLM を開発、一般社会に展開し、すでに社会の一部となっているといっても過言ではなく、さらには強力な LLM を保有するか否かは一国の国力を左右し得るとも言われている。世界各国において、AI の開発・運用・ガバナンスを他国や特定企業に過度に依存せず、コントロールできる主権を意味するソブリン AI (Sovereign AI) や学習や推論に利用されるデータの所在や管轄をコントロールできるデータ主権や、自国版の生成 AI モデルを持つべきといったモデル主権が活発に議論されている。もともと汎用性の高い技術であり、膨大な知識をベースとした一般市民との対話から、ソフトウェアのコーディング、デバッグ、果ては数学等の極めて高度な知的能力を発揮している。また、その技術的進化は日進月歩の急速なものである一方で、著作権の侵害や、偽誤情報を生成してしまうといった様々なリスクも顕在化しており、様々な法規制も制定、検討されている。

②多言語翻訳・音声翻訳

多言語翻訳・音声翻訳技術は、訪日外国人や在留外国人の増加、国際会議や観光需要の高まりを背景に、社会的な重要性が急速に高まっている。大阪・関西万博において来場者や出展者が利用可能な多言語翻訳アプリが提供されるなど、行政手続、医療、防災、交通、観光など幅広い分野で実用的な技術として導入が進みつつある。教育現場や災害時対応など、生活に密着した場面でも活用が広がり、次の段階として文化・ライフスタイルの違いを考慮した翻訳精度向上が課題となっている。

2.7.2. 現在の研究開発動向

①大規模言語モデル・生成 AI

生成 AI の代表とも言える LLM は巨大なニューラルネットである。基本的には Transformer²⁰⁶⁾ と呼ばれるアーキテクチャをベースとしたニューラルネットが使われることが多い。LLM はそれ以前の AI とは異なり、非常に多岐にわたるタスクを一つのモデ

ルで実施することが可能であり、基盤モデル（ファウンデーションモデル）²⁰⁷⁾とも称される。LLMの学習では、まず、大規模なテキストデータ（Webテキストや書籍データ、プログラムのソースコード、さらには自動合成された各種データを中心に数TB～数100TB）を学習させるが、この学習を事前学習と称する。動画・音声の処理も可能なマルチモーダルなLLMの場合、さらに大規模なデータを事前学習させる。（欧米、中国ではPBクラスのデータを事前学習させていると推定される。）また、最終目的となる様々なタスク（各種の文書やプログラムの作成・改善、日常生活に関するものから法律や技術分野等の高度に専門的な分野での相談等）用の学習データを事前学習用のデータに混ぜたり、事後学習（追加学習）に用いたりすることで、それらのタスクを高精度で行わせることができる。

LLMとして最初に著名になったのは米国のGPT-3（1,750億パラメータ）²⁰⁸⁾である。その改良版であるChatGPTは短期間で億を超えるユーザーを集めて社会現象を巻き起こし、その後続モデルが次々と開発された。OpenAIのGPT系列の後を追う形で、パラメータ数が大きいほどLLMの精度が上がるいわゆるスケーリング則に基づいて、GoogleのGeminiやAnthropicのClaude、MetaのLlamaなど数千億から1兆程度のパラメータ数を持つ大規模なLLMが開発された。一方で、そうした大規模LLMを教師として小規模なLLMを学習させる、いわゆる「蒸留」を行うことで、小規模なLLMでも精度が上がるのが分かり、PC上で動作するなど、低コストで利用可能な小規模LLMも人気を集めている。また、計算の効率化や性能向上のためのモデルを複数の「専門家（Expert）」ネットワークに分割するMixture of Expert（MoE）などの技術²⁰⁹⁾も一般的になってきている。

また、これまで米国のいわゆるビッグテック企業を中心に開発、提供されてきたLLMであるが、近年では中国企業もアリババのQwen、DeepSeek社のDeepSeekなどがオープンなLLMとして提供されており、日本も含めた様々な国で活用が進んでいる。一方、多様な知的タスクをこなすLLMはその社会的影響も大きく、他国製のLLMによって自国の文化や社会制度等が毀損される可能性も指摘されており、ソブリンAIやモデル主権を担保するために、各国の

文化や制度等に強い、独自のLLMを開発する試みも様々な国において広がりつつある。日本国内でも、Preferred Networks（PFN）、Softbank Intuitions、NTT、NEC、NIIなど多くの企業や研究機関が独自LLMを開発している。NICTでは、2008年から独自に収集している700億ページを超える日本語Webページを活用して、独自の日本語特化型LLMを開発している他、PFNなどと共同で日本の文化や社会等に留意した安全で高性能な国産LLM等の開発を進めている²¹⁰⁾。

なお、LLMの応用範囲は劇的に増えており、例えば、ソフトウェアのコーディングやデバッグ、リファクタリング等についてもLLMで行うことができ、活用も進んでいるが、出力コード等の品質に関しては多々問題が指摘され、熟練プログラマー等による確認・修正が必要になることもある²¹¹⁾²³⁶⁾。さらには、様々なレベル、分野での教育や論文執筆、高齢者の話し相手まで様々な応用も出現している²¹²⁾。こうした高度なタスクを実施するに当たっては単に学習データ等を増強するだけでなく、テキスト等の出力を生成する、つまり「推論」する際の方法論の改善も重要である。この推論に関する大きなイノベーションとしては、基本的な「次単語予測」を脱し、複雑な問題解決（リーズニング）のためのChain-of-Thought（CoT）といった枠組みがあり、例えば、高難度な数学等で顕著な性能向上に貢献している²¹³⁾。また、学習データに関して人間が作成したデータだけでなく、AI等で学習データを自動合成する枠組みやLLMの出力を一旦なんらかの方法で修正、訂正し、それらを学習データとしてLLMにフィードバックするいわゆる「自己進化」などの仕組みも使われている²¹⁴⁾。

加えて、LLMの活用法やより多様なデータを扱える枠組みに関しても様々な研究が進められている。複数のLLM、AIやデータベースを組み合わせるAIEージェントや、そうしたAIにより高い自律性を持たせたエージェンティックAI²¹⁵⁾等のコンセプトも大きな注目を集めているし、OpenAIによるSora等、AIが生成した動画がSNS等に大量に投稿されるなど、言語以外の動画やその他の種類のデータも扱えるマルチモーダルAIも注目され、また、劇的に進化しつつある。

LLMの評価も重要な課題である。従来、固定された人手作成のベンチマークデータでLLMの評価を

行うことが多かった²¹⁶⁾。公開・固定ベンチマークによる評価やリーダーボードでの公開（例えば llm-jp-eval, Nejumi Leaderboard 等）は比較可能性という利点がある一方で、LLM が常人の枠を超えた専門的知識を身につけ、能力が高まっていることから、そのベンチマークデータの作成自体が困難になりつつある。加えて、一旦ベンチマークデータが固定されると、そのデータ自体ないしは類似データを学習させることで、既存 LLM のベンチマークの評価値を上げることは容易である一方、そのような付け焼き刃的な学習では本質的能力は向上しないという課題があることも実証されている。さらに、今後、高度な LLM が社会に大きな影響を与えることは確実であることから、AI システムへの攻撃に対する様々なリスク対策も必須である。そのリスク対策の前提として、モデルの安全性評価が重要であるが、これに関しても上記したような問題が指摘されている。こうした課題に対する研究の方向性として、評価を能動的・動的に行う取組が進められている。例えば、NICT ではこうした問題を回避するため、多岐にわたる評価用プロンプト（つまり、LLM に与える指示）を自動合成し、その出力を自動評価する能動的評価基盤の開発を進めている。

②多言語翻訳・音声翻訳

人の言葉を処理する音声認識や機械翻訳、音声合成といった多言語処理技術においても、識別系から生成系の AI 技術に移行しつつある²¹⁹⁾。

音声認識の分野では、2022年9月に OpenAI が公開した Whisper²²⁰⁾ を契機として、大規模かつ高性能な音声基盤モデルの開発が急速に加速し、実社会での利活用も急速に広がった。現在では、多くの企業や研究機関が音声基盤モデルの研究開発にしのぎを削っている。研究開発やビジネス展開における主要プレイヤーとしては、Google、Apple、Meta、Amazon、Microsoft などのいわゆるビッグテックに加え、OpenAI が依然として強い影響力を保持している。一方で、近年の特徴として AI スタートアップ企業の台頭が挙げられる。これらのスタートアップ企業は、M&A や事業転換を含む機動的な経営を行いながら事業領域を拡大し、自社開発モデルのみならず、既存の基盤モデルを柔軟に活用して多様なプロダクトやサービスを展開している。特に注目すべき点は、ビッグテックにはない柔軟性と迅速な意思決定であり、企

画から開発、ローンチに至るまでのスピードが極めて速いことである。こうした動きは、音声技術領域におけるビジネスモデルの変革を加速させている。

技術的には、現在の LLM の中核技術でもある Transformer の登場以降、Transformer を基盤とした Encoder-Decoder 形式のシステムが主流となっている。当初は Encoder、Decoder とともに比較的小規模なモデルが用いられていたが、近年では、Encoder については大規模なラベル無し音声データを用いた自己教師あり学習（Self-supervised Learning）によって事前学習されたモデルを採用することが一般的となっている²²¹⁾。一方、Decoder については、従来の構造に代わり LLM を導入する動きが加速している²²²⁾。これにより、LLM がもつ強力な自然言語処理能力を活用し、より高精度な音声認識結果を生成できるようになった。ただし、Encoder で得られる音声特徴量系列を LLM に直接入力することはできないため、LLM が受取可能な入力形式へ変換する小規模ニューラルネットワーク（Adapter）や、音声特徴量系列とテキスト系列の単位の違いを整合させる Aligner といったモジュールに関しても、さまざまな手法が提案されている²²³⁾。

音声合成においても、ニューラルネットを用いた音声合成モデルが主流となり、現在では CPU のみで処理可能な高速・高品質なモデルが多数登場している。単一話者はもちろんのこと、複数話者および複数スタイル・複数言語の高品質ニューラル音声合成モデルが多数提案されている。特に最近では、ニューラルオーディオコーデックを用いて音声信号から離散トークン系列への変換および逆変換により、LLM で直接入出力が可能となっている²²⁴⁾。また最近では、LLM を統合し、テキスト指示文（プロンプト）を入力して感情や発話スタイルを制御可能なモデルも提案されている²²⁵⁾。

機械翻訳については、2016年に、Google 翻訳がニューラルネット機械翻訳（NMT）を導入して以来、一層の高精度化が進んでいる²²⁶⁾。メジャーな機械翻訳プロバイダーとしては、Google、Microsoft に加えて、DeepL が広く国内外で使われるようになっていく。さらに、2022年に開始された ChatGPT 等の AI サービスも翻訳に利用されている。一方、同時通訳については、研究開発が盛んにおこなわれており、大阪・関西万博での活用を始め各種のアプリがでるなど、実用化が進みつつある。これらの機械翻訳技術については、一般的なテキストについて9割以上の翻訳

- Multi-Talker：重なり合う複数話者の発話を同時に認識²³⁰⁾
- Multi-Modal：音声・画像・テキストなど複数モダリティの統合処理²³¹⁾

特に、ChatGPT、Gemini、Grok などの対話型 AI は早期に音声入力へ対応しており、今後は Multi-Modal LLM の研究開発がさらに加速すると予想される。また、Multi-Task モデルの拡張として、音声認識・音声合成・機械翻訳・対話制御を単一の大規模モデルで統合的に実行する技術も進展している。代表的な応用としては、

- 同時通訳：Moshi²³²⁾、CoeFont 通訳
 - 対話エージェント：Hibiki²³³⁾、gpt-realtime
- などが既にサービス化されており、今後はさらに多様な分野で統合処理技術の開発が加速すると見込まれる。加えて、リアルタイム性の向上、エッジデバイスでの運用、プライバシー保護や安全性への対応も、重要な研究課題として位置づけられている。音声合成においては、上記の統合的なモデルに加えて、合成音声セキュアに利用するための電子透かし等の技術が今後ますます重要になってくる。

機械翻訳に関して、まず、(大規模対訳コーパスのある) 高資源言語間については、機械翻訳の一層の高精度化の研究が引き続き必要である。たとえば、高資源言語間であっても、専門用語・口語表現・イディオムなどの低頻度事象の翻訳は難しい。また、専門分野の機械翻訳精度を高精度化するために、様々な分野の対訳データの整備を続けるとともに(例えば「翻訳バンク」²³⁴⁾ 等)、分野適応の研究をする必要がある。データサンプルが少ない低資源言語間の機械翻訳においては、引き続き、大規模言語モデルをファインチューニングする研究が主流となるであろう。世界には多数の言語があることから、世界中で連携して、多数の言語間の機械翻訳精度を向上していく流れとなると思われる²³⁵⁾。

一方、数十冊に及ぶようなシリーズ物の長編小説のような長いテキストを一貫性をもって翻訳する研究については、大きな進展は未だない。また、機械翻訳結果の信頼性を判定する研究も引き続き盛んである。最近の新しい研究動向としては、機械翻訳だけでなく人間翻訳におけるエラーを検出したり、特定の言語現象(語義の曖昧性解消・照応等)に特化して評価したりする研究もある。また、同時通訳においては、翻訳処

理速度を上げつつ高い翻訳精度を目指す研究もある。また、知識の壁、文化の壁という点からは文や発話を正確に訳するだけではなく、翻訳者や通訳者が行っているような文章全体の文脈を用いた適切な語彙や表現の選択や文化的な背景の差異を意識した翻訳、あるいは通常の文章以外の漫画やアニメなどの画像・映像情報なども利用したマルチモーダルな機械翻訳について今後の取り組みが望まれる。

2.8. バイオ ICT と脳情報通信

本章では、情報通信技術 (ICT) を基盤として、人工知能 (AI) と生命科学・脳神経科学の融合により形成されつつある技術領域「バイオ ICT と脳情報通信」の研究開発動向を俯瞰し、その社会的意義と課題を整理する。本章で扱う「バイオ ICT」とは、AI・ICT 技術を単なる解析手段として生命科学に適用するものではなく、生体分子・細胞・組織・器官・脳・個体といった複数階層の生命現象を、計測・モデル化・予測・介入して、さらに工学的に利活用するところまでを含めて統合的に扱う技術体系を指す。

従来のバイオインフォマティクスが、主に静的データの解析や仮説検証に重点を置いてきたのに対し、バイオ ICT は、マルチモーダル・時系列データを用いた動的な理解、実時間でのフィードバック、生命体・生体分子をシステム・機能材料として利活用し、さらには個別最適化された介入を可能とする点に特徴がある。「脳情報通信」は特に、脳情報の取得・符号化・伝送・復号・解釈・利用・介入・保護(セキュリティ/ガバナンス)を含むものであり、さらには脳機能を模倣し、学ぶことによる新たな情報処理の構築も含むものである。

近年、AI 技術の進展とともに、脳や生命を、遺伝情報に留まらず、広く情報処理システムとして捉える研究が進み、多層的な技術群が並行して発展している。生命科学と ICT の融合そのものは新しい概念ではないが、近年の計測技術の高精度化・大規模化と、AI 技術の進展により、従来は困難であった多階層・マルチモーダル生命情報の同時統合と、実時間での解析・予測が現実のものとなりつつある。これにより、平均的モデルに基づく理解から、個体差や時間変動を前提とした動的・個別化モデルへの転換が進み、生命現象を「理解する」段階から「制御・支援・利用す

る」段階へと研究パラダイムが拡張されている。一方で、これらの技術は個人の身体や生命機能、知覚、認知に深く関与することから、倫理・法制度・社会受容における課題（ELSI）への配慮を前提とした研究開発と段階的な社会実装が不可欠である。本章では、バイオ ICT と脳情報通信を人間中心の ICT 社会を支える基盤技術群の一つとして位置づけ、現状と課題を整理する。

2.8.1. 取り巻く環境

現代社会は、AI 技術の進展とともに、情報と生命の関係が再定義されつつある段階にある。先端技術の発展は、医療、産業、生活の利便性や効率性を高めてきた一方で、生成 AI やナノテクノロジー、生命科学の急速な進展に伴い、技術の社会実装や制御に対する不安や懸念も顕在化している。特に、人間の判断や行動に影響を及ぼす技術については、社会的合意形成の重要性が高まっている。

こうした状況の中、超高齢社会におけるウェルビーイング向上、健康維持、認知機能低下への対応、医療・介護負担の軽減といった課題に対し、ICT、生命科学、脳神経科学の融合による技術的解決への期待も存在する。「バイオ ICT と脳情報通信」は、生体に直接関わる新たな ICT 領域として位置づけられつつあり、日本政府が掲げる「Society 5.0」における人間中心社会の実現に向けて、脳や生命の知見を ICT に応用することも期待されている。

現在の AI 技術は、従来のデータ解析手法にとどまらず、多様なデータモダリティを統合的に扱う基盤技術として発展してきた。大規模基盤モデルの登場により、自然言語、画像、時系列データなどを横断的に処理する能力が高まり、生命科学や脳・神経科学における解析手法を加速させている。これにより、複雑な生体データを対象としたデータ駆動型研究が可能となり高度化しつつある²³⁷⁾。

生命体の情報処理を理解するバイオインフォマティクス分野においても、研究対象は遺伝子配列解析から、分子構造、細胞機能、生体機能へと拡張されてきた。タンパク質構造予測に代表される AI 活用の成果は、分子レベルの理解を加速させるとともに、創薬や医療を含む応用研究にも影響を及ぼしている^{238) 239)}。また、画像解析やマルチモーダル AI の応用により、基礎研究や臨床診断における解析精度や効率の向上が

報告されている²⁴⁰⁾。さらに、アミノ酸配列を言語として扱うモデルなど、生命科学と AI 技術の融合による新たな研究手法も提案されており、あらゆる生命現象を情報の処理過程として捉える視点が広がりつつある。

バイオ ICT と脳情報通信分野は、脳・神経科学・全脳シミュレーション、分子・細胞・組織・器官スケールのデジタルツイン、生体センシングと生体親和型デバイス、生体の身体性を活かした情報通信といった複数の技術群から構成されており、生命を情報として捉える科学技術体系として、AI、脳・神経科学、生命科学、ICT の融合を加速させている。

2.8.2. 現在の研究開発動向

前節で述べたとおり、バイオ ICT と脳情報通信は、AI の基盤化と生体計測・解析技術の進展を背景に、複数の技術群が並行して発展する領域である。この技術は、その役割に応じて大きく三つに整理できる。第一に、生体・脳情報を高精度かつ多面的に取得するための計測技術群、第二に、それらの情報を統合して状態推定や将来予測を行うモデル化・AI 技術群、第三に、得られた知見をもとに生体や環境へ働きかける介入・制御技術群である。脳融合 AI やニューロモルフィック計算は主として第二のモデル化・計算基盤に位置づけられ、デジタルツインは計測・モデル化・介入を結ぶ統合的枠組みとして機能する。本節では、構造階層を念頭に、(i) 脳と AI の相互作用に基づく計算・理解技術（下記①～③）、(ii) 脳情報通信のインターフェース技術（同④）、(iii) 分子・細胞から器官に至る生命現象のモデル化と実装（同⑤）の観点から研究開発動向を整理し、現在の到達点と未解決課題を明確化する（図 2.8-1）。これらに加えて、近年特に注目される動向として、ナノ・分子 ICT デバイス、生体実装型ツインがある（詳細は 2.9 章を参照）。さらに、生体が有する知能機能そのものを計測・接続し、情報処理資源として活用しようとする研究も進展している。本節ではその概要のみを扱い、詳細は付録 C-6-8 に示す。図 2.8-1 では、バイオ ICT と脳情報通信を、生命の階層構造（分子・細胞から社会まで）と ICT の機能レイヤ（計測、モデル化、介入、情報通信）の多層統合として示している。中央には脳・個体レベルを据え、BMI/BCI を介した人間中心の情報循環を核として、デジタルツインや AI が生命理解と

