

# Beyond 5G ホワイトペーパー ～2030 年代へのメッセージ～

3.0 版

2024.3.7

Beyond 5G 推進コンソーシアム 白書分科会



<b>1. はじめに</b> .....	<b>7</b>
<b>2. トラヒックトレンド</b> .....	<b>10</b>
2.1 ビデオトラヒックの将来の傾向 .....	10
2.2 トラヒック変動と環境依存性 .....	10
2.3 将来のアップリンクトラヒックの増加 .....	11
2.4 将来のモバイルトラヒック予測 .....	12
2.5 携帯電話システムの展開状況 .....	15
2.6 まとめ .....	17
<b>3. 通信業界のマーケットトレンド</b> .....	<b>19</b>
3.1 スマートフォン、基地局等の通信インフラ設備のシェア構造の変化 .....	19
3.2 電子部品 .....	21
3.3 半導体 .....	22
3.4 無線アクセスネットワークの電力消費 .....	23
<b>4. 他業界から得られたトレンド</b> .....	<b>27</b>
4.1 金融 .....	27
4.2 建設・不動産 .....	32
4.3 物流・運輸 .....	37
4.4 通信・IT .....	55
4.5 メディア .....	61
4.6 エネルギー・資源・素材 .....	65
4.7 自動車 .....	73
4.8 機械 .....	84
4.9 電機・精密・半導体 .....	99
4.10 農業・水産業・食料・生活関連 .....	109
4.11 小売・卸・流通分野 .....	124
4.12 サービス・公共サービス・法人サービス .....	130
4.13 飲食業界（外食産業） .....	150
4.14 娯楽・レジャー .....	154
4.15 学問・その他 .....	161
<b>5. Beyond 5G で求められる Capability と KPI</b> .....	<b>184</b>
5.1 Beyond 5G で求められる Capability .....	184
5.2 Beyond 5G を象徴する図と利用シナリオ .....	192

5.3	目標 KPI .....	196
<b>6.</b>	<b>技術トレンド .....</b>	<b>207</b>
6.1	Beyond 5G に向けた技術トレンド .....	207
6.2	Beyond 5G アーキテクチャ .....	214
6.3	周波数資源の利活用技術 .....	246
6.4	システムプラットフォームとアプリケーション .....	265
6.5	トラスト確保技術（セキュリティ、プライバシー、信頼性、レジリエンス（耐性）） .....	270
6.6	ネットワークエネルギー効率の向上 .....	283
6.7	非地上系ネットワーク（NTN）によるネットワークカバレッジ拡張 .....	286
6.8	無線通信技術と光通信技術 .....	291
<b>7.</b>	<b>おわりに .....</b>	<b>312</b>
	<b>略語集 .....</b>	<b>314</b>

【改訂履歴】

Ver.	Date	Contents	Note
1.0	2022.3.18	初版	
1.5	2022.9.30	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4.7 節: 「5G のユースケースと通信要件」の節を追加</li> <li>● 4.8 節: 本文の更新</li> <li>● (新)5.2 節 「Beyond 5G を象徴する図と利用シナリオ」を追加</li> <li>● (新)5.3 節: 目標 KPI に関する図の記載・更新及び本文の更新</li> <li>● 6.1.2 節: 情報の更新</li> <li>● 6.1.3.2 節: 「電波伝播に関連する研究動向と成果」の追加</li> <li>● その他: 誤記訂正</li> </ul>	
2.0	2023.3.13	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4 章: <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 各業界の節構成の統一</li> <li>➢ Beyond 5G で実現が期待される各業界の活用例を追加</li> <li>➢ 各業界の Beyond 5G に求められる Capability の表を追加</li> <li>➢ 各業界の Beyond 5G を活用した姿を示す図の形式統一・追加</li> <li>➢ 各業界のまとめの節を追加</li> </ul> </li> <li>● 4.1 節: 本文の更新</li> <li>● 4.2 節: 本文の更新</li> <li>● 4.3.2 節: 本文の更新</li> <li>● 4.4 節: 節構成の変更</li> <li>● 4.4.5 節: 「5G の振り返り」の節を追加</li> <li>● 4.6 節: 本文の更新</li> <li>● 4.7 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.8 節: 節構成の変更</li> <li>● 4.8.5 節: 本文の更新</li> <li>● 4.9.1 節: 本文の更新</li> <li>● 4.9.2 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.10.1 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.10.2 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.10.3 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.12.1 節: 本文の更新</li> <li>● 4.12.2 節: 本文の更新（教育分野の内容記載）</li> <li>● 4.13 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.14 節: 本文の更新</li> <li>● 4.15.1 節: 節構成の変更、本文の更新</li> <li>● 4.15.3 節: 節構成の変更</li> </ul>	



Ver.	Date	Contents	Note
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5.3 節: 付録「Beyond 5G の無線区間伝送における「信頼性」の検討例」の追加</li> <li>• 6.1 節: 「AI/ML 活用、センシング、トラスト確保技術の概説」の節を追加。</li> <li>• 6.1.3.1 節: 国内外の周波数利活用検討動向に関する記載を追加・更新</li> <li>• 6.3 節: トラスト確保技術（セキュリティ、プライバシー、信頼性、レジリエンス（耐性））に関する記載を追加・更新</li> <li>• 6.6 節、6.6.1 節、6.6.3 節: ネットワーク機能とコンピューティングリソースの最適融合（新規追加）、ネットワーク自律運用（更新）に関する記載を追加・更新</li> <li>• 6.6.4 節: 耐障害性に関する記載を新規追加</li> <li>• その他: 誤記訂正</li> </ul>	
3.0	2024.3.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 章 : 3.0 版、別冊発行にあわせ記述修正</li> <li>• 5 章 : IMT-2030 Framework との比較追加 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 5.2.2 節 : B5G を象徴する図と利用シナリオについて ITU-R 勧告との比較を追加</li> <li>➢ 5.3.3 節 : 目標 KPI と Capability について ITU-R 勧告との比較追加</li> </ul> </li> <li>• 6 章 : <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 6.2 節（旧 6.6 節）「Beyond 5G アーキテクチャ」の節を更新し、新しいアーキテクチャについて記載や、同時に発行された別冊の参照箇所を追記</li> <li>➢ 6.1 節「Beyond 5G に向けた技術トレンド」について整理し、周波数資源の利活用技術を 6.3 節として分離し、「携帯電話システムの展開状況」は、第 2 章「トラヒックトレンド」の 2.5 節に移動</li> <li>➢ 6.3.1.2 節「WRC における IMT 地上系コンポーネント用周波数の特定」、6.3.1.3 節「周波数範囲 7125 MHz - 15.35 GHz の利用状況に関する調査」、および 6.3.1.4 節「周波数範囲 6425 MHz - 7125 MHz の状況」を追加</li> </ul> </li> <li>• 7 章 : 3.0 版発行にあわせ記述修正</li> </ul>	

# 1. はじめに

## 1. はじめに

移動通信システムは、世代を重ねる中で、通信基盤から生活基盤へと進化してきた。各国で導入が進みつつある第五世代移動通信システム（5G）は様々な業界で利用され、業界間の連携と協創を促進することで生活基盤を超えた社会基盤へと進化すると見込まれている。さらに、その次の技術である Beyond 5G は、サイバー空間を現実世界（フィジカル空間）と一体化させ、Society 5.0 のバックボーンとして中核的な役割を担うものと期待されている。Beyond 5G は 2030 年頃の実用化が見込まれており、2021 年末時点で欧米をはじめ諸外国でも Beyond 5G に関する多くのプロジェクトや団体が設立され、コンセプトおよび技術検討が進められている。

我が国においても国内外動向を踏まえつつ、2030 年代に期待される強靱で活力のある社会の実現に向け、Beyond 5G の早期かつ円滑な導入、Beyond 5G における国際競争力の強化を目指すことを目的とし、2020 年 12 月に Beyond 5G 推進コンソーシアムが設立された。

Beyond 5G 推進コンソーシアムは、Beyond 5G 推進に向けた総合的な戦略の検討と Beyond 5G 白書の作成を行う企画・戦略委員会、Beyond 5G 推進に向けた国際動向把握と我が国の取組状況の国際的な発信を行う国際委員会、ならびに総会から構成されている。本白書は、企画・戦略委員会配下に属する白書分科会にて作成されたものである。本白書の目的は、2030 年代に期待される強靱で活力のある社会を展望し、Beyond 5G のユースケースや通信の要求条件と技術を明確化すること、また、Beyond 5G コンセプトを早期にとりまとめて世界に発信し、ITU 含む国際的議論に反映するとともに、国際的なイニシアチブを確立することである。本白書の特徴としては、Beyond 5G に求められる要件を洗い出すために、通信業界のみならず、多様な業界の意見を積極的に取り込み、そのうえで Beyond 5G で必要となる技術要件をまとめていることである。これによって、通信業界のみならず、あらゆる産業界にとって有益な Beyond 5G コンセプトの作成につながるだけでなく、日本国内のみならず世界各国での Beyond 5G の検討に貢献できると考えている。

本白書は、大きく分けて以下の章から構成されている。

### 第 2 章 トラヒットトレンド

2030 年頃に到来が予想される Beyond 5G のモバイルアプリケーション、ユースケースからトラヒックの傾向を示したもの。

### 第 3 章 通信業界のマーケットトレンド

移動通信分野のマーケット動向、特に、スマートフォンや基地局等の通信インフラ設備のシェア構造の変化と、スマートフォン関連の構成部品の技術動向を示したもの。

### 第 4 章 他業界から得られたトレンド

現時点で世の中に存在するすべての業界における課題を洗い出し、課題解決案、業界としてあるべき姿や夢、さらには、Beyond 5G に期待する性能や機能をまとめたもの。

### 第 5 章 Beyond 5G で求められる Capability と KPI

第 4 章の内容から、様々な業界での特徴的なユースケースを洗い出し、それぞれのユースケースで

求められる Beyond 5G の性能をまとめたもの。

## 第 6 章 技術トレンド

Beyond 5G に求められる周波数および技術の動向について検討し、それらが利用者や市場に提供する機能・価値・果たす役割・期待などを明らかにしたものを。

さらに第 3.0 版の公開に合わせ、日本の技術の強みや注目の高いテーマ等、「日本の売り」となる技術トピックに関する研究成果を、技術トピック毎に別冊としてとりまとめ公開した。これらの別冊は、白書分科会メンバの他、国内アカデミアの研究成果も多く盛り込まれている。公開された別冊の技術トピックは以下のとおりである。

- Cell-Free Distributed MIMO
- Radio technologies for higher frequency
- Technologies on repeaters and reflectors
- End-to-end network architecture
- AI/ML
- Sensing
- Sustainability and Energy efficiency
- NTN

本白書は、白書分科会にご参加いただいた非常に多くの方々に多大なるご協力を頂き、作成したものである。通信業界の関係者やアカデミアの有識者の方々はもちろん、通信業界以外の様々な業界の方々にもご協力いただいた。おかげで本白書は、通信業界だけでなくあらゆる業界をまたがり、産学官で未来のビジネス創出や社会課題解決の検討を推進する上で有益な情報を多く含んだものとなっている。本白書が日本としてより良い未来社会を創造し、グローバルな活動を推進するための一助となることを期待する。

## 2. トラヒックトレンド

## 2. トラヒックトレンド

本章では、2030年頃に到来が予想される Beyond 5G のモバイルアプリケーション、ユースケースから、トラヒックの傾向を示したものを記載している。

### 2.1 ビデオトラヒックの将来の傾向

4K・8K 推進ロードマップに則ってテレビ放送の高画質化が進んでいる[1]。8K 放送は始まりつつも、高精細動画は、2030年頃には、4K 放送がより一層拡大されると推察される。2020年時点での4K 放送の世帯普及率は約10%に達している[2]。飛躍的な映像圧縮・伸長技術の革新、大容量ネットワーク普及の進展によるものと思われる。高精細映像の送信は、モバイルトラヒック量への影響が非常に大きい。今後、高精細の映像コンテンツのトラヒック量も、大幅に増大すると考えられる。動画トラヒックは、例年堅調な伸びを示し、2030年には2020年を遥かに凌ぐと推察される。

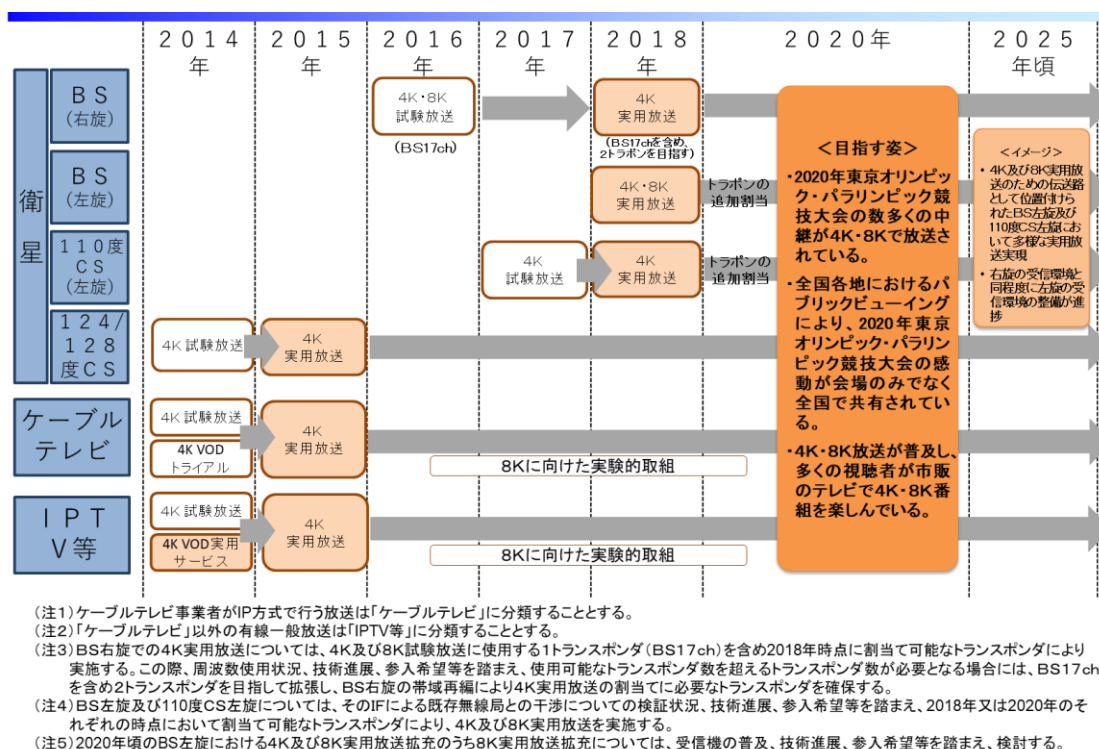


図 2.1-1 4K・8K 推進のためのロードマップ[1]

### 2.2 トラヒック変動と環境依存性

トラヒック量は、時間、場所、アプリケーション、デバイスによって、大きく異なると考えられる。最近のトラヒックの分布は、屋内/屋外の利用で特徴が分かれており、時間帯によって偏りが生じる傾向がある。

2021年においては、屋内/屋外のトラヒック量の比率を比較すると、22時以降、約80%が屋内から来ている。

しかしながら、2030 年頃には、MaaS 等の自動運転でのトラフィック増加、ドローン等による物品配送によるトラフィック増加、M2M 通信の飛躍的増加が見込まれ、日中帯を中心とした屋外トラフィックの増加が見込まれる。一方で、アフターコロナ、働き方改革、多様な働き方でのテレワークの推進により、屋内トラフィックは、様々な時間帯に平準化していくものと考えられる。

今後、サービスがより多様化し通信デバイスの増加、高精細なコンテンツによるデータサイズの増加が拍車をかけ、トラフィックが必要になる時期、分布が集中し、混み合う傾向となっていくものと考えられる。

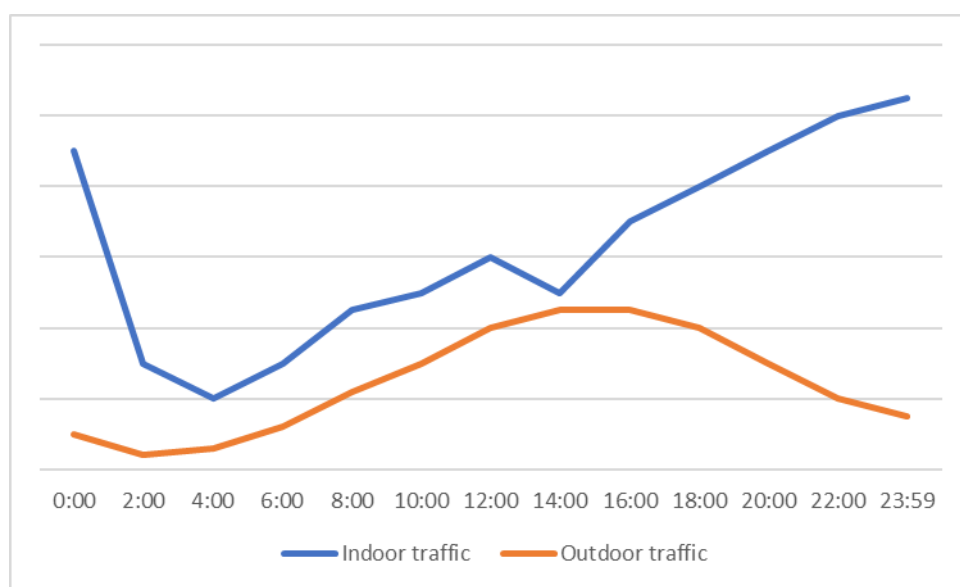


図 2.2-1 一日の屋内/屋外のトラフィック変動の例[7]

### 2.3 将来のアップリンクトラフィックの増加

本節では、将来のアップリンクトラフィックについて考察する。

2030 年におけるアップリンク/ダウンリンクトラフィックの比率に関しては、ダウンリンクトラフィックは継続して、多くの場所で使われるが、アップリンクトラフィックの増加率は、ダウンリンクトラフィックよりも、高く上昇すると考えられる。スポーツイベントやコンサート会場において、多くの写真や動画がリアルタイムに撮影され、YouTube、Twitter、Facebook、TikTok 等への映像の投稿が増加すると考えられる。また遠隔地の多数の場所から情報発信され、それを閲覧する形が広がると考えられる。

2030 年の 5G、Beyond 5G の一つの流行するアプリケーションとしては、VR（仮想現実）、MR（複合現実）、AR（拡張現実）や、メタバースが挙げられる。これらの未来市場予測としては、日本で数百万人～1 千万人レベルが使っていると思われる、全世界で数億人程度のユーザー数となると予想される。日本以外の、若年層が多い国では、もう少し割合が伸びるかもしれない。

AR/VR 関連市場の将来展望 2020[4]では、2030 年の AR/VR 表示機器の世界市場は、2019 年の 44.8 倍の 13 兆 9500 億円に拡大すると予測されている。これにより、労働力不足に対応するための作業が効率化され、AR/VR などによる研修やトレーニングが一般的になる予想される。

2030年のBtoC/BtoBtoC向けコンテンツ市場においては、Beyond 5G通信で双方向通信が容易になり、VRで臨場感を味わせるライブ配信がメタバース市場拡大を牽引すると見られている。



図 2.3-1 引用：ASCII.jp VR会議・コラボツール[5]

2030年に向けては、Beyond 5G技術の広帯域・大容量化による高精細画像の転送だけでなく、マルチアングル放送の開始、MaaS等の自動運転技術への活用、ドローンによる宅配・物品配送に伴うIoT/デバイス間通信、製造業のロボット・センサー/IoT通信の活発化、VR/AR/アバター/メタバースによる仮想空間の利活用推進によって、新たな通信形態が登場することにより、トラフィックはペタビット級まで広がっていくと考える。

## 2.4 将来のモバイルトラフィック予測

本節では、将来のモバイルトラフィックの予測を記述する。

日本の総務省の情報通信統計データベース（2018年から2021年の過去3カ年）によると、過去3年間のモバイルトラフィックの成長率は、全体で年間約1.3倍である[6]。



## 移動通信トラフィックの推移(過去3年間)

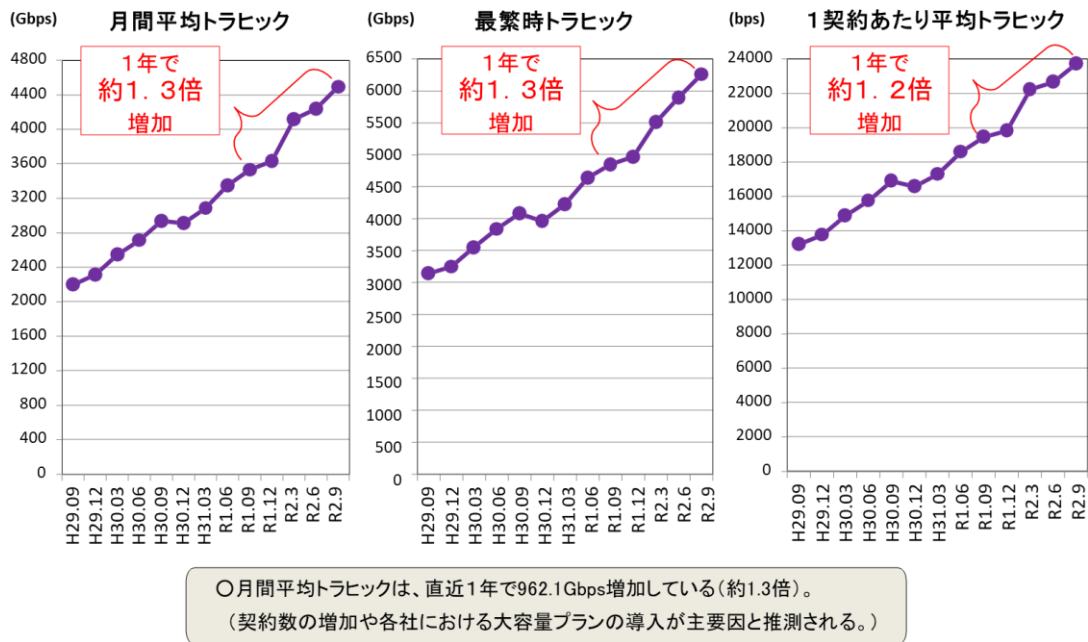


図 2.4-1 移動通信トラフィックの推移[6]

次に、我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計値を元に考察するとダウンリンクトラフィックは、総トラフィックのほぼ 90%を占めることがわかる。またダウンリンクトラフィックの成長率は、近年、年間約 1.3 倍であることがわかる。

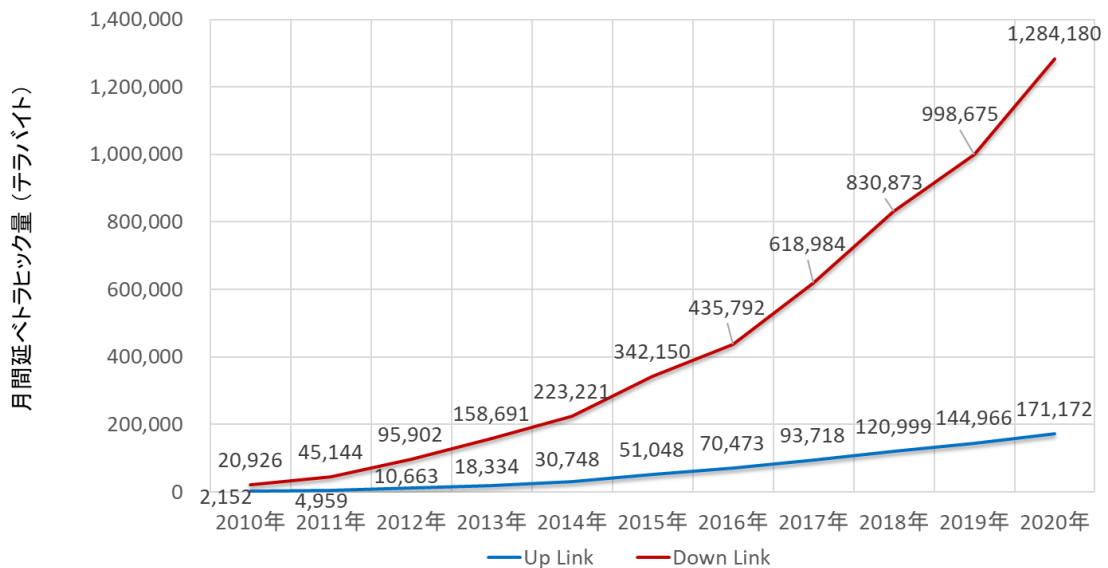


図 2.4-2 日本の移動通信のアップリンク/ダウンリンクの傾向[3]

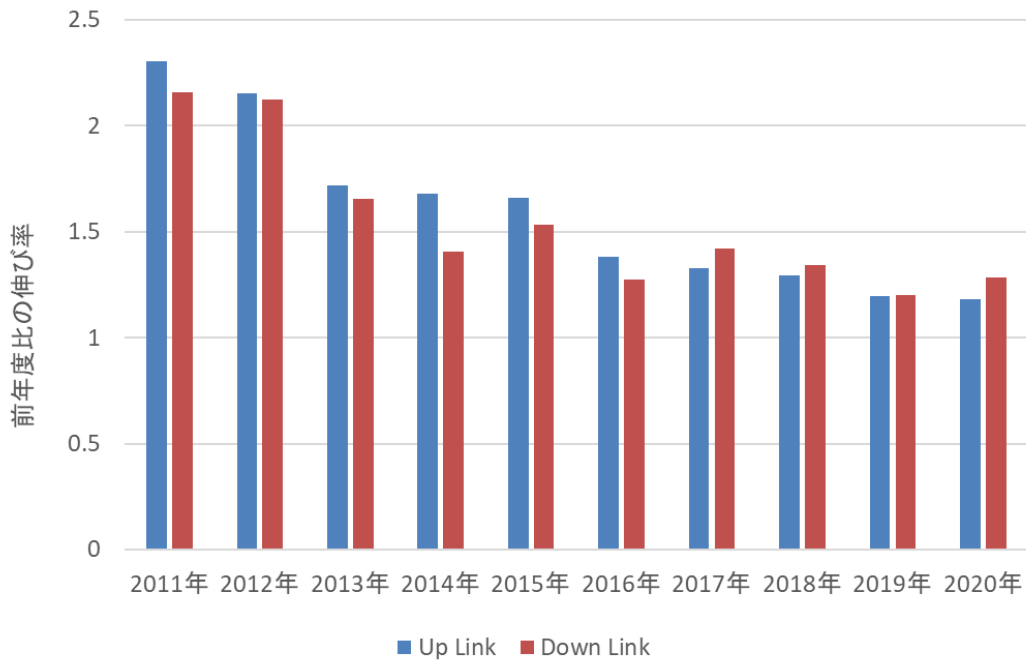


図 2.4-3 日本の移動通信のアップリンク/ダウンリンクの前年度比伸び率[3]

これらを総合すると、2020年の総トラフィックが1,285ペタバイトであることから、2030年のモバイルトラフィックは、17,734ペタバイトになると予測される。

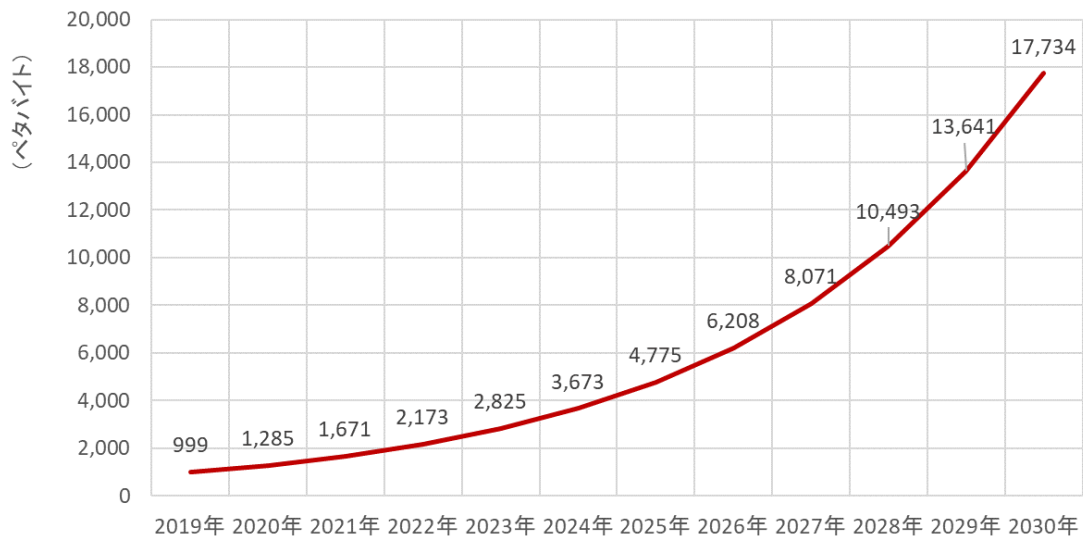


図 2.4-4 2030年までのモバイルトラフィック予測例

図 2.4-4 は、過去の統計から得られたアップリンク及びダウンリンクのうち高い方であるダウンリンクから類推した将来のモバイルデータトラフィック予測の例である。2030年に向け Beyond 5G の特別な流行のサービス/コンテンツが出現し、爆発的にトラフィックが伸びることも想定される。

## 2.5 携帯電話システムの展開状況

携帯電話の加入者数は、全世界で80億人に達しており、依然として増加傾向にある(図 2.5-1)。グローバルな通信規格を適用することで、「規模の経済」の効果により高度な情報通信サービスを提供するための膨大なコストが巨大な市場のユーザー間で共有され、これによって高度な通信サービスが手頃な価格で利用可能な市場が形成されている。

携帯電話の加入契約者数で見ると、中国、インド、欧州(地域)が上位3位、米国が4位、日本が9位となっていることが判る。

一方で、地域・国別の GDP-PPP<sup>1</sup>に上記の加入契約者数を乗じて概算の市場規模を算出してみると必ずしも加入契約者数のグラフとは一致しない(図 2.5-2)。直近では、中国、欧州、米国が上位3位を占めており、これらの国や地域は、米国に次いで第4位の日本を含む他の国や地域と比較して、圧倒的な市場シェアを有していることを見取ることができる。

今後のサービス提供地域の更なる拡大や、スマートフォン等の人と人の通信に加えて通信の発展が加速するであろうことを踏まえると、これまでに構築されてきた高度で安定した全国的な通信ネットワークを最大限に活用しつつ、新たに包括的な世界の構築に向けたサービスの拡大の方策を検討する必要があると考えられる。

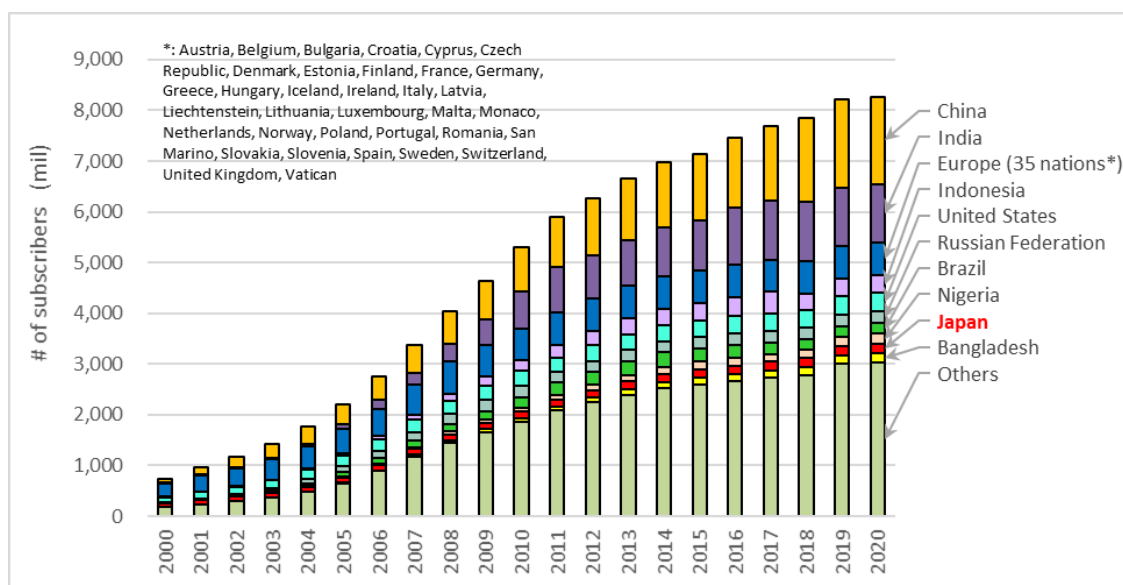


図 2.5-1 全世界の携帯電話の契約者数 [8]

<sup>1</sup> Gross Domestic Product (GDP) per capita, purchasing power parity の略。購買力平価で表した一人当たりの国内総生産 (GDP)のこと。1人当たりの GDP を国際ドルに換算して購買力平価 (PPP)で表し、それを総人口で除して算出したもの[9]。

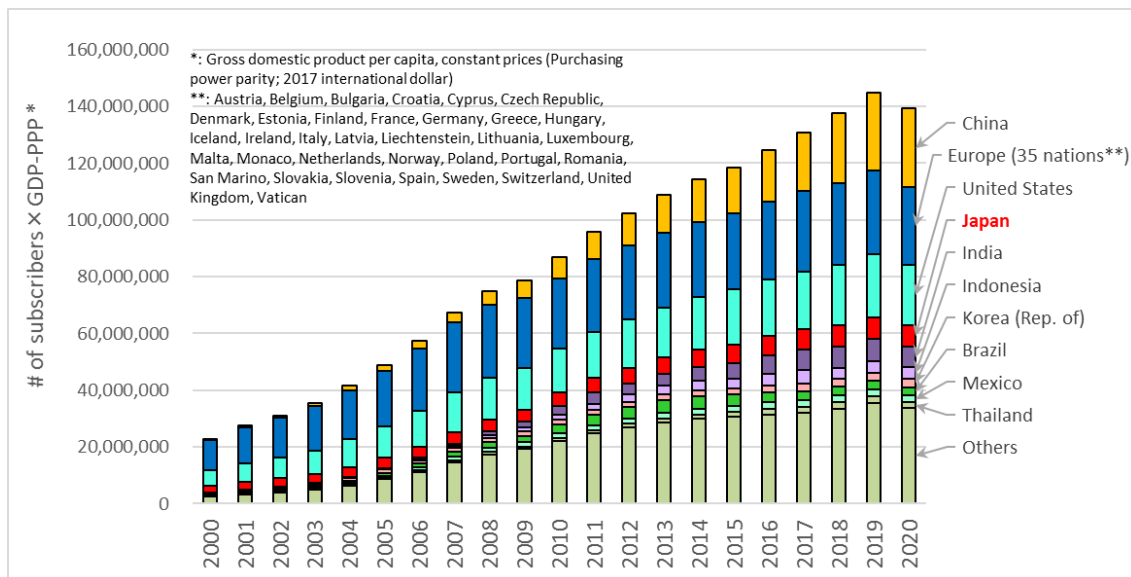


図 2.5-2 携帯電話契約者数×GDP-PPP [8][9]

現状は、それぞれの地域や国において国際標準規格に準拠しつつ、それぞれの地域ごとの状況に即した通信システムが張り巡らされており、人々がそれらの通信システム資源を共有しながら社会生活や産業活動を営んでいる状況にある。

今後、Beyond 5G が世界に大きな影響を与え、欠くことのできない重要な役割を果たすことを考えると、Beyond 5G の存在を意識せずに、より多くの人々が当たり前のように利用する共通の社会インフラや資源として位置づけ直すことが重要と考えられる。

インターネットなどの ICT システムを空気や水のような、いわゆる‘Global commons<sup>2</sup>’(国際公共財)と同等に位置付けることについては異なる見解もあるが[10][11]、Beyond 5G が提供し得る情報通信基盤としての価値は人類共通の財産である有限なエネルギー資源と貴重な周波数資源を使って提供されることから考えると間違いなく‘rivalrous’(競合的に利用され得る)な有限資源であり、また、疑似的には‘non-excusable’(非排他的に利用可能)に感じるほど潤沢な情報通信の価値を提供できることから、‘Quasi-Global commons’(準国際公共財)のように位置づけた上で、有限な人類共通の資源としての情報通信能力をどのように分配・提供していくことが公正で世界社会の公共の福祉に貢献できるかという検討を行うことは Beyond 5G システムの開発と敷延において重要と思われる。

<sup>2</sup> 経済学では、有限で共有可能な資源としてのグローバル・コモンズは、競合的資源であるが他者の利用を排除できない資源として定義されている。Beyond 5G は限られた周波数資源を使用する点では競合的であるが、技術的には、特定のユーザーまたはグループを除外するように操作できるので除外可能である。したがって、Beyond 5G のような ICT システムをグローバル・コモンズとして単純に定義することには議論の余地がある。

## 2.6 まとめ

本章では、2030年頃に到来される日本における Beyond 5G のトラフィックの傾向を記述したものである。

2020年からの新型コロナウイルス蔓延により、テレワークやオンライン授業への移行が加速し、オンラインライブやゲーム等の新たな日常の定着により、トラフィックは大幅に増加した。また、今後もキャッシュレス化、非接触の営業活動等、社会の変容を浮き彫りにした新しいライフスタイルに移行することから、トラフィックは将来にわたって増加すると考えられる。

また、2030年に向けて、Beyond 5G の特別な流行するサービス/コンテンツが出現し、爆発的にトラフィックが伸びることも想定される。

## 参考文献

- [1] 総務省, 令和2年版情報通信白書, “4K・8K 推進のためのロードマップ”.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd264210.html>
- [2] ASCII.jpXデジタル, “4K 放送の視聴機器の出荷が 550 万台突破、世帯普及率 1 割超に”.  
<https://ascii.jp/elem/000/004/027/4027554/>
- [3] 総務省, 情報通信統計データベース, “我が国の移動通信トラフィックの現状 集計値”.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin06.html>
- [4] MONOist, “2030 年の AR/VR 表示機器の世界市場は 16 兆 1711 億円に”.  
<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2009/04/news017.html>
- [5] ASCII.jp, “VR 会議”.  
<https://ascii.jp/elem/000/004/016/4016815/>
- [6] 総務省, 情報通信統計データベース, “我が国の移動通信トラフィックの現状 集計値、概要”.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin06.html>
- [7] M. Paolini, "Beyond Data Caps – An Analysis of the Uneven Growth in Data Traffic," Senza Fili Consulting, 2011.
- [8] International Telecommunication Union, Telecommunication Development Sector (ITU-D), “Mobile-cellular subscriptions (excel)”, (July 2022).
- [9] International Monetary Fund, “World Economic Outlook Database”, April 2022.
- [10] M. Raymond, “The Internet as a Global Commons?”, Centre for International Governance Innovation, (October 2012).
- [11] M. Raymond, “Puncturing the Myth of the Internet as a Commons”, Georgetown Journal of International Affairs, (November 2013).

# 3. 通信業界のマーケットトレンド

### 3. 通信業界のマーケットトレンド

本章では、移動通信分野のマーケット動向、特に、スマートフォンや基地局等の通信インフラ設備のシェア構造の変化と、スマートフォン関連の構成部品の技術動向について述べる。

#### 3.1 スマートフォン、基地局等の通信インフラ設備のシェア構造の変化

##### 3.1.1 スマートフォンマーケット

図 3.1-1 に世界のスマートフォンマーケットにおけるメーカー単位の販売台数の変化を示す。世界のスマートフォンマーケットでは、普及が本格化した 2009 年から 2019 年の 10 年間で、スマートフォンの総販売台数は 6.3 倍に増加している。主要携帯電話端末メーカー別で見ると、2009 年には、Blackberry が首位、Apple が 2 位と北米企業 2 社で全体の 1/4 以上を占めていたが、2019 年には、Samsung が首位、Huawei が 2 位とアジア企業 2 社が全体のおよそ 40%を占めるなど、10 年間で上位企業の顔ぶれが大きく変容したことがわかる。特に中国企業は、Huawei、Xiaomi、Oppo、vivo など 6 社が 10 位以内にランクインし世界シェアの 43.4%を占めるなど、その存在感を大きく増している。また、スマートフォンの販売台数シェアの上位 5 社の占めるシェアは、2009 年には 38.3%であったのに対し、2019 年には 69.5%となっており、スマートフォン販売台数シェアの寡占化も見られる。

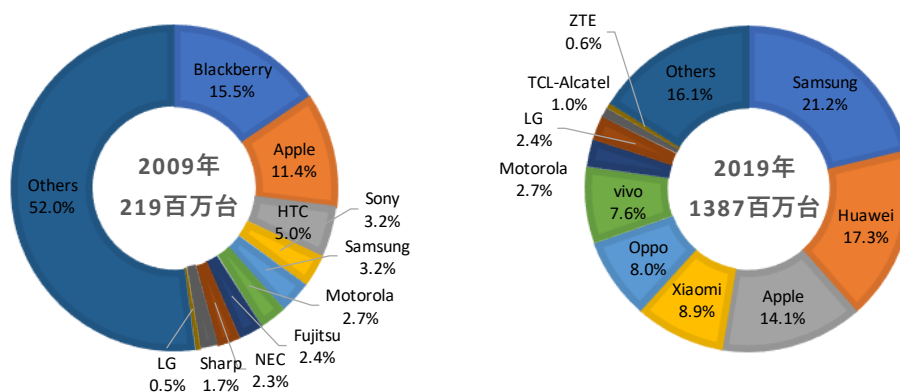


図 3.1-1 世界のスマートフォンマーケットのメーカーシェアの変化 [1]

図 3.1-2 に国内のスマートフォンマーケットにおけるメーカー単位の販売台数の変化を示す。国内のスマートフォンマーケットでは、2014 年と 2019 年の 5 年間に於いて、Apple のシェアが首位を維持したまま 43.7%から 59.8%と伸びており、我が国において根強い人気を伺える。その他のシェアとしては、2014 年には、国内企業が多くを占め、それに韓国企業が続いていたが、2019 年では、これらの企業がシェアを伸ばせない中、中国企業がその存在感を増してきている。

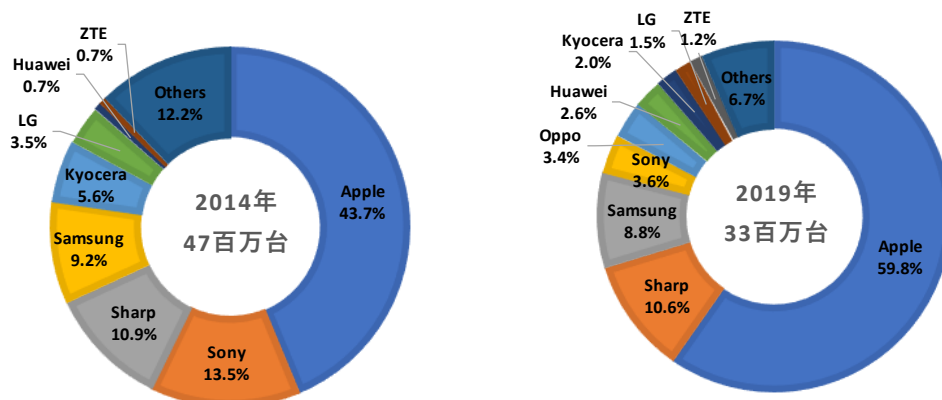


図 3.1-2 国内のスマートフォンマーケットのメーカーシェアの変化 [1]

このように、スマートフォン販売台数に関しては、全体に対し上位数社が占めるシェアが拡大し、その他の企業は残りのシェアを分け合う形となっており、2009年から2019年の10年間で世界マーケットの参入・拡大に成功した企業とそうでない企業との違いが明確に見られる。Beyond 5Gにおいてもスマートフォンのマーケットシェアは大きく変化することが考えられる。

### 3.1.2 基地局マーケット

#### 3.1.2.1 マクロセル基地局のメーカーシェア

図 3.1-3 及び図 3.1-4 に世界のマクロセル基地局マーケットにおける主要基地局メーカー単位の出荷金額の変化および国内のマクロセル基地局マーケットにおける主要基地局メーカー単位の出荷金額の変化をそれぞれ示す。

世界のマクロセル基地局マーケットでは、2009年にはEricssonが首位、Nokiaが2位と北欧企業2社で全体の半分以上のシェアを占めていたが、2019年にはHuaweiが首位となっている。10年間で、特に中国企業、韓国企業が大きくシェアを伸ばし、上位企業のシェアの変動が見られる。また、マクロ基地局の出荷金額シェアの上位5社の占めるシェアは、2009年には75.8%であったのに対し、2019年には96.5%となっており、上位5社の占めるシェアが大きく拡大している。

国内のマクロセル基地局マーケットでは、2014年と2019年の5年間において、スマートフォンのマーケットと異なり、上位企業の顔ぶれは大きく変わっていない。欧州企業のシェアは全体の半数以上を占め、日本企業のシェアは約1/3から約1/4に減少している。

このように、マクロ基地局マーケットは過去10年間でシェアが上位となる企業の顔ぶれは大きく変わっておらず、Beyond 5Gにおいても大きく変化しないことが予想される。



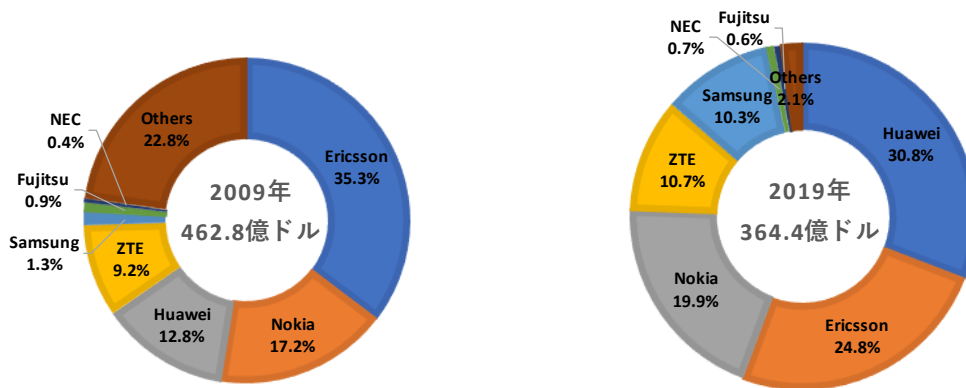


図 3.1-3 世界のマクロセル基地局マーケットのメーカーシェアの変化 [1]

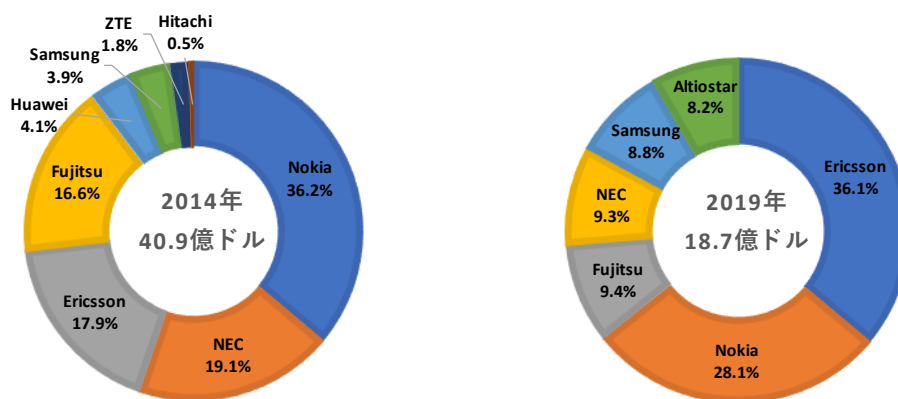


図 3.1-4 国内のマクロセル基地局マーケットのメーカーシェアの変化 [1]

### 3.1.2.2 スモールセル基地局の伸長

5G 以降では、従来のマクロセル基地局に加えスモールセル基地局の普及が進むことが想定されている。スモールセルは超高速・大容量伝送のサービスを展開するためのインフラとなるものであり、マーケットの拡大が見込まれている。

