

# ICT 俯瞰報告書

## 2023



## 目 次

報告書の構成	iii
第1章 はじめに	1
1.1. 最近の世界情勢	1
1.1.1. 新型コロナウィルス感染症と ICT	1
1.1.2. 国際情勢の変化と ICT	1
1.2. 世界各国・地域の状況	1
1.2.1. 北米の状況	1
1.2.2. 欧州の状況	3
1.2.3. アジアの状況	5
第2章 注目分野の動向	7
2.1. 分野横断的な基盤技術	7
2.1.1. 取り巻く環境	7
2.1.2. 現在の研究開発動向	7
2.1.3. 将来展望	8
2.2. 電磁波の利活用	8
2.2.1. 取り巻く環境	9
2.2.2. 現在の研究開発動向	10
2.2.3. 将来展望	13
2.3. 通信ネットワークインフラ	14
2.3.1. 取り巻く環境	14
2.3.2. 現在の研究開発動向	15
2.3.3. 将来展望	16
2.4. ICT デバイス技術	17
2.4.1. 取り巻く環境	17
2.4.2. 現在の研究開発動向	18
2.4.3. 将来展望	19
2.5. サイバーセキュリティ	20
2.5.1. 取り巻く環境	21
2.5.2. 現在の研究開発動向	22
2.5.3. 将来展望	24
2.6. 量子 ICT	25
2.6.1. 取り巻く環境	25
2.6.2. 現在の研究開発動向	26
2.6.3. 将来展望	27
2.7. ユニバーサルコミュニケーション	28
2.7.1. 取り巻く環境	29

2.7.2. 現在の研究開発動向	30
2.7.3. 将来展望	31
<b>2.8. バイオ ICT と脳情報通信</b>	33
2.8.1. 取り巻く環境	33
2.8.2. 現在の研究開発動向	34
2.8.3. 将来展望	35
 <b>第3章 おわりに</b>	37
 <b>付録 A 用語集</b>	I
 <b>付録 B 参考文献</b>	III
 <b>付録 C 補足情報</b>	VIII
<b>C-1. 欧州の状況について (1.2.2章関連)</b>	VIII
C-1-1. 欧州デジタル未来の形成について	VIII
C-1-2. 欧州のICT分野に関する地政学的動向	VIII
C-1-3. スマート・ネットワーク・サービス共同事業	VIII
C-1-4. 欧州各国における研究開発	VIII
C-1-5. 欧州内連携の事例	VIII
C-1-6. グリーンICT分野の動向	VIII
C-1-7. 半導体分野の研究開発動向	VIII
<b>C-2. ICTデバイス技術について (2.4章関連)</b>	IX
C-2-1. 国内外の研究開発事例	IX
C-2-2. 空間光変調器(OPA)の研究開発動向	IX
C-2-3. トランジスタやダイオードの研究開発動向	IX
<b>C-3. ユニバーサルコミュニケーションについて (2.7章関連)</b>	IX
C-3-1. 大規模言語モデルの補足	IX
C-3-2. GPT-3についての補足	IX
C-3-3. 対話AIの補足	IX
C-3-4. 対話AIに関する課題	IX
C-3-5. NICTにおけるLLMの開発	X
C-3-6. 実世界のモデリング・画像生成技術	X
C-3-7. 都市デジタルツインについて	XI
<b>C-4. 量子ICTについて (2.6章関連)</b>	XI
C-4-1. 量子計算精度を高める研究開発	XI

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变化等、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。

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、昨今大きな話題となっている生成系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。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。

---

## 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や国際的な紛争の発生、および関連する経済状況の変動によって、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、世界各地域の動向について、いくつか主要な事例を取り上げながら述べる。

### 1.1. 最近の世界情勢

#### 1.1.1. 新型コロナウィルス感染症とICT

2020年から続く新型コロナウィルス感染症により、人々の生活は大きく変化した。世界EC市場売上げは540兆円超（2021年、前年比19.5%増）となり、さらに、在宅勤務やオンライン学習等によるWeb会議システムの利用等が急速に進んだことにより、インターネットトラフィックは急増している（図1.1-1）。

それに伴い、ICT関連の消費電力も増加傾向にある。このまま技術革新が行われなかった場合、2050年には2016年比4000倍以上の消費量が見込まれるとの試算もある（図1.1-2）。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）も必要不可欠となっている。

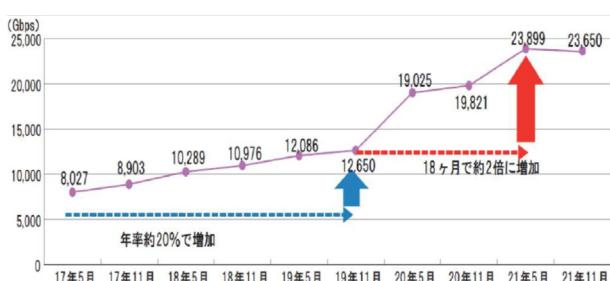


図1.1-1 インターネットトラフィック推移<sup>1)</sup>

IT関連消費電力予測	2016年	2030年	2050年
IPトラフィック (ZB/年)	4.7	170	20,200
消費電力 (国内: TWh/年)	41	1,480	176,200
消費電力 (世界: TWh/年)	1,170	42,300	5,030,000

図1.1-2 IT関連消費電力予測<sup>2)</sup>

#### 1.1.2. 国際情勢の変化とICT

2022年2月、ロシアがウクライナに侵攻し、国際情勢も急速に変化した。ウクライナのFedorov副首相は侵攻2日後にはTwitterでSpaceX社創業者のElon Musk氏に支援を要請、その半日後にはウクライナ国内で同社のStarlinkによる衛星通信サービスが開始された。多くの機材がウクライナに搬入され、2022年5月時点で15万人が利用した。Twitterを活用した迅速な対応や、従来の地上網だけでなく上空や宇宙を含むVerticalに広がった次世代通信網等、社会インフラとして急速に進展しているICTの現状が垣間見られた事象であった。

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。2021年10月には日米を含む30カ国が、ランサムウェアを世界的な脅威であるとする共同声明を発表。2022年9月には日米豪印外相会合において、ランサムウェアに関する声明を発表し、世界的な脅威に対する国際協力強化を進めている<sup>3)</sup>。

AI分野にも大きな変革が起こっている。2022年11月には、Open AIがChatGPTをリリース。リリース後2カ月で利用者は1億人を突破し、急速に利用が広がっている。機械学習技術の革新的な進化によって、チャットボットとしての文章生成能力は驚くほど高く、今後様々な分野でのイノベーション創出が期待される。このような近年のAI技術の発展は、地政学的にも大きな影響力を發揮しつつあるとの指摘もなされている<sup>4)</sup>。

### 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が、2000年以降の連邦政府による研究開発支援の傾向は、大学等を中心とした研究力の低下と、その結果としての米国の国力弱体化に対する懸念を惹起してきた<sup>5)</sup>。一方で、近年、急速な経済発展を背景に、中国が科学技術・イノベーションに関する指標において米

国に迫り、一部では上回る状況となってきたことを受け<sup>6)</sup>、トランプ政権下の米国では、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論議が高まることとなった。バイデン政権においても、コロナ禍やウクライナ侵攻を受けて経済安全保障上の要請はますます高まっており、科学技術・イノベーション政策は重要な政策課題に位置付けられている。

米国の研究開発エコシステムは、高等教育機関、国立研究所を含む連邦出資研究開発センター（FFRDC）や、いわゆるビッグテックやスタートアップを含む民間企業等を主な担い手として発展してきた。全米各地で大学や国立研究所を核とした地域研究拠点が形成され、イノベーションを担う高度人材の養成・循環や技術移転がなされてきた。

バイデン政権が掲げた「米国雇用計画」及び一連の大型予算法案は、このような産学官が連携する地域研究拠点に対する直接支援に加え、地域の研究開発エコシステムにおいて特に重要な役割を担う国立研究所の能力向上や、新たな研究センターの設立等を通じ、課題解決を重視しながら地域のイノベーション力を引き上げようとするものであり、もはや米国にとって唯一の競争相手となった中国にリードするための「一世代に一度」の投資と言われている<sup>7)</sup>。

こうした中で、人工知能（AI）、量子情報科学技術（QIST）、5G/6G 等を含む ICT は、グリーンエネルギー技術等と並んで重要な分野として注目されており、また、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<sup>8)</sup>。これらの新興技術の育成に当たっては、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、官民パートナーシップのみならず、同志国との連携強化も積極的に図られている。

以上のような米国の動向の中でも、我が国が特に注目すべき最近の動きを以下紹介する。

## ①量子 ICT

IBM、Google 等が量子コンピューティング開発を牽引する一方で、米国では、量子ネットワークについても早くより連邦政府による青写真が示され、シカゴ、ニューヨーク、ワシントン DC をはじめ、全米各地で国立研究所・大学を中心にテストベッド構築等が進め

られているところである。このような取り組みから派生して、スタートアップによる世界初の量子メモリの商用化<sup>9)</sup> や、地域系通信事業者と連携したテストベッドの構築<sup>10)</sup> など、先進的な成果が生まれつつある。

## ② Beyond 5G/6G

2020年に民間主導の 6G 推進イニシアチブである「Next G Alliance」が設立され、大学、国立研究所を含む約 100 者が参加してロードマップの策定等を精力的に進めている。また、2021年4月に NSF が立ち上げた研究開発プロジェクト「RINGS (Resilient & Intelligent NextG Systems)」では、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。並行して連邦通信委員会（FCC）の有識者 WG<sup>11)</sup> でも 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ており、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。これに加え 2022 年は、T-Mobile や Apple 等と、衛星通信事業者との提携が相次いで発表された「非地上系ネットワーク（NTN）元年」だったと言え、こうした動きが今後 6G にどのように取り込まれていくのかが注目される。

## 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<sup>12)</sup>。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）への対応を重視しており、2022 年 10 月に「AI 権利章典のための青写真」を発表して、AI によるイノベーションと、市民権の保護の両立を掲げている。今後、EU との連携や、連邦データプライバシー法案（ADPPA）等の規制を通じ、こうした取り組みの強化が図られると見込まれる。

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

欧州では、2019年12月の欧州委員会新委員長の就任後、「グリーン・デジタルの双子の移行」を欧州連合（EU）の重要政策として位置付けている。「欧州デジタル未来の形成」<sup>13)</sup>（付録C-1-1）では、最先端のデジタル能力の構築・展開や5G/6Gの推進といった研究開発のみならず、米国や中国への対抗も念頭に置いたデータ戦略・プラットフォーム規制、AI規制枠組の作成、ICTのグリーン化等を掲げており、規制等の手法も交えた取組を推進しているのがEUの特徴である。

EUのICT分野の研究開発、実装・展開に関しては、①研究・イノベーション活動に資金を投じる「ホライズン・ヨーロッパ」<sup>14)</sup>、②AI、サイバーセキュリティ等のデジタル分野の実装・展開を支援する「デジタル・ヨーロッパ」<sup>15)</sup>、③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」<sup>16)</sup>などを通じ、各種プロジェクトを実施している。

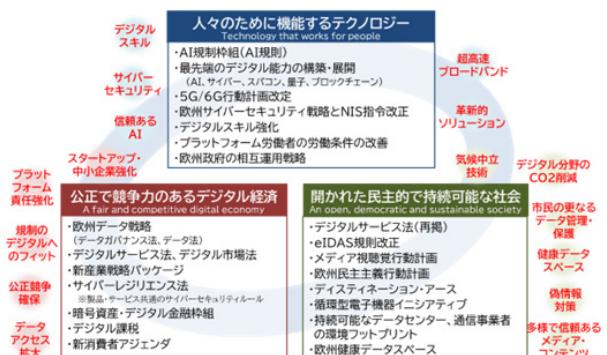


図1.2-1 欧州デジタル未来の形成

加えて、地政学的環境の変化により、欧州のICT分野に関する活動は大きく変容している（付録C-1-2）。近年、EUは、「技術主権・デジタル主権」や「戦略的自律性」といった概念を強く打ち出し<sup>17)</sup>、量子通信インフラの構築、衛星コンステレーション計画等、ICT分野において安全保障を絡めた政策や研究開発を推進している。欧州各国も、EUの動きを踏まえつつ、ICT分野の取組を積極的に進めている。

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)

欧州では、フィンランドが世界に先駆けてB5G/6G

に関する取組<sup>18)</sup>を開始し、その後、EUは、2021年1月にB5G/6Gのフラッグシップ・プロジェクト「Hexa-X」を立ち上げ、さらに同年11月には7年間で官民合計18億ユーロを投じる官民パートナーシップ「スマート・ネットワーク・サービス共同事業」を設立するなど<sup>17)</sup>、研究開発プロジェクトを実施している（付録C-1-3）。

欧州各国では、英国は、2022年12月に3件の研究開発プロジェクトや実験施設の構築等を発表した<sup>19)</sup>。ドイツは、2021年8月に4つの研究ハブを設立し<sup>20)</sup>、2022年第2四半期より個別の研究開発プロジェクトを実施するなど<sup>21)</sup>、各国において2025年頃からの標準化を念頭に置いた研究開発が活発化している（付録C-1-4）。

B5G/6Gの研究開発では、モバイルに関する技術のみならず、光通信、光電融合、NTNに関する技術などが盛り込まれるとともに、省エネルギー、セキュリティ、プライバシー、電磁環境などにも配慮するよう要請されていることが大きな特徴である。

#### ②量子 ICT

2018年10月、EUは、10年間で10億ユーロを投じる「量子技術フラッグシップ」プロジェクトを立ち上げ、研究開発を進める<sup>22)</sup>とともに、OPENQKDプロジェクトによりテストベッドの構築を進めてきた<sup>23)</sup>。2019年6月には、10年以内に欧州全体で量子通信インフラを開発・展開するためのイニシアティブ「欧州量子通信インフラ（Euro QCI）」を発表し<sup>24)</sup>、現在、「デジタル・ヨーロッパ」を中心とした個別プロジェクトにより各国の量子通信インフラの構築が進められている。

欧州各国でも、フランスが2021年2月に国家量子戦略<sup>25)</sup>を、英国も2023年3月に今後10年間で250億ポンドを投じる新たな国家量子戦略を発表している<sup>26)</sup>。

#### ③サイバーセキュリティ、ネットワークセキュリティ

サイバーセキュリティに関して、2020年12月、EUは、「デジタル・ディケイドに向けたサイバーセキュリティ戦略」、リスク管理やインシデント報告義務を拡大する「情報システム・ネットワーク指令の改正案（NIS2）」等を発表した<sup>27)</sup>。また、2022年9月、欧州委員会は、デジタル要素を有するハード・ソフト製品全般に、サイバーセキュリティに関する必須要件を課し、CEマークの貼付を求める「サイバーレジエン

ス法案」を提案している。

研究開発、実装・展開については、「ホライゾン・ヨーロッパ」や「デジタル・ヨーロッパ」においてプロジェクトを実施しており、欧州一般データ保護規則（GDPR）の施行等を踏まえ、プライバシー強化技術（PETs）や暗号化されたデータを活用する技術なども研究されている。

ネットワークセキュリティに関しては、EUは、2020年1月に、「5G ネットワークのサイバーセキュリティ・ツールボックス」を採択<sup>28)</sup>し、各において高リスク・ベンダーの制限などの取組を進めている。英国では、2021年11月に電気通信（セキュリティ）法が成立し、2022年10月に、5Gでのファーウェイの使用を禁止する法的通知を発行している<sup>29)</sup>。

欧洲各国でも、英国が2021年12月<sup>30)</sup>、フランスが同年2月<sup>31)</sup>、ドイツが同年9月<sup>32)</sup>に新たなサイバーセキュリティ戦略を打ち出すなど、その取組を強化している。

#### ④ AI

EUでは、研究開発に加え、特にAIに関する倫理的な問題についても焦点が当てられており、2021年4月には、AIシステムについての史上初の法的枠組となる「AI法案」を提案した<sup>33) 34)</sup>。さらに、AIシステムによる損害の民事上の責任に関する統一ルールを定めたAI責任指令を提案している<sup>35)</sup>。

研究開発、実装・展開については、「ホライゾン・ヨーロッパ」、「デジタル・ヨーロッパ」の枠組の下で多数のプロジェクトが実施されており、官民パートナーシップも設立されている。

欧洲各国でも、英国が2021年9月に国家AI戦略を、フランスが同年11月に国家AI戦略の第2弾を、ドイツが2020年12月に国家AI戦略の改定を発表するなど、国家レベルの戦略を打ち出している（付録C-1-5）。

#### ⑤ データ戦略と個人データ・プライバシー保護

欧洲では、2018年のGDPRの施行に加え、米国や中国のプラットフォーム事業者への対抗を意識して、データの共有・利用に関する様々な政策を打ち出している。

2020年2月、欧州委員会は、「欧州データ戦略」<sup>36)</sup>を発表し、その後、デジタル市場の公正競争を促進

する「デジタル市場法案」<sup>37)</sup>、オンライン上の違法な製品・サービス・コンテンツから消費者を保護する「デジタル・サービス法案」<sup>38)</sup>、民間の産業データ等のデータ共有を促進する「データ法案」<sup>39)</sup>等を順次提案している。このように、欧州ではデータの取扱いに関するルールが次々と形成されつつあり、民間企業はこれらを意識した活動が必要となっている。