社会実装を往復する構造を表現している。これらの技術は ELSI に支えられ、人間中心 ICT 社会 (Society 5.0) へと統合される。

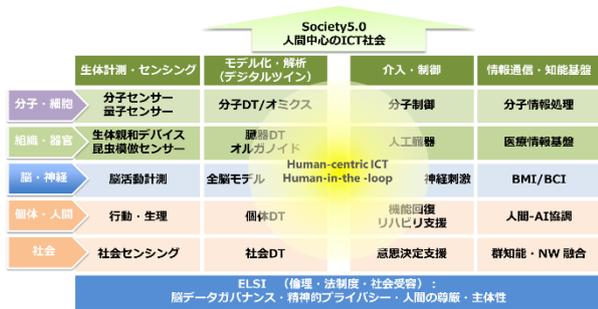


図 2.8-1 バイオ ICT と脳情報通信の多層統合図

① AI と脳・神経科学の共進化

AI と脳・神経科学は、長年にわたり相互に影響を与えながら発展してきた。AI は人間の脳や知能の理解を着想源として設計されてきた一方で、近年では AI 自身が脳神経科学における解析・仮説検証のための重要な研究手段となり、両者は相互に影響を与えながら発展する「共進化」とも呼ぶべき関係にある (参考: 付録 C-6-1)。

脳・神経科学の研究対象である脳は、極めて複雑で動的な非線形システムであり、その理解には膨大な観測データの解析が不可欠である。脳活動イメージング、電気生理計測、行動解析などによって得られる高次元データに対し、機械学習や深層学習を用いた解析が導入されることで、従来は捉えきれなかった時空間パターンや機能的構造が抽出可能となりつつある。AI は、脳機能や認知過程に関する仮説生成と検証を支える基盤技術として、脳・神経科学研究に組み込まれつつある²⁴¹⁾。

このように AI と脳・神経科学の共進化は、単なる相互参照関係にとどまらず、脳の構造や機能をより直接的に計算モデルへ取り込もうとする研究潮流を生み出している。その一つの方向性が、ニューロモルフィック計算に代表される研究領域であり、脳の高効率かつ適応的な情報処理原理を計算アーキテクチャやデバイスレベルで実装しようとするものである。第二には、脳の階層構造や情報処理様式を計算機上で統合的に再現しようとするアプローチがあり、全脳モデルや大規模脳シミュレーションとして展開されている。第三に、脳信号を直接情報通信に結びつける BMI/BCI 研究があり、医療応用とともに新たな人間—機械

関係を模索する研究領域として拡大している。(BMI / BCI 研究の動向詳細については、付録 C-6-4 参照)

② 脳融合 AI とニューロモルフィック計算

AI と神経科学の共進化が進む中で、脳の情報処理原理を計算モデルや計算基盤に取り込もうとする研究領域が形成されつつある。その代表的な方向性が、脳融合 AI およびニューロモルフィック計算である。脳融合 AI とは、AI と神経科学の共進化が進む中で、脳の情報処理原理や動作様式を参照しつつ、それらを計算モデルや計算基盤へと取り込もうとする研究領域である。ここで重視されるのは、脳の構造や機能を忠実に再現することではなく、脳が示す高効率性、適応性、分散性、学習の柔軟性といった特性を工学的に抽象化し、情報処理技術へ応用する点にある。ニューロモルフィック計算が、計算と記憶の近接化やイベント駆動型処理など、主として計算基盤・ハードウェアの革新を通じて脳型計算の実現を目指すのに対し、脳融合 AI は、アルゴリズムや学習原理の側面から脳の情報処理特性を取り込み、既存の AI 手法を拡張・再構成しようとする点に特徴がある。

現在主流の深層学習は高い性能を実現している一方で、計算資源や電力消費の増大が課題となっている。このため、深層化・大規模化とは異なる方向から、学習構造や情報表現の在り方そのものを見直す試みとして、脳融合 AI に関する研究が進められている。これらの研究では、従来の深層学習における固定的な階層構造に必ずしも依らず、時間的ダイナミクスや再帰的処理、局所的学習といった脳に見られる情報処理様式を取り入れることで、効率性や適応性の向上を目指す試みも含まれている。ニューロモルフィック計算は、脳に見られる情報処理様式を参考に、計算と記憶の近接化やイベント駆動型処理を取り入れることで、特定用途におけるエネルギー効率や低遅延処理の向上を目指す研究分野である。

近年では、従来の概念実証的研究にとどまらず、AI 応用を明確に意識したアルゴリズム・デバイス・システムの協調設計 (コデザイン) へと研究の重心が移りつつある。その一例として、神経細胞の発火挙動を模したスパイクニューラルネットワーク (SNN) が提案されており²⁴²⁾、条件次第では不要な演算を抑制できる可能性が報告されている。

これらの研究はアルゴリズムにとどまらず、インメ

メモリ計算を志向した新規デバイスやハードウェア実装とも連動して進められている²⁴³⁾。近年は、特定タスクにおける実用性能や消費電力削減を明確な目標として、アプリケーション要件を起点とした設計が進められている点に特徴がある。一方で、製造のばらつき、長期信頼性、開発環境の未成熟などの課題が大きく、現時点では汎用計算基盤を代替するものではなく、用途を限定した研究・実証段階にある。

このように、脳融合 AI やニューロモルフィック計算は、脳の情報処理原理を工学的に抽象化して活用するアプローチである（より詳細な補足は付録 C-6-2 参照）。一方で、これとは異なり、脳の構造や機能そのものを対象に、より直接的な理解と再構成を目指す研究も進展している。その代表例が、全脳モデル (Whole Brain Emulation) および大規模脳シミュレーションである。

③全脳モデル (Whole Brain Emulation) とブレイン・シミュレーション

ニューロモルフィック計算が、脳の情報処理原理を抽象化して計算基盤へ応用するアプローチであるのに対し、全脳モデル (Whole Brain Emulation: WBE) と大規模脳シミュレーションは、脳の構造や活動、接続といった多様な階層を対象に、計測データと数理モデル、計算機シミュレーションを往復しながら、機能的振る舞いの再現や説明可能性の向上を目指す研究領域である。ここでの「再構成」や「理解」は、脳を完全に再現することを意味するものではなく、特定の機能や動作様式をモデルとして再現・検証可能な形で捉えることを指す。狙いは、脳を情報処理システムとして扱うことで、脳機能に関する知見の深化に加え、疾患理解や医療応用、さらには計算モデル設計への波及を見据える点にある^{244) 245)}。

近年は、脳の形態・細胞特性・接続・活動といった異なる階層のデータが蓄積されつつあり、スーパーコンピュータや AI を活用したシミュレーション研究が進展している。これらの取り組みは、観測事実を拘束条件として取り込みつつ、複数階層の相互作用を計算機上で統合的に扱おうとする点に特徴がある。ただし、重要なのは「全脳を完全に再現すること」そのものではなく、研究目的に応じた適切な粒度でモデル化を行い、観測データとの比較を通じて妥当性検証と改良を反復する研究方法論を確立することである。

このような考え方自体は神経科学において長年追求されてきたものであるが、近年では計算資源の飛躍的向上や AI 技術の導入により、従来は扱うことが困難であった大規模・多階層モデルの探索やパラメータ調整が現実的なものとなりつつある。このような全脳シミュレーションの位置づけは、脳融合 AI における計算モデルと実データの循環的活用という考え方とも整合的である。

国際的には、多層的な脳アトラス整備、モデルと計算コードの共有、脳活動データと臨床情報を含む研究基盤の構築が進められている。これらは、研究成果の再現性と再利用性を高め、国際協調の下で脳理解を加速する基盤として位置づけられる。一方で、計測精度の限界、モデル妥当性の評価、計算コスト、個人差の扱いに加え、データ利用や倫理的配慮といった課題が大きい。このため WBE は、短期的な完全再現を前提とするのではなく、段階的に理解を積み上げる長期的研究課題として整理することが適切である。(補足の議論は付録 C-6-3 参照)

このような、脳の構造や機能に関する知見の獲得を目的としたモデル化やシミュレーション研究と並行して、脳情報を外部の情報システムと直接接続し、機能回復や支援、操作へと結びつける技術も発展している。その代表がブレイン・マシン・インターフェース (BMI) およびブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) である。次節では、脳の計測・解読技術を基盤として、脳と情報通信を直接結びつける BMI/BCI の研究開発動向を整理する。なお、生体の知能そのものを情報処理資源として扱う研究動向については、付録 C-6-8 に詳述する。

④脳情報通信と BMI/BCI の技術潮流

前節で述べた全脳モデルや脳シミュレーションが、脳機能の理解を目的とした研究であるのに対し、ブレイン・マシン・インターフェース (BMI) およびブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) は、脳活動を計測・解読し、外部の情報システムと直接接続することを目的とする技術である^{246) 247)}。

BMI/BCI は、機能回復支援を主要目的として発展してきた。近年では、皮質活動をリアルタイムに解読し、ロボットアームやカーソル、音声合成装置を制御する実証研究が進展している。特に、発話機能の再建や運動機能の補助に関する成果は、脳活動の高精度デ

コード技術の進展を示す代表的事例である。

さらに、神経補綴技術の発展により、単なる外部機器制御にとどまらず、損傷部位を迂回して残存神経回路へ刺激を伝達する「人工神経接続」の研究も報告されている。非侵襲的脊髄刺激とコンピュータ制御を組み合わせることで、慢性期脊髄損傷患者において歩行様運動の再建や機能改善が示された事例は、脳情報通信が神経回路レベルで実装され得ることを示す重要な実証例である。これは、神経信号の符号化・復号化を通じて神経回路の再接続を図るものであり、生体内ネットワークの再構成という観点からも位置づけられる。BMI/BCIは技術的には非侵襲型と侵襲型に大別される。非侵襲型BCIは脳波（EEG）などを用いるため安全性が高く、臨床研究や実証実験が広く行われてきた。一方で、信号の空間分解能や帯域幅に制約があり、複雑な情報の高精度デコードには限界があった。しかし近年では、センサーや計測ハードウェアの高性能化に加え、脳活動の構造的・動的特性を取り込んだ脳基盤モデルの活用や、新たな計測原理に基づく非侵襲計測技術の研究が進展しており、非侵襲型BCIにおいても解読性能や応用可能性の拡張が試みられている。これに対し、侵襲型BMIは、皮質脳波電極や皮質内電極、血管内電極などを用い、ニューロン活動に近接した信号取得が可能であり、高精度な解読が期待される。ただし、長期安全性や生体適合性の検証が重要課題である。^{248) ~ 250)}

BMI/BCIにおいてAIは、脳信号の解読、使用者や環境変化への適応、ならびに実時間処理を通じて、システム全体の性能と安定性を支える中核的な計算基盤として位置づけられる。深層学習や自己教師あり学習を用いた脳信号デコーディングにより、個人差の大きい神経活動から特定タスク（運動意図、発話関連など）で精度改善が報告されている^{251) 252)}。近年では、Transformerなどのモデルを用いた自己教師あり事前学習により、大規模・多様な脳活動データから汎用的な表現を獲得する「脳基盤モデル」の構築が進められており、限られた教師データでも高い解読性能を示す可能性が注目されている。さらに、リアルタイム処理や適応学習が可能となったことで、使用者の学習負担を低減し、長期安定利用に向けた技術基盤が整いつつある。また、神経活動の計測と刺激を統合した閉ループ型インターフェースの研究が進展しており、情報の一方向伝達から双方向的な神経回路調整へと研究

軸が拡張している。脳信号と環境認識AIを統合することで、思考によるデバイス操作や環境制御といった応用も進展し研究実証が進む。一方で、社会実装には依然として多くの課題が残る。長期安全性、生体適合性、信号の安定取得、装着・手術の負担低減に加え、脳データのプライバシー保護、意思決定への介入、責任の所在といった倫理・制度的課題もある。

以上のように、BMI/BCIは脳活動を情報通信システムと接続する技術として、神経回路レベルでの情報入出力を可能にしつつある。一方で、脳活動を含む生命現象をより多面的に扱うためには、神経活動の上位表現のみに着目するのではなく、その基盤を成す分子・細胞レベルの動態にまで視野を広げることが重要となる。近年では、生命現象を分子、細胞、組織といった階層ごとに情報として記述し、計算モデルと実測データを往復させながら統合的に扱う研究が進展している。次節では、このような視点のもと、分子・細胞・組織・器官スケールにおけるデジタルツインおよび関連技術の研究動向を概観する。

⑤分子・細胞・組織・器官スケールのデジタルツイン

生命科学分野では近年、分子から器官に至る多層的な生命現象をデータとして計測・統合し、計算機上で再構成する研究が進展している。この流れの中で注目されているのが、実世界の状態を計算機上のモデルとして表現し、計測データとの継続的な連携により更新される「デジタルツイン」の概念を生命科学分野へ適用する研究である。生命科学におけるデジタルツインでは、分子・細胞・組織・器官といった各階層の生命現象を数理モデルとして記述し、実測データを用いてモデルの整合性を保ちながら動的に更新する点に特徴がある。

分子・細胞スケールでは、マルチオミクス解析や分子構造予測、分子相互作用解析などにAIが活用され、生命現象を、分子・細胞レベルでの相互作用やネットワーク動態を含む情報の流れとして捉え、記述・モデル化する研究基盤が形成されつつある。こうしたアプローチは、組織・器官スケールへと拡張され、数理モデル化が比較的進んできた心臓等の器官を中心に、医療分野での応用可能性が検討されている²⁵³⁾。

生命科学デジタルツインの中核は、分子・細胞・組

織・器官といった異なる階層を統合するマルチスケールモデルにある。このマルチスケールモデルを実測データと整合させつつ、階層間の状態推定とモデル更新を反復する枠組みとして、「データ同化」技術が重要な役割を担う。AIは、未観測状態の推定やモデル更新を支援する要素技術として位置づけられる。政策的観点からは、デジタルツインが生命科学を「理解のための科学」から、予測や介入効果の事前評価を含む「予測と制御の工学」へと展開し得る点が重要である。ここでいう展開は、理解と応用を分離するものではなく、生命現象をモデルとして記述・検証する研究と、そのモデルに基づく予測や事前評価を一体的かつ段階的に高度化していくプロセスとして捉えられる。

計算機上で効果やリスクを評価する枠組みは、医療の安全性向上や研究開発効率の改善に資する一方、モデルの妥当性検証や長期的信頼性の確保に加え、データ共有・標準化、AIの利活用や安全性、予測結果の利用に伴う倫理・社会的課題に対応する制度的枠組みが不可欠である。生命科学デジタルツインは、計測技術、計算基盤、AI、こうした制度設計を横断するICT研究開発の一環として、段階的に推進されるべき領域である。(補足情報は付録C-6-5参照)

本章で扱った研究領域は、分子・細胞レベルの生命情報計測から、脳活動の解釈、神経インターフェース、さらには生体デジタルツインに至るまで、多層的に展開している。これらは一見すると異なる研究分野であるが、生体情報の取得、モデル化、通信、制御という観点から見ると、情報通信技術と生命科学の融合領域として共通の基盤を形成している。特に脳情報通信は、生体内の情報処理と外部情報システムを接続する基盤技術として位置づけられ、バイオICTの中核的領域として今後の研究開発の方向性を規定する可能性がある。

このような技術潮流を踏まえ、本章では以下に将来展望を整理する。

2.8.3. 将来展望

前節までに示したとおり、バイオICTと脳情報通信は、AIの基盤化と生体計測・解析技術の進展を背景に、複数の技術群が並行して発展する領域である。これらの技術は、生命情報の取得・解析・制御を通じて、人間と情報通信システムの関係性を拡張し得る可能性を持

つ。本節では、このような技術潮流を踏まえ、今後どのような時間軸で展開し得るかを整理するとともに、研究開発と社会実装を進める上での政策的論点を、短期・中期・長期の視点から概観する(図2.8-2)。



図 2.8-2 バイオICTと脳情報通信のフレームワーク

①短期(概ね5年以内): 実証と制度設計の段階

短期的には、既に研究開発が進展している技術を中心に、限定的な社会実装や実証を進める段階にある。重点は、技術の高度化そのものよりも、信頼性評価、標準化、制度設計を含めた「社会に接続する準備」に置かれる。

計測の観点では、フレキシブル生体センサーや非侵襲・低侵襲の生体計測技術を中心に、医療・ヘルスケア分野での実証が進展すると考えられる。重要なのは、短期的な性能向上よりも、長期安定性、再現性、データ品質の評価手法を確立することである。これにより、生体データを研究用途から実装用途へと段階的に展開する基盤が整備される。

計算の観点では、既存の深層学習や基盤モデルを活用した生体データ解析が引き続き主流となる。ニューロモルフィック計算については、汎用AIを代替するものではなく、低消費電力や低遅延が求められる特定用途に限定した研究・実証が中心となる段階である。

インターフェースの観点では、BMI/BCIは当面、医療分野、特に機能回復や意思伝達支援を中心に展開される。低侵襲化や装着負担低減に向けた技術改良が進む一方、長期安全性や脳データの取扱いに関する制度設計が並行して求められる。

モデルの観点では、心臓など数理モデルが成熟した器官を中心に、デジタルツインの限定的な実用が進む。ここでは、モデルの網羅性よりも、臨床・研究現

場での有用性と妥当性評価が重視される。

ELSI の観点では、研究開発の後追いではなく、設計段階から倫理・法制度・社会的配慮を組み込む体制整備が不可欠となる。特に、生体・脳データのガバナンスは短期段階での重要課題である^{254) ~ 256)}。

②中期（概ね 5～10 年）：統合と拡張の段階

中期的には、個別技術の高度化に加え、分野横断的な統合が進む段階に移行する。単一技術の性能競争から、複数技術を組み合わせたシステム設計が主要な研究テーマとなる。

計測の観点では、生体表層から内部へと対象が広がり、細胞・組織・器官（脳）レベルでの多点・多階層計測が進展する。量子センサーなど新たな計測原理は研究段階に留まるが、将来のブレークスルーを見据えた基盤研究として重要性を増す。

計算の観点では、脳融合 AI やニューロモルフィック計算が、低消費電力・低遅延が求められる特定用途で試行的に利用され始める可能性がある。省電力計算と生体データ駆動型 AI の組み合わせは、エッジ AI やリアルタイム処理を必要とする分野で価値を持つ。一方で、汎用深層学習と比べて開発ツールや評価手法が未成熟であり、標準化が課題となる。さらに、AI、脳神経科学、デバイス工学、情報通信を横断的に担う人材育成が不可欠である。これらは研究開発投資のみならず、基盤整備と人材戦略を並行して進める必要性を示している。

インターフェースの観点では、BMI/BCI の応用範囲が医療以外の領域へ段階的に拡張される可能性がある。特に、ウェアラブルセンサーやエッジ AI と組み合わせたヒューマンインターフェースとして、日常生活における環境制御やコミュニケーション支援など、人間の活動を補助する用途が検討される可能性がある。ただし、認知や意思への影響が大きい技術であることから、用途限定と社会受容性の検証が前提となる。

モデルの観点では、デジタルツインとオルガノイド・オン・チップなどの生体実装型ツインを往復させる研究が進展し、創薬や個別化医療の高度化に寄与する。モデルと実測の接続を担う評価指標や標準化が、政策的に重要な論点となる。ELSI の観点では、国際的な規制・倫理議論との整合が不可欠となり、データの越境利用や国際共同研究を前提とした制度設計が求められる。