Beyond 5G では、テラヘルツ帯など、高周波数帯のさらなる活用が検討されており、スモールセル基地局マーケットはさらに拡大していくことが予想される。

## 3.2 電子部品

表 3.2-1 にスマートフォン・無線通信デバイス関連の電子部品の世界シェアを示す。村田製作所は、チップ積層セラミックコンデンサ（MLCC）、表面波（SAW）フィルター、無線 LAN モジュール、ならびに Bluetooth モジュールにおいて世界トップのシェアを獲得している。また TDK はインダクタおよびリチウムイオンポリマー電池において、アルプスアルパインはカメラ・アクチュエーター、ソニーは CMOS イメージセンサーにおいて世界トップシェアを獲得しており、様々な電子部品において日本の部品メーカーが存在感を見せ

ている。

5G スマートフォンでは、4G に比べて、セラミックコンデンサを始めとする重要電子部品の搭載個数は増加しており、Beyond 5G でもこの傾向は変わらないと考えられる。特に Beyond 5G で活用が期待されるミリ波、テラヘルツ波は送信時の電力消費が大きいとため、電池の高性能化やアンテナ回りの性能向上などが求められると考えられる。

今後も、高周波帯の活用により、重要電子部品数が増加することが予想される。高いシェアを獲得できれば、大量生産によるコストダウンを図ることができる可能性がある。

表 3.2-1 スマートフォン関連の電子部品の概要と世界シェア [2]

スマートフォン関連部品	概要	世界シェア (出荷数量ベース)		
		1	2	3
チップ積層セラミックコンデンサ (MLCC)	電子回路の中で電圧を制御する部品	村田製作所 約40%	Samsung EM (韓) 約20%	太陽誘電 10~15%
表面波 (SAW) フィルタ	無線信号の中から必要な周波数だけを取り出すフィルタ	村田製作所 50%以上	Qualcomm (米) 30~35%	
セラミック発振子	デジタル回路のクロック信号源等に使用	村田製作所 75%		
無線LANモジュール	携帯端末等につける無線LANモジュール	村田製作所 50~60%	USI (中)	TDK
Bluetoothモジュール	携帯端末等に付けるモジュール	村田製作所 50%	アルプスアルパイン	
インダクタ	高周波回路全般で使用	TDK 25~30%	村田製作所	太陽誘電
カメラ・アクチュエーター	カメラのオートフォーカスや手振れ補正等に使用	アルプスアルパイン 70~80%	ミネベアミツミ	TDK
CMOSイメージセンサ	スマートフォンのカメラ等で使用	ソニー 50%	Samsung (韓) 24%	OmniVision (米) 14%
リチウムイオンポリマー電池	薄型電池	TDK 40~50%	Samsung SDI (韓) 30%	LG Chem (韓) 10~20%

### 3.3 半導体

図 3.3-1 に 2014 年から 2020 年までの世界の半導体売上高合計および半導体メーカー各社の半導体売上高の遷移を示す。2014 年の世界の半導体売上高は 3403 億米ドルであったが、2018 年には 4767 億米ドルに達している。これは 2015 年頃からのメモリバブルが影響しているとされ、DRAM 等の取引価格高騰により各半導体メーカーの売上高が大きく向上している。しかし、2018 年から 2019 年にかけてスマートフォンやパソコンの需要が停滞したことにより半導体不況に陥り、2019 年には世界半導体売上高は 4223 億米ドルに減少した。一方で 2019 年から 2020 年にかけてはコロナ禍にあって、半導体市場は伸長しており、リモートワーク等の巣ごもり需要を受けてメモリ、GPU、5G 向けチップが半導体市場の成長をけん引した結果、世界の半導体売上高は 4662 億米ドルと再度拡大してきている。

メーカー別売上高で見ると、2014 年には首位の Intel に続き、Samsung、Qualcomm と続いていたが、2017 年には 25 年連続首位を維持してきた Intel に代わり、メモリバブルの恩恵を受けた Samsung が首位となっている。以後、メモリバブルの終息とともに 2019 年以降は再度 Intel が首位に返り咲いているが、上位陣として米国企業と韓国企業で多くのマーケットシェアを獲得している。

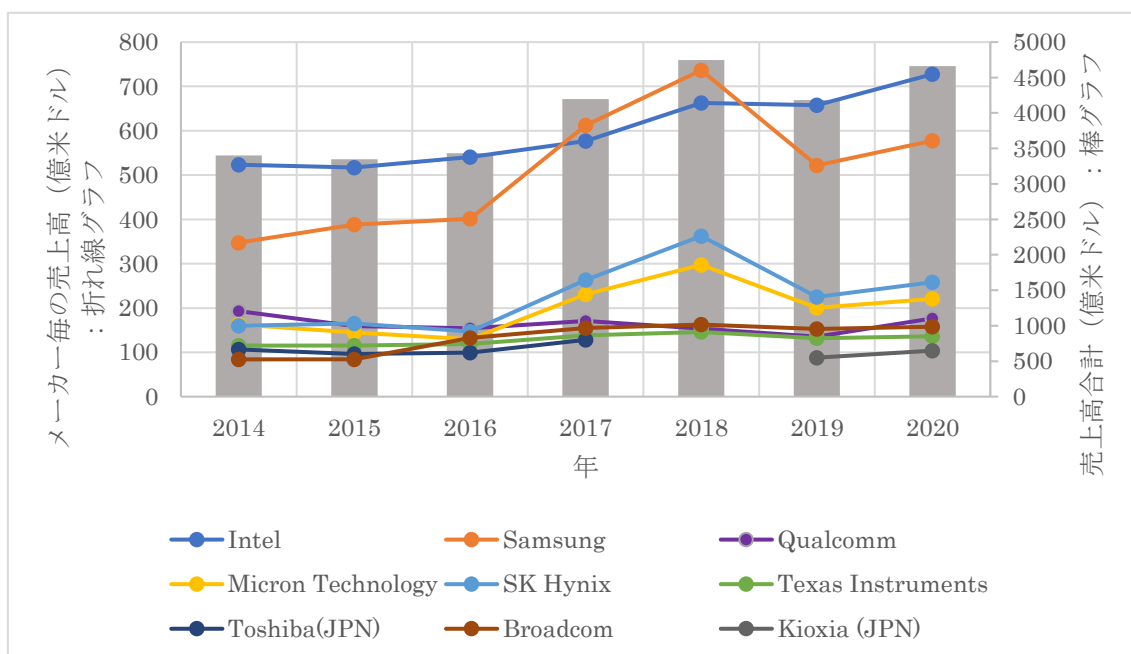


図 3.3-1 世界の半導体のメーカーシェアの変化 [3]-[9]

### 3.4 無線アクセスネットワークの電力消費

図 3.4-1 及び図 3.4-2 にそれぞれ国内及び世界のネットワーク関連消費電力を示す[10]。グラフには 2018 年と 2030 年が示されているが、2030 年のエネルギー消費量は、将来の消費電力削減技術を考慮せずに、マクロセル基地局やスモールセル基地局の台数の増加分のみを考慮した予測値である。また、青のグラフはコアネットワーク及びメトロネットワークの消費電力であり、橙のグラフはアクセスネットワークの消費電力である。コアネットワークは国内拠点と世界を結ぶネットワークの中核を担う大容量超高速通信回線であり、メトロネットワークは、コアネットワークとアクセスネットワークを結ぶネットワークである。アクセスネットワークは、ユーザーとネットワーク端を結ぶネットワークである。

図 3.4-1 及び図 3.4-2 より、国内と世界の 2018 年に対する 2030 年のネットワーク関連消費電力は同様の傾向を示しており、2018 年と比較して 2030 年は約 4~5 倍に増加している。また、ネットワーク関連消費電力はコアネットワーク及びメトロネットワークと比べアクセスネットワークが大幅に大きく、アクセスネットワークの消費電力の大半は基地局である。3.1.2 節で示したようにマクロセル基地局やスモールセル基地局の台数は今後増加することが予想されており、さらに第 2 章で示したように無線トラフィックも今後増加することが予想されている。特に対策を取らない場合、基地局 1 台あたりの消費電力が増え、かつ、基地局数が増える可能性もあることから、Beyond 5G に向けて消費電力を低減する技術の開発がますます重要になると考えられる。

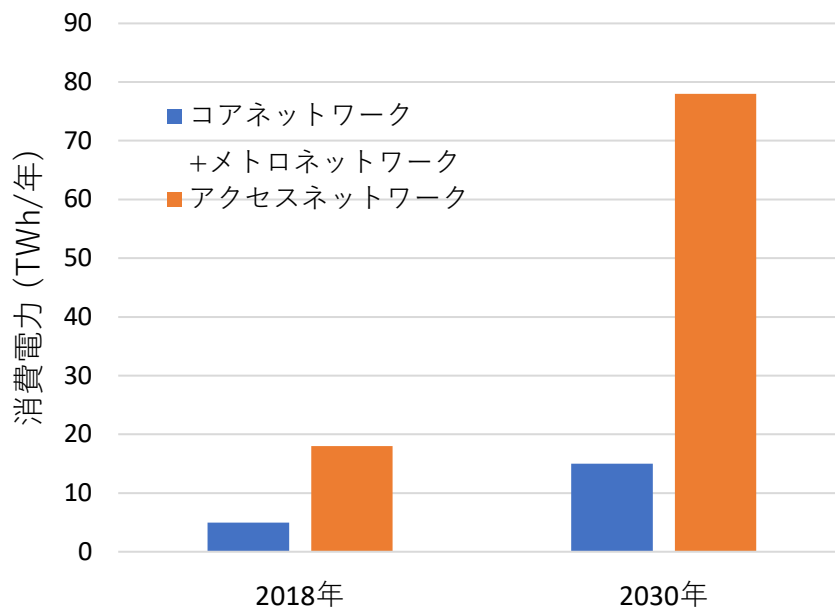


図 3.4-1 国内のネットワーク関連消費電力

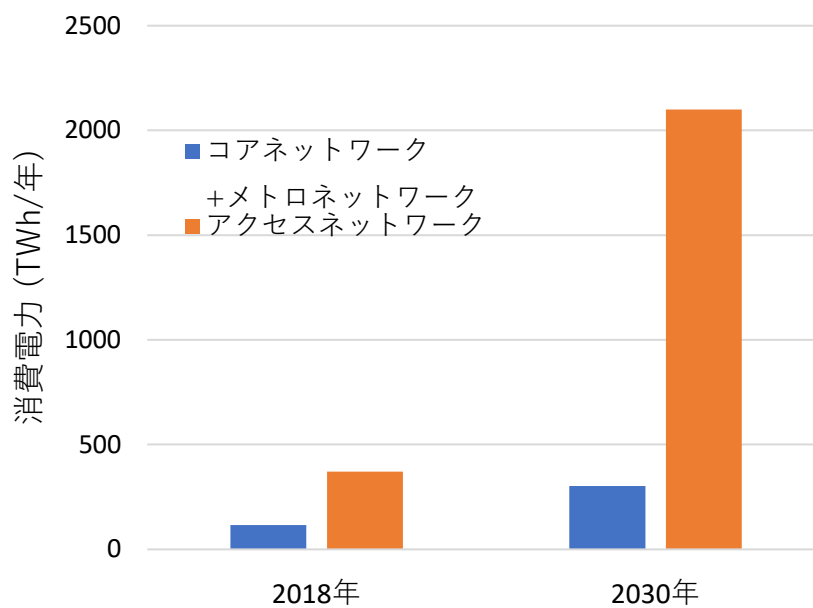


図 3.4-2 世界のネットワーク関連消費電力

**参考文献**

- [1] 総務省, 令和 2 年版情報通信白書, “第 4 節 5G が変える ICT 産業の構造 (3) 移動通信システムに係る市場シェアの変化”.

<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd114130>.

[html](#)

- [2] 楽天証券, “特集：5G スマホで再成長に向かう電子部品大手（村田製作所、TDK）”。  
<https://media.rakuten-sec.net/articles/-/25081>
- [3] Gartner, “Worldwide Semiconductor Revenue Grew 7.9 Percent in 2014”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2015-04-07-worldwide-semiconductor-revenue-grew-8-percent-in-2014-according-to-final-results-by-gartner>
- [4] Gartner, “Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Declined 1.9 Percent in 2015”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2016-01-07-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-declined-2-percent-in-2015>
- [5] Gartner, “Worldwide Semiconductor Revenue Grew 2.6 Percent in 2016”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-05-15-worldwide-semiconductor-revenue-grew-2-percent-in-2016-according-to-final-results-by-gartner>
- [6] Gartner, “Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Grew 22.2 Percent in 2017”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-03-20-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-22-percent-in-2017-samsung-takes-over-no-1-position>
- [7] Gartner, “Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Grew 12.5 Percent in 2018”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-04-10-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-12->
- [8] Gartner, “Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Declined 11.9% in 2019”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-01-14-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-declined-11-point-9-percent-in-2019>
- [9] Gartner, “Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Grew 10.4% in 2020”。  
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-04-12-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-10-4-percent-in-2020>
- [10] 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol. 3) – ネットワーク関連消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題 –”, 令和 3 年 2 月。

## 4. 他業界から得られたトレンド

## 4. 他業界から得られたトレンド

時代の進化を作り出してきたモバイルシステムには、今後、さまざまな社会的な課題の解決に寄与することが求められている。このため、Beyond 5G に求められる性能や機能を考えるためには、5G 以前とは異なり、幅広い業界の実情を把握する必要がある。よって、本章では、通信業界のみならず、世の中に存在するすべての業界における課題を洗い出し、課題解決案、業界としてあるべき姿や夢、さらには、Beyond 5G に期待する性能や機能をまとめる。ユースケースや利用シーンについては、5G 以前で実現できるものと、Beyond 5G で期待できるものがある。これらを明示するために、以下のいくつかの節ではユースケースや利用シーンを二軸で表している。

なお、以下では現存するすべての業界を 15 の節に分類し、それぞれの節ごとに異なる執筆者に調査や分析、執筆をお願いした。デジタル化や最新のモバイルシステムの力を必要とするのはすべての業界に共通だが、現時点でのデジタル化やモバイルシステムの利用状況は業界によって異なる上、今後、これらに求める内容も業界によって異なる。したがって、節ごとの記述内容や文章量に差異があることをご了承願いたい。

### 4.1 金融

社会全体のデジタルトランスフォーメーションが進む中、銀行、証券、保険などの金融業界においては、業種間の統合や連携が進み新たなサービスが生まれつつある。本節ではそういった流れを踏まえ、金融業界の将来像を考察する。

#### 4.1.1 現状と課題

金融業界においても他業種同様、ブロックチェーンや AI を用いた新たなサービス提供が進みつつある。また、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響もあり、非対面営業やキャッシュレス・オンライン決済が浸透しつつある。さらには、小売業、情報通信業やサービス業など異なる業種の金融業界への参入など、金融関連のプレイヤー自体が多くなりつつある。加えて、関連業界の DX 化の影響が金融業界におよぶことが予想される。特に、移動手段の変化に伴い、保険業界には大きな変化がもたらされる可能性がある。

このような状況をふまえ、金融業界では、大きくは、現行業務における運用コストの低減と高付加価値ビジネスへのシフトが課題として挙げられる。

- 運用コスト低減への要求

預金、貸金といった従来の業務では、低金利状態の継続や為替取引手数料等の低減による収益の低下といった状況にあり、業務運用コストの低減が求められている。そのため、各店舗の統廃合や若しくは店舗の規模縮小、店舗内の従来型設備(ATM など)の削減が進んでいる。合わせて、店舗を中心とした対面ビジネスに代わり、自宅や職場、モバイルを活用したオンラインビジネスへの移行による運用コスト削減が進んでいる。

- 高付加価値ビジネスへのシフト

業務運用コストの低減とともに既存ビジネスから、高付加価値ビジネスへのシフトによる高収益化が重要となっている。たとえば、ラップ口座など一括型の顧客投資や、株式・債券などの従来型投資から不動産・商品などのオールタナティブ投資などの新たな投資運用や、機関投資家向けの M&A などアドバイザーサービスが挙げられる。

#### 4.1.2 期待する将来像

対面からオンライン化、キャッシュレス化に伴い顧客との接点がデジタル化されることや、高付加価値ビジネスへのシフト等事業の多様化の方向性とあわせ、金融サービスは既存サービスの高度化に加え、さまざまなサービスの統合や他業界を巻き込んだ新たなサービスの方向に進むことが想定される。

- 既存サービスの高度化

業務で収集した顧客データなどのビッグデータを AI を利用して活用することにより業務の効率化や多様なサービスを実現する。融資における与信分析や投資における銘柄分析への活用、ドライブレコーダなど運転実績の自動車保険のメニューへの活用などが挙げられる

- 他業界との融合

金融業界がもつ様々なサービスを API として開示し、BaaS(Banking as a Service)として提供することで、他業界と連携したサービスが可能となる。他業界のサービス・アプリケーションを BaaS を利用して金融サービスを埋め込む（エンベデッドファイナンス）が可能となる。

- 新たな金融サービスの出現

電子マネーや暗号資産などのデジタル通貨の普及に伴い、中央銀行デジタル通貨(CBDC: Central Bank Digital Currency)の導入や取引データのビッグデータとしての二次活用など、既存サービスを越えた将来の金融サービスとして考えられる

- 関連業界からの影響

関連業界のデジタル化の進展とともに既存の金融・保険サービスの拡大が考えられる。

#### 4.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

4.1.2 節で描いた金融サービスの将来像実現に向け、Beyond 5G を活用する事が期待される活用例を以下にまとめる。

- デジタル貨幣社会の浸透

小売から始まり取引全てがデジタル化する社会の実現



- ホログラム等を利用した店舗レスバンキングサービスの台頭  
対面サービスの高度化が実現
- 高度なセキュリティサービスの提供  
Beyond 5G ネットワークで担保されるセキュリティを金融サービスに適用することで、利用者に優しい高セキュリティサービスを実現する
- 新たな保険サービスの提供  
関連業界のデジタル化の進展とともに以下のような新たな保険サービスが考えられる。
  - 自動車業界における自動運転導入に対応した保険
  - UAV など新たな乗物に対する保険
  - 宇宙、海中での活動に関する保険
  - 予測精度の向上による自然災害に関する保険

#### 4.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

上記のような金融に期待される活用例を実現するために必要となる Capability 表 4.1-1 に示す。また、Beyond 5G ネットワークが果たす役割をネットワークの要件から記載する。

表 4.1-1 Beyond 5G の活用例と Capability

活用例	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
デジタル貨幣社会	○	○	○	○				○		
ホログラム等を利用した店舗レスバンキング	○	○	○	○				○		
高度なセキュリティサービス				○						

##### (a) 超多数同時接続

前述の与信業務や保険メニューなど既存サービスの高度化において、顧客や IoT などのビックデータ分析をリアルタイムで行うためには、ネットワークとしては超多数同時接続を提供する必要がある。

##### (b) 超高速・大容量、超低遅延

金融商品の取引、特に、仮想通貨による取引の増大や株式等リアルタイム取引の高速化などにおいては、超高速・大容量、超低遅延が要求される。

対面からオンラインビジネスへの移行に伴い、異なるデバイス（テレビやスピーカー）やさまざまな UI

(たとえばホログラムなど) を活用した営業業務など十分の通信容量やリアルタイム性が確保できる超高速・大容量、超低遅延のネットワークインフラが必要となる

(c) 超安全・信頼性

個人情報を含むデータを取り扱うことから、個人の同意を含めた高いセキュリティが必要である。取引データの二次利用や他業種連携などサービスを提供するプレイヤーが多い場合は特に重要である。

(d) カバレッジ拡張

金融サービス利用者が自宅や職場だけでなく、いつでもどこでもモバイル通信をもちいてサービスを受けられるためには、地域的なデジタルデバイドが解消されるべきであり、異種無線連携や機器連携などを含めた広いカバレッジの提供が必要である。

なお、4G や 5G においてもこれらの要件を満たすことで金融サービスの提供自体に問題はないものもあるが、Beyond 5G ではさらなる大容量データのリアルタイム解析や UX の向上などの高度化が期待できる。図 4.1-1 に Beyond 5G を活用した金融の姿を示す。

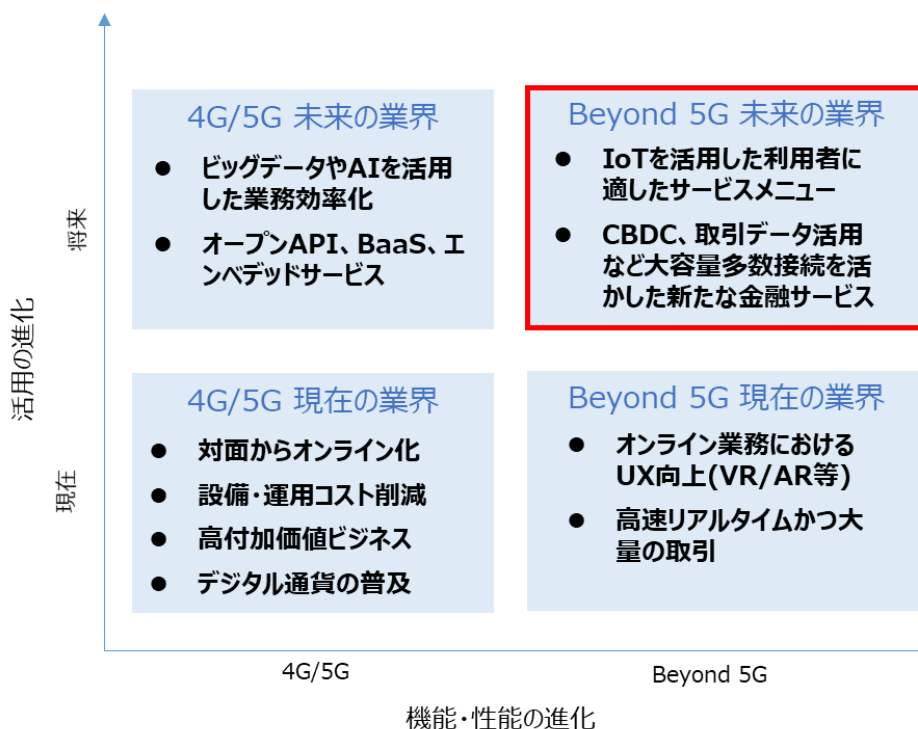


図 4.1-1 Beyond 5G における金融業界

#### 4.1.5 まとめ

本節では、金融業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

[1] 金融庁, 2021 事務年度 金融行政方針, “コロナを乗り越え、活力ある経済社会を実現する金融システムの構築へ”。

[https://www.fsa.go.jp/news/r3/20210831/20210831\\_allpages.pdf](https://www.fsa.go.jp/news/r3/20210831/20210831_allpages.pdf)

## 4.2 建設・不動産

### 4.2.1 現状と課題

建設・土木分野は、持続可能な建設産業の構築を課題としている。産業別の就業者数の推移を見ると、全体では 2012 年（平成 24 年）以降増加傾向となっている一方、建設業では 2002 年の 618 万人から 2010 年に 504 万人まで減少し、近年は横ばいで推移している（2019 年 499 万人）。また建設業は、全産業平均に比べて高齢化が進んでおり、将来的な担い手の確保が課題である。55 歳以上の就業者の割合が 2002 年の 24.8%より 10.4%上昇し、2019 年には 35.2%となっている。

近年の自然災害の激甚化・頻発化等を踏まえれば、今後とも、防災・減災、インフラ老朽化対策等の国土強靱化や経済の活性化等に直結する社会資本の戦略的な整備を進めていくことが不可欠であり、業界の需要は大きい。さらに有効求人倍率は、2019 年には建設・土木・測量技術者が 5.86 倍、土木の職業が 5.21 倍、建設の職業が 5.02 倍となるなど、高い水準である。（全職業の合計では 2019 年には 1.45 倍）。

また人口減少や高齢化が進む中であっても、建設業は賃金水準の向上や休日の拡大等による働き方改革とともに、ICT 活用などによる生産性向上が必要不可欠である。

海外においても、建設業分野での ICT 活用は課題となっている。作業の多くは屋外の現場で行われ、異なる建設プロセスで多くの作業員、組織が関係する特徴を有する。またトラックおよび建設重機等の機械、化学物質および重材料等の危険物を扱うので、作業計画、管理、および安全の確保が重要な課題である。ICT を広く活用することで、作業員や建設機器のモニタリング、重機の遠隔操作、現場作業の自動化を図り、持続的、効率的な建設および現場の安全性向上を実現することが期待される。ICT に関するこのような取組みは、construction 4.0 と呼ばれている。

不動産業は、国民生活および経済発展を支える重要な基幹産業であり、2030 年に向けても成長発展が期待できる。一方不動産業の従業員数は 133.7 万人で、2015 年時点で 60 歳以上が約 5 割と高齢化が進んでいる。今後の課題として、人口の減少、遊休不動産の増加、不動産の老朽化、就業者の高齢化・後継者不足、新技術で可能となってきた多様なライフスタイルへの対応、安全安心な不動産取引の実現、ストック型社会の実現があげられる。また新型コロナウイルスのため、営業活動の制約、賃貸需要の低迷、空き室率の上昇等の影響が出ている。

国土交通省では、ICT の活用等により調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおいて、抜本的な生産性向上を目指す「i-Construction」に取り組んでいる。i-Construction の取組みの一環として、ICT 施工の普及促進を推進しており、3 次元データを活用した建設機械の自動制御等により高精度かつ効率的な施工を実現するマシンコントロール/マシンガイダンス技術等の積極的な活用を図っている。また、建設は屋外作業が基本であり、気象要件の影響を受けやすいことから、そういった要件を踏まえコンクリート工の規格を標準化しデジタル化できるようにしていくことが重要視されている。

i-Construction での先進的な取組みとしては、以下のような事例があげられる。

- UAV を用いた 3 次元測量
- 3 次元測量・設計データを活用した ICT 建機による施工
- 鉄筋配置・結束作業をロボットアームで行う組立自動化システム
- ウェアラブルカメラを活用した遠隔検査
- 深層混合処理船の操作ノウハウをプログラミングし自動化
- 狭小空間専用小型ドローンを活用したインフラ設備点検
- 遠隔参加型 VR を用いた施工検討の効率化・高度化
- 国土交通省は、2021 年 3 月屋外のローカル 5G 無線局免許を取得

不動産業のサービスとしては、以下の ICT 活用事例がある。

- IoT を用いた空き家管理
- IoT による効率的な地域運営（例えば、センサーやカメラ等から取得されたデータ等を活用して効率的な地域サービスの運営を行う）
- オフィスの知的生産性を高める環境制御システム（AI・IoT により、室内温湿度や従業員のバイタルデータを分析）

#### 4.2.2 期待する将来像

今後の建設業分野は、5G、AI、ロボット、クラウド等の革新テクノロジーの建設、インフラ分野への導入を進め、無人化施工技術の現場実証や、現場作業員を支援する技術、映像データを活用した監督検査の省力化などの取組みが期待されている。特に建設産業の生産性向上のためには、「高速大容量」、「多接続」、「低遅延」の特性を持つ 5G システムを活用した無人化施工等が有効な手段である。

また 3 次元モデルを活用し社会資本の整備、管理を行う CIM（Construction Information Modeling, Management）、および BIM（Building Information Modeling）の普及を更に図り、業務効率化・高度化を推進する。

また不動産業分野においても、AI、IoT 等の新技術の活用を目指している。例えば VR によるオンライン物件内覧、AI、IoT、ロボット等を導入した不動産管理サービスにより、効率性、利便性向上を図ることが考えられる。不動産投資で AI による投資助言サービスを利用する動き、さらに不動産取引では、遠隔地間のコミュニケーション、電子署名、ブロックチェーン技術を用いた決済手段や取引方法で、精度および安全性の向上が見込まれている。

### 4.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

建設・不動産の分野においては、以下の Beyond 5G 活用例が考えられる。

- 熟練技術者と協力した遠隔施工 – VR 技術を利用して、遠隔の熟練技術者と協力して現場の作業者が施工・建設を行う。
- 熟練技術者による遠隔施工 – ハプティクス技術や VR 技術を利用して、建設機械またはロボットの遠隔操作による施工・建設。
- あらゆる建設部材の IoT 化を行うことによるインフラ、建築物、不動産の保守管理 - 振動、温度、湿度、ガスなどのセンサーを付け、常に監視しながら予防保全、管理を行う。
- 物理空間とサイバー空間による建設 - 物理空間とサイバー空間融合を Beyond 5G システムにより実現する。サイバー空間上での処理で設計を行い、実際の施工の際には、各建設機材の測位や環境センサーが温度、湿度、ガスの発生などをセンシングしながら、サイバー上で設計通りに建設が進んでいるか、建設資材の管理、現場環境に問題が無いかなどをチェックする。
- 自動建設機械やロボットが工事・建設を行う完全自動化 - 作業員に代わって自動走行車が機材を運搬、自動建設機械が工事を行い、ロボットが自動で建設を行う。Beyond 5G システムによるデジタルツインのサポートにより、問題が発生したときに即座に対応する。
- デジタルツインによる不動産の管理・取引および不動産投資
- 災害時の情報提供 - 地震や津波、ゲリラ豪雨などの自然現象が発生したときに、橋の振動や浸水の水位などの状況から通行可能な道路の情報、避難経路などを即座に提供できるシステム。
- VR によるオンライン物件内覧

### 4.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

4.2.3 節で示す活用例から、表 4.2-1 に示す Beyond 5G に求められる Capability が考えられる。

表 4.2-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
熟練技術者による遠隔施工 熟練技術者と協業した遠隔施工	○	100ミリ秒以下		○						
デジタルツインによる自動建設、インフラ保守		○		○		○	1~2cm			
建設部材のIoT化を行うことによるインフラ、建築物の保守管理			○		○		1~2cm			
デジタルツインによる不動産・取引・投資				○						
VRによるオンライン物件内覧	○	○								

建設・不動産業界の進化と Beyond 5G の技術進化の融合した姿を図 4.2-1 に示す。

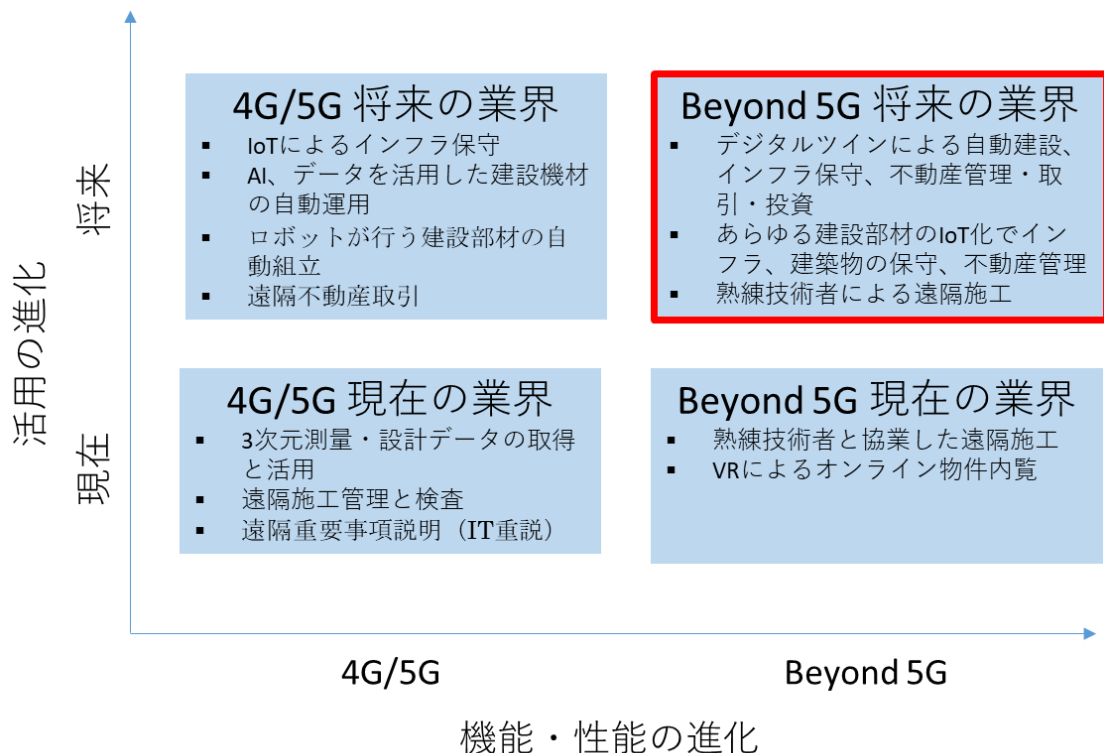


図 4.2-1 Beyond 5G における建設・不動産業界



#### 4.2.5 まとめ

本節では、建設業および不動産業の現状と課題を検討して、期待する将来像、および Beyond 5G を活用した活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、5G を上回る超低遅延、超高速・大容量、超安全・信頼性、および超低消費電力、さらには高精度な測位・センシング、および時刻同期精度が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省, 令和 3 年度版国土交通白書.  
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/pdf/kokudo.pdf>
- [2] 国土交通省, 令和 2 年度版国土交通白書, “第 2 章 時代の要請にこたえた国土交通行政の展開第 11 節 効率的・重点的な施策展開、第 10 章 ICT の利活用及び技術研究開発の推進第 4 節 建設機械・機械設備に関する技術開発等”.  
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdfindex.html>
- [3] i-Construction.  
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- [4] 国土交通省, インフラ分野の DX.  
[https://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000073.html](https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000073.html)
- [5] 国土交通省, 不動産ビジョン 2030, “報道発表資料: 「不動産ビジョン 2030」をおよそ四半世紀ぶりに策定 ~令和時代の『不動産最適活用』に向けて、これからの不動産のあり方を提言~”.  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/totikensangyo16\\_hh\\_000190.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/totikensangyo16_hh_000190.html)
- [6] 国土交通省, 働き方改革を支える今後の不動産のあり方検討会.  
[https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/sosei\\_const\\_tk3\\_000139.html](https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/sosei_const_tk3_000139.html)
- [7] 鹿島建設, 中期経営計画 (2021-2023 年) .  
<https://www.kajima.co.jp/ir/newplan/index-j.html>
- [8] “5G for Construction: Use Cases and Solutions”.  
<https://www.mdpi.com/2079-9292/10/14/1713>
- [9] Munoz-La Rivera, F.; Mora-Serrano, J.; Valero, I.; Oñate, E. “Methodological-technological framework for Construction 4.0”, Arch. Comput. Methods Eng. 2021, 28, 689–711.
- [10] 経済産業省, 経済産業省ひと言解説, “10 年ぶりに低下傾向に転じた貸事務所業の活動 ; 特に東京で空室率が上昇”.  
[https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto\\_kako/20210125hitokoto.html](https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20210125hitokoto.html)



## 4.3 物流・運輸

### 4.3.1 倉庫、物流

倉庫・物流産業は極めて重要な社会インフラであり、工業製品や原材料、生鮮・加工食品、廃棄物に至るまで様々な物資が保管・貯蔵され、それらが必要な時に必要な場所へ道路、海上、航空、鉄道等を通じて輸送されることにより、国民生活や産業生産活動が極めて効率的に維持されている。

本節では、人口の減少や国際経済の不確実性の増大、新型コロナウイルス感染症の流行など、倉庫・物流が直面する課題を勘案しつつ、持続的な成長と安定的な国民生活の維持のための倉庫・物流の将来像を描くとともに Beyond 5G で実現が期待される活用例や Capability について考察する。

#### 4.3.1.1 現状と課題

現在の日本の物流政策は、令和3年6月に閣議決定された「総合物流施策大綱（2021年度～2025年度）」[4]に沿って行われている。この大綱や物流を取り巻く現在の動向[5]に物流の現状が取りまとめられているように、物流産業における労働力不足の問題、災害に対する物流ネットワークの脆弱性、国際物流の環境変化、新技術の導入等に対応するため、我が国の物流が直面する課題として、以下の5点があげられている。

- ① 人口減少の本格化や労働力不足への対応
- ② 災害の激甚化・頻発化と国民の安全・安心の確保
- ③ Society5.0の実現によるデジタル化・イノベーションの強化
- ④ 地球環境の持続可能性の確保やSDGsへの対応
- ⑤ 新型コロナウイルス感染症への対応

#### 4.3.1.2 期待する将来像

4.3.1.1節で挙げた課題を踏まえて、以下の取り組みがなされている。

- ① 物流DXや物流標準化の推進によるサプライチェーン全体の徹底した最適化（簡素で滑らかな物流の実現）
  - （1）物流デジタル化の強力な推進
  - （2）労働力不足や非接触・非対面型の物流に資する自動化・機械化の取組の推進
  - （3）物流標準化の取組の加速
  - （4）物流・商流データ基盤の構築等
  - （5）高度物流人材の育成・確保
- ② 労働力不足対策と物流構造改革の推進（担い手にやさしい物流の実現）
  - （1）トラックドライバーの時間外労働の上限規制を遵守するために必要な労働環境の整備
  - （2）内航海運の安定的輸送の確保に向けた取組
  - （3）労働生産性の改善に向けた革新的な取組の推進
  - （4）農林水産物・食品等の流通合理化
  - （5）過疎地域におけるラストワンマイル配送の持続可能性の確保

- (6) 新たな労働力の確保に向けた対策
- (7) 物流に関する広報の強化
- ③ 強靱で持続可能な物流ネットワークの構築（強くてしなやかな物流の実現）
  - (1) 感染症や大規模災害等有事においても機能する、強靱で持続可能な物流ネットワークの構築
  - (2) 我が国産業の国際競争力強化や持続可能な成長に資する物流ネットワークの構築
  - (3) 地球環境の持続可能性を確保するための物流ネットワークの構築

これらは、2025 年度までの施策ではあるが、2030 年代においても Beyond 5G がもたらす技術革新等により、より高度な物流サービスが期待されるであろう。このなかでも特に、物流デジタル化、自動化・機械化、物流標準化、データ基盤の構築、ラストワンマイル配送、物流ネットワークの構築では、Beyond 5G による革新的な通信およびネットワーク技術を用いた様々な活用例が想定される。

#### 4.3.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

4.3.1.2 節で描いた物流の将来像への実現に向けて、Beyond 5G を活用する事で実現が期待される活用例を以下にまとめる。

- 倉庫・物流における Beyond 5G IoT の利用
  - ・ 例：Beyond 5G で提供される廉価で高度な IoT 技術や RF Tag 等による、荷物の位置の追跡や管理。
- 倉庫・物流施設内での Beyond 5G ローカル通信・ネットワークを用いた、機械、ロボット等の自動運転
  - ・ 例：倉庫・物流施設内における通信およびネットワークのサポート。
  - ・ 例：また、機械やロボットの自動運転のサポート。
  - ・ 例：倉庫・物流施設内での人や機械・ロボットとの相互作用の監視、事故災害回避
  - ・ 例：サイバーポートと呼ばれる、港湾のデジタル化、IT 化、および自動化。
- 物流におけるドローン、コネクティッドカー又は船の利用による効率化、省力化、高速化
  - ・ 例：ドローンや自動運転車を使ったラストマイルの配送。
  - ・ 例：ドローンによる無人・遠隔監視、メンテナンス。
  - ・ 例：高速鉄道、高速車両、高速ドローンを使った高速配送。
  - ・ 例：隊列走行や連結トラックによる自動・半自動・大量効率輸送。
  - ・ 例：自動運転船や自動貨物列車による大量輸送、モーダルシフト。
  - ・ 例：無人タクシー・空飛ぶタクシー等、次世代モビリティ(交通)との連携。
  - ・ 例：スマートシティとの連携。
- 海上ルート含む NTN 等の利用による全地球的カバレッジ
  - ・ 例：人工衛星や HAPS 等の利用による全地球的カバレッジによる物流支援

- ビッグデータ/AI を使った物流の最適化、Beyond 5G クラウドやデジタルツインの応用
  - 例：生産・配送の先読み、混載やルートの最適化・自動化。
  - 例：AR による、作業の最適化、効率化、遠隔操作、およびトレーニング
  - 例：対サイバーテロ・犯罪のためのセキュリティ、プライバシー保護
  - 例：対自然災害等のための、ネットワークやクラウドの冗長性、補完性のサポート

#### 4.3.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

4.3.1.3 節では、Beyond 5G の活用により期待される倉庫、物流の活用例についてまとめた。本節では各活用例に対する、Beyond 5G の Capability について考察する。

- 倉庫・物流における Beyond 5G IoT の利用
  - 超低消費電力：荷物追跡や物資の保管等では長期間充電ができない活用例が多く、究極的にはボックススキャッター通信等の利用によりバッテリーのいらぬ IoT デバイスなどが要求される。
  - 超多数同時接続：多くの荷物を扱う倉庫・物流施設では多数同時接続性が要求される。
- 倉庫・物流施設内での Beyond 5G ローカル通信・ネットワークを用いた、機械、ロボット等の自動運転
  - 超低遅延、時刻同期精度、超安全・信頼性：機械・ロボットの自動運転に必要な低遅延、時刻同期精度、高信頼性が要求される。
  - 測位・センシング：通信と融合した無線センシングにより、機械・ロボットの自動運転に必要な高精度の位置情報が要求される。
  - 超安全・信頼性：施設内の物理的安全性、通信やネットワークのセキュリティ、災害やテロ・犯罪にたいする堅牢性が要求される。
- 物流におけるドローン、コネクティッドカー又は船の利用による効率化、省力化、高速化
  - 超低遅延、時刻同期精度、超安全・信頼性：自動運転に必要な低遅延、同期精度、高信頼性が要求される。
  - 測位・センシング：自動運転に必要な高精度の位置情報が要求される。
- 海上ルート含む NTN 等の利用による全地球的カバレッジ
  - カバレッジ拡張：通常の地上ネットワークではカバーできないエリアを人工衛星や HAPS 等によりネットワーク接続を可能にする事が要求される。
- ビッグデータ/AI を使った物流の最適化、Beyond 5G クラウドやデジタルツインの応用
  - 超高速・大容量：ビッグデータやデジタルツインに必要な大きな通信容量が要求される。
  - 機械学習および人工知能：大量のデータを効率的に解析し、需要予測等含め、より効率的な生産および配送が要求される。
  - クラウド化、ネットワーク仮想化・スライス、エッジコンピューティング等：高度のネットワー

ク機能が様々な倉庫・物流における活用例に要求される。

- 超低遅延、時刻同期精度、超安全・信頼性：リアルタイムでのデジタルツインの更新には低遅延、高精度の時刻同期、高信頼の通信が要求される。
- 測位・センシング：通信と融合した無線センシングにより、高精度の位置情報を用いたデジタルツインの作成が要求される。
- 超安全・信頼性：プライバシーや機密の保護、災害やテロ・犯罪にたいする堅牢性、冗長性、補完性が要求される。

以上の活用例と求められる Capability の対応を表 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
IoT利用			○		○					
機械、ロボット自動運転		○		○		○	○			
ドローン、コネクテッドカー又は船の利用		○		○		○	○			
海上ルートを含むNTN等の利用								○		
クラウド・デジタルツインの応用	○	○		○		○	○			

倉庫、物流業界の進化と Beyond 5G の技術進化の融合した姿を図 4.3-1 に示す。

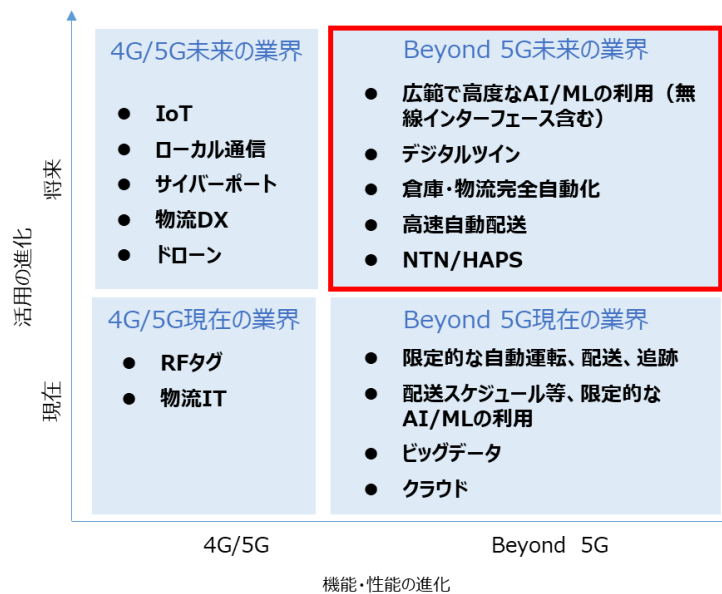


図 4.3-1 Beyond 5G における倉庫、物流業界

#### 4.3.1.5 まとめ

本節では、倉庫・物流の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した Beyond 5G に求められる Capability としては超低消費電力、超多数同時接続、超低遅延、時刻同期精度、超安全・信頼性、測位・センシング、超安全・信頼性、カバレッジ拡張、超高速・大容量、機械学習・人工知能、クラウドが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 令和 3 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>
- [2] 政府 CIO ポータル, 世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和 2 年 7 月 17 日閣議決定）.  
<https://cio.go.jp/data-basis>
- [3] 国土交通省, 令和 3 年版国土交通白書.  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- [4] 国土交通省, 総合物流施策大綱（2021 年度～2025 年度）（令和 3 年 6 月閣議決定）.  
<https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/butsuryu03100.html>
- [5] 国土交通省, 第 1 回 2020 年代の総合物流施策大綱に関する検討会, “参考資料 1 物流を取り巻く動向について”.  
[https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/seisakutokatsu\\_freight\\_tk1\\_000181.html](https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/seisakutokatsu_freight_tk1_000181.html)
- [6] 経済産業省, 物流分野におけるモビリティサービス（物流 MaaS）勉強会とりまとめ.  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/butsuryu\\_maas/20200420\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/butsuryu_maas/20200420_report.html)
- [7] 経済産業省, 平成 28 年度商取引適正化・製品安全に係る事業 サプライチェーン最適化に向けた物流の実態調査等 報告書.  
[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H28FY/000608.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000608.pdf)
- [8] Mikko A. Uusitalo, et al., “Ultra-Reliable and Low-Latency 5G Systems for Port Automation”, IEEE Communications Magazine (Volume: 59, Issue: 8, August 2021).  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9530504>

## 4.3.2 航空

### 4.3.2.1 現状と課題

グローバルな経済成長の影響を受け、航空旅客数は拡大傾向にある。2021年時点では新型コロナウイルスの影響により、一時的に2020年より旅客数が減少しているが、IATA（International Air Transport Association）によると2023年に新型コロナウイルス前の水準を5%上回り、その後堅調に伸びると予測されている[1]。2030年には、新型コロナウイルスの影響が低減していれば、グローバルに55億人の航空旅客数の需要が見込まれ、市場の拡大が予想される。

航空機内の乗客向け通信接続サービスは、新型コロナウイルス以前の予測では、2021年からの5年間で市場が約1.5倍伸長[2]するとされていた。また、乗客の3人に1人は、航空会社選択時に通信接続サービスが使用できるかを考慮するというアンケート結果があり[3]、航空機内の空間・時間を快適に楽しみたいという乗客の要望はさらに増加すると予想される。

機体の進化として、低炭素燃料の使用や電動化、運航速度の高速化、航空機内の非乗客向け通信配線のワイヤレス化が検討されている。電動化については2025年頃に導入を開始され、電動化の比率は2035年に4.4%になると予測されている。飛行距離が数十km程度のビジネスジェット等では、完全電動式が採用され、航続距離が数百km以上になるリージョナルジェット以上ではハイブリッド式や燃料電池を用いた方式を採用することが検討されている[4]。また、運航速度の高速化の技術開発も進められており、コンコルド以降商用機からは姿を消していた超音速旅客機[5]の再登場や、大型ロケットと宇宙船「スターシップ」を組み合わせたサブオービタル軌道による2地点間高速移動[6]の実現が期待されている。航空機内の通信配線のワイヤレス化では、一例としてワイヤ本数10万本、ワイヤ長470km、ワイヤ重量5,700kgとなる配線のワイヤレス化による軽量化が望まれている[7]。