また、EU内の産業データの共有・利用の促進について、2019年10月、ドイツが連邦型の欧州クラウド／データインフラ構想「Gaia-X」を発表した<sup>40)</sup>。そして、「欧州データ戦略」で戦略的分野の産業データの共有を促進する「データスペース」の構築を掲げ、「デジタル・ヨーロッパ」の下で各分野のデータスペース構築プロジェクトを進めている。

#### ⑥ グリーン ICT

官民双方で積極的にグリーンICTの取組を進めているのも欧州の特徴である。EUの26加盟国等は、環境利益のためにグリーン・デジタル技術の使用を加速する宣言に署名し（付録C-1-6）、民間でも、26社のCEOが、2040年までの気候中立を約束する「欧州グリーン・デジタル連盟」を立ち上げている<sup>41)</sup>。

研究開発、実装・展開については、各国で研究開発プロジェクト<sup>42)</sup>が実施されているほか、B5G/6G等の各分野のなかで持続可能性に配慮した案件が公募・実施されている。

また、グリーンICTの取組の一環として、電子機器用の充電プラグのUSB-Cへの統一に関するEUの法令改正<sup>43)</sup>等も実施されている。

#### ⑦ 欧州の技術主権・デジタル主権、戦略的自律性に向けた主な取組

宇宙分野では、EUは、欧州の自律性とデジタル主権を確保する観点から、量子通信を含む欧州全土へのセキュアで高速なコネクティビティを実現する衛星コンステレーション「IRIS<sup>2</sup>」の構築計画を打ち出している<sup>44)</sup>。

半導体分野では、欧州委員会は、半導体のサプライチェーンの強化とともに、欧州の技術的リーダーシップの確立を目的とした「欧州チップ法案」を提案している<sup>45)</sup>（付録C-1-7）。

標準化分野では、2022年2月、欧州委員会は、新たな欧州標準化戦略を発表した<sup>46)</sup>。そこでは、欧州委

員会が要求する欧州標準はEU及び欧州経済地域の標準化機関のみが関与できるとする旨の改正を盛り込んだ欧州標準化規則案が提案されており、欧州の技術主権、戦略的自律性が強く意識されている。

### 1.2.3. アジアの状況

ASEAN加盟国（10カ国）は日本の約5倍に相当する約6億7000万人を抱え、近年の一人当たりの所得も向上する中、GDPについては約3兆3000億米ドルとなっており、これは日本の67.7%、全世界GDPの4.5%に相当する<sup>47)</sup>。米中貿易摩擦や新型コロナウイルスによる世界経済への大きな下押し圧力の中でも、東南アジア地域に対しては安定的なビジネス展開先として注目してきた面が多いが、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

シンガポールは、2022年9月、情報通信メディア開発庁（IMDA）は、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<sup>48)</sup>。

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エン・マイン・ファン情報通信大臣が表明<sup>49)</sup>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<sup>50)</sup>。

この他、インドでは2023年3月モディ首相が、产学研官連携の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<sup>51) 52)</sup>。今後、同グループにおいて、工程表（ロードマップ）や行動計画（アクションプラン）の策定が進められる予定である。

#### 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<sup>53)</sup>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、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<sup>54)</sup>において、米国に続き2位に位置づけられている。

この他のASEAN地域としては、インドネシア<sup>55)</sup>、タイ<sup>56)</sup>、マレーシア<sup>57)</sup>、ベトナム<sup>58)</sup>において、AIに関する国家戦略が策定されている。

また、インドでは、2018年に策定された国家AI戦略「National Strategy for Artificial Intelligence #AIFORALL」<sup>59)</sup>に基づき、AIの開発・導入による包括的な成長に向けた基礎研究（COREs、Centres of Research Excellence in Artificial Intelligence）と、農業、ヘルスケア、教育、スマートシティ、インフラ、スマートモビリティを重点分野としたアプリケーションベースの技術開発や展開（ICTAI、International Centre for Transformational Artificial Intelligence）が進められている。また、AI等に関して300万人の政府職員への訓練<sup>60)</sup>を計画する等、人材面においても優位性を持っている<sup>54)</sup>。

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チブである「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、オーストラリア、ニュージーランド、インドの他、東南アジア地域としてはシンガポールが、2020年6月時点の創設メンバーとして参加している。

#### ③量子ICT

オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）は、同国の量子技術は2045年までに60億豪ドル（約5,700億円）規模の市場と、約1万9,000人の雇用を生み出すとの予測<sup>61)</sup>を発表。2021年にオーストラリア政府が作成したList of Critical Technologies in the National Interestにおいても、7つの柱建ての一つとして、量子が位置付けられている<sup>62)</sup>。このような中、量子産業を成長させ、革新的な量子技術を導入するための重要な方策として、「国家量子戦略」（National Quantum Strategy）を現在策定中であり、2022年4月には、同戦略策定に向けて量子技術の状況のマッピングを目的として、イシューペーパー（National Quantum Strategy: issue paper）が公開され、同年6月3日まで意見募集された<sup>63)</sup>。また、2023年2月、シドニー大学（University of Sydney）では、740万豪ドルを投資し

て量子技術施設を拡大し、同大学のシドニーナノサイエンスハブ (Sydney Nanoscience Hub) 内に「Future Qubit Foundry」を設立すると発表した。未来の量子コンピューター技術の開発における国内の主要拠点として、量子コンピューターの大規模な運用と社会での実用化を目指すものとされている<sup>64)</sup>。

インド政府は、「国家量子技術・アプリケーション戦略」(National Mission on Quantum Technologies & Applications (NM-QTA)) を策定し、量子技術の研究開発に5年間で800億ルピーの予算を割り当てる等、5カ年計画に基づいた取組をすすめている<sup>65)</sup>。

また、2022年3月には、インド防衛研究開発機構 (Defence Research and Development Organisation, DRDO) とインド工科大学 (IIT) デリーの科学者が、100km以上離れたウッタルプラデーシュ州のプラヤグラジとビンディヤチャルの間の量子鍵配達 (QKD) を成功裏に実証したと報じられている<sup>66)</sup>。更に、2022年4月、インドはイスラエルとともに“bilateral workshop on Quantum Technologies (I2QT-2022)”を開催している<sup>67)</sup>。DRDO、DRDO-Industry-Academia Centre of Excellence (DIA-CoE)、インド工科大学デリー校 (Indian Institute of Technology-Delhi (IIT-D)) が主催し、175名（専門家、科学者、企業関係者等）が参加の上、量子技術ロードマップ、量子コンピューティング、自由空間での量子通信等について議論されている。インドは、イスラエル以外にも複数の国と量子に関する研究連携を進めており、特にフィンランドとは、「Indo-Finnish Virtual Network Centre on Quantum Computing」を設立する計画もある<sup>68)</sup>。

2022年2月、シンガポールの量子技術関係の企業 (SpeQtral) が、量子鍵配信の衛星ミッション「SpeQtral-1 quantum satellite mission」を開始するとの旨が報じられている<sup>69)</sup>。これは、シンガポール宇宙技術産業局 (Office for Space Technology and Industry (OST In)) による宇宙機能の研究開発 (R & D) 支援プログラム (Space Technology Development Programme,

STDP) の下で進められ、2024年に打ち上げ予定である SpeQtral-1衛星は、民間主体が打上げる数少ない量子鍵配信衛星の一つとなる見込み。

#### ④サイバーセキュリティ

2022年、アジア太平洋地域は、前年に引き続きサイバー攻撃を最も受けた地域となっている。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48%）、次いで多く攻撃を受けた金融業と保険業（それぞれ同18%）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91%を占めており、続いてフィリピンが5%、そしてオーストラリア、インド、及びベトナムがそれぞれ1.5%であった<sup>70)</sup>。

このような状況に対し、シンガポール、マレーシア、タイにおいて個人情報保護法が施行されるなど、東南アジアでは個人情報保護に関する法整備が進みつつある<sup>71) 72)</sup>。重要インフラに対するリスク管理としては、2021年、オーストラリアにおいて、リスク管理計画の策定やインシデント報告を義務付けるとともに、重要インフラ事業者がインシデントに適切な対応を取らない場合等に政府が介入できるようにする法制度を整備している<sup>73)</sup>。また、インドネシアにおいては、2021年、重要な情報インフラの保護に関する大統領規制が発令されている（2024年5月に発効予定）<sup>73)</sup>。

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)<sup>74)</sup>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<sup>75)</sup>。

## 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、技術で勝て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、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。まずはビジョンに関して、Beyond 5G推進コンソーシアム<sup>76)</sup>において、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、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<sup>77)</sup>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Beyond 5G研究開発促進事業<sup>78)</sup>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<sup>79)</sup>。テラヘルツシステム応用推進協議会<sup>80)</sup>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<sup>81)</sup>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<sup>82)</sup>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 システムがあらわす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。

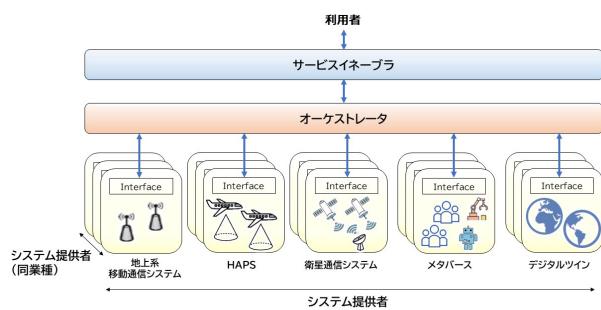


図 2.1-2 異業種をつないで実現する Beyond 5G のサービス

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に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動通信システムから、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。

## 2.2. 電磁波の利活用

電波や光などの電磁波の利活用なくして現代の社会生活は成り立たない。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に支えられている。

本章では、Society 5.0<sup>83)</sup> 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。

- ・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」
- ・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）を実現するために必要な「宇宙環境を把握・予測する技術」
- ・電波利用の大きな変化に対して、電波の安全性を正確に計測・評価する「電磁環境技術」
- ・ICTの基盤であり安心・安全な社会生活を実現する「時刻と周波数を生成・計測・供給する技術」
- ・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」

### 2.2.1. 取り巻く環境

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、国土強靭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）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。

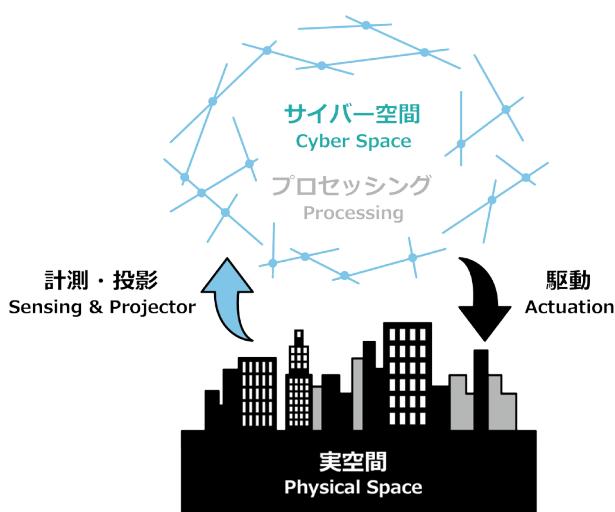


図2.2-1 デジタルツインの概念図

また、太陽活動を源として発生する宇宙放射線や地磁気嵐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、航空運用・電力システム・衛星運用・通信・放送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年頃に次の極大期を迎えると予想され、徐々に太陽フレアの規模や頻度が増大しており、低軌道衛星の障害など社会的影響も始めている。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の正確な把握や予報（宇宙天気予報）が実施されるとともに、その高度化に向けた宇宙環境を把握・予測する技術の研究開発が推進されている。

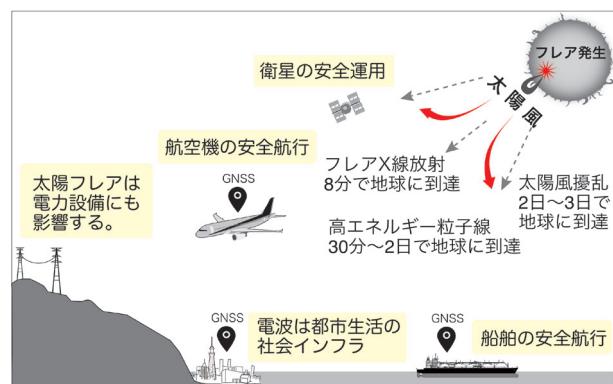


図2.2-2 宇宙環境の変動とその影響

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（様々な電磁環境）の問題がある（図2.2-3）。特に省エネ家電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。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。



図 2.2-3 電磁環境の概念図

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。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。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。

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、まだ課題が多い。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、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。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・CO<sub>2</sub>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。

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（図2.2-4）。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 を打ち上げて、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。

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。打ち上げが近い地球観測衛星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。

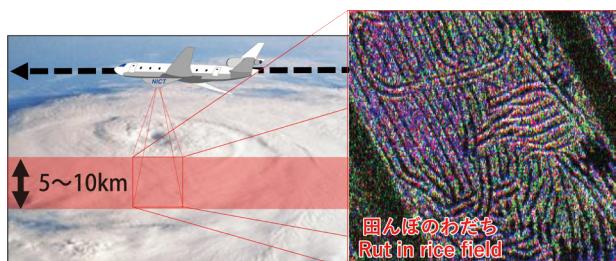


図 2.2-4 合成開口レーダーの概念図

## 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。

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による太陽風観測衛星の24時間データ受信や、東南アジア域電離圏観測網の高密度化・広域化等が進められている。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、2028年打上げ予定の次期ひまわり衛星搭載を目指して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、スーパーコンピュータ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」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」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。

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」、衛星表面帯電リスク評価システム「SECURES」、短波帯電波伝搬シミュレータ「HF-START」などが開発されている。

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。

## 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）。

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。

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まっている。



図2.2-5 LED照明からの漏洩磁界測定

## 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る、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メートル条約加盟国が今後一層の努力していくことが決議された。

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、2024年頃にはGPS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。

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は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。これは「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には、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キテクチャ等が期待されている（図2.2-6参照）。

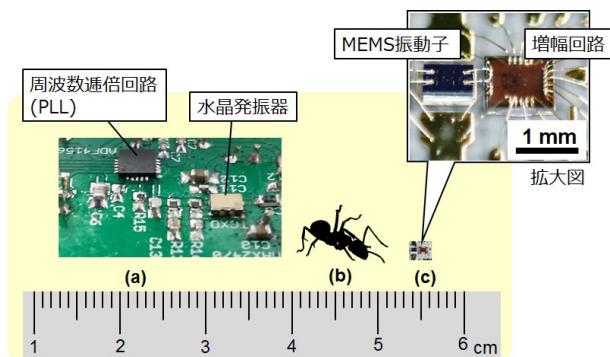


図2.2-6 原子時計用発信回路の小型化

- (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關ホログラフィ（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。イスラエル Ben-Gurion 大学 J. Rosen らは、FINCH を発明し3次元蛍光顕微鏡への応用を当初示していたが、現在は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ている。また、エストニア Tartu 大学 A. Vijayakumar、豪 Swinburne 大学 S. Juodkazis と連携するなど国際ネットワークを広げている。FINCH のもう一人の発明者である米国 G. Brooker は、ベンチャー企業 CellOptic 社を設立し、FINCHに基づく分解能 100 nm 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 T.-C. Poon のグループは、单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。自動車部品メーカー Continental は2016年からホログラフィック投影技術を有するDigiLensとの連携を加速、DigiLensは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。またスタートアップ企業の Ceres Holographics も、独自の光学スクリーン開発技術の確立を目指している。国内では、世界的に猛威を振るったコロナウイルスによって、遠隔や非接触技術が大きく注目され、コロナ禍前から開発されてきた空中ディスプレイ技術の実用化が大きく進ん

た。アスカネットやパリティ・イノベーションはタッチパネルやモニタから離れた中空に映像を表示することができる。両者ともに2020年から2021年にかけて各分野の企業や自治体と連携して、空中ディスプレイを用いた非接触インターフェースの提供を始めた。また、民間企業との連携でコンビニエンスストアや書店のセルフレジに導入されている。

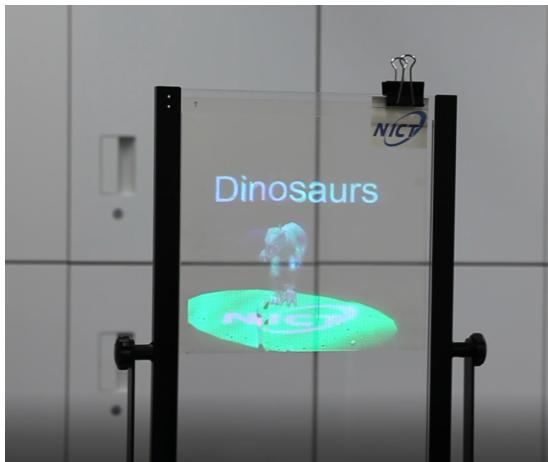


図2.2-7 AR用の透明フルカラーアニメーションの3Dディスプレイ

### 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、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。

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。今後は通信とセンシングが一体化したシステムの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な利用されており、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などから利用が始まっていると想定される。