③長期（10 年以上）：人間中心 ICT の再定義

本章で概観した諸技術は、情報通信技術が単なる外部ツールから、生体と連続的に接続される基盤へと変化しつつあることを示している。生体センシング、ナノ・分子デバイス、脳・神経インターフェースの進展により、人間は情報ネットワークの外部利用者ではなく、その内部に位置する要素として捉えられる段階に近づきつつある。この変化は、急進的な融合を意味するものではなく、段階的かつ共進化的なプロセスとして進行すると考えられる。つまり、長期的には、バイオ ICT と脳情報通信は、個別技術の集合を超え、人間と ICT の関係そのものを再定義する基盤として位置づけられる可能性がある。人間の生理状態や認知活動は ICT を通じて可視化・支援され、同時に ICT システムも人間からの入力を通じて適応・進化する関係が形成される。既に日常生活においても、人間の行動とアルゴリズムが相互に影響し合う例は観察されている。ただし、この段階は技術的可能性と社会的価値の両立を慎重に検討すべきフェーズである。

計測の観点では、分子から個体レベルまでを連続的に捉える生命階層横断型の計測体系が構想される。これにより、デジタルツインのリアルタイム更新や予測精度の向上が期待される。

計算の観点では、大規模 AI の計算需要増大と電力消費の増大を踏まえて、ニューロモルフィック計算、生体計算、量子計測などを含む新たな計算・計測体系が、持続可能性を重視した形で検討される。これらは汎用計算基盤を直ちに代替するものではなく、低消費電力・低遅延が求められる特定用途や基礎研究段階での活用が中心となる可能性が高い。ただし、従来型計算基盤との補完関係として位置づけることが重要である。このため、基盤研究とともに評価指標や標準化を含む長期的な投資戦略が求められる。

インターフェースの観点では、人間が情報ネットワークの「外部利用者」ではなく、人間中心 ICT 社会において人間が情報ネットワークの「外部利用者」ではなく、能動的な構成要素として関与する社会像が議論される可能性がある。BMI/BCI は、認知支援や能力拡張など健常者のエンパワーメントを含む新たなヒューマンインターフェースとして発展する可能性も指摘されている。一方で、認知拡張や意思介入に関する技術は、精神的プライバシーや認知の自由に関わる課題を伴うため、厳格な制限と社会的合意を前提とす

る必要がある。モデルの観点では、生命科学が予測と制御を含む技術として深化し、医療、農業、環境分野などへの横断的展開が視野に入る。

政策的には、こうした人間中心 ICT の進展を、利便性向上のみならず、安全性、信頼性、社会的受容の観点から総合的に捉える必要がある。バイオ ICT や脳情報通信は、脳活動や生体情報を通じて人間の状態や意図を把握し、それに応じて情報システムが適応する可能性を持つ点に特徴がある。このような技術は、人間が ICT に適応する従来の関係に対し、ICT が人間に適応する新しい関係を形成する可能性を示唆している。その意味で、これらの技術は「人間中心 ICT」を具体化する基盤として位置づけられる。一方で、技術の可能性と限界を冷静に評価しつつ、人間の尊厳と主体性を確保する制度設計を並行して進めることが重要である。とりわけ、社会として長期的に受容され、安全性と信頼性を確保しながら継続的に運用できる形でバイオ ICT・脳情報通信を発展させるための制度的基盤を整備することが不可欠である。ELSI の観点では、人間の身体性、尊厳、主体性をいかに確保するかが中心的論点となる。技術進展を前提としつつ、社会的価値との動的調整を行う制度的枠組みが求められる。

以上のように、バイオ ICT と脳情報通信の将来展望は、短期の実証・制度設計、中期の統合・拡張、長期の概念転換という段階的な進展として捉えることができる。政策的には、過度な期待や懸念のいずれにも偏ることなく、研究開発と社会実装を並行して進める長期的視点が不可欠である。

2.9. 注目すべき新技術動向

本章では、今後 ICT 関連分野において今後注目すべき技術、いわば Emerging Technology について述べてみたい。2章の各分野の新しい動向、あるいは複数分野にまたがる新しい動向等をいくつか取り上げる。

2.9.1. 物理系コンピューティング

生成 AI の急速な普及とともに、計算量や電力消費の多さが課題になっていることはこれまでに述べた通りである。現在主流の GPU をベースにした AI の計算処理（学習、推論）は基本的にデジタル演算で実現

されているが、これを物理現象そのものによる演算で置き換えようとする流れがある。

例えば、光コンピューティングを手掛けるイスラエルのスタートアップ Cognifiber は、従来は光ファイバー内のノイズ源になっていたクロストーク現象を応用し、光信号をファイバー内のコア間で伝搬させ積和演算に応用することで、高速かつ低消費電力の推論を行う。同社は 2029 年をターゲットに LLM の学習にも対応させることを目指している²⁵⁷⁾。また、米 MIT 発のスタートアップでシリコンフォトニクスの技術を持つ Lightmatter 社は、AI 推論を光コンピューティングで高速・低消費電力に実現するチップ Enviser を開発するとともに、膨大なデータのチップ間転送のボトルネックを解消するための光インターコネクタ（光ファイバ技術を用いたデータ伝送チップ）Passage も開発している。同社は、光による演算と光によるデータ転送を一体で設計することで、ポスト GPU 時代の AI データセンター全体の電力効率とスケーラビリティ向上を狙っている。

2.9.2. 生体機能活用型デバイス

本節では、生体が持つ情報処理に関わる機能を、ICT に応用する新たな技術群のうち、生体分子や細胞等が持つ情報処理・センシング・自己組織化といった機能を、計算処理やフィジカルツインの基盤として活用する技術を取り上げる。従来のシリコンベース計算デバイスを置き換えるものではなく、補完・拡張するエマージング技術として位置づけられる。ここでは、比較的社会実装段階が近いと思われる二つのトピックを取り上げる。すなわち、①ナノ・分子 ICT デバイス、②生体実装型ツイン（オルガノイド、オーガン・オン・チップ）である。

①生体情報処理とナノ・分子 ICT デバイス

生体情報処理とナノ・分子 ICT デバイスは、従来のシリコンベースの電子デバイスでは到達しにくい分子・細胞スケールの情報空間に ICT を拡張する、新しい情報取得・処理基盤として注目されている。なお、本節でいう分子 ICT デバイスとは、DNA、タンパク質、脂質などの生体由来の高分子、あるいは生体と高い親和性を持つナノ材料を用いて、生体内外の化学的・物理的状态を分子・細胞スケールで計測・変換し、情報として取得・伝送・処理する ICT デバイス

を指す。これには、蛍光タンパク質や受容体分子を用いたバイオセンサー、スピン欠陥や量子準位を利用した量子センサー、生体分子と電子・光デバイスを接続する分子デバイスなどが含まれる。

生体情報処理とナノ・分子 ICT デバイスは、社会実装に近い生体親和デバイス、基礎研究段階の分子情報デバイス、将来的な計測革新を担う量子センサーという異なる成熟度を持つ技術群から構成される（補足 C-6-6 参照）。生体親和デバイスの分野においては、例えば米 Northwestern University 発のスタートアップ Epicore Biosystems 社が、汗中の電解質や代謝物などのバイオマーカーを皮膚上で連続計測するマイクロ流体ウェアラブル技術の事業化に取り組んでいる²⁵⁸⁾。2025年には合計 3,200 万ドルのシリーズ B 資金調達を発表した。また、EPFL（スイス連邦工科大学ローザンヌ校）発のスピンオフである Xsensio 社は、皮膚表面のタンパク質やホルモン等の微量な生体由来情報をリアルタイムかつ連続的に取得する、Lab-on-Skin 型ウェアラブルデバイスを開発しており、2026年3月には 700 万ドルのシリーズ A 資金調達を発表している²⁵⁹⁾。

これらの分野は、デジタルツインや生体実装型ツインを支える実測基盤として位置づけられ、生命科学と ICT の統合を下支えする重要な要素となりつつある。

②生体実装型ツイン：オルガノイドおよびオーガン・オン・チップ

コンピュータ上で構築したモデルを用いるデジタル・ツインに対して、それでは捉えきれない生体内の相互作用や微小環境を再現するフィジカル・ツインの手法が近年発展している。幹細胞等の自己組織化によって作られるオルガノイドはその一例であり、これをチップ上に搭載したオルガノイド・オン・チップは、生物学的忠実性と環境制御性の両立を図りつつ、薬剤応答や病態形成の評価基盤として期待されている（詳細は付録 C-6-7 参照）。

例えば、米 Harvard 大発のスタートアップである Emulate 社は、ヒトの肺、腸、肝臓などの機能を微小流体チップ上で再現する技術を展開しており、動物実験だけでは得にくいヒト生体応答をより高精度に予測する研究開発基盤の構築を進めている²⁶⁰⁾。同社は 2021 年には 8,200 万ドルの大型資金調達を発表している。また、英 Oxford 大発のスタートアップで

ある CN Bio 社は、ヒト臓器間相互作用を模擬可能な PhysioMimix プラットフォームを開発しており、肝臓、腸、肺、腎臓などを対象に、創薬における有効性・安全性評価や動物実験依存の低減を図っている²⁶¹⁾。同社は 2024 年に 2,100 万ドルのシリーズ B 資金調達を発表している。

研究開発が進展する一方で、オルガノイドの発生過程や成熟過程の動的変化を完全に再現することは依然として困難であり、材料のばらつきや薬剤吸着性、長期培養時の安定性などが課題として指摘されている。また、多臓器モデルの統合や、複雑な三次元構造を対象としたイメージング・解析技術の高度化も必要である。デジタルツインと相補的に活用するため、評価指標と標準化の整備が重要である。

2.9.3. 代替的 PNT 技術

従来、高精度な位置測位とナビゲーション、および時刻は、GNSS に依存していた。ただし代表的な GPS も配備から 30 年前が経過し、代替手段の必要性が指摘されているようになっている。また、昨今の地政学的リスクの高まりを背景に、本書 2.7 章でも Sovereign AI に触れたように、技術主権 (Technology Sovereignty) の重要性が注目されている。本節では、現代の ICT 基盤および様々なサービス基盤を根底で支えている PNT（測位 = Positioning、航法 = Navigation、時刻 = Timing）に関する技術について、既存の方式に対する代替手段（Alternative PNT、技術主権確保という観点からは Sovereign PNT の側面も持つ）の動向に触れたい。

最近の動向として、宇宙空間を用いた技術（特に低軌道 (LEO) 衛星による PNT）、量子技術を用いた高精度センサーによる PNT、および地球磁場や重力といった地球物理情報を利用する PNT の 3 つに分けて述べる。

①低軌道衛星 PNT

GNSS として代表的な GPS システムの老朽化、および地政学的な環境変化に伴う GPS 信号の妨害（ジャミング、スプーフィング等）等を背景に、近年 LEO 衛星を用いた PNT 技術が注目されている。LEO 衛星は GEO 衛星に比べて通信距離が数十分の一程度と短いため、衛星からの信号受信強度が高いことから、妨害の影響を相対的に受けにくい。

米国では Xona Space Systems 社、TrustPoint 社が LEO PNT システムの開発を進めている。両社とも数 100 機規模の独自の LEO コンステレーション構築を表明しているが、本格的な衛星網構築はまだ数年先と見られる。Xona 社は 2026 年 2 月に日本の古野電気株式会社と LEO PNT ソリューション開発に関する MoU を締結している²⁶²⁾。また、LEO コンステレーション構築で先行している SpaceX 社の Starlink も、LEO PNT 基盤としては強力な候補になると主張している²⁶³⁾。日本においても、内閣府の宇宙政策委員会において、LEO PNT の可能性について検討がなされている²⁶⁴⁾。

②量子技術を用いた PNT

代替的 PNT の別のアプローチとして、高精度な量子センサーや、原子時計や光時計を用いる方向性もある。量子加速度計や量子ジャイロスコープを用いて既存の慣性航法を強化したり、あるいは 2.2 章にも述べている高精度な原子時計や光時計を用いて精密な時刻生成を実現したりするものである。

例えば米 Vector Atomic 社は、原子時計や量子慣性・重力系センサーを中心に、GPS に依存しない航法・時刻同期向けの量子ハードウェアを開発している²⁶⁶⁾。

③地球物理情報を利用する PNT

地球磁場や重力場といった、地球物理的な情報を活用して、あらかじめ整備された地図情報との照合により自己位置を推定する PNT のアプローチもある。これは高精度なセンサーと地図等を組み合わせて、地球がもつ自然場の空間分布を位置推定の手掛かりとして利用するものである。GPS 等の GNSS が利用困難な環境における代替 PNT 技術として研究開発が進められている。

例えば、豪 Q-CTRL 社は元々量子制御技術に強みがあり、主に航空機向けに、地球磁場や重力場の変動を高精度な量子センサーで計測し、自己位置推定を行う技術を有する。2025 年には海上での実証実験を行い、また米 DARPA による次世代量子センサー開発プログラム (RoQS: Robust Quantum Sensors) に採択され、2,440 万ドルの契約を受けたと発表している²⁶⁵⁾。

第3章 おわりに

本 ICT 俯瞰報告書では、豊かな将来の社会基盤を実現するために大きな役割が期待されている ICT 分野において、どのような研究開発が進められているのか、どのような将来展望があるのかについて、「分野横断的な基盤技術」「電磁波の利活用」「通信ネットワークインフラストラクチャー」「ICT デバイス技術」「サイバーセキュリティ」「量子 ICT」「ユニバーサルコミュニケーション」「バイオ ICT と脳情報通信」の大きく 8 つの俯瞰分野に加えて、新たに「注目すべき新技術動向」を追加し、技術動向を紹介した。ICT を取り巻く環境は多岐にわたり、また ICT 分野の技術トピックも多種多様であるため、この俯瞰区分は、必要に応じて見直していくものである。

また、技術的動向を中心とした報告となっているが、ChatGPT のような汎用 AI ツールの社会的普及によって、技術面だけでなく、倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) についてもさまざまな視点から議論する必要があり、今後の俯瞰報告書で取り上げなければいけない点である。1.1 版以降、1.3 章にはこのような観点も追記している。これからの ICT 研究開発プロジェクトにおいても、常に技術開発とともに ELSI を検討しながら進めていくことが重要である。

同様に、持続可能な社会に向けた ICT の貢献に関しても、ICT の利用によるさまざまな社会システムのエネルギー消費の効率化だけでなく、ICT 自体のエネルギー消費をカーボンニュートラルにしていく必要があり、さらなるグリーン ICT の推進にむけての発展が期待される。

本報告書は、NICT の研究者を中心に執筆するとともに、今回は各分野の有識者アドバイザーとの意見交換を通じて、より俯瞰的な視点を追加するように努めた。ただ、まだ作成プロセスも含めて発展段階にあり、不十分な点については、今後更新していく予定である。また、本報告書の内容が、我が国の情報通信、経済、行政、教育などの政策担当者や、ICT の研究者コミュニティに活用され、ICT の発展と安全安心な Society 5.0 の実現に貢献できれば幸いである。

(付録 A 用語集)**第 2 章****2.2 電磁波の利活用**

1. 非地上系ネットワーク (Non Terrestrial Network、NTN) : 通信衛星だけではなく、HAPS やドローン、船舶など、地上の移動体に限定せず、海や空、宇宙に至るすべての移動体を多層的につなげる通信システム。飛行機や船におけるインターネット利用だけではなく、物流や IoT などの新しいユースケースの実現が期待されている。

2.3 通信ネットワークインフラストラクチャー

1. HAPS : High-Altitude Platform Station の略称で、地上高 20 km の成層圏を数日～数ヶ月の長期間に渡って無着陸で飛行できる無人飛行体を指す。
2. 空間多重光ファイバ通信 : 1 本の光ファイバ中に複数のコアを配置するマルチコアファイバや、伝搬する光の分布 (モード) 毎に別の経路とするマルチモード伝送方式を用いて、従来の 1,000 倍以上 (毎秒ペタビット級) の情報伝送を行う通信技術。
3. HTS (ハイスループット衛星通信システム) : 衛星のビームを絞り、一度に沢山のアンテナビームを集中照射することで大容量にする衛星通信システム。
4. 宇宙 RAN : 宇宙における無線アクセスネットワーク (Radio Access Network、RAN)。スマートフォンなどの端末から受け取った通信データを整理し、その先のコアネットワークとやり取りする。アンテナ設備、基地局、回線制御装置などを含む。

2.4 ICT デバイス技術

1. UVC : 紫外線 (Ultra-Violet) の一種。UV は波長の長いほうから A・B・C と大別されている。UVC (UV-C) は 100 ~ 280 nm の波長域の光を指す。自然界では、太陽からも放射されているが、成層圏やオゾン等で全て吸収されて地表には到達しない。

2.6 量子 ICT 分野

1. コヒーレンス時間 : スピンに保存された量子情報が消失してしまう時間を表す。量子情報の消失は、量子の基底状態と励起状態の間の位相関係が外部からの攪乱により乱されることにより起こる。
2. 超伝導量子ビット : 超伝導現象を利用して、ウェハ上に人工的に作製された原子の基底状態と第一励起状態を重

ね合わせ状態として実現される。

2.7 ユニバーサルコミュニケーション

1. LiDAR (Light Detection And Ranging : ライダー) : 照射したレーザー光の反射光から対象物までの距離や形状を測定する技術
2. GAN (Generative Adversarial Network : ギャン) : 生成と認識の 2 つのネットワークを競わせることで高解像度の画像等のデータを生成可能にする技術
3. REXR (Realistic and EXpressive 3 D avataR : レクサー) : カメラ 1 台の映像だけから本人の細やかな表情・身体動作を実時間で再現可能にする 3 D アバター構築技術
4. NeRF (Neural Radiance Fields : ニューラル放射輝度場) : 複数の視点の画像から異なる視点の高品質な画像を生成する技術

2.8 生命機能に学ぶバイオ ICT と脳情報通信融合研究

1. デジタルツイン (Digital Twin) : デジタルツインとは、物理的なオブジェクト・人・プロセス・システムをリアルタイムでデジタル空間に複製した仮想モデルのこと。現実世界のセンサーや IoT デバイスからデータを収集し、常に更新され続ける「生きたデジタルコピー」として機能する。主要な医療・ヘルスケア分野での活用事例は、臓器や人体システムのデジタルツインを作成して個別化医療や外科シミュレーションへの活用するものなど。英国バイオバンクの膨大なデータを活用し、機械学習を用いて個人の心臓を忠実に再現した「心臓デジタルツイン (CDT)」を大規模に構築する革新的な手法の提案がある。
2. ニューロモルフィック (Neuromorphic) : 生物の神経系に見られる情報処理様式を参照し、それを工学的に抽象化して実装する計算アーキテクチャおよびデバイスの総称である。非フォン・ノイマン型計算として、計算と記憶の分離を前提としない構成や、イベント駆動型処理を取り入れることで、従来型計算のボトルネック低減を目指す研究開発動向がある。
3. Whole Brain Emulation (WBE : 全脳モデル / 全脳シミュレーション) : 脳の構造および活動に関する計測データを基に、計算機上で多階層モデルを構築し、脳機能の理解や検証を行う研究アプローチである。多層のモデル化 : 形態、細胞特性、神経接続、神経活動といった