航空交通管理システムは、安全・安心かつ高効率な運行に向け、日本では国土交通省のCARATS（Collaborative Action Renovation of Air Traffic Systems）[8]、欧州ではSESAR（Single European Sky ATM Research）[9]、米国ではNextGen（Next Generation Air Transportation System）[10]が航空交通管理システムの高度化を検討中である。

これらの動向を踏まえ、2030年の航空業界の課題として、グローバルな航空需要の増大への対応、多様なニーズへの対応、環境への配慮、航空管制の高度化、さらなる安全・安心を取り上げる[11]。

#### 課題1. グローバルな航空需要の増大への対応

航空需要の増大により、混雑空港および混雑空域における高密度運航の実現、空港までの、陸上・海上を含めたアクセスの改善、旅客の諸手続きにかかる時間の短縮、パイロットを含む航空業界の人材不足への対応が求められている。

#### 課題2. 多様なニーズへの対応

航空業界へ求めるサービスは多様化しており、ビジネスジェットなどの、企業・団体又は個人が商用目的で利用する航空機の普及も期待されている。多様な旅客に対して、それぞれに適した空港・航空機内でのサービス向上が求められている。旅客需要のみならず、グローバルな電子商取引による航空貨物輸送への需要も増加しており、貨物の手続きの電子化や、危険物の確認の効率化が求められている。



また、ドローンや空飛ぶクルマなど、新しいサービスについても、期待が高まっている。

### 課題 3. 環境への配慮

脱炭素社会の実現にむけ、航空機の省燃費機材の導入、軽量化の推進が求められている。国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）の取り組みでは、燃料効率を毎年 2%改善、2020 年以降総排出量を増加させないことが目標に掲げられている。航空用ジェット燃料では、CO<sub>2</sub>削減効果のある、SAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）の開発が進められている。日本国内では、実証プラントで生産された国産 SAF が、航空用ジェット燃料に関する国際規格の品質検査に合格し、実際の定期運航に供給され[12]、SAF の普及が期待されている。また、空港の脱炭素化に向け、空港施設・車両の CO<sub>2</sub> 削減対策や空港再エネ拠点化も求められている[13]

### 課題 4. 航空管制の高度化

離発着の多い空港において、視界不良であっても、管制官が航空機の位置を精密に把握し、同時離発着を支援する仕組み、全飛行フェーズでの衛星航法の実現、運航に関わる情報を包括的に管理し、必要な時にアクセスできるネットワークの構築、国際間の情報共有、協調的な運用、航空利用に特化した気象予測情報の作成・航空機上の気象情報の活用等、気象情報の高度化が求められている。

### 課題 5. 安全・安心

テロ対策として、保安検査の厳格化を図りつつ、検査の負担を軽減できる高度な保安検査機器の導入が望まれている。

## 4.3.2.2 期待する将来像

4.3.2.1 節で上げた、航空業界の現状と課題を踏まえ、航空業界は、グローバルに増加する需要と市場の拡大に対して、さらなる技術革新による効率化、サービスの発展が望まれており、航空業界が目指す将来像として、以下の 4 点が挙げられる。

- 安全・安心かつ便利・快適な空の旅  
安全・安心かつストレスフリーな移動および、快適な航空機内サービスを乗客に提供する。
- 持続可能な航空輸送  
機体を高度化し、燃費向上・脱炭素化を実現する。操縦アシストおよび無人運行により、人材不足を解消する。
- 高密度な運航  
航空管制の高度化により、より高密度な運航を実現する。
- 新しい航空サービスの導入  
ドローン・空飛ぶクルマによる従来の航空機以外のサービスへ発展する。超音速航空機の再登場により、航空機の移動時間が大幅に短縮する。

## 4.3.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

4.3.2.2 節で示した航空業界が目指す将来像にむけ、Beyond 5G で実現が期待される活用例を

以下に示す。

### <安全・安心かつ便利・快適な空の旅を実現するサービス>

#### 活用例 1-1：安全でストレスフリーな移動

旅客の自宅から空港・および空港内の移動に対して最適なルートおよび移動手段を提供する。保安検査では、高性能ボディスキャナ、高性能 X 線検査装置など、高度な保安検査機器が導入され、保安性の向上および検査時間が短縮される。チェックイン・搭乗ゲートでは、顔認証・生体認証などにより一元管理され、旅客の負担が軽減される。広大な空港では、空港内をパーソナルモビリティによる自動ナビゲーション・隊列走行により誰でも快適に移動できるようになる。荷物は、スマートタグを活用したラゲッジ管理により、荷物ピックアップの遅延短縮とトレースを実施する。これらの技術は、課題 1、課題 2、課題 5 の解決に貢献する。

#### 活用例 1-2：快適な航空機内サービス

航空機内において、パーソナライズされた環境・エンターテインメントを提供し、より快適な空間・時間を提供する。個人に合わせた空調・照明・座席の配置・食事サービスを自動で選択・提案する。エンターテインメント機器は、個人の趣向に合わせた画面表示、図 4.3-2 に示すような持ち込みデバイス（スマホ・タブレット・PC）とも連動し、自宅と同様の通信環境を提供する。また、航空機内において没入感のある VR/AR により、長時間となる空の旅に新たなエンターテインメントを提供する。

さらに、客室乗務員の業務効率化のため航空機内通信を活用し、乗務員間および地上職員とリアルタイムに情報を共有する。これらの技術は、課題 2 の解決に貢献する。



図 4.3-2 航空機内における VR/AR

#### 活用例 1-3：地上業務の支援

広大な空港のすべてのエリアをカバーエリアとする超安全・信頼性および超低遅延通信により、手荷物搬送用車、ランプバス、除雪車両などの、空港内のモビリティの自動運転や運行管理を支援する。航空機の整備において、多種多様な大量の整備データを、超高速・大容量によりアップロードし解析し、整備時間の短縮に貢献する。これらの技術は、課題 1、課題 5 の解決に貢献する。



## <持続可能な航空輸送を実現する機体の高度化>

### 活用例 2-1：燃費向上・脱炭素化

新素材の活用や航空機内部の配線のワイヤレス化が進み、機体の軽量化による燃費向上・CO<sub>2</sub> 排出量が削減される。航空機内部の配線のワイヤレス化では、通信が途切れない安全性を確保する必要がある。ワイヤレス化により、ワイヤの配線に影響されない航空機内設備の配置が可能となる。これらの技術は、課題 3 の解決に貢献する。

### 活用例 2-2：操縦アシスト・運行管理

航空管制・航空機のセンサーの高度化により、パイロット数を 2 名から 1 名または、無人飛行が実現する。無人運航では特に離着陸時には管制と連携したきめ細かな制御が必要であり地上管制と航空機との超安全・信頼性および低遅延通信でサポートする。悪天候、特に積乱雲による乱気流や想定外の事態に備えて、センサーによる自律的な周辺状況（雲の発達・風速・風向き等）や機体の振動、機器状態の繊細な状態把握と管制・コントロールセンターとのリアルタイムで共有する。さらに、航空機と航空機の間の大容量の直接通信により、詳細な情報をリアルタイムに共有する。これらの技術は、課題 1 の解決に貢献する。

## <高効率な運航を実現する航空管制>

### 活用例 3-1：高密度運航の実現

航空管制の精度向上および管制処理容量の増大により、図 4.3-3 に示すように、混雑空港における高密度運航を実現し、離発着数の増加および離陸待ち・着陸待ち時間を短縮する。航空管制の精度向上では、高精度な気象予測、航空機制御により、悪天候であっても複数機の同時離発着が可能となる。また、衛星航法の高度化により、視界不良時の着陸機会増加による運航率改善が可能となる [11]。管制処理容量の増大では、管制空域を高度別に分割し、管制取り扱い可能航空機数を向上させる。また、全航空機の出発から到着までの航路をグローバルに一元管理、予測能力の向上、運航情報の包括的管理など航空管制をスマート化し、運航を安定化・効率化する。これらの技術は、課題 1、課題 4 の解決に貢献する。

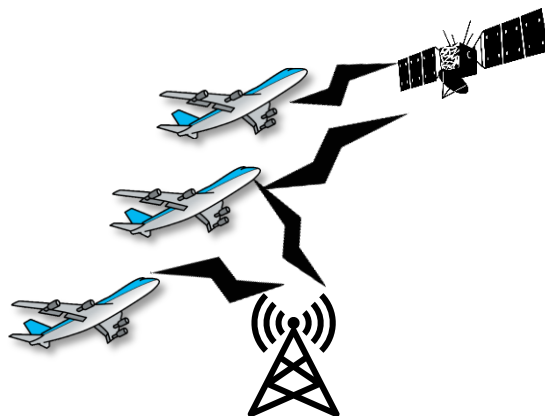


図 4.3-3 高密度運航の実現

## <新しい航空サービスの導入>

### 活用例 4-1：ドローン・空飛ぶクルマ

ドローン市場が拡大し、物流、計量、監視、災害対応、インフラ点検などに活用されていく。飛行空域・飛行方法について、ドローンの性能に合わせて、各国の法整備が進み、様々な用途のドローンが普及する。また、空飛ぶクルマとして、タクシー・緊急車両の飛行が開始され、移動時間の短縮を実現できる。パイロットによる有人飛行もしくは自動操縦や遠隔操縦による無人飛行の両方が考えられるが、どちらに対しても、ドローンや空飛ぶクルマが行き交う空域における事故を防止し、安全で快適な飛行を実現するためには、正確な位置測位、高度なセンシング機能、機体を制御するための超安全・信頼性および超低遅延が求められる。また、乗員・乗客のスマートフォン等の電子機器との通信のための上空の高速移動体への超高速・大容量通信技術も必要となる。これらの技術は、課題2の解決に貢献する。

### 活用例 4-2：超音速航空機

超音速旅客機では、ソニックブーム（衝撃波が生む、轟くような大音響）と燃費が悪いことが課題であった。ソニックブームを低減できる機体の設計より、超音速飛行できる空域が広がり、空気抵抗を下げる機体の設計により、燃費が向上し、超音速旅客機が普及し、大都市間の移動時間が大幅に短縮することが期待されている。また、航路として宇宙空間（高度 100km 超）までを含む高高度な航路を含む可能性もある。これらの空域へのカバレッジ拡張、超音速移動の追従、管制信号の低遅延通信および、活用例 1-2 に記載の乗客向けの超高速・大容量通信を実現することが求められる。これらの技術は、課題2の解決に貢献する。

#### **4.3.2.4 Beyond 5G に求められる Capability**

本節では、4.3.2.3 節の活用例に対して、Beyond 5G に求められる Capability について考える。

### 活用例 1-1：安全でストレスフリーな移動

- ・多くの旅客に対する映像認識や生体認識のための超高速・大容量かつ超低遅延通信
- ・パーソナルモビリティのための、車車間通信、測位・センシング
- ・荷物追跡のための低コストで電池レスな低消費電力デバイスによるスマートタグと測位・センシング

### 活用例 1-2：快適な航空機内サービス

- ・航空機内向けの超高速・大容量通信
- ・航空機と基地局間のトラヒック要求に合わせた柔軟な通信経路設定（例：GEO、LEO、HAPS、ATG 等複数経路の活用）
- ・機内通信への不正アクセスを防止する高いセキュリティ

### 活用例 1-3：地上業務の支援

- ・モビリティの自動運転や運行管理を支援する超安全・信頼性および超遅延通信

- ・ 航空機の整備情報をアップロードする超高速・大容量通信

#### 活用例 2-1：燃費向上・脱炭素化

- ・ 航空機内配線のワイヤレス化
  - 客席の IFE (In-Flight Entertainment) モニターへの超高速・大容量通信
  - 航空機内配線 (ハーネス) のワイヤレス化のための有線並みの超安全・信頼性および超低遅延通信と超低消費電力センサーデバイス

#### 活用例 2-2：操縦アシスト・運行管理

- ・ 管制と航空機の間および、航空機-航空機の直接通信の超安全・信頼性および超低遅延通信を実現する上空を含むカバレッジ拡張
- ・ 機体のコントローラーと多数のセンサーとの超安全・信頼性および超低遅延通信

#### 活用例 3-1：高密度運航の実現

- ・ 高精度な位置測位や環境センシング、上空に対する超安全・信頼性および超低遅延通信
- ・ シームレスな地上・非地上通信

#### 活用例 4-1：ドローン・空飛ぶクルマ

- ・ 空へのカバレッジ拡張
- ・ 遠隔操作のための低空での超安全・信頼性および超遅延通信、測位・センシング
- ・ 高速移動体への超高速・大容量通信

#### 活用例 4-2：超音速航空機

- ・ 宇宙空間を含むカバレッジ拡張、超高速移動時に途切れない通信

表 4.3-2 に、航空業界の活用例に対する Beyond 5G の Capability をまとめる。

表 4.3-2 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
1-1 ストレスフリーな移動	○				○		○			
1-2 快適な機内サービス	○			○						柔軟な通信経路設定
1-3 地上業務の支援		○		○						
2-1 燃費向上・脱炭素化	○	○		○	○					
2-2 操縦アシスト・運行管理		○		○	○			○		
3-1 高密度運航		○		○						シームレスな地上・非地上通信
4-1 ドローン・空飛ぶクルマ	○	○					○	○		
4-2 超音速航空機	○	○						○		超高速移動時に途切れない通信

図 4.3-4 に、縦軸に航空業界の活用例の進化、発展、横軸に通信ネットワークの機能・性能の進化とし、航空業界の活用例のマッピングを示す。右上の象限が、航空業界の発展と Beyond 5G の実現の両者で達成される活用例である。

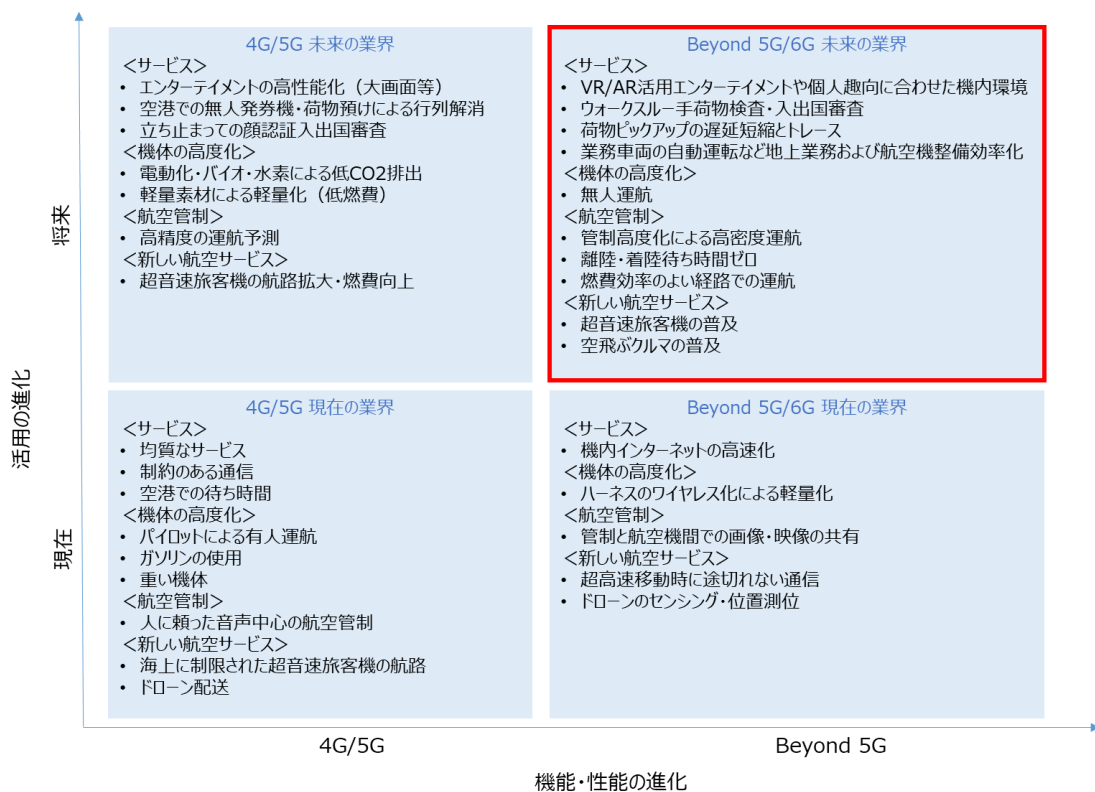


図 4.3-4 Beyond 5G における航空業界

#### 4.3.2.5 まとめ

本節では、航空業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G を活用した活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、超低消費電力、測位・センシング、カバレッジ 拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] IATA, “COVID-19 An almost full recovery of air travel in prospect”.  
<https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/an-almost-full-recovery-of-air-travel-in-prospect/>
- [2] talk Satellite, “IFC: Bubble or Boom?”.  
<https://www.talksatellite.com/EMEA-A28053.htm>
- [3] Panasonic Avionics Corporation, “Reinventing the flying experience.”.  
<https://info.panasonic.aero/wp-future-perfect-travel/>
- [4] 富士経済, “陸海空モビリティにおける CASE 動向の現状と将来展望”, 2021 年 1 月.
- [5] 日経クロステック, “電動化と超音速になぜ積極投資? ユナイテッド航空の幹部を直撃”.  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00134/090200278/>
- [6] ニュートンプレス, “Newton 2021 年 10 月号”.
- [7] Wireless Avionics Intra-Communications.

<https://waic.avsi.aero/>

- [8] 国土交通省, 将来の航空交通システムに関する推進協議会.

[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr13\\_000006.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html)

- [9] The SESAR Joint Undertaking, SMART AND SUSTAINABLE AVIATION FOR EUROPE.

<https://www.sesarju.eu/>

- [10] Federal Aviation Administration, Next Generation Air Transportation System (NextGen).

<https://www.faa.gov/nextgen/>

- [11] 国土交通省 航空局, “航空を取り巻く状況と今後の課題”, 2020年2月.

<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001330402.pdf>

<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001330403.pdf>

- [12] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “木くずや微細藻類から製造した持続可能な代替航空燃料を定期便に供給”.

[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101442.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101442.html)

- [13] 国土交通省, “空港の脱炭素化に向けた官民連携プラットフォーム”.

<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001424028.pdf>

### 4.3.3 鉄道

#### 4.3.3.1 現状と課題

2020 年以降は人口減少のほか、働き方の変化やネット社会の進展、自動運転技術の実用化等により、鉄道による移動ニーズが縮小すると予想される[1],[2]。そのため、既存の鉄道事業は利益縮小の可能性が高く、鉄道を中心とした輸送サービスを質的に変化し、進化・成長させていくことが喫緊の課題といえる[3]。

一方で、カーボンニュートラルな時代に合わせて、環境にやさしい鉄道貨物輸送へのシフトが期待される。また、ニューノーマル時代の到来に合わせて、デジタル技術を活用することにより、既存の鉄道事業の強化を図り、DX 推進によって新たな収益事業の創出が必要となる[4]。既存事業の深化と新規事業の探索の両利きにより、今後は収益力の維持・向上を図らなくてはならない。

これらの動向を踏まえると、2030 年に向けて鉄道業界は、鉄道のインフラ等を起点としたサービス提供から、人の生活における「豊かさ」を起点とした社会への新たな価値創造が必要といえる。さらなる技術革新による効率化、サービスの拡大・発展が望まれており、鉄道業界が目指す将来像として、以下の 4 点が挙げられる。

- 事故ゼロで安全安心な鉄道輸送
- ドライブレス運転の実現と障害時のダイヤ早期回復
- 運輸サービスの更なる魅力向上と最適かつ快適でシームレスな移動
- 一人ひとりに最適化されたすべての人が心豊かに生活できるまち

2030 年の鉄道業界では、①事故ゼロと障害発生時の早期復旧、②本格的な少子高齢化と人口減少への対応、③インフラシステムの老朽化とサービスの魅力向上、④都市一極集中に対する分散型まちづくりが求められる。

#### <課題 1：事故ゼロと障害発生時の早期復旧>

鉄道運輸は人命や財産を預かるサービスであり、何よりも安全性が求められる。事故発生をゼロにするという究極の目標の実現とともに、天災や機器故障による鉄道運輸サービス停止からの早期復旧は欠かすことのできない課題といえる。

#### <課題 2：本格的な少子高齢化と人口減少>

今後本格的な少子高齢化と人口減少が進むと、鉄道運輸業務の提供、鉄道設備の保守や運用などで深刻な人手不足が予想される。ドライブレス運転の実現や、運行保守作業へのロボット導入、設備や車両の状態に応じた AI によるスマートメンテナンスなどが求められる。

#### <課題 3：インフラシステムの老朽化とサービスの魅力向上>

切迫する巨大地震や激甚化する気象災害、インフラの老朽化等に適切に対応することにより鉄道輸



送の機能を維持する必要がある[5]。加えて、鉄道輸送を支えるシステム面の老朽化にも対応する必要がある。さらに、ニューノーマル時代の到来にあわせた多様な暮らし方・働き方が求められている。移動中の車内リモートワークの需要や、鉄道と鉄道以外の移動手段をシームレスに組み合わせた MaaS サービスに対する期待が高まっている。

#### <課題 4：都市一極集中に対する分散型まちづくり>

新型コロナウイルス感染症の拡大を契機に、人・機能が都心に集中した従来の拠点集約型の都市づくりから、交通と通信の融合により、場所や時間に捉われない多様な暮らし方・働き方が求められている。都心部と都市周辺や各地のサテライトシティが一体となって機能する分散型まちづくりの検討が必要で、様々なシーンでモビリティ・ロボットを活用したくらしの実現が求められる[6]。

#### 4.3.3.2 期待する将来像

2030 年の鉄道業界に期待する将来像として、①安全安心の取組、②自動化、③運輸サービスの魅力向上、④分散型のまちづくりの 4 つに着目する。

##### <将来像 1：安全安心の取組>

- IoT やセンサー技術を活用した鉄道の安全性向上
- ロボットによる業務支援やカメラによる駅ホームおよび踏切の見守り
- 災害・事故現場の状況把握へのドローンやロボットの活用
- 超高信頼な通信による運行制御、状態監視
- 輸送障害時の列車ダイヤの早期回復
- 設備・車両の状態に応じた AI によるスマートメンテナンス

##### <将来像 2：自動化>

- 遠隔制御ならびに自律運転によるドライバレス運転の実現
- 輸送障害時の列車ダイヤの早期回復
- 運行保守・メンテナンス作業へのロボット導入
- 保守用車の遠隔制御
- 設備・車両の状態に応じた AI によるスマートメンテナンス

##### <将来像 3：運輸サービスの魅力向上>

- 移動情報・購入・決済をオールインワンで提供する次世代チケット/決済システム
- 移動手段を最適に組み合わせる他事業者や MaaS とのシームレスな連携
- スムーズな鉄道利用を実現するタッチレス・ゲートレス改札
- 多様な暮らし方・働き方に対応した移動中の車内リモートワーク
- 多言語翻訳やキャッシュレス決済の強化によるインバウンド需要の取り込み



- 大容量・低遅延な次世代鉄道無線

<将来像 4：分散型のまちづくり>

- 都心と地方をつなぐ分散型のまちづくり
- 様々なシーンでモビリティやロボットが活用されるスマートな都市
- 一人ひとりの多様な暮らし方に最適化された空間自在な暮らし

#### 4.3.3.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

鉄道業界では以下の Beyond 5G の活用例が考えられる。

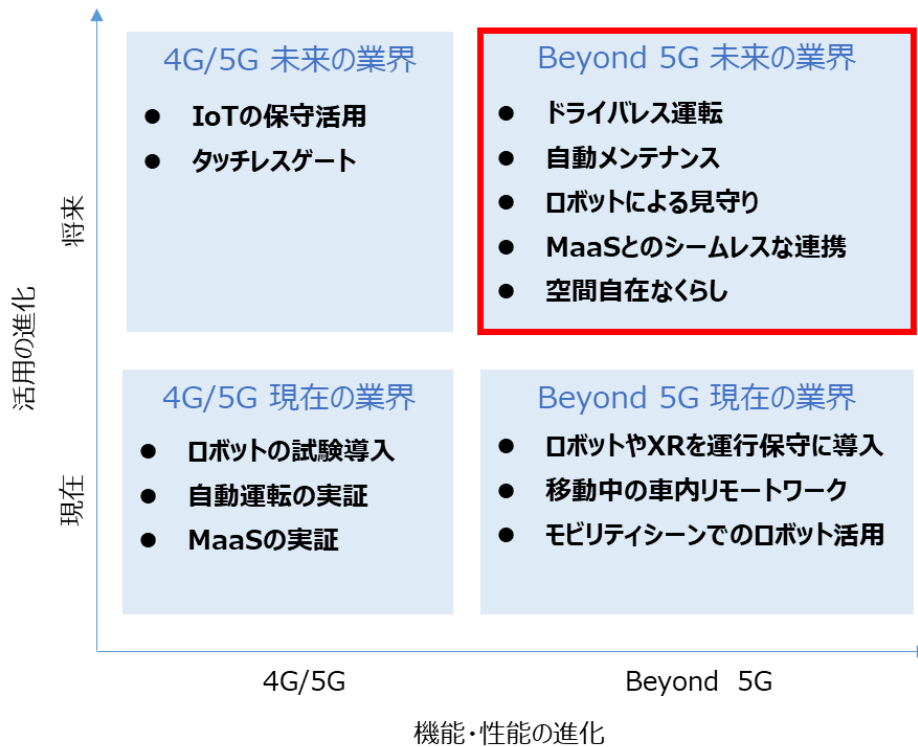


図 4.3-5 Beyond 5G における鉄道業界

#### 4.3.3.4 Beyond 5G に求められる Capability

前節で示す活用例から、以下の Beyond 5G に求められる Capability が考えられる。

表 4.3-3 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
ドライバレス運転		数ミリ秒		10 <sup>-6</sup>			○			
自動メンテナンス	○	○		○	○		○			
ロボットによる見守り	○	○		○						
MaaSとのシームレスな連携		○	○					○		
空間自在な暮らし	○	○		○			○	○		

#### 4.3.3.5 まとめ

本節では、鉄道業界の現状と課題を検討して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超低消費電力、超安全・信頼性、測位・センシング、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省, 令和 3 年度版国土交通白書.  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- [2] 国土交通省, 令和 3 年度版交通政策白書.  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei\\_transport\\_fr\\_000108.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_fr_000108.html)
- [3] JR 東日本グループ経営ビジョン「変革 2027」.  
<https://www.jreast.co.jp/investor/moveup/>
- [4] 阪急阪神ホールディングス株式会社, 経営計画.  
<https://www.hankyu-hanshin.co.jp/download/ir/management/managementplan.pdf>
- [5] 国土交通省, 第 2 次交通政策基本計画.  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei\\_transport\\_tk\\_000161.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000161.html)
- [6] Beyond 5G 推進コンソーシアム 企画・戦略委員会 白書分科会 ビジョン作業班 (第 4 回) .  
[https://b5g.jp/doc/whitepaper\\_visionwg\\_doc04-1.pdf](https://b5g.jp/doc/whitepaper_visionwg_doc04-1.pdf)

## 4.4 通信・IT

### 4.4.1 現状と課題

近年、ICT インフラの高速・大容量化、スマートフォンの急速な利用拡大、モノがネットワークにつながるIoT化など様々な形で進化を続けている。

他方、世界中で新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の爆発的な感染拡大が続いており、これに伴う外出制限等により、テレワークなど全面的に ICT に依存せざるを得ない状況が生じている。また、災害や国際情勢の急激な変化により、有事の際の通信手段の確保の必要性が注目されるなど、社会のデジタル化を支えるための ICT インフラの高度化・強靱化や制度の見直し等を一層進める必要があるという事実が明らかになった。

社会生活と経済活動を円滑に維持するためには、以下に示す課題を解決し、早急に、5Gをはじめとする ICT インフラが徹底的に使いこなされる環境を実現する必要がある。これに加え、デジタルトランスフォーメーションによるスマート化や、信頼性のある自由なデータ流通の推進等により、フィジカル空間で起きている事象を、リアルタイム・ビッグデータを活用してサイバー空間に投影し、解決策を見いだす仕組みを実現することが求められている[1]。

#### 1. 高度な通信インフラの整備

「データ主導社会」に移行するためには、地上、海、空、宇宙などフィジカル空間のあらゆる場所において生ずる様々な事象について、各種センサーなどを用いて最新のデータをできる限り多く収集することが必要となる。また、サイバー空間とフィジカル空間を跨る極めて高度なデータの同期をあらゆる場所において安全・確実に実現するためには、高速性に加え低遅延や多数接続といった特長を備える 5G よりも更に高度な通信インフラが必要であり、そのためには、全国を網羅するデータの神経網として高度な光ネットワークの整備も必要となる。これらにより、極めて大量のデータが流通することにより、エネルギー消費も拡大することが予想されるため、地球環境への負荷を抑えつつデータの安全な流通を可能とする通信インフラが必要となる[1][2]。

#### 2. 自律的に動くプラットフォームの構築

産業用ロボット、家庭用ロボット、自動走行車等のあらゆる機械がセンサーにより自らの位置情報、姿勢情報や加速度情報、周辺の外部情報等を把握し、自律的に動くようになると予想されるが、その円滑な実現のための技術やルールの確立が求められる[2]。

#### 3. セキュリティ・耐災害性の強化

IoT化の進展により、交通システム・物流システムをはじめとした様々な社会システムが ICT による最適制御の対象となっていくと予想される。こうした社会全体の ICT 化が進む中で、ICT システムのセキュリティ・耐災害性の強化はこれまで以上に重要な課題となってくる。このため、サイバーセキュリティ、個人情報の保護、信頼性のある情報の自由かつ安全な流通の確保や、災害対策の促進を図るとともに、高速・大容量で災害時も途切れない安定したネットワークを有線/無

線を問わず地域格差を最小限に抑え全国的に整備することが必要となる[1][2]。

#### 4.4.2 期待する将来像

2030年代に期待される将来像の具体的なイメージとして、次のようなものが考えられる[1]

##### ①「誰もが活躍できる社会（Inclusive）」

- ・ 都市部と地方、国境等の地理的な障壁に加え、年齢、障害の有無といった様々な差異も取り除かれることで、誰もが活躍できる社会。
- ・ 自宅に居ながらにして、アバターやロボット等を介して地球上のどこにでもリアルな体感でアクセス可能となる「超テレプレゼンス技術」や、ウェアラブル端末等を通じて人の思考や行動がサイバー空間からリアルタイムな支援を受けられるようになることで身体能力や認知能力を拡張する「超サイバネティクス技術」等が必要。

##### ②「持続的に成長する社会（Sustainable）」

- ・ 現実世界を再現したサイバー空間で最適化を行い、現実世界へフィードバックすることで、社会的にロスのない、便利で持続的に成長できる社会。
- ・ モノ同士が互いに制御し合うことで信号待ちや渋滞が発生しない交通システム等を実現する「超相互制御型ネットワーク技術」や、AI技術による高精度の需要予測とリアルタイムの多地点間マッチングにより食品等の廃棄がゼロになる「超リアルタイム最適化技術」等により実現すると考えられる。

##### ③「安心して活動できる社会（Dependable）」

- ・ 社会基盤である通信網の安全性と安定性が自律的に確保されることにより、誰もが安心して活動できるという、信頼の絆が揺るがない人間中心の社会。
- ・ こうした社会は、例えば、AI技術による自動検知・自動防御・自動修復等によりユーザーが意識せずともセキュリティやプライバシーが確保される「超自律型セキュリティ技術」や、ネットワーク構成や電力消費量/供給方法を柔軟かつ自律的に変えることで災害時等でも通信が途絶えない「超フェイルセーフ・ネットワーク技術」等を確立することにより実現される。



図 4.4-1 期待される3つの将来像

#### 4.4.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

Beyond 5G では、技術進化にともない下記の実現が期待されている。

- **サイバーフィジカルシステム(CPS)の進展による強靱で活力のある社会**

サイバー空間とフィジカル空間の一体化（CPS：Cyber Physical Systems）が進展し、フィジカル空間における物理的なやりとりが、サイバー空間においてデジタルデータの形で再現されるようになっていく。こうした膨大なデジタルデータを AI 等の活用により解析することにより、フィジカル空間の状況の把握が随時可能となるだけでなく、その情報を基にフィジカル空間における次の行動の判断を行うことが可能となる。

CPS を社会経済活動に最大限活用する「データ主導社会」に移行すれば、蓄積された大量のデータから新たな価値創造が行われ、暗黙知の形式知化や、過去の解析から将来の予測への移行、部分最適から全体最適への転換も可能となる。別の角度から見れば、必要なモノ・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供することができるようになるということである。これこそ、様々な社会的損失や課題の解決と経済成長とを両立できる「Society 5.0」が実現する。

CPS は、高速性に加え低遅延や多数接続といった特長を備える 5G の導入により進展することが見込まれるが、2030 年代には、サイバー空間においてフィジカル空間がより速く、より詳細に再現されるよう

になると考えられる。その結果、フィジカル空間の機能がサイバー空間により拡張されるだけでなく、フィジカル空間で不測の事態が生じた場合でも、サイバー空間を通じて社会生活や経済活動が円滑に維持されるといった、強靱で活力のある社会が実現する[1]。

● 「誰一人取り残さない」デジタル化、安心安全で情報格差のない社会

デジタルへの接触機会を増やしその価値を実感できるようにするなど、全ての人にデジタルの恩恵を受けられる機会を与え、地理的・経済的・身体的制約の有無にかかわらず、あらゆる人や団体が必要な時に必要なだけデジタルを利用できる環境や一人ひとりのニーズに合ったサービスを選ぶことができ、多様な幸せが実現できる社会を実現する。これにより生産性の向上や新たな付加価値の創出、今後、感染症や自然災害が発生する事態になっても、生活や経済への影響を最小限に食い止めつつ社会としての機能を維持・継続できる強靱性を確保する[3]。

4.4.4 Beyond 5G に求められる Capability

期待する社会の実現に向けて、5G 機能の更なる高度化に加え、以下に示す Capability の実現が求められる。

CPS の進展による強靱で活力のある社会では、Beyond 5G の超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続によって、サイバー空間を介した社会生活と経済活動の両立を可能にする Society 5.0 が必要とされている。(図 4.4-2)

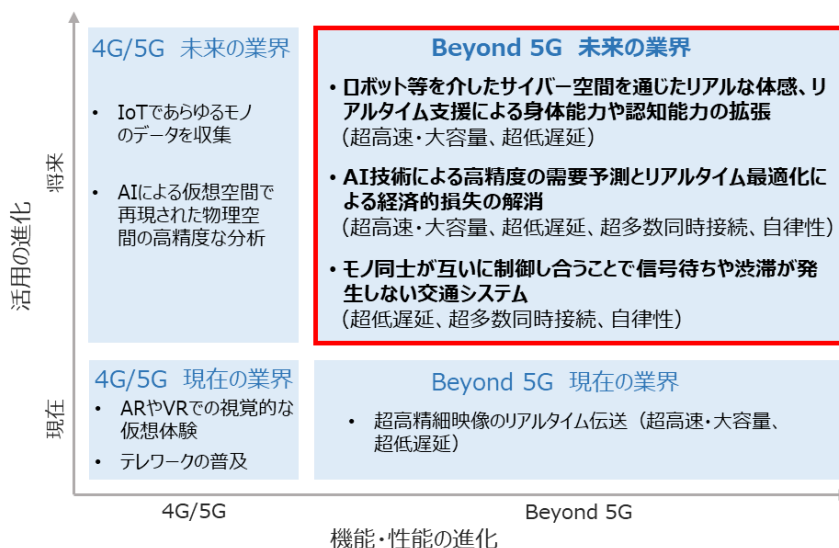


図 4.4-2 Beyond 5G における通信・IT 業界 (CPS の進展による強靱で活力のある社会)

「誰一人取り残さない」デジタル化、安心安全で情報格差のない社会では、全ての人々がデジタル恩恵を受けられ、安全性が自律的に確保されることにより、誰もが安心して活動できることが求められている。



また、災害時等でも途絶えない安定したネットワーク整備という課題を解決すべく、地上系/非地上系ネットワークによる国土カバー率 100%が期待されている。(図 4.4-3)

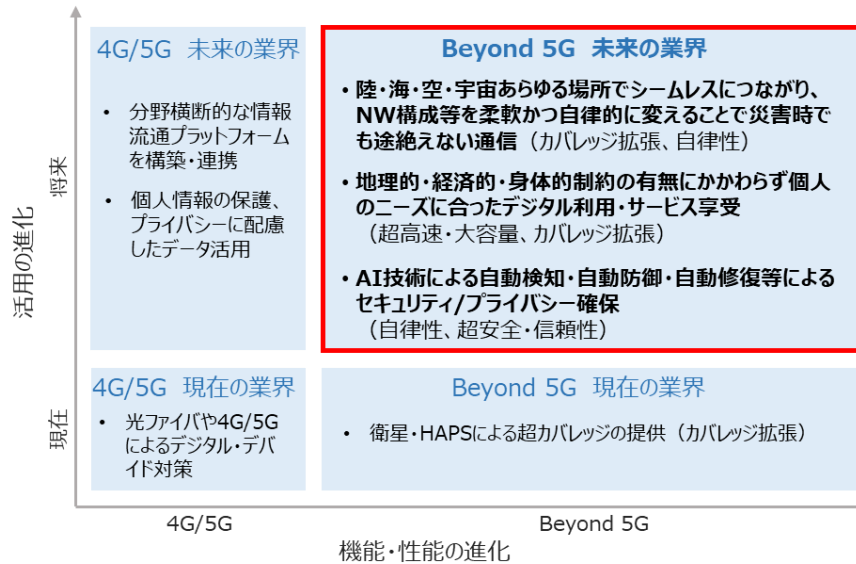


図 4.4-3 Beyond 5G における通信・IT 業界  
 (「誰一人取り残さない」デジタル化、安心安全で情報格差のない社会)

上記のような社会を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.4-1 に示す。

表 4.4-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
CPSの進展による強靱で活力のある社会	○	○	○						○	
「誰一人取り残さない」デジタル化、安心安全で情報格差のない社会	○			○				国土カバー率 100%	○	

#### 4.4.5 5G の振り返り

5G の標準化・商用化における課題等を Beyond 5G の検討に活かすことを目的に、Beyond 5G 推進コンソーシアム 白書分科会で 5G の振り返りを行った。代表的な意見を以下に記載する。

- 5G では、標準化の初期段階に 3 つの利用シナリオ（超高速、超低遅延、多数同時接続）を定義することで、検討を進める上での大きな方向性が明確化された。その利用シナリオはシンプルでユーザーに分かり易く、また 3GPP・ITU・GSMA 等の関連標準化団体が一体となって 5G をプロモーションしたことで、5G の認知度は非常に高いものとなった。

- ・ 超高速に加えて超低遅延や多数同時接続が新たに機能に加わったこと、V2X 等の新しい市場向けの機能も追加されたこと、またネットワークスライシングの導入等でネットワークの柔軟性が担保されたこと等により、5G はより多くの要件に応えることのできるネットワークとなった。
- ・ 適用範囲を広げながらも、仕様を段階的にリリースすることで、顕在化していたスマートフォン等での高速通信の要求を迅速に取り込んだ。また、4G のコアネットワーク基盤を 5G に活用する技術や、4G と 5G で周波数を共用する技術の採用が、5G の早期導入を実現した。

このように、5G では標準化の円滑な進行や普及の促進等に効果的であった点が標準化・商用化において多くあり、これらは Beyond 5G でも踏襲すべきである。

他方、今後の改善が求められる意見も提出されている。

- ・ 高機能化が進んだことにより標準化の範囲が拡大し標準化に時間を要したことや、システムの開発・運用費が増大することがあった。
- ・ 3 つの利用シナリオがユーザーに広く認知された一方で、無線区間のみを指す指標であること、保証される性能値ではないこと、段階的なリリースにより導入当初は全ての要求を満たすものではなかったことから、実際のネットワーク性能とユーザーの期待にギャップが生じるケースがあった。

これらへの対応として、実際のユーザーのニーズやシステムの実装、運営の状況等を考慮した機能の取舍を進めることが考えられる。また、今後は機能のリリース時期を明らかにすることや、ネットワーク性能の伝え方の工夫等により、過度な期待やギャップを生まないための取り組みが求められる。

#### 4.4.6 まとめ

本節では、通信・IT 業界を取り巻く社会情勢や ICT インフラ高度化の重要性、期待する将来像と解決すべき課題から Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、カバレッジ拡張、自律性が考えられる。また、5G を振り返り今後の検討に生かすべき点について述べた。Beyond 5G はあらゆる場所でのシームレスな通信を可能にし、情報格差の解消やスマート化を実現する重要な要素である。今後の Beyond 5G による、さらなる通信・IT 業界の発展が期待される。

#### 参考文献

- [1] 総務書, Beyond 5G 推進戦略 – 6G へのロードマップ –.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000696613.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf)
- [2] 総務省, 平成 27 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/pdf/index.html>
- [3] 総務省, 令和 3 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/pdf/index.html>



## 4.5 メディア

### 4.5.1 現状と課題

本節では、メディア産業に関わる放送・ラジオ、出版・印刷・新聞、広告、ソーシャルメディアなどについて、概況をまとめる。

#### ● 放送・ラジオ

放送・ラジオは、緊急放送から娯楽番組まで、確度の高い情報や多彩なコンテンツを国民にあまねく提供する社会基盤として親しまれている。テレビ放送やラジオ放送は、地上波放送・衛星放送・ケーブル放送などに加え、インターネットテレビ・ラジオなどのサービス形態で提供されている[1]。近年では、インターネットを活用した見逃し配信や同時配信も一般化しつつあり、テレビ・ラジオ機器だけではなくパソコンやスマートフォンなど視聴形態や時間・場所を選ばずにコンテンツへアクセスできる取り組みが進められている[2]。また、放送サービスのさらなる拡充に向け、放送コンテンツの4Kや8Kといったさらなる高精細化技術への対応が進められており、例えば、2021年東京オリンピックにおいては4K/8Kを使った開会式や競技映像の配信が実施された。さらに、映像の高精細化に加え、360度映像や3次元映像技術などを使った体感型のコンテンツについても検討がなされている。今後も放送は重要なメディアの一つとして提供されることが想定され、テレビ/ラジオ端末やスマートフォンのみならず、XRグラスなどのウェアラブルデバイスや、果てはデバイス自体を意識せずコンテンツを楽しめる超小型XRデバイスなど、様々なデバイスでより多彩なサービス・コンテンツを楽しめることが期待されている[3]。一方、特に若い世代においては、テレビ・ラジオの視聴時間よりもインターネットの動画・音楽配信に、より多くの時間を割いているという調査結果も明らかになっている[4]。

#### ● 出版・印刷・新聞、広告

新聞、雑誌、書籍、コミックなど、情報誌からエンターテインメントまで幅広ジャンルを網羅するとともに、多様なトピックや地域について、それぞれに特化した情報提供を行うものも多く展開されている。提供する媒体としては、紙媒体によるものに加え、スマートフォンやパソコンなどの電子デバイスでの閲覧に対応しているものも市場にでまわっており、ユーザーのライフスタイルなどにあわせてコンテンツへアクセスする手段が多様化している。このような傾向は、コミック市場を例にとると、電子コミックが登場し始めてから数年の期間で、電子コミック市場が紙媒体（コミックス、コミック誌）市場を超え、2020年では市場全体の5割強を占めている[5]。また、このような出版物のデジタル化の流れから、広告についてもデジタルシフトが進められている[6]。今後は、映像・音声放送と同様に、様々なデバイスでサービス・コンテンツを楽しめるようになることが期待される。

#### ● ソーシャルメディア

SNS、ブログ、動画配信サービスなどをはじめとするソーシャルメディアは、インターネットを利用して誰でも手軽に情報を発信し、相互のやりとりができるツールとして利用されており、より個人の嗜好に合わせたコンテンツや、速報性・特殊性の高い情報発信を手軽に行えることから、新たなインフラ情報源として市

民権を獲ている。コンテンツ配信の観点では、ブログや SNS などにおけるテキストや画像の発信に加え、YouTube や TikTok などによる動画配信など、個人が配信するコンテンツの幅も大きく広がっている。また、2020 年からの新型コロナウイルスの世界的な流行に際しては、巣ごもり需要などから動画配信サービスの登録者数が増加したことに加え、リアルイベント市場の低迷に対し、オンライン形式のライブイベントが増加するなど、デジタルプラットフォームを活用したコンテンツやサービスが広がりをみせている[7][8]。今後においても、デジタルプラットフォームを核にしたソーシャルメディアコンテンツの発展は、ジャンルを問わずますます加速していくことが予想される。

メディア業界では、上述したようにコンテンツのデジタル化が進んでいる。今後、コンテンツがより多様かつリッチになることに加え、アプリケーションやコンテンツの流行の移り変わりもさらに流動的になること予測される。このため、様々なアプリケーションやコンテンツをどのようにして効率的・セキュアに提供していくかが課題となる。

#### 4.5.2 期待する将来像

メディア業界におけるコンテンツ・サービスは、既にデジタルプラットフォームを活用したオンラインでの提供が進められており、2030 年以降ではほぼ全てのコンテンツがオンラインで提供され、インターネットを介してアクセスが可能となると推測される。これにより、ユーザーは時間、物理的な場所、デバイスなどに制限されず、一人ひとりのライフスタイルにあわせて多様なサービス・コンテンツを享受することが可能となる。また、併せて個々のユーザーの配信についても、よりリッチなサービス・コンテンツを、時間・物理的な場所・デバイスを選ばずに手軽に提供することも可能となると想定される。コンテンツリッチ化の観点では、ホログラフィックコミュニケーションやインターネットの身体所有体験を含む、さらなる没入型メディアなどの浸透が期待され、サイバーフィジカルシステム(CPS)やデジタルツイン、メタバースなどのコンセプト例にあげられる仮想空間をプラットフォームとして活用するサービスと連携した配信が考えられる。例えば、仮想空間における従来のメディアコンテンツの提供に加え、現実世界の物理的な制約を超えた新たなメディアサービスの提供も期待される。さらに、多様化・肥大化するメディアコンテンツの中から、ユーザーが自身の嗜好にあわせたコンテンツをストレスなく楽しむことができるよう、パーソナライズが重要な要素の一つとなると想定される。個々のユーザーにあわせたコンテンツ配信最適化には、AI などの技術を活用することが想定され、ユーザーへ配信されるコンテンツのレコメンド・選択といったアプリケーションレイヤー観点から、選択されたコンテンツの配信方法の最適化（例えば、アクセス技術やデバイスを含めた配信経路最適化など）といった低いレイヤーでの最適化も含めて検討が進められることが期待される。

#### 4.5.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

Beyond 5G で実現が期待される活用例として、ホログラフィックコミュニケーションがあげられる。

#### 4.5.4 Beyond 5G に求められる Capability

前節のメディア業界の期待される将来像に基づき、Beyond 5G に期待されるコンセプトを以下にまと

める：

- Beyond 5G により、誰でも・いつでも・どこでも・どのような端末でもデジタルコンテンツへのアクセスが可能であり、また、各ユーザーが自身のコンテンツを配信することが可能。リッチかつ多様なマルチメディアアプリケーション開発者コミュニティを可能とするグローバルエコシステムの構築。
- ホログラフィックコミュニケーションやインターネットの身体所有を含むさらなる没入型メディア体験をサポート
- 個々のユーザー・視聴環境・視聴デバイスに適応したサービス提供

以下に技術観点で期待されることをまとめる：

- さらなる周波数利用効率、カバレッジ拡張、低遅延化
- 放送と通信の両方を用いた効率的なコンテンツ配信を可能とする無線アクセスおよび、NW アーキテクチャのサポート
- AI を使った多様なパーソナライズ/カスタマイズの実現