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。B5G時代に不可欠な通信衛星メガコンステレーションへの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)。



GNSSに影響する宇宙天気の予報



図2.2-8 宇宙天気予報センター

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な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に対する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、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。

ネットワークの参加者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

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。

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成果が多く見られる。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、2023 年の日本国内で約 30 億ドル、世界全体では約 1600 億ドルの市場規模が見込まれており、今後もさらなる成長が見込まれる。

## 2.3. 通信ネットワークインフラ

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）およびネットワーキング等の基礎・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。

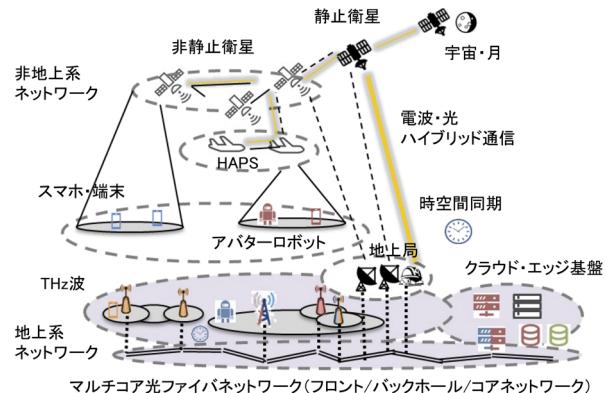


図 2.3-1 将來の通信ネットワークインフラ

### 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ジュをつかって 9.6 kbps 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、10 Gbps の光アクセスサービスも利用できるようになっている。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 10 Gbps に到達し、2000 年代に 1 Tbps、2010 年代に 10 Tbps 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 11 Mbps 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 9.6 Gbps と 20 年で約 1000 倍速くなっています。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。

移動通信システムは、1990 年代に 2G（デジタル化）で 64 kbps だった通信速度が、384 kbps 程度（3G）、100 Mbps ~ 1 Gbps（4G）を経て 10 Gbps 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 10 Gbps、100 Gbps 級の HTS が打ち上げられた<sup>84)</sup>。近年は数百 Gbps の通信容量にまで向上している。また、2023 年以降に Tbps 級の衛星の打ち上げを計画するオペレータも存在する。

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る、5G の人口カバー率が 2022 年 3 月で 93.2% になっている<sup>85) 86)</sup>。

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して 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、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。

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 109 Tbps の伝送容量世界記録を達成し、2012 年 9 月に、NTT が 1 Pbps で記録更新した。その後、2015 年 9 月に NICT が 2.15 Pbps 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 10.16 Pbps 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 1 Exa bps × km を達成した。2020 年 3 月に NICT が、38 コアファイバで 10.66 Pbps 及び結合 3 コアファイバで 172 Tbps の 2040 km 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 407 Tbps 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 1.01 Pbps 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 1.53 Pbps 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 (R3) 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 (319 Tbps × 3001 km = 957 Pbps km) を達成。その時点での最高は TE Subcom の 881 Pbps 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 1 Pbps 大容量伝送実験に成功。20 THz の周波数帯域 (801 波長) を使用<sup>87)</sup>
- 2023 年 3 月：標準外径の 19 コア光ファイバで 1.7 Pbps の大容量伝送実験に成功。

次に、非地上系ネットワークの研究開発の動向を記す。中国は、2019 年 12 月末に実践 (Shijan) 20 衛星の打ち上げに成功した。同衛星には、伝送速度 4.5 Gbps 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 622 Mbps 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、1.244 Gbps 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 1.06 μm 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 1550 nm での光通信実験を実施して

いる。

民間企業に着目すると、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、ver.2 と呼ばれる次世代の衛星群には衛星間の光通信機能を搭載することが計画されている。Amazon（米国）の衛星インターネット計画「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。また、関連会社 Blue Origin はロケットを開発し、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。

国内では、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<sup>88)</sup>。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、2023 年 3 月現在の会員数は 160 人を超えており、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、2025 年に HAPS 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。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 年に開始し洋上への展開を計画している。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。

### 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

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、複数 AI 同士の自律分散協調等による自動化レベル 4 を達成し、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。また、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、サイバーフィジカル空間上で無線システムを構築し、電波モデルや無線機の軌道等を与える、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、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。

以下ではさらに、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 10 Tbps 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ることはまだ想像しにくいため、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、データセンター、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。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（HAPS 1 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。このため、2040年ごろに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が、既存の周波数共用フレームワークを拡張する形で制度化されるであろう。

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分野の動向も重要な要素になってくる。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き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が待望される。

本章では、より高度な情報通信基盤を実現するためのICTデバイスについて研究開発動向を述べる。

### 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。これらの社会的要請を受けて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。将来の車の自動運転などではレーダー／ライダーなどが搭載されて精度の高さが求められ、リアルタイムかつ高精度な測距が必要となる。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うと、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、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、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高性能なICTデバイスも求められている。

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。

#### 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/6Gの研究が活発化しているが、このうち5Gの機能高度化にあたる「超高速・大容量」、「超低遅延」、「超多数同時接続」は、テラヘルツ波帯等の高周波数帯域における無線通信技術により実現できると期待されている。テラヘルツ波は、電波と光の中間の周波数を有し、双方の特性を併せ持つ電磁波であり、エレクトロニクス・フォトニクスの両分野のアプローチや融合が必要である。大量生産・普及に適したSi CMOSを利用したテラヘルツ帯無線通信用回路技術の研究が国内外で活発化している（図2.4-1）。例えば国外では、米国Intel社が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。また国内では、東工大・NTTのグループによる300GHz帯の無線送受信機チップ開発や、NICTによる300GHz帯無線通信でのビームステアリング技術の実証等が進められている。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-2-1も参照）。国外では、HRL LaboratoriesやUniversity of Notre Dame、Rockwell Scientific Companyなど多数の機関で研究開発が行われている。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ベースに、さらにNICTでも技術を有する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（ $\mu$ コム）の研究開発が国外で進んできている。日本では、NICTと慶應義塾

大学、徳島大学が取り組んでいるが、大阪大学はイラアメリカと共同で開発を行っている。

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。

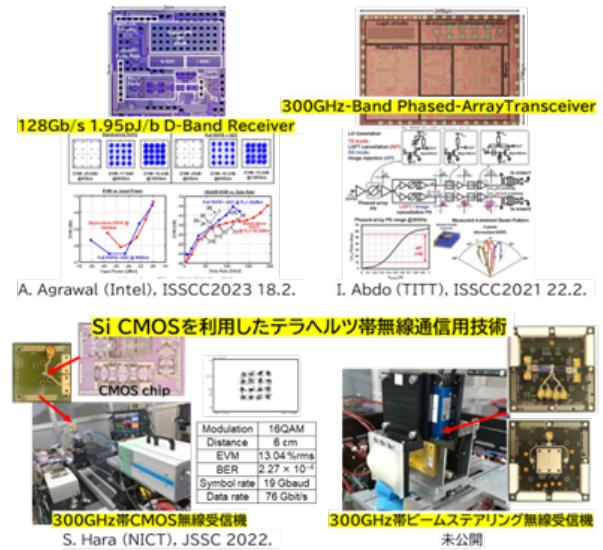


図2.4-1 テラヘルツ帯無線通信技術

##### 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、デバイスソフ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のコアデバイスであり、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]	~ 50	~ 40	~ 80	> 100
$V \pi L$ [V · cm]	2	0.2 ~ 2	0.8	0.03 ~ 0.3

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 ~ 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-2-2 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が、過去 2 年間は 500 編弱とほぼ一定である（図 2.4-2）。新しい半導体分野として広く認知され、この数年研究開発分野としても大きな盛り上がりが認められてきたが、それも最近になり落ち着いてきた感がある。現在の  $Ga_2O_3$

分野研究開発の大まかな方向性は、以下の通りである。

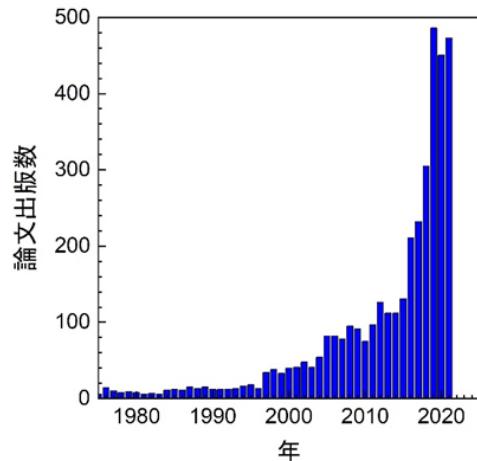


図 2.4-2 酸化ガリウムデバイス分野の論文出版数

最安定結晶構造に相当する  $\beta-Ga_2O_3$  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から最大 4 インチのウェハーが市販されている。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は、有機金属気相成長法（MOCVD）技術の進展が目覚ましい。

デバイス開発も、これまでの日本、米国に加えて、中国を中心化しており、トランジスタ、ダイオード開発成果が、この 2 年でこれまで以上に多く発表されるようになった（付録 C-2-3 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。

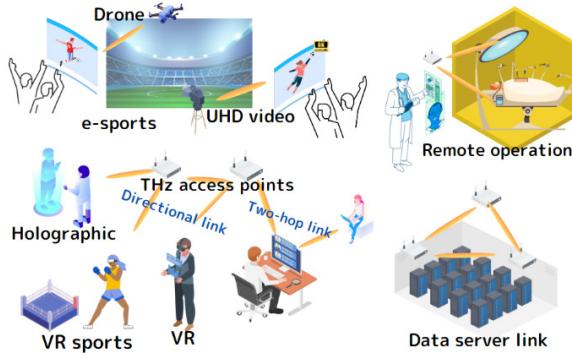


図 2.4-3 将来の超高速無線利用イメージ

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ー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(100GHz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、新規な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)。

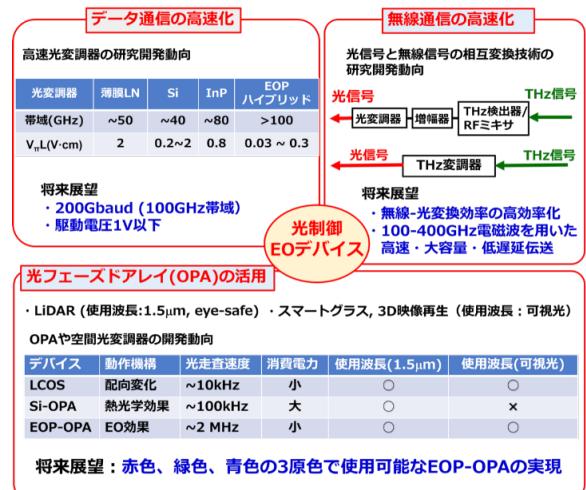


図 2.4-4 有機材料 ICT デバイスの展望

酸化ガリウムデバイスでは、ホール伝導性を有するp-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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して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。

## 2.5. サイバーセキュリティ

急増するサイバー攻撃への対策は国を挙げた喫緊の課題となっている。サイバーセキュリティの分野では、サイバー攻撃に関連したデータを大量に集め、それらのデータを分析して正しく対処できる人材を育成することが重要である。しかしながら、我が国ではこれまで海外のセキュリティ製品・技術を導入・運用する形態が主流となっており、コア技術に係るノウハウ・知見を蓄積できないことで研究開発が停滞し、セキュリティ製品・技術の自給率の低迷を招いている。我が国のサイバーセキュリティ対応能力を向上させるためにどのような研究開発に取り組むべきか、という問題意識に基づき、本章ではサイバーセキュリティを取り巻く国内外の動向、及びサイバーセキュリティに関する研究開発動向を俯瞰する。

### 2.5.1. 取り巻く環境

サイバーセキュリティを取り巻く環境は急速に変化している。以下の観点について述べる。

1. 増加するサイバー空間の脅威
2. サイバー攻撃に悪用される IoT 機器
3. ソーシャルエンジニアリングの進化
4. AI とサイバーセキュリティ
5. 量子コンピュータ時代に向けた技術移行

#### ①増加するサイバー空間の脅威

2020年からの新型コロナウィルス感染症の流行により、人々の生活は大きく変化した。テレワークやオンラインでのビジネス・活動が増えるにつれて、サイバー攻撃の標的も増加している。我が国では、NICTで実施されている NICTER プロジェクト<sup>89)</sup>において、継続的に国内外の約 30万の未使用の IP アドレス空間（ダークネット）に届く通信（パケット）を観測しているが、このパケット数はマルウェアの感染活動などインターネット上の不正な活動の活発さを示す一つの指標となっている。この NICTER プロジェクトにおける大規模サイバー攻撃観測網で 1 アドレス当たりに届く年間総観測パケット数は、図 2.5-1 に示すように 2020年に前年比 50% 増と急増して以来、高い水準で推移している<sup>90)</sup>。

サイバー攻撃は社会的・政治的な主張を目的とした攻撃もある一方、組織・重要インフラ・国家を標的とした経済犯・組織犯的なものが増加しており、2022年のサイバー攻撃のうち、金銭を脅し取ること（extortion）を目的とした攻撃は 27% にのぼった<sup>91)</sup>。また、最も狙われた地域はヨーロッパであり、地政学的緊張を利用したものと考えられる。特に近年、組織のデータを暗号化し、その解除のために身代金（ransom）を要求するランサムウェア攻撃が進化している。暗号化したファイルの復旧だけでなく、窃取した組織の機密情報や個人情報をダークウェブ上のリクサイトへ暴露することを材料に脅迫し、身代金を高額化する二重恐喝（double extortion）が増加し、ランサムウェア攻撃によるデータ漏洩の増加の一因となっている。また、ランサムウェアのビジネス化、分業化が進み（RaaS, Ransomware as a Service）、ランサムウェアを作成する能力を持たない組織でも攻撃が可能になるパッケージを RaaS オペレータが開発・配布し、攻撃の実行者であるアフィリエイトが請け負う

といったエコシステムが形成されている。さらに、攻撃の短縮化が進み、2019年には身代金を得るまで 2ヶ月以上かけていたところを 2022年には 3日弱となるなど、低コストで成功率を上げるようになってきた。サイバー攻撃の標的は大企業だけでなく、中小企業、公的機関、医療機関など多様化している。

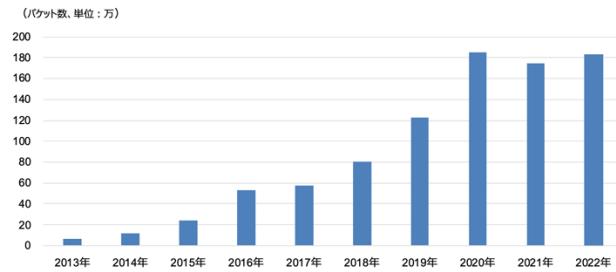


図 2.5-1 NICTER で観測した 1 IP アドレス当たりの年間総パケット数（過去 10 年間）

#### ②サイバー攻撃に悪用される IoT 機器

インターネットに接続された機器や家電製品、監視カメラなどの Internet of Things (IoT) が、サイバー攻撃の対象となっている。2022年に NICTER で観測した主な攻撃対象（宛先ポート番号）の上位 10 位を図 2.5-2 に示す。円グラフの水色の部分が、Web カメラやホームルータなどの IoT 機器に関連したサイバー攻撃関連通信である。

このような IoT 機器は、機器の性能が限定されている、管理が行き届きにくい、ライフサイクルが長いなど、サイバー攻撃に狙われやすい特徴を持っている。IoT 機器に脆弱性がある場合、攻撃者はこれらの機器を操って大規模なサイバー攻撃（DDoS 攻撃）を仕掛けるなど、攻撃を拡大させることが可能となる。特に 2022年には、日本国内で複数のデジタルビデオレコーダー製品が Mirai というマルウェアに感染し、DDoS 攻撃の踏み台として悪用される事象が発生した。当事象に関しては、前述の NICTER プロジェクトを通じて、製品開発者の協力の下で機器の脆弱性を調査し、製品開発者が把握していないかった未知の脆弱性が明らかになったほか、この脆弱性を悪用する攻撃が、対象となる機器のみに対してピンポイントで送られている実態が観測された。インシデントに関する情報を迅速に共有し、対策方法の検討や啓発、被害の拡大防止に向けた脆弱性対策を迅速に行なうことが、ますます重要になっている。