異なる階層を対象とし、研究目的に応じた粒度でモデル化と検証を反復する。

4. スパイクニューラルネットワーク (SNN) : 生物の神経細胞がスパイク状の信号を用いて情報伝達を行う特性を取り入れたニューラルネットワークモデルである。時間情報として、スパイクの発火タイミングや時間関係を情報表現に用いる点に特徴がある。ニューロモルフィック・ハードウェアと組み合わせることで、特定用途における高い電力効率が期待されている。
5. マルチオミクス (Multi-omics) : ゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームなど、複数階層の生体分子情報を統合的に解析する手法である。単一データでは捉えにくい生命現象を、複数モダリティの統合解析により把握することが期待されている。
6. データ同化 (Data Assimilation) : 数理モデルによる予測と実測データを統合し、モデル状態やパラメータを更新する数理的手法。
7. オルガノイド (Organoid) : 幹細胞や組織由来細胞を三次元培養し、自己組織化により形成される小型の生体模倣組織。複数種細胞の空間配置と相互作用を部分的に再

現することで、器官臓器の機能を再現する。創薬、疾患モデル、個別化医療研究などの実験基盤として用いられている。

8. オーガン・オン・チップ (Organ-on-a-Chip) : 微細加工技術により作製されたチップ上で細胞を培養し、生体内の微小環境を模倣する生体模倣システムである。流体、物理刺激、化学条件を精密に制御可能であることから、器官・臓器のモデルシステムとして利用される。複数チップを接続し、臓器間相互作用の解析が可能である。オルガノイドを利用することも検討され、オルガノイド・オン・チップとも呼ばれる。
9. 生体実装型ツイン (Biological Implementation Twin) : 実際の生体由来組織を用いて器官機能を物理的に再構築したモデルであり、デジタルツインに対応する実体側のツインであり、オーガン・オン・チップやオルガノイドもこれに該当する。計算モデルでは捉えにくい細胞間相互作用や微小環境を扱うことが可能で、デジタルツインとの相互往復により、モデル妥当性の検証や予測精度向上に寄与する。

- 1) 総務省, “我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算,” Available: https://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/eidsystem/market01_05_03.html
- 2) International Energy Agency, “Energy demand from AI,” <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai>
- 3) IPA, “JC-STAR 活用に向けた取り組み,” <https://www.ipa.go.jp/security/jc-star/leverage.html>
- 4) Stanford University, “The 2025 AI Index Report,” https://hai.stanford.edu/assets/files/hai_ai-index-report-2025_chapter4_final.pdf
- 5) SANDVINE, “The Global Internet Phenomena Report March 2024,” https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/2024/GIPR/GIPR%202024.pdf
- 6) Starlink 公式 X アカウント, <https://x.com/Starlink/status/1986168985453490449>
- 7) The Times, “Higher Education World University Rankings,” 2022. Available: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/2022/world-ranking#!/page/0/length/100/>.
- 8) Department of Defense, “DOD Announces \$600 Million for 5G Experimentation and Testing at Five Installations,” Available : <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2376743/dod-announces-600-million-for-5-g-experimentation-and-testing-at-five-installati/>
- 9) “Qunnect Announces Sale of First Commercial Quantum Memory,” Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/qunnect-announces-sale-of-first-commercial-quantum-memory-301428820.html>.
- 10) “EPB and Qubitekk Launch Commercial Quantum Network to Accelerate Development and Adoption of Quantum Products,” Available: <https://epb.com/newsroom/press-releases/epb-and-qubitekk-launch-commercial-quantum-network-to-accelerate-development-and-adoption-of-quantum-products/>.
- 11) Ruane, J., Kiesow, E., Galatsanos, J., Dukatz, C., Blomquist, E., & Shukla, P., The Quantum Index Report 2025, MIT Initiative on the Digital Economy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, May 2025. Available: <https://qir.mit.edu/wp-content/uploads/2025/06/MIT-QIR-2025.pdf>
- 12) PAWR Project Office, Platforms for Advanced Wireless Research (PAWR) Program Overview, advancedwireless.org, accessed December 5, 2025. Available: <https://advancedwireless.org>
- 13) “FCC Technological Advisory Council,” Available: <https://www.fcc.gov/general/technological-advisory-council>.
- 14) E. A. M. v. Dis, J. Bollen, R. v. Rooij, W. Zuidema and C. L. Bockting, “ChatGPT: five priorities for research,” Nature, 2023.
- 15) https://www.eeas.europa.eu/japan/eutoha_ja?s=169
- 16) <https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/eu/data.html>
- 17) https://commission.europa.eu/document/download/e6cd4328-673c-4e7a-8683-f63ffb2cf648_en
- 18) https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en
- 19) https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/competitiveness-compass_en
- 20) https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
- 21) https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/digital-europe-programme_en
- 22) https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en
- 23) <https://smart-networks.europa.eu/>
- 24) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/6g>
- 25) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/partnerships#ecl-inpage-partnership-with-japan>
- 26) <https://www.horizon-europe.gouv.fr/eu-us-6-g-ri-cooperation-34675>
- 27) <https://6g-mirai-harmony.eu/>
- 28) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>
- 29) <https://qt.eu/>
- 30) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- 31) https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/ESA_and_European_Commission_to_build_quantum-secure_space_communications_network
- 32) <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/secure-satcom/iris2>
- 33) <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/>

- iris2-secure-connectivity_en
- 34) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>
- 35) <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>
- 36) <https://www.ukri.org/news/five-hubs-launched-to-ensure-the-uk-benefits-from-quantum-future/>
- 37) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act>
- 38) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-solidarity>
- 39) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2243
- 40) https://cybersecurity-centre.europa.eu/index_en
- 41) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/speech_25_471
- 42) https://luxembourg.representation.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/eu-launches-investai-initiative-mobilise-eu200-billion-investment-artificial-intelligence-2025-02-11_en
- 43) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-continent-action-plan>
- 44) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/ai-office>
- 45) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai>
- 46) <https://www.gov.uk/government/publications/ai-opportunities-action-plan/ai-opportunities-action-plan>
- 47) <https://www.aisi.gov.uk/>
- 48) <https://www.gov.uk/government/news/tackling-ai-security-risks-to-unleash-growth-and-deliver-plan-for-change>
- 49) https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- 50) https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en
- 51) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/artificial-intelligence-unlocking-smarter-greener-energy-future>
- 52) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_1013
- 53) https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14628-AI-Continent-new-cloud-and-AI-development-act_en
- 54) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-services-act-package>
- 55) https://digital-markets-act.ec.europa.eu/index_en
- 56) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-governance-act>
- 57) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act>
- 58) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-union>
- 59) https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/eu-budget-2028-2034_en
- 60) https://commission.europa.eu/publications/european-competitiveness-fund_en
- 61) 外務省アジア大洋州地域政策参事官室, Japan, “目で見る ASEAN — ASEAN 経済統計基礎資料— (令和5年12月).” . Available: <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000127169.pdf>.
- 62) Infocomm Media Development Authority, Singapore, “Advancing Singapore’s 6G future and talent, IMDA partners SUTD to launch the first 6G R&D lab in Southeast Asia,” Available: <https://www.imda.gov.sg/content-and-news/press-releases-and-speeches/press-releases/2022/advancing-singapores-6-g-future-and-talent---imda-partners-sutd-to-launch-the-first-6-g-research-and-development-lab-in-southeast-asia>.
- 63) AI-RAN ALLIANCE, “About,” Available: <https://ai-ran.org/>.
- 64) VnExpress, Vietnam, “Vietnam to begin 6G technology research and development,” 2022. Available: <https://e.vnexpress.net/news/business/industries/vietnam-to-begin-6-g-technology-research-and-development-4417487.html>.
- 65) Ministry of Information and Communications, Vietnam, “Vietnam sets up committee on 6G research and development,” 2022. Available: <https://english.mic.gov.vn/Pages/TinTuc/tinchitiet.aspx?tintucid=152682>.
- 66) Government of India, Ministry of Communications, Department of Telecommunications, India, “6G VISION,” 2023. Available: <https://dot.gov.in/sites/default/files/Bharat%206G%20Vision%20Statement%20-%20full.pdf>.
- 67) Gulf News, United Arab Emirates, “PM Modi unveils 6G test bed, industry hails move,” 2023. Available: <https://gulfnews.com/world/asia/india/pm-modi-unveils-6-g-test-bed-industry-hails-move-1.94646978>.
- 68) Public Information Bureau, India, “INDIA’S 6G VISION,” 2025. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2118200>.
- 69) Smart Nation and Digital Government Office, Singapore, “National AI Strategy,” Available: <https://www.smartnation.gov.sg/initiatives/artificial-intelligence/>.
- 70) Smart Nation and Digital Government Office, Singapore, “National AI Strategy 2.0,” 2023. Available: <https://go.gov.sg/nais2023>.

- 71) Oxford Insights, United Kingdom, “Government AI Readiness Index 2024,” 2024. Available: <https://oxfordinsights.com/wp-content/uploads/2024/12/2024-Government-AI-Readiness-Index-2.pdf>.
- 72) National University of Singapore, Singapore, “Artificial Intelligence Institute,” Available: <https://ai.nus.edu.sg/>.
- 73) AI Singapore, Singapore, “Southeast Asian Languages in One Network (SEA-LION),” Available: <https://sea-lion.ai/>.
- 74) AI Singapore, Singapore, “AI Singapore in Hugging Face,” Available: <https://huggingface.co/aisingapore>.
- 75) A*Star Institute for Infocomm Research, Singapore, “Unlocking the Potential of Large Language Models (LLMs) with I²R’s MERaLion,” Available: <https://www.a-star.edu.sg/i2r/research/I2RTechs/research/i2r-techs-solutions/unlocking-the-potential-of-large-language-models-llms-with-i-r-s-merlion-ai>.
- 76) Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Indonesia, “STRATEGI NASIONAL KECERDASAN ARTIFISIAL INDONESIA,” Available: <https://ai-innovation.id/images/gallery/ebook/stranas-ka.pdf>.
- 77) NECTEC, Thailand, “The Cabinet approved the (Draft) Thailand National AI Strategy and Action Plan (2022 – 2027),” 2022. Available: <https://www.nectec.or.th/en/about/news/cabinet-national-ai-strategy.html>.
- 78) Ministry of Science, Technology & Innovation (MOSTI), Malaysia, “Malaysia National Artificial Intelligence Roadmap 2021-2025 (AI-RMAP),” Available: <https://airmap.my/wp-content/uploads/2022/08/AIR-Map-Playbook-final-s.pdf>.
- 79) The Prime Minister of the Socialist Republic of Vietnam, Vietnam “Decision No. 127/QĐ-TTg 2021 the national strategy for artificial intelligence research through 2030,” Available: <https://english.luatvietnam.vn/decision-no-127-qd-ttg-dated-january-26-2021-of-the-prime-minister-on-the-promulgation-of-the-national-strategy-on-research-development-and-applica-197755-doc1.html>.
- 80) Department of Trade and Industry, Philippines, “DTI launches National AI Strategy Roadmap 2.0 and Center for AI Research, positioning the Philippines as a Center of Excellence in AI R&D,” 2024. Available: <https://www.dti.gov.ph/dti-archives/dti-news-archived/dti-dti-launches-national-ai-strategy-roadmap-2-0-center-ai-research-positioning-philippines-center-excellence-ai-rampd>.
- 81) National Electronics and Computer Technology Center, Thailand, “Pathumma LLM,” 2025. Available: <https://www.nectec.or.th/innovation/innovation-service/pathumma-llm.html>.
- 82) National Electronics and Computer Technology Center, Thailand, “National Electronics and Computer Technology Center in Hugging Face,” Available: <https://huggingface.co/nectec>.
- 83) NITI Aayog, India, “National Strategy for Artificial Intelligence #AIFORALL,” 2018. Available: <https://niti.gov.in/sites/default/files/2019-01/NationalStrategy-for-AI-Discussion-Paper.pdf>.
- 84) Public Information Bureau, India, “Cabinet Approves Over Rs 10,300 Crore for IndiaAI Mission, will Empower AI Startups and Expand Compute Infrastructure Access,” 2024. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2012375>.
- 85) Public Information Bureau, India, “MeitY Unveils India AI Governance Guidelines under IndiaAI Mission to Ensure Safe, Inclusive, and Responsible Adoption of Artificial Intelligence across Sectors,” 2025. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2186639>.
- 86) JETRO, Japan, “インド発の生成 AI スタートアップのクルトリムがユニコーン入り,” 2024. Available: <https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/01/366a09e5b0329c2f.html>.
- 87) Department of Industry, Science and Resources, Australia, “National AI Plan,” 2025. Available: <https://www.industry.gov.au/publications/national-ai-plan>.
- 88) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia, “Our AI capabilities and projects,” Available: <https://www.csiro.au/en/research/technology-space/ai/Our-AI-capabilities-and-projects>.
- 89) Public Information Bureau, India, “Three-Day GPAI Summit concluded today at Bharat Mandapam!,” 2023. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=1986475>.
- 90) Department of Industry, Science and Resources, Australia, “National Quantum Strategy,” 2023. Available: <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>.
- 91) International Conference on Research Infrastructures, Australia, “Australia’s first Quantum Communications Testbed open for business,” 2024. Available: <https://icri2024.au/2024/09/05/australias-first-quantum-communications-testbed-open-for-business/>.
- 92) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia, “Breakthrough quantum-secure link protects data using the laws of physics,” 2025. Available: <https://www.csiro.au/en/news/All/>

- News/2025/October/Breakthrough-quantum-secure-link-protects-data-using-the-laws-of-physics.
- 93) Public Information Bureau, India, “National Quantum Mission: India’s Quantum Leap,” 2025. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2111953>.
- 94) Department of Science and Technology, India, “National Quantum Mission (NQM)” Available: <https://dst.gov.in/national-quantum-mission-nqm>.
- 95) Public Information Bureau, India, “C-DOT and Sterlite Technologies Ltd. (STL) achieve India’s First Quantum Key Distribution (QKD) over Multi-Core Fibre,” 2025. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2122447>.
- 96) Public Information Bureau, India, “Startup supported by DST under NQM demonstrates 500 km Quantum-Safe Network,” 2025. Available: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2186652>.
- 97) The Straits Times, Singapore, “S’pore creates first quantum cryptography testbed, gets closer to building an unhackable Internet,” 2022. Available: <https://www.straitstimes.com/tech/tech-news/spore-creates-first-quantum-cryptography-testbed-gets-closer-to-building-an-unhackable-internet>.
- 98) National Quantum-Safe Network, Singapore, “ABOUT NQSN” Available: <https://nqsn.sg/index.html>.
- 99) Infocomm Media Development Authority, Singapore, “National Quantum Safe Network Plus” Available: <https://www.imda.gov.sg/about-imda/emerging-technologies-and-research/national-quantum-safe-network-plus>.
- 100) 東芝デジタルソリューションズ株式会社 /SpeQtral Pte Ltd., Japan/Singapore, “東芝デジタルソリューションズとSpeQtral社、シンガポールが展開する耐量子ネットワークの実証プロジェクトに向け協業関係を強化,” 2023. Available: <https://www.global.toshiba/jp/news/digitalsolution/2023/11/news-20231124-01.html>.
- 101) SpeQtral Pte Ltd., Singapore, “SpeQtre, the entanglement-based quantum comms demonstrator satellite, is now on orbit,” 2025. Available: <https://speqtralquantum.com/newsroom/speqtre-the-entanglement-based-quantum-comms-demonstrator-satellite-is-now-on-orbit>.
- 102) SpeQtral Pte Ltd., Singapore, “Pioneers of space-based quantum communication” Available: <https://speqtralquantum.com/technology/satellite-qkd>.
- 103) IBM, “IBM X-Force 2025 Threat Intelligence Index,” Available: <https://www.ibm.com/reports/threat-intelligence>.
- 104) Microsoft, “Microsoft Digital Defense Report 2025,” 2025. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/dmc/en-us/corporate-responsibility/cybersecurity/microsoft-digital-defense-report-2025/>.
- 105) JETRO, Japan, “ASEAN のデジタル経済とデータ関連規制 (2025年3月),” 2025. Available: <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2025/01/96964f3d796cfb8f.html>.
- 106) 牛島総合法律事務所, Japan, “外国の個人情報の保護に関する制度調査,” Available: https://www.ushijima-law.gr.jp/topics/foreign_pi_legislation/.
- 107) Department of Home Affairs, Australia, “Cyber Security Act,” 2024. Available: <https://www.homeaffairs.gov.au/cyber-security-subsite/Pages/cyber-security-act.aspx>.
- 108) 総務省, Japan, “日ASEAN サイバーセキュリティ能力構築センターの設立,” H30. Available: https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin09_02000074.html.
- 109) JICA, Japan, “ASEAN 地域向け技術協力プロジェクト討議事録の署名: 日ASEAN 協力を通じた自由、公正かつ安全なサイバー空間の構築に向けて,” 2023. Available: https://www.jica.go.jp/press/2022/20230221_43.html.
- 110) “L’Union européenne annonce 200 milliards d’euros d’investissements dans l’IA” <https://www.actuia.com/actualite/lunion-europeenne-annonce-200-milliards-deuros-dinvestissements-dans-lia>
- 111) “Emmanuel Macron annonce 109 milliards € investis pour l’IA en France” <https://www.larevuedudigital.com/emmanuel-macron-annonce-109-milliards-e-investis-pour-lia-en-france/>
- 112) “AI Opportunities Action Plan” <https://www.gov.uk/government/publications/ai-opportunities-action-plan/ai-opportunities-action-plan>
- 113) “AI の未来のためのシャルルボワ・共通ビジョン”, https://www.mofa.go.jp/mofaj/ecm/ec/page25_001321.html
- 114) “ビアリッツ宣言: 開かれた自由で安全なデジタル化による変革のための戦略”, https://www.mofa.go.jp/mofaj/ecm/ec/page23_002901.html
- 115) “広島 AI プロセス” <https://www.soumu.go.jp/hiroshimaaiprocess/>
- 116) “広島 AI プロセス包括的政策枠組み” <https://www.soumu.go.jp/hiroshimaaiprocess/documents.html>
- 117) “Prime Minister launches new AI Safety Institute”, <https://www.gov.uk/government/news/prime-minister-launches-new-ai-safety-institute>
- 118) “At the Direction of President Biden, Department