また、上記のコンセプト観点と技術観点をマッピングした図を図 4.5-1 へ示す。

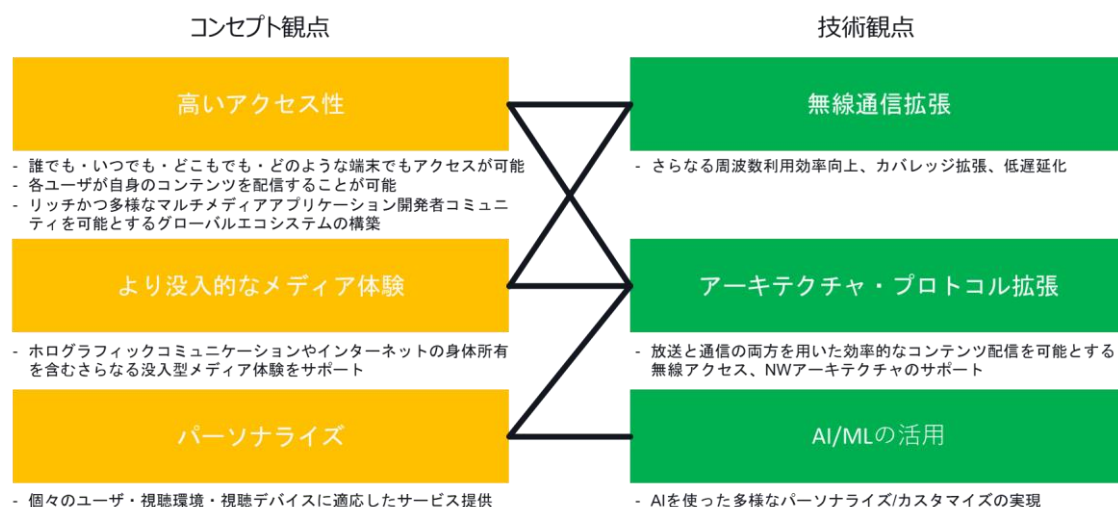


図 4.5-1 Beyond 5G に期待されること

4.5.3 節の活用例及び、以上の内容をふまえ、表 4.5-1 にメディアにおける Beyond 5G の要件をまとめる。ホログラフィックコミュニケーションについては、数十～数百 Gbps のスループットが求められると想定される。

表 4.5-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
ホログラフィックコミュニケーション	○									

#### 4.5.5 まとめ

本節では、メディアの現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、高速・大容量、具体的には数十～数百 Gbps のスループットが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 令和 2 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd251810.html>
- [2] 博報堂 D Y メディアパートナーズ, テレビ番組視聴意識調査 2021.  
[https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210622\\_29890.html](https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210622_29890.html)
- [3] 総務省, “放送を巡る諸課題に関する検討会、放送サービスの未来像を見据えた周波数有効活用に関する検討分科会報告書案”, 平成 30 年.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000555176.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000555176.pdf)
- [4] 総務省, “令和 2 年度情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書(概要)”.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000765135.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000765135.pdf)
- [5] 公益社団法人 全国出版協会 出版科学研究所, 日本の出版統計 コミック販売額.  
<https://shuppankagaku.com/statistics/comic/>
- [6] 電通, 2020 年日本の広告費.  
<https://www.dentsu.co.jp/news/release/pdf-cms/2021012-0225.pdf>
- [7] 博報堂 D Y メディアパートナーズ, メディア定点調査 2021.  
[https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210524\\_29812.html](https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210524_29812.html)
- [8] 博報堂, 博報堂 D Y メディアパートナーズ, コンテンツファン消費行動調査 2021.  
[https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210903\\_30402.html](https://www.hakuhodody-media.co.jp/newsrelease/report/20210903_30402.html)

## 4.6 エネルギー・資源・素材

### 4.6.1 現状と課題

エネルギー・資源、素材業界は、主として鉱物資源の採掘や森林での伐採から原材料を生産する産業と、それら原材料の調達と加工を行って他産業へ素材を供給する産業からなる業界である。このような鉄、非鉄金属、非金属、プラスチック、紙等の素材は我々の身の周りの製品に幅広く利用され、多くの産業の基盤となっている[1]。本稿では、鉱物資源業界と製紙業界におけるトレンドを取り上げる。

#### ● 鉱物資源業界

鉱物資源業界における鉄・非鉄（銅、アルミニウム、レアメタル、レアアースなど）は、いずれも産出する国に偏りがある。近年は、新興国における資源需要の高まりによる金属価格変動の激しさや資源ナショナリズムの台頭などにより世界的に安定的な資源確保・調達に関する重要性が増している。資源鉱物業界としては、持続的な社会を実現するために、「海外資源確保の推進」、「備蓄」、「省資源・代替材料の開発」、「リサイクル」、「海洋資源開発」による資源確保を進めることを目標として掲げている。なお、使用済み製品等を収集して含有する非鉄金属を回収する「リサイクル」はいわゆる「都市鉱山」と呼ばれ、技術・運用の高度化が望まれており、「海洋資源開発」は今後の資源供給源として期待されている[2]。

鉱山の採掘現場に目を向けると、安全・環境面では厳しい労働環境であり、採掘用機械や運搬トラックの自動化技術の導入等の新しいテクノロジーの採用により作業員の安心安全性の向上や採掘コスト削減を図る事例が見られる。これらの現場では、引き続き機械による自動化や効率化が図られていくと考えられる[3][4]。今後期待される海洋資源開発の現場においても同様に厳しい環境での作業になると想定できるため同様に機械化による自動化・効率化や安全性の確保が重要となると考えられる。

一方、鉱物資源の精錬・加工を行う企業は大規模製造設備を有して多くのエネルギーを消費する装置産業の形態をもつため、脱炭素化、環境負荷低減へ取り組みを進めており、ビッグデータ活用などでの効率化やロボット導入等の自動化などの製造 DX（DX：デジタルトランスフォーメーション）ならびに省エネ機器導入が今後も進んでいくと考えられる。

#### ● 製紙業界

製紙業界全体としては、デジタル技術発展による電子媒体の利便性向上からのペーパーレス化による需要減という構造的縮小トレンドが避けられず、ダンボール用の板紙が微増（食料品向け需要、中国向け段ボール輸出増加）という状況である（EC 向け需要は小割合）。業界での利益率改善対応として製紙メーカー各社は、工場停止・再編、板紙への業種転換と新規事業開発に取り組んでいる。新規事業の例としては、プラスチック代替品開発、セルロースナノファイバー（CNF）の展開、バイオマス発電事業があげられる[5]。

製紙業界では、各企業とも早くから資源確保と環境保護のための植林事業と紙のリサイクル活動に取り組んでいる[6][7]。植林事業について近年は海外で展開されており、二酸化炭素の吸収・固定ならびに持続可能な原材料調達を可能とする森林経営の実施とともに、森林の価値を高める活動にも力を入れている[8]。資源確保としての植林現場や森林運営においては、伐採作業や木材運搬については



機械化がなされてきているが、植栽作業や保守作業である下草刈り取りなど、人手に頼る作業もまだ多く、さらなる効率的で安心安全な作業環境の実現が望まれる。林業自身でも検討されているような植栽・保守作業ならびに伐採・運搬などの機械化による作業効率化/自動化や違法伐採監視などの遠隔モニタリングが取り入れられていくものと考えられる[9]。なお、紙のリサイクルについて日本は高いリサイクル率を実現している。今後、「静脈産業」としての IoT 技術やビッグデータの活用などにより高度化されたりリサイクル事業の提案・検討がされており、このようなシステムを活用することによって一層のリサイクル率向上が進むものと考えられる[10]。

紙・パルプを製造する製紙企業も大規模製造設備を有して多くのエネルギーを消費する装置産業の形態をもつため、省エネ、脱炭素への貢献にも取り組んでおり、業界としては 2050 年までに生産活動での CO<sub>2</sub> 排出実績ゼロを目指すことを先駆け宣言（2021 年 1 月）している。宣言によれば、CO<sub>2</sub> 削減のための再生可能エネルギー活用、省エネ機器・低炭素型車両導入、生産システム高度化による効率化のみならず、環境対応素材（プラスチック代替品 CNF）社会実装や森林による CO<sub>2</sub> 吸収・固定貢献拡大に今後取り組むとしている[11]。

#### ● 課題

2030 年にむけて、資源鉱物業界ならびに製紙業界においては、以下の項目の推進が課題である。

- 鉱山/海洋資源での採掘現場や木材伐採におけるロボット/機械による自動化・効率化や遠隔操作/遠隔モニタリング

現状、機械化、自動化が可能な範囲は限定的であり、遠隔操作用装置も十分に普及していない。今後は、AI による現場の熟練作業者の暗黙知の形式知化や自動ロボットの導入等でさらなる効率化を目指す。そのためには、ローカル 5G 含めて通信環境等の ICT インフラの整備が重要となる。

- 資源加工企業の設備の脱炭素化にむけた再エネ採用や IoT 化/ビッグデータ活用による効率化  
生産効率の向上や自動加工、故障検知等のプロセス監視の最適化により省エネを図る。そのためには工場におけるローカル 5G 含めて通信環境等の ICT インフラの整備が重要となる。
- 「静脈産業」としてのリサイクルシステムにおける IoT を活用した各種データ（廃棄物データ、保管場所、設備稼働データ、収集車両運行データ etc.）の収集と共通利用

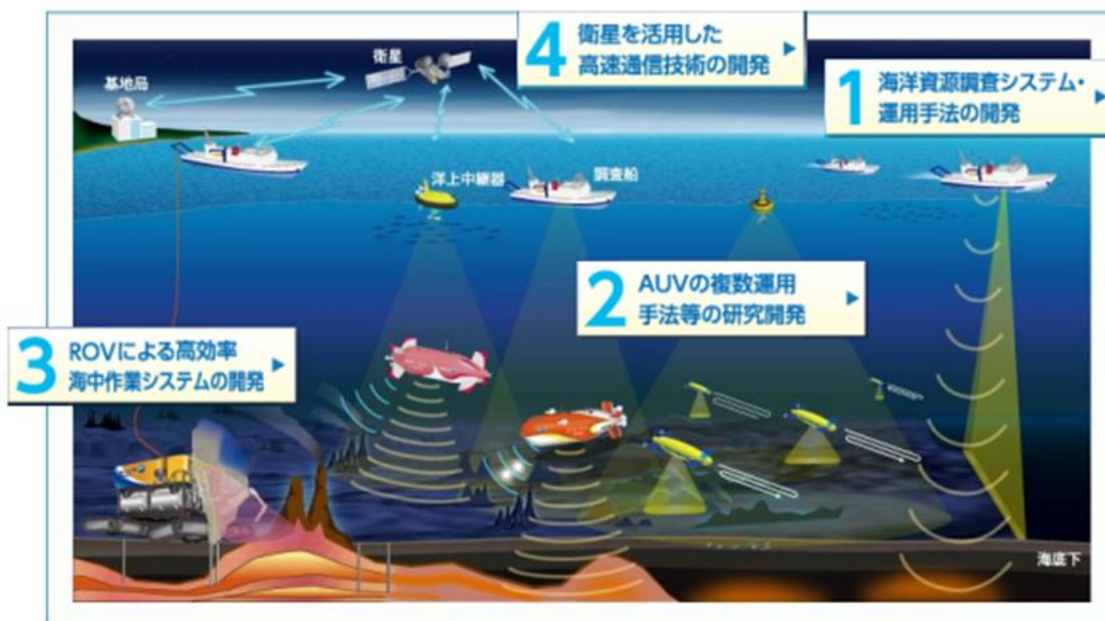
IoT データを活用して廃棄物の量と質を把握して需要と供給のマッチングを行い、回収車両の効率的運航、設備運転管理の最適化などを進める。多種多様のセンサーデータ収集のための IoT 通信環境等の ICT インフラの整備によるデジタル化の推進が重要となる。

#### 4.6.2 期待する将来像

##### ● 鉱物資源採掘現場

採掘プロジェクトの奥地化・深部化が進んだ鉱山や海洋における採掘現場においてもより超低遅延・超安全・信頼性である高度な通信環境が整備されてロボットや自動運転システムの導入や機械の遠隔

機器操作/ドローン監視などによる人件費などのコスト低減と労働環境の改善がされている。特定の閉域内でのローカルシステムではなく、IoT 機器とクラウドとのスムーズな連携によりビッグデータ収集・AI 活用が進み、運用管理システムによる掘削設備の故障予知など運用面での最適化がなされている。さらに、掘削現場だけでなく、採掘した資源運搬においても運輸管理システムとスムーズな連携が図られており、バリューチェーン全体での最適化が実現している。



出典：「新たな海洋基本計画の策定に向けた提言～Society5.0 時代の海洋政策～」一般社団法人 日本経済団体連合会[12]

※経団連にて内閣府総合科学技術・イノベーション会議 HP から図を作成

「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 戦略的イノベーション創造プログラム

図 4.6-1 「海のジパング計画」[13]で開発する海洋資源調査技術[12]

#### ● 植林現場

紙資源のサステナビリティとして計画的植林が確立し、山林地帯でも通信環境が整備されて同様な運用管理システムによりロボット/ドローン活用などの作業支援、遠隔機器操作、遠隔監視等で効率化、人件費等のコスト低減と労働環境の改善がなされている。



自動伐倒作業車

自動集材機

自動走行フォワーダ

出典：「林業イノベーション現場実装推進プログラム」林野庁[9] から抜粋

図 4.6-2 イノベーションによる林業の将来像

### ● 工場とリサイクル

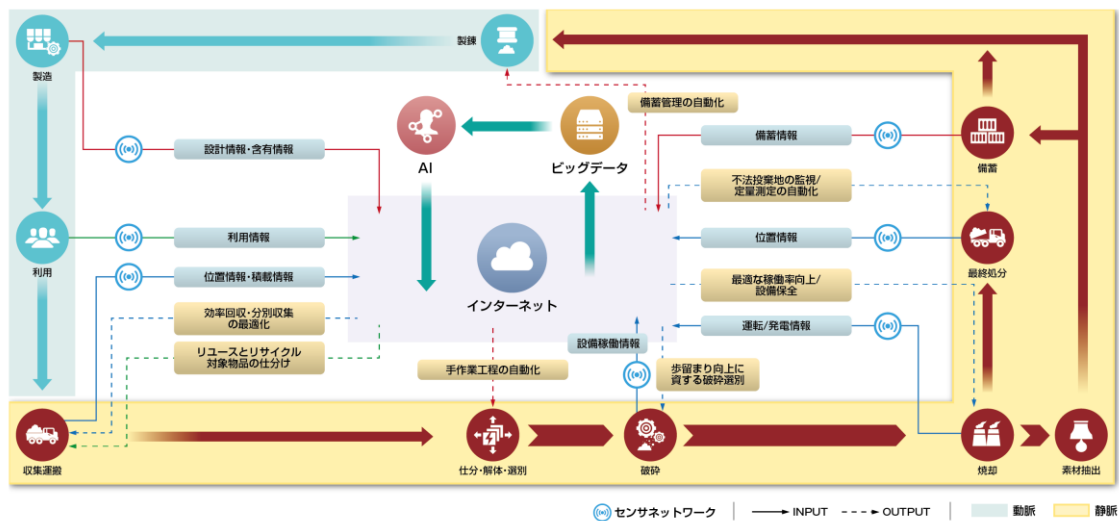
鉱物資源並びに製紙の資源加工企業でも超低遅延、超高速・大容量、超安全・信頼性を用いた製造 IoT による製造 DX が普及した結果、稼働最適化による生産性向上や省エネ化が図られて、CO<sub>2</sub>削減が進んでいる。

鉱物資源加工企業がリサイクル原料の中核的な処理施設として大きな役割を担い、グループ精錬所間あるいは他社精錬所間でのリサイクルデータを収集・活用した鉱物資源回収ネットワークを構築し、各精錬所で Just In Time のリサイクル原料処理が行われている。各精錬所の設備稼働状況を把握し、セキュアなデータ共通利用基盤を活用して全体的に効率的な稼働が実現されている。

同様に、紙・段ボールのリサイクルでも IoT によるデータ収集と共通インフラの活用によって Just In Time のリサイクルが実現されている。以上のように、リサイクル活動の中で発生する回収対象物の属性（場所、特性、量 etc.）に関するデータがあらゆる場所で収集されてセキュアなデータ共通利用基盤で見える化・共有化されることにより、必要な処理作業情報提供や回収ルート最適化などサプライチェーン全体として効率化された静脈産業として稼働している。

以上のようなサービスは、Beyond 5G の時代ではサイバーフィジカルシステム（CPS）あるいは仮想システムとして構築されている。





出典：廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会 HP

図 4.6-3 廃棄物処理・リサイクル分野における IoT 導入促進のイメージ図[14]

#### 4.6.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 立ち入り困難区域での遠隔操作と自動操作

製紙産業のサステナビリティを確保するため、計画植林への取り組みが求められる。山間部にある植林地では人のアクセスが良くないことが多いため、効率的に樹木の育成を行うためには遠隔監視、遠隔操作、自動操作が必要となる。また、資源の枯渇や国別の偏りに対応するために、鉱山の開拓のみならず、積極的な海洋資源探索・採掘が求められる。

- 工業製品のライフサイクル管理

サステナブルな社会を実現するために、工場から出荷された製品のライフサイクルを通じた管理が求められる。一例として、「都市鉱山」でのレアアースの採掘・分離精製の総量指標管理やレアアース製品のトレーサビリティ実現などが考えられる。

#### 4.6.4 Beyond 5G に求められる Capability

- カバレッジ拡張による通信エリア充実

5G では通信環境が十分ではなかった山岳、山林、海洋上などの地域においても、衛星（超低軌道衛星等）や HAPS を用いることによりカバレッジ拡張が実現され、超高速・大容量や超低遅延な通信環境の利用が可能となる。これにより人が立ち入りにくい/作業しにくい場所でも無線通信の利用が可能となり、労働環境が厳しい現場の作業の自動化、ロボット活用が実現する。例えば、山岳の資源採掘現場や山林における調査業務でのドローン活用、リアルタイム遠隔機器操作、現場設備の省エネ・省力化推進、機器監視業務、製造のサステナビリティ（部品・材料の監視/保全システム）確立がある。また、海上での利用の一例としては日本周辺の海洋鉱物資源探索・採掘業務があり、上記に加えて海中で使用可能な水中通信技術/センサー技術の実現も期待される。

- 超低遅延通信による自動運転・遠隔操作の拡大

Beyond 5G 時代には、現場の高精細映像（8K 等）/センサーと HMD/振動装置などを用いた没入型機器遠隔操作システムがユースケースとして期待されている。この活用例では、高詳細映像を送ることから、超高速・大容量通信が求められる。また、映像酔い防止のためには現場と操作者の間で 100 ミリ秒以下の映像伝送遅延時間が望ましい[15]。この映像伝送遅延時間は、Beyond 5G での通信遅延、映像圧縮伸張処理のための画像処理による遅延ならびに HMD への表示に要する遅延に分類される。例えば、映像圧縮伸張のための画像処理による遅延は技術の進展を考慮すれば 40 ミリ秒以下と想定される[15]。また、HMD 着用時の視点移動に伴う VR 酔い防止のためには HMD への表示に要する処理遅延時間は 15 ミリ秒以下が望ましい[16]。これらより、Beyond 5G に求める性能は、45 ミリ秒となる。

- 超多数同時接続と超低消費電力化

全ての工業製品のライフサイクル管理のための ID 付与（トレーサビリティ）、あらゆる場所での状況管理（廃棄場所、作業状況のリサイクルトレース）や回収作業の効率化がカバレッジ拡張や、超多数同時接続により可能となる。また、あらゆる場所に電源供給を気にすることなく機器を設置できるためには長期間の電池駆動可能でホッピング/リレーなどを利用した超低消費電力な分散ネットワークやデバイスへの非接触給電も必要となる。

上記活用例の Capability を表 4.6-1 に示す。また、エネルギー・資源・素材業界の進化と Beyond 5G の技術進化の融合した姿を図 4.6-4 に示す。

表 4.6-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
立ち入り困難区域での遠隔操作と自動操作	○	≤40ms (E2E)						○		
製品のライフタイムトレーサビリティ			○		○			○		非接触給電

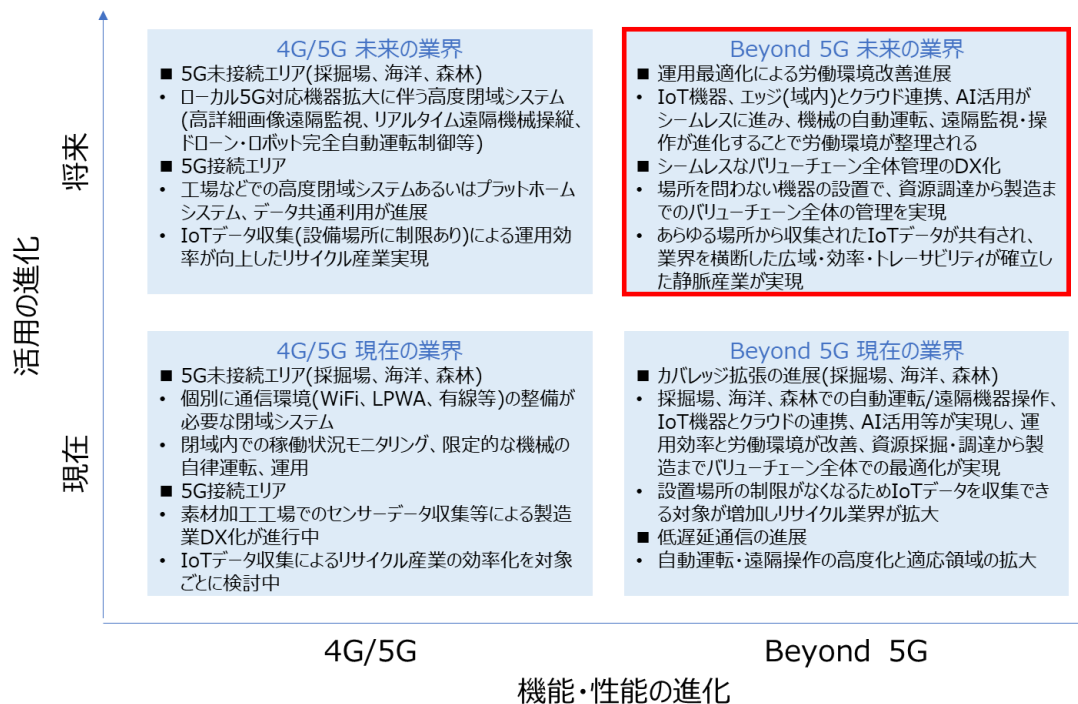


図 4.6-4 Beyond 5G におけるエネルギー・資源・製紙業界

#### 4.6.5 まとめ

本節では、鉱物資源・製紙業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G を活用した活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、カバレッジ拡張、超低消費電力、非接触給電が考えられる。

#### 参考文献

- [1] EY 新日本有限責任監査法人, 業種別会計, その他産業製品, 資材産業, “素材産業 第 1 回: 素材産業のビジネスモデルと業界の概要”, 2020 年 04 月 01 日.  
<https://www.shinnihon.or.jp/corporate-accounting/industries/basic/material/2010-11-16-01-01.html>
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁, スペシャルコンテンツ, “世界の産業を支える鉱物資源について知ろう”.  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/anzenhosho/koubutsusigen.html>
- [3] 公益社団法人日本技術士会 資源工学部会, 月刊『技術士 PE』資源工学部会関連記事 添付資料, “鉱業技術のイノベーションの変遷と今後の方向性(提言)”, 2020 年 1 月号.  
[https://www.engineer.or.jp/c\\_dpt/mining/topics/008/008209.html](https://www.engineer.or.jp/c_dpt/mining/topics/008/008209.html)
- [4] 公益社団法人日本技術士会 資源工学部会, 行事(講演会・見学会)の開催実績 添付資料

- 料, “マイニングにおける施工の安全性と生産性の追求”, 当年度 (2021 年度) の講演会資料, 4 月講演会.  
[https://www.engineer.or.jp/c\\_dpt/mining/topics/008/008239.html](https://www.engineer.or.jp/c_dpt/mining/topics/008/008239.html)
- [5] 三井住友銀行, 産業調査レポートバックナンバー, “紙・パルプ産業の動向と今後の方向性”, 2020 年 10 月.  
<https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/>
- [6] 日本製紙連合会, “環境への取り組み～木材調達に対する考え方 | 植林について”.  
<https://www.jpa.gr.jp/env/proc/planting/index.html>
- [7] 日本製紙連合会, “環境への取り組み～紙のリサイクルに対する考え方 | 古紙利用の重要性”.  
<https://www.jpa.gr.jp/env/recycle/used-paper/index.html>
- [8] 日本製紙連合会, “環境への取り組み～木材調達に対する考え方 | 製紙産業のスタンス”.  
<https://www.jpa.gr.jp/env/proc/stance/index.html>
- [9] 林野庁, “「林業イノベーション現場実装推進プログラム」の公表について”, 令和元年 12 月 10 日.  
[https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken\\_sidou/191210.html](https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken_sidou/191210.html)
- [10] 経済産業省, 循環経済ビジョン 2020, 2020 年 5 月 22 日.  
<https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004.html>
- [11] 日本製紙連合会, “製紙業界-地球温暖化対策長期ビジョン 2050 -カーボンニュートラル産業の構築実現”, 2021 年 01 月 20 日.  
<https://www.jpa.gr.jp/topics/nr.php?topicsid=66>
- [12] 一般社団法人 日本経済団体連合会, “新たな海洋基本計画の策定に向けた提言～ Society5.0 時代の海洋政策～”, 2017 年 7 月 18 日.  
<https://www.keidanren.or.jp/policy/2017/054.html>
- [13] 内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 戦略的イノベーション創造プログラム, “次世代海洋資源調査技術 (海のジパング計画) ”.  
<http://www.jamstec.go.jp/sip/>
- [14] 廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会, 廃棄物処理・リサイクル分野における IoT の活用, “廃棄物処理・リサイクル分野における IoT 導入促進のイメージ図”.  
<https://iot-recycle.com/>
- [15] 株式会社 KDDI 総合研究所, “遠隔操作ロボット用映像伝送技術で 50 ミリ秒の超低遅延映像伝送を実現!”, 2020 年 7 月 9 日.  
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/070901.html>
- [16] 株式会社ジャパンディスプレイ, 5G Tokyo Bay Summit® 2017 5G×VR ワークショップ, “VR-HMD 向けディスプレイ”.  
[https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g\\_event/5gts2017.html](https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g_event/5gts2017.html)

## 4.7 自動車

### 4.7.1 現状と課題

#### ● 現状の社会と課題

##### ➤ 地方における利用交通手段の制限[1]

日本の人口は2008年をピークに減少を続けており、地方部では運転士不足、収益性の悪化によって公共交通機関の維持はますます厳しい状況。

また、地方は自家用車の利用率が高い特徴がある一方で、免許を持たない住民の移動手段が制限される可能性がある。

##### ➤ 都市部の人口集中による移動時間の制約[1]

都市部は人口密度が高く、自家用車の利用率が高い地域と公共交通機関の利用率が高い地域があることが特徴。

いずれの地域でも、交通渋滞が深刻な地域が多く、移動・通勤時間が長くなり、それによって生活時間が制約を受けている。また、今後高齢化が進むことにより自家用車で移動できない住民が増加し、高齢者の移動の自由の制約となる可能性がある。

一方、公共交通機関の利用率が高い地域では、自家用車と物流車両が集中することで交通渋滞を引き起こし、それによる生活時間の制約が生じている。

##### ➤ エネルギーと環境問題[2]

カーボンニュートラルに向けて、日本は温暖化ガスの排出を2030年に46%削減、2050年に実質ゼロにする方針を宣言している（いずれも2013年度比）。それに伴い、経済産業省から「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が発表され、その中で自動車産業における産業政策が発表されている。自動車産業のカーボンニュートラルへ向けた政策は、電気自動車へのシフト、脱炭素燃料の利用、そしてそれらを支えるインフラの整備などが主体である。一方で「車の使い方の変革」として、次世代の交通システムの基盤となる高精度デジタル地図・OTA (Over The Air) 機能・狭域通信機能の社会実装の必要性も挙げられている。

地球規模の課題となった環境問題や、運転者の過失による交通事故の問題は、日本のみならず世界においても共通の社会課題となった。これらの課題解決に向けて、自動車は電動化、ネットワーク化、自動運転といった技術革新の潮流のさ中にある。さらに、これらのプラットフォームが実装された社会を踏まえ、シェアリングやMaaSといった総合的な移動サービス導入への期待も高まりつつある[8]。

#### ● 安全運転支援の現状

##### ➤ ITS 関連サービス[3], [4], [5]

一般道路においては警察庁が管轄する新交通管理システム（UTMS: Universal Traffic Management Systems）が全都道府県に展開されており、信号機の制御によって交通の流れを誘導したり、バスなどの公共車両の優先通行を支援して公共交通機関の利用を促すことにより、排気



ガスや騒音・振動など公害を低減するような仕組みなどが社会実装されている。また、ITS Connect 推進協議会が推進する ITS Connect では一部地域・一部車両に限定されるが、車車間直接通信により緊急車両の存在を通知したり、路車間通信により交差点での対向車や歩行者を検出してドライバーに注意喚起するなどのサービスを提供している。さらに、自動運転での活用に向け、内閣府戦略的イノベーション創造プログラムにおいて実証実験が進められるなど、将来の V2X 技術としてもその使用が期待されている。

高速道や自動車専用道路では、道路事業者が管轄する ETC システムにより料金徴収が行われており、料金所の無人化と渋滞緩和に大きく貢献している。また、最近では ETC2.0 により従来の ETC 用途に加え、渋滞回避支援・キャッシュレス決済・安全運転支援・災害時支援のようなサービスも提供できるようになっている。

➤ 4G, 5G で実現可能になる安全運転支援[6]

4G、又は 5G ベースのセルラーV2X 技術は、いずれもクラウドや AI を活用した広域サービスとの相性が良く、運転中に自車周辺で起こりうる様々な危険を先読みしてドライバーへ注意喚起したり、緊急時には衝突回避等に必要な行動のアシストを行うなど、従来の ITS よりも幅広い安全運転支援が可能となる。

さらに、通信形態としてもセルラーネットワークを介さずに直接的に提供する V2V (Vehicle To Vehicle), V2I (Vehicle To Infrastructure), V2P (Vehicle To Pedestrian)のような狭域サービスや、セルラーネットワークとクラウドを介する V2N (Vehicle To Network), I2N (Infrastructure To Network), P2N (Pedestrian To Network)のような比較的広域なサービスを、それぞれの用途ごとに通信インフラに依存しないように柔軟に運用することが可能となる。

また、車載 HMI (Human Machine Interface) / HUD (Head Up Display)の高機能化とも相まって、通常的安全運転支援をより直感的、かつ、リアルタイムに提供する AR ナビゲーションのような高付加価値サービスが普及し、従来の ITS とインフォテメメントを融合した新たなコネクティッドサービスが登場するだろう。

● 自動運転の現状

➤ 自律型自動運転[7]

現在可能となっている自動運転は、車載のシステムが全ての動的運転タスクを高速道路（限定領域、または ODD: Operational Design Domain）において実行し、作動継続が困難な場合は、システムからの介入要求等に運転者が適切に応答することで達成する自動運転レベル 3 である。車両は自律で自動運転を行い、運転者はハンドル操作や前方の監視義務から一部解放されるハンズオフやアイズオフが可能になったが、いつでも運転操作が行えるように備える義務がある。

➤ 4G, 5G が貢献可能な自動運転の技術

ダイナミックマップや、各 ECU と車載メディアのソフトウェアを OTA でいつでもダウンロード可能となる。

ダイナミックマップの情報要素の一部を車両からソフトウェアセンターに収集したり、分野横断でデータベースを連携させることで様々な高付加価値サービスを提供できるようになる。

また、路側カメラ、信号機、センサー等との V2I インフラ協調により自動運転機能を補完できるようになるため、自律自動運転と比べて自動運転車周辺の視認性を向上させ、自動運転レベル 3 からレベル 3 以下の間のハンドオーバーの低減に貢献できる。一方、通信システムの観点では、自動運転に資する路車間・車車間・歩車間通信の異なる通信形態を単一規格で実現できるようになり、また、グローバルでのエコシステムを形成しつつ自動運転の普及促進に貢献できる。

#### ● 5G の活用例と Capability

Beyond 5G でさらなる発展を遂げることが期待される、5G で規定された典型的な活用例とその Capability を示し、5G からの進化を明確化する。

##### ➤ 協調的進路変更 (Cooperative maneuver) ・緊急軌道修正 (Emergency trajectory alignment)

運転者の意思や、障害物を避けて事故を防止するために必要な軌道修正、進路変更などの情報を周辺車両と共有し、ステアリング・アクセル・ブレーキを協調的に制御する。

自動運転レベル 2、3 [15]では、車線変更や高速道路の合流など運転者の意思を周辺車両と共有するための通信要件は、データレート 0.5Mbps、メッセージサイズ 300-400Bytes、エンドツーエンド最大遅延 25 ミリ秒、通信信頼性  $10^{-1}$  である[13,14]。

自動運転レベル 4、5 [15]では、障害物を検出した際に、事故防止のための軌道を計算し、即座に周辺の車両にセーフティクリティカルな状況を伝え、周辺の車両は協調的に緊急のリアクションを実行するための軌道修正を行う。このための通信要件としては、データレート 30Mbps、エンドツーエンド最大遅延 3 ミリ秒、通信信頼性は、500m 通信距離以内において  $10^{-5}$  と規定されている[14]。

##### ➤ 協調的知見 (Cooperative perception)

車両のオンボードセンサー情報、または、UE-type RSU からのセンサーデータを、近接する車両間でリアルタイムに交換することで、環境感知性能を拡張し、事故防止に役立てることを想定した活用例。

自動運転レベル 2、3 [15]では、ITS サービスのメッセージを定期的に送信できないユーザー車両を、V2X サポート済みの車両が検出・区分化する。V2X サポート済みの車両が自らのセンサーで検出した障害物の区分、スピード、進行方向などを定期的に送信する。これを実現するための通信要件としては、メッセージサイズ 1600bytes、エンドツーエンド最大遅延 100 ミリ秒、通信信頼性  $10^{-2}$  としている [14]。

自動運転レベル 4、5 [15]に向け、家々の隅の背後、曲線、または物体など、ローカルのセンサーからは見えない領域の物体や障害物の検出(全方位視野)を目的とする。低解像度または高解像度のデータを想定すると、その通信要件は、コーデックありの場合のデータレート 50Mbps、raw データでは、1Gbps、エンドツーエンド最大遅延 3 ミリ秒、通信信頼性  $10^{-5}$  (緊急時)である[14]。

➤ 遠隔運転

操作者 1 人により短時間の間、車両を遠隔制御することを想定した活用例。主に工事車両や除雪車両の操作を想定する。制御対象の車両から、遠隔運転アプリケーションメッセージ（カメラデータ、センサーデータ、状態データ、確認など）をネットワーク経由で遠隔の操作者に送信する。また、遠隔の操作者は遠隔運転アプリケーションコマンドメッセージをネットワークを経由して車両に送信する。この場合の通信要件としては、データレート 25Mbps（アップリンク）／1Mbps（ダウンリンク）、エンドツーエンド遅延 5 ミリ秒、通信信頼性  $10^{-5}$  である[14]。

#### 4.7.2 期待する将来像

● 2030 年の社会像

➤ 地方

自動運転移動サービスを使い公共施設や商業施設間を移動。コミュニティバスや乗合タクシーが利用でき、誰もが自由に移動でき、地域が活性化している。

高齢者が移動しなくても移動車両を利用した遠隔医療、飲食、小売り等の様々なサービスが利用可能になる[1]。

➤ 都市部

目的地まで自動運転、つまり、移動時間を家族や友達との会話や仕事などに自由に活用できるようにする。様々な移動手段とシームレスに連携し、目的地ごとに移動手段を束ねて効率的にする[1]。

➤ MaaS (Mobility as a Service)

複数の公共交通機関やそれ以外の移動手段・サービスを最適に組み合わせることで検索、予約、決済等を一括で行うモビリティプラットフォームが整備され、地方や都市部に関わらず、誰もが自由に利用できる利便性の高いモビリティサービスが普及する[1]。

➤ 車の使い方

2030 年頃の Beyond 5G のデジタル社会に向けては、ネットワークや、クラウドデータセンターの消費電力を最小化するため、自動車をエッジデバイスとし、自動走行を含む高度な情報処理等を可能な限り実施する。次世代の交通システムの基盤となる高精度デジタル地図・OTA 機能・狭域通信機能が車に実装される[2]。

➤ 強靱なクラウドネットワークの整備

自動運転機能を具備したコネクティッドカーの普及に伴い、当該車両の数百種類にも及ぶセンサーデータ、カメラ画像や LiDAR 点群情報などのあらゆるデータが無線通信によりネットワークに



常時送信・蓄積され、高精度デジタル地図の逐次的な更新に使用されることとなる。その通信データ量は 2020 年頃と比較すると、車両あたり 100 倍[9]、そして自動運転車の新車販売台数は 100 倍以上[10]とそれぞれ想定されており、それらを合算すると膨大なデータ量をネットワーク上で処理することとなる。すなわち、そのような膨大なデータを蓄積できるストレージリソースや、遅延なく処理できるサーバーの演算能力等を補える強靱なクラウドネットワークが整備される。

➤ スマートシティとの連携

日本の社会課題である人口減少やエネルギー消費の問題を解決するため、スマートシティの社会実装が進む。それに伴い、車の機能や役割も大きく変容する。例えば、EV(Electric Vehicle)/PHV(Plug-in Hybrid)車のバッテリーと HEMS (Home Energy Management System)の接続により、電力会社からの需給に柔軟に対応することで、街全体の電力需要を最適化するなど、車は社会や人々の生活と、より密接に関わるようになると想定される。

#### 4.7.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 安全運転支援

Beyond 5G の包摂的なインフラと Network as a Service (NaaS) の適用により、災害発生時など交通インフラが停止するような状況下においても、車両は衛星や HAPS (High Altitude Platform Station)、車車間などの通信によりさまざまなサービスを継続して利用できるようレジリエンス機能をもつだろう。さらには、各ユーザーの使い方やサービスの要件に合わせて過不足なく通信リソースを供給する機能や、異なる技術やインターフェースを持つものとも連携して、より幅広いリソースを効率的、かつ柔軟に運用して、Beyond 5G 能力、サービスを補完する拡張、進化も可能となると考えられる。このことを考慮すると、他の技術（例えば、IEEE802.11bd など）の進化についても常に注視していく必要がある。また、Beyond 5G 基地局において、高周波数帯を活用したセンシング機能などにより、従来のレーダーよりも高解像度・広範囲・高精度角度測位・高速移動物のより正確な検知が可能となり、安全運転支援や自動運転に資するインフラ整備を大幅に助長できる。

Beyond 5G における安全運転支援の姿を図 4.7-1 に示す。



図 4.7-1 Beyond 5G における自動車業界（安全運転支援）

● 自動運転

Beyond 5G で新たに導入される通信とセンシングの融合機能により、レーダーと通信機能間のハードウェアと周波数帯域のシェアリングという利点をもたらし、将来車両モデルの設計にも貢献するだろう [12]。

Beyond 5G 基地局のセンシング機能により、従来のレーダーよりも高解像度・広範囲・高精度角度測位・高速移動物のより正確な検知が可能となり、安全運転支援と同様に自動運転に資するインフラ整備を大幅に助長できる。また、車両に実装すべき LiDAR 等のセンサー情報をインフラ側で補完することで測位精度を向上させるとともに車両価格を低減できるため、これらも自動運転車の普及促進に貢献すると考えられる。

Beyond 5G によるインフラ協調、超高速・大容量が可能にする非圧縮データ伝送、センシングや AI を活用し、遠隔車両制御の意思決定に必要なより正確、かつ迅速な情報の取得と伝達も可能になり、遠隔監視・遠隔運転の要員数の低減や、遠隔監視・遠隔運転地域拡大に貢献するだろう [12]。

さらに、Beyond-5G で通信路が超高速・大容量化すると、道路状況や交通情報のデータの画像化が可能となり、ダイナミックマップ基盤の成熟に資すると考えられる。

高度な自動運転時代に向けては、車両単体での学習や推論に要求される計算処理能力は各種センサーの高度化に伴い膨大となることが予想されている。また、車両単体が得られる多(又は他)視点情報が限定的な場合の計算量は、ニューラルネットワークを肥大化させ、車両の GPU・NPU の能力だけでは極めて短い時間内での計算を賄いきれない可能性も考慮する必要がある。そういった要件に備えるため、分散学習・推論を複数車両や Beyond 5G 基地局そのものに具備することで可能にし、Beyond 5G ネットワークと AI を統合することが極めて重要な要件となる。

インフラ側では低炭素化社会に向けた配慮として、自動運転の高度な AI 演算を、データセンターPUE

(Power Usage Efficiency) の状況に応じ、車両とエッジクラウド間で動的に機能配置するような制御、自動運転 AI アルゴリズムに用いる学習データストレージの車両エッジクラウドとデータセンターへの分散配置 (フェデレーテッド・トレーニング) も具備するようになるだろう。

量子暗号により OTA セキュリティの堅牢性を向上させたり、デジタルツイン技術をつかさどる超高速・大容量通信の活用により、信号なし交差点のタイムリーな状況に基づく適応的な決定による出会いがしらの衝突事故撲滅や、危険な状況の予測に基づく緊急回避行動を運転者に提案するなどの応用が考えられる。

Beyond 5G における自動運転の姿を図 4.7-2 に示す。



図 4.7-2 Beyond 5G における自動車業界 (自動運転)

#### 4.7.4 Beyond 5G に求められる Capability

##### (a) 超高速・大容量

安全運転支援や自動運転に資するダイナミックマップにおいて、550 万画素相当 (SONY IMX490) の車載カメラ数を 12 台、画像イメージ数をカメラあたり 10 枚取得、それらを 10 秒毎にアップロード、圧縮率 25% の可逆圧縮を施すものと仮定すると、必要となる伝送速度は車両当たり数 100Mbps 程度となる [16]。また、4K カメラ数を 12 台、画像イメージ数をカメラあたり 10 枚取得、それらを 1 秒毎にアップロード、圧縮率 25% の可逆圧縮を施すものと仮定すると、必要となる伝送速度は車両当たり数 Gbps 程度となる。

高速道路上の渋滞のようなケースでは、交通密度 (車両台数/km) が 108 台/km に達する [11]。そのうち 5~20% の車両がクラウド上のサーバーに同時に画像をアップロードしたと仮定すると、路側機、又は基地局のセルあたりの同時接続容量は数 10Gbps が必要となる。

## (b) 超低遅延

遠隔運転では、車載カメラの画像等をもとに遠隔地の運転操作者が車両を制御するため、画像と制御信号の2つの異なるサイズのデータを車両と制御網とで同時に交換する必要がある。5G時代の遠隔運転の想定は、主に工事車両や除雪車などロボティク的な用途が想定されているが、Beyond 5G時代には地方のモビリティサービスの一環や、災害発生時の路上駐車車両の除去など多様化することが考えられ、それらに必要な要件の定義が必要となる。

仮に8K相当の画像を無圧縮、60FPSで車両から遠隔地へ伝送した場合、アップリンクの無線区間の伝送速度は概ね50Gbps必要となる。一方、制御信号においては、現在多くの車載センサーの動作周期100ミリ秒が2030年代には自動運転に向けた最適化が図られるものと見込み、エンドツーエンドでの通信遅延<sup>[13][14]</sup> 1ミリ秒<sup>3</sup>、通信信頼性<sup>4</sup> [14]  $10^{-6}$ 以上が求められる。

## (c) 超安全・信頼性、測位・センシング

安全運転支援における集団的知見(Collective perception)の共有では、複数車両がセンサー情報を全方位にわたり共有するだけでなく、Beyond 5Gのセンシング能力を活用することで緊急軌道修正などのイベントに対応する。要求条件としては、5Gで想定されている500m以上の通信距離圏内におけるデータ伝送速度1Gbpsを踏襲しつつ、エンドツーエンドでの遅延1ミリ秒以下の低遅延性能と、その通信信頼性を $10^{-6}$ とし、5Gでの要件を超える性能の達成が期待される。

さらに、センサーフュージョン・シェアリング技術により環境感知性能を拡張することは、車両に実装すべきLiDAR等のセンサー情報をインフラ側で補完できるため、安全運転支援や自動運転を高度化させる上では必要不可欠な技術である。センサーフュージョン・シェアリングにおいても、前述集団的知見と同等の要求条件を満たす必要がある。

一方、都市部の夜間や地方などで車両が単独走行する条件下では、Beyond 5G基地局のセンシングが有効である。高周波数帯の利用による超広帯域、基地局MIMOの超多素子化、並びに高度に複数セルを協調させた分散型センシング等により、IoTデバイスのような専用受信端末を用いずに5G、またはその拡張技術を凌駕するセンチメートルレベルのセンシング精度を提供可能とすることが期待される。

## (d) 超低消費電力

路側機や周辺車両との集団的知見の共有、いわゆる協調型の安全運転支援や自動運転ではサイドリンクの活用が期待できる。しかしながら、現在、サイドリンク上で伝送されるデータの想定は制御信号や同期信号のようなごく小さなデータサイズ(数百から数千バイト)である。Beyond 5G時代は画像を含んだ各種センサーデータ伝送を可能にすることで、適度に分散化したデータ伝送と処理が可能となり、上位ネットワークや無線インターフェースの負荷とデータセンターにおける低消費電力化を積極的に低減す

<sup>3</sup> この4.7節における通信遅延の提案数値は3GPPリリース16の要件を参考にした

<sup>4</sup> この4.7節における記載した通信信頼性はBlock Error Rateに相当するもの

る取り組みが必要である。

(e) 超安全・信頼性

OTA による各 ECU プログラムのアップデートを保証するために、エアインターフェースにおける量子暗号通信の適用が必要となる。

(f) 自律性

高度な自動運転時代に向けては、車両単体での学習や推論に要求される計算処理能力は各種センサーの高度化に伴い膨大となることが予想されている。また、車両単体が得られる多(又は他)視点情報が限定的な場合の計算量は、ニューラルネットワークを肥大化させ、車両の GPU・NPU の能力だけでは極めて短い時間内での計算を賄いきれない可能性も考慮する必要がある。そういった要件に備えるため、分散学習・推論を複数車両や Beyond 5G 基地局そのものに具備することで可能にし、Beyond 5G ネットワークと AI を統合することが極めて重要な要件となる。

(g) カバレッジ拡張

車両や路側機と、衛星や HAPS との通信によるカバレッジの拡張技術により、例えば、災害発生時に緊急車両が通信路を確保したり、一般のオーナーカーにおいても携帯圏外でのコネクテッドサービス(例、緊急呼)を提供できるようになるなどが期待される。

それぞれの活用例が求める Beyond 5G の Capability を表 4.7-1 に示す。

表 4.7-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
車両センサー情報を活用したダイナミックマップの更新	数Gbps/ユーザー、数10Gbps/セル									
遠隔運転における遠隔監視と遠隔制御	~50Gbps	E2E通信遅延 1msec		10 <sup>-6</sup> 以上						
安全運転支援における集団的知見; 車両のセンサー情報をインフラ側で補完(センサーフュージョン・シェアリング)	~1Gbps	E2E通信遅延 1msec		10 <sup>-6</sup> 以上			cmレベルのセンシング精度			
車両や路側機と、衛星やHAPSとの通信によるカバレッジの拡張、緊急時災害支援など								○		
複数の車両や基地局(エッジクラウド)に基づく分散型学習と推論	○	○							○	
OTAによる車両プログラムのアップデートの管理など	○			量子暗号通信の適用						

#### 4.7.5 まとめ

本節では、自動車業の現状と課題を検討して、期待する将来像、および Beyond 5G を活用した活用例を示した。Beyond 5G に求められる capability としては、5G を上回る超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、および高精度な測位・センシング、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, 官民 ITS 構想・ロードマップ.  
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20210615/roadmap.pdf>
- [2] 内閣官房, 他関係省庁, 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略.  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>
- [3] 一般社団法人 UTMS 協会, “UTMS 導入状況”.  
<http://www.utms.or.jp/japanese/pre/index.html>
- [4] 総務省, “自動運転の実現に向けた総務省の取組”.  
[https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2020/file/cv/07CV\\_05J\\_Ebara.pdf](https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2020/file/cv/07CV_05J_Ebara.pdf)
- [5] ITS Connect 推進協議会, ITS Connect の自動運転における有効性  
[https://www.itsconnect-pc.org/wp/wp-content/uploads/2021/04/news08\\_20210427\\_Release3.pdf](https://www.itsconnect-pc.org/wp/wp-content/uploads/2021/04/news08_20210427_Release3.pdf)
- [6] 5GAA, A visionary roadmap for advanced driving use cases, connectivity technologies, and radio spectrum needs.  
<https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/09/A-Visionary-Roadmap-for-Advanced-Driving-Use-Cases-Connectivity-Technologies-and-Radio-Spectrum-Needs.pdf>
- [7] 国土交通省, 自動運転の安全技術ガイドライン.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf>
- [8] ITS Japan, ITS 年次レポート 2021 年版, “日本の ITS 産官学民連携による次世代 ITS 推進”, 2021 年 6 月.
- [9] NTT データ, “コネクティッドカー社会の実現に向けて”.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000472190.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000472190.pdf)
- [10] 国土交通省, “ADAS 搭載車両、自動運転車両の台数予測」(カメラ総研出展データ) ”.  
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001330176.pdf>
- [11] 東京大学先端科学技術研究センター, “渋滞のサイエンスとその解消法”.  
<https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2016/03/71-03mijika.pdf>
- [12] W. Tong, P. Zhu, et al. 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [13] 3GPP TR 22.886 V16.2.0, Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services.