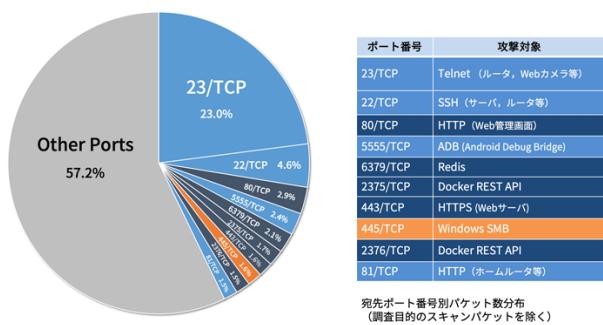


図 2.5-2 NICTER 観測による 2022年のサイバー攻撃関連通信の主な攻撃対象（宛先ポート番号）

### ③ソーシャルエンジニアリングの進化

ソーシャルエンジニアリングとは、人間の心理的傾向や社会的行動を利用し、その脆弱性を突いた攻撃を行う手法である。具体的には、ネットワーク管理者になりすまして緊急を装いターゲットとなる人物に電話をかけてパスワードを聞き出すなど、サイバー攻撃などと比べ、高度な技術を使わずに侵入に必要な情報を入手する方法である。フィッシングもソーシャルエンジニアリングの一種で、偽のウェブサイトを作成し、本物のウェブサイトと見分けがつかないようにしてメール等でその URL をクリックさせるよう誘導し、ユーザーの ID やパスワードなどの個人情報を盗み出すことを目的としている。2022年もフィッシングは依然、侵入手口のトップとなっており、フィッシングが感染手口となったインシデントの割合は 41% であった<sup>91)</sup>。

ソーシャルエンジニアリングは、技術的な脆弱性を利用する攻撃手法とは異なり、相手の人間性や社会的心理を突く攻撃である。このため、心理学やヒューマンファクタ、ユーザブルセキュリティといった観点からのアプローチが不可欠である。

### ④AI とサイバーセキュリティ

AI 技術をマルウェアの自動分析や攻撃の検知・脅威予測に活用するなど、AI のサイバーセキュリティ対策への活用手法が進展する一方、サイバー攻撃の高度化にも AI 技術が悪用される恐れがある。例えば、攻撃者が AI を利用してフィッシング攻撃の精度を向上させ、より効果的な攻撃が可能になることが懸念される。また、AI そのものに対する攻撃手法も数多く生まれており、AI を防御する技術「AI セキュリティ」の確立も急務となっている<sup>92)</sup>。

### ⑤量子コンピュータ時代に向けた技術移行

現在使われている公開鍵暗号は大規模な量子コンピュータが実現すると安全性が低下してしまうことから、昨今の量子コンピュータの目覚ましい発展はサイバーセキュリティの観点では大きな脅威である。これに備え、米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）は量子コンピュータによる攻撃に耐えうる新しい暗号技術「耐量子計算機暗号」(Post Quantum Cryptography, PQC) の標準化を 2016 年から開始した<sup>93)</sup>。世界中から応募された候補の中から 2022 年 7 月に標準化対象となる複数の方式が発表された。

今後は現在の暗号方式から PQC にどのように移行していくかが課題となる。すでに広く普及している暗号モジュールをすべて置き換える必要があり、多大な費用と長い移行期間が必要となる一方で、現行の暗号を解読可能な量子コンピュータが開発されるまでの時間は刻一刻と迫っている。移行への対応はすでに喫緊の課題である。

#### 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、具体的ないくつかのサイバーセキュリティ技術、およびその基礎となる暗号技術に焦点を当てて述べる。

##### ①サイバーセキュリティ技術

###### ■データ駆動型サイバーセキュリティ技術

実データに基づきサイバー攻撃を複数の側面から観測する技術、状況把握を支える可視化技術、機械学習等の AI 技術を駆使した自動分析・自動対策技術の確立・高度化が求められている。前述の NICTER プロジェクトによる観測・分析結果は政府や関連組織と共有して対処に役立てられるほか、一部は NICTERWEB<sup>94)</sup> 上で一般にも公開されている。

###### ■AI × サイバーセキュリティ

機械学習等の AI 技術とサイバーセキュリティ技術を融合させた研究開発では、インターネット上のマルウェアキャンペーンを検知・分析する技術、大量のマルウェアを分析してその機能を類推する技術、多種多様なセキュリティアプライアンスが発報したアラート情報から真に対処が必要な重要なアラートを抽出する技術、JavaScript やユーザのアクセス履歴より危険

なWebページを検出する技術、脅威インテリジェンスの抽出・分析技術など、収集した大量のサイバーセキュリティ情報からリアルタイムに付加価値の高い情報を得るために研究開発が行われている。

### ■サイバー攻撃観測技術

特定の組織を狙う標的型攻撃では、被害を受けた企業や組織から攻撃の詳細情報が出てくることは非常に稀であり、標的型攻撃の実態把握や適切な対策導出が困難である。攻撃者が侵入先でどのような振る舞いをしているのかを観測する一手法として、実組織を精巧に模倣した巨大なダミーネットワークを構築し、標的型攻撃等のマルウェアを実行して攻撃者を誘引し、ステルスに観測を行うことができる（図2.5-3）。人間の攻撃者のアトリビューションや、ダミーデータの中にビーコンを仕込むことで、真の発信元の特定が可能である。

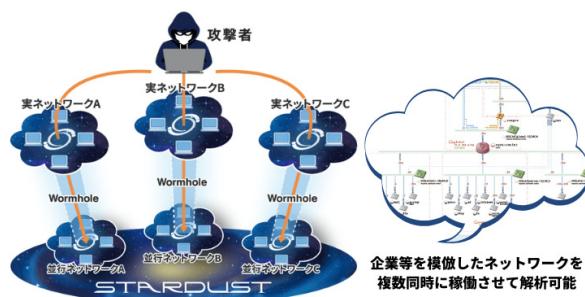


図2.5-3 標的型攻撃誘引基盤 STARDUST

### ■5G/Beyond 5G セキュリティ

5Gの商用利用が開始され、「超高速大容量」「高信頼・低遅延」「多数同時接続」の特徴を持ったネットワークが普及し始めている。5Gネットワークでは多種多様なデバイスが繋がり、自動運転や遠隔医療からスマート農業・スマートファクトリ、高精細映像制作など様々なサービスの実現が期待される一方で、新技術の導入によりこれまでの環境では想定していなかった新たなセキュリティ脅威の懸念が生まれている。

我が国では、2020年にKDDI、NTTドコモ、NEC、NICT等が中心となり、共同で5Gセキュリティ検証用テストベッドの整備と研究開発を開始した。NICTの環境内にオープンソースソフトウェアであるOpenAirInterfaceおよびfree5GCを利用した5Gコアネットワークと、Software Defined Radio (SDR)機器による無線アクセスネットワークを含めた5G検証環境を構築し、5G環境におけるセキュリティ脅威の検討とモデリング分析、緩和策等の技術検証を実施し

ている。こうして得られた知見は「5Gセキュリティガイドライン」<sup>95)</sup>として総務省より公表されている。

### ■サプライチェーンリスクに対応するハードウェアセキュリティ検証技術

IoT機器の普及やサプライチェーンリスクの高まりによって、ある機器に脆弱性や意図的に仕込まれたバックドア（外部から侵入可能な裏口）が存在しないか検証する技術の重要性が高まっている。一例として、ファームウェアやカーネルモジュールからFPGA(Field-Programmable Gate Array)、ICチップ、センサデバイスのようなハードウェアにより近い領域のセキュリティ技術の研究開発が実施されている（図2.5-4）。



図2.5-4 サプライチェーンリスクに対応する  
ハードウェアセキュリティ検証技術

### ■ユーザブルセキュリティ

セキュリティの課題を考える上で人間（ユーザ・システム開発者・サービス提供者）の観点を無視することはできない。特にユーザがシステムやサービス等を利用する際に、その使いやすさ（ユーザビリティ）は重要である。一方で、セキュリティ確保のためにシステムが複雑になってユーザビリティが損なわれる等、セキュリティとユーザビリティはトレードオフの関係になりやすい。したがって、セキュリティが確保されつつ、ユーザーにとっての効果、効率及び満足度を損なわずに本来の目標を達成する「ユーザブルセキュリティ」の考え方が重要になってくる。例えば、一般ユーザがアプリダウンロード時にプライバシーポリシーを理解できないまま同意することや、身体障害者のセキュリティ認証における不便さなどが課題となっている。他にも、脆弱な機器を利用し続けている一般ユーザに対して適切なセキュリティ通知や対処方法の通知手法や、ナッジを活用することで望ましい方向へユーザの行動変容を促す手法などについて、研究開発が実施されている。

## ②暗号技術

### ■信頼されるデータ流通のための暗号技術

DFFT (Data Free Flow with Trust : 信頼性のある自由なデータ流通) とは、「プライバシーやセキュリティ、知的財産権に関する信頼を確保しながら、ビジネスや社会課題の解決に有益なデータが国境を意識することなく自由に行き来する、国際的に自由なデータ流通の促進を目指す」というコンセプトである。DFFTは、2019年1月にスイス・ジュネーブで開催された世界経済フォーラム年次総会（ダボス会議）にて、安倍総理（当時）が提唱し、2019年6月のG20大阪サミットにおいて各国首脳からの支持を得て、首脳宣言に盛り込まれた。データの提供・収集・保管・解析・展開の各段階におけるセキュリティやプライバシーを確保するための暗号技術の研究開発は古くから行われているが、特に「秘密計算」という、データの機密性やプライバシーを確保しながら計算結果を得る暗号学的手法の研究開発は日本が強みを持つ分野である。戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期の課題にも含まれている。一例として、プライバシーを保護しながら独立なノード間での協調的機械学習を実現する連合学習技術が開発され、NICTと複数の金融機関が連携した実証実験が行われており、より精度の高い不正取引検知の実現という社会課題の解決に向けた取り組みが行われている<sup>96)</sup>。

### ■量子コンピュータ時代に向けた暗号技術

量子コンピュータが利用可能となった時代にも安全に利用できるセキュリティシステムの確立を目指し、各国ともに量子暗号通信、耐量子計算機暗号及び耐量子性のあるセキュリティプロトコルの設計、開発、安全性評価、実装に関する研究開発が活発に行われている。具体的には、耐量子計算機暗号の世界標準となることが予想されている格子暗号、多変数公開鍵暗号等や、現在広く使用されているRSA暗号、楕円曲線暗号等の安全性評価に関する研究開発が進められている。我が国では、その成果をもとに電子政府推奨暗号の安全性評価や、暗号技術の適切な実装法や運用法の検討が行われている<sup>97)</sup>。量子暗号通信については、2.6章を参照いただきたい。

### ■ブロックチェーンのセキュリティ

Web3.0時代において、ブロックチェーン技術は、より分散化され、セキュアで透明性の高いWeb環境の実現を目指す中核技術であり、そのセキュリティに

関する研究が国内外の学会で盛んに行われている。特にブロックチェーン上で実現するスマートコントラクトや、デジタルコンテンツやアセットの所有権を保証するNFT(Non-Fungible Token)が注目されている。

### 2.5.3. 将来展望

サイバーセキュリティ分野における我が国の国際競争力の強化をはかり、政府機関や重要インフラ事業者等のサービスを支えるセキュリティ技術が過度に海外に依存する状況を回避・脱却するためには、国内でサイバーセキュリティ情報を生成・蓄積・提供できる環境が不可欠である。また、日々進化する技術により増大するサイバー空間のセキュリティリスクに対応し、社会の安全を守っていくためには、その担い手となるサイバーセキュリティの専門知識を持つ人材が不可欠であるが、これらの人材は依然として不足しており、その育成を一層加速していく必要がある。

このような問題意識に基づき、我が国ではサイバー攻撃に関する膨大なデータや人材育成の知見を活用し、産学官の結節点（ネクサス）となる先端的基盤の構築を目指し、2021年4月にサイバーセキュリティネクサス（CYNEX）<sup>98)</sup>が新たに組織された。本取り組みを通じて、サイバーセキュリティ情報を国内で収集・蓄積・分析・提供するとともに、社会全体でサイバーセキュリティ人材を育成するための共通基盤を開拓することで、日本のサイバーセキュリティの対応能力向上が期待されている。

昨今、サイバーセキュリティは安全保障上ますます重要な要素になりつつある。サイバー攻撃は国境を越えて行われること、現代のサプライチェーンはグローバルに展開されていることを踏まえると、一組織や国家で独立して対応するだけでは限界があり、グローバルな連携が必要である。例えば、北大西洋条約機構（NATO）と日本の間で、サイバー空間を含む安全保障上の協力関係を構築する動きがある<sup>99)</sup>。関係者間で信頼関係を構築し、情報共有をはかり、協力体制を築くことでより効果的な対策を講じることができる。そのためには、例えば国立の研究機関等が持つ中立性を活かし、海外の研究機関等との緊密な連携により、サイバーセキュリティ研究開発の世界的中核拠点を目指していくことも重要と考えられる。

## 2.6. 量子 ICT

1.2章でも述べた通り、日本を含む世界各地域において、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

量子計算機を実装し、従来の計算機よりもはるかに早く情報処理を実行したと主張するGoogleの論文や、IBMにより近未来における量子計算機大規模化のロードマップが提示されたことによって、世界各国で多くのプロジェクトが立ち上がっている。先日、日本においても一般利用が可能な量子計算機の実装が報道されるに至った。これらはNISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）と呼ばれる範疇に入る量子計算機であり、商用公開などでその実験的な利用が可能になっているが、実用的に意味のある量子計算機という観点では依然として十分な性能が得られていない。量子情報処理の基礎単位である量子ビットの実装には、「任意操作を実現可能にすること」、「コヒーレンス時間を十分に長くすること」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。なお、上記性

能改善の努力によって、誤り訂正機構実装に必要な物理量子ビット数に関して、従来からの考え方を見直されるほどの精度改善が実現されつつあり、30年後の汎用量子計算機の実現を見据えて、熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。

量子計算手法のひとつとして量子アニーリングもある。これはカナダのD-wave社が最初に実用化した、量子ビットを使った情報処理方法である。これらは量子ビットを使う情報処理という観点から量子計算機の一つとして位置づけられる場合もあり、条件によっては計算量的に量子計算機と同等の能力を有するという理論的な考察があるが、その一方、量子アニーリングの代表的な応用として検討されている組み合わせ最適化問題などについて、従来の計算機よりも効果的に解けるかどうかは理論的に明らかになっておらず、その実効性については未知の部分が多い。

#### ②量子通信技術

量子力学の性質を使った通信である量子通信は、情報の盗聴を量子力学の原理に基づいて検知できることから、情報秘匿が求められるセキュアな通信技術として有用性が高い。特に、「量子暗号」は絶対安全的に秘密鍵の共有を可能とするもので現在すでに実用化されている。実際、ネットワーク状の量子暗号のテストベッドが、光ファイバ網上に、日本、EU、アメリカ、中国、韓国などで計画あるいは構築されており、応用研究の主軸は、量子暗号ネットワークをシステムとしてどのように機能実装し活用するかに移っている。その一方、量子暗号のやり取りが可能となる光ファイバ通信距離の限界は数百キロ程度であるとの理論考察もあり、当該技術の利用シーンを限定する大きな要因となっていることから、解決に向けた技術革新が模索されている。

光ファイバ等を用いずにレーザー光などによって直接的な通信を行う技術は、量子暗号通信の最大の技術課題である通信距離問題の解消につながるため、双方の技術補完的な運用が研究開発の方向性のひとつとなっている。この技術は衛星間秘匿通信において使用されており、世界で初めて衛星を使って量子暗号通信を実現した中国に技術的、経験的な観点から一日の長がある。

#### ③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。超伝導現象を利用して実現する超伝導量子ビットは、その優れた集積性とスケーラビリティから、イオン、光、 спин、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。

量子通信で利用される鍵となる技術である単一光子生成・検出技術は極めて重要であることから、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することに加え、素子を基板上に集積化する技術も開発が進みつつあることから量子情報通信分野において広く普及しており、実用化に向けた研究開発が進行中である（図 2.6-1）。

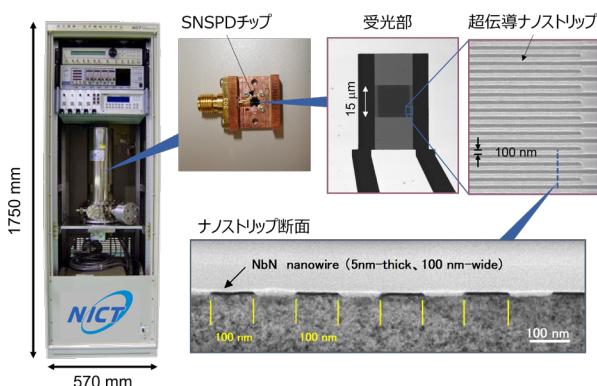


図 2.6-1 NICT で開発された単一光子検出器

## 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、スピニン、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計算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。

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、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、理論的には、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

量子通信の実行可能距離を延ばす手段として提案された手法（量子中継）の実現に向けた実験的研究が各方面で実施されている。その実現には、量子情報のまま処理できるノード（量子ノード）の実現が必須であり、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。応用に向けた研究としては、量子暗号ネットワークを利用して実用機能を実装しようという試みがある。具体的には、中間ノードを経由する「鍵リレー」を行うことで長距離にて鍵共有を可能にするような単純なものから、秘密分散やネットワーク符号などの古典的なネットワークプロトコルに量子暗号が供給する秘密鍵を組み合わせることで、従来の古典的なプロトコルでは実現できなかった安全性を実現するものまで多様な研究の方向性がある。