- of Commerce to Establish U.S. Artificial Intelligence Safety Institute to Lead Efforts on AI Safety”, <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2023/11/direction-president-biden-department-commerce-establish-us-artificial>
- 119) “AI セーフティ・インスティテュートの設立”<https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20240214.html>
- 120) “Digital Trust Centre”
<https://www.imda.gov.sg/-/media/imda/files/news-and-events/media-room/media-releases/2024/05/imda-factsheet-digital-trust-centre-designated-as-spore-ai-safety-institute-22-may-2024.pdf>
- 121) “Canadian Artificial Intelligence Safety Institute (CAISI)”<https://www.canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2024/11/canada-launches-canadian-artificial-intelligence-safety-institute.html>
- 122) <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mPid=2&mId=4&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=1058>
- 123) “INESIA” <https://presse.economie.gouv.fr/le-gouvernement-annonce-la-creation-de-linstitut-national-pour-levaluation-et-la-securite-de-lintelligence-artificielle-inesia/>
- 124) <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/timayres/media-releases/establishment-australian-ai-safety-institute>
- 125) “AISI 国際ネットワーク Mission Statement”https://aisi.go.jp/assets/pdf/Mission_Statement_International_Network_of_AI_Safety_Institutes.pdf
- 126) “Tackling AI security risks to unleash growth and deliver Plan for Change” <https://www.gov.uk/government/news/tackling-ai-security-risks-to-unleash-growth-and-deliver-plan-for-change#:~:text=Tackling%20AI%20security%20risks%20to,Plan%20for%20Change%20%2D%20GOV.UK>
- 127) “Statement from U.S. Secretary of Commerce Howard Lutnick on Transforming the U.S. AI Safety Institute into the Pro-Innovation, Pro-Science U.S. Center for AI Standards and Innovation”
<https://www.commerce.gov/news/press-releases/2025/06/statement-us-secretary-commerce-howard-lutnick-transforming-us-ai>
- 128) “人工知能戦略本部”<https://www.kantei.go.jp/jp/104/actions/202512/19jinkoutchinou.html>
- 129) “OpenAI Declares ‘Code Red’ as Google Threatens AI Lead,” <https://www.wsj.com/tech/ai/openai-altman-declares-code-red-to-improve-chatgpt-as-google-threatens-ai-lead-7faf5ea6>
- 130) “A New Chat Bot Is a ‘Code Red’ for Google’s Search Business,” <https://www.nytimes.com/2022/12/21/technology/ai-chatgpt-google-search.html>
- 131) “DeepSeek-R1: Incentivizing Reasoning Capability in LLMs via Reinforcement Learning”
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.12948>
- 132) “エヌビディア時価総額、米史上最大の 5890 億ドル減 - DeepSeek ショック”
<https://www.bloombergenews.com/articles/2025-01-27/SQQNIVDWX2PS00>
- 133) <https://waymo.com/blog/2024/06/waymo-one-is-now-open-to-everyone-in-san-francisco>
- 134) “SAFE プロジェクトの汎用 AI 安全性ツールキットの公開,” <https://centre-secrite-ia.notion.site/safe-online?v=1c466ef02bab811f94ef000ca607ec1e>
- 135) “What is the Model Context Protocol (MCP)?”, <https://modelcontextprotocol.io/docs/getting-started/intro>
- 136) Beyond 5G 推進コンソーシアム, “Beyond 5G 推進コンソーシアム,” Available: <https://b5g.jp/>.
- 137) Beyond 5G 新経営戦略センター, “Beyond 5G 新経営戦略センター,” Available: <https://b5gnbsc.jp/>.
- 138) NICT, “革新的情報通信技術 (Beyond 5G(6G)) 基金事業,” Available: <https://b5g-rd.nict.go.jp/program/>.
- 139) NTT, “IOWN,” Available: <https://www.rd.ntt/iown/>.
- 140) テラヘルツシステム応用推進協議会, “テラヘルツシステム応用推進協議会,” Available: <https://www.scator.jp/THz-conso/>.
- 141) NICT, “スペース ICT 推進フォーラム,” Available: <https://spif.nict.go.jp/>.
- 142) NICT, “ワイヤレスエミュレータ 利活用社会推進フォーラム,” Available: <https://wepf.nict.go.jp/forum/>.
- 143) 内閣府, “内閣府ホーム 内閣府の政策 科学技術政策 Society 5.0,” 2023. Available: https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/.
- 144) <https://www.mod.go.jp/j/press/news/2024/08/03a.html>
- 145) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101760.html
- 146) 総務省デジタルビジネス拡大に向けた電波政策懇談会 (第 3 回) 資料
https://www.soumu.go.jp/main_content/000919452.pdf
- 147) <https://cumulon.jp/>
- 148) <https://newstsukuba.jp/59186/10/12/>
- 149) “Delta diverts polar flights due to solar storm | Reuters,”
<https://jp.reuters.com/article/us-delta/delta-diverts-polar-flights-due-to-solar-storm-idUKTRE80N28I20120124/>
- 150) “Blue Origin and NASA delay launch because of solar

- storms | AP News,” <https://apnews.com/article/blue-origin-mars-nasa-solar-storm-87946ca6bb47601055642740e80b7dd4>
- 151) <https://swc.nict.go.jp/report/topics/202511121600.html>
- 152) <https://www.nict.go.jp/press/2022/12/27-1.html>
- 153) <https://swc.nict.go.jp/safir/>
- 154) <https://www.mod.go.jp/j/press/news/2025/07/28a.html>
- 155) “不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発,” https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/R4_RD02.pdf
- 156) https://emc.nict.go.jp/mnt/gis_map.html
- 157) “R7年度情報通信白書,” <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r07/html/nd217520.html>
- 158) https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000101.html
- 159) 農林水産省 農村振興局 整備部 防災課長・農林水産省水産庁 漁港漁場整備部 防災漁村課長・国土交通省 水管理・国土保全局 海岸室長・国土交通省 港湾局海岸・防災課長（令和3年8月2日）「気候変動の影響を踏まえた海岸保全施設の計画外力の設定方法等について」https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/coastplan/r3_08.pdf
- 160) 国土交通省水管理・国土保全局（令和7年3月14日）「河川整備基本方針の変更の考え方について」https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/ka-senbunkakai/shouinkai/kihonhoushin/dai149kai/09.pdf
- 161) “知識ベース知識の森，衛星通信,” 電子情報通信学会，2023.
- 162) “情報通信白書,” 総務省，2025.
- 163) “5Gの整備状況（令和6年度末）の公表,” 総務省，2025.
- 164) NICT, “世界初、4コア光ファイバで毎秒1ペタビット伝送に成功,” 報道発表資料，2022.
- 165) 豊嶋，高橋，三浦，辻，中尾，中須賀，“スペースICT推進フォーラムの活動と今後の展望,” 電子情報通信学会 SAT・RCS研究会（SAT2022-38/RCS2022-125），2022.
- 166) NTT, “AI社会の実現に向けた、IOWN APNによるGPUの3拠点分散データセンター構築を世界で初めて成功,” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2025/0319.html>
- 167) Softbank, “AI-RAN: Telecom Infrastructure for the Age of AI,” <https://www.softbank.jp/en/corp/technology/research/topics/126/>
- 168) NVIDIA, “NVIDIA と Nokia、6G 向けの AI プラットフォームを先駆的に開発し、通信分野における米国のリーダーシップ復帰を推進,” <https://blogs.nvidia.co.jp/blog/nvidia-nokia-ai-telecommunications/>
- 169) KDDI, “AIを活用した障害検知システムの運用を開始,” https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi_pr-1097.html
- 170) KDDI, “AIとの対話によるネットワーク運用の実証実験に成功,” https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi_nr-459_3735.html
- 171) T. Hirayama, et al., “Autonomic Closed-Loop Service Management based on Interworking Multiple AI Models,” NOMS 2025-2025 IEEE Network Operations and Management Symposium, 2025, pp. 1-7
- 172) P. Martinez-Julia, et al., “EDAIR: An Efficient Distributed AI Agent Architecture for Multi-Domain Intent Resolution,” NOMS 2025-2025 IEEE Network Operations and Management Symposium, 2025, pp. 1-7
- 173) NTT, “IOWN 実用化に向けたデバイス技術開発の取り組み,” https://www.rd.ntt/research/JN202505_33811.html
- 174) NICT, “ミリ波無線受信機を簡素化する光・無線直接伝送技術の実証成功,” <https://www.nict.go.jp/press/2021/07/15-1.html>
- 175) Viasat, <https://www.viasat.com/about/technology/satellite-fleet/viasat-3>
- 176) “Google’s CNMI cable set to launch in the first quarter of 2026,” <https://www.pacificislandtimes.com/post/google-s-cnmi-cable-set-to-launch-in-the-first-quarter-of-2026>
- 177) World Economic Forum. Global Cybersecurity Outlook 2025. 2025. <https://www.weforum.org/reports/global-cybersecurity-outlook-2025/>
- 178) European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape 2025. 2025. <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2025>
- 179) National Institute of Standards and Technology (NIST). SP 800-161 Rev.1 Update 1: Cybersecurity Supply Chain Risk Management Practices for Systems and Organizations. 2023. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-161/rev-1/update-1/final>
- 180) Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., Connelly, S. NIST SP 800-207: Zero Trust Architecture. NIST, 2020. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-207/final>
- 181) 内閣官房．サイバー安全保障に関する取組（能動的サイバー防御の実現に向けた検討など）. 2025. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cyber_anzen/

- 182) U.S. Cyber Command. Cyber 101: Defend Forward and Persistent Engagement. 2022.
<https://www.cybercom.mil/Media/News/Article/defend-forward/>
- 183) National Institute of Standards and Technology (NIST). Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). 2023.
<https://www.nist.gov/itl/ai-risk-management-framework>
- 184) OWASP. OWASP Top 10 for LLM Applications (v2025). 2025.
<https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/>
- 185) National Institute of Standards and Technology (NIST). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard (ML-KEM). 2024.
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/fips/203/final>
- 186) ISC2. 2024 ISC2 Cybersecurity Workforce Study. 2024.
<https://www.isc2.org/research/workforce-study>
- 187) National Institute of Standards and Technology (NIST). SP 800-204A: Building Secure Microservices-based Applications Using Service-Mesh Architecture. 2020.
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-204a/final>
- 188) OWASP. OWASP API Security Top 10 – 2023. 2023.
<https://owasp.org/www-project-api-security/>
- 189) National Institute of Standards and Technology (NIST). SP 800-218: Secure Software Development Framework (SSDF) Version 1.1. 2022.
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-218/final>
- 190) 国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT). NICTER 観測レポート 2025 (公表ページ / プレスリリース). 2026.
<https://www.nict.go.jp/press/2026/01/30-1.html>
- 191) SecurityScorecard STRIKE Team. “Checking all the Boxes”: LapDogs, The New ORB in Town. 2025.
<https://securityscorecard.com/research/lapdogs-orb-report/>
- 192) Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). #StopRansomware Guide. 2023.
<https://www.cisa.gov/stopransomware>
- 193) Microsoft. Human-operated ransomware (侵入後活動・横展開等の脅威解説). 2022.
<https://learn.microsoft.com/en-us/security/ransomware/human-operated-ransomware>
- 194) MITRE. ATT&CK Technique T1059.001: PowerShell. 2019.
<https://attack.mitre.org/techniques/T1059/001/>
- 195) European Union. Regulation (EU) 2016/679 (General Data Protection Regulation, GDPR). 2016.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>
- 196) National Institute of Standards and Technology (NIST). NICE Framework (SP 800-181 Rev.1). 2020.
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-181/rev-1/final>
- 197) Johnson, C., Badger, M., Waltermire, D., Snyder, J., Skorupka, C. NIST SP 800-150: Guide to Cyber Threat Information Sharing. NIST, 2016.
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-150/final>
- 198) サイバー攻撃誘引基盤 STARDUST.
https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku70-2_HTML/2024S-02-02-02.pdf
- 199) セキュリティ情報融合基盤 CURE.
https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku70-2_HTML/2024S-02-02-04.pdf
- 200) CRYPTREC.
<https://www.cryptrec.go.jp>
- 201) CYDER (サイバー防御演習).
<https://cyder.nict.go.jp/>
- 202) SecHack365.
<https://sechack365.nict.go.jp/>
- 203) サイバーセキュリティネクサス (CYNEX).
<https://cynex.nict.go.jp/>
- 204) NOTICE.
<https://notice.go.jp/>
- 205) 内閣府, “政府機関等における耐量子計算機暗号 (PQC) への移行について (中間とりまとめ)”
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/pqc/index.html>
- 206) A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin, “Attention Is All You Need,” 12 2017. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
- 207) R. Bommasani et al. “On the Opportunities and Risks of Foundation Models,” 2021. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.07258>.
 (Transformer)
- 208) T. B. Brown et al. “Language Models are Few-Shot Learners,” 2020. Available: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/1457c0d6bfc64967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf>.
- 209) Cai et al., *A Survey on Mixture of Experts in Large Language Models*, TKDE 2025.
 Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.06204>
- 210) 情報通信研究機構, “Preferred Networks、さくらインターネット、情報通信研究機構、安心安全で日本社会と調和する国産生成 AI のエコシステム構築に向け、基本

- 合意を締結” Available: <https://www.nict.go.jp/press/2025/09/18-1.html>
- 211) Tambon et al., “Bugs in large language models generated code: an empirical study”, 2025
Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.06204>
- 212) Forbes JAPAN 「市場規模 6.5兆円、『高齢者の孤独』を癒やす AI チャットボットたち」
Available: <https://forbesjapan.com/articles/detail/83798>
- 213) Aske Plaat et al., “Multi-step Reasoning with Large Language Models, a Survey,” ACM Computing Surveys, 2025
Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.11511>
- 214) Jiaxin Huang et al., “Large Language Models Can Self-Improve,” EMNLP 2023
Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.00533>
- 215) Luo et al., “Large Language Model Agent: A Survey on Methodology, Applications and Challenges” (2025)
Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.21460>
- 216) Han ほか 「llm-jp-eval: 日本語大規模言語モデルの自動評価ツール」 言語処理学会 第 30 回年次大会, 2024
- 217) Meinke et al., “Frontier Models are Capable of In-context Scheming”, arXiv:2412.04984, 2024
- 218) Bondarenko et al., “Demonstrating Specification Gaming in Reasoning Models”, 2025
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.13295>
- 219) Cui et al., “Recent Advances in Speech Language Models: A Survey,” ACL 2025.
- 220) Whisper が登場 | OpenAI
<https://openai.com/ja-JP/index/whisper/>
- 221) Baevski et al., “wav2vec 2.0: A Framework for Self-Supervised Learning of Speech Representations,” NeurIPS 2020.
- 222) Zhang et al., “SpeechGPT: Empowering Large Language Models with Intrinsic Cross-Modal Conversational Abilities,” Findings of EMNLP 2023.
- 223) Tan et al., “SSR: Alignment-Aware Modality Connector for Speech-Language Models,” IWSLT 2025 / arXiv 2024.
- 224) Wang et al., “Neural Codec Language Models are Zero-Shot Text-to-Speech Synthesizers,” 2023
- 225) Guo et al., “PromptTTS: Controllable Text-to-Speech with Text Descriptions,” arXiv 2022.
- 226) Wu et al., “Google’s Neural Machine Translation System: Bridging the Gap Between Human and Machine Translation,” arXiv 2016.
- 227) Feng et al., “Multimodal Neural Machine Translation: A Survey of the State of the Art,” EMNLP 2025.
- 228) 石渡 祥之佑, 「マンガ機械翻訳への招待」, 機械翻訳 (日本機械翻訳協会), 第 75 号, pp. 29–40, 2021.
- 229) Alec Radford et al., “Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision (Whisper)”, arXiv, 2022.
- 230) Xinlu He, Jacob Whitehill, “Survey of End-to-End Multi-Speaker Automatic Speech Recognition for Monaural Audio”, arXiv, 2025.
- 231) Google Research, “AudioPaLM: A Large Language Model That Can Speak and Listen”, 2023.
- 232) Alexandre Défossez et al., “Moshi: a speech-text foundation model for real-time dialogue”, arXiv, 2024.
- 233) Tom Labiausse et al., “High-Fidelity Simultaneous Speech-To-Speech Translation (Hibiki)”, ICML/MLR, 2025.
- 234) “翻訳バンク,” Available: <https://h-bank.nict.go.jp/about/>.
- 235) Gain Baban et al., “Bridging the Linguistic Divide: A Survey on Leveraging Large Language Models for Machine Translation”, arXiv, 2024.
- 236) Stack Overflow, “2025 Developer Survey,” <https://shiftmag.dev/stack-overflow-survey-2025-ai-5653>
- 237) Duan, J., et al. (2024). “Deep learning based multimodal biomedical data fusion: An overview and comparative review.” *Information Fusion* 112, 102536.
- 238) Jumper, J., et al. (2021). “Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold.” *Nature* 596, 583–589.
- 239) Varadi, M., et al. (2022). “AlphaFold Protein Structure Database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models.” *Nucleic Acids Research* 50 (D1), D439–D444.
- 240) Rives, A., et al. (2021). “Biological structure and function emerge from scaling unsupervised learning to 250 million protein sequences.” *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 118 (15).
- 241) Richards, B. A., et al. (2019). “A deep learning framework for neuroscience.” *Nature Neuroscience* 22, 1761–1770.
(脳のシミュレーション)
- 242) BRAIN Working Group 2.0. (2019). “The Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative 2.0: From Cells to Circuits, Toward Cures.”
- 243) Naselaris, T., et al. (2011). “Encoding and decoding in fMRI.” *NeuroImage* 56 (2), 400–410.
(Neuromorphic)
- 244) Indiveri, G., & Liu, S.-C. (2015). “Memory and information processing in neuromorphic systems.” *arXiv preprint arXiv:1506.03264*.
- 245) Xia, Q., & Yang, J. J. (2019). “Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing.” *Nature Materials*

- 18, 309-323.
(BMI & BCI)
- 246) EBRAINS AISBL. (2023). "Annual Report 2022-23."
- 247) Wolpaw, J. R., et al. (2002). "Brain-computer interfaces for communication and control." *Clinical Neurophysiology* 113 (6), 767-791.
- 248) IEEE Brain. "Standards: Neurotechnologies for Brain-Machine Interface Standards Roadmap."
- 249) Easttom, C., et al. (2021). "A Functional Model for Unifying Brain Computer Interface Terminology." *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology* 2, 91-96.
- 250) Grootswagers, T., Wardle, S. G., & Carlson, T. A. "Decoding dynamic brain patterns from evoked responses: a tutorial on multivariate pattern analysis applied to time series neuroimaging data." *Journal of Cognitive Neuroscience* 29(4) (2017): 677-697.
- 251) Cichy, R. M., & Pantazis, D. "Multivariate pattern analysis of MEG and EEG: A comparison of representational structure in time and space." *NeuroImage* 158 (2017): 441-454.
- 252) Willett, F. R., et al. (2023). "A high-performance speech neuroprosthesis." *Nature* 620, 1031-1036.
- 253) Van Sint Jan, S., & Geris, L. (2019). "Modelling towards a more holistic medicine: The Virtual Physiological Human (VPH)." *Morphologie* 103 (343), 127-130.
(生体情報)
- 254) Ienca, M., & Andorno, R. (2017). "Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology." *Life Sciences, Society and Policy* 13, 5.
- 255) UNESCO. (2024). "Towards a draft text of a Recommendation on the Ethics of Neurotechnology: working document." SHS/BIO/AHEG-Neuro/2024/INF.4 REV.
- 256) Council of Europe & OECD. (2022). "Neurotechnologies and Human Rights: Do we need new rights?" Round table report.
- 257) "イスラエル新興「エヌビディアのGPUより1000倍高速」、光活用のAI計算機," <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/10807/>
- 258) <https://www.epicorebiosystems.com/>
- 259) <https://xsensio.com/>
- 260) <https://emulatebio.com/>
- 261) <https://cn-bio.com/>
- 262) https://www.furuno.co.jp/news/general/general_category.html?dispmid=1017&itemid=1770
- 263) <https://www.teslarati.com/spacex-starlink-fcc-gps-alternative/>
- 264) 内閣府, <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-anpo/anpo-dai63/gijisidai.html>
- 265) <https://q-ctrl.com/blog/darpa-selects-q-ctrl-to-develop-next-generation-quantum-sensors-for-navigation-on-advanced-defense-platforms>
- 266) <https://vectoratomic.com/>
- 267) A. Chowdhery et al., "PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways," 2022. Available: <https://arxiv.org/abs/2204.02311>.
- 268) J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova, "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding," 11 10 2018. Available: <https://arxiv.org/abs/1810.04805v2>.
- 269) E. Collins, Z. Ghahramani, "LaMDA: our breakthrough conversation technology," 18 3 2021. Available: <https://blog.google/technology/ai/lamda/>.
- 270) "BlenderBot 3: A 175B parameter, publicly available chatbot that improves its skills and safety over time," 9 8 2022. Available: <https://ai.facebook.com/blog/blenderbot-3-a-175b-parameter-publicly-available-chatbot-that-improves-its-skills-and-safety-over-time/>.
- 271) GIGAZINE, "科学記事を自動で生成するAI「Galactica」がわずか3日で公開停止へ、入力内容次第で「ウソ記事」を生成可能と判明," 2022. Available: <https://gigazine.net/news/20221121-meta-ai-galactica-pulled/>.
- 272) S. Pichai, "An important next step on our AI journey," 2023. Available: <https://blog.google/technology/ai/bard-google-ai-search-updates/>.
- 273) J. Victor, J. E. Lessin, "Fighting 'Woke AI,' Musk Recruits Team to Develop OpenAI Rival," 2023. Available: <https://www.theinformation.com/articles/fighting-woke-ai-musk-recruits-team-to-develop-openai-rival>.
- 274) ロイター, "アルファベット株急落、グーグルのAIチャットボットが不正確な回答," 2023.
- 275) M. Joachimczak, J. Liu, H. Ando, "Creating 3D personal avatars with high quality facial expressions for telecommunication and telepresence," *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality (IEEE VR 2022)*, 2022.
- 276) B. Mildenhall, P. Srinivasan, M. Tancik, J. Barron, R. Ramamoorthi, R. Ng, "Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis," *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2020.
- 277) G. Mylonas, et al., "Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey," *IEEE Access*, 2021.
- 278) S. Mihai, et al., "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects," *IEEE Communications Surveys &*