[14] 3GPP TS 22.186 V16.2.0, Enhancement of 3GPP support for V2X scenarios.

[15] Society of Automotive Engineers, "Levels of Driving Automation™", J3016, April 2021.

<https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>

[16] Automotive Edge Computing Consortium (AECC), "Operational Behavior of a High Definition Map Application Whitepaper", version 1.0.0, May 2020.



## 4.8 機械

機械は人の生活活動、物の生産・流通、社会インフラ、エネルギー利用のすべてにわたる基盤であり、機械工学上の様々な改善による性能、効率、信頼性の向上に加え、センサーの進化、ICT の活用によるシステム最適化が進行している。特に機械と機械また機械とシステム制御とが直接つながることによる大幅な効率向上に対する期待は大きい。日本が課題先進国である労働人口の減少を補う自動化・省人化、また人間と協調するロボット、あらゆる段階での環境負荷の低減などの課題が注目されている。

表 4.8-1 機械業界の期待する進歩

項目	期待する進歩
機械の設計	<ul style="list-style-type: none"><li>● 遠隔共同作業とデジタルツインによる設計効率の向上</li><li>● 非接触給電、有線ネットワークの無線化を取り入れた設計</li><li>● AI/HPC で燃料効率、機械効率、制御効率の最適設計</li></ul>
機械の製造	<ul style="list-style-type: none"><li>● デジタルツイン、つながるサイバー工場で最適生産</li><li>● 物流網の効率化と製造場所の分散、地産地消</li><li>● ロボット、AGV、レイアウトフリー工場、3D プリンタ</li></ul>
機械の自律制御	<ul style="list-style-type: none"><li>● AI による操縦・機械操作の省人化・無人化・自律化</li><li>● 自動運転（センシング精度・密度、測位、最適制御）</li><li>● 高精度測位・通信による最適運行制御</li></ul>
機械の活動範囲拡大	<ul style="list-style-type: none"><li>● 空、成層圏、宇宙、遠洋、海中、地下のカバレッジ</li></ul>
機械の知能化・人間協調	<ul style="list-style-type: none"><li>● 自律ロボット（AI による制御、作業精度と速度の向上）</li><li>● 人間拡張（器官・感覚拡張、多感覚、1 対多遠隔操作）</li><li>● サービスロボット（コミュニケーション、家電代替）</li></ul>
機械の監視・保全	<ul style="list-style-type: none"><li>● 運転データの取得（データ種別、サンプリング、対象点数）</li><li>● 分析・フィードバック（デバイス/エッジ/クラウドの最適分担）</li></ul>

以下、機械業界の領域ごとに、2030 年への期待と解決すべき課題について個別に記述する。本節では、機械を応用する代表的な産業分野として製造分野、建設分野、農林水産分野、に注目し、それぞれの主要機器である工作機械、建設機械、農機を取り上げた。また、将来の少子高齢化や労働人口減少、自然災害等の社会課題への対応を考える上で不可欠なロボットについても言及する。さらに、機械の活動範囲拡大を考慮し、陸海空のモビリティを代表する大型機械を扱う分野として、船舶(造船)についても取り上げる。なお鉄道については、4.3.3 節、航空機については 4.3.2 節、自動車については 4.7 節で記載しているため本節では触れないこととする。

## 4.8.1 工作機械

### 4.8.1.1 現状と課題

- 現状

性能向上やメンテナンスなどを目的とした機器単体への ICT 技術の活用が行われており、システムレベルへの適用を目指した検証および実用化検討も進んでいる。

- モーションコントロールのような演繹的なアプローチによる加工精度向上の工夫が従来より行われてきた（例：経験的事実や数理的モデリングに基づくびり振動の抑制）
- 故障検知やエッジコンピューティングを活用した工場の検証・実用化が始まっている

- 課題

精度・処理能力などさらなる性能向上と新材料や特殊加工への対応など多様性拡大が今後必要である。また物流を含めた製造工程全体のプロセスを考慮すれば、サプライチェーン、バリューチェーン、エコモデル等に関係する課題への対応も必要となるが、本節では製造工程自体に関する課題にフォーカスすることとする。

- 加工精度・スループットの向上
- 切りくずの制御と処理
- 故障検知
- 各種材料のモデリング・材料に応じた自動加工
- プロセスの監視と最適化
- 高難度な特殊加工の実現

### 4.8.1.2 期待する将来像

ICT を活用した加工の高精度化・高速化、メンテナンス効率化、材料・条件など対応範囲拡大が期待されている。

- IoT データに基づき故障検知やツール寿命等を自動判定し、自動でツール交換を行う
- ローカル 5G 等を用いて集めた加工データに基づいた高速・高精度な加工。あらゆる材料や特殊加工への対応
- 生産現場のデジタルツイン化による同期生産により、需要変動に柔軟に対応する生産加工や生産プロセスの実現

### 4.8.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

収集したデータに基づく性能向上や工作工程の知能化や大規模センサーネットワークの活用、超低速低遅延なモーションコントロールの実現が工場における 5G/Beyond 5G 活用の主要な将来展望となる。

- 加工データの自動収集・選別・データセンター転送
- ツールの破断時等の状態量データ収集・特徴量抽出によるツール寿命の予測

- 収集したデータに基づく制御性能の改善といった、動的なソリューションの提供
- 単一の工場では前例の少ない加工対応
- 完全に人の手が入らない工場、グローバルな加工計画の自動生成
- センサーやツール周りの有線接続が不要、ケーブル外乱の影響が除外
- 人間がロボットに接触しながら適切なタスクを「教え込む」ダイレクトティーチング手法が高度化  
(VR や AR 空間を通じて操作者がどこにいても/安全にダイレクトティーチングを実現)

#### 4.8.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

これまで述べてきた活用例を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.8-2 にまとめる。また、Beyond 5G における工作機械産業の姿を図 4.8-1 に示す。

表 4.8-2 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
①加工データの自動収集・選別・転送			○			○	○		○	
②完全自動製造	○	○	○	○		○			○	
③ダイレクトティーチング手法高度化	○	○		○		○	○		○	

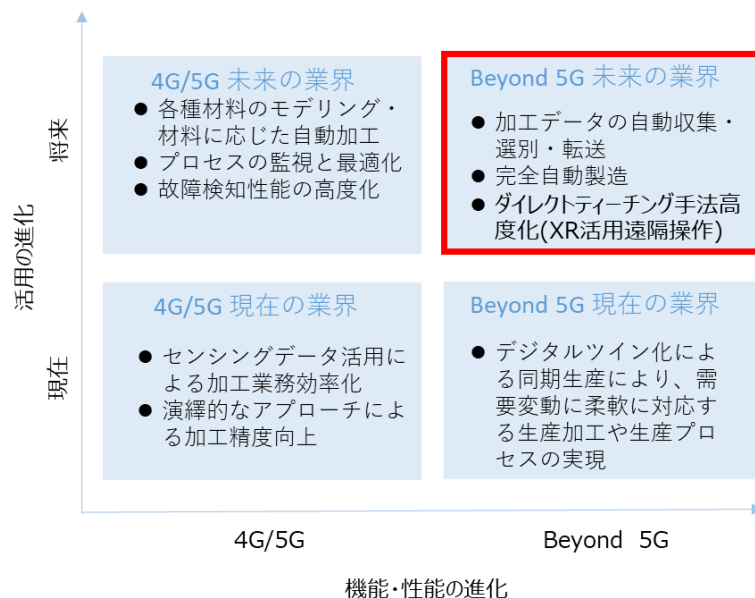


図 4.8-1 Beyond 5G における工作機械産業

#### 4.8.1.5 まとめ

本節では、工作機械業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、高速大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、時刻同期精度、測位・センシング、自律性などが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 慶応大学 柿沼研究室.  
[http://ams.sd.keio.ac.jp/app-def/S-102/KKlab\\_hp/](http://ams.sd.keio.ac.jp/app-def/S-102/KKlab_hp/)
- [2] 名古屋大学 社本研究室.  
<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/upr/research.html>
- [3] 総務省, “地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証”.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000712738.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000712738.pdf)
- [4] NTT ドコモ, ホワイトペーパー : 5G の高度化と 6G.  
[https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper\\_6g/DOCOMO\\_6G\\_White\\_PaperJP\\_20210203.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20210203.pdf)
- [5] NTT ドコモ, “5G evolution & 6G”.  
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/6g/index.html>
- [6] 総務省, “製造現場におけるローカル 5G 等の導入ガイドライン”.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000760634.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000760634.pdf)

## 4.8.2 建設機械

### 4.8.2.1 現状と課題

- 現状

建設工事の従事者減少と工事ニーズの増大の課題を総合的に解決する試みがなされている。

- 2020年以降は人口減少による建機オペレータの人数が不足。
- 自然災害・インフラ老朽化による緊急性が高く危険な作業が増加。
- ICT技術による作業効率化と建機のライフサイクル管理が推進されている。

- 課題

建機の自動化と遠隔操作が期待されているが、いずれも発展途上である。

- 建機自動化可能範囲は限定的。
- 遠隔操作インターフェースは大型で高価。
- 都市化による都市部での狭小作業・限定時間作業の増加。

### 4.8.2.2 期待する将来像

建機にとどまらない建設工事の生産性・安全性の向上が期待されている。

- 自動化による建設作業の実現。
- オペレータ室からのリモート監視・操作による建設作業の安全・安心の確保。
- デジタルツイン技術による施工効率と建機稼働効率の最大化。

### 4.8.2.3 Beyond 5Gで実現が期待される活用例

「省人化・無人化の促進」、「誰でも安全安心なリモート建機操作」、「空間的・時間的に柔軟な施工管理」などのシーンで Beyond 5G の活用が期待される。将来への期待・願望を以下に記載する。

#### ① 省人化・無人化の促進

- 建機へのロボット技術適用と自動機能の高度化
- 自動化困難作業への建機遠隔操作技術の適用
- 複数建機の自動操作と遠隔操作の最適スケジューリングによる少数オペレータでの作業・管理

#### ② 誰でも安全安心なリモート建機操作

- 清潔・安全なオペレータ室からの遠隔操作による建設作業
- シンプルな操作インターフェースでの直感的な運動・感覚伝達
- 低遅延・広帯域な通信網とネットワーク状況に応じた適応的な通信制御

③ 空間的・時間的に柔軟な施工管理

- 建機の状態に応じた AI によるスマートメンテナンス
- デジタルツイン技術による施工計画と現場作業のシームレス化
- ICT による建機のレンタル・シェアリングとオペレータのフレキシブルなワークスタイル

4.8.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

これまで述べてきた活用例を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.8-3 にまとめる。また、Beyond 5G における建設機械産業の姿を図 4.8-2 に示す。

表 4.8-3 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
①省人化・無人化の促進		○		○		○	○		○	
②誰でも安全安心なリモート建機操作	○	○		○		○			○	
③空間的・時間的に柔軟な施工管理		○		○		○				

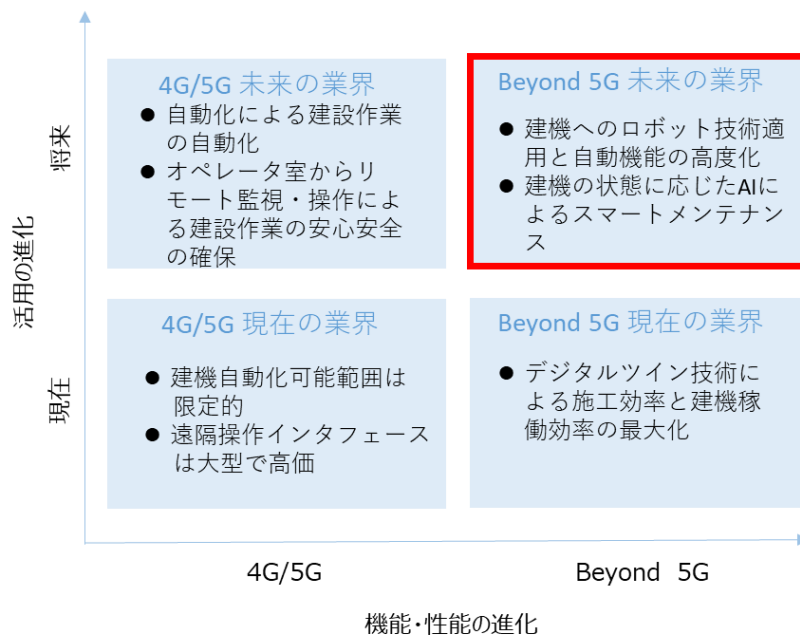


図 4.8-2 Beyond 5G における建設機械産業

#### 4.8.2.5 まとめ

本節では、建設機械業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、時刻同期精度、測位・センシング、自律性が考えられる。

#### 参考文献

- [1] i-Construction 委員会, i-Construction ～建設現場の生産性革命～,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- [2] 国土交通省, 令和 3 年版国土交通白書.  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- [3] 国土交通省, “建設業及び建設工事従事者の現状”.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001180947.pdf>
- [4] 鹿島建設, 鹿島建設広報, “日本初！建物の全てのフェーズで BIM による「デジタルツイン」を実現”, 2020 年 5 月 11 日.  
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202005/pdf/11a1-j.pdf>



### 4.8.3 農業機械

#### 4.8.3.1 現状と課題

- 現状

農業従事者の減少と高齢化により、農業生産性の大幅な向上が必要とされている。

- 人口減少に伴い、農業就業者数は継続して減少傾向
- 少子高齢化に伴い、農業就業者の高齢化が進展

- 課題

ICT 技術等の先進技術を活用した「スマート農業」の推進が必要不可欠である。

- せん定作業等における熟練作業者の暗黙知の形式知化
- 自動ロボットの導入・維持コストの大幅な低減
- 農業経営規模の大規模化、農地の集積・大規模化
- 通信環境等の ICT インフラの整備
- 地球温暖化による農地環境の変化への対策

#### 4.8.3.2 期待する将来像

農機の自動化、高機能化にとどまらず農業生産のあらゆる面でスマート化の実現が期待される。

- せん定や収穫等の一連の作業が全て自動化されたことで、農業従事者は基本的に遠隔監視・指示・判断のみを行うだけの超省力化された農業
- 気象条件等の変化に合わせて最適な栽培環境に自動的に管理されるスマート農業システム
- 冷夏等の長期の気象予測に基づいて最適な作付け時期や品種選択を支援してくれるシステム
- 海外を含む遠隔地にある農地の管理・生産を実現する遠隔農業システム
- 消費者の需要予測と生産物の発育状況に応じた生産・出荷計画の自動作成システム

#### 4.8.3.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

「スマート農業」にて、将来こんなことができたら良いという期待・願望を以下に記載する。

- 熟練作業者の暗黙知の形式知化、周辺環境に応じた整枝やせん定の自動化
- アタッチメント変更やソフトウェアの更新等による自動農業機械の複数種類品種収穫への対応
- 生産物の成熟度を判断し、最適なタイミングの物を選別して収穫・出荷
- 自動農業機械の遠隔での稼働状況管理、故障時期予測、故障メンテナンス
- 生産物や飼育物の発育状況や成熟度、健康状態等の情報が一括で遠隔管理
- 温度、湿度、日照条件、飼料等を最適に制御
- 熟練作業者が農業初心者に対して遠隔地から農作業の指導・支援可能
- 時間帯や飼育物の健康状態に応じた飼育物の自動誘導。放牧中の畜舎を自動的に清掃
- 遠隔地の獣医による飼育物の遠隔診療
- 過去の生育状況や気候条件、土壌環境等のデータから最適な作付け野菜や品種等をアドバイス

#### 4.8.3.4 Beyond 5G に求められる Capability

これまで述べてきた活用例を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.8-4 にまとめる。また、Beyond 5G における農業機械産業の姿を図 4.8-3 に示す。

表 4.8-4 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
①自動農業機械の遠隔での稼働状況管理、故障時期予測、故障メンテナンス	○	○				○				
②遠隔地から農作業の指導・支援	○	○								
③周辺環境に応じた整枝やせん定の自動化	○	○					○			

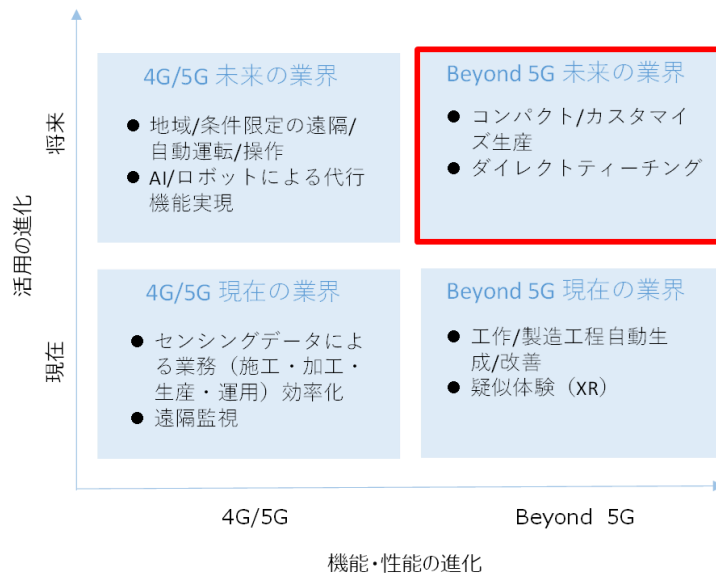


図 4.8-3 Beyond 5G における農業機械産業

#### 4.8.3.5 まとめ

本節では、農業機械業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、時刻同期精度、測位・センシングが考えられる。

## 参考文献

- [1] 農林水産省, “スマート農業の展開について”.  
[https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/pdf/smart\\_agri\\_tenkai.pdf](https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/pdf/smart_agri_tenkai.pdf)
- [2] 総務省, 令和 2 年度版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf>

## 4.8.4 ロボット

### 4.8.4.1 現状と課題

#### ● 現状

少子高齢化やニューノーマル社会での労働力不足の解消や、人々が暮らしやすい社会の実現に向け、ロボットの活用が期待される。また、ロボットは単体でその役割を担うものから、ネットワークやクラウドと連携したシステムの中にロボットが位置付けられ、その役割を担う形態に変わってきている。本節では、サービス用ロボットについて記載する。その他のロボットについては、他章に適宜記載する。

- 少子高齢化による労働力不足が顕著化
- ニューノーマル社会に向けたリモートコミュニケーションの増加
- 多様性を許容する社会に向けたロボット技術活用への期待

#### ● 課題

人とロボットの共生・協調を実現するためのコミュニケーション、安全、DXとの連携などが課題。

- ロボットによる自動化可能範囲は限定的かつ、人とのコストパフォーマンスには依然大きな差。
- 映像のみのテレプレゼンスロボットでのコミュニケーション機能は非言語伝達の観点で不十分。
- バーチャル空間の活用は進展の兆しであるが、フィジカル空間での活用は非常に限定的。

### 4.8.4.2 期待する将来像

少子高齢化による労働力不足が解消され、人々の暮らしが豊かになる。

- 自動化ロボットによる労働力補完
- 安全・安心の確保とリモートコミュニケーション両立
- バーチャル空間・フィジカル空間での疑似身体を通じた身体や精神の拡張

### 4.8.4.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

「ロボット技術による労働力補完の実現」、「非言語伝達が可能なリモートコミュニケーションロボット」、「誰でも操作可能な疑似身体ロボット」の3項目にて、将来こんなことができれば良いという期待・願望を以下に記載する。

#### ① ロボット技術による労働力補完の実現

- 自動機能の高度化
- 自動化困難作業への遠隔操作技術の適用
- 複数ロボットの自動操作と遠隔操作の最適スケジューリングによる少数オペレータでの作業・管理

#### ② 非言語伝達が可能なリモートコミュニケーションロボット

- 五感伝達技術の高度化
- オペレータの心情・意図・雰囲気推定と伝達技術の適用

- 安全かつ臨場感のあるインタラクション技術の適用

### ③ 誰でも操作可能な疑似身体ロボット

- シンプルな操作インターフェースでの直感的な運動・感覚伝達
- グローバルでの低遅延・広帯域な通信網とネットワーク状況に応じた適応的な通信制御
- 初期導入と運搬・設置のハードルが低いシステムの構築

#### 4.8.4.4 Beyond 5G に求められる Capability

これまで述べてきた活用例を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.8-5 にまとめる。また、Beyond 5G におけるロボット産業の姿を図 4.8-4 に示す。

表 4.8-5 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
① ロボット技術による労働力補完の実現	○	○		○		○	○		○	
② 非言語伝達が可能なリモートコミュニケーションロボット	○	○		○		○	○		○	
③ 誰でも操作可能な疑似身体ロボット	○	○		○		○	○		○	

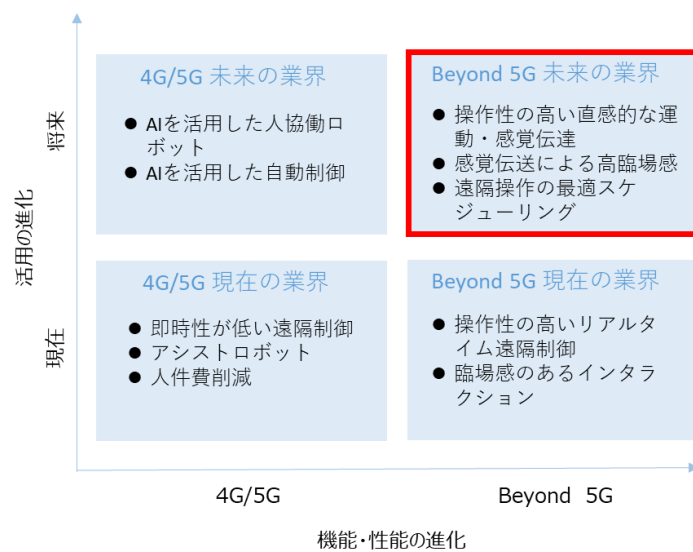


図 4.8-4 Beyond 5G におけるロボット産業

#### 4.8.4.5 まとめ

本節では、ロボット業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、時刻同期精度、測位・センシング、自律性が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省, “2050 年までの経済社会の構造変化と政策課題について”, 平成 30 年 9 月.  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050\\_keizai/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050_keizai/pdf/001_04_00.pdf)
- [2] 国土交通省, 令和 3 年版国土交通白書.  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- [3] 経済産業省, 令和 2 年度ものづくり白書.  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210528002/20210528002-3.pdf>
- [4] オリイ研究所.  
<https://orihime.orylab.com/>
- [5] 総務省, 令和 2 年度版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf>

## 4.8.5 造船(船舶)

### 4.8.5.1 現状と課題

#### ● 現状

海上輸送の増加に伴い、IT 技術の適用による効率化が進められつつある。

- 海上輸送量は年 4%程度で増加し、船舶の数も増加傾向が継続
- 少子高齢化や船員離れによる労働力不足が進行
- 船舶へのセンサー搭載などによる DX 化が進展
- 海上では衛星を用いて通信を行い、港湾に入ると陸上の通信設備へ切り替えて利用

#### ● 課題

海運業界においては、船舶のみならず港湾設備能力の向上が望まれている。効率化、自動化のさらなる拡大が課題。航行支援や環境モニタリングのための船外（海中）センサーや海中ドローンなどに有効な通信手段がない。

- 貨物量・輸送量の増加に対して港湾のキャパシティー不足(荷物の積み下ろしスループット等)  
⇒ 港湾の数や規模を拡大するのは困難なため、稼働時間を増やす・効率を上げることが課題
- 船員の高齢化、成り手不足による人員不足

### 4.8.5.2 期待する将来像

船舶や、港湾設備の自動化、効率化が進み、物資輸送が円滑に行われるようになる。船舶の自動運転が進む。船舶自体や航行環境、海中環境のモニタリングに海中通信の利用が進む。

- 港湾での荷物積み上げ下ろし、輸送の自動化・高速化の実現
- 船舶の自動運行(洋上→港湾内)の実現
- 船員教育の充実化、オペレーション中心の業務シフト

### 4.8.5.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

船舶や港湾設備の自動化・効率化のためのロボット活用や、船舶の自動運転や海洋環境モニタリングに向け、超低遅延、高信頼なネットワークの適用や海上・海中での通信エリア拡大が進む。

- 港湾における荷物積み下ろしのスループット向上
- 港湾クレーンの遠隔・自動運転、ロボット活用等による積み下ろし作業無人化・省人化
- 港湾内輸送車両の狭域自動運転(無人)
- 10cm 精度の駐車位置制御が可能な自動車(貨物)の自動運転
- 船舶内外の航行状況、海中環境のモニタリング船舶データ活用によるオペレーション自動化・航行効率化(フリートオペレーションセンター)
- 無線制御型海中ドローンによる船舶外部および海中環境のセンシング



#### 4.8.5.4 Beyond 5G に求められる Capability

これまで述べてきた活用例を実現するために、Beyond 5G に求められる Capability を表 4.8-6 にまとめる。また、Beyond 5G における船舶産業の姿を図 4.8-5 に示す。

表 4.8-6 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
① 港湾における貨物積み下ろしの効率化		○	○	○		○	○		○	
② 船舶内外の航行状況、海中環境のモニタリング		○	○	○	○	○	○	○	○	

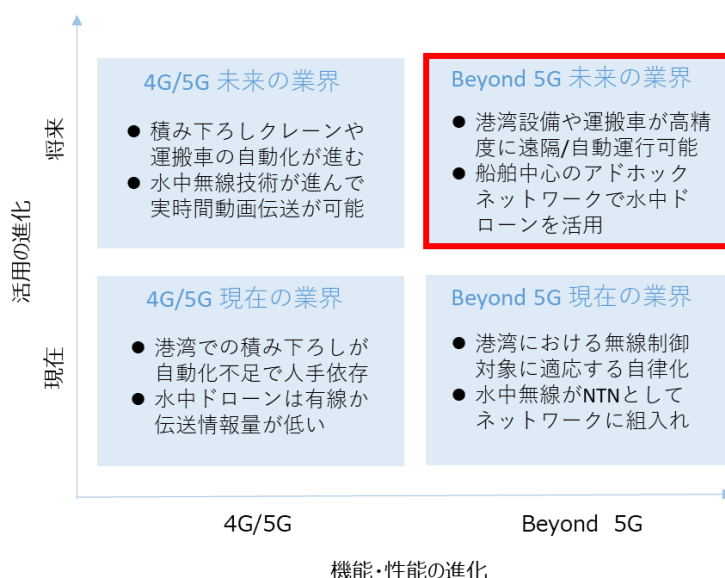


図 4.8-5 Beyond 5G における船舶産業

#### 4.8.5.5 まとめ

本節では、造船・船舶業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超低遅延、中多数同時接続、超安全・信頼性、超低消費電力、時刻同期精度、測位・センシング、カバレッジ拡張、自律性が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 日本郵船ホームページ。  
<https://www.nyk.com/>
- [2] 公益財団法人 日本海事センター, “世界の海上荷動き動向”。  
<http://www.jpmac.or.jp/relation/trend.html?id=28>

## 4.9 電機・精密・半導体

### 4.9.1 電機・精密

#### 4.9.1.1 現状と課題

- Beyond 5G がエッセンシャルインフラとなっていく中で、社会インフラ/プラットフォーム業界への変貌が求められる。
- 生活シーンや業務で取り扱う各機器の通信機能として Beyond 5G が普及するため、幅広い業界の深い理解および望ましい社会実装に向けた合意形成とアクションが大切になる。

情報通信技術は汎用技術として社会への影響が極めて大きく、あらゆるものの再定義が必要である[1]。この情報通信技術の進展により、電気機械、電気機器、精密機器を扱う電機・精密業界は、個別の機器・システム毎の業界の姿から、社会インフラ/プラットフォーム業界への変貌が求められる。

Beyond 5G により社会、業界を変えるのではなく、社会、業界をより良くするために Beyond 5G を使うという順序で考えることが重要である。Beyond 5G は目的ではなくあくまでも手段のひとつであり、あつたら便利な道具という位置付けから、人々のライフスタイル、ワークスタイルの中においてあることが当たり前の存在に変わる。つまり、電気、水道、ガス、道路などと同様にエッセンシャルインフラの役割を果たすこととなり、身の回りにあるあらゆる家電、電気機器、機械、OA 機器などが Beyond 5G を介して相互に接続される。

これまでアナログ的なプロセスで業務を遂行していた業界を含むあらゆる業界において、高度化したサイバーフィジカルシステム(CPS)の日常的な活用が進む。このデジタルツイン(DT)を接続する高度かつ効率的なネットワークが必要となり、Beyond 5G は電機・精密機器が CPS の DT 間のコミュニケーションを媒介する神経網と感覚器の役割を果たす。

生活シーンや業務において、センサー情報(リアル)、過去データの AI 分析結果(サイバー)、これらの組み合わせ、を最適に活用するようになり、電機・精密機器は情報通信と不可分の一体的な存在となる。そのため各機器・システム個別の設計思想や動作ではなく、総合的かつ全体最適なアプローチで臨むこと必要である。

そのためには電機・精密機器業界は、業界内の領域・分野間のより密接な連携に加えて、その他の幅広い業界の深い理解および望ましい社会実装に向けた合意形成とアクションが大切になる。その際、業界横断/業界間の連携のための、オープン API やオープンインターフェース、データ分析/処理やコンテンツ取り扱いのための共通プラットフォーム化も有効となる。

#### 4.9.1.2 期待する将来像

- Beyond 5G は、産業の拡大だけではなく人々や社会のさらなる進化を支えるものになる。
- 複数の製品/システム間連携が必然となり、業界横断的な共創活動や業界間の連携が進む。
- 未来志向のユーザー中心デザインへのシフトなど、ユーザーとの関係も進化していく。

5G までの時代では、産業の拡大ということを目的に大容量、低遅延、多接続といった特徴のあるネットワークが求められたが、Beyond 5G 時代には、コロナ禍の状況を経たニューノーマルあるいは超高齢化社会、そういった社会における新しいワークスタイルやライフスタイル下において、誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会へと進化することが求められる。したがって、Beyond 5G のネットワークは、産業の拡大だけでなく人々や社会のさらなる進化を支えるものになっていき、それに従い市場の価値観も変化していくと考えられる。

家電製品から産業用機械まであらゆる機器・システムが通信を介し繋がり連携し合うためには制御のためのオープンインターフェースの整備、そこでやり取りするデータについても有効かつ効率的な利活用を促進するためにデータのオープン化、および活用例や活用シーンの拡がりを安全・安心の面から支えるセキュリティ、プライバシー強化、これらへの対応が重要となる。

ユーザーニーズが変化し多様化していく中で、個社や単独の業界、および個別の機器、システムで出来ることは限られてくるのが考えられる。社会の様々な局面で Beyond 5G が一般的に用いられるようになることから、複数の製品/システム間連携が必然となり、そのための業界横断的な共創活動や業界間の連携が進む可能性がある。

このような時代の要請に応えるためには、電機・精密業界は、業界側が望む姿だけではなく、幅広いユーザーのニーズの本質を満たすための姿に変貌していく必要があるだろう。必ずしも現在の業界区分や業態に捕らわれずに、未来志向のユーザー中心デザインへシフトし、ユーザーのあたらしいニーズや社会の要請へアプローチすることが肝要である。

ユーザーとの関係は、これまでのような供給と需要という関係を超え、ベンダー側の企業・業界とユーザーが同じ目線、対等に近い立場で未来を創る時代へと進むだろう。ダイバーシティ&インクルージョンや高齢化社会が進展することからも、電機・精密機器は専門家しか理解・操作出来ない製品やシステムだけではなく、ユーザーが自分で容易に扱えることが求められるようになる。誰一人取り残さない社会[2]の実現に向けた、ユニバーサル対応も重要な要素となるだろう。

#### 4.9.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

##### [家電製品]

Beyond 5G がキッチン家電(冷蔵庫、IH クッキングヒーター、電子レンジ、炊飯器など)、生活家電(洗濯機、掃除機など)、空調換気給湯機器(エアコン、換気扇、エコキュートなど)などにおいて、電気を使う製品自体の情報と製品ユーザーや環境情報をシームレスにつなげることで、より高度な生活インフラの役割を担うと考えられる。

これら家電製品に対する Beyond 5G の活用例としては、製造面と製品機能面の 2 つの切り口がある。

まず製造面としては、4.10.3 節の生活文化用品関連の記載に準じる製造業としての内容が挙げられる。さらに、在庫管理や輸送最適化まで含めたグローバルでの生産体制の最適化を支える仕組みへ

適用できることが望ましい。

他方、製品機能面での課題や将来像としては、「健康・快適」と「使いやすさ」と「省エネ」を実現することが挙げられる。家電製品は、人間の居住空間で使われ主に人間が操作する機器のため、設置し使用される状況と人間の情報とのリンクが欠かせない。これからの社会における要請としては、個人の健康・栄養状態情報の管理、操作の支援(高齢者や子供の操作、機器操作への慣れ具合)、ユーザーの機器使用状況(正しく快適に使えているか否か)、住宅内の環境やエネルギー状況、建物・街・屋外の環境や空調の一体マネジメント、適正な機器動作を行うようなアプリケーションの実現、などが求められる。これらを実現するためには、状況の変化に適切に追従する超低遅延、的確な判断のための情報を送受する超高速・大容量、多種多様な機器が相互につながるための超多数同時接続、という Beyond 5G の機能が必要となる。個別の機器についての活用例を以下に述べる。

### キッチン家電

- 個人の健康や栄養状態、嗜好、冷蔵庫の食品の在庫・種類と鮮度などから、最適な食材と食品ロスをミニマムとするような調理の選択を支援する機能
- 調理中に焦げ過ぎなどの失敗や火傷リスクがないように見守る機能や指定した時間に出来上がるような段取りを含めてレコメンドする機能
- 複数の多様な機器をリアルタイムに接続しそれらの状況情報を連携させるとともに、ユーザーの状況に合わせた適切な判断や、誰にでも分かりやすいユニバーサル・インターフェース

### 生活家電

- 日常生活における洗濯や掃除について、ユーザーの要望(時短、静音、清潔など)を考慮し実行する機能
- 作業の段取り(洗濯物を畳み、ゴミ捨てなど)の支援
- ユーザーの体力・筋力も考慮した自動化ロボットと人が行う部分の分担の最適化など、ユーザーの要望を理解した上で機器やロボットとの連携機能

### 空調、換気、給湯機器

- 熱中症、新型感染症対策、ヒートショックなど、健康に関わる空気環境(温度、湿度、気流、空気清浄など)の制御
- 電力需給状況や時間毎電気代を考慮し省エネと両立させる制御
- より良い睡眠のための快適な空調と、音・光も合わせたトータルな室内環境制御
- オフィスなどのビル空調や、工場、学校、病院などそれぞれの現場ニーズに応じた制御
- エネルギー貯蔵の観点からの湧き上げと貯湯の制御や、災害時の水使用の制御
- 屋内外の環境情報やユーザーの要望に応じたリアルタイムな判断、空調・換気・給湯・照明など一体制御
- 住宅内だけでなくビル全体、地域全体の省エネと、天候や発電状況、電力貯蔵状況などとリンクした

制御

- 各機能の分散化に伴うクラウド化への対応
- 空調機器が扱う情報量増大に伴う外部連携機能と共通インターフェース

[重電関連機器]

電力機器・システムを含む社会の重要インフラに関しては、災害・障害あるいはセキュリティ等に対する堅牢性や強靭性が求められ、Beyond 5G における超安全・信頼性が重要となる。このうちセキュリティに関しては既に多様なアプローチが試みられているが、将来的には量子暗号通信の適用も有効と考えられる。

Beyond 5G と AI の発展により、種々のデータや情報をリアルタイムで分析し、機器・システムやサービスへフィードバックできるようになり、重要インフラの堅牢性や強靭性を担保しつつ、リアルタイムで保全・保安や修理・復旧を行える可能性が高まる。この具体化例としては、スマート系統保護・制御やスマート保全等が考えられる。

#### 4.9.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

- Beyond 5G は、5G 性能の量的拡大と分散データ処理が融合し、通信・計算資源を有機的に活用する通信システムとなる。
- AI の本格的な活用が進み、ネットワークと AI はお互いに補い合い共進化していく。
- ユーザーのサービス利用の制約の縮小、社会全体のインフラ最適化や機器シェア、省電力化への対応が求められる。

超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続という 5G からの 3 つの機能に関しては、性能向上に引き続き取り組むことが求められるだろう。

Beyond 5G では上記 3 機能に加えて、Society5.0 を支えるインフラとしての重要要件となる超低消費電力、超安全・信頼性が加わる。安全・安心の観点では、セキュリティ・バイ・デザイン、業界横断/業界間のセキュリティ担保への対応も含まれるだろう。

社会のあらゆる局面に Beyond 5G が浸透し利活用が進むためには、これまで通信を十分に活用できていなかったユーザーにとっても操作や契約が一層身近となり、また自身でネットワークやサービスを手掛けるような通信の民主化[3]も進むことから、電機・精密業界の各機器・システムの自律性、拡張性も大切な機能となる。

無線通信のためのネットワークという側面のみでなく、光通信を含む有線通信との連携・融合、複合的な社会システムとしての運用自動化/最適化、AI なども含むエッセンシャルインフラとして最適な構成をとるための分散データ処理基盤、および全体を包括的に守るセキュリティ、というそれぞれの要素技術の進化が期待される。これらはそれぞれが完全に独立して進化するのではなく、AI とネットワークやその周辺技術がお互いに補い合う共進化の関係となっていくと考えられる[4]。



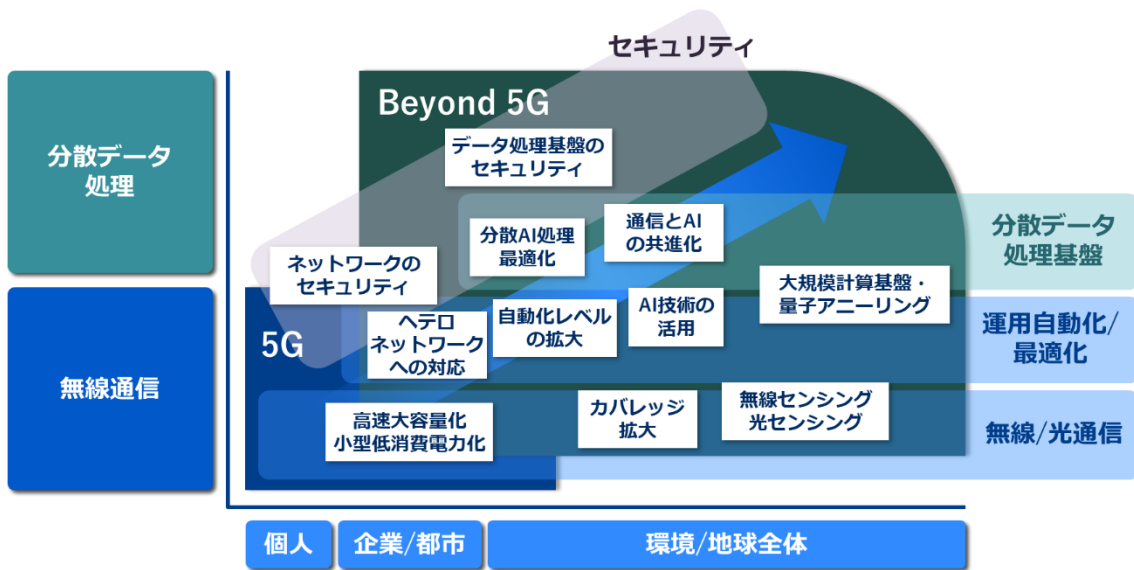


図 4.9-1 Beyond 5G に向けた技術進化の方向性

ユニバーサル・インターフェースが格段に進化したデバイスとサービス形態の要請も高まることが考えられる。マニュアルフリーの直観操作や複雑な操作無しで作動する方式、デバイスフリーでいつでもどこでもサービスや利用可能とするような各種制約の排除などにより、誰一人取り残さない、誰もが主体性を十分に発揮できる、年齢や障害の有無などの違いに関わらず、また保有デバイスや契約形態を意識せずに必要な時に必要なだけ最適な通信を使える社会を実現するような各種機能の実現も重要な要素となってくる。

5G までの人や産業の発展を中心とした価値の追求から、Beyond 5G 以降は持続可能な社会、地球、環境に対する貢献へと、要求が一段と進化する。人の活動や産業発展を中心としたサービスから ICT を活用した地球、環境と共存する社会への変化、企業、組織毎のネットワーク展開から社会全体のインフラ最適化や機器シェア、省電力化への変化、これらの変化に対応するための機能が Beyond 5G に求められることとなる。以上の内容をまとめたものを表 4.9-1 に示す。

表 4.9-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
キッチン家電	○	○	○		○					ユニバーサル・インターフェース
生活家電	○	○	○		○					
空調、換気、給湯機器	○	○	○							
重電機器		○	○	○						堅牢性 強靱性

電機・精密業界の進化と Beyond 5G の技術進化の融合した姿を図 4.9-2 に示す。

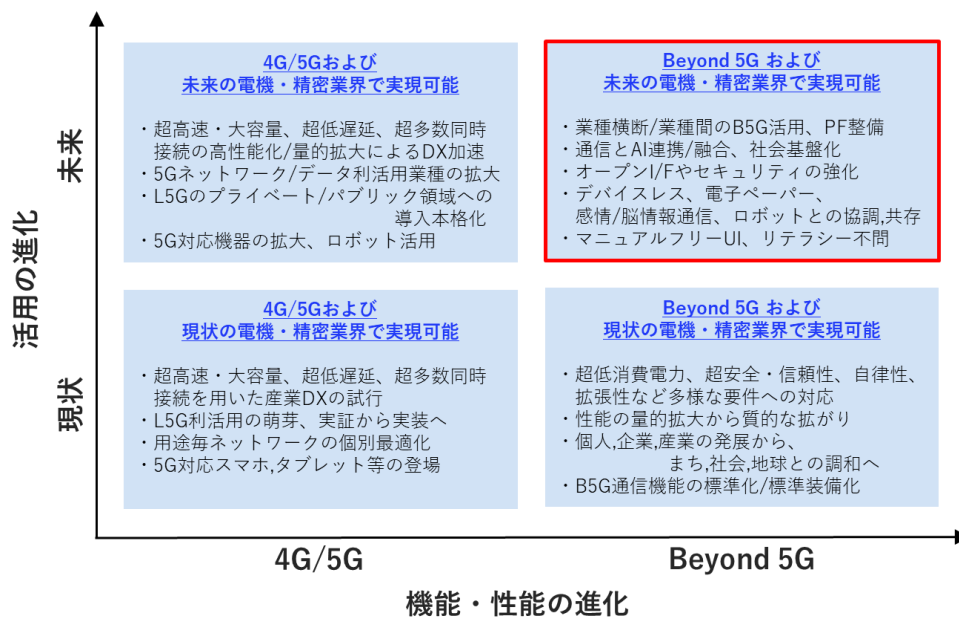


図 4.9-2 Beyond 5G における電機・精密業界

#### 4.9.1.5 まとめ

本節では、電機・精密業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、超低消費電力、およびユーザーが端末側機器を操作する際のユニバーサル・インターフェース、重要社会インフラを支えるための堅牢性や強靭性が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 東京大学教授 森川博之, “「情報の時代」の未来(上) 変革に数十年 強い意志を 想像超える新産業登場も(経済教室),” 日本経済新聞, 2018年9月3日.
- [2] 総務省, 令和3年版情報通信白書, “令和3年「情報通信に関する現状報告」”.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>  
[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01tsushin02\\_02000155.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin02_02000155.html)  
 (2021年7月30日公表)
- [3] 東京大学 大学院情報学環教授 中尾彰宏, “5G・6G 社会の未来図(複眼) 現場発の仕様革新起こす,” 日本経済新聞, 2020年3月26日.
- [4] 日本電気株式会社, Beyond 5G ビジョン.  
<https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/index.html>  
[https://jpn.nec.com/press/202011/20201126\\_03.html](https://jpn.nec.com/press/202011/20201126_03.html)  
 (2020年11月26日公表)



## 4.9.2 半導体

### 4.9.2.1 現状と課題

#### ● 現状

スマートフォンやPC等の通信デバイスだけでなく、車、家電、ロボット、基地局、データセンター、各種産業機器と様々な機器に搭載されており、必要不可欠なものとなっている。

半導体の分類としては、Si系半導体と化合物系半導体に分かれ、用途としてはデジタル、アナログ、パワー、メモリ、通信、センサー、光学系がある。それぞれに適した製造方法が確立されている。

一般的に前工程と呼ばれるウエーハ製造工程、後工程と呼ばれるパッケージ製造工程に分かれている。

前工程ではムーアの法則と呼ばれる微細化加工が進み、微細化に比例するように製造に必要な工程数や時間、製造装置の費用が増加している。

そのため、現在の最先端プロセスと呼ばれる10ナノメートル以下で製造できる企業は十分な投資ができる企業に限られ、寡占化が進んでいる。

後工程においてのトレンドは、チップレットと呼ばれる複数のチップを1つのパッケージに搭載し、LSI(チップ)を小型化し歩留まり向上させると同時に面積削減を実現している。またメモリ等ではチップの積層化も進んでおり、これを実現する手法がパッケージ技術のみならず、ウエーハ技術や基板技術を使った手法も増えてきており、境界があいまいになってきている。

#### ● 課題

新型コロナウイルスをきっかけにして、2021年現在、半導体の供給不足が発生している。

これまでも天災(地震、洪水など)で一部地域を中心とした工場の停止による供給不足は発生していたが、他の地域の工場は稼働しており、時間と手間がかかるものの、復帰までには挽回までの計画が立てられ、ある程度の期間があれば回復できていた。

新型コロナウイルスは世界的なロックダウンによる工場の稼働停止や稼働率低減に伴い、ワールドワイドでの生産量が低下するというかつてない事態が発生した。どこにも代替品が無いという状況が続き、結果1年以上挽回できない状況が続いている。

大きな原因の一つは半導体製造における、製造プロセスの複雑化に伴うリードタイムの長期化である。製品にもよるが、長いものでは前工程で数カ月、後工程で1カ月程度かかる。挽回するために生産設備の増設を図るものの、ほぼ同時期に各社から半導体製造装置が発注され、件数が急増し、納期が長期化している。更に半導体製造装置に使用する半導体が入手できない、といった二次的な問題も発生し、収束できない状況が続いた結果、自動車や家電等の生産計画が大幅に低下している。