光ファイバーを用いた量子情報通信技術に関する基礎的研究として、透過率の高いファイバやノイズの小さな受光素子など基礎的なデバイス性能向上に向けた努力も進められている。これらは、量子通信可能な距離の理論限界向上に有用であるだけでなく、通常の通信技術の性能向上にも繋がるものであり地道に取り組むべき課題である。

衛星を使った量子通信技術については、衛星打ち上

げが非常に高コストであるため、特定の研究拠点に限定されてしまっているが、着実に開発が進められている。例えば、中国では2017年に衛星量子暗号の実験成功を報告しており、ヨーロッパでは、EUが独自に2025年に軌道上試験を実施、2028年にサービス開始する計画を発表している。

### ③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、その優れた集積性とスケーラビリティから、超伝導を用いたデバイス技術に一日の長がある。超伝導量子ビットについては、量子状態の保持時間（コヒーレンス時間）の延伸が長年の課題であったが、近年はタンタル（Ta）や窒化物超伝導体を電極材料とすることで0.1ms以上（コヒーレンス時間）を安定して実現できるようになってきた。一方、素子ごとに回路パラメータを任意設定できることも超伝導量子ビットの利点であることから、できあがった素子に個別にレーザーを照射（ポストアニール）して素子特性を調整する手法の開発も進んでいる。また、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、サーチュー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）。

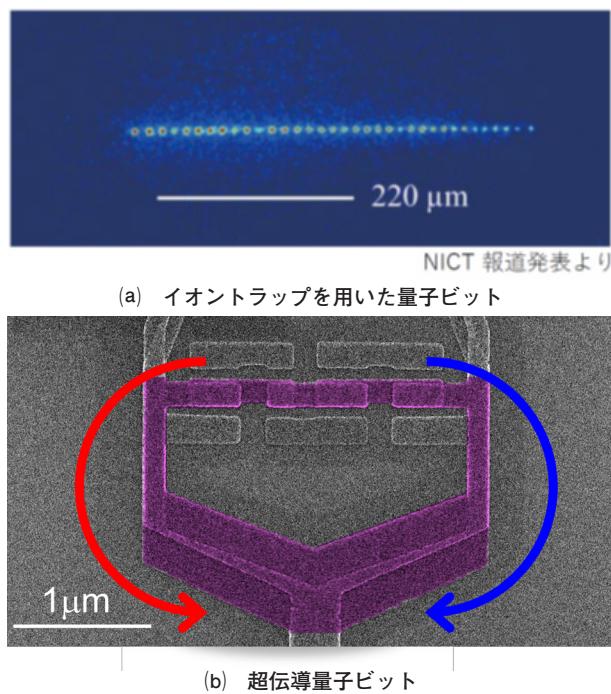


図2.6-2 量子計算機や量子中継で用いる量子ビットの例

### 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。現時点での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

地上の光ファイバーによって世界規模の量子暗号ネットワークを実現するためには、量子中継技術の確立が重要である。その実現のため、1) 単一光子生成デバイスの実現、2) 量子媒体変換技術、3) 量子ビットに対する簡単な量子操作を正確に実装する技術、などの技術確立が重要である。

一方、衛星を使った量子暗号技術は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) 衛星にセキュア性を求めるないこと、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。

#### ③量子デバイス技術

超伝導量子ビットについては、1ms以上のコヒーレンス時間を安定して実現できれば、ゲート fidelity のさらなる改善が可能であり、計算精度の飛躍的な向上が期待される。一方、回路パラメータのばらつき低減も重要で、レーザーによるポストアニールだけでなく、抜本的にばらつきを抑制する作製プロセスの開発も重要となるであろう。これらの実現には、回路方式だけでなく、材料プロセスから取り組む必要があり、そのような研究開発の先に実用的に意味のある計算において「量子」を用いる優位性が実証される日も

遠くないだろう。一方、汎用量子コンピュータの実現には、NISQ コンピュータよりもさらに素子数を4～5桁増やす必要があるが、解決すべき様々な問題が山積しており、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）。

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」していく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にまで来ている。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引き続き継続的な開発が必須である。

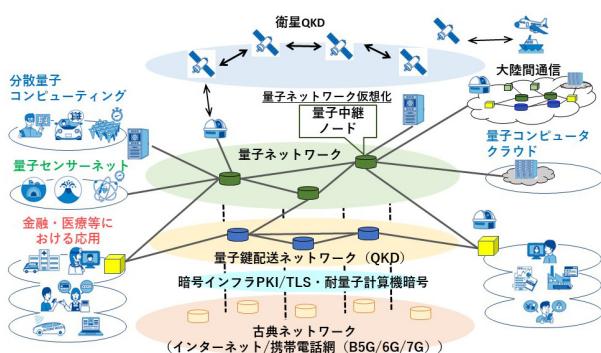


図 2.6-3 量子インターネットの将来像（NICT 量子インターネットホワイトペーパーより改変）

## 2.7. ユニバーサルコミュニケーション

人と人、人とモノ（ロボットなど）、あるいは、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未来社会はすぐそこまで来ている。人間中心の社会では、主なコミュニケーション手段となり得るのは、言葉や人の表情やしぐさ、人のとる行動などである。本章では、言語および非言語情報を含めた包括的で様々な壁を超えるコミュニケーションを「ユニバーサルコミュニケーション」と捉え、その動向について概観する（図 2.7-1）。一般に円滑なコミュニケーションを阻む壁には言語の壁、知識の壁、さらには文化の壁があり、これらの壁を乗り越えるために様々な研究開発が進められている。特に、多様な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。

昨今話題となることが多い AI 技術には識別系と生成系のものがある。前者は、文書分類のように入力データを振り分ける作業に適しており、後者は、文章生成のようにデータのサンプルを擬似的に生み出す作業に適している。最近は、生成系の AI 技術の性能が格段に良くなってきた。それに伴い、ユーザの支持を得て、広く商用でも使われるようになりつつあり、生成系の AI 技術を活用した新しいサービス（メール自動生成やデザイン支援など）が次々と生まれている。

生成系 AI の代表例である対話 AI のひとつ ChatGPT については、早期に 20 社超の大企業が ChatGPT を活用したサービスの提供を発表したという報告もある。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。

また、近年、音声やテキストだけでなく、画像や各種 IoT データなどのマルチモーダル情報を扱う AI 技術も注目されており、扱われる情報は、音声、テキスト、画像等それぞれ単独の情報だけではなく、複数組み合わせたものへと多様化している。実世界（フィジカル空間）と仮想世界（サイバー空間）が高度に融合した未来社会においては、実世界をモデリングして（付録 C-3-1 参照）サイバー空間に再現し、そこで分析結果を実世界にフィードバックして、コミュニケーションやその先の行動の変容につなげるデジタルツイン（付録 C-3-2 参照）が実装され、都市計画の立案などに活用されている。そこでも、マルチモーダル情報を扱う AI 技術が活用されつつある。

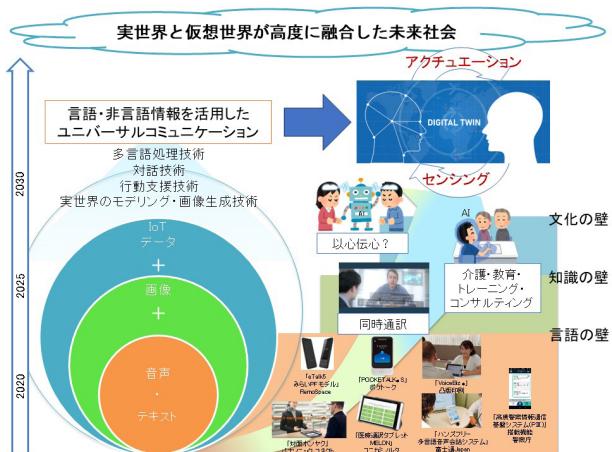


図 2.7-1 未来のユニバーサルコミュニケーション

一方で、AIが、本物と区別がつかないような偽情報や、偏見のある情報、プライバシーや著作権等を侵害する情報等を生み出してしまうという問題も指摘されている。AIがそれらの情報を適切な情報と誤って学習し、そのAIを使ったユーザにより不適切な情報がさらに拡散されるといったことや、詐欺やなりすまし等に悪用されるといった行為が蔓延し、社会の混乱につながることが危惧されている。さらには、どういった学習データを用いて学習したのかがわからないAIが生成した身元不明の文章が溢れることで、個人の意思決定をゆがめる恐れがあることや、産業発展や技術革新が重視され人権や民主主義にAIが与える影響についての議論が実質的にされていないといった指摘もある<sup>100)</sup>。

生成系のAIに対する世界の動向としては、偽りや偏見の制限や、プライバシーや著作権の侵害等の制限が難しいことを理由にChatGPTの利用を禁止する発表や、EUにおけるAIの倫理規制の整備等、慎重な動きもある。我が国としても、社会の混乱やビジネスの遅延に陥らないようにするために、技術的検討のみならず、倫理的な規範やガイドラインの策定や法的な枠組みの整備を進める必要がある。特に、データの収集やAIが生成したコンテンツの利用において、透明性や公平性、多様性の確保、責任の明確化、個人情報や著作権等の権利保護の検討が重要となる。

以下では、特に、言葉に関する技術の研究開発動向に着目し、①コミュニケーションの基本となる多言語処理の技術、②それらを支える大規模言語モデル及びそれらを活用した対話技術を取り上げて概観する。

### 2.7.1. 取り巻く環境

#### ①多言語処理技術

##### (音声認識・合成、機械翻訳、同時通訳)

音声認識、合成については、ともに2010年頃までは統計的手法が主流であったが、深層学習技術の台頭により、統計的手法の一部機能をニューラルネットに置き換えたハイブリッド技術が広く普及した。その後、2016年頃から全ての音声認識、合成処理をニューラルネットで実施するEnd-to-End技術の研究開発が主流となった。深層学習の台頭以降、音声認識においてはGAFA、Microsoft、IBM等の所謂Big Techがしのぎを削って研究開発を主導し、様々な手法が提案された。また、音声検索アプリやスマートスピーカ等の様々なプロダクトが開発され、広く利用されることとなった。音声合成においては、Google Deep Mindが2016年に提案したWaveNetを皮切りに、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。また最近では、マイクロソフト社のVALL-Eのように、任意の話者の声で合成可能な複数話者モデルも提案されている。

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。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る。一方、同時通訳については、研究開発は盛んにおこなわれているが、実用化の動きは始まったばかりである。また、画像を活用したマルチモーダル翻訳については、研究段階である。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8~9割程度には達しており、精度は向上してきているが、汎用性や使い勝手の面ではまだ発展の余地がある。

#### ②大規模言語モデル（対話技術）

汎用的な大規模言語モデル(Large Language Model、以下LLM)は巨大なニューラルネットであり、大規模なテキストデータ(Webテキストを中心で、数百GB~数TB)を事前に学習させて利用する。最終目的となる様々な言語処理タスク(質問応答、テキスト生成、機械翻訳等)用の学習データを用いてさらに追加で学習(ファインチューニングと呼ばれる)して、それらのタスクを高精度で行わせることができる。LLMは、一つ

のモデルに基づいて様々なタスクが実行できることからファウンデーションモデル（基盤モデル<sup>101)</sup>）とも呼ばれ、基本的なアーキテクチャとして Transformer<sup>102)</sup>と呼ばれるものを踏襲している（付録 C-3-3 参照）。

従来、言語処理の研究開発では、それぞれのタスクごとにニューラルネット等の機械学習器を設計し、対象のタスク専用のデータで学習を行い、タスクを実行してきた。LLM は、言語処理のありとあらゆるタスクが一つのモデルで高い精度で可能となる夢の技術として期待されている。また、LLM は、人間が使う自然言語のみならず、プログラミング言語も対象に学習することが可能で、プログラムのコードを生成できるものもある。特に生成系の LLM は、プログラムのコード生成も含め様々なタスクを実行可能なことから、ホワイトカラーの仕事のやり方に革命を起こすという点でも注目を集めている。しかしその一方で、識別系の LLM に比べて、実利用の点で後述するようなリスク要因がある。

LLM として最初に著名になったのは、GPT-3 (1,750 億パラメータ、Brown ら<sup>103)</sup>）である。その能力の高さ、短期間で億を超えるユーザを集め、社会現象を巻き起こしている ChatGPT<sup>104)</sup> もこれの改良版と言える。また、よりパラメータを増やし、ニューラルネットをより巨大にすることでより高精度なもの実現を目指すことが一種のトレンドとなり、GPT-3（付録 C-3-4）の後を追う形で、Google の PaLM (5,400 億パラメータ、Chowdhery ら<sup>105)</sup>）や中国で開発された悟道 2.0<sup>106)</sup> (1兆 7,500 億パラメータ) などより巨大なモデルも登場している（図 2.7-2）。

ChatGPT のように LLM を活用したチャットボットは対話 AI とも呼ばれる。アプリとしては目新しい訳ではないものの、ChatGPT は一般ユーザが広くその有用性を認めた世界初の対話 AI と言える。

2.7 節冒頭で述べたように生成系の AI には技術的課題が存在し（付録 C-3-5, C-3-6 も参照）、実際、社会への様々な悪影響を指摘する声も多数存在するが、Microsoft は 2023 年 2 月に ChatGPT を同社の検索エンジン Bing に組み込むことを発表し、レビュー版の公開を開始した。Google も Bard を用いた類似のサービスを開始した。加えて、本稿執筆時に OpenAI より GPT-4 が発表され<sup>107)</sup> ChatGPT や Bing で利用可能となっている。また、ChatGPT は API を通して利用することも可能で、様々なサービス、アプリが誕生して

おり、日本企業での活用も始まっている<sup>108)</sup>。他にも多数の民間企業や研究機関が同様の試みを発表しており、LLM を活用した対話 AI に関する研究開発は熾烈を極めている（付録 C-4-5 も参照）。

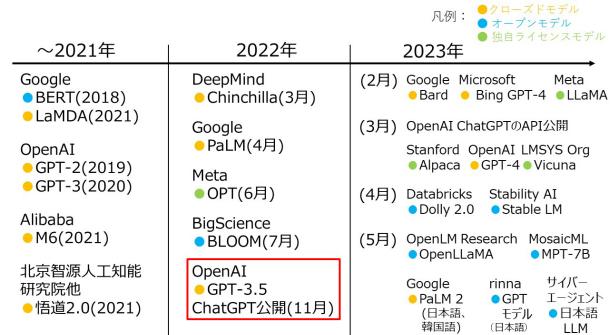


図 2.7-2 近年の LLM に関する動き

### 2.7.2. 現在の研究開発動向

#### ①多言語処理技術

##### （音声認識・合成、機械翻訳、同時通訳）

音声認識においては、Big Tech に加え、アジアの Baidu、iFlyTek、LINE（ワークスマバイルジャパンが買収）等の台頭があり基礎技術の研究開発競争が激化している。また、国内においては、NTT、Yahoo Japan 等が気勢を上げている。技術面では話者識別、言語識別や、様々な音響信号処理技術等を End-to-End 手法の枠組みで取り込んだ複合的な音声認識技術が提案されている。また、Google、Microsoft 等が提供する有料音声認識 API の他、OpenAI Whisper や、Reason Speech 等のような無料で利用できる高精度音声認識 API の公開が続いている。プロダクト開発においてもますます競争が激化している。

音声合成においても Big Tech<sup>109)</sup> の他、韓国の Kakao Enterprise 等がしのぎを削って研究開発を推進している。特に単一話者および複数話者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。

機械翻訳については、現在、英独などの対訳コーパスが大量にある言語間については、NMT を大規模化することにより、高精度機械翻訳が可能になっている。一方、専門分野などの分野固有の対訳コーパスが必要な場合については、翻訳メモリを検索することにより機械翻訳精度を向上する研究がある。また、データサンプルが少ない低資源言語間の翻訳については、BART などの大規模言語モデルをファインチューニングして翻訳モデルを作成する研究がある。一方、文書などの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。さらに、イメージやビデオの情報を併用したマルチモーダル機械翻訳は研究段階にある。

## ② LLM（対話技術）

LLMを事前学習し、ファインチューニング等をするためには膨大な計算機資源が必要であるため、ChatGPT等をAPI経由で自らのサービスに接続する他は、誰もが容易にLLMを活用したアプリケーションを開発できる状況とは言いがたい。また、人工知能の実現といった観点からLLMの大規模化や、報酬に基づく強化学習だけでは不十分であることも指摘されており<sup>110)</sup>、新たなアーキテクチャ、学習方法等の研究開発もすすめられている。