- Tutorials, vol. 24 no. 4, pp.2255-2291, 2022.
- 279) “データ連携分析基盤 xData プラットフォーム,” Available: <https://www.xdata.nict.jp/>.
- 280) K. Wang, et al., “A review of the technology standards for enabling digital twin,” *Digital Twin*, 2022.
- 281) K. B. Letaief, et al., “Edge Artificial Intelligence for 6G: Vision, Enabling Technologies, and Applications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 1, pp. 5-36, 2022.
- 282) 総務省, “「Web3時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」中間とりまとめ,” 2023. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000860618.pdf.
- 283) Boyden, E. S., Zhang, F., Bamberg, E., Nagel, G., & Deisseroth, K. (2005). Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity. *Nature Neuroscience*, 8(9), 1263-1268. <https://doi.org/10.1038/nn1525>
- 284) Akerboom, J. et al. (2012). Optimization of a GCaMP calcium indicator for neural activity imaging. *The Journal of Neuroscience*, 32(40), 13819-13840. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2601-12.2012>
- 285) Wolpaw, J. R., & Wolpaw, E. W. (2012). *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*. Oxford University Press. (BCI 分野の標準的原典)
- 286) Richards, B. A. et al. (2019). A deep learning framework for neuroscience. *Nature Neuroscience*, 22(11), 1761-1770. <https://doi.org/10.1038/s41593-019-0520-2>
- 287) Muir, D. R., & Sheik, S. (2025). The road to commercial success for neuromorphic technologies. *Nature Communications*, 16, 3586. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57352-1>
- 288) Indiveri, G., & Liu, S.-C. (2015). Memory and information processing in neuromorphic systems. *Proceedings of the IEEE*, 103(8), 1379-1397. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2444094>
- 289) Schuman, C. D. et al. (2022). Opportunities for neuromorphic computing algorithms and applications. *Nature Computational Science*, 2, 10-19. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00184-y>
- 290) Neftci, E. O., Mostafa, H., & Zenke, F. (2019). Surrogate gradient learning in spiking neural networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(6), 51-63. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2931595>
- 291) Eshraghian, J. K. et al. (2023). Training spiking neural networks using lessons from deep learning. *Proceedings of the IEEE*, 111(9), 1016-1054. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3274519>
- 292) Davies, M. et al. (2021). Advancing neuromorphic computing with Loihi: A survey of results and outlook. *Proceedings of the IEEE*, 109(5), 911-934. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3067593>
- 293) Sandberg, A., & Bostrom, N. (2008). *Whole Brain Emulation: A Roadmap*. Future of Humanity Institute, University of Oxford. <https://www.openphilanthropy.org/wp-content/uploads/SandbergandBostrom2008.pdf>
- 294) RIKEN Center for Computational Science (R-CCS). Large-scale brain simulation research using supercomputer Fugaku. <https://www.r-ccs.riken.jp/en/>
- 295) Kuriyama, R. et al. (2025). Microscopic-Level Mouse Whole Cortex Simulation Composed of ~9 Million Biophysical Neurons and ~26 Billion Synapses on the Supercomputer Fugaku. *Proc. SC'25*.
- 296) Dorkenwald, S., Matsliah, A., Sterling, A.R. et al. Neuronal wiring diagram of an adult brain. *Nature* 634, 124-138 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07558-y>
- 297) Lazar, A.A., Liu, T., Turkcan M.K., Zhou, Y. (2021) Accelerating with FlyBrainLab the discovery of the functional logic of the Drosophila brain in the connectomic and synaptomic era *eLife* 10:e62362. <https://doi.org/10.7554/eLife.62362>
- 298) Amunts, K., Ebell, C., Muller, J., Telefont, M., Knoll, A., Lippert, T. (2016) The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain. *Neuron*. 92, 574-581. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.10.046>.
- 299) EBRAINS Research Infrastructure. Europe's Digital Infrastructure for Brain Research. <https://ebrains.eu/>
- 300) Markram, H. et al. (2015). Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry. *Cell*, 163(2), 456-492. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.09.029>
- 301) Galang, E. V. et al. (2025). Systematic review and meta-analysis of the relationships between real-time neurofeedback training parameters and acquisition of neural modulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1652607. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1652607>
- 302) Lyu, R. (2026). Deep learning approaches for EEG-based healthcare applications: a comprehensive review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1689073. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1689073>
- 303) Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107(32), 14425-14430. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008662107>
- 304) De Fano, A. et al. (2025). Non-verbal joint action

- in healthy adults: a systematic scoping review of EEG-hyperscanning research. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 20 (1), nsaf050. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaf050>
- 305) Leahy, O. et al. (2025). Environmental effects on inter-brain coupling: a systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1627457. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1627457>
- 306) Hildt, E. (2019). Multi-Person Brain-To-Brain Interfaces: Ethical Issues. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1177. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01177>
- 307) Adam, D., (2025) Digital twins come to the life sciences. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA.*, 122, e2532645122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2532645122>
- 308) Meijer C, Uh HW, El Bouhaddani S. (2023) Digital Twins in Healthcare: Methodological Challenges and Opportunities. *J Pers Med.* 13 (10):1522. <https://doi.org/10.3390/jpm13101522>
- 309) Jaffery, O., Melki, L., Slabaugh, G., Good, W. W., Roney, C. H. (2024). A review of personalized cardiac computational modelling using electroanatomical mapping data. *Arrhythmia & Electrophysiology Review*, 13, e08, <https://doi.org/10.15420/aer.2023.25>
- 310) Waight, M. et al. (2025). Personalized heart digital twins detect substrate abnormalities in scar-dependent ventricular tachycardia. *Circulation* 151, 521–533. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.124.070526>
- 311) Thangaraj, P. M. et al. (2024) Cardiovascular care with digital twin technology in the era of generative artificial intelligence. *European Heart Journal*, 45, 4808–4821. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae619>
- 312) Qian, S., Ugurlu, D., Fairweather, E. et al. (2025) Developing cardiac digital twin populations powered by machine learning provides electrophysiological insights in conduction and repolarization. *Nat. Cardiovasc Res* 4, 624–636. <https://doi.org/10.1038/s44161-025-00650-0>
- 313) Laubenbacher, R., Niarakis, A., Helikar, T. et al. (2022). Building digital twins of the human immune system: toward a roadmap. *npj Digit. Med.* 5, 64. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00610-z>
- 314) V. Vaghasiya, C. C. Mayorga-Martinez & M. Pumera, Wearable sensors for telehealth based on emerging materials and nanoarchitectonics., *npj Flexible Electronics* 7:26 (2023)
- 315) Pancheng Zhu, Hanmin Peng, Alina Y. Rwei, Flexible, wearable biosensors for digital health, *Medicine in Novel Technology and Devices*, Volume 14, 2022, 100118, ISSN 2590-0935,
- 316) Fatma Kurul, Damla Aydoğan, Sevval Janat, Irem Aydın Kırlangıç, Hüseyin Oğuzhan Kaya, Seda Nur Topkaya, Wearable sensors for health monitoring: Current applications, trends, and future directions, *Biosensors and Bioelectronics: X*, Volume 28, 2026, 100727, ISSN 2590-1370,
- 317) M. Hatano, “固体量子センサの研究開発の現状と今後の課題,” 2022. Available: https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/kento_wg/9kai/siry02_1.pdf. (Organoid)
- 318) Leung, C. M., et al. (2022). “A guide to the organ-on-a-chip.” *Nature Reviews Methods Primers* 2, 33.
- 319) Zhou, L., et al. (2025). “Organoids and organs-on-chips: Recent advances, applications in drug development, and regulatory challenges.” *Med* 6 (4), 100667.
- 320) Tang, X. Y., et al. (2022). “Human organoids in basic research and clinical applications.” *Signal Transduction and Targeted Therapy* 7, 168.
- 321) Lancaster, M., Renner, M., Martin, CA. et al., “Cerebral organoids model human brain development and microcephaly,” *Nature*, 501, pp.373-379., 2013.
- 322) Lu, Y., & Liu, Q. (2022). “Insect olfactory system inspired biosensors for odorant detection.” *Sensors & Diagnostics* 1, 11 26-1142.
- 323) Fukui, C., et al. (2025). “Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities.” *npj Robotics* 3, 4.
- 324) Iqbal, H., et al. “Forceful manipulation with micro air vehicles.” *Science Robotics* 3 (23) (2018): aau6903.
- 325) Abbasi, E. (2025). “Biological sensors and bio-inspired technologies: the role of insects in advanced detection systems and robotics.” *Discover Applied Sciences* 7, 503.

(付録 C 補足情報)**C-1. 欧州の状況について (1.2.2章関連)****C-1-1. 欧州デジタル未来の形成について**

欧州デジタル未来の形成を具現化するものとして、「デジタル・コンパス 2030」や「デジタル・ディケイドへの道」において、2030年までの目標や、目標達成のためのガバナンス枠組が規定されている。

「デジタル・コンパス 2030」

https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en

「デジタル・ディケイドへの道」

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_4630

C-1-2. 欧州の ICT 分野に関する地政学的動向

例えば、2019年3月、欧州委員会及びEU外務・安全保障政策上級代表は、「EU-中国：戦略的展望」において、中国の急速な成長について、経済や政治面のみならず技術的な台頭を踏まえ、中国を「戦略的なパートナー」から、協力・交渉のパートナーであると同時に「技術的覇権を追求する経済的競争相手」と位置付けている。

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52019JC0005>

C-1-3. スマート・ネットワーク・サービス共同事業

2022年1月から第1弾の公募が開始された。第1弾では、6Gの研究開発や実験インフラの開発等のプロジェクト35件が採択され、2023年1月からこれらのプロジェクトが開始され、同月には第2弾の公募も開始されている。

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/europe-scales-6-g-research-investments-and-selects-35-new-projects-worth-eu250-million>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/europe-launches-second-phase-its-6-g-research-and-innovation-programme>

C-1-4. 欧州各国における研究開発

例えば、フランス政府は2021年7月に「5G及び将来の通信ネットワーク技術に関する加速戦略」を策定し、その一環としてB5G/6Gプロジェクトを実施している。

<https://www.entreprises.gouv.fr/fr/strategie5G>

また、スペイン政府も Beyond 5G/6Gの研究開発プロ

ジェクトを進めている。

<https://portal.mineco.gob.es/es-es/comunicacion/Paginas/20220818-NdP-convocatoria-5G+-y-6G.aspx>

C-1-5. 欧州内連携の事例

フランスとドイツは、AIに関する協力宣言に署名し、2020年10月以降、InriaとDFKIを核にした各種共同研究開発プロジェクトを進めている。

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/declaration-d-intention-conjointe-formalisant-les-liens-entre-les-reseaux-francais-et-allemands-en-49019>

<https://www.inria.fr/en/first-five-projects-inrias-partnership-dfki>

C-1-6. グリーン ICT 分野の動向

フランスでは、国家レベルの取組として、2021年2月に「デジタルと環境」に関するロードマップを発表し、ICT分野の環境フットプリントの削減を推進している。

<https://www.economie.gouv.fr/environnement-numerique-feuille-de-route-gouvernement>

C-1-7. 半導体分野の研究開発動向

半導体分野に関する具体的な研究開発プロジェクトは、官民パートナーシップの主要デジタル技術共同事業 (Key Digital Technology Joint Undertaking: KDT JU) の下で実施されている。

<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/key-digital-technologies>

C-2. 電磁波の利活用について (2.2章関連)**C-2-1. 電磁波の歴史**

電磁波技術の利活用は、19世紀後半(1860年代～1880年代)にマクスウェルが電磁気学を理論化し、ヘルツが1888年に電磁波の存在を実証したことに始まる。1890年代にはマルコーニによる無線通信の実験が成功し、20世紀初頭にはラジオ放送(1920年代)やレーダー(1930年代)が登場した。戦後はテレビ放送(1950年代)や衛星通信(1960年代)、携帯電話(1980年代)が社会基盤を形成した。一方、通信以外の分野では、1940年代にマイクロ波のエネルギーで職員等を加熱する電子レンジが実用化され、1970年代以降はリモートセンシングによる地球観測や、医療分野でのMRI(1970年代)や放射線診断が普及した。近年では、非

破壊検査、環境モニタリング、IoT や自動運転支援など多様な分野で革新が進み、電磁波技術は生活と産業を支える不可欠な基盤となっている。

C-2-2. 50年後の長期的展望

IPCC の第 6 次評価報告書統合報告書では 2024 年の平均気温が工業化前に比べて観測史上初めて 1.5℃ の上昇となったことを報告している。国交省は 1976 年以降の 10 年間の平均に対し、2024 年までの 10 年間の期間の 1 時間降水量 50 ミリ以上の短時間強雨の発生頻度は 1.5 倍にも増加していると報告している¹⁵⁸⁾。このため我が国の関連省庁の災害対策ではこれまでの 2℃ の温度上昇だけでなく、4℃ の温度上昇シナリオについても想定した計画が策定されている^{159) 160)}。このような社会環境においても電磁波の優れた特性から災害予測から災害規模緩和・軽減や災害復興までの様々な取組に更に利活用されていくと考えられるため、関連研究開発の更なる推進に向けた長期的取り組みが望まれる。付録図 C-2-1 に災害時における電磁波技術の例を示す。

災害時以外においても将来の電磁波技術の利用は地上の生活空間から宇宙空間まで及ぶことが想定される。付録図 C-2-2 において、電磁波技術は非地上通信ネットワーク (NTN) から月、太陽、火星までに及ぶ広大な宇宙空間で活用されることが示されている。付録図 C-2-3 において、電磁波技術は未来社会における気象・災害の観測・予測や高度に発展したネットワークや自動化技術等を支える基盤技術としての役割を引き続き担うことが示されている。



災害発生予測情報を正確かつ効果的に国民や関連組織に伝えるためのアプリや手順開発等の取組。



リモートセンシング技術による地球温暖化や豪雨観測・予測技術の向上や地表センシング技術による被害把握。



電磁波センシング技術によるインフラ老朽化診断技術



復興時のドローンやロボットの運用に必要な衛星測位への宇宙天気影響予測・時空間同期技術やEMC対策技術。

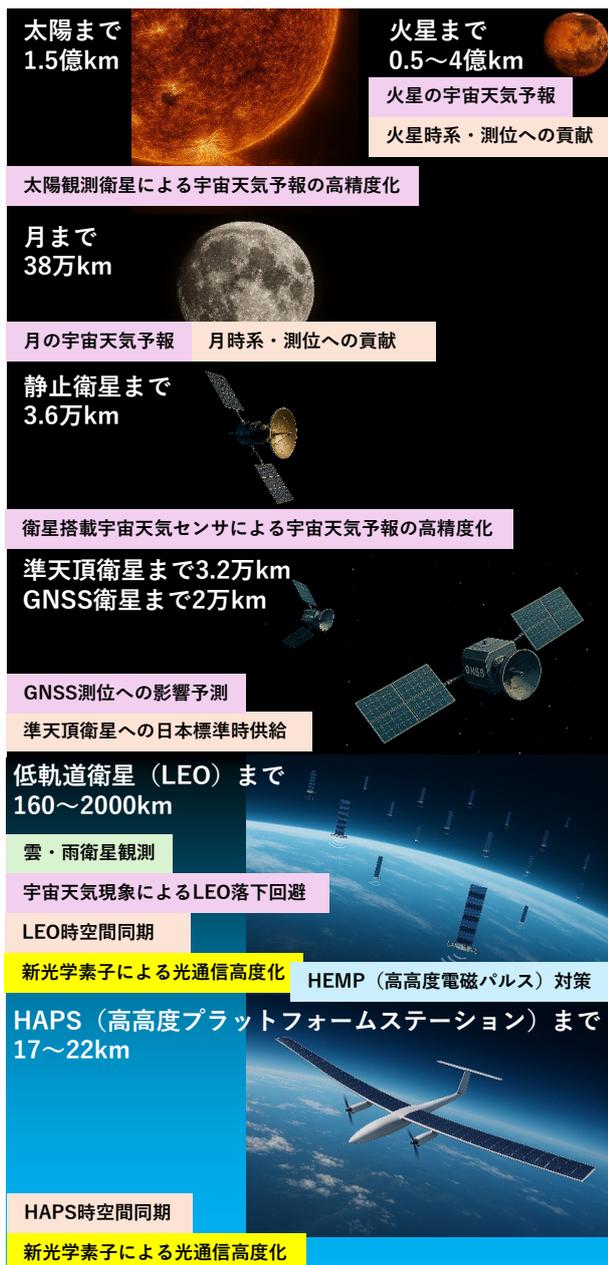


宇宙天気予報の高精度化・予測期間の拡大によるケスラーシンドロームのような宇宙天気激甚災害の抑止。



GNSSが使えない状況でも測位や時刻同期が可能なロバストな時空間同期環境。

付録図 C-2-1 将来の激甚化する災害に対する予測・把握・避難・軽減・復興等における電磁波技術の利用例。説明文の背景色は図 2.2-1 (a) の各技術 (リモートセンシング技術・宇宙環境技術・電磁環境技術・時空標準技術・デジタル光学基盤技術) の色に対応している。



付録図 C-2-2 将来の宇宙空間における電磁波技術の利用予想図。説明文の背景色は図 2.2-1 (a) の各技術 (リモートセンシング技術・宇宙環境技術・電磁環境技術・時空標準技術・デジタル光学基盤技術) の色に対応している。



付録図 C-2-3 将来の生活環境における電磁波技術の利用予想図。説明文の背景色は図 2.2-1 (a) の各技術 (リモートセンシング技術・宇宙環境技術・電磁環境技術・時空標準技術・デジタル光学基盤技術) の色に対応している。

C-3. ICT デバイス技術について (2.4 章関連)