別の視点では、世界的な人口の増加からエネルギー消費の増加が進んでおり、それを食い止めるべくCO<sub>2</sub>削減に向けた動きが各国で計画されている。カーボンニュートラルを実現するために、家電への消費電力規制や車のEV化などが推進されている。消費電力削減のためには様々な手法があるが、制御としては動作モードに応じて周波数や電圧を変えたり、必要な回路のみ動作させる制御方法などがあり、スマホやノートパソコン等のバッテリー駆動時間の延長のために活用されている。この技術を非バッテリー駆動

のセットにも適用することで全セットの低消費化が可能となる。

また、EV のモーター駆動等で使用する大電力用途にはパワー半導体と呼ばれる素子が使われており、このパワー半導体で消費する電力を削減するために、Si 半導体から次世代半導体（SiC や GaN）への置き換えが進んでいる。

- 5G における取組み

上記課題を解決するために、5G を活用した以下のような取り組みがなされている。

- 半導体工場内の設備の IoT 化や搬送用ロボットの導入、活用。
- サプライチェーンコントロールや開発現場への AI の導入、活用。
- 半導体プロセスやパッケージ技術への 3D 化手法の導入、活用。
- 次世代半導体の損失改善に向けた製造手法の開発

#### 4.9.2.2 期待する将来像

- 半導体工場の省人化（5G）、無人化（Beyond 5G）
- サプライチェーン含めた生産計画への AI 活用による省人化（5G）、無人化（Beyond 5G）
- 開発現場への AI 活用による短 TAT 化（5G）、省人化（Beyond 5G）
- 微細化以外の半導体技術の進化による寡占化からの脱却（Beyond 5G）
- 損失ゼロへ向けた次世代半導体の開発（5G）更なる特性改善への AI の活用（Beyond 5G）
- 半導体製造のリードタイムを数カ月⇒数日化（Beyond 5G）
- 空飛ぶ装置、工場等により、災害から回避可能な手法の確立（Beyond 5G）

#### 4.9.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 半導体工場内の装置校正や修理、導入を遠隔操作まで実現し、完全無人化
- サプライチェーンコントロールや開発現場の省人化
- 先端半導体プロセス用装置の低価格化、短リードタイム化
- 次世代半導体の損失改善に向け AI の導入、活用
- 次々世代半導体素子の最短開発に向けたワールドワイドでの連携
- 製造のリードタイムを数カ月から数日に短縮する

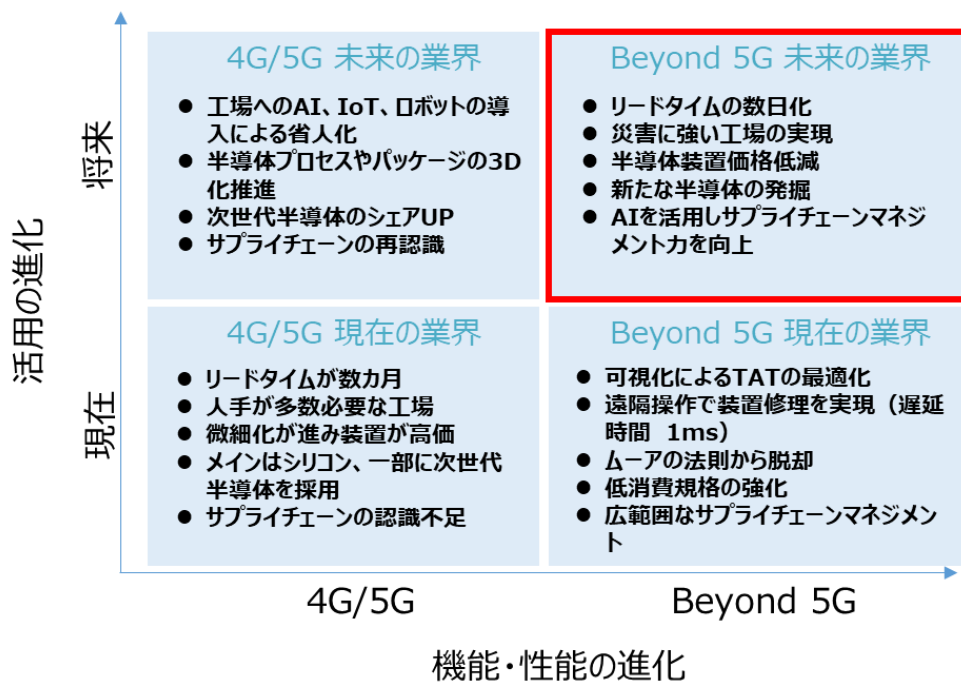


図 4.9-3 Beyond 5G における半導体業界

#### 4.9.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

半導体産業における、現在や未来の各種活用例から想定し、Beyond5G に求められる Capability として、以下に示すものが考えられる。

- 半導体工場内の装置校正や修理、導入を遠隔操作まで実現し、完全無人化するために、超高速・大容量や超低遅延、超安全・信頼性、測位・センシングが求められる。捜査対象の数が多い場合は、超多数同時接続も必要となる。
- AI やロボットを用いて、サプライチェーンコントロールや開発現場の省人化を実現するためには、超高速・大容量や超低遅延、測位・センシングが求められる。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.9-2 に示す。

表 4.9-2 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
半導体工場内の完全無人化	○	○	○	○			○			
サプライチェーンや開発現場の省力化	○	○	○				○			

#### 4.9.2.5 まとめ

本節では、半導体産業の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、測位・センシングが考えられる。

## 4.10 農業・水産業・食料・生活関連

### 4.10.1 農業・水産業

#### 4.10.1.1 現状と課題 [1]

##### ● 課題

- 農業や水産業の分野では、昨今の少子高齢化や人口減少が進むにつれて、労働力不足が、深刻な課題となっている。
- 農業や水産業の現場では、人手に頼る作業や、熟練者でなければできない作業が多く、人手の確保以外に、農作業の省力化、負担の軽減なども重要な課題となっている。
- 農業・農村、漁業や漁村の持続性を高めるためには、経営規模の大小や農村・漁村地域などの条件にかかわらず、生産基盤を強化することが課題となる。

##### ● ICT 活用に係る取組 [2]

- 近年、農業や水産業の分野における、Society5.0 の実現に向けて、ロボット、AI、IoT（Internet of Things）等の先端技術を駆使して超省力・高品質生産を可能にする「スマート農業」及び「スマート水産業」の社会実装に向けた、様々な取組が進められている。
- スマート農業技術の導入により、ロボット、トラクター、スマホなどで操作する水田の水管理システムなどの活用により、作業を自動化し人手を省くことを可能にする（作業の自動化）
- 位置情報と連動した経営管理アプリの活用により、作業の記録をデジタル化・自動化し、熟練者でなくても生産活動の主体になることを可能にする（情報共有の簡易化）
- ドローンや衛星によるセンシングデータや気象データの AI 解析により、農作物の生育や病虫害を予測し、高度な農業経営を可能にする（データの活用）などの効果が期待されている。
- 具体例として、2019 年度からは、スマート農業技術を生産現場に導入し、農業経営への効果を検証するスマート農業実証プロジェクトなどが進められている。

##### ● スマート農業の取り組み

現状での 5G を活用した、スマート農業における、実証プロジェクトとしては、以下の例が挙げられる。

###### a) 農機等の遠隔監視

- 5G などの技術を取り入れたスマート農業を実用化するため、農地で無人トラクターを使った農作業に取り組んだり、センサーやカメラで作物の生育状況を把握したりする実証実験が行われた。
- 5G のほかに BWA 等の最新技術を組み合わせることで、遠隔監視による無人状態での完全自動走行に求められる超高速・超低遅延で信頼性の高いネットワークの実現を目指している。
- こうした無人走行システムの社会実装に当たっては、車両や周辺状況を農業者が遠隔地から監視する必要があるが、こうした通信に当たり、超低遅延等の特長を有する 5G や Beyond 5G の利活用が期待されている。

#### b) リアルタイムでの遠隔モニタリング

- 畜産業における労働負担の軽減と経営の効率化を目的として、牛舎において、牛の群から耳標（耳に付けた識別番号）を画像認識することで、牛の位置を特定するとともに、搾乳量の減った牛の映像をリアルタイム伝送することで遠隔モニタリングする実証試験が実施された
- このように、農場等に固定した高精細カメラや、ロボットやドローン等に設置した移動カメラからの映像を、5G の回線を利用して超高速かつ超低遅延で伝送することで、リアルタイムでのモニタリングを行うことが可能である。

### ● スマート水産業の取り組み[3]

現状での 5G を活用した、スマート水産業における、実証プロジェクトなどの活用例としては、以下の例が挙げられる。

#### a) 漁業の生産性向上

- 沿岸漁業では、海上のスマートブイや、リアルタイム潮流計などからのデータにより、遠隔で定置網に入る魚の状況を把握することが可能になる。これらの情報をもとに、7 日先までの漁海の状況などを予測し、スマホなどで漁業者に情報提供することにより、出漁の判断や獲りたい魚の選択的な漁獲に活用することが可能となる。
- 沖合・遠洋漁業では、人工衛星からの海水温等のデータと漁獲データを使って、AI で分析することにより、漁場形成の予測を行うなどの取り組みが進められている。また、カツオ漁船への一本釣り自動釣り機を導入した実証などが進められている。

#### b) 養殖業の生産性向上

- ICT 技術を活用した自動給餌システムの導入により遠隔操作で最適な給餌量の管理を行うほか、IoT や水中ドローンのカメラを活用した養殖場の見える化を図るなどの取組が進められている。

#### 4.10.1.2 期待する将来像 [3]

- Beyond 5G のように技術進化するにつれて、5G の三大特徴である、(1)超高速・大容量、(2)超低遅延、(3) 超多数同時接続、をさらに生かすことで、「スマート農業」や「スマート水産業」が加速化されることが期待され、さらに CO<sub>2</sub> 対策を含めた環境問題対策、自然災害対策システムなど他業界との連携なども期待される。
- 「スマート農業」や「スマート水産業」において、ロボット、AI、IoT 等の先端技術を活用したリアルタイムでの遠隔モニタリング、遠隔指導・支援、農機や漁船等の遠隔監視等のため、Beyond 5G を活用することで、作業の自動化、データの活用などを通じた生産性向上効果がさらに高まることが期待される。
- 具体的には、農場や牧場といったリアルな世界が、サイバー空間上に CPS (Cyber Physical



Systems) によりマッピングされ、前述のように、農場でのトラクターの自動運転が、サイバー空間から、監視や制御が可能となる。

#### 4.10.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 農場における自動運転トラクターや田植機などの自動運転のためには、走行速度や障害物認識の観点から、自動車の自動運転のレベルまでは必要ないと考えられるが、同程度の通信性能が要求され、Beyond 5G はこれらの要求条件を満たす技術として期待される。
- ドローンを使った農薬の空中散布のように、超低遅延の制御が要求される活用例の場合は、ローカル Beyond 5G 技術と、エッジコンピューティング技術などを組み合わせることにより、より高速で安定したドローンの飛行制御が可能となる。
- 圃場に張り巡らせた、温度センサー、湿度センサー、雨量計などの様々なセンサーからのデータが、LPWA (Low Power Wide Area)などの IoT 技術や Beyond 5G 技術を組み合わせることによって収集され、サイバー空間上で管理され、農業経営などに生かされる。
- これらのデータは、AI 技術を使って、様々な角度から分析することにより、収穫量を最大化するために、圃場への自動給水／排水や、ビニールハウスの自動開閉、農薬散布の時期の把握など、農作業全体の管理に役立てることができる。
- 最新の AR/VR 技術を使って、Beyond 5G を通じて利活用することにより、遠隔地での農業指導や支援なども可能になり、耕作放棄地域などや、海外の農場などで、新たに農業を始める場合や農業支援することなどにも利用することが考えられる。
- 海上に浮いたスマートブイやリアルタイム潮流計などからのデータにより、定置網にかかる漁獲量や魚の種類が把握でき、AI 技術を使うことによって将来の漁場予測なども可能になる。
- 水中ドローンなどからの映像情報により、魚の種類を正確に識別することは、現状で、画像の解像度の関係で難しいが、今後、通信容量の拡大により、認識精度が向上することが期待される。
- このように、「スマート農業」や「スマート水産業」における、Beyond 5G の活用は、生産性のさらなる向上のみならず、過疎地域における生活環境の改善による定住促進などコミュニティの維持、活性化につながることも期待される。
- 今後、農業（農村）や水産業（漁村）などにおける Beyond 5G の活用に当たっては、その利用環境の整備状況や導入コストも念頭に置いて、ローカル Beyond 5G を含めた、現場の活用例をさらに具体化していくことが重要である。

Beyond 5G の技術進化と業界の進化を図 4.10-1 に示す。



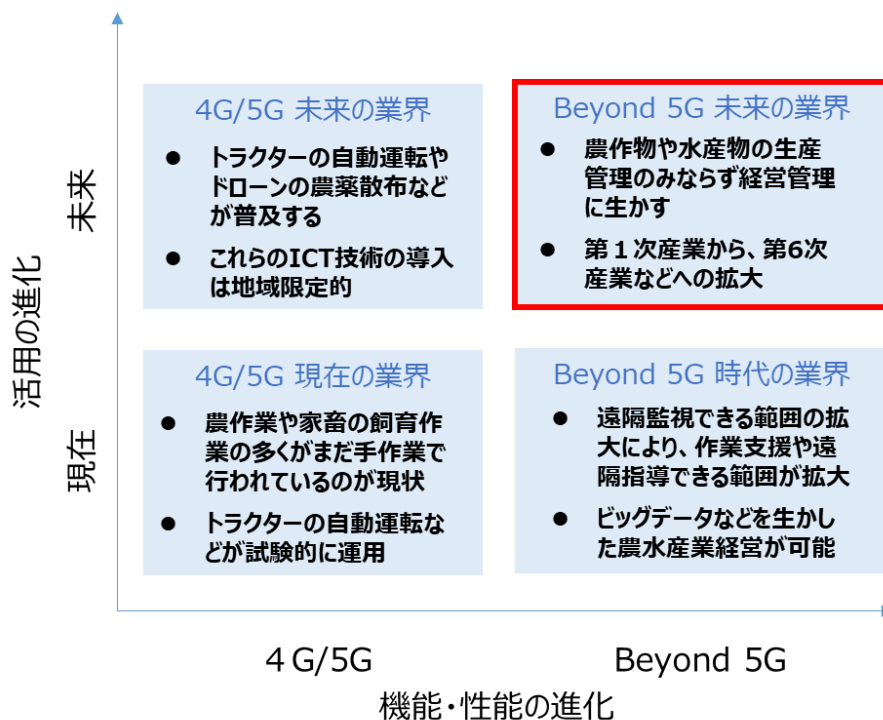


図 4.10-1 Beyond 5G における農業／水産業

#### 4.10.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

スマート農業やスマート水産業における、現在や未来の各種活用例から想定し、Beyond5G に求められる Capability として、以下に示すものが考えられる。

- 自動運転トラクターや自動田植機などの農機の遠隔監視や自動運転のためには、走行速度や障害物認識の観点から、自動車の自動運転レベルまでの性能要件は必要ないと考えられるものの、同程度の通信性能が要求されるものと考えられる。これらの技術に関する Beyond 5G の Capability としては、超低遅延、測位・センシングが関係すると考えられる。
- 畜産業における、牛舎の遠隔モニタリング技術に関しては、牛の位置を特定するとともに、牛の映像をリアルタイム伝送するために、Beyond 5G の Capability としては、超高速・大容量や、場合によっては電波が届きにくい場所も想定されることから、カバレッジ拡張も必要となるかも知れない。
- スマート水産業における、沿岸漁業では、海上のスマートブイやリアルタイム潮流計などから、定置網に入る魚の状況を遠隔から把握することが必要なため、Beyond 5G の Capability としては、スマートブイや潮流計は超多数同時接続される可能性があり、遠隔の海上に設置するため、超低消費電力である必要がある。また、スマートブイや潮流計の位置が把握できる必要があり、測位・センシング機能が必要となり、さらに、電波が届きにくい場所も想定されるために、カバレッジ拡張も必要になることが想定される。
- 一方、スマート水産業における養殖業においては、水中ドローンを使って、養殖場所の見える化を図る必要があるため、Beyond 5G の Capability としては、水中ドローンは多数接続する可能性

があるため、超多数同時接続、機器が故障しないための、超安全・信頼性、また、遠隔で長時間動作するために、超低消費電力及び、場所の特定も必要であるため、測位・センシング、さらに電波が届きにくい可能性もあり、カバレッジ拡張などの Capability が重要となるであろう。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.10-1 に示す。

表 4.10-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
農機の遠隔監視 (トラクター等)		○					○			
遠隔モニタリング	○							○		
スマートブイ・リアルタイム潮流計			○		○		○	○		
水中ドローン			○	○	○		○	○		

#### 4.10.1.5 まとめ

本節では、農業や畜産業、水産業の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、超低消費電力、測位・センシング、カバレッジ拡張などが考えられる。

#### 参考資料

- [1] 農林水産省. “スマート農業の展開について”.  
[https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/pdf/smart\\_agri\\_tenkai.pdf](https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/pdf/smart_agri_tenkai.pdf)
- [2] 総務省. 令和 2 年度版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/index.html>
- [3] 水産庁, “スマート水産業の展開について”.  
<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/smart/attach/pdf/index-3.pdf>
- [4] NICT, Beyond 5G/6G ホワイトペーパー-2.0 版. 2022 年 3 月公開.  
[https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v2\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v2_0.pdf)

## 4.10.2 食品業

### 4.10.2.1 現状と課題

#### ● 食品の生産業種による分類

日常生活においては、「食品」と一言で言っても、多種・多様なものがある。ここでは、当該食品が生産された業種から分類するものとする。例えば、お米は農業による一次産品である。また、パックに入った切り餅は、もち米を食品加工工場などで、加工したものであり、二次産品とする。また、食品は、農業からだけでなく、畜産業や、水産業からも産出されるため、それぞれの業界につき、一次産品、二次産品として下記の表のとおり分類する。

表 4.10-2 食品の生産業種による分類

	農業	畜産業（養鶏含む）	水産業
一次産品	穀物、野菜、キノコ類、果物、豆類など	牛肉、豚肉、鶏肉など	魚、貝、海藻など
二次産品	切り餅パック、冷凍野菜、トマト缶、豆腐、納豆、食パン、麺類 など	ハム・ソーセージ、ベーコン、焼き豚 など	さば缶、ツナ缶、貝の缶詰、干物類、海苔 など

- 一次産品としての食品は、おもに農業、畜産業（養鶏含む）や水産業などの、第一次産業からの産物である。これは、前節（4.10.1）で示した、現状と課題があり、5Gや今後のBeyond 5Gの導入によって、さらなる生産性の向上などが期待される。
- 一方で、二次産品としての食品は、その多くが、食品加工工場などからの産物である。これは、製造業の一種であり、特に食品加工のスマート工場などが該当し、ここでは、一般的な製造業（特に食品加工）の現状と課題や、5GやBeyond 5Gの導入による期待などについて以下に考察する。

#### ● 製造業（特に食品加工）が抱える課題 [1]

- 昨今の少子・高齢化に伴い、製造業においても、就業者数が年々減少傾向にあり、製造業における国内生産性は減少傾向が止まらない状況である。
- こうした就業者数の減少や生産年齢の高齢化等による労働生産性の低下に対し、製造業では、従前より生産性を高める取組を行ってきたところであるが、更なる生産性向上が求められている。
- 特に、食品加工工場の生産現場では、商品（食品）の品質を確保することや、機械異常などによる、生産ラインの停止を回避するなど、安定した生産ラインの稼働が求められている。

#### ● ICT 活用に係る取組

- 近年、ICT を活用したプロダクト・イノベーション、プロセス・イノベーション、マーケット・イノベーション等を通じ、限られた資源内での生産性の向上や新たな生産方式に資する取組が行われている。特に、IoT や AI を活用し、あらゆる設備の稼働状況や作業者の行動をリアルタイムに把握する取組などが活発化している。

表 4.10-3 製造業における ICT を活用した取組

	ICTを活用した取組み内容
プロダクト・イノベーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビッグデータ、AI、ロボット活用による生産革新に基づくカスタム製品化</li> <li>IoT活用による自社製品の遠隔での稼働状況把握や新製品の提案など製品のサービス化</li> </ul>
プロセス・イノベーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボット活用、遠隔操作・制御などによる生産工程の高効率化</li> <li>IoT導入などのセンシングによる生産管理や作業誘導などの作業ミス削減</li> </ul>
マーケット・イノベーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビッグデータ、AIの活用による分析とフィードバックなどのマーケティング情報収集・分析</li> </ul>

(出典) 総務省 (2020) 「第五世代移動通信システムのもたらす経済及び社会の変革に関する調査研究」

## ● 製造業(食品加工業)の取組み[2]

### a) 工場内のモニタリング [3]

- 工場内に設置された高精細カメラからの映像を、5G を利用して超高速かつ超低遅延で伝送することで、リアルタイムでの設備や機器の状態監視を行うことができる。
- 従来、IoT の導入により稼働状況をデータ計測することで、工場内の「見える化」が行われているが、さらに人の動作等を含むカメラ映像という付加情報により、見える化が進む。
- 5G が有する超高速・大容量の特長によって、4K・8K 等のより高精細な映像を伝送することで、より正確かつ精緻なモニタリングが可能となる。超低遅延の特長によりフィードバック制御の精度を上げることが可能となる。
- AI 技術を活用した解析を行うことで、作業員の作業効率化のみならず、製造ラインによっては商品のキズや加工のムラを自動検知することも実現可能となる。
- 工場の現場に、より近い場所で、エッジコンピューティングを利用することによって、5G の超低遅延性を発揮することで、よりリアルタイムに検知を行い、即座にフィードバックすることも可能となる。

### b) 作業支援 [4]

- 工場内の製造ラインにおいて、作業内容に応じて、PC やタブレット、VR/AR 技術等を活用して、5G を介して、人と生産システムのインタラクションにおける支援を行う。
- 例えば、AR ゴーグルを使いながら補充情報を用いて作業を円滑に行ったり、遠隔での指導やコミュニケーション等にも応用したりすることができる。
- 既存方式 (Wi-Fi 等) では速度や遅延等の性能が不足するため、5G の特長を活かしてレスポンスを高めたシステムを導入することで、作業支援や品質改善にも活用できる。

### c) 設備等の自動化 [5]

- 工場では、生産工程の自動化 (自動制御等) やモニタリング・最適化等を目指すファクトリーオートメーション (FA) 技術や、製造プロセスの合理化やエネルギー消費の低減、安全性の確保といった側面から FA とは別の形態で進化してきたプロセスオートメーション (PA) 技術が進化している。

- これらの FA や PA 技術において、5G の特長を活かしワイヤレス化することで、例えば IoT 技術による生産ラインからの大量のデータ収集や、生産設備のリアルタイムでの遠隔制御などが実現できる。
- 既存技術（Wi-Fi 等）では、精度や遅延等においてクリティカルな領域には FA や PA 技術が適用できなかったところ、5G の性能では、適用可能となる場合がある。
- さらに、生産設備に組み込まれているロボット等の関連装置により近い「エッジ」において、通信と連携しながら、エッジコンピューティングを行うことで、工場内での高い性能要件に対応することが可能となる。
- 工場内ではプライベート網であるローカル 5G、工場間や企業間の連携には公衆網の 5G を適用するハイブリッド 5G を活用することで、工場内の多数の無人搬送車をよりスマートに動かす他、ハイブリッド 5G により、工場内の情報と公衆網の情報をつなげることで、サプライチェーン全体を最適化し、需要変動にフレキシブルに対応するなどの、スマート生産の実現が期待できる

#### 4.10.2.2 期待する将来像[6]

- Beyond 5G のように技術進化するにつれて、5G の特徴である、(1)超高速・大容量、(2)超低遅延、(3) 超多数同時接続、をさらに生かすことで、スマート工場（食品加工）が加速化することにより、生産性向上効果がさらに高まることが期待され、さらに CO<sub>2</sub> 対策を含めた環境問題対策も進むことが期待される。
- Beyond 5G によって、工場のワイヤレス化がさらにステージアップすることにより、多数の設備を同時に映像でモニタリングすることによるメンテナンス性の向上に加え、生産ラインからのデータの収集や分析が容易となり、稼働率や生産性の向上に寄与することが期待される。
- 具体的には、生産ラインといったリアルな世界が、サイバー空間上に CPS（Cyber Physical System）によりマッピングされ、生産ラインや作業員の動きなどの監視や制御が可能となる。

#### 4.10.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 生産ラインの安定稼働のための振動解析など、超高速かつ低遅延でのデータ分析が要求される部分については、エッジコンピューティング技術などが利用される。
- 工場内に張られたセンサーやシーケンサーからのデータを、LPWA（Low Power Wide Area）などの IoT 技術や工場内ローカル Beyond 5G によって収集され、サイバー空間上で管理され、生産管理などに生かされる。
- FA や PA 導入のため、設備等の自動化を進める際には、生産ラインの設備などを、時間の誤差が非常に少なく制御できる、TSN（Time-Sensitive Network）技術などが重要となる。これらの技術を Beyond 5G と組み合わせることにより、生産性の向上が期待される。
- 最新の AR/VR 技術を使って、ローカル Beyond 5G を通して利用することにより、遠隔地での技術指導や作業支援なども可能になると考えられる。
- このように、スマート工場（食品加工）における、Beyond 5G の活用は、食品の生産性のさらなる向上のみならず、製造工程における材料の在庫管理や、生産物である加工食品の在庫管理に

活用でき、AI やビッグデータなどを組み合わせることによって、小売店舗への流通管理、マーケティングにまで応用することが可能になると考えられる。

- 例えば、昨今、社会問題にもなっている「食品ロス」についても、Beyond 5G 技術を利用して、食品販売店で在庫状況を逐次管理し、閉店近くになれば、食品が売れなく余っている店舗から、売り切れで足りない店舗への食品の物流を行うことや、その日の天候や気温、人流などから、食品ロスを最小化するために、翌日の最適な生産量を決めるなどの応用も考えられる。

Beyond 5G の技術進化と業界の進化を図 4.10-2 に示す。

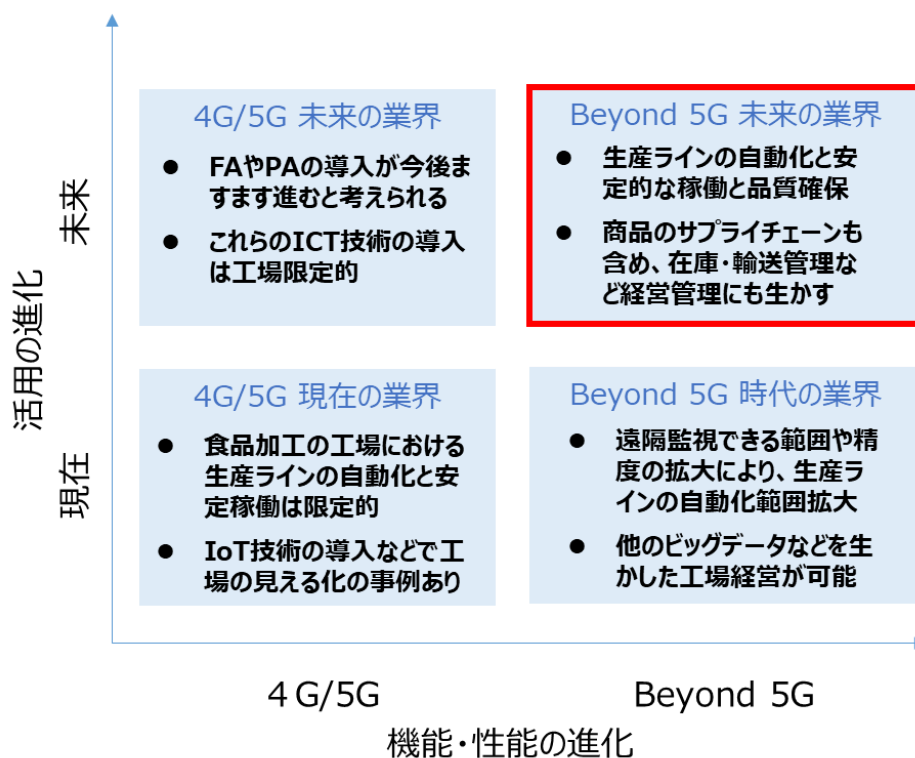


図 4.10-2 Beyond 5G における食品加工産業

#### 4.10.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

食品業、特に食品加工の製造業などのスマート工場における、現在や未来の各種活用例から想定し、Beyond 5G に求められる Capability として、以下に示すものが考えられる。

- 工場内において、リアルタイムで設備や機器の状態監視を行う場合、高精度のカメラからの映像を利用することが想定される。この場合に、Beyond 5G の Capability としては、大量の画像情報の通信が必要なことから、超高速・大容量、超低遅延が必要となる。また、これらのカメラは、工場内のいたるところで長時間動作する必要があることから、超低消費電力が必要となる。さらに、工場内のどこに当該設備や機器があるかを把握するために、測位・センシング機能も必要であると考えられ



る。

- 工場内の製造ラインにおいて、PC やタブレット、VR/AR 技術等を活用して、作業支援を行う場合、AR/VR のための、画像情報を、超高速・大容量でまた超低遅延で通信する必要がある。さらに、AR/VR に用いるグラスは、超低消費電力である必要があり、作業支援対象の設備や機器の位置情報を的確に把握する必要があることから、測位・センシングの機能も重要になるものと考えられる。
- スマート工場では、生産工程の自動化や、モニタリング・最適化などを目指すファクトリーオートメーション(FA)や、製造プロセスの合理化やエネルギー消費の低減などを旨とするプロセスオートメーション(PA)などを進める必要がある。このため、Beyond 5G の Capability としては、モニタリングなどのために、超高速・大容量、超低遅延が必要となる。また、生産ラインや機器の制御のため、時刻同期精度や、長時間運転のため超低消費電力も必要となる。さらに、機器の位置情報把握のために、測位・センシングも必要となると考えられる。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.10-4 示す。

表 4.10-4 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
工場内監視 (高精度カメラ)	○	○			○		○			
作業支援 (AR/VRによる)	○	○			○		○			
設備等の自動化 (FA/PA等)	○	○			○	○	○			

#### 4.10.2.5 まとめ

本節では、食品業、特に製造業としての食品加工産業の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、時刻同期精度、測位・センシングなどが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省統計局, 平成 30 年労働力調査年報。  
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/report/2018/index.html>
- [2] 総務省, 令和 2 年度版情報通信白書。  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/index.html>
- [3] MONOist, “工場での 5G 活用実証へ、カメラやセンサーからリアルタイムでデータ収集”。  
<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1912/05/news028.html>
- [4] オムロン, “NTT ドコモ、ノキア、オムロン、製造現場における 5G 活用実証実験に合意”。  
<https://www.omron.co.jp/press/2019/09/c0910.html>
- [5] 三菱電機, “三菱電機と NEC が製造業における 5G 活用に向けた共同検証を開始”。



<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2019/1119.pdf>

[6] NICT, Beyond 5G/6G ホワイトペーパー-2.0 版. 2022 年 3 月公開.

[https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v2\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v2_0.pdf)

### 4.10.3 生活・文化用品関連

#### 4.10.3.1 現状と課題

##### ● 生活・文化用品関連の分類

- 生活・文化用品とは、主に家庭で消費や利用される食品以外の物品が該当し、総務省の日本標準商品分類（平成2年6月改定）[1]によれば、以下で示すものが含まれている。
- これらの多くは、工業製品であり、製造業による産物となり、製造業の中でも、食料品製造業以外の、繊維工業、化学工業、家具・装備品製造業などが関係する。
- このため、前節（4.10.2）で示した、食品加工のスマート工場以外の製造業の現状と課題や、5GやBeyond 5Gの導入による期待などについて以下に考察する。

表 4.10-5 生活・文化用品の分類

分類	項目
生活・文化用品	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 台所用品及び食卓用品（銀器、銀めっき品及び類似金属品を除く。）</li><li>・ 衣服（履物及び身の回り品を除く。）</li><li>・ 身の回り品</li><li>・ 履物</li><li>・ 装身具、身辺細貨品及び銀器</li><li>・ 家庭用繊維製品</li><li>・ 家具</li><li>・ 冷暖房用、食品調理用器具及び装置（主熱源に電気を使用しない）並びに衛生設備用品</li><li>・ その他の住生活用品</li><li>・ 医療用品及び関連製品</li><li>・ 医薬品及び関連製品</li><li>・ 化粧品、歯みがき、石けん、家庭用合成洗剤及び家庭用化学製品</li><li>・ 娯楽装置及びがん具</li><li>・ 楽器</li><li>・ スポーツ用具（靴及びユニホームを除く。）</li><li>・ 印刷物、フィルム、レコード及びその他の記録物（プログラムを除く。）</li><li>・ 文具、紙製品、事務用具及び写真用品</li><li>・ 美術品、収集品及び骨とう品</li><li>・ その他の生活・文化用品</li></ul>

##### ● 課題

- 当該製造業においても、昨今の少子・高齢化に伴い、就業者数が年々減少傾向にあり、製造業における国内生産性は減少傾向が止まらない状況である。
- こうした就業者数の減少や生産年齢の高齢化等による労働生産性の低下に対し、当該製造業でも、更なる生産性向上が求められている。
- 特に、衣類などの生産現場では、個人のサイズや趣向にあったものが求められる場合があり、少量多品種の商品を短時間で生産することなどが求められている。

##### ● ICT 活用に係る取組

- 4.10.2 節と同様に、当該製造業においては、ICTを活用したプロダクト・イノベーション、プロセス・イノベーション、マーケット・イノベーション等を通じ、限られた資源内での生産性の向上や新たな生産方式に資する取組が行われている。

- 特に、近年では AI を活用し、顧客の様々なニーズに対応して、少量多品種の生産への取組も活発化している。

#### ● 生活・文化用品製造業における取組み [2]

前節（4.10.2）で示した通り、当該製造業では 5G を使った工場のモニタリング、AR/VR による作業支援、FA や PA 技術において、5G の特徴を生かした設備等の自動化や、工場内のローカル 5G と工場間や企業間での公衆網としての 5G 利用を組み合わせたハイブリッド 5G などの取組みが既に具体化している。

- ・ 工場内のモニタリング
- ・ 作業支援
- ・ 設備等の自動化

#### 4.10.3.2 期待する将来像[3]

- Beyond 5G のように技術進化するにつれて、5G の特徴である、(1)超高速・大容量、(2)超低遅延、(3)超多数同時接続、をさらに生かすことで、スマート工場が加速化することで、生産性向上効果がさらに高まることが期待され、さらに CO<sub>2</sub> 対策を含めた環境問題対策も進むことが期待される。
- Beyond 5G によって、工場のワイヤレス化がさらにステージアップすることにより、多数の設備を同時に映像でモニタリングすることによるメンテナンス性の向上に加え、生産ラインからのデータの収集や分析が容易となり、稼働率や生産性の向上に寄与することが期待される。
- 具体的には、生産ラインといったリアルな世界が、サイバー空間上に CPS（Cyber Physical System）によりマッピングされ、生産ラインや作業員の動きなどの監視や制御が可能となる。

#### 4.10.3.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 生産ラインの安定稼働のための振動解析など、超高速かつ低遅延でのデータ分析が要求される部分については、エッジコンピューティング技術などが利用される。
- 工場内に張られたセンサーやシーケンサーからのデータを、LPWA(Low Power Wide Area)などの IoT 技術や工場内ローカル Beyond 5G によって収集され、サイバー空間上で管理され、生産管理などに生かされる。
- FA や PA 導入のため、設備等の自動化を進める際には、生産ラインの設備などを、時間の誤差が非常に少なく制御できる、TSN（Time-Sensitive Network）技術などが重要となる。これらの技術を Beyond 5G と組み合わせることにより、生産性の向上が期待される。

最新の AR/VR 技術を使って、ローカル Beyond 5G を通して利用することにより、遠隔地での技術指導や作業支援なども可能になると考えられる。

このように、スマート工場における、Beyond 5G の活用は、生活関連用品の生産性のさらなる向上のみならず、製造工程における材料の在庫管理や、生産物である商品の在庫管理に活用でき、

AI やビッグデータなどを組み合わせることによって、小売店舗への流通管理、マーケティングにまで応用することが可能になると考えられる。

Beyond 5G の技術進化と業界の進化を図 4.10-3 に示す。

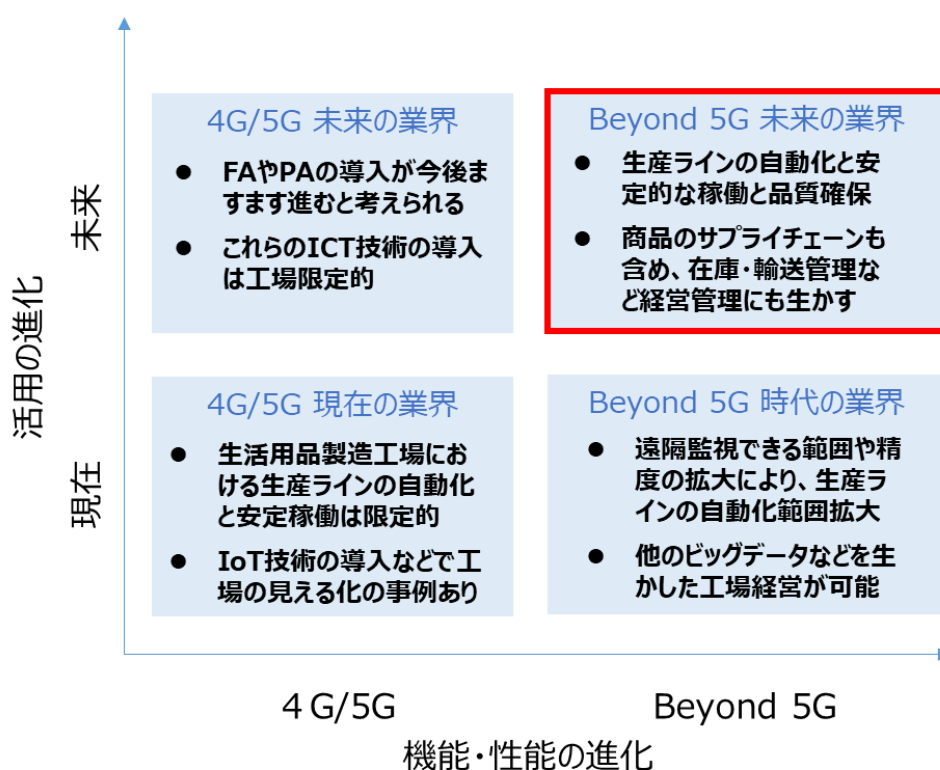


図 4.10-3 Beyond 5G における生活・文化用品製造業

#### 4.10.3.4 Beyond 5G に求められる Capability

生活・文化用品の製造業などのスマート工場における、現在や未来の各種活用例から想定し、Beyond 5G に求められる Capability として、以下に示すものが考えられる。

- 工場内において、リアルタイムで設備や機器の状態監視を行う場合、高精度のカメラからの映像を利用することが想定される。このため前節と同様に、Beyond 5G の Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、測位・センシングなどが必要であると考えられる。
- 工場内の製造ラインにおいて、PC やタブレット、VR/AR 技術等を活用して、作業支援を行う場合、前節と同様に、Beyond 5G の Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、測位・センシングなどが必要であると考えられる。
- スマート工場において、ファクトリーオートメーション(FA)やプロセスオートメーション(PA)などを進める場合、前節と同様に、Beyond 5G の Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、時刻同期精度、測位・センシングなどが必要であると考えられる。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.10-6 に示す。

表 4.10-6 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
工場内監視 (高精度カメラ)	○	○			○		○			
作業支援 (AR/VRによる)	○	○			○		○	○		
設備等の自動化 (FA/PA等)	○	○			○	○	○	○		

#### 4.10.3.5 まとめ

本節では、生活・文化用品関連産業、特に製造業としての現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、時刻同期精度、測位・センシングなどが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 統計基準・統計分類, 日本標準商品分類 (平成 2 年 6 月改定) .  
[https://www.soumu.go.jp/toukei\\_toukatsu/index/seido/syohin/2index.htm](https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/syohin/2index.htm)
- [2] 総務省, 令和 2 年度版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/index.html>
- [3] NICT, Beyond 5G/6G ホワイトペーパー-2.0 版. 2022 年 3 月公開.  
[https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v2\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v2_0.pdf)

## 4.11 小売・卸・流通分野

小売・卸・流通分野では、下記の通り非常に幅広い業界が存在している。

小売業、卸売業、食品卸、衣料品卸、水産卸、百貨店、スーパーストア、コンビニエンスストア、調剤薬局、家電量販店、ホームセンター、ディスカウントストア、書店、スポーツ用品店、リサイクルストア、カー用品店等。また、輸出入貿易と国内における物資の販売を中心に、幅広い商品・サービスを取り扱う総合商社と特定の分野に特化した専門商社がある。一方、商品そのものは同じもの（同じ様なもの）を取り扱い販売方式が違う、通信販売、アウトレット等も大きな市場を形成している。さらに、多くの分野・業種で取り扱う商品のインターネットを通じて購入できるネット販売は直接販売と対照的に現在非常に大きな市場に成長をしている。

### 4.11.1 現状と課題

現在の小売・卸・流通分野における課題としては、主として以下の点が挙げられる。

- 商品が売れない（時代と共に変化する消費者ニーズ）
  - 商品・モノが簡単に売れなくなっている。これは、品質が高い商品や類似の価格の安い商品が、あらゆるジャンルの商品で改良が繰り返し行われ、新商品が次々開発、販売されていることが原因に挙げられる。また、品質が高くなるということは、一度買うと長く使用することができるために、消費者は頻繁に商品・モノを買い換える必要がなく、ひとつのモノを長く使い続けるのが一般化してきている。
  - トレンドの移り変わりの速さも原因の一つとなっている。インターネットの定着によって、製品・モノの購入者である消費者が収集できる情報量が急増している。消費者はトレンドに敏感な反応を示し、流行のサイクルがどんどん短くなり人気商品もすぐに変化する現象もでてきている。
  - 時代と共に変わっていくニーズに応えられるかが重要な経営課題になっている。現在、製品・モノの購入をして所有していた時代から「共有」が当たり前になってきている。消費者が高い買い物をするこへの不安がインターネット上で製品・モノだけではなく優れたサービスを比較的安価に共有する傾向が強まっている。サブスクリプション型のサービスはその代表例で、定額制によって、提供されるサービスを使い放題に利用するという形態である。
  
- ネットショッピング、EC サイト等のインターネット利用の購買
  - 欧米、中国等と同様にネットショップや EC サイトの成長率が高まっている。日本の小売業界でもインターネットで顧客を集め商品・モノを紹介して販売をしていく動きが強くなってきている。
  - 製品・モノの購入タイミングの変化によるリアル店舗のショールーム化による絶対購入動機への対応が難しくなっている。これはリアル店舗には集客できても実際の購入は、同じものより安く販売しているサイトを探し、購入するために他社に顧客を奪われる可能性がある。

- SDGs への取り組み

- 脱プラ・レジ袋

日本全国で使われているレジ袋は年間で 305 億枚、一人当たり約 300 枚のレジ袋を使っている。この 305 億枚のレジ袋を作るためには原油が 42 万キロリットル必要になる。[1]

- フェアトレード

主に小売店において生産者が人間らしく暮らし、より良い暮らしを目指すために、正当な値段で作られたものを売り買いすることである。安い商品は、作る過程で環境破壊や人権を無視した労働により製品が作られている可能性がある。フェアトレードマークのついた商品やその意味を消費者に伝えることで消費者も購買を通じた SDGs・社会貢献を行うことができる。

- フードロス

食品の多種多量な販売により店舗においても消費者においても、まだ食べることができる食品を捨てられてしまうことが大きな社会問題となっている。また、賞味期限切れ、消費期限切れ等も同様に大量な食品が捨てられることがある。

- サプライチェーンでの様々な課題

小売・卸・流通業は、そのサプライチェーンによる製品・モノの製造から卸、流通、販売へと連携される。例えば、出荷される製品・モノは小売業だけではなくスーパーやコンビニ等多くの業種で配送が行われる。そのために、脱炭素・カーボンニュートラルへの対応がサプライチェーンの運輸業で重要な課題となっている。

上記のような課題に加え新型コロナウイルスにより、小売業界の働き方も大きく変化している。同じ小売業界の中であっても、業態によって with コロナ、after コロナの環境適応に向けて様々な取り組みを行っている。日用品を販売するスーパーマーケットやドラッグストアは、with コロナの生活様式の中でいかにして 3 密対策を行い、消費者と従業員を守っていくかが重要になっている。このような観点からも、引き続き省人化、ICT と人工知能 AI を活用した DX 化推進が急務になっている。

#### 4.11.2 期待する将来像

現状の課題に対し ICT を活用することで課題の解決を行ってきた。このような、取り組みでの新たな通信技術を活用した将来への期待は非常に多岐に渡るものになると思われるが、ここでは Society5.0 実現に向けて期待される以下の項目に沿って述べるものとする。

- 高齢化社会による過疎化および業界の縮小化とその対策

日本全国、地方都市では高齢化の過疎化が急激に進んでいく。そのために、小売業等の商売が成り立たなくなり、商店・スーパー・ドラッグストア等の生活に必要な店の経営が成り立たなくなると考えられる。



- 人口減少での地域格差をもたらす生活環境の影響とその対策  
人口減少が生じる地域間の格差をデジタル田園都市国家構想[2]の実現によりどの地域で生活していても首都圏・都会の利便性と同様な生活環境が得られ地方の自然の豊かさを生かした地域社会の確立を目指す。
- 業界の持続的発展のためのデータ流通と連携  
ハイパージャイアント等が日本市場でインターネット経由での商品・モノの販売に対応するために、また、様々な社会課題を解決していくために個々の業界単独での経営だけではなく、他社との連携、業界間での連携による商品・モノの販売から社会・地域密着型のサービスを展開するためにデータ連携・流通の基盤を構築する。
- 業界の社会基盤形成に関わる社会実装モデルへの寄与  
生活に大きく関与している業界においては、個人のレベルからコミュニティ・地域レベルでなくてはならない存在となり、それが将来の社会基盤形成に関わる業界の社会実装モデルとして成長していくことを推進していく。
- SDGs への業界貢献  
製品・モノの製造の前の第一次産業からの関与と製造、出荷、配送、物流へ製品・モノを販売する前、製品・モノの販売、販売後のフードロス、廃棄等の削減等、非常に多くの対処・対応による業界による貢献が考えられる。特に、カーボンニュートラル[3]の対応については、サプライチェーンに関連する業種が多いため次世代ネットワークと人工知能等の先進技術を活用する必要がある。  
例えば、日本国内のコンビニエンスストア全店舗への商品の配送を行う際の物流（トラック等）の1日あたりのCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現するために、自社・自社以外の温室効果ガス排出量の把握と削減のための対応を行う。[4]

#### 4.11.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 従来からの販売に関する ICT 活用
  - リアル店舗からネット・EC 等のバーチャル店舗への転換
  - 精密で高度な販売予測に基づいた製品の入荷、在庫、販売
  - 製品・モノの正確な入荷のための配送手配
  - サプライチェーンの拡充のためのシステム連携
  - 慢性的な人手不足に対する陳列ロボット活用
  - 長時間就業に対する最適化
  - レジ会計、発注業務、棚卸業務、シフト作成、販売促進等の高度化

- 新型コロナウイルスによる ICT 活用
  - 顧客の導線管理・分析（入店時、自動検温含む）
  - IoT 技術による密回避
  - ネットスーパーの拡充
  - シェアリング型宅配サービス
  
- デジタル・サービスシフト
  - ソーシャルメディア等の対応
  - 新たな購入方式（インターネット・スマートフォン等）の対応
  - 商品・モノの物販に付加価値であるサービス（コト）の提供
  