LLMを構築する研究開発に関しては、これまでの延長線上としてさらなる大規模化も進むと考えられるが、商用サービス展開時の運用コスト等を考えた場合には、誰の手にも届くような規模でより高性能なモデルが求められており、そうした中規模なLLMの構築も進展すると考えられる。Metaが2023年2月に発表したLLaMA<sup>111)</sup>などがその方向性を示していると考える。たとえば、LLaMA-13B（130億パラメータ）はほとんどのベンチマークでGPT-3（1,750億パラメータ）よりも高い精度を示した。このLLaMAが研究用途で公開されたため、これをファインチューニングしたVicuna（130億パラメータ）やAlpaca（70億パラメータ）が相次いで発表された。商用利用可能なオープンソースのLLMという点では、BLOOM（1,750億パラメータ）が著名であるが、同じく2023年に入ってからDolly2.0（120億パラメータ）、StableLM（70億パラメータ）、OpenLLaMA（70億パラメータ）など、商用利用可能なLLMの開発、発表が続いており、今後こういったオープンソースLLMの開発は加速していくと考えられる。日本国内でも、rinnaが36億パラメータの日本語LLMを、サイバーエージェントが68億パラメータの日本語LLMをそれぞれ商用利用可能なライセンスで公開している。NICTでは、学習データ

は大きくないが、400億パラメータのGPTを構築済みであり、今後学習データやモデルの大規模化を検討している。

### 2.7.3. 将来展望

#### ①多言語処理技術

##### （音声認識・合成、機械翻訳、同時通訳）

高精度なEnd-to-End音声認識を実現するためには、音声とそのラベル（音声の書き起こしテキスト）の対である音声コーパスをこれまで以上に大量に収集、整備して、音声認識モデル学習を実施する必要がある。大量の音声コーパスの整備には膨大な金銭的、人的コストが必要となり、自ずと限界を迎えることが容易に予想される。この問題において、ラベルの無い大量の音声データを用いたモデル学習に関する研究が大きなトレンドとなっている。方法としては、音声認識により生成された疑似ラベルを利用するSemi-supervised learningと、大量のラベル無しデータを用いて音声特徴抽出器を事前学習し、用途に応じて少量のラベル有りデータでチューニングを行うSelf-supervised learningの2種類が主流である。これらは今後の音声認識の発展において有望な技術である。

一方、音声合成においては同時通訳のための話速制御技術等はどの機関も着手していないため、重点的に研究することが重要である。また、音声認識用コーパスを用いた複数話者End-to-endモデルにより原音と同等の認識率が達成できることがわかった。これはつまり、音声認識の学習データが（実音声だけでなく）モデルからも生成可能であることを意味する。ニューラル言語生成モデルにより自然なテキストは無限に生成可能であるため、未知語等にも対応可能な音声認識用学習セットの生成が可能となる。ただし、VALL-Eのように誰の声でも高品質に合成できるようになると、合成音声をセキュアに利用するための電子透かし等の技術が今後重要になってくる。

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」<sup>112)</sup>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。更に、機械翻訳の精度は向上してきたが、現状の NMT の中には、翻訳結果の正確性を保証する仕組みはないので、NMT を使うユーザーが、正確性を自ら確認する必要がある。現状においては、MT 出力の訳文を、原言語に逆翻訳し、それと入力原文を比較することにより、機械翻訳結果の正確性を確認する方法が使われているが、将来的には、それ以外の様々な方法により、外国語のわからないユーザーであっても、機械翻訳結果の正確性を確認する方法を研究開発していく必要がある。また、同時通訳においては、（講演スライドなどの）画像情報なども利用したマルチモーダルな機械翻訳が研究されるだろう。

### ② これからの LLM およびその応用（対話技術）

ChatGPT は、様々な自然言語処理のタスク（検索、要約、質問応答、ナラティブの生成等）をシンプルなプロンプト（システムに実行させる命令や、命令の実行を助けるための例示）を与えるだけで実行できるという LLM の応用の可能性を示した良い例と考えられる。ChatGPT が示した LLM を活用した対話 AI の可能性は、興味深いものの、生成結果に虚偽や倫理的に問題がある表現が含まれる可能性がある以上、生成結果がそのまま利用できるとは限らない。また、人間ではなく、LLM が生成したテキストを識別し、人間が書いたテキストのみを提示する技術や人間が書いたテキストに立脚したテキストのみを自動生成する方法等も含めて、意図せず不正確、あるいは不適切な表現が生成される課題の解決に向けた研究開発や、より特定の課題（例えば映画のシナリオの自動生成）にチューンされた LLM や、動画等他のモダリティも同時生成できる LLM の開発も進むと考えられる。2023 年 3 月に発表された GPT-4<sup>113)</sup> では、6 ヶ月の期間を費やし、より安全に利用できるようになったと報告され、実験的ではあるが画像を入力できるようになった点も発表されている。

こういった LLM を活用した対話 AI が広まるにつれて、このような技術を社会の中でどのように扱うべきかと言った議論も深まると考えられる。現時点では、

ChatGPT と人間の専門家による質問応答の結果を比較した研究<sup>114)</sup> も見られるが、今後このような比較のためのデータや、それを用いた倫理等も含んださまざまな観点からの評価手法等も発展する可能性がある。

また、対話 AI はさまざまなアプリに組み込まれることが想定される。たとえば、対話 AI が資料作成アプリに組み込まれた場合には、それを利用することで情報の重要性や意図などの機密情報が対話 AI のプロバイダーに筒抜けとなることが想定される。また、対話 AI により生成されたプログラムコードは、他者の特許や著作権を知らないうちに侵害している可能性もあり、その利用には注意が必要である。

さらに、対話 AI によるフェイク情報が Web 上に置かれることで、それを用いて事前学習した LLM を用いた別の対話 AI が同様にフェイク情報を生成し、さらには、これまで期待するように動作していた正誤判定等も行えなくなる事が懸念される<sup>115)</sup>。その結果として、Web 全体にフェイク情報が蔓延する可能性もある。学術面においても、例えば 2023 年 3 月の日経新聞の報道<sup>116)</sup> にあるように、AI が生成するそれらしいテキストが学術論文等にまぎれ人間の科学的知識がゆがむことも懸念される。

これらの事から、対話 AI の利用方法や利用に関する規制などさまざまなルールの整備も必要となってくると想定される。実際に米国では、高度な AI システムの訓練を少なくとも 6 ヶ月間中断することを求める書簡が 2023 年 3 月 22 日に公開され賛同者を募り、2023 年 3 月末時点でイーロンマスク氏のような著名人も含め 1,000 人以上が署名しているという報道もある<sup>117)</sup>。

### ③ おわりに

本章では主に言葉によるコミュニケーションを支援する技術に焦点を当ててその動向を概観したが、コミュニケーションを広く捉え直すと、さらなる可能性が考えられる。例えば、脳情報通信技術（2.8 章）の発展により、人の五感を通じて脳で処理された多様な情報をマルチモーダル情報のひとつとして考慮できるようになれば、さらに高度なコミュニケーションが可能になると期待される。言葉によるコミュニケーションの先には、高度な ICT 技術をより人間の中に取り込んでいくことにより、例えば脳と脳同士のコミュニケーションによる以心伝心の世界も現実となるだろう。

## 2.8. バイオ ICT と脳情報通信

近年、バイオインフォマティクスのように生命科学と ICT の融合領域での研究開発が盛んに進められている。また、2.7.3章でも述べた通り、AI 技術の進歩によって人と AI が文章を通じたコミュニケーションが取れるようになりつつあるだけではなく、より生命科学と ICT が密接に融合していくことで新しい分野の開拓が期待される。本章では、生命科学と ICT の組み合わせによるバイオ ICT 分野、およびその中でも特に人間の脳に注目した脳情報通信技術の動向について概観する。

### 2.8.1. 取り巻く環境

AI の急速な技術革新によって引き起こされる不安や恐怖の念は、人々の自然な反応として顕在化している（図 2.8-1）。特定の機能において AI は、既に人間の能力を超えているものもあり、将来的にはより高度なタスクをこなし、人間の思考や感情を模倣する可能性もある。そのような進展によって、人間の基本的人権や個性が侵害される可能性や、人間の存在意義や本質に関する疑問が生じる。これらの問いかけは社会的に重要なものとなっている。



図 2.8-1 進化する AI と超高齢社会に対する不安

また、AI の進化には安全上のリスクも指摘されている。AI システムが誤った判断を下すことで重大な事故や損害を引き起こす可能性や、悪意を持つ者が AI を悪用することで新たな脅威が生じる可能性である。倫理的および社会的な問題も懸念される（参考：AI 倫理に関する論文<sup>118)</sup>）。個人のプライバシーの侵害や、人種や性別などにバイアスを持った意思決定を行なってしまう可能性である。このような AI が持つ課題を洗い出して解決を目指す ELSI の議論が必要と

なってきており、技術の進歩と社会のニーズの両方を考慮しながら、AI から享受する利益を最大化し、リスクを最小化することが求められている。

AI に関連した技術的課題は、膨大な計算のために消費するエネルギーと排出されるエネルギー、さらにデータストレージのための膨大な空間と電力の課題である。AI がより複雑な問題に挑むにつれ、AI システムを訓練するために必要な計算量は、毎年 10 倍に増加している。この課題の解決法として、デバイスのエネルギー効率の向上を目指す研究開発と並行して、計算能力、リソース、サイズ、重量、消費電力 (SWaP) の間のトレードオフを生命体から学ぶ研究にも期待が持たれている。

国民が抱いているもう一つの不安は、現在日本が迎えつつある超高齢社会に関するものである。自分の認知能力が低下することへの恐怖とともに、高齢になっても健康で活動的に生活したいという願いがある。これを反映して、国民は健康寿命の延伸や予防医療の重要性に高い関心を持ち、健康的なライフスタイルの中で、社会参加ができる状況を望んでいる。ICT や介護ロボット、スマートヘルスケアデバイスなどの技術によって、介護や医療の負担が軽減され、高齢者の生活の充実と支援が進むことを国民は期待している（図 2.8-2）。この超高齢社会においても AI は大きな役割を果たす。

しかし、SF 映画がよく取り上げるように、AI の高度化によって AI が意識を持つことや、意識をコンピュータ上へ移行するというテーマに対する人々の警戒心は大きい。無機質な AI に対して感じる不安の根源の一つは、AI に代表される知的なマシンには、人間ならば自ずと持つはずの行動規範が存在しないことであろう。現代人の行動を生み出す源泉は“こころ”である。生命科学と AI 研究の研究分野において、“こころ”は研究の中心的なテーマではない。したがって、これらの研究開発だけでは人々の心豊かな生活を保障することは難しい。将来目指すべき人間中心の社会がどのような技術に支えられるのかという問い合わせの答えは、ヒトの脳を主たる対象とした広義の脳科学（脳神経科学、心理学、人間科学、生命科学、哲学）が提供してくれる。



図 2.8-2 生活を支援する技術への期待

現在、Society5.0<sup>83)</sup> を謳った人間を中心とした社会を実現するための研究開発として、国内外で「ニューロテック・ブレインテック」や「ニューロモルフィック」に期待が集まっている。「脳を知ることによる効率的な情報通信や呈示」「脳に倣ったAI、省エネルギー情報処理、無線通信」「脳情報を用いた次世代インターフェース」の観点から各種の基礎研究、技術開発が国内外で進んでいる。また、省エネルギーの情報処理技術への手がかりとして生命機能の研究への回帰も見られ、ここではアカデミアのみならずスタートアップを含む民間企業も参入している。

10年程度のスパンで語る技術開発は、それまでの数十年に及ぶ研究成果に基づいているものが多く、かつ分野融合によってブレークスルーしたものが多い。そこで、今後の10年以降に出現する「人間中心の研究開発」を予測するには、現在の当該研究開発動向のみならず、様々な分野の基礎研究のポテンシャルにも目を向ける必要がある。

### 2.8.2. 現在の研究開発動向

脳情報通信融合研究とバイオICTの研究開発を取り巻く環境を3つの関連分野で考える。人工知能関連研究、脳機能解析を含む生命科学研究、そして脳機能計測装置を含むICT研究である。

#### ①人工知能関連研究

トランスフォーマ<sup>102)</sup>による生成AIの急速な進化によってAIは高度な言語能力を獲得し、人々が行ってきた知的作業を幅広く担い始めている。すでに、単機能AIは、力任せの大規模データ探索ではない高い学習能力を示して、人間のチェスの世界チャンピオンを破り、囲碁のプロ棋士を破る高い能力を示した。大

規模データを分析する深層学習が画像認識や音声認識などのAI活用に大きな進展をもたらした。生命科学の長年の課題であったタンパク質構造予測さえも、アミノ酸の一次配列から高い精度で構造予測ができるようになり、生命科学、特にタンパク質構造研究を大きく変貌させた。

#### ②生命科学研究

バイオインフォマティックスの進展によって、生命科学はデータ駆動型科学と手を結び、光学顕微鏡やクライオ電子顕微鏡などの観察装置・技術の発展と併せて飛躍的発展を遂げている。タンパク質構造研究はクライオ電子顕微鏡の高性能化によって高い空間分解能でタンパク質の3次元構造を解き、そのダイナミクスを分子動力学計算によって予測できる。また、蓄積した構造データを用いた機械学習によって、アミノ酸の一次配列からタンパク質の3次元構造を予測することができるようになった<sup>119)</sup>。

生物実体を用いた研究を支える基盤技術としての光学顕微鏡技術が著しい進展を見せており、高空間分解能で3次元的に細胞等を観察・操作する技術は、生物実体深部にまで拡張されている。加えて、ゲノム編集技術が新たな生命の創造を可能にし、iPS細胞研究は人工臓器技術に大きな革命を引き起こしつつある。遺伝子工学技術は生命科学の有用なツールとして分野を大きく発展させており、派生技術であるオプトジェネティクス<sup>120)</sup>は、特定の神経細胞を特定の時期に刺激できる技術として神経生理学研究において必須のものとなった。また、人工関節や人工内耳技術に代表される機能補完の生命医科学技術は、材料科学との協業によって高性能で強靭で耐久性のある代替器官を次々と生みだし、人々の健康寿命を著しく延伸している。マクロレベルの代替器官にとどまらず、細胞機能を模倣したマイクロ粒子技術や人工細胞技術などが出現して、分子間相互作用を情報通信として捉える新たな通信の概念が定着しつつある。

脳神経科学においては、実験動物を用いた研究で、脳内ネットワークの詳細な記載を行うコネクトームの報告が続いている<sup>121)</sup>。モデル生物のキイロショウジョウバエでは、脳を構成する全ニューロンの接続関係を網羅的に記載したコネクトームデータベースが公開され<sup>122) 123) 124)</sup>、遺伝子操作技術や仮想現実(VR)技術を用いた行動実験や深層学習を活用した行動解析

技術の導入も相まって、神経系内部における情報処理を具体的な回路の特性に即した解析が可能になってきた。オプトジェネティクス的手法の導入により、ニューロンの活動と行動が関連付けられるようになっている。学習・記憶の分子メカニズムの解明も進んでいる。遺伝子スイッチの他、光応答性チャネルタンパク質を特定細胞で発現する技術によって、外部から光照射によって特定の神経を局所的に刺激することもできる。生体の行動を外部から制御できる技術であり、将来的には幅広く応用される可能性がある。既に、ショウジョウバエやマウスの行動を外部光刺激で変容させる研究が行われている。昆虫の神経系は小規模ながらも多彩な適応的行動を高速に生み出すことが可能であり、ランドマークを利用したナビゲーションや行動選択の中核機構など情報処理の工学的応用を目指す試みがなされている<sup>125)</sup>。近年のこうした取り組みは、IoT やエッジデバイスに代表される、より電力コスト性能に優れた情報通信技術に対するニーズの高まりを背景として活発化している。大きさ、重量、エネルギー消費の制約の中で機能するあらたな AI を作るために昆虫の目を向けたもので、小型昆虫の統合された感覚および神経系を理解して、コンピューター・ハードウェアにマッピングして、その機能をエミュレートするものである。

一方、ヒト脳を対象とした研究は大型計測装置とその解析技術の高度化によって、ヒトの高次脳機能の本質に迫る研究が加速している。大型計測装置 MRI は、高磁場化が進み 時空間分解能が益々向上している。同時に BOLD 信号以外の非 BOLD 信号を用いた神経活動計測の研究開発が進む<sup>126)</sup>。これによって、様々な脳情報処理のメカニズムの数理モデル化が進んでいる。

### ③ ICT 関連研究

ICT 研究開発では、IoT に代表されるセンサーネットワークとそれを支える高速・大容量通信ネットワークが整備されてきている。通信機器は小型・可搬化

して、いつでもどこでもネットワークに接続する環境が整備されつつある。このような ICT の発展に呼応して、脳機能と ICT の融合領域である「ニューロテック、ブレインテック分野」では、次のような技術が開発されている。脳波解析技術では、医療分野での診断や治療に役立てられるほか、脳活性化ゲームや生体認証などの分野でも利用されている。脳－コンピューターインターフェース技術（Brain-Computer Interface、Brain-Machine Interface 技術）は、主に脳波解析技術を応用して脳活動をコンピュータと接続し、ユーザの意思によって様々な機器を操作する研究が試みられている。医療面での応用として、患者が義手や義足を操作するためや、e スポーツ分野で脳の活性化を図るために利用されている。ニューロマーケティング技術は、脳情報解析技術を利用して、消費者の行動や意識の根源を分析し、市場調査や広告効果の分析に応用する。商品や広告の企画段階から顧客の心理を読み取り、より効果的なマーケティング戦略を立てることができるようになっている。ニューロフィードバック技術<sup>127)</sup>では、脳情報解析技術を応用して、被験者の脳の活動を測定し、視覚や聴覚情報として被験者にフィードバックすることで、トレーニング効果を高め、意識に上らない脳活動を活性化することで、認知機能の向上やストレス解消に役立てることが試みられている。また、生体機能と機械学習の組み合わせによって、におい・味の判別や微量な生体活性物質を検出する化学物質センサーの構築が、基礎研究から民間まで幅広く行われるようになってきている。