C-3-1. 国内外の研究開発事例

例えば国外では、米国 Intel 社が 22nm FinFET を利用した PLL ならびに ADC を統合した 150GHz 帯無線受信機チップを開発し、128Gb/s の通信速度の性能を実証している。また国内でも東工大・NTT のグループが、65nm Bulk CMOS プロセスを利用した 300GHz 帯の無線送受信機チップを開発し、実装基板を半波長の間隔で配列するパッケージング技術によりフェーズドアレー無線機の開発も報告している。NICT においてもプロジェクトを進める共同研究機関と共に、RF フロントエンド回路、アンテナ、ベースバンド回路、およびパッケージング技術の開発を進め、300GHz 帯無線通信でのビームステアリング技術を実証した。現在、ビームフォーミング技術の高機能化や、多素子モジュールによる空間多重伝送技術に向けた研究開発を進めている。高出力 GaN デバイスについては、p-NiOx や強誘電膜といった Ga₂O₃ とは全く異なる材料を、Ga₂O₃ デバイスに組み込み、デバイス特性改善につなげる試みが多く出るようになった。中でも p-NiOx は、Ga₂O₃ デバイス構造の基本構成パーツと言っても良いほど、多くのデバイスに採用され、優れたデバイス特性のデモがなされている。縦型トランジスタ開発に関しては、この 2年で開発を行う機関がこれまでより増加し、現在米国、ドイツ、イギリス、フランス、中国、日本の 6カ国で開発が進められている。FinFET、トレンチ FET といったエッチング側壁上にゲート電極を形成するデバイス構造に加え、量産に適した縦型プレーナ FET 構造の開発も再燃している。例えば、窒素イオン注入ドーピングした Ga₂O₃ 層をチャネルとする、インバージョンタイプの縦型 MOSFET の 4 インチ Ga₂O₃ ウェハ上への試作がノベルクリスタルテクノロジーから報告され、耐圧 1.3 kV、オン電流 1.3 A、ターンオン/ターンオフスイッチング回復時間 38, 78 ns という優れたデバイス特性のデモンストレーションがなされた。

C-3-2. 空間光変調器 (OPA) の研究開発動向

空間光変調器の各方式について、Liquid Crystal on Silicon (LCOS) 方式が光走査速度が 10kHz 程度までの比較的低速の用途に対して、実用化が進んでいる。Si-OPA は使用波長 1.55 μ m で、高偏向角の光ビーム制御や LiDAR の動作実証が報告されている。Si-OPA の光ビーム走査速度は 100kHz 前後にとどまり、消費電力も 1 チャンネル当たり 5mW 以上と大きい。

これに対して、EOP-OPA は使用波長 1.55 μ m で、光ビーム走査速度 2MHz、消費電力 0.38mW と、より高性能な動作実証が報告されている。さらに、1.55 μ m 光の 2D ベクトル走査による文字描画や可視光 (640nm) での低駆動電圧変調も実証されており、3D 映像再生の実現に近づいている。各方式の動作機構、走査速度、消費電力、使用波長を比較した表を下記に示す。

種類	動作機構	光走査速度	電力	使用波長 1.55 μ m/ 可視光
LCOS	配向変化	~ 10 kHz	小	○ / ○
Si-OPA	熱光学効果	~ 100 kHz	大	○ / ×
EOP-OPA	EO 効果	~ 2 MHz	小	○ / ○

C-3-3. トランジスタやダイオードの研究開発動向

パワーデバイスとして有用な縦型構造に関しては、特にショットキーバリアダイオードのデバイス性能に著実な進展が見られる。しかしながら、その総合的なデバイス特性 [パワー性能指数: (耐圧 \times 耐圧) / オン抵抗] は飽和傾向にあり、SiC, GaN の理論限界には届いていない。横型トランジスタも次々と報告されており、耐圧に代表されるデバイス特性において改善が見られる。また、準安定構造に相当する α -Ga₂O₃ の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。 α -Ga₂O₃ は、主にサファイア基板上的ヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中では最も研究が進んでいる。(株) FLOSFIA では、 α -Ga₂O₃ を用いたショットキーバリアダイオード、トランジスタ開発が進められている。また、 α -Ga₂O₃ SBD を用いた DC/DC 降圧コンバーターの販売を開始している。

C-4. 量子 ICT について (2.6 章関連)

C-4-1. 量子計算精度を高める研究開発

量子二準位系に限らず、第 3 準位以上の量子準位を使い、ヒルベルト空間を拡張して量子計算の自由度を高めることで実行的精度を向上させる研究などがある。

C-4-2. 衛星を使った量子暗号技術について

技術要件として重要な 1) 昼間でも通信可能であること、2) 曇りでも通信可能であること、3) 衛星にセキュリティを求めないこと、については、一般に量子でない衛星光通信でも困難である。ただし、解決の方策として以下のようなことが考えられる。

1)、2) については、衛星間量子通信を利用した複数経路を選択する鍵配送を行うことで解決可能である。あるいは条件の良いときだけ鍵共有を行い蓄積した鍵を用いて通信を行うといった運用面も含めた検討も重要となる。

3) については、衛星のセキュリティは衛星通信全般で課題となるが、量子鍵配送については高効率の量子もつれ光源が作れば解決可能である。また、衛星を制御する古典通信を認証付きの通信を使うなどの方法で、衛星を乗っ取られないようにすることも重要である。

C-5. ユニバーサルコミュニケーションについて (2.7 章関連)

C-5-1. 大規模言語モデルの補足

Transformer を踏襲した LLM には大別して識別系と生成

系とがある。識別系としてはBERT²⁶⁸⁾(文書分類や質問応答等に適している)が有名であり、生成系としてはGPTシリーズ、PaLM²⁶⁷⁾、LaMDA²⁶⁹⁾等がある。

C-5-2. GPT-3 についての補足

GPT-3が発表された当初は、個別のタスク向けの学習データを用いたファインチューニングなし、つまりzero/few shotと呼ばれる方法で様々なタスクで高い精度を出せることに注目が集まったが、ChatGPTでは、GPT-3.5とよばれるモデルをファインチューニングし、その上で強化学習等を実施することでシステムを実現している。

C-5-3. 対話 AI の補足

ChatGPTの他にもMetaがBlenderBot 3(米国内でのみ利用可能;2022年8月公開;²⁷⁰⁾やGalactica(科学記事や解説文を生成できるとして2022年11月15日に公開するも、差別表現や不正確な科学的知識を生成するなどして非難を浴び、わずか3日で公開停止²⁷¹⁾を公開した。Googleも関連する技術として2021年にLaMDA²⁶⁹⁾(Language Model for Dialogue Applications)を発表しており、それを用いた対話AI Bard²⁷²⁾をサービスとして投入した。Bardはその後、LaMDAのもととなったLLMのPaLMの後継であるPaLM2を用いるように変更され、日本語をはじめとする多言語対応を果たして公開された。また、テスラ、スペースX等の起業で有名なイーロン・マスク氏もChatGPTと同様の対話AIの開発を模索し始めたことが報道されている²⁷³⁾。

C-5-4. 対話 AI に関する課題

ChatGPTは、一定の水準を満たしたことで公開後2ヶ月で1億アクティブユーザに達するなど世の中に受け入れられたものと思われる。一方で、この「一定の水準」は、対話AIの運用主体の性格や、公開の趣旨の説明等のプレゼンテーションにも大きく依存している模様で、たとえば、情報の正確さが重んじられる検索エンジンを主要ビジネスとするGoogleに関しては、前述のBardの公開予定のアナウンス時にある質問に対するBardの回答が不正確であったことから、Googleの株価が9%下落するといった騒ぎも起きている²⁷⁴⁾。

対話AIが発達してきたことによって、対話アプリの開発者等が考慮すべき課題が新たに持ち上がっている。たとえば、音声対話システムを開発する場合に音声認識と音声合成を同一プロバイダーのAPIを使用してシステムを構成する場合には、システムへの入力と出力をそのプロバイダーに抑えられることになり、対話システムの入出力データをAPIのプロバイダーが大量に収集することが可能になる。このプロバイダーが対話AIを用いることで、収集したデータを学習データとして容易に類似サービスを構築できる。同様に他の対話システムの入出力からもサービスを構築することが可能で、これらの対話サービスを組み合わせたより高度なサービスも構成可能である。そのため、自らが構築した対話アプ

リが知らないうちにより高度な対話サービスの中で模倣され、サービス提供されるようになりリスクがある点を指摘する。

C-5-5. NICT における LLM の開発

NICTでは、既に述べた生成系のLLMの問題もあり、実用的な観点から識別系のLLMの構築やその応用に関する研究開発に取り組み、独自のWebテキスト350GBで学習した日本語BERTや、その50倍の規模の大規模BERT等のモデル構築、それを用いたアプリケーションの研究開発を行っている。また、LLMの効率的な開発を支援するため、ニューラルネットのアーキテクチャを問わず並列学習を容易にする自動並列化深層学習ミドルウェアRaNNCを開発し、オープンソースとして公開している。

C-5-6. 実世界のモデリング・画像生成技術

実世界の3D構造・表面特性等をモデル化し、リアルな画像を新規に生成する深層学習技術は近年急速に進展してきており、実世界とデジタル世界の融合を図る空間コンピューティングのコア技術として、遠隔コミュニケーション(空間を共有した対話や共同作業)、ロボットを用いた遠隔作業、シミュレーション、遠隔医療・介護、体験教育・訓練など、幅広い分野においてその活用が期待されている。

実世界モデリングの対象としては、人物と環境(室内・屋外の人工物/自然物)に分類できるが、その情報取得には、モーションキャプチャ・LiDAR等の3Dセンサ情報やカメラ画像(静止画・動画)が利用される。従来は、高価なセンサや多数のカメラ等の大規模装置が使われ、機材のセッティングやデータ処理に膨大な作業が必要であったが、機械学習を用いることで大幅なコスト削減、処理時間の短縮、再構築精度の向上等が可能になってきている。

再構築される実環境の3D情報としては、点群データ、表面メッシュ、体積モデル等、多様な表現が用いられるが、実空間のリアリティを人に感じさせるためには、これら3D情報に基づく画像生成(照明条件等に応じた画像レンダリング)が不可欠となる。一方、3D情報を明示的に再構築せずに数枚の画像から高品質の新規画像を生成するGANの技術開発やその応用も多方面で進められている。

実在人物のモデリング技術に関しては、多数のセンサやカメラを配置した大規模装置を用いずに、カメラ1台の画像だけから深層学習により3Dアバターを構築する技術の開発が進んできている。2022年に発表されたNICTのREXR技術(付録図C-5-1)は、Webカメラ1台の画像から3Dアバター(表面メッシュ形状、表面テクスチャ、身体内部の関節位置・角度等のパラメータ)を構築し、刻々と変化する顔の微細な表情や細やかな身体動作を任意の視点からリアルタイムで生成することに成功した²⁷⁵⁾。



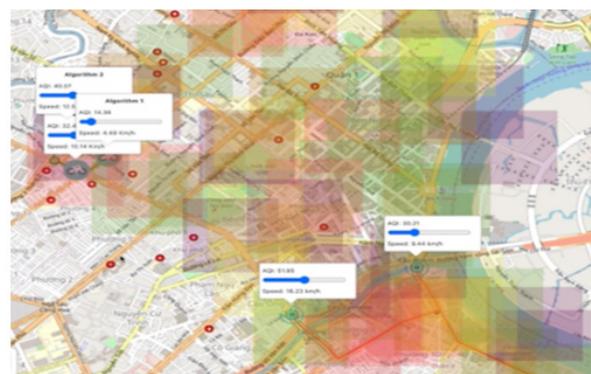
付録図 C-5-1 REXR による表情豊かな 3D アバター構築

実環境のモデリングに関しても、少数の画像から高品質な新規画像を生成する技術の開発が進められている。例えば、NeRF は（学習時に 3D 物体の情報を与えずに）複数の視点から撮影した画像のみから任意の視点の画像を高品質で生成する深層学習技術で、2020 年 3 月 arXiv に発表されるとその生成画像のクオリティの高さから大きな注目を集めた²⁷⁶⁾。事実、本論文は国際会議 ECCV 2020 で Best paper honorable mention を獲得し、その後 2 年足らずの間に 1500 件以上の論文に引用された。NeRF の最大の特徴は、3D シーンを表面メッシュではなく体積密度（物体の不透明度を表す連続体）として表現する点にある。一方、NeRF の課題としては、対象が静的シーンに限定されることや学習・レンダリングにかかる多大な計算コスト等が挙げられるが、現在これらの課題を克服するための様々な工夫・改良が試みられている。

本技術に関する今後の一般的な課題として、1) モデル化・画像生成の精度 / 頑健性の向上、2) 学習・パラメータ推定・レンダリングの高速化 / リアルタイム化、が挙げられるが、これらはトレードオフの関係にあるため、目的・用途に応じた個別の技術開発が必要になるであろう。そのためには、ユーザのヒューマンファクターを明らかにしながら個々の利用形態に求められる技術要件を明確にしていくことが重要となる。さらに、本技術の悪用を避けて安心・安全な活用を行うために、本技術が生成する実世界のモデルや画像に対して信頼性の高い管理・認証の仕組み作りも並行して行っていく必要がある。

C-5-7. 都市デジタルツインについて

デジタルツインは、物理オブジェクトの仮想的なモデルであり、IoT データを通じ物理的な状態の変化を把握し、分析、予測、最適化することができる。近年、デジタルツインを活用して都市のデータを収集、監視、管理し、都市計画や環境管理、交通制御、エネルギー使用管理などを促進することで、スマートで持続可能な都市を目指す取り組みが進められている²⁷⁷⁾。幾つかの都市でデジタルツインの導入が始まっており、都市計画のシミュレーションによる最適化や意思決定支援（シンガポール）、インフラや交通の改善、緊急時の移動支援（オランダ ロッテルダム）などに活用されている。



付録図 C-5-2 大気汚染リスクを避けたルート案内の例

都市デジタルツインの要素技術は、都市の資産・インフラ管理の基礎となる測量・地図作成技術や建築情報モデリング（BIM）技術、動的なデータを収集・フィードバックするための IoT・5G 技術、状況の把握や予測分析のための AI 技術、計画立案や早期警戒を支援するシミュレーション技術などである²⁷⁸⁾。従来のデジタルツインと比べ、都市デジタルツインでは、多様なセンサや情報源からの異なる種類、分野、時間・空間のデータを統合し、隠れたパターンや未知の相関関係などを発見することで、物理オブジェクトの将来の状態や重要な変化を予測し、シミュレーションによる解決策の検証や自己最適化を行う。そのための基盤の研究開発も進められており²⁷⁹⁾、例えば、リアルタイムに更新される交通データと機械学習を使って、交通事故を効果的に予測・回避したり、緊急・災害時の環境データや人々の行動データを追跡・監視しながら潜在的なリスクを予測し、防災・減災行動を支援したりする（付録図 C-5-2）。さらに、多様なデータやモデルの相互運用性を向上させるべく、国際標準化の検討も進められている²⁸⁰⁾。

新しいトレンドとして、エッジコンピューティングと AI を統合し、物理オブジェクトが高性能・低遅延・高セキュリティな認識や予測を行うことが挙げられる²⁸¹⁾。例えば、インテリジェント交通システムにおいて、流動人口や交通流、気象、大気質などのデータをスマートカー等で収集し、その場で交通リスクをリアルタイムに学習・予測し結果を共有する（付録図 C-2）。エッジ環境では計算資源や電力供給が非常に限られているため、データ量の削減や、機械学習モデルの軽量化、クラウドと連携した分散機械学習やプライバシー保護のための連合学習などの技術が必要とされる。

メタバースは、ネットワークを通じてアクセスできる仮想的なデジタル空間であり、AR や VR を駆使した没入感の高いコミュニケーションが可能である。近年、実在する都市をベースとしたメタバース化が進展する一方で、自治体の既存データを活用したデジタルツイン構築も進められている²⁸²⁾。今後、都市デジタルツインとメタバースの融合が進み、都市

のシミュレーションや可視化に加え、仮想モデルと物理オブジェクトの相互作用やインタラクティブなコミュニケーションを通じ、バーチャルとリアルの垣根を越えた協調作業や行動変容による課題解決が期待される。

C-6. バイオ ICT と脳情報通信について (2.8章関連)

C-6-1. AI と脳・神経科学の共進化

AI と脳・神経科学の関係は、一方向的な「模倣」とどまらず、相互に研究手法や概念を交換しながら発展してきた。深層学習の進展は、脳神経活動に関する高次元データの解析を可能にし、神経活動の時空間パターンや表現構造の抽出を加速させている。一方で、神経科学から得られる知見は、学習・適応・表現といった情報処理原理として AI 研究に取り込まれてきた。このような双方向的関係は、AI と脳・神経科学の「共進化」として整理されている。

AI は、神経科学が直面する複雑な課題に取り組むための基盤技術となりつつある。約 860 億個のニューロンが数兆のシナプス結合を形成するヒト脳は、極めて動的かつ非線形なシステムである。その機能理解には、多様な計測・操作技術を組み合わせた大規模データの取得と解析が不可欠である。例えば、特定の神経細胞を高い時間精度で操作可能とするオプトジェネティクス²⁸³⁾や、カルシウム感受性蛍光タンパク質プローブ (GCaMP) を用いた神経活動イメージング²⁸⁴⁾、電気生理計測、行動解析などにより、膨大な画像・動画・時系列データが生成されている。

これらの多様で高次元なデータに内在する構造を解析する手段として、機械学習や深層ニューラルネットワークが広く導入されている。AI は、脳画像データや電気生理データの解析、神経疾患に関連する特徴抽出、ブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) の信号解読技術²⁸⁵⁾などに活用され、神経科学研究における不可欠な解析基盤として統合されつつある。さらに、計算モデルを用いたシミュレーションは、脳機能や認知過程に関する仮説を検証するための手段を提供している。

近年では、AI モデルそのものを研究対象とし、その内部計算構造を解析することで脳理解に新たな視点を与えようとする研究も進展している。Richards ら²⁸⁶⁾が示したように、深層学習モデルは目的関数、学習規則、アーキテクチャといった内部構成要素を持つ最適化システムとして捉えることができ、これらを分析対象とすることは神経科学における理論形成に有益である。この観点に立ち、ニューラルネットワーク内部の表現や計算過程を分解・同定しようとする研究潮流は、近年 Mechanistic Interpretability とも呼ばれている。このようなアプローチは、AI の解釈性向上を目的とするだけでなく、人工ニューラルネットワークと生物脳に共通する学習・情報表現原理を探る試みとしても位置づけられる。

C-6-2. 脳融合 AI ・ニューロモルフィック計算

脳融合 AI は、脳の構造や機能を忠実に再現することを目

的とするものではなく、脳に見られる高いエネルギー効率、適応性、分散的な情報処理といった特性を工学的に抽象化し、情報処理技術へ応用する研究領域である。ニューロモルフィック計算は、その中でも特に、計算基盤およびデバイスレベルでこれらの特性を実装しようとするアプローチであり、従来の CPU や GPU とは異なる「第三の計算アーキテクチャ」として位置づけられる。

これまでニューロモルフィック計算が広範な実用化に至らなかった最大の要因は、汎用的なプログラミングモデルの不在にあった。初期のスパイキングニューラルネットワーク (SNN) は、手設計ネットワークや局所学習則に依存する場合が多く、特定用途には有効であっても、任意のタスクを柔軟に実装できる手段が限られていた。そのため、研究用途を超えた大規模展開や商業利用には高い技術的障壁が存在していた。

近年、この状況に大きな転換をもたらしたのが、深層学習で確立された勾配ベース最適化手法を SNN に適用する枠組みである。代理勾配法や時間方向の誤差逆伝播といった理論的進展により、スパイキングニューラルネットワークを、データと損失関数に基づいて学習させることが可能となった。これにより、従来の深層学習とほぼ同一のアプリケーション開発フローを用いて、ニューロモルフィック・ハードウェア向けのモデルを構築・展開できるようになり、「どのようにプログラムするか」という長年の課題が事実上解消されつつある。