- コンサンプションとシェアリング
  - 購入から消費（コンサンプション）での商品・モノの価値
  - 消費から共有（シェアリング）での商品・モノの価値

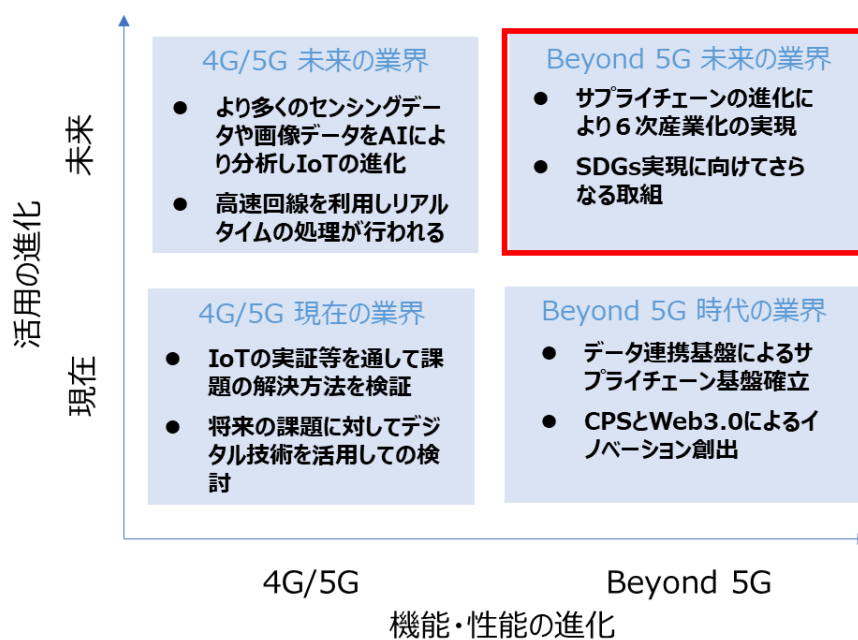


図 4.11-1 Beyond 5G における小売・卸・流通業界

#### 4.11.4 Beyond 5G に求められる Capability

上記のような小売・卸・流通業界を実現するために必要となるネットワークの Capability は、以下の通り。

- 超高速・大容量、超低遅延  
 自律性の高いドローンによる配送  
 映像・画像等の大量なメディア転送  
 無人店舗化（ホロボーターション・コンシェルジュ）  
 共同配送のためのデータ流通・連携（CO<sub>2</sub> 排出量削減）
- 超多数同時接続  
 地域全体の空間センシング  
 無人店舗化（製品・モノ）
- 超安全・信頼性  
 パーソナル情報  
 分野・企業間のデータ流通と連携  
 無人店舗（決済）
- 拡張性  
 省エネルギー化対策  
 環境配慮型配送車両  
 AGV（無人搬送車）  
 CPS（Cyber Physical System）・DTC（Digital Twin Computing）  
 都市 OS との連携

表 4.11-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
販売に関するICT活用	○	○	○	○	○		○		○	Trusted Data
新型コロナウイルスによるICT活用	○	○	○				○	○	○	Trusted Network
デジタルサービスシフト		○		○			○			Trusted Network Data
コンセンションとシェアリング				○			○	○	○	Trusted Network Data

#### 4.11.5 まとめ

本節では、小売・卸・流通業界の現状と課題を調査して、それら分野の期待する将来像および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる性能要件としては、前述の表で示した。要件は、活用例や実現するサービスにより、単体としての要求、複数の組み合わせた形での要求または、ク

クラウドを中心としたアプリケーションシステムとの連携（Beyond 5G/MEC のような）が重要になる。

一方、業界の発展には、データの利活用が非常に重要なテーマとなり、人工知能 AI を適用した DX 化が推進されていく。そのために、Beyond 5G での要件として Trusted Network や Trusted Data (Web) のような経済安全保障の一連の取り組みが重要になると思われる。[5]

#### 参考文献

- [1] 経済産業省, “なつく、知つく 3R”.  
[https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/nattokushitto\\_ku3r.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/nattokushitto_ku3r.pdf)
- [2] 内閣官房, デジタル田園都市国家構想実現会議.  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital\\_denen/index.html](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital_denen/index.html)
- [3] 環境省, “2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて”.  
[https://www.env.go.jp/earth/2050carbon\\_neutral.html](https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html)
- [4] 環境省, 経済産業省, “サプライチェーンを通じた音質効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン Ver2.1”, 2014 年 3 月.  
[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/comm\\_rep/gl201203v2-full.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm_rep/gl201203v2-full.pdf)
- [5] 内閣府 経済安全保障  
[https://www.cao.go.jp/keizai\\_anzen\\_hosho/index.html](https://www.cao.go.jp/keizai_anzen_hosho/index.html)

## 4.12 サービス・公共サービス・法人サービス

### 4.12.1 医療

医療・公衆衛生は社会保障の重要な構成要素の一つであり、医療従事者、医療制度、提供体制、医療技術に支えられることにより私たちは安全かつ高度な医療サービスを受診することができる。本節では、医療の現状と課題を勘案し期待する将来像を描くとともに Beyond 5G で実現が期待される活用例及び求められる要求条件について考える。

#### 4.12.1.1 現状と課題

少子高齢化や新型コロナウイルス感染症の流行など医療を取り巻く環境は変化しており、2030 年における状況は現在の状況から大きく変化することが予想される。その上で環境の変化に起因する問題や課題の発生が予見されており、日本政府は健康・医療戦略推進本部を設置して健康・医療戦略をとりまとめている[1]。このような背景の中、今後日本をはじめとする世界各国が直面すると考えられる医療分野の課題の中から 3 つを取り上げる。

##### 1. 超高齢化社会との共生

日本の高齢化率は 2020 年において 28.8%であり、先進地域（18.3%）や開発途上地域（7.4%）など諸外国と比べて高い水準である。一方、今後は先進地域に加えて開発途上地域においても高齢化が急速に進展し、2060 年には先進地域では 28.2%、開発途上地域では 16.4%に上昇すると見込まれている[2]。このように諸外国と比較して高い高齢化率である日本であるが、この先次の 4 つの課題に直面すると考えらえる。

一つ目は医療費の増大である。一人当たりの医療費は成人後に年齢とともに高くなり 65 歳以後に急激に増加する。二つ目は医療体制の不足であり、医療需要の増大に伴い医療福祉従事者の数は 2040 年には最大 1,070 万人に増加する見通しでありこれは全就業者の約 5 人に 1 人の割合となる[3]。三つ目は医療体制の地域的な偏在である。過疎地域では 65 歳以上の人口割合が 36.6%と高齢化が進んでおり無医地区の人口は増加している[4]。最後に四つ目は平均寿命と健康寿命の差の拡大である。2020 年簡易生命表によると日本人の平均寿命は男性が 81.64 歳、女性が 87.74 歳と年々延びているが、合わせて健康上の問題で日常生活が制限されることなく生活できる期間である健康寿命の延伸が重要となる[5]。

これらの課題にいち早く直面する事が想定される日本において、世界最高水準の技術を用いた医療の提供という健康・医療戦略の基本的理念のもと世界に先駆けて超高齢化社会との共生を果たし、世界に向けて課題・解決策を提示する役割が期待される。

##### 2. 未知の疾患への対応

2019 年 12 月に確認された新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は国際的な広がりを見せ、世界各国は感染症の蔓延を阻止すべく行動制限などの措置を取る事となった。これらの措置は、私たちの日常生活にも大きな変化をもたらした。感染症は紀元前から確認されており、中世ヨーロッパのペスト、

20 世紀初頭のインフルエンザの流行など、これまでに多くの死者を出してきた[6]。18 世紀以降、ワクチンや抗生物質の出現により感染症の予防や治療方法が大きく発展したものの、1970 年以降少なくとも 30 の新興感染症が発見されている。新型コロナウイルス感染症に対するワクチンが開発され、各国で接種が進むことにより新規感染者数が減少する兆しが見える一方、今後も未知の感染症が発生する可能性は高く、発生時の速やかな対応や解決するための体制を整えておくことが重要となる。具体的には、1. 病原体を早急に同定し、得られた情報（ゲノム情報など）を幅広く公開・共有可能なネットワークおよびデータベース、2. AI やロボットを利用することで、治療薬やワクチン等の医薬品をハイスループットに開発可能なプラットフォーム、3. 感度が高く、臨床現場で容易に使いこなせる診断ツール、といったプログラムをシームレスに展開できる体制の確保が不可欠である[7][8]。

### 3. 医薬品・医療機器開発テクノロジーの発展

医療分野の研究開発は世界的にも加速しており、更にデジタル技術の活用によりイノベーションの創出が期待される。日本における研究開発の課題として、基礎研究の成果が実用化に必ずしも結びつかない点が指摘されていたため、2015 年に日本医療研究開発機構（AMED：Japan Agency for Medical Research and Development）が設立され、厚生労働省、文部科学省、及び経済産業省で運用されていた医療分野の研究開発の一元化が進められている[9]。これにより基礎研究から実用化までの一貫した研究開発を推進する体制が構築され数多くの成果が報告されている。このように、今後成長が期待される知識集約産業である医薬品・医療機器産業に対して、日本としては組織的に取り組むことにより世界最高水準の医療技術の実現及び世界市場への展開や牽引が重要となる。さらに別の観点として、最先端の医療技術の導入に際して装置導入および通信を含めた運用に対する負担の整理も重要となる。

以上の様に、医療分野の国際的及び日本国内の背景を踏まえてこれから直面すると考えられる課題を取り上げたが、日本は社会課題を解決する先進国として課題解決に向けて業界の垣根を飛び越えて取り組むことが期待される。

#### **4.12.1.2 期待する将来像**

4.12.1.1 節で挙げた医療の現状と課題を踏まえて、私たちの生活をより豊かなものとするために、医療に期待する 5 つの将来像を描き、図 4.12-1 にまとめる。





図 4.12-1 期待する5つの医療の将来像

### 1. 身体機能の補助及び再現

加齢に伴う身体機能や知覚機能である五感（視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚）、運動感覚、平衡感覚などの機能の低下や身体機能の不自由さは日常生活に影響を及ぼし生活の質の低下、更には健康寿命への影響が懸念される。これに対する医療技術として、失われた身体機能を回復する再生医療の研究が進められており、例えば人工多能性幹細胞（iPS細胞）を用いた網膜疾患治療・血小板の自己輸血・免疫細胞療法などの治験が始まっている[15]。また、再生医療とは別の観点で、通信を活用したロボティクス、メカトロニクス、AI技術により、五感の一部機能を補助及び再現する技術も考えらえる。このように身体機能を補助及び再現することにより健康寿命が延伸された未来が期待される。



## 2. 未知の感染症へ即座の対応

未知の感染症が発見された際の速やかな対策実施の重要性を考慮すると、前述した対策実施のための体制やシステムの事前整備以外にも、例えば社会活動や健康状態のモニタリングの重要性が考えられる。モニタリングにおいては、接触機会低減のために位置情報に加えて感染状況や健康状態をリアルタイムで解析し、情報を提供するシステムを事前に構築する事などが考えられる。今後、未知の感染症が発見されても蔓延を抑制する対策やワクチン開発が速やかに実行され、私たちの生活への影響が最小限に留められる未来が期待される。

## 3. 医療技術開発

ICT (Information and Communication Technology) の発展は医療技術の発展に多大な貢献をしている。例えば、生物がもつ遺伝情報を総合的に解析するゲノム解析は膨大な情報量の処理が必要とされるため情報処理技術が活用されており、近い将来がんや難病が克服されることも期待される[16][17]。さらに通信基盤の拡張に伴うビッグデータの構築や AI の精度の向上により、サイバー空間に医療データベースを構築する事でデジタルツインを実現し、これを活用した最先端の医療技術の発展につながる事が期待される。

## 4. 超高齢化社会を支える医療・介護体制の構築

超高齢化社会の到来に伴い、身体の状態や医療の地域偏在により患者が病院に行けない事態が発生することが考えられる。このようなケースに対して ICT 技術の導入による解消が期待される。例えば、医療機関毎に保有する個人のカルテなど医療に関する履歴や情報を一元的に管理する PHR (Personal Healthcare Record) が挙げられる。近年、スマートフォンの普及やクラウドの発展に伴い、PHR を様々なサービスに活用することが可能となり、2016 年から日本研究医療開発機構では疾病や介護予防や医療と介護連携など、新しいサービスモデルが開発された。このように、医療技術に ICT 技術を導入することで、より個人の状況に応じた医療を受診できる未来が期待される。

## 5. 健康寿命の延伸

今後人間の寿命が延びるなか健康寿命の延伸が重要となる。健康寿命の延伸に向けて重要な要素の一つとして日々の健康管理が挙げられる。がんや糖尿病などの生活習慣病は日本人の死亡要因の 6 割を占めており[18]、日ごろからがんや糖尿病などの予防に向けた取り組みが重要である。合わせて定期的に健康状態を振り返ることも非常に重要となり、体の異変が発生した場合は早期に発見し対処することを心がける必要がある。また、別の観点として必要な治療の際に患者の身体への負担を低減させる低侵襲治療も重要な要素として挙げられる。高齢になるにつれて慢性疾患を抱える確率が高くなる一方、

手術などの治療によるリスクも高くなるため体への負担を最小限にする医療技術開発が必要となる。このように、日々の健康管理システムによる病気の防止や早期発見、更に身体に傷をつけない低侵襲医療が実現された未来が期待される。

#### 4.12.1.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

4.12.1.2 節で描いた未来の医療の実現に向けて、図 4.12-2 に示す通り将来の医療技術に Beyond 5G を活用する事で実現が期待される 8 つの活用例を紹介するとともに実現を支える医療技術、通信技術の Capability について考察する。

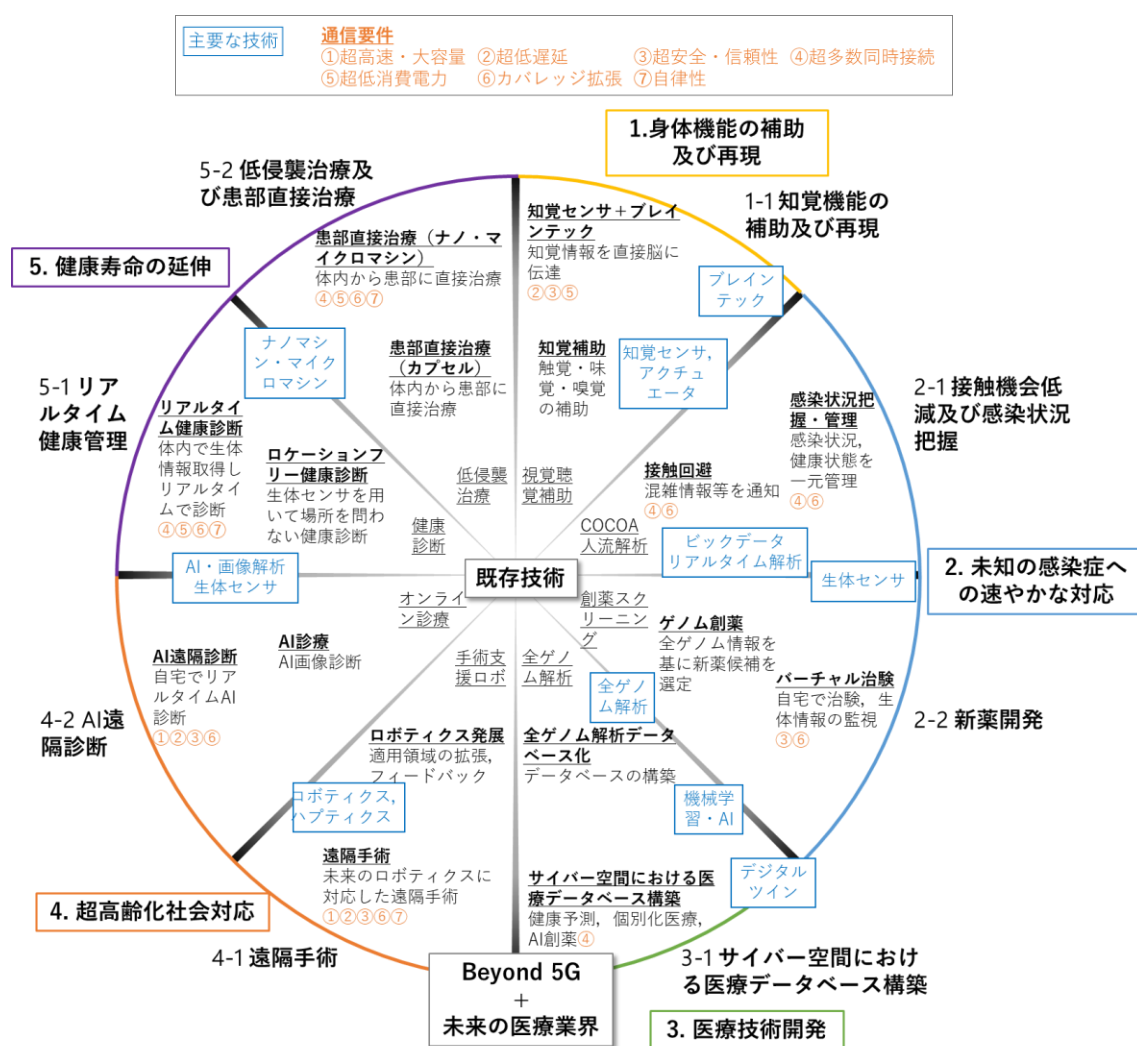


図 4.12-2 期待する将来像と実現を支える医療技術、通信技術の Capability

### 1-1. 知覚機能の補助及び再現

知覚機能を補助する医療器具として、私たちの身近なものとして視覚、聴覚を補助する眼鏡、補聴器などが挙げられる。更に将来の医療器具では、視覚、聴覚に限らず触覚、味覚、嗅覚の補再現が考えられる。実現を支える要素技術として、例えば触覚に関しては人工皮膚センサーの研究・開発が進められており、様々な皮膚感覚を検出し、適切な電気信号を発生するウェアラブルなデバイスが報告されている[19]。同時にセンサーでデジタル化された信号を人間に伝達する手段も必要となるが、例えば触覚の場合アクチュエータなどを用いて圧力を再現し人間に伝達することが考えられる。加えて、拡張現実（AR）/ 仮想現実（VR）技術に再現した触覚を加えてフィードバックさせるハプティクス技術によって視覚などの他の知覚機能との連携も実現できる可能性もある。

更に将来的には、伝達する手段として知覚情報を直接脳に伝える方法が考えられ、脳信号の読み取りもしくは脳へ刺激を与える技術としてブレイン・マシン・インターフェース（BMI : Brain-machine Interface）が研究されている[20]。BMIは米国では1970年代から積極的に研究が推進されているが、近年の神経科学、情報科学、工学技術の進展により急速に発展しており、2020年にはNeuralink社より頭部に埋め込んで神経細胞の活動を感知するコインサイズのデバイスが開発された。将来の医療器具として、知覚機能を再現する一つの形として、知覚センサーでデジタル化された知覚信号がBMIを用いて人間に伝達される構成が考えられる。ここで、各種知覚センサーとBMIを接続する通信技術は重要な役割を担い、知覚は身体への異常や危険を判断するために必要な機能であるため、超安全・信頼性、超低遅延が要求される。更に、データの送受信が常に発生する一方、医療器具としての利便性を考慮すると一回の充電で最低1日は稼働し続ける事が期待されるため通信デバイスに対して超低消費電力下の動作が要求される。

### 2-1. 接触機会低減及び感染状況把握

未知の感染症が発見され蔓延する兆候が表れた際に、蔓延を抑制する手段として人と人の接触機会の低減が目指され、新型コロナウイルスが蔓延した際には2つのICTを活用した技術が国内で注目を集めた。一つ目が携帯電話の接触確認アプリケーションである。近接通信機能（Bluetooth）を用いて1m以内で15分以上接した相手が新型コロナウイルス陽性とシステムに登録された場合に陽性者に接触した可能性がある旨の通知が送信される[21]。もう一つが携帯電話の位置情報に関するビッグデータを活用して提供される人流や繁華街の出入に関する情報である。定量的な値を提示することで政府や各自治体の方針の決定に貢献するとともに私たち個人の行動に対する意識づけに影響を与えた。

国内で注目を集めたこれらの技術であるが、将来的には情報のリアルタイム解析が考えられる。例えば、現時刻における地域、施設、交通機関などの混雑状況がリアルタイムで解析されその結果が利用者に提供されることにより、入場規制など状況に応じた接触回避の措置や私たち一人一人の状況に応じた行動を促すことが期待できる。更に位置情報に生体情報や罹患情報を加えることで活用の幅が広がる。例えば、感染症が蔓延した際に病床の不足により自宅やホテルで療養する場合もあるが、生体センサー

を用いて心拍数や血中酸素濃度などの生体情報をリアルタイムで取得し、医療機関に伝送することで病状の変化にいち早く気づき対応することが期待できる。加えて罹患情報を加えることで各地域の感染状況や感染経緯の確認や解析、及び健康状態の管理や入院要否の判断なども含めて罹患者に対する対応を一元的に行うことが可能となる。このような活用例を実現するため通信技術に対しては、個人情報扱うため高いセキュリティを確保しつつ、正確な混雑状況を解析するために携帯電話の高精度な位置情報取得が求められることが考えられる。更にリアルタイムで生体情報を管理するために、療養場所として想定される自宅やホテルの全ての部屋に対して確実に通信エリアとして提供する必要がある。

## 2-2. 新薬開発

ワクチン開発には通常数年必要とされる。しかしながら新型コロナウイルスのワクチン開発は1年未満という短期間で実現された。これを実現させた技術として注目を集めている mRNA ワクチンは、ウイルスのゲノム情報が明らかになれば迅速に設計を行い、製造プロセスに移行することが可能である[22]。このようなゲノム情報を利用しながら、標的とした細菌やウイルスに対して、適切な治療薬やワクチンの設計を行うゲノム創薬のアプローチは、これまで膨大な候補設計からスクリーニングを繰り返す従来の選定手法に比べて、期間やコストを大幅に削減することができ、かつゲノム情報を元に論理的なプロセスで特定を行うため、より効果の高い医薬品の創出が期待できる[23]。ワクチン開発で重要なプロセスとして治験があるが、米国企業のファイザー社を例にとると2020年4月に治験が開始され12月にワクチンとして承認された。治験期間が短縮できた背景の一つとして、多額の財政支援が投じられ3つの段階からなる治験を並行して進められたことが挙げられる。

一方で、今後流行が地域的な場合など多額の財政支援が常に見込めるとは限らない。今後より速やかにかつ安価に治験をすすめるために、治験参加者の募集から治験完了まで全てオンラインで実施するバーチャル治験が考えられる。治験参加者の募集に際して地理的・時間的な制約がなくなることで、例えば国境をも跨いでより広い地域からより多くの人々の参加を可能とする。更に、感染症が流行した場合に移動や行動に制限が課される場合もあるが、全てオンラインとする事で制限の影響を受けることなく治験を進める事が可能となる。ここで、検査や投薬は自宅などで行われるため、体調の変化への対応が治験参加者の不安の一つとなる。これに対して、オンラインによる遠隔診療や治験期間中は常に生体センサーを身に着けることで生体情報を治験機関で常にモニタリングし、体調の変化を即時に検出し、治験機関に通知等により迅速な対応を行う事が考えられる。また、生体情報をモニタリングすることで通常の治験で行われる定期的な受診に対してより多くの情報の蓄積が期待できる。更に副反応の頻度や効果の持続性の追跡調査を行う方法としても活用が見込める。このように、様々な効果が見込めるバーチャル治験であるが、生体情報のリアルタイムなモニタリングを実現するために高いセキュリティを確保しつつ、生体センサーと治験機関を常時接続するための通信技術が重要となる。また、治験の参加者の生体情報を常にモニタリングするため、参加者が行動する範囲が確実に通信エリアとして提供される必要がある。



### 3-1. サイバー空間における医療データベースの構築

DNA シーケンス技術の進展によりゲノム解析に必要となる時間は短縮され、ゲノム医療は臨床で一部実用化されている[24]。更に民間のサービスとして遺伝子検査を身近に受けることが可能であり、特定の疾患へのかかりやすさなどの遺伝的な傾向を知ることができる。

ここで、各研究機関の研究報告や論文を用いて遺伝子を解析したデータと症例や健康情報が結びつけられるが、研究機関が実施した糖尿病やがん、循環器疾患などの症例に対する全ゲノム解析のデータは各研究機関が保有する[25]。各研究機関が蓄積する膨大な全ゲノム解析結果は研究開発の促進に貢献してきたが、これらのデータを統合的に管理し全ゲノム配列をデータベース化することが今後重要となると考えられ、全ゲノム解析等実行計画が策定された[26]。このとき、全ゲノム解析結果のビッグデータの管理と症例や健康情報を結びつけるために AI の活用が必要不可欠である。さらに生体センサーを用いて日々の生体情報を取得し健康情報として適切に反映することでデータベースの精度向上が期待される。

将来的には希望する全ての人々が全ゲノム解析を実施し、解析結果と症例や日々の健康情報などをリアルタイムに結びつけることによりデジタルツインのサイバー空間に医療データベースとして構築され、健康の未来予測や個別化医療の提供に繋がる事が期待される。同時にサイバー空間の医療情報を AI が解析する事で、統合的なデータベースが常に更新され癌や生活習慣病に対する治療技術や創薬等の産業利用への貢献も期待される。このようにサイバー空間に統合的なデータベースを構築するために一人一人が身に着ける生体センサー、全ゲノム解析結果、個人の症例や健康情報などの医療情報を結びつける高セキュリティなネットワークが必要不可欠となる。

### 4-1. 遠隔手術

現在、術者が直接患者を手術することが一般的である一方、ロボティクスによる手術支援ロボットが実用化されており低侵襲な手術が提供されている[27]。さらにロボティクスと通信技術を融合させた遠隔手術は 5G においても活用例の一つとして検討が進められている。一方、ロボティクスは将来に向けて拡張が検討されており、適用領域の拡張、映像の高解像度化、ハプティクスによる術者への触感のフィードバック等が実現されると考えられる。更に手術支援ロボットが車両や航空機に搭載されて移動性を持つ手術室として運用されることにより、車両や航空機が患者のいる場所に到着後、速やかに手術が開始されることが期待される。これらの将来のロボティクスや医療技術に対応すべく、通信技術の拡張も必要不可欠となる。特に映像の高解像度化として例えば 8K 映像のリアルタイム伝送に伴い大容量通信が要求され、また手術者の操作に対して触感のフィードバックを伴う双方向通信を考慮した超低遅延性が要求される。更に私たちが訪れる可能性があるあらゆる場所に手術環境を搭載した車両や航空機が出動することを考えると、大容量通信が可能なエリアの拡張も必要となる。

将来的な技術として、ごく最近、一連の手術（腹腔鏡下手術）を人間の手を使わずに、ロボットが自律的に実施する試みが大型動物を利用して行われている[28]。これに対しては、ロボットの制御の要と

なる、多数のカメラによるモニタリングや、センシング、これらから得られる情報をリアルタイムに伝送する大容量通信に加え、各デバイス間が正しく連携する自律的な制御システムが重要となる。

## 4-2. AI 遠隔診断

2020 年、新型コロナウイルスの蔓延に伴いオンライン診療の利便性が向上し電話やインターネットを介した医師により患者が自宅にいる状態の診療が身近なものになった[29]。現在のオンライン診療は医師の問診を基本とした診断や処方であるが、今後は患部の画像や聴診の音声データ、更には血圧や心拍数などの生体情報等を用いた診断が受けられることが考えられる。一方、AI による診断に関して様々な取り組みがあり、特に AI は画像解析技術との相性が良く、例えば皮膚科は AI による画像診断と相性が良いと考えられる。さらに、放射線画像の AI 診断に向けた取り組みが知られており、今後は胸部レントゲンや心電図などの身近な分野や更には音声や生体情報が AI による診断に取り込まれることが期待される。そして、オンライン診療と AI 診断が融合することにより将来は医療機関ではなく自宅や救急車などで様々な医療画像や生体情報の取得が可能となり、同時に取得した生体情報が医療機関や AI サーバーに伝送することで、場所や時間を問わず AI によるリアルタイムな自動診断の実現が期待される。本活用例においても緊急性が高い場合は大量のデータを短期間で送信する必要があり、さらに私たちが訪れる可能性があるあらゆる場所で受診を可能とするために大容量通信が可能なエリアの拡張が必要となる。

## 5-1. リアルタイム健康管理

健康管理の一つの方法として、定期的に健康診断や人間ドックを医療機関で受診することが挙げられる。6 割を超える成人が健診を受診している一方、時間や費用、必要性を理由に受診しない人も多い[30]。近年、ウェアラブルデバイスに脈拍などの生体情報を計測する生体センサーが搭載されている。これにより私たちは小さな負担で、継続的に生体情報を計測することが可能となる。更に小型のデバイスを体内に挿入する事で、体内から生体情報を入手する事が考えられ、デバイスは例えば 360 度の映像を取得するために複数のカメラを搭載し、映像を合成するために複数のカメラが自律的に連携をする事が考えられる。今後の先進的な技術としては、大きさが数ナノメートルから数マイクロメートルオーダーの超微細なデバイスであるナノマシンやマイクロマシンを生体センサーとして活用することが考えられる。

このような超微細なデバイスを体内に注入し、身体の診断を体内から行うことで[31]、私たちは時間や場所を意識することなく、ウェアラブルデバイスで取得可能な情報に加え、血液など体液中の物質の検出が可能となる。そして、取得された生体情報は医療機関に伝送され AI 診断によりリアルタイムな健康管理が実現される。例えば身体の異常が検知された場合、即座に医師に通知され、医師は患者に対して通知や診断を行う。ここで体内に注入された無数のデバイスを制御し、取得された生体情報を管理し、医療機関や AI サーバーに伝送するために通信技術は重要となる。例えば、デバイスは通常体の各部位に配置されているが、異常な部位が検知された場合は、短期間で患部を特定したり、診断の精度向上

のために、その部位にデバイスを集中することが考えられる。この時、体内に注入された無数のデバイスを制御するために超多数同時接続が要求されると共に、デバイス間およびデバイスに搭載される複数の機能間の相互連携のために自律的な通信網の構築が必要となる。更に一度注入されたデバイスはある程度の期間体内で活動を続けることが考えられ、その期間の活動を可能とするために超低消費電力での動作や体内でのエネルギーハーベストに応じた動作が必要とされると同時に、通信技術を用いた体外からの電力供給も期待される。加えて、通信エリアとして新しく体内の環境を考慮する必要性がある。例えば成人の場合約 3 分の 2 を占める水分を考慮した通信環境の検討が考えられる。

## 5-2. 低侵襲治療及び患部直接治療

現在、低侵襲治療として腹腔鏡等による治療が普及している。ここで、腹腔鏡はわずかではあるが医療器具を体内に挿入させるために身体に穴を空ける必要がある。身体を傷つけることなく治療し身体への影響を更に抑制するために、例えば治療や投薬の機能を備えたカプセル内視鏡の様に嚥下可能な小型なデバイスが、体内から患部への直接治療や薬剤の投与することが期待される。そしてデバイスの微細化が進み、ナノマシンやマイクロマシンに置き換わることが考えられる。体内での治療や投薬はナノマシンやマイクロマシンに期待する活用方法の一つでもあり、リアルタイム健康管理で紹介した診断機能と合わせることで、体内で診断から治療までの医療行為を私たちが意識することなく自律的に行うことが可能となる。ここで、健康管理を目的としたナノマシンやマイクロマシンの制御と異なる点として、薬剤の投与が完了したデバイスは体外に放出され、新たに薬剤が充填されたデバイスが体内に注入されるためデバイスの入れ替えが生じる。したがって、入れ替わるデバイスを適切に管理するため無数のデバイスの制御の重要性が増すとともに、各デバイスにおいても自律的なデバイス探査や相互接続の確立がより重要となる。

### 4.12.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

4.12.1.3 節では、医療技術と通信技術の融合により期待される具体的な将来の活用例について考えたが、本節では各活用例を念頭に置いて、Beyond 5G に対する要求性能について考える。

#### (a) 超高速・大容量

(要求される活用例：4-1. 遠隔手術、4-2. AI 遠隔診断)

遠隔手術や AI 遠隔診療において高精細な動画のリアルタイム伝送のために超高速通信が要求される。例えば、医療用ロボットは 3D の映像を見ながら操作されるが将来的には映像は 8K に拡張される見込みである。更に遠隔手術は超低遅延も要求されるため映像圧縮に必要な遅延量を考慮すると無圧縮もしくは低い圧縮率で圧縮された映像の伝送が必要となると考えられる。仮に 8K の映像を無圧縮で伝送した場合、数十 Gbps 程度の通信速度が必要となる。

#### (b) 超多数同時接続、測位・センシング

(要求される活用例：2-1 接触機会低減及び感染状況把握、3-1 サイバー空間における医療データ



ベース構築、5-1 リアルタイム健康管理、5-2 低侵襲治療及び患部直接治療)

多数のナノマシンやマイクロマシンなど超微小なデバイスを体内に注入した場合、外部からの制御や情報の連携を行う必要があるため超多数同時接続が重要となる。例えば、体内に数個から数十個のデバイスが注入されかつ電車内の人の密度を想定すると数百万～数千万個/km<sup>2</sup>のデバイスの超多数同時接続が必要となる。

また、携帯電話の測位情報を感染対策に活用する際には測位精度の向上が重要となる。例えば新型コロナウイルスの場合、感染防止の基本対策として人と人の間隔は 2m空けることが提示されている。したがって、屋内や屋外など特に人が密集する環境において水平方向に数mを上回る測位精度が要求される。

#### (c) 超低消費電力

(要求される活用例：1-1 知覚機能の補助及び再現、5-1 リアルタイム健康管理、5-2 低侵襲治療及び患部直接治療)

ナノマシンやマイクロマシンは一度体内に注入されるとある程度の期間、体内で活動を継続する事が考えられるが、これを実現するための電源補給が重要な要素となる。ここで、体外から給電するために体内のデバイスを制御しかつ給電を行うために無線技術の活用が期待される。更にエネルギーハーベストを考慮した動作も重要となり、例えば体内では熱や振動による電力の補給が期待されるが供給可能な電力量の範囲で動作する仕組みを導入する必要がある。

#### (d) 超安全・信頼性

(要求される活用例：1-1 知覚機能の補助及び再現、2-2 新薬開発、4-1 遠隔手術、4-2 AI 遠隔診断)

リアルタイムで生体情報の遠隔監視が要求されるバーチャル治療、リアルタイム AI 診断、遠隔手術では通信に高い安全性と信頼性が要求される。特に遠隔手術に関しては生命に直結するため高い信頼性、例えば 10<sup>-7</sup> が考えられる。また、サイバー空間で医療データベースを構築する場合、ゲノム解析情報などの様々な個人情報扱われるため、高セキュリティなネットワークが必要不可欠となる。

#### (e) 自律性

(要求される活用例：4-1 遠隔手術、5-1 リアルタイム健康管理、5-2 低侵襲治療及び患部直接治療)

ナノマシンやマイクロマシンは多数のデバイスが連携することが考えられ、外部から一括制御する方法のほかにデバイス間の連携が考えられる。そのため個々のデバイスや機能が近傍のデバイスや機能の探査や相互接続を確立して通信網を構築するため、デバイスの自律的な通信制御が必要とされる。

#### (f) カバレッジ拡張

(要求される活用例：2-1 接触機会低減及び感染状況把握、2-2 新薬開発、4-1 遠隔手術、4-

## 2 AI 遠隔診断、5-1 リアルタイム健康管理、5-2 低侵襲治療及び患部直接治療)

通信エリアとして新しく体内が加わり、体内もしくは体内と体外のデバイス間の通信を確立するために成人の場合約 3 分の 2 を占める水分を考慮した通信環境の検討が必要となり、例えば体内環境を考慮した電波の伝搬モデルの検討が必要となる。

以上の内容をふまえ、表 4.12-1 に医療の活用例に対する Beyond 5G の要件をまとめる。

表 4.12-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
1-1. 知覚機能の補助及び再現		○		○	○					
2-1. 接触機会低減及び感染状況把握			○					○		
2-2. 新薬開発				○				○		
3-1. サイバ-空間における医療データベースの構築			○							
4-1. 遠隔手術	数十 Gbps	○		10 <sup>-7</sup>				○	○	
4-2. AI遠隔診断	○	○		○				○		
5-1. リアルタイム健康管理			○		○			○	○	
5-2. 低侵襲治療及び患部直接治療			数百万～数千万個 /km <sup>2</sup>		○			○	○	

### 4.12.1.5 まとめ

本節では、医療の現状と課題を勘案して期待する医療の将来像を描いた。そして、将来像の実現に向けて期待される Beyond 5G を活用した活用例を紹介し、求められる通信要件について考察し、超高速・大容量、超多数同時接続、測位・センシング、超低消費電力、超安全・信頼性、自律性、カバレッジ拡張において高い要求性能が求められることを示した。私たちの生活に欠かせない医療・公衆衛生であるが、医療技術と通信技術を融合した活用例が実現されることにより、より豊かに健康で長い人生が送れる未来が訪れる事が期待される。

### 参考文献

[1] 総務省, 健康・医療戦略.

[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000691940.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000691940.pdf)

[2] 内閣府, 令和 3 年版 高齢社会白書.

- [https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/zenbun/pdf/1s1s\\_02.pdf](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/zenbun/pdf/1s1s_02.pdf)
- [3] 厚生労働省, 令和 2 年版 厚生労働白書.  
<https://www.mhlw.go.jp/content/000684406.pdf>
- [4] 総務省, 平成 29 年度 過疎対策の現状と課題.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000513096.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000513096.pdf)
- [5] 厚生労働省, 令和 2 年 簡易生命表の概況.  
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life20/dl/life18-02.pdf>
- [6] 厚生労働省, 平成 16 年度版 厚生労働白書  
<https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/04/>
- [7] 日本医療研究開発機構, 感染症創薬に向けた研究基盤の構築と新規モダリティ等の技術基盤の創出.  
<https://www.amed.go.jp/content/000081490.pdf>
- [8] Amesh, “Expediting Development of Medical Countermeasures for Unknown Viral Threats: Proposal for a “Virus 201” Program in the United States”, June 08, 2020.  
<https://www.centerforhealthsecurity.org/our-work/publications/2020/expediting-development-of-medical-countermeasures-for-unknown-viral-threats>
- [9] 日本医療研究開発機構 ホームページ.  
<https://www.amed.go.jp/program/index.html>
- [10] 厚生労働省 ホームページ, 介護・高齢者福祉.  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/hukushi\\_kaigo/kaigo\\_kour\\_eisha/](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/kaigo_kour_eisha/)
- [11] 内閣官房, 感染拡大防止特設サイト.  
<https://corona.go.jp/proposal/>
- [12] 日本医療研究開発機構, 成果情報.  
<https://www.amed.go.jp/news/seika/jyusho/20190207.html>
- [13] 厚生労働省 ホームページ, 医療.  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou\\_iryuu/iryuu/](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/iryuu/)
- [14] 厚生労働省 ホームページ, 健康.  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou\\_iryuu/kenkou/index.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/kenkou/index.html)
- [15] 日本医療研究開発機構, 再生・細胞医療・遺伝子治療研究開発 2021.  
<https://www.amed.go.jp/content/000075830.pdf>
- [16] 奥真也, “未来の医療年表 10 年後の病気と健康のこと”, 講談社現代新書.
- [17] 奥真也, “Die 革命 医療完成時代の生き方”, 大和書房.

- [18] 厚生労働省, スマート・ライフ・プロジェクト.  
<https://www.smartlife.mhlw.go.jp/event/disease/>
- [19] RMIT University, “New electronic skin can react to pain like human skin”.  
<https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2020/sep/electronic-skin>
- [20] 日本医療研究開発機構, 平成 27 年度 BMI 分野における技術動向調査分析.  
<https://www.amed.go.jp/content/000031969.pdf>
- [21] 厚生労働省, 新型コロナウイルス接触確認アプリ COCOA.  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/cocoa\\_00138.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/cocoa_00138.html)
- [22] 厚生労働省, 新型コロナワクチンについて.  
<https://www.cov19-vaccine.mhlw.go.jp/qa/0021.html>
- [23] 日本製薬工業協会, くすりの情報 Q&A.  
[https://www.jpma.or.jp/about\\_medicine/guide/med\\_qa/q46.html](https://www.jpma.or.jp/about_medicine/guide/med_qa/q46.html)
- [24] 厚生労働省, ゲノム医療等をめぐる現状と課題.  
[https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10601000-Daijinkanboukouseikagakuka-Kouseikagakuka/151117\\_tf1\\_s1.pdf](https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10601000-Daijinkanboukouseikagakuka-Kouseikagakuka/151117_tf1_s1.pdf)
- [25] 内閣官房, 我が国におけるゲノム解析の状況.  
[https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome\\_dai1/siryou2.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome_dai1/siryou2.pdf)
- [26] 厚生労働省, 全ゲノム解析等実行計画 (第 1 版) .  
<https://www.mhlw.go.jp/content/10601000/000579016.pdf>
- [27] 独立行政法人 医薬品医療機器総合機構, 審議結果報告書.  
[https://www.pmda.go.jp/medical\\_devices/2015/M20151026002/150557000\\_22100BZX01049000\\_A100\\_3.pdf](https://www.pmda.go.jp/medical_devices/2015/M20151026002/150557000_22100BZX01049000_A100_3.pdf)
- [28] H. Saeidi, et.al., “Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis”, 26 January 2022  
<https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abj2908>
- [29] 厚生労働省, パンフレット.  
<https://www.mhlw.go.jp/content/000621951.pdf>
- [30] 厚生労働省, 健診(健康診断や健康診査)や人間ドックの受診状況.  
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa10/3-5.html>
- [31] 日本医療研究開発機構, プレスリリース.  
[https://www.amed.go.jp/news/release\\_20200521-03.html](https://www.amed.go.jp/news/release_20200521-03.html)

## 4.12.2 行政、教育分野

行政、教育分野に関する将来像は、特定の国によらない普遍的なものと考えられるが、現状の行政システムのデジタル化の進捗や、システムの利用状況、運用方法、法制度などは国により異なる。以下では、日本の行政システムを例に現状の課題や将来像を記載する。また、日本の教育分野特有の課題についても記載する。

我が国では、2000年代初頭より e-Japan 戦略(2001年)や IT 新改革戦略(2006年)をはじめとする様々な政策を通じ、電子政府・電子自治体を推進してきた。しかしながら、2020年の新型コロナウイルス感染症の流行により変化した国民の生活様式に対して、現状の仕組みでは必ずしも十分に対応できないとの課題が生じたことから、これらの課題を踏まえて、「誰一人取り残さない、人に優しいデジタル化」をめざし、新たな「デジタル社会の実現に向けた重点計画」を推進しつつある[1]。教育分野においては、2019年以降 GIGA スクール構想により、全国的に教育現場の DX 化が進んできている。今後は、1人1台端末や ICT 環境の整備だけに留まらず、教育格差の解消や部活動支援など専門知識が必要な学習における遠隔指導の環境整備などに ICT の力が期待されている。

### 4.12.2.1 現状と課題

#### ① 行政

現在の政府・自治体の行政システムに関して、システム構成、システム利用者、システム運用者の 3つの観点からの問題、課題をあげる。

#### 1. 行政システム構成に関する課題

現在の政府や自治体における業務システムは、所管や用途毎に個別に構築されており、個別最適のシステムとなっている[2]。たとえば、戸籍、住基、児童、介護、生活保護、地方税などの業務システムは市区町村ごとに構築され、さらに提供するサービスも自治体毎にカスタマイズされたものも存在する。一方、住基ネット、年金、ハローワーク、国税などの業務に関するシステムは全国レベルのシステムにより提供される。このような所管や用途ごとの個別システムでは、行政全体で見ると、構成装置やシステムにかかるコストが高くなっている。一方、電子申請について、いくつかの業務においてすでに導入されているが、現在は、用途により様々なシステムが存在する。たとえば、行政手続きに関する申請(e-Gov)やマイナポータル、補助金申請システム(jGrants)、国税(e-Tax)や地方税(e-TAX)などの納税システムなど、用途によりシステムが異なっている。

#### 2. 行政サービス利用者の観点からの課題

政府や自治体システムの利便性の観点からは、行政のシステムが所管や用途ごとの個別システムのため、利用者は各システムに対して申請等の処理が必要となり、利用者の作業負荷が大きくなっている。特に、業務によっては(例えば非常時の申請など)、利用者が手続のために行政窓口へ殺到する場合があります。ペーパーレス化、電子申請の普及が望まれている。さらに、行政手続きに関し、規制や慣行(たとえば、実印登記など)に対し、デジタル化することにより利用者のコスト低減が望まれている。

一方、政府、自治体は、個人情報を含む様々なデータを保有しているが、データの所在、データの標準や形式、利活用の方法、個人情報扱い方などが必ずしも統一されておらず、民間がこれらのデータを利活用するには効率が良くない状況にある。

### 3. 行政システム運用者の観点からの課題

行政システムを運用する政府、自治体の立場では、取り扱う業務が多種多様にわたるため、業務効率化や運用コスト低減が望まれる[3]。たとえば、利用者からの問い合わせ業務に関しては、FAQ の充実や、AI による問い合わせ対応の自動化などの適用によりオペレータ対応の低減が求められている。また、対面での受付業務などについても対面 AI の導入により職員の業務低減が望まれる。さらに、利用者の電子申請を加速化することによって、対面業務の低減とともに、電子化による業務効率化が必要である。一方、行政職員の働き方の観点からは、モバイルを活用したコミュニケーションシステムの整備・統一などによりテレワークなどの改革が求められている。

## ② 教育

教育分野は、いわゆる学校教育から企業教育まで幅広い。ここでは、学校教育に焦点を当てて現状の課題をあげる。

### 1. ICT 環境整備における課題

教育現場(学校内や大学キャンパス、研究施設など)における ICT 環境整備はコロナ禍の影響もあり、急速に進んできている。しかし、家庭学習など教育現場以外での環境整備がまだ十分とはいえない。校内から各家庭での学習を継続してサポート可能な環境の整備が望まれている。又、リモート授業においては、双方向コミュニケーションの活性化や、更には教室とリモート参加のハイブリッド環境での効果的な学習方法の改善などが期待されている。

### 2. 教育現場の知見共有における課題

教育現場では生徒だけでなく、指導者への支援も必要である。指導におけるノウハウの共有等を広く実施することが期待される。

### 3. 部活動などにおける ICT 導入の課題

実技指導や部活動の指導者不足を補うため、学校間での交流などでもますます ICT 活用が期待される。

## 4.12.2.2 期待する将来像

### ① 行政

上記のような課題を鑑み、政府は、行政の縦割りを打破し規制改革を行うためにデジタル庁の創設と合わせ、「誰一人取り残さない、人に優しいデジタル化」をめざした新たな「デジタル社会の実現に向けた



重点計画」を制定、推進しつつある[4]。この「誰一人取り残さない、人に優しいデジタル化」のための行政システムとしては以下が考えられている。

### 1. 徹底した UI・UX の改善と国民的サービスの実現

現在の用途別、提供者別のシステムではなく、利用者視点で、関連する行政手続きが容易に行えるシステムが必要であり、具体的には以下を実現することで行政システムのサービス向上が期待できる。

- ・スマートフォンやタブレットを活用してシステム利用者が、いつでもどこでも簡単に手続きを完結できる
- ・利用者のライフステージ(引っ越し、死亡・相続など)に合わせて、ワンストップで手続きが完結できる
- ・準公共サービス(教育、健康・医療・介護など)と連携したサービスを楽しむ

### 2. デジタル社会の共通基盤

サービス利用時の個人 ID としてのマイナンバーカードが普及し、マイナンバーカードを利用したサービスが拡大することが望まれる。さらに、行政機関間でのデータ参照に関してリアルタイムなデータ反映、電子署名の導入、新たな行政認証制度といった、デジタル社会に向けた共通基盤の整備、普及が望まれる。