#### 2.8.3. 将来展望

周辺分野の加速度的進展を考慮し、かつバイオ ICT と脳情報通信融合研究分野はこれら周辺分野との積極的な融合が進みシナジー効果が生まれ、加速度的に発展することが想定される。そこで、2030 年以降の将来展望を考察したい（図 2.8-3）。

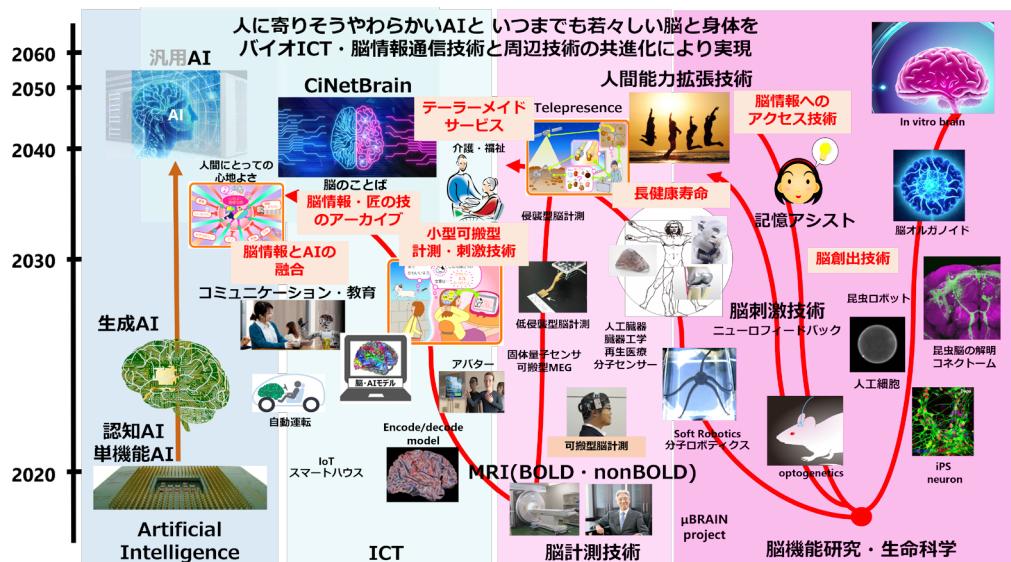


図 2.8-3 バイオ ICT・脳情報通信技術の将来展望

## ①情報通信・AI分野の将来展望

ニューロテック・ブレインテックにおいて進んでいく「脳情報通信技術」やバイオ ICT の研究開発の展開は、次の 10 年では、次のようなものが挙げられる。

- ・脳情報解読や脳内情報表現の解明によって、脳に最適な情報を効率的に伝える情報通信や情報表示の技術が開発される。加えて、微量物質検知可能なバイオセンサー等を活用した双方向性の五感情報通信が発達する。効果器へのアクセスが可能となり、脳の特性を利用した運動機能改善や機能低下防止トレーニングなど、言語によらない行動変容を利用する技術が進む。
- ・ヒトや昆虫などの脳機能を取り入れた次世代 AI 技術と脳融合 AI が出現する。脳や生命体に倣った次世代省エネ情報処理技術や次世代パルス無線通信技術が出現する。これは、ニューロン活動のパルスベースの情報通信を範としたもので、IoT のセンサーネットワークでの使用が期待されている。また、化学物質を情報担体として捉える分子通信技術の実応用が始まる。
- ・脳波による BMI 技術とニューロフィードバックが一般化して、脳波を利用した学習促進や集中力向上が広く利用されるようになる。低侵襲の皮質脳波等による BMI が双向化するとともに、医療領域から一般利用へと転換を始める。

## ②生命科学研究分野の将来展望

生物実体を用いた研究では、iPS 細胞を用いた細胞工学が発展し、様々な臓器が再構築されつつある。現在でも脳オルガノイド<sup>128)</sup>が開発されており、このオルガノイドに電気刺激を与えたときに、どのような学習能力を発揮するかを評価する研究も進んでいる。将来的には試験管内 Brain が作られる可能性もある。また、ゲノム編集技術によって、任意の遺伝子を細胞に導入してそのタンパク質を発現することも可能となり、細胞工学の可能性は大きく広がっている。このような iPS 細胞を含む細胞工学技術の発展は、やがて臓器バンクのような医療応用に展開し、健康寿命の延伸や、代替臓器による不老不死への挑戦にもつながっていくものと考えられる。また、ボトムアップで人工的に細胞を作り上げる技術が進み、過酷な環境でも生存可能な細胞としてマイクロロボットとしての活用が進む。

脳機能計測技術に関する研究開発では、小型・可搬・高精度計測装置の開発が急速に進む。脳波計ではより高精度のものが出現する。現在は非侵襲のものが主流であるが、やがて低侵襲の脳波計測装置が一般に受け入れられて、広く使われるようになる。また、量子磁気センサーの開発<sup>129)</sup>が進み、可搬型の MEG (脳磁図計測) が可能になる。計測することが主流であった脳機能に対して、刺激装置の発展による機能アシストの考え方方が加わる。TMS に加えて tDCS や tACS (経頭蓋直流・交流電気刺激法) のように、頭皮上に貼付した電極に微弱な電流を流すことで身体や脳の機能を向上させる技術が使われ始めているが、超音波応

用技術や光遺伝学手法の活用も始まる。記憶や学習の分子メカニズムが解明されることで、局所的な神経刺激による記憶アシストや記憶回復などの治療が始まる。

### ③ 2050年の未来像

高次脳機能へ安全にアクセスする技術の開発が受け入れられ、一般に広がっていく。超高齢社会において、人々が被る認知の劣化に伴う様々な事象に対して、有効な方策を考えるときバイオICTや脳情報通信融合研究の役割は重要性を増す。

意味を理解できるようなAIがヒトの脳情報と融合して脳融合AIとして誕生する。これによって、自分の分身として、様々な作業を自分のようにこなし、支援するAIが誕生する。また、脳情報のアーカイブ化が可能になり、個人の脳情報、記憶や運動技術などを自らアップロードし、参照できるようになる。

脳計測装置は、小型化可搬化と低侵襲化、加えて刺激装置を持つシステムとして深化する。可搬化することで、身体性にアクセスが可能になり、空間認知に必須の運動から得られる感覚情報を利用できるようになり、運動補助や機能促進を加速しヒト脳との融合AIのレベルを押し上げる。人間とAIが隔てなくつながる可能性が大きくなる。

iPS細胞技術や細胞工学技術、人工細胞技術によって健康寿命は著しく延びる。人工臓器や臓器バンクなどの設置が進み身体的老化は抑えられる。これに呼応して、脳を健康に保つための技術開発の要請が高まる。安全性が確認されることで、記憶アシストやニューロフィードバックの一般利用が進む。脳情報へのアクセスやアーカイブ化によって、脳情報をシリコンのメモリー内にアップロードすることや、外部記憶装置からダウンロードすることが可能となる時代が訪れる。その記憶媒体はシリコンでできた素子や生体分子からなるオルガノイド、再構成脳が想定される。

なお、このような科学技術の発展が人間の「こころ」と調和して進んでいくためには、常にELSIに対する広範な議論を分野横断的に行う必要があり、国際連携に配慮して早期に取り組みを始めることが求められている。

## 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」「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つの俯瞰分野について、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、あくまで2023年度版の区分であり、今後はさらなる進化が予想される。

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・社会的な問題（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ならない点である。これから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し、できるだけ中立的な立場から調査、整理しているが、初めての試みでもあり、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。

## 用語集

## 付録 A

### 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

1. HAPS : High-Altitude Platform Station の略称で、地上高 20km 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搅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 3D avatars : 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 3D 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. SwaP : 計算能力、リソース、サイズ・重量・消費電力 (SWaP) の間のトレードオフを考える試み。μ BRAIN 研究は、小型昆虫の高度に統合された感覚・神経系を理解し、その素晴らしい機能をエミュレートするために適切なハードウェアにマッピングできるプロトタイプ計算モデルを開発することを目的とした革新的な基礎研究コンセプトを探求する。自然是、これらの小さな昆虫に劇的な小型化とエネルギー効率を強いており、基本的な機能を維持しながら、コンパクトなフォームファクターにわずか数百のニューロンを持つものもあります。この研究により、推論、予測、一般化、問題の抽象化を系統的に、あるいは全く新しい方法で行うことができるようになり、切実な問題の解決策を見出すことができるようになります。

<https://www.darpa.mil/program/microbrain>

2. ニューロテック・ブレインテック：脳の活動をモニタリングする技術や、脳を刺激し治療や能力向上をうながす技術、またこれらを支援する技術など、脳神経科学の知見を応用した技術の総称。
3. ニューロモルフィック：生物の脳の優れた性能を分析し、模倣することで既存のデバイスの性能を高めようとするもの。生物学的な神経計算の原理に導かれた

- ニューロモーフィック・コンピューティングは、人間の脳が世界とどのように相互作用するかをエミュレートする新しいアルゴリズム・アプローチを使用して、人間の認知に近い機能を実現する。Intel の HP による。  
<https://www.intel.com/content/www/us/en/research/neuromorphic-computing.html>
4. ソフトロボティックス：生物の身体は、やわらかく、その形態と構造、仕組み、情報処理機構のどれをとっても現在の我々が構築しうる人工物とは根本的に性質を異にしている。この生物の特長を備えた「生体システムの価値観に基づいた自律する人工物」を企図し、新たに「ソフトロボット」として定義する。  
<https://softrobot.jp/outline/>
- 新学術領域「ソフトロボット学」  
<https://softrobot.jp/>

• ソフトロボット学入門 基本構成と柔軟物体の数理  
編著 鈴森 康一、中嶋 浩平、新山 龍馬、舛屋 賢  
オーム社 ISBN 978-4-274-22998-5

5. 分子通信：生体分子を情報伝達のキャリアとして利用する新しい通信パラダイム。自然界に存在する材料からナノメートルサイズで人工的に製造したバイオナノマシンを体内に埋め込みナノマシンを用いて酵素やタンパク質などの生体分子（情報分子）を送信ナノマシンから受信ナノマシンへ伝播姿勢化学反応を誘起して通信を実現するもの。

Molecular Communication, T. Nakano,A.W. Eckford, T. Haraguchi, Cambridge University Press. DOI:<https://doi.org/10.1017/CBO9781139149693>

## 参考文献

## 付録B

- 1) 総務省, “令和4年情報通信に関する現状報告の概要,” Available: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nb000000.html>.
- 2) JST, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1),” pp. <https://www.jst.go.jp/lcs/proposals/fy2018-pp-15.html>.
- 3) 外務省, “ランサムウェアに関する声明,” Available: <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100396821.pdf>.
- 4) A. Kane, W. Wallach, “Artificial intelligence is already upending geopolitics,” 2022. Available: <https://techcrunch.com/2022/04/06/artificial-intelligence-is-already-upending-geopolitics/>.
- 5) Council on Competitiveness, “Innovate America: Thriving in a World of Challenges and Change,” 2021. Available: <https://blog.google/technology/ai/lamda/>.
- 6) The Times, “Higher Education World University Rankings,” 2022. Available: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/2022/world-ranking#!/page/0/length/100/>.
- 7) White House, “FACT SHEET: The American Jobs Plan,” 2021. Available: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/31/fact-sheet-the-american-jobs-plan/>.
- 8) Department of Defense, “5G Initiative: Tranche 1 Sites,” Available: [https://www.cto.mil/dod\\_5g\\_initiative\\_tranche\\_1\\_sites/](https://www.cto.mil/dod_5g_initiative_tranche_1_sites/).
- 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) “FCC Technological Advisory Council,” Available: <https://www.fcc.gov/general/technological-advisory-council>.
- 12) E. A. M. v. Dis, J. Bollen, R. v. Rooij, W. Zuidema and C. L. Bockting, “ChatGPT: five priorities for research,” Nature, 2023.
- 13) “EUR-Lex,” Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0067&qid=1679077102394>.
- 14) “Horizon Europe,” Available: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en).
- 15) “The Digital Europe Programme,” Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>.
- 16) “Connecting Europe Facility,” Available: [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en).
- 17) “The Smart Networks and Services Joint Undertaking,” Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-networks-and-services-joint-undertaking>.
- 18) “6G Flagship,” Available: <https://www.6gflagship.com/white-papers/>.
- 19) “UK to accelerate research on 5G and 6G technology as part of £110 million telecoms R and D package,” Available: <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-accelerate-research-on-5g-and-6g-technology-as-part-of-110-million-telecoms-r-and-d-package>.
- 20) Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/karliczek-wir-wollen-bei-6g-an-der-spitze-sein.html#searchFacets>.
- 21) Available: [https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/projectfolder\\_view](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/projectfolder_view).
- 22) Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>.
- 23) Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/new-quantum-project-aims-ultra-secure-communication-europe>.
- 24) Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>.
- 25) Available: <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/01/21/presentation-de-la-strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques>.
- 26) Available: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>.
- 27) Available: <https://ec.europa.eu/commission/>