このプログラミングモデルの確立と並行して、ハードウェア設計においても重要な変化が生じている。初期に主流であったアナログあるいは混載信号型のニューロモルフィック回路は、極めて高い省電力性を持つ一方で、デバイスばらつきや量産性の面で課題を抱えていた。近年では、デジタル CMOS 技術を基盤としたスパイキングプロセッサや、推論専用設計された簡素なニューロモルフィックデバイスが登場し、信頼性・再現性・量産性を確保しながら、依然として高い電力効率を実現できる設計が現実的になっている。

こうしたソフトウェアとハードウェアの収斂により、ニューロモルフィック計算の商業化は、特定の用途領域から段階的に進展するロードマップが明確になりつつある。特に、超低消費電力かつリアルタイム処理が求められる エッジ AI、IoT デバイス、ウェアラブル機器、センサー近傍処理といった分野は、ニューロモルフィック計算が従来型プロセッサに対して明確な優位性を発揮し得る市場として位置づけられている。これらの分野では、クラウド依存を低減し、常時動作可能な知覚・判断機能を実装することが重要であり、イベント駆動型で省電力なニューロモルフィック技術との親和性が高い。

以上のように、ニューロモルフィック計算は、かつての「生物模倣的であるが扱いにくい特殊計算機」という段階を脱し、深層学習に基づく汎用的なプログラミングモデルと、商用展開を意識したハードウェア設計の両立により、実用・商業フェーズへ移行しつつある技術として整理できる。本節

の議論は、ニューロモルフィック計算の商業化ロードマップを整理した Muir and Sheik (2025)²⁸⁷⁾ を中核とし、関連する基盤的総説およびスパイクニューラルネットワークの学習理論に関する一次文献に基づいている。

C-6-3. 全脳モデル・大規模脳シミュレーション

全脳モデル (Whole Brain Emulation: WBE) および大規模脳シミュレーションに関する研究は、脳全体を短期的に完全再現することを目指すものではない。むしろ、研究目的に応じた適切な粒度でモデル化を行い、計測データとの比較を通じて妥当性検証と改良を反復する研究方法論の確立が重視されている。近年は、計算資源の飛躍的向上と AI 技術の導入により、多階層モデルの探索やパラメータ推定が現実的な研究対象となりつつある。

国内では、理化学研究所 計算科学研究センター (R-CCS) を中心に、スーパーコンピュータ「富岳」を用いた大規模脳シミュレーション研究が進められている^{294), 295)}。特に、大脳皮質・大脳基底核・小脳・視床など複数領域を統合した哺乳類脳モデルの構築が試みられ、安静時神経活動の再現など、全脳動作に関わる基礎的要素が示されている。富岳向けに最適化された計算フレームワークの開発により、大規模シミュレーションの実行効率向上が報告されており、全脳規模モデルを段階的に構築・検証するアプローチの実現性が示唆されている。

小規模脳を対象とした研究としては、昆虫脳、特にショウジョウバエを対象とした全脳レベルのモデル化とシミュレーションが進展している^{296), 297)}。Fruit Fly Brain Observatory や FlyBrainLab などの統合基盤により、解剖学的データに基づく実行可能な神経回路モデルの構築と解析が可能となっている。近年、成虫ショウジョウバエの全脳配線図 (約 14 万ニューロン、数千万シナプス) が一般公開され、モデル化やシミュレーションの再現性向上に大きく寄与している。これらの成果は、より大規模な脳モデルへのスケールアップに向けた検証環境として位置づけられている。

欧州では、Human Brain Project (HBP) の成果を継承する形で、データ・モデル・計算資源を統合する研究基盤 EBRAINS が整備・常設化されている²⁹⁸⁾。EBRAINS は、多階層脳アトラス、神経回路モデル、シミュレーション環境、ニューロモルフィック計算資源などを統合的に提供し、全脳規模のモデル化や再現性の高い研究を支えるオープンな研究インフラとして機能している。

また、スイスの EPFL を中心とする Blue Brain Project では、皮質微小回路の高忠実度モデル化を出発点として、段階的により大規模な脳モデルへ拡張する戦略が採られてきた。近年も、神経形態の合成、モデル自動生成、計算効率化といった基盤技術の高度化が継続されており、全脳規模モデルに向けた長期的ロードマップの一環として位置づけられている。

これらの取り組みは、Sandberg と Bostrom²⁹³⁾ によって提示された WBE のロードマップにおける、「計測・解釈・

モデル化・並列計算を段階的に統合し、小規模モデルからスケールアップする」という基本的思想と整合的である。現在の国内外の全脳モデル研究は、このロードマップを現実的な研究戦略として実装しつつある段階にあると整理できる。

C-6-4. BMI/BCI と脳情報通信

BMI/BCI は、脳活動を計測・解読し外部システムと接続する技術であるが、実際には脳の局所的な信号取得に基づく。そのため、全脳スケールの状態や文脈との関係を考慮した設計が重要となる。近年は、非侵襲計測技術の高度化や、脳基盤モデルの活用により、侵襲性を抑えつつ応用領域を拡張する試みが進展している。

従来、BMI/BCI は主として運動・言語機能の補綴や機能回復を目的として発展してきたが、近年では治療・介入と健常者の能力拡張 (エンハンスメント) との境界領域にも研究の射程が広がっている。その代表例が、脳活動を個人にフィードバックすることで神経可塑性を誘導するニューロフィードバック (Neurofeedback) である。ニューロフィードバックは、脳活動のリアルタイム計測と自己調節学習に基づき、ADHD、てんかん、うつ病、PTSD などの臨床応用に加え、注意制御、情動調節、ピークパフォーマンス向上といった健常者を対象とした応用にも展開されている。近年は AI を用いた脳波解析の高度化により、個人差を考慮した訓練プロトコルの最適化や、在宅・遠隔型の介入が現実的な選択肢となりつつある。

さらに、BMI/BCI の応用は個人内の脳制御にとどまらず、対人間相互作用の理解と支援へと拡張している。ハイパースキニング技術を用いた研究により、会話や共同作業、共感的相互作用の際に生じる対人間神経同期 (Interbrain Synchrony: IBS) が可視化され、コミュニケーションの質や理解度、共感の成立と密接に関連することが示されている。こうした知見は、BMI/BCI を単なる情報入出力装置ではなく、人と人との関係性や社会的相互作用を媒介・調整する技術基盤として再定義する可能性を示唆している。

言語・運動機能の補綴においても、AI による高精度デコード技術の導入により、脳信号からのテキスト生成や意思伝達支援、運動意図の解読精度が大きく向上している。一方で、これらの技術が治療目的を超えて利用される場合、個人の認知的自由やプライバシー、社会的公正性といった倫理的課題への配慮が不可欠である。BMI/BCI は、機能回復技術から人間拡張技術へと連続的に展開する可能性を持つが、その社会実装には技術的成熟と同時に、慎重な制度設計と合意形成が求められる。

C-6-5. 生命科学デジタルツイン

医療および生命科学分野におけるデジタルツインは、現実世界の生体や生体システムを模倣し、センサー、画像、臨床データなどを用いて継続的に更新される調整可能な計算機モデルとして発展しつつある^{307), 308)}。従来の固定パラメータに基づく計算モデルと異なり、デジタルツインは個々の対象

から得られる実測データを反映して時間とともに進化し、個体差を考慮した予測や意思決定支援を可能にする点に特徴がある。

・臨床診断・治療の個別化への応用

医療分野における代表的な実装例として、1型糖尿病患者を対象とした人工膵臓システムが挙げられる。2016年に米国食品医薬品局（FDA）が承認した本システムでは、ウェアラブル血糖センサーから取得したデータを数学モデルに入力し、体内の糖代謝をシミュレーションすることで、必要なインスリン量を約5分ごとに再計算し自動投与を行う。モデルは患者の状態変化に応じて継続的に再調整され、患者とともに進化するデジタルツインとして機能している。

心疾患領域では、不整脈治療における応用が進んでいる³⁰⁹⁾⁻³¹²⁾。心房細動や心室頻拍といった疾患に対して、患者ごとの心臓構造を画像診断データから三次元的に再構成し、電気信号の伝播をシミュレーションするデジタルツインが構築されている。これにより、手術前に最適なアブレーション（心筋焼灼）部位を予測することが可能となり、侵襲的な電気生理マッピングの補助や代替手段としての有効性が示されている。実際に、心筋瘢痕に起因する心室頻拍を対象とした研究では、デジタルツインにより臨床的に重要な異常部位の約80%が事前に予測されたと報告されている。また、Qianら³¹²⁾は英国バイオバンクの膨大なデータを活用し、機械学習を用いて個人の心臓を忠実に再現した「心臓デジタルツイン（CDT）」を大規模に構築する革新的な手法を提案している。

さらに、免疫応答のような高度に複雑な生命現象に対しても、デジタルツインの適用が試みられている。肺炎感染時の免疫応答を対象とした研究では、免疫細胞の移動や相互作用を数理的に表現し、患者ごとのデータを入力としてモデルを更新する枠組みが提案されている。この過程は、気象学におけるハリケーン進路予測と類似した数理手法を用いる点に特徴があり、治療判断支援への応用が期待されている³¹³⁾。

・創薬および基礎研究への応用

デジタルツインは、創薬や基礎生命科学研究においても重要な役割を果たしつつある。患者由来iPS細胞から作製したオルガノイドや、臓器の機能を微小流路上で再現する臓器チップ（Organ-on-a-chip）と組み合わせることで、ヒト特有の生理・病態を反映した実験データを取得し、それをデジタルツインの基盤情報として活用する試みが進んでいる。これらは、動物実験に依存しない新たな安全性評価手法（NAMs）の一環として位置づけられ、創薬プロセスの効率化と精度向上に寄与すると考えられている。

・AIを活用した大規模 in silico 試験

近年は、AIを用いて多数の仮想患者を生成し、デジタルツイン上で大規模な in silico 試験を実施する研究も進展している。例えば、合成データに基づく仮想心臓モデルを用い

て、抗不整脈薬の効果を実患者への投与前に評価することが可能となっている。また、AIが臨床データと転帰の関係性を自動的に学習し、専門家が個別に数理モデルを構築することなく、デジタルツインを生成・更新する手法も提案されている。

C-6-6. ナノ・分子 ICT デバイスについて

近年、分子 ICT デバイスは、ナノ材料、フレキシブルエレクトロニクス、量子計測技術と融合することで、従来の電子デバイスでは取得が困難であった生体内部の情報を高感度かつ低侵襲に取得する基盤を形成しつつある。以下、技術成熟度と役割の違いに着目し、生体情報処理と分子 ICT デバイスを三つの層に分けて整理する。

・生体親和デバイス：社会実装に近いセンシング基盤

生体統合型フレキシブルエレクトロニクスは、皮膚や臓器の動きに追従可能な柔軟性を持つセンサーデバイスであり、心拍、筋電、神経活動などの生体信号を連続的に計測できる。近年は、生分解性材料を用いた一時使用型デバイスや、ワイヤレス通信と組み合わせた遠隔モニタリング技術も研究開発が進んでいる。これらの技術は、医療・ヘルスケア分野における常時モニタリングや早期介入を支える基盤技術として、比較的社會実装に近い位置にある^{314)~316)}。また、生体親和性材料や柔軟デバイス技術は、侵襲型 BMI/BCI における生体適合性や長期安定性の課題に対する有望な技術基盤としても注目されている。

・分子情報デバイス：基礎研究段階の新しい情報原理

DNA、タンパク質、細胞そのものを情報の記録・伝達・処理媒体として利用する分子情報デバイスは、依然として基礎研究段階にあるが、従来の電子デバイスとは異なる原理に基づく情報処理の可能性を有する。特に匂い・味といった曖昧性を含む化学的・生物学的情報を分子レベルで直接センシングする研究は、ICTがこれまで扱にくかった情報領域を拡張する試みとして注目されている。これらは短期的な実装よりも、生命情報処理の新たな概念を探索する研究基盤として位置づけることが適切である。

・量子センサー：生体内部の物理環境を高感度に計測する技術として、2.6章でも述べた超小型ダイヤモンド量子センサーが近年注目されている。分子・細胞スケールで温度や磁場の変化を検出可能なこれらのセンサーは、細胞内オルガネラ近傍の状態を直接計測する手段を提供する³¹⁷⁾。得られる実測データは、生命現象を計算機上で再構成するデジタルツインの検証・更新に不可欠であり、計算モデルと実測を結びつける接続点として機能する。また、オルガノイドやオルガン・オン・チップといった生体実装型ツインに組み込むことで、組織内部の状態を非侵襲かつ多点的に観測する可能性も開かれる。

C-6-7. 生体実装型ツイン：オルガノイドおよびオルガン・オン・チップについて

デジタルツインが計算機上に構築されたモデルによって生命現象や器官機能を表現するのに対し、生体実装型ツインは、実際の細胞や組織を用いて器官機能を物理的に再構築することで、計算モデルでは捉えきれない多細胞相互作用や微小環境を再現する実体側の対応物（フィジカル・ツイン）として位置づけられる。

その具体例の一つであるオルガノイド（幹細胞や組織由来細胞が自己組織化することで形成される小型の三次元組織）は、実際の臓器が持つ主要な構造的・機能的特徴を部分的に再現するものである。異なる種類のオルガノイドを空間的に配置し相互作用させる（「組織性」をもたせる）ことで、組織どうしが影響を及ぼし合う仕組みや、実際の体内に近い相互作用を調べることができる。一方、オルガン・オン・チップは、マイクロ流体技術等を用いて物理・化学環境を制御し、再現性と操作性を高めた器官機能再構築手法である。これにより、血流や物質輸送、組織間境界といった、生体内で重要な環境条件を忠実に模擬しながら、薬剤応答や病態形成の過程を安定して評価できる。両者を統合したオルガノイド・オン・チップは、生物学的忠実性と制御性の両立を狙うアプローチとして発展している^{318) 319)}。創薬分野では、初期スクリーニングから有効性・毒性評価までの予測力向上や動物実験依存の低減が期待される。また、患者由来細胞を用いたオルガノイド・オン・チップは、個別化医療に向けた疾患モデルとしても期待されている。遺伝的背景や疾患特異的環境を反映したモデルを構築することで、治療反応の個人差を事前に評価することが可能となり、治療方針決定の高度化に資する^{320) 321)}。

C-6-8. 生体知能の実装と活用に関する研究動向

生体知能の実装と活用は、生体が持つ知的な機能そのものを情報処理系に接続し、新しい計算基盤として利用しようとする萌芽の技術領域である。生体が示す高い適応性、学習能力、環境応答性を、従来とは異なる省エネルギーかつ柔軟な情報処理原理として利用できる可能性がある。なお、本節でいう生体知能とは、生体が有する学習・適応・行動制御といった機能が、外界からの入力にตอบสนองして情報を表象・変換し、出力を生む動的な情報処理機能を指す。

2.9章で述べているオルガノイド／オルガン・オン・チップは、主として「器官機能や病態の再現性を高める実験モデ

ル」として、生理機能の再現や創薬・安全性評価等への応用を志向する。一方で近年は、生体組織を「モデル」として用いる段階から一歩進み、生体知能そのものを計測・刺激・情報処理系と閉ループに接続し、ICTに活用しようとする研究も進展している。代表例がオルガノイド・インテリジェンス（Organoid Intelligence: OI）と、昆虫に由来する知能機能の活用である。OIは、脳オルガノイドの活動を計測したり刺激を与えたりすることで、学習や適応がどのように生じるかを調べる研究である。脳が情報をどのように表し、処理し、経験に応じて変化するかを、実験可能な形で理解しようとする点に特徴がある。得られた知見は脳融合 AI やニューロモルフィック計算など、脳の仕組みを参考にした情報処理技術の設計にもつながる可能性がある。高解像度計測や長期培養技術は進展しているものの、再現性やスケラビリティには制約が大きく、当面は基礎研究のための実験基盤として位置づけるのが適切である（疾患理解や創薬への波及可能性はあるが、主目的は知能原理の解明にある）³²¹⁾。

他方、昆虫神経系の活用は、嗅覚などの高効率な感覚処理や行動制御を、センサー・ロボティクス・情報処理系に取り込む試みとして位置づけられ、生体知能を ICT に接続・活用するもう一つの方向性を形成している。昆虫に由来する生体知能の活用は、昆虫個体を直接制御する「サイボーグ」的手法に限定されるものではなく、昆虫が持つ小型性・高効率な感覚運動統合や環境適応能力を、実体利用または機構抽出の形で ICT に取り込む試みとして展開されている。

昆虫は、限られた神経資源で高度な環境認識やナビゲーション行動を実現しており、特にエネルギー効率と小型性に優れる点が注目されている。これまでの研究では、昆虫の神経系に微小電極やワイヤレス刺激装置を装着し、飛行行動などを外部から制御する限定的な実証が報告されている^{322) ~ 324)}。

一方で、昆虫の嗅覚・聴覚・触覚に代表される高感度かつ省エネルギーな感覚受容・情報処理機構は、必ずしも昆虫個体の制御を伴わず、環境モニタリングや自律システム向け IoT センサーとして工学的に模倣・実装する研究も進められている。これらは、情報通信システムにおける入力系の高度化や省電力化に寄与する可能性がある³²⁵⁾。このような昆虫由来の生体知能の活用は、OIと同様に、生体が持つ知能機能を情報処理資源として捉え、ICTに接続・活用する試みとして位置づけられる。

更新履歴

2023年 7月	第 1.0 版の公開
2025年 3月	第 1.1 版の公開 ・ 1.1.1 章タイトルおよび本文を更新 ・ 1.3 章に AI 分野の動向を追記
2026年 3月	第 2.0 版の公開

謝辞

本俯瞰報告書を作成するにあたり、多大なるご協力を頂きました有識者アドバイザーの皆様、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

【執筆者】（五十音順、以下同）

石津健太郎 井上振一郎 井上 大介 今井 弘二 内元 清貴
内山 将夫 江口 智之 大岩 和弘 大竹 清敬 大友 明
岡本 拓磨 笠松 章史 梶 貴博 加藤 豪 神谷 俊之
作田 吉弘 関根 徳彦 高橋 和晃 田中 秀吉 寺井 弘高
鳥澤健太郎 中川 勝広 野村 惇哉 早坂 和弘 原 紳介
原井 洋明 東脇 正高 菱田 光洋 藤沼 広一 藤本 雅清
本田 知之 山田 俊樹 渡邊 聡一 渡邊 一世

【執筆協力者】

井戸 哲也 大井隆太郎 柏岡 秀紀 川村 誠治 木俣 豊
後藤 薫 古波津 創 小林 昇平 鈴木 隆文 津川 卓也
富田 章久 豊嶋 守生 成瀬 康 藤原 幹生 古田 健也
盛合 志保 和田 尚也

【有識者アドバイザー】

東京科学大学 岡崎 直観先生 東北大学 加藤 寧先生
広島大学 亀田 卓先生 早稲田大学 川西 哲也先生
中央大学 須藤 修先生 名古屋大学 高橋 暢宏先生
東京大学 高橋 宏知先生 東北大学 橋田 紘明先生
J N S A 松本 泰先生 早稲田大学 森田 逸郎先生
九州大学 山西 陽子先生 横浜国立大学 吉岡 克成先生
大阪大学 若宮 直紀先生

【企画・編集】

大島 浩嗣 徳田 英幸 中村 昌世 成澤 慶

【表紙デザイン】

井澤 澄子 泉 映絵 川田 直美 庄野 志保 中山 健司
柳沢光太郎



ICT 俯瞰報告書 2.0 版

2026 年 3 月発行

ISBN : 978-4-904020-50-0

国立研究開発法人情報通信研究機構

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail nict-idi-ictrep@ml.nict.go.jp

URL <https://www2.nict.go.jp/idi/#ictrepo>

掲載されている論文の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、
無断で転写、複製、転載することを禁じる。