- presscorner/detail/en/ip\_20\_2391.
- 28) Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/cybersecurity-5g-networks-eu-toolbox-risk-mitigating-measures>.
- 29) Available: <https://www.gov.uk/government/news/huawei-legal-notices-issued>.
- 30) Available: <https://www.gov.uk/government/news/new-blueprint-to-protect-uk-from-cyber-threats>.
- 31) Available: <https://www.economie.gouv.fr/cybersecurite-renforcement-gouvernement-protection-citoyens-administrations-entreprises>.
- 32) Available: <https://www.bmi.bund.de/EN/topics/it-internet-policy/cyber-security-strategy/cyber-security-strategy-node.html>.
- 33) Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_1682](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_1682).
- 34) Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-approach-artificial-intelligence>.
- 35) Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_5807](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_5807).
- 36) “欧州データ戦略,” Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0066>.
- 37) “デジタル市場法案,” Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1925&qid=1679312263657>.
- 38) “デジタル・サービス法案,” Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R2065&qid=1679312300258>.
- 39) “データ法案,” Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1113](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1113).
- 40) “Gaia-X,” Available: [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/project-gaia-x.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/project-gaia-x.pdf?__blob=publicationFile&v=5).
- 41) “欧州グリーン・デジタル連盟,” Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_1186](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_1186).
- 42) “Karliczek: Digitale Technik und Klimaschutz müssen Hand in Hand gehen,” Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2021/08/190821-ICT-II.html>.
- 43) “Long-awaited common charger for mobile devices will be a reality in 2024,” Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220930IPR41928/long-awaited-common-charger-for-mobile-devices-will-be-a-reality-in-2024>.
- 44) “IRIS2,” Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_921](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_921).
- 45) “欧州チップ法案,” Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_729](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_729).
- 46) “New approach to enable global leadership of EU standards promoting values and a resilient, green and digital Single Market,” Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_661](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_661).
- 47) 外務省アジア大洋州地域政策参事官室, “目で見る ASEAN—ASEAN 経済統計基礎資料—,” 2022. Available: <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000127169.pdf>.
- 48) Infocomm Media Development Authority, IMDA, “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-6g-future-and-talent--imda-partners-sutd-to-launch-the-first-6g-research-and-development-lab-in-southeast-asia>.
- 49) VnExpress, “Vietnam to begin 6G technology research and development,” 1 2022. Available: <https://e.vnexpress.net/news/business/industries/vietnam-to-begin-6g-technology-research-and-development-4417487.html>.
- 50) Ministry of Information and Communications (MIC), Vietnam, “Vietnam sets up committee on 6G research and development,” 2022. Available: <https://english.mic.gov.vn/Pages/TinTuc/tinchitiet.aspx?tintucid=152682>.
- 51) Government of India, Ministry of Communications, Department of Telecommunications, “6G VISION,” 2023. Available: <https://dot.gov.in/sites/default/files/Bharat%206G%20Vision%20Statement%20-%20full.pdf>.
- 52) Gulf News, “PM Modi unveils 6G test bed, industry hails move,” 2023. Available: <https://gulfnews.com/world/asia/india/pm-modi-unveils-6g-test-bed-industry-hails-move-1.94646978>.
- 53) Smart Nation and Digital Government Office, Singapore, “National AI Strategy,” Available: <https://www.smartnation.gov.sg/initiatives/artificial-intelligence/>.
- 54) Insights, Oxford, “Government AI Readiness Index 2022,” 2022. Available: <https://www.oxfordinsights.com/government-ai-readiness-index-2022>.
- 55) “STRATEGI NASIONAL KECERDASAN ARTIFISIAL INDONESIA,” Available: <https://ai-innovation.id/server/static/ebook/stranas-ka.pdf>.
- 56) 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.
- 57) 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>.
- 58) "Decision No. 127/QD-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>.
- 59) "National Strategy for Artificial Intelligence #AIFORALL," 2018. Available: <https://niti.gov.in/sites/default/files/2019-01/NationalStrategy-for-AI-Discussion-Paper.pdf>.
- 60) INDIAai, "30 lakh Indian civil servants will be trained in AI and other emerging technologies," 2022. Available: <https://indiaai.gov.in/news/30-lakh-indian-civil-servants-will-be-trained-in-ai-and-other-emerging-technologies>.
- 61) A. CSIRO, "Australia's quantum technology set for growth," 2022. Available: <https://www.csiro.au/en/news/News-releases/2022/Australias-quantum-technology-set-for-growth>.
- 62) Department of Industry, Science and Resources, Australia, "List of critical technologies in the national interest," Available: <https://www.industry.gov.au/publications/action-plan-critical-technologies/list-critical-technologies-national-interest>.
- 63) Department of Industry, Science and Resources, Australia, "National Quantum Strategy: issues paper," Available: <https://consult.industry.gov.au/national-quantum-strategy-issues-paper>.
- 64) University of Sydney, "Future Qubit Foundry to keep Australia at the forefront of quantum tech," 2 2023. Available: <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2023/02/21/future-qubit-foundry-at-forefront-quantum-technology.html>.
- 65) Department of Science & Technology (DST) , India, "Budget 2020 announces Rs 8000 cr National Mission on Quantum Technologies & Applications," Available: <https://dst.gov.in/budget-2020-announces-rs-8000-cr-national-mission-quantum-technologies-applications>.
- 66) NewsOnAir, "DRDO & IIT Delhi scientists successfully test QKD between two cities 100 kilometres apart," 2022. Available: <https://newsonair.com/2022/03/02/drdo-iit-delhi-scientists-successfully-test-qkd-between-two-cities-100-kilometres-apart/>.
- 67) "India, Israel hold bilateral workshop on Quantum Technologies," Available: <https://theprint.in/world/india-israel-hold-bilateral-workshop-on-quantum-technologies/905642/>.
- 68) S. Dharmaraj, "India, Finland Collaborate on Quantum Computing, Carbon-Neutral Tech," OpenGov Asia, pp. <https://opengovasia.com/india-finland-collaborate-on-quantum-computing-carbon-neutral-tech/>, 2022.
- 69) SpaceRef, "SpeQtral announces SpeQtral-1 quantum satellite mission for ultra-secure communications," 2022. Available: <http://spaceref.com/news/viewpr.html?pid=59383>.
- 70) IBM, "IBM Security X-Force Threat Intelligence Index 2023," Available: <https://www.ibm.com/reports/threat-intelligence>.
- 71) JETRO, "ASEAN 主要国における個人情報保護規程、越境データ移転やローカリゼーション要求の観点から," Available: <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2021/e178293b9f08889a.html>.
- 72) JETRO, "個人情報保護法が6月から完全施行(タイ)," Available: <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/07/4ef5dedb9ce1002e.html>.
- 73) Microsoft, "Microsoft Digital Defense Report 2022," Available: <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE5bUvv?culture=en-us&country=us>.
- 74) 総務省, "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](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin09_02000074.html).
- 75) JICA, "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," Available: [https://www.jica.go.jp/press/2022/20230221\\_43.html](https://www.jica.go.jp/press/2022/20230221_43.html).
- 76) 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/>.
- 77) 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/>.
- 78) NICT, "Beyond 5G 研究開発促進事業," Available: <https://b5g-rd.nict.go.jp/program/>.
- 79) NTT, "IOWN," Available: <https://www.rd.ntt/iown/>.
- 80) 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.scat.or.jp/THz-conso/>.
- 81) NICT, "スペース ICT 推進フォーラム," Available: <https://spif.nict.go.jp/>.
- 82) 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/>.
- 83) 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/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/).

- 84) “知識ベース知識の森、衛星通信,”電子情報通信学会, 2023.
- 85) “情報通信白書,”総務省, 2022.
- 86) “5Gの整備状況（令和3年度末）の公表,”総務省, 2022.
- 87) 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.
- 88) 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.
- 89) NICT, “NICTER,” Available: <https://www.nicter.jp/>.
- 90) NICT, “NICTER観測レポート2022,” 2023. Available: [https://csl.nict.go.jp/report/NICTER\\_report\\_2022.pdf](https://csl.nict.go.jp/report/NICTER_report_2022.pdf).
- 91) IBM, “IBM Security X-Force Threat Intelligence Index 2023,” 2023. Available: <https://www.ibm.com/reports/threat-intelligence>.
- 92) 総務省, “AIセキュリティ情報発信ポータル,” 2022. Available: [https://www.mbsd.jp/aistec\\_portal/](https://www.mbsd.jp/aistec_portal/).
- 93) NIST, “Post-Quantum Cryptography,” Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>.
- 94) NICT, “NICTERWEB,” Available: <https://www.nicter.jp/>.
- 95) 総務省, “5Gセキュリティガイドライン第1版,” 2022. Available: [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000812253.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000812253.pdf).
- 96) NICT, 神戸大学, エルテス, “プライバシー保護連合学習技術を活用した不正送金検知の実証実験を実施～被害取引の検知精度向上や不正口座の早期検知を確認～,” 2022. Available: <https://www.nict.go.jp/press/2022/03/10-1.html>.
- 97) CRYPTREC, “CRYPTREC,” Available: <https://www.cryptrec.go.jp/>.
- 98) NICT, “サイバーセキュリティネクサス,” Available: <https://cynex.nict.go.jp/>.
- 99) 日経新聞, “サイバー・宇宙で協調 岸田首相、NATO事務総長と会談,” 1 2023. Available: <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA307NW0Q3A130C2000000/>.
- 100) 朝日新聞, “生成AIは「個人の意思ゆがめる恐れ」AIと民主主義は共存できるか,” 2023.
- 101) R. Bommasani et al. “On the Opportunities and Risks of Foundation Models,” 2021. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.07258>.
- 102) 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>.
- 103) T. B. Brown et al. “Language Models are Few-Shot Learners,” 2020. Available: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8acl42f64a-Paper.pdf>.
- 104) “Introducing ChatGPT,” 30 11 2022. Available: <https://openai.com/blog/chatgpt>.
- 105) A. Chowdhery et al., “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways,” 2022. Available: <https://arxiv.org/abs/2204.02311>.
- 106) GIGAZINE, “中国の研究チームが新たなAI「悟道2.0」を発表、パラメーター数は1兆7500億でGoogleとOpenAIのモデルを上回る,” 4 6 2021. Available: <https://gigazine.net/news/20210604-china-wudao-2-ai/>.
- 107) “GPT-4 is OpenAI’s most advanced system, producing safer and more useful responses,” 14 3 2023. Available: <https://openai.com/product/gpt-4>.
- 108) 長尾雄輝, 佐藤浩実, “社員1万2500人、対話AIを助手に パナソニックコネクト【イブニングスクープ】,” 日本経済新聞, 8 3 2023.
- 109) 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>.
- 110) Y. LeCun, “A Path Towards Autonomous Machine Intelligence,” 27 6 2022. Available: <https://openreview.net/pdf?id=BZ5alr-kVsf>.
- 111) “Introducing LLaMA: A foundational, 65-billion-parameter large language model,” 24 2 2023. Available: <https://ai.facebook.com/blog/large-language-model-llama-meta-ai/>.
- 112) “翻訳バンク,” Available: <https://h-bank.nict.go.jp/about/>.
- 113) “GPT-4,” 14 3 2023. Available: <https://openai.com/research/gpt-4>.
- 114) B. Guo et al., “How Close is ChatGPT to Human Experts? Comparison Corpus, Evaluation, and Detection,” 1 2023. Available: <https://arxiv.org/abs/2301.07597>.
- 115) I. Shumailov, Z. Shumaylov, Y. Zhao, Y. Gal, N. Papernot, R. Anderson, “The Curse of Recursion: Training on Generated Data Makes Models Forget,” <https://arxiv.org/abs/2305.17493>, 2023.
- 116) A. Ahuja, “[FT] 生成AI、偽情報を再生産 世論を誘導も,” 日本経済新聞, 6 3 2023.
- 117) 白石武志, “「AI開発、半年中断を」 マスク氏ら1000人超が署名,” 日本経済新聞, 29 3 2023.
- 118) T. Hartwig, Y. Ikkatai, N. Takanashi, H.M. Yokoyama, “Artificial intelligence ELSI score for science and technology: a comparison between Japan and

- the US,” AI & Soc., 2022. Available: <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01323-9>.
- 119) J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel, T. Green, M. Figurnov, O. Ronneberger, et al. “Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold,” Nature, 596 (7873) , pp.583-589., 2021.
  - 120) K. Deisseroth, G. Feng, A.K. Majewska, G. Miesenbock, A. Ting, MJ. Schnitzer, “Next-generation optical technologies for illuminating genetically targeted brain circuits,” J Neurosci, 26 (41) :10380-6. PMID 17035522, 2006.
  - 121) L. K. Scheffer, et al., “A connectome and analysis of the adult Drosophila central brain,” 2020. Available: <https://doi.org/10.7554/eLife.57443>.
  - 122) Guido et al., “Accommodating unobservability to control flight attitude with optic flow,” 2022. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05182-2>.
  - 123) Varennes et al., “Two pursuit strategies for a single sensorimotor control task in blowfly,” 2020. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77607-9>.
  - 124) Mischiati et al., “Internal models direct dragonfly interception steering,” 2014. Available: <https://www.nature.com/articles/nature14045>.
  - 125) DARPA, “μ BRAIN,” Available: <https://www.darpa.mil/program/microbrain>.
  - 126) L. Huber, K. Uludağ, H.E. Möller, “Non-BOLD contrast for laminar fMRI in humans: CBF, CBV, and CMRO2,” 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.07.041>.
  - 127) H. Marzbani, HR. Marateb, M. Mansourian, “Methodological Note: Neurofeedback: A Comprehensive Review on System Design, Methodology and Clinical Applications,” 2016. Available: <https://doi.org/10.15412/J.BCN.03070208>.
  - 128) Lancaster, M., Renner, M., Martin, CA. et al., “Cerebral organoids model human brain development and microcephaly,” Nature, 501, pp.373?379., 2013.
  - 129) 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/siryo2\\_1.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/kento_wg/9kai/siryo2_1.pdf).
  - 130) E. Collins, Z. Ghahramani, “LaMDA: our breakthrough conversation technology,” 18 3 2021. Available: <https://blog.google/technology/ai/lamda/>.
  - 131) “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/>.
  - 132) 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/>.
  - 133) S. Pichai, “An important next step on our AI journey,” 2023. Available: <https://blog.google/technology/ai/bard-google-ai-search-updates/>.
  - 134) 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>.
  - 135) 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.
  - 136) 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.
  - 137) 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.
  - 138) G. Mylonas, et al., “Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey,” IEEE Access, 2021.
  - 139) 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.
  - 140) “データ連携分析基盤 xData プラットフォーム,” Available: <https://www.xdata.nict.jp/>.
  - 141) K. Wang, et al., “A review of the technology standards for enabling digital twin,” Digital Twin, 2022.
  - 142) 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.
  - 143) 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](https://www.soumu.go.jp/main_content/000860618.pdf).

## 補足情報

## 付録C

### 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/europees-digital-decade-digital-targets-2030\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europees-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](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竞争相手」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-6g-research-investments-and-selects-35-new-projects-worth-eu250-million>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/europe-launches-second-phase-its-6g-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.ecologie.gouv.fr/nouvelle-etape-faire-converger-numerique-lexigence-environnementale-gouvernement-public-feuille>

#### 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.kdt-ju.europa.eu/>

## C-2. ICT デバイス技術について（2.4章関連）

### C-2-1. 国内外の研究開発事例

例えば国外では、米国 Intel 社が 22nmFinFET 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、住友電工が 5G 基地局用トランジスタとしての GaN-HEMT のトップシェアをもっている。NICT も日本国内最高の最大発振周波数  $f_{max}$  を報告している。

### C-2-2. 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 1.5mm 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 1.5mm 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。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 1.5mm / 可視光
LCOS	配向変化	~ 10kHz	小	○ / ○
Si-OPA	熱光学効果	~ 100kHz	大	○ / ×
EOP-OPA	EO 効果	~ 2MHz	小	○ / ○

### C-2-3. 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着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 × 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  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  は、主にサファイア基板上の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、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  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、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  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-3. 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-3-1. 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がある。識別系としては BERT<sup>109)</sup> (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、PaLM<sup>105)</sup>、LaMDA<sup>130)</sup> 等がある。

### C-3-2. 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-3-3. 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；<sup>131)</sup>) 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<sup>132)</sup> ) を公開した。Google も関連する技術として 2021年に LaMDA<sup>130)</sup> (Language Model for Dialogue Applications) を発表しており、それを用いた対話 AI Bard<sup>133)</sup> 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<sup>134)</sup>。

### C-3-4. 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 億アクティブラジオ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<sup>135)</sup>。

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なリスクがある点を指摘する。

### C-3-5. 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きている。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-3-6. 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-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<sup>136)</sup>。



付録図 C-1 REXR による表情豊かな 3D アバター構築

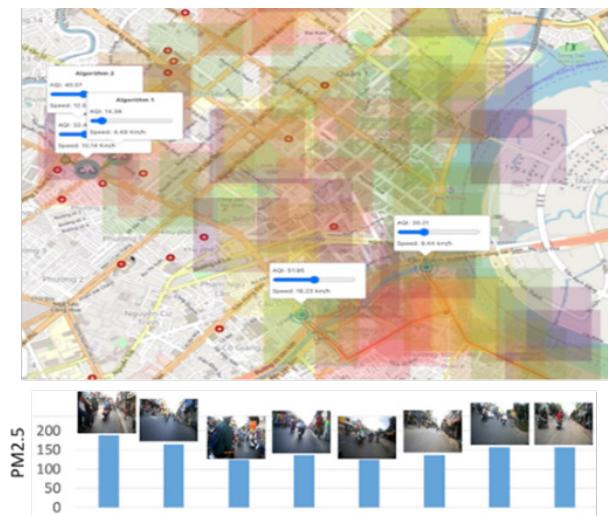
実環境のモデリングに関しても、少数の画像から高品質な新規画像を生成する技術の開発が進められている。例えば、NeRF は（学習時に 3D 物体の情報を与えずに）複数の視点から撮影した画像のみから任意の視点の画像を高い精度で生成する深層学習技術で、2020 年 3 月 arXiv に発表されるとその生成画像のクオリティの高さから大きな注目を集めた<sup>137)</sup>。事実、本論文は国際会議 ECCV 2020 で Best paper honorable mention を獲得し、その後 2 年足らずの間に 1500 件以上の論文に引用された。NeRF の最大の特徴は、3D シーンを表面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-3-7. 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<sup>138)</sup>。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。



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<sup>139)</sup>。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<sup>137)</sup>、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りiskを予測し、防災・減災行動を支援したりする（付録図 C- 3）。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<sup>141)</sup>。

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<sup>142)</sup>。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- 3）。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<sup>143)</sup>。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-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。

## 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。

### 【執筆協力者】(五十音順、以下同)

青木 哲郎	東 充宏	足立 樹泰	安藤 広志	石谷 寧希
石津健太郎	井戸 哲也	井上振一郎	茨木 久	内元 清貴
内山 将夫	大井隆太朗	大岩 和弘	大竹 清敬	大友 明
笠松 章史	柏岡 秀紀	加藤 豪	門脇 直人	亀井 彰志
香山健太郎	河井 恒	川村 誠治	黄田 育宏	小嶋 寛明
古波津 創	小林 昇平	小山 泰弘	Sarah Connor	鈴木 隆文
關根 徳彦	是津 耕司	仙場 浩一	平 和昌	田口 隆久
田中 秀吉	田中 隆浩	津川 卓也	対島 淑亮	寺井 弘高
鳥澤健太郎	内藤 栄一	中川 勝広	成瀬 康	西野 寿律
原 紳介	原井 洋明	春野 雅彦	東脇 正高	福島 千枝
藤田 智子	藤本 雅清	藤原 幹生	古田 健也	前田京太郎
松田 厚志	三木 茂人	盛合 志帆	安井 元昭	矢野 博之
山口 明哲	山口 典史	山田 章	山田 俊樹	山元 大輔
吉原基二郎	和氣加奈子	和田 尚也	渡邊 一世	渡邊 聰一

### 【企画・編集】

大島 浩嗣 加藤 義行 徳田 英幸 中村 昌世

### 【表紙デザイン】

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 1.0版

2023年7月発行

ISBN : 978-4-904020-31-9

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/

---

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。