### 3. データ流通、利活用

行政が保有するさまざまなデータに対して、それらを安心、安全に有効活用するためのデータ戦略が望まれる。たとえば、データの信頼度を確保しつつデータを分散的に管理するための共通ルール、標準化などのデータベースが整備されていること、行政が保有するデータ利活用のためのオープンデータ基盤の整備されていることなどにより、いつでもだれでも安心・安全にデータを活用できる環境が望まれる。

### 4. デジタルデバイドの解消

利用者の年齢、障害等心身の状態、経済的要因にともなう ICT 活用機会格差を生じさせないアクセシビリティを提供することや、モバイルデバイスなどを介して地理的な制限なく、いつでもどこでも行政システムにアクセス可能な環境を提供することが望まれる。

#### ② 教育

教育における未来像は、各個人のおかれた環境等に寄らず、平等に、又、自由に教育を受けられる環境を提供することが望まれる。

#### 4.12.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

##### ① 行政

上記の行政システムの将来の姿に対し、ネットワークは 4G や 5G においても行政システム自体は実現できるケースも多い。しかしながら Beyond 5G を用いることで、UX の向上やデジタルデバイドの解消など、さらなる高度化が期待できる。

## 1. 統合された行政サービス

行政システムで提供される行政サービスにおいて、利用者の観点からは、出生、死亡、婚姻、引越等などの利用者のシナリオに応じて、さまざまな各申請・届出をワンストップで実現できることが望ましい。さらに、「民間タッチポイント」を一元化することにより利用者は、個々のシステムを意識せず行政システムに一か所からアクセス可能となる。その実現のためには、行政システムとして、(1)ガバメントクラウド、ガバメントネットワークなどの全国共通な機能を提供するインフラの構築した上で、(2)地方公共団体における業務システムの統一化・標準化によりシステム開発の効率化をはかり、(3)個別システムをサービス(SaaS)として提供し、API連携として利用する枠組みにより、システム間連携を効率化できる。

## 2. 利用者にやさしいUX

利用者は、だれでも、いつでも、どこでも行政サービスを利用できる。前項で言及した利用者の状態や経済的要因、地理的な制限なく、かつ安心・安全にサービスを利用できる。特に、災害時など、端末から非常に多くの通信が発生した際にも利用者がストレスなく行政サービスを利用できる。

## 3. 行政との連携サービス

行政システムのもつ機能を API として提供し、他業界のシステムがそのサービスを利用することにより、業種・業界をまたいだサービス連携が可能となる。たとえば、医療機関や教育機関といった準公共分野との連携、引越手続きと公共インフラ契約の一体化といった民間サービスとの連携が可能となる。一方、行政・関連機関がもつさまざまなデータ(気象データ、河川データ、交通データなど)をオープンデータとして提供し、他機関のサービスに利活用することで、サービスの高度化が可能となる。

### ② 教育

教育の将来の姿に対しても、ネットワークは 4G や 5G においても実現できるケースも多い。しかしながら、Beyond 5G の導入により、より高度な学習方法の導入やリアルとリモートの共存といったハイブリッドな学習形態が可能となる。

## 1. 遠隔指導・コミュニケーション

部活動や実技を伴う指導において、指導者のノウハウをよりリアルに伝えることが可能となる。口頭で伝授するだけでなく、遠隔でも直接感覚なども伝えることが可能となる。又、遠隔地を結んでの部活動、例えば合奏や合唱などが可能となる。

## 2. ハイブリッド教室

遠隔で参加する生徒も実教室で参加する生徒も、ストレスなく授業が受けられる。教える指導者側も両方の生徒を意識することなく授業を進めることのできるようになる。又、言語の違う生徒や指導者同士であっても問題ないような環境が実現される。

#### 4.12.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

上記のような行政システムや教育分野に期待される活用例を実現するために必要となる Capability を表 4.12-2 に示す。また、また、Beyond 5G ネットワークが果たす役割をネットワークの要件から記載する。

表 4.12-2 Beyond 5G の活用例と Capability

活用例	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
統合行政サービス	○		○	○				○		
行政サービスのUX向上		○	○	○						
他業界との連携サービス	○			○						
遠隔指導・コミュニケーション	○	○		○			○	○		
ハイブリッド教室	○	○		○				○		

##### (a) 超多数同時接続

災害時など、端末から非常に多くの通信が発生した際にも利用者が行政サービスを享受できるために、行政システムでは、超多数同時接続を提供する必要がある。また、オープンデータに関しては、行政・関連機関がもつさまざまなデータを収集するための多数端末の収容可能なネットワークが必要である。なお、このようなデータの大量・リアルタイムな収容のためには、公衆網のみならず地方公共団体による私設網 (Local 5G 相当) の利用も必要である

##### (b) 超高速・大容量、超低遅延

前述の災害時等大量の通信が発生した際にも、モバイル経由の通信品質が劣化しないための十分な容量の通信インフラが必要である。また、行政サービスの UX 向上については、特にスマートフォンを使いこなせない利用者向けには、異なるデバイス (テレビやスピーカー) やさまざまな UI (たとえばホログラムなど) の活用が考えられる。そのようなケースにおいても十分な通信容量やリアルタイム性が確保できる大容量、超低遅延のネットワークインフラが必要となる

##### (c) 超安全・信頼性

個人情報を含むデータを取り扱うことから、高いセキュリティが必要である。また、準公共分野や民間分野とのデータ連携を含む連携サービスにおいては、セキュリティに含め、利用者やサービス対象を示す ID の連携機能が必要である

##### (d) カバレッジ拡張

行政サービス利用者が役所 (対面) や自宅 (オンライン) での利用だけでなく、いつでもどこでもモバイル通信をもちいて行政サービスを受けられるためには、地域的なデジタルデバイドが解消されるべきであり、異

種無線連携や機器連携などを含めた広いカバレッジの提供が必要である。

図 4.12-3 に Beyond 5G を活用した行政・教育分野の姿を示す。

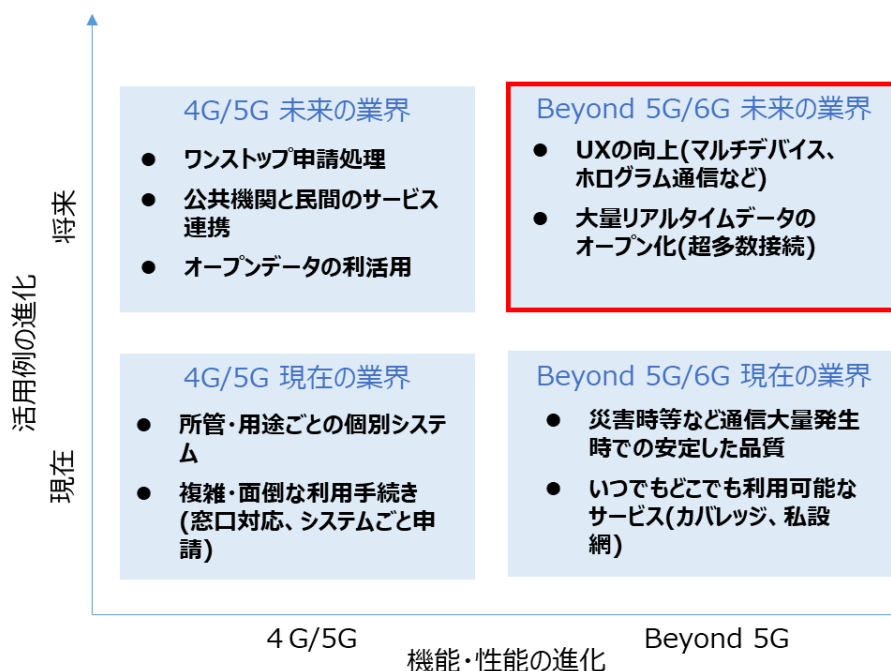


図 4.12-3 Beyond 5G における行政・教育分野

#### 4.12.2.5 まとめ

本節では、行政・教育分野の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超安全・信頼性、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 令和 3 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/pdf/index.html>
- [2] 総務省, デジタル時代における住民基本台帳制度のあり方に関する検討会 有識者部会.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/kenkyu/digital\\_juki/yushikishabukai.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/digital_juki/yushikishabukai.html)
- [3] 自由民主党政務調査会デジタル社会推進特別委員会, “デジタルニッポン 2020”.  
[https://jimin.jp-east-2.storage.api.nifcloud.com/pdf/news/policy/200257\\_1.pdf](https://jimin.jp-east-2.storage.api.nifcloud.com/pdf/news/policy/200257_1.pdf)
- [4] デジタル庁, デジタル社会の実現に向けた重点計画.  
<https://www.digital.go.jp/posts/ZlptjPro>

## 4.13 飲食業界（外食産業）

### 4.13.1 現状と課題

#### ● 課題

- 2020 年初頭頃から始まった、世界的なコロナ禍が現在でも続いている。日本では、東京オリンピックが開催されていた、2021 年 8 月頃をピークとした、第 5 波が同年 10 月頃には、ほぼ収束したが、2022 年初めにかけて、第 6 波が拡大し、同年 7 月頃から始まったオミクロン株 BA.5 による第 7 波は予想を上回る大流行となった。
- これまで、飲食業界では、緊急事態宣言が発令されるたびに、時短営業の要請や、営業自粛が余儀なくされ、経営面では大きな打撃を受けてきた。
- 2021 年の第 5 波の収束に伴い、各地で飲食店の時短営業が解除され、コロナ禍においても従前の営業を再開できるように、ワクチンパスポートや接種証明書を提示した顧客や、PCR 検査の陰性証明がある顧客のみが入店できる仕組みのトライアルなど、コロナ禍でも経済を回していく取り組みが進められた。
- 2022 年 10 月頃からは、観光需要の喚起策として、全国旅行支援キャンペーンが始まり、旅行や宿泊の割引だけでなく、各地域の飲食店などで利用できる地域別のクーポンなどが発行されるようになり、地域の飲食業界の活性化も図られている。
- 従前より、飲食店の経営上の問題点として、第 1 位「材料費の上昇」、第 2 位「客単価の減少」、第 3 位「施設・設備の老朽化」があげられている。客単価の減少の中で、諸経費の上昇が収益を圧迫しているのが現状の問題である。これに対しては、経費の節減はともかく、売上高を上げることが第一である。[1]
- 飲食店の売上高は、①「客席数」②「客席回転率」③「客単価」④「営業日数」と大きく分けて 4 つの要素から構成されており（売上高 = 客席数 × 客席回転率 × 客単価 × 営業日数）で現われ、コロナ禍においても、売上高を伸ばすにはこの 4 つの要素を高めることが重要となる。[1]

#### ● ICT 活用に係る取り組み

- 前述のように、飲食店で売上高を伸ばすため、これまでに ICT を活用した様々な取り組みが進められている。まず、②「客席回転率」を上げるための方策としては、入店した客がスムーズに注文を出せるように、各席にタブレット端末を置いて、給仕を呼ばなくとも注文が出せるようになっている店舗もある。また、支払いも、最近、利用が浸透してきたスマホ決済が、多くの店舗で利用できるようになっている。
- また、物理的な①「客席数」は、飲食店により決まってくるが、店内だけではなく、仮想的な店外の顧客を取り込むために、お弁当のテイクアウトを提供する店舗も増えている。さらに、ネットなどから注文を受けたテイクアウト商品は、宅配食サービスと連携してバイクや車などを使って直接宅配され、売上高を増やす取り組みもなされている。さらに、調理に要する時間を短縮するために、調理ロボットや配膳ロボットを導入して、麺を茹でる工程など、調理工程の一部を自動化することや、調理したものを、顧客のテーブルまでロボットが配膳する取り組みなども一部店舗で進められている。[2]専用

のスマホアプリにより、現状の 5G を利用して、ネットで注文や予約ができるなどの取り組みは、多くの飲食店（特にチェーン店）で浸透してきている。

- 飲食店における、食品の原材料の効率的な獲得や消費、さらに前述のフードロスへの対策なども現状の ICT 活用に係る取り組みと考えられる。

#### 4.13.2 期待する将来像[3]

- Beyond 5G のように技術進化するにつれて、5G の三大特徴である、(1)超高速・大容量、(2)超低遅延、(3) 超多数同時接続、をさらに生かすことで、飲食店業界でも、様々なサービス提供が加速化されることが期待される。
- 飲食店業界においても、ロボットや IoT、AI 等の先端技術を活用して、調理工程の効率化などにより、人件費の削減や諸費用を抑えることにより、売上高向上効果が期待される場所である。
- 具体的には、調理ロボットは、設置スペース削減の観点から、現在の、少品種生産から、少量多品種生産にも対応できるように改良が期待される。また、飲食店内の配膳ロボットは、ローカル Beyond 5G を使って、客席まで自動運転によって、客が注文した品物を届けることができるようになるであろう。

#### 4.13.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

- 配膳ロボットはその多くは現状では、従来技術(Wi-Fi)を使って制御されている。その要求条件として、配膳中に子供などが前を横切った際に認識し、急停止できるとか、配膳する機の位置や形状をセンチ単位で認識する技術が必要であり、今後ますます、ポジショニングなど認識精度が向上することが期待される。
- また、IoT 技術を使って、店内の客席の空き状況を把握し、客からの注文を受け付け、食材の在庫状況などが、逐次把握することが可能になる。さらに、ネットから注文を受けたテイクアウト商品は、これまで、宅配食サービスと連携してバイクや車で宅配されていたものが、将来的には、ドローンによる宅配食サービスにとってかわることになるかも知れない。
- これらの各飲食店の状況データは、Beyond 5G によってサイバー空間上に CPS (Cyber Physical Systems)によりマッピングされ、各店舗におけるロボットなどの稼働状況や食材の在庫状況、ネットからの注文状況、宅配食サービスの配達状況などが、一括監視することが可能となるであろう。
- このように各店舗から IoT 技術や Beyond 5G により収集されたデータを、AI で分析することにより、食品ロスの削減につなげることや、得られたマーケティング情報から、経営判断に生かすことも可能になるであろう。
- 飲食業界において Beyond 5G と、ロボットや AI と IoT 等の先端技術の活用が、ますます進むにつれて、昨今、トライアルなどがなされている無人のコンビニエンスストアのように、将来的には、飲食業界においても「無人レストラン」が出現するのもしれほど遠い話ではないかも知れない。



Beyond 5G の技術進化と業界の進化を図 4.13-1 に示す。

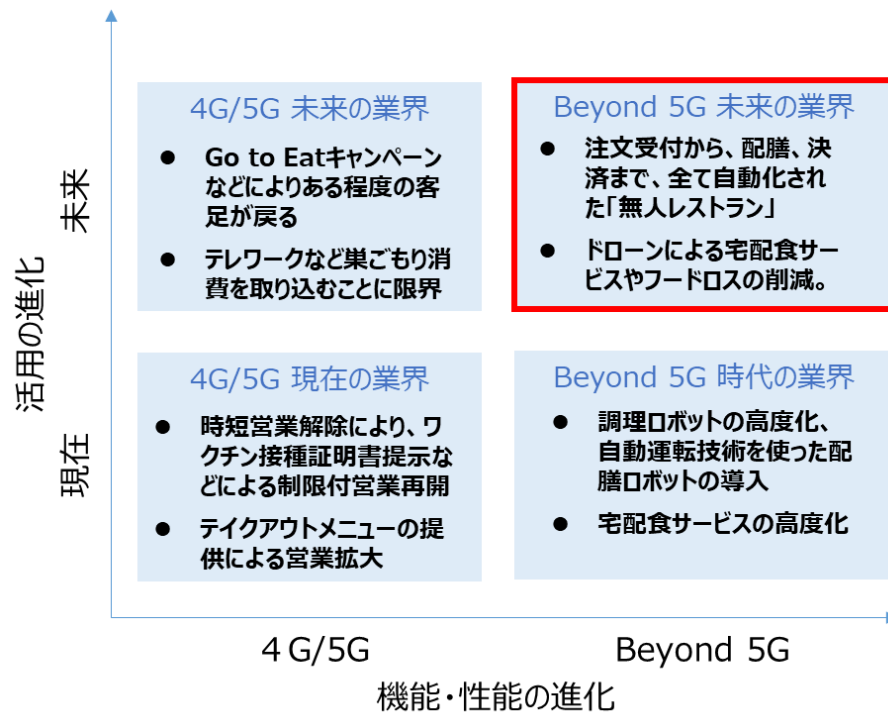


図 4.13-1 Beyond 5G における飲食業界

#### 4.13.4 Beyond 5G に求められる Capability

飲食店業界における、現在や未来の各種活用例から想定し、Beyond 5G に求められる Capability として、以下に示すものが考えられる。

- 将来の飲食店においては、人件費削減などの観点から、調理ロボットや配膳ロボットなどが、益々普及することになると考えられる。調理中のロボットや、配膳中のロボットが、周辺の状況を認識するために、大量の画像情報を低遅延で通信することや、位置情報を確認する必要がある。このため、Beyond 5G の Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、測位・センシングなどが必要となる。また、特に配膳ロボットは、長時間の自動運転が必要になることから、超低消費電力なども重要な要件になると考えられる。
- 将来的な宅配食サービスとしてはドローンの利用が想定される。この場合に、Beyond 5G の Capability としては、ドローンの飛行がスムーズに実施できるように、超高速・大容量、超低遅延で、かつレベル 4 での運用に対応して、市街地上空での事故や落下の危険性が少ない超安全・信頼性が必要となる。また、ドローンは長時間でも飛行できるように、可能な限り低消費電力である必要があり、飛行経路の位置情報を把握するため、測位・センシング機能も必要である。さらに、場合によっては、電波が届きにくい山間部まで飛行する可能性もあり、カバレッジ拡張も必要となる場合があると考えられる。

- 将来的には、無人化されたレストランが想定される。このようなレストランでは、前述の配膳ロボットや調理ロボットが、通常営業時間に稼働すると考えられる。このため、Beyond 5G の Capability としては、配膳ロボットや調理ロボットと同様に、超高速・大容量、超低遅延、超低消費電力、測位・センシングなどが重要になると想定される。さらに、無人化されたレストランを安全にかつ継続的に稼働させるため、超安全・信頼性も重要になると考えられる。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.13-1 に示す。

表 4.13-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
配膳ロボット 調理ロボット	○	○			○		○			
宅配サービス (ドローンによる)	○	○		○	○		○	○		
無人レストラン	○	○		○	○		○			

#### 4.13.5 まとめ

本節では、飲食店業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、超低消費電力、測位・センシング、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 厚生労働省, 飲食店営業（料理店）の実態と経営改善の方策.  
[https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou\\_iryuu/kenkou/seikatsu-eisei/seikatsu-eisei22/dl/h20/ryouri\\_housaku.pdf](https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/kenkou/seikatsu-eisei/seikatsu-eisei22/dl/h20/ryouri_housaku.pdf)
- [2] 川崎重工, オープンイノベーション施設「Future Lab HANEDA」開所.  
<https://kawasakirobotics.com/jp/news/future-lab-haneda-open/>
- [3] NICT, Beyond 5G/6G ホワイトペーパー2.0 版. 2022 年 3 月公開.  
[https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v2\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v2_0.pdf)

## 4.14 娯楽・レジャー

### 4.14.1 現状と課題

新型コロナウイルスの影響により、人々はリアル場で集まることが難しくなっている。その結果、代替手段として、バーチャル空間上でエンターテインメントやレジャーを楽しむ機会が急激に増加している[1]。このようなエンターテインメントのデジタル化へのシフトは、従来の映像、音楽、ゲーム等の分野に留まらず、新たにスポーツや旅行、レジャー施設や玩具など、様々な領域に拡大し始めている[2]。その中でも、特に近年では、メタバースといった、3次元バーチャル空間上に構築された仮想空間内でのエンターテインメントに注目が集まっている。例えば、オンラインゲームのフォートナイトでは、ラッパーのトラヴィス・スコットが音楽イベントをバーチャル空間上で開催し、累計で2,700万人以上もの参加者を集めている[3]。今後はXRなど3D表示デバイスの進化に伴い、3D空間内でのエンターテインメントの普及が見込まれる。この他にも、eSportsの分野では、プロスポーツチームの参戦や関連ビジネスの拡大に伴い、市場規模も右肩上がりとなっており、2023年には市場規模が15億9820万ドルとなる見込みである[4]。

一方で、新型コロナウイルスはコンテンツ制作側にも大きな影響を与えている。アニメや映画等の映像制作においては、ロケーション撮影に行けないといった制限により映像制作が進まないといった問題が発生している。こうした中、バーチャルプロダクション技術<sup>\*1</sup>やポリュメトリックキャプチャ技術<sup>\*2</sup>などの技術革新により、リアリティや臨場感のある映像制作を行えるようになってきている。エンターテインメント分野の消費市場の成長とともに、コンテンツ制作側の進化も同時に進んでいる状況である。

オンラインコンテンツの利用率は、現状若年層が最も多いが、今後、ユースケースの拡大とともに、利用者年齢層の幅が更に広がっていくことが予想される。特に、ソーシャルネットワークでは、テキストおよび画像が主流であったが、動画の投稿およびライブも格段に増えてきており、今後もエンターテインメント性の高いソーシャルネットワークの進化が期待されている[5]。エンターテインメント関連の市場規模はさらに増加する見込みである。一方で、通信トラフィック量増大への対応や、アプリケーションの低遅延化要求など、通信ネットワークにおいて解決すべき課題も多い。

\*1: 大型LEDディスプレイ、カメラトラッキングとリアルタイムエンジンを組み合わせた撮影手法のひとつ。

3DCGを中心としたバーチャル背景を大型ディスプレイに表示し、現実空間にあるオブジェクトや人物を、カメラで再撮影することで、後処理なくCGと実写を組み合わせた映像制作を実現することができる。

\*2: 実在の人物や場所を三次元デジタルデータに変換し、それを高画質に再現する技術。実世界空間をまるごと取りこみ、後から自由に視点を動かして視聴することを可能にする自由視点映像技術の一つ。

### 4.14.2 期待する将来像

エンターテインメント業界は今後、人々のライフスタイルの変化とともに、さらなる進化を遂げることが予想される。デバイス技術や通信技術の進化に伴い、これまで体験したことのないような新しいサービス体験が次々と提供されていくことが期待される。ここでは、今後のエンターテインメント業界において、重要になると

考えられる、5つの将来像について紹介を行う。

## 1. 究極の没入体験の提供

バーチャル空間上のエンターテインメント提供において、更なる体験品質の向上が求められている。特に、これまでの視覚・聴覚中心の視聴体験から、五感をフルに刺激する究極の没入体験、一体感の提供により、これまで味わったことのない体験価値を創造し、人々に驚きと感動を与えるアプリケーションの提供が期待される。それを実現するために、超高音質・超高画質で空間自体を丸ごと伝送する空間情報伝送技術及び、視覚・聴覚だけでなく触覚・嗅覚・味覚も含めた空間を再現する空間再現技術の進化が求められる。さらなる没入感向上のため、これまでの片方向配信から、バーチャル空間でのリアルタイムでインタラクティブなコミュニケーションを可能にする超低遅延通信技術を用いて、エンターテインメントの世界に引き込まれるような究極の没入体験、一体感の提供を行うことが期待される。例えば、音楽ライブやスポーツ観戦などのリモートライブやオンラインゲーム、リモート遊園地、オンライン旅行など多岐にわたるアプリケーションでの感動体験が期待される。さらに、車、電車、船、航空機などの高速移動中であっても、このようなリアルタイムなエンターテインメントコンテンツの提供が求められている。

## 2. バーチャルとリアルの融合

エンターテインメントは今後、バーチャル空間上でのみ楽しむものから、バーチャルとリアルを融合させて楽しむものへと変化していくことが予想される。実世界をバーチャル空間上にリアルタイムに反映したり、実世界の物理空間上にバーチャル空間を重畳したりするなど、バーチャルとリアルをシームレスに融合することで、新たな体験価値の提供を可能とする。例えば、代表的な例として AR 技術を用いたナビゲーションなどが挙げられる。この他にも、バーチャル空間上でのスポーツ大会の実現や、有名ミュージシャンとのバーチャル空間上でのセッションといったようなサービスが挙げられる。このようなサービス実現のために、物理空間の動きを正確にキャプチャし、リアルタイムにバーチャル空間上に反映する技術や、バーチャル空間上の作用を物理空間上へリアルタイムに反映するようなインタラクションデバイスの進化などが求められる。

## 3. エンターテインメントとソーシャルの融合

ソーシャルネットワークは、これまでのテキスト・画像・動画中心のものから、究極の没入体験やバーチャルとリアルとの融合といったような新たな体験へと変化することが予想される。メタバースをはじめとするバーチャル空間上においては、単なるエンターテインメントコンテンツの提供としての場ではなく、エンターテインメントとソーシャルの融合した場の提供が行われるようになると期待される。エンターテインメントとソーシャルの融合した場においては、友人とゲームやライブに参加したり、他ユーザーとコミュニケーションを行ったりと、バーチャル空間を活用したソーシャルネットワークの確立が行われる。

## 4. コンテンツクリエイター支援

コンテンツ制作においては、これまでプロフェッショナルが専用の機材等を用いてコンテンツ制作を行っていたが、近年では、デバイスや AI の進化、SNS の発展に伴い、コンテンツ制作・提供の敷居が下がって

る。これにより、誰でも気軽に音楽、ビジュアル、ゲームなど、高品位コンテンツのクリエイターになれる時代になってきており、この流れは今後さらに加速することが予想される。誰でも気軽にクリエイターになれる世界においては、コンテンツクリエイターを支援するような新たな環境づくりが必要となる。バーチャルプロダクション技術や AI クラウドを活用した映像制作ワークフロー技術等のさらなる進化により、制作から流通まで、クリエイターの求める価値を提供することが求められる。特に、上述のエンターテインメントとソーシャルの融合したソーシャルエンターテインメント空間では、コンテンツクリエイターとコンテンツを享受する人との橋渡しの場としての活用が行われ、特定の人に向けてコンテンツ作成を行うような、コンテンツの超個人化なども今後進むと期待される。

## 5. サービス提供のポータル化

これまで、リッチなサービスは、インフラの整った一部の限られたエリアのみに提供されてきた。将来のエンターテインメントは、可能な限り多くの人々に広くサービス提供が行われることが望ましい。一部の限られた人々がサービスの恩恵にあずかる世界ではなく、世界中の人々が、いつでもどこでも低コストで容易に、高品位なエンターテインメントサービスを享受できる、格差の無い世界の実現が求められる。

### 4.14.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

本節では、4.14.2 節で描いた将来像の実現に向けて、今後 Beyond 5G で実現が期待される活用例についていくつか紹介を行う。なお、これらの活用例はあくまで一例であり、この他にも様々な活用例が将来登場してくることが期待される。

#### 1. インタラクティブライブミュージック

メタバース空間の活用例として、仮想空間上で、アーティストとオーディエンスがインタラクティブに交流することができるライブミュージックが挙げられる。ポリュメトリックキャプチャリング技術によってキャプチャされたアーティストをリアルタイムにバーチャル空間上に反映することにより、オーディエンスは任意の場所で、様々な角度からコンサートを楽しむことができるようになる。また、オーディエンス同士をリアルタイム接続することで、その場の熱気や一体感がバーチャル空間で共有され、より没入感の高いエンターテインメントを体験することができるようになる。Beyond 5G 通信に対して、非常に多くのユーザーを同時にバーチャル空間上に接続し、リアルタイムでインタラクティブな体験を提供できるようになることが期待される。



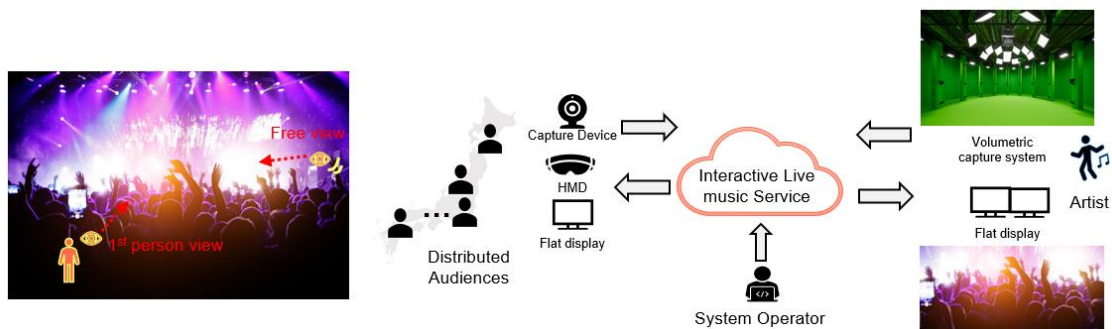


図 4.14-1 Interactive Live Music ユースケース

## 2. AR ナビゲーション

エンターテインメントとソーシャルとの融合という観点で、AR ナビゲーションは一つの重要な活用例として挙げられる。例えば、観光用途においては、旅行先をバーチャル空間内に再現し、物理空間とリアルタイムにリンクさせることで、その場所に応じた必要な情報をリアルタイムに提供することが可能になる。物理空間上にバーチャル空間上で取得された情報をシームレスに重畳することで、より直感的に誰でもわかりやすい情報提供が行えるようになる。また、位置情報ゲーム等と連動することで、新たな旅行の楽しみ方や価値提供を行うことも期待される。さらに、物理空間上の旅行者に対して、バーチャル空間内のユーザーと交流を行うことで、全世界のユーザーがバーチャル空間を介して、リアルな場での交流が可能になる。AR ナビゲーションのようなユースケースでは、物理空間のキャプチャリングから、提供情報の物理空間へのマッピングまでリアルタイムに行われるため、Beyond 5G のメインユースケースである、デジタルツインのような高度な情報処理が求められる。

## 3. バーチャルスポーツ

自らが実際に体を動かしたパフォーマンスを仮想空間上に反映させ、仮想空間上でスポーツを行うバーチャルスポーツが近年人気を集めている。例えば、バーチャルサイクリングでは、コースの風景を画面上に表示しながら、室内などに固定した自転車のペダルをこぐことにより、リアルなサイクリングを体験することができる。バーチャル空間上のコースの状況により、自転車側に負荷などをフィードバックすることで、よりリアルな体験も実現できるようになる。こういったバーチャルスポーツでは、家にいながらも世界中の人々とスポーツ競技ができるようになったり、有名アスリートとバーチャル空間上で競い合ったりといったような、新たな体験や価値提供を行うことができるようになる。このような活用例では、高画質な情報伝送だけでなく、体に装着したウェアラブル機器とのインタラクションや、スポーツ機器とのリアルタイムな連動が求められる。また、スポーツにおいては低遅延性が非常に重要になるため、これらの要求を実現する Beyond 5G 通信が求められる。

## 4. バーチャルプロダクション

エンターテインメントコンテンツ制作支援という視点では、クリエイターのクリエイティビティを刺激し、誰でも



手軽にエンターテインメントコンテンツ制作が行える環境を整えていく必要がある。一例として、バーチャルプロダクションが挙げられる。バーチャルプロダクションは、背景映像の仮想空間と、実物の被写体を同時に撮影し、合成することで映像コンテンツを制作する撮影手法であり、従来よりも手軽に映像コンテンツ制作が行えるようになるというメリットがある。誰でも気軽に高品位なコンテンツクリエイターになれる時代に向けて、こうしたコンテンツクリエイター支援のための環境構築が益々重要になってくる。柔軟性の高い撮影環境構築のため、Beyond 5G 通信を用いた有線接続の無線化などが期待される。

#### 4.14.4 Beyond 5G に求められる Capability

将来のエンターテインメント業界における Vision を実現するために、Beyond 5G 通信に求められる通信要求事項の一例について述べる。ここでは、エンターテインメント業界の進化を図 4.14-2 に、業界の将来像と要求技術を図 4.14-3 にそれぞれ示している。

超高音質・超高画質な情報伝送においては、4K/8K/大画面、高精細、高感度、高輝度/ハイダイナミックレンジ、ハイレームレート、高色域/可視光外/波長分解能といった、高品位データ通信への要求を満たす必要がある。また、ポリュメトリックキャプチャリング、三次元再合成といった、実在の人物や場所を三次元デジタルデータに変換し、それを高画質に再現する技術への対応が必要となる。これにより、実世界空間をまるごと取りこみ、後から自由に視点を動かして視聴することを可能にする自由視点映像の提供が可能となる。視線に合致した空間表現(6DoF:Six Degree of Freedom)に必要なデータ量(RAW Data)として、例えば 48-200Gbps, 更に MTP(Motion To Photon) latency として 10 ミリ秒、TTP (Time To Present) latency として 70 ミリ秒といったような要求値が挙げられている[6]。

インタラクティブという観点では、マルチモーダルなリアルタイムインタラクションを実現するための通信が求められる。特に、バーチャルとリアル融合のために、多くのセンサーデータの収集及びリアルタイムな反映が必要となる。このため、従来の基地局端末間通信のみならず、高信頼で低遅延な端末間直接通信といったような、短距離通信との融合も期待される。また、Beyond 5G 通信システムにおいては、通信機能の提供のみならず、センシング機能や位置測位機能といった通信以外の機能提供が求められる。

この他にも、環境格差の是正という観点で、通信環境および良質なコンテンツへのアクセス環境の改善のために、全世界へのカバレッジ拡張が求められる。衛星通信技術等の進化により、低コストで高品位な通信カバレッジを提供することが期待される。また、仮想空間ビジネスの拡大に伴い、情報セキュリティ問題への対策も今後非常に重要になるため、高セキュリティでレジリエントな通信ネットワークを提供することが必要となる[7]。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.14-1 に示す。

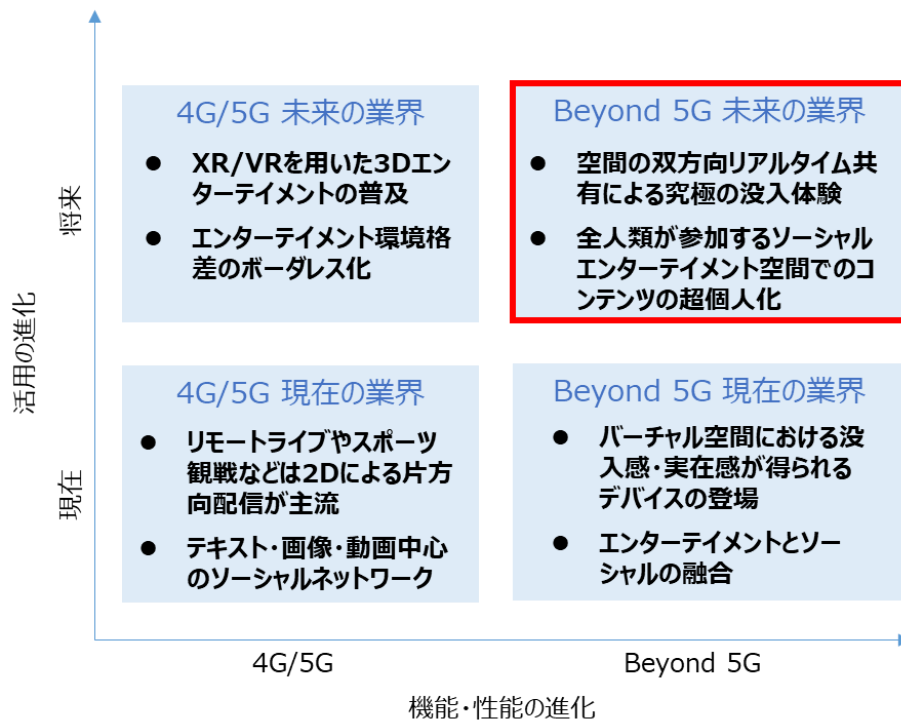


図 4.14-2 Beyond 5G における娯楽・レジャー業界

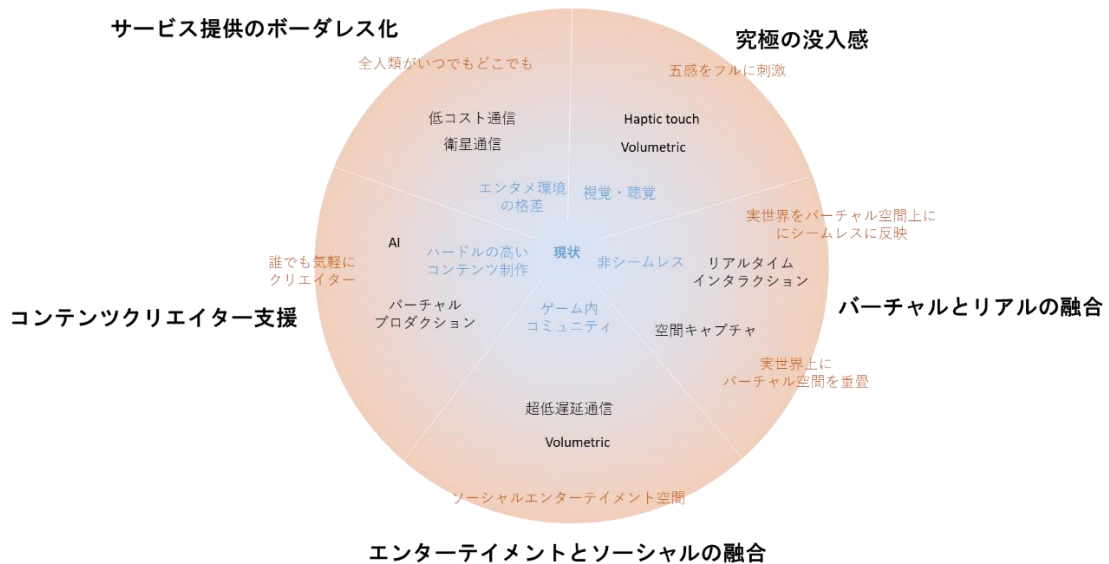


図 4.14-3 期待されるエンターテインメント業界の将来像と要求技術

表 4.14-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
インタラクティブライブミュージック	48-200Gbps	MTP ≤10ms, TTP ≤70ms	Max. Audiences > 1.2 mil		○	○	○			6DoF free view
ARナビゲーション	○	○	○		○	○	○			Cloud/Split rendering
バーチャルスポーツ	○	≤20ms			○	○	○			
バーチャルプロダクション	○	○				○	○			

#### 4.14.5 まとめ

本節では、娯楽・レジャー分野の現状と課題を勘案し、期待する娯楽・レジャー分野の将来像を描いた。そして、その将来像の実現に向けて、Beyond 5G 活用の一例を紹介し、求められる通信要件について考察を行った。本節で示した活用例においては、超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続、超低消費電力に加え、時刻同期精度、測位・センシングといった領域において高い要求性能が求められることを示した。娯楽・レジャー分野は、我々の生活を豊かにする上で必要不可欠なものであり、Beyond 5G 通信により今後の更なる発展が期待される。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 令和 3 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/pdf/index.html>
- [2] 国土交通省, 令和 3 年版観光白書.  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000008.html>
- [3] REUTERS, "Travis Scott's Fortnite concert series draws 27.7M unique views".  
<https://www.reuters.com/article/esports-fortnite-travis-scott-astronomic-idUSFLM2PGVN5>
- [4] 株式会社 KADOKAWA Game Linkage, "グローバル e スポーツマーケットレポート 2020".  
<https://www.kadokawa.co.jp/topics/4641/>
- [5] 総務省, "ウィズコロナにおけるデジタル活用の実態と利用者 意識の変化に関する調査研究", 2021 年.  
[https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/r03\\_01\\_houkoku.pdf](https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/r03_01_houkoku.pdf)
- [6] IOWN GLOBAL FORUM, AI-Integrated Communications Use Case Release-1.  
[https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-AIC\\_Use\\_Case\\_1.0.pdf](https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-AIC_Use_Case_1.0.pdf)
- [7] 経済産業省, "仮想空間の今後の可能性と諸課題に関する調査分析事業".  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210713001/20210713001.html>

## 4.15 学問・その他

### 4.15.1 宇宙

#### 4.15.1.1 現状と課題

宇宙利用は、国や特定業界、研究開発利用が先行し、一般向けは衛星放送等特定分野に留まっていたが、2022年地上系ネットワークと衛星ネットワークの統合を目的に5G標準仕様の策定が初めて行われ、より深い連携を目指した検討が今後継続される見込みである。また、宇宙開発を目指す新興国や新企業も増えてきており、宇宙利用と宇宙開発技術の活用により、社会課題解決に貢献すべく、更なる新規取組が求められる。

将来の宇宙利用が想定されるユースケースは様々な業界に関連するため、対象範囲が多岐に渡り、実現にかかる時間もここ数年から数十年と様々なケースが想定される。そこで、すでに一部業界で行われている『宇宙から地球の生活を守る』という直近の比較的身近な観点と、その技術開発の延長線上にある『生活圏・活動領域を宇宙へ拡大』という2つの観点から、将来像、活用例を次項以降に整理する。

#### 4.15.1.2 期待する将来像

##### ● 宇宙から地球の生活を守る

これまでの移動通信システム（4G/5G）では、大規模災害発生時、衛星通信をモバイルバックホールやユーザー端末との直接通信に利用し、地上災害による被害軽減に活用してきた。また観測衛星のデータは安全保障や天気予報、気候変動対策等にも利用され、私たちの生活を守るために必要不可欠となり、近年、宇宙空間活用はその重要性を増している。

今後更に普及が見込まれる自動運転や船舶自動航行のベースとなる地理空間情報の収集にも衛星は活用されており、位置・時刻・測位情報を活用して海洋状況監視を行うなど、安全保障分野における宇宙空間活用の期待は大きい。また、IoTやセンサー技術がより高度化し、宇宙からの状況把握によるインフラ維持管理や国土保全管理、資源探査等、人手を介さない効率的な取り組みも期待されている。

##### ● 生活圏・活動領域を宇宙へ拡大

2020年に民間の宇宙船が宇宙へ飛び立って以来、宇宙開発は速度を増し、宇宙がより身近なものになってきている。将来、地球上の我々にとってのサイバー空間と同様に宇宙空間は活動領域の一つとなる。地球、宇宙、サイバー空間が、シームレスにつながり、遠隔操作などを通じて自由に活動できる領域が拡大する。

#### 4.15.1.3 Beyond 5Gで実現が期待される活用例

ここでは、前記「宇宙から地球の生活を守る」「生活圏・活動領域を宇宙へ拡大」の二つの視点それぞれについて活用例を示す。なお、a,b は「宇宙から地球の生活を守る」に、c,d,e は「生活圏・活動領域を宇宙へ拡大」に対応するものである。

## a) 宇宙利用によるスマート通信インフラ活用

日本では 2020 年以降、本格的な少子高齢化と人口減少による都市部等居住エリアの点在化に伴い、各居住エリア間中継の通信需要は増大する。一方、過疎地や離島・山間部では安全安心に暮らすために必要な道路や橋梁等社会インフラ維持が困難となり、宇宙と地上の統合ネットワークを利用したスマートシティ実現が重要となる。

また郊外では、農林水産業の生産性向上や上下水道、電力送電網等インフラ維持のため、広域に点在するロボットやセンサー等モノ同士をつなぐ安定的で高速な通信ネットワークと、現地あるいは中央での AI 処理による情報システムが統合した広域ロボティクスのネットワークシステム整備が重要となる。災害や障害発生時においてもシステムの孤立化や自律化継続に支障が及ばないように信頼性の強化やデジタルデバイド（情報格差）の解消が必要となり、上空や宇宙利用による通信環境の重要性が増す。

現在のセルラーネットワークでも、僻地や島しょ部等地上通信網の未整備エリアや、移動体（船舶や航空機、携帯端末等）向けに衛星通信が利用され、航空機内 Wi-Fi 等のネットワーク基盤として活用されている。Beyond 5G の非地上系ネットワーク（Non Terrestrial Network：以下 NTN）にて宇宙や上空からのカバーにより、陸海空を網羅する通信基盤が実現すると、以下のような活用例が期待できる。

- 無人物流システムや無人タクシーなどの自動運転支援・交通管制システム・物流管理システムなどへの都市間を跨ぐ、エンドツーエンドのシームレスなサービスカバレッジ拡張
- 様々な陸上や海上の IoT センサーによるモニタリングやトレース、およびそれら収集データと AI 活用による農業・林業・水産業など一次産業向けの広域なロボット化・自動化システムの提供
- 災害復旧対応や建設現場、イベントなど一時的な通信接続需要に対し、ブロードバンドサービスやネットワーク接続サービスの提供
- 地方の 5G エリアやローカル 5G エリアなどへのバックホール・バックボーン回線を提供し、リモートワーク・遠隔教育・遠隔医療や広域生活情報や放送代替サービスの提供などのスマート化
- 上空のドローンや NTN に搭載した IoT センサーによる保安警備や自然災害予兆などの自動化・スマート化

更に将来、テラヘルツ波や宇宙光通信による大容量・高速通信が実現すれば、地上・海洋・上空・宇宙をシームレスにつなぎ、様々な業界の地上ネットワークと融合するネットワーク基盤で、あらゆる情報をいつでもどこでも活用できるようになる。例えば現在、クラウド上の GPS 情報から通行可能ルートや渋滞回避ルートの情報がリアルタイムに提供されているが、将来はクラウド上の GPS 情報や車載カメラ・ドローンカメラの情報、あるいは事故・工事情報等を総合して渋滞回避ルートを取得し、無人物流システムのみならず全ての自動車を群または個々でコントロールし、各々の最終目的地まで最適ルートでかつ、省資源・低 CO<sub>2</sub> 排出な自動運転を行うような利用も実現できるかもしれない。

また NTN の中で HAPS のみを経由したグローバルあるいはリージョナルな HAPS ネットワーク網の構築により、陸上・海底の光ファイバー内の光速（約 20 万 km/s）伝送よりも 1.5 倍速い無線通信（約



30 万 km/s) を活用した極低遅延ネットワークでの、応答速度要求が極めて厳しい早期警戒・警報システムやロボティクスアプリケーションにおけるミッションクリティカルな制御など、陸海空を問わずそれら新しい領域に適用できるようになるかもしれない。

Beyond 5G の技術進化と通信基盤の進化を図 4.15-1 に示す。

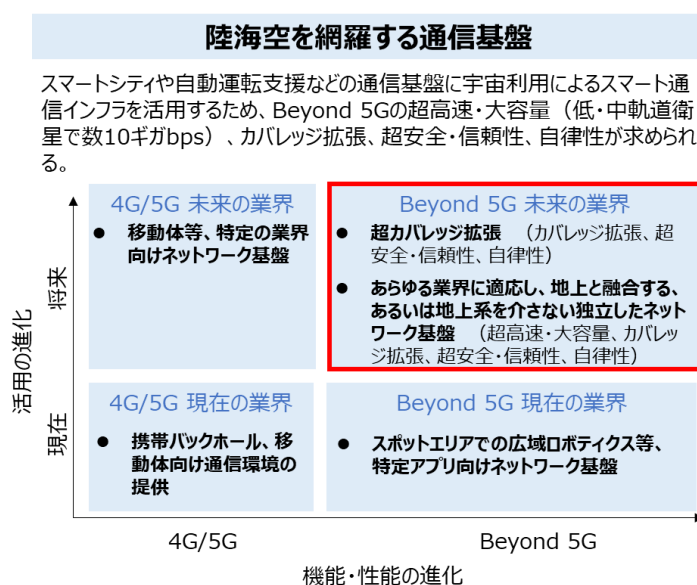


図 4.15-1 Beyond 5G における宇宙業界①

## b) セキュアでレジリエントな環境による宇宙生成データ活用

世界中で近年増大・激甚化する自然災害や火山活動の監視への対応や、地域紛争の激化に伴う安全保障への対応、地球規模の異常気象や気候変動対策等の観点から、宇宙から地球を観測・監視する需要が急増し、衛星画像・データの活用が進んでいる。例えば、農作物・水産物の生産管理や食害・盗難対策、保険審査などにすでに活用されており、気象観測衛星データがスーパーコンピューター解析により天気予報の精度向上に貢献するなど、私たちの生活に密接に関連し必要不可欠なものとなっている。

今後さらに、宇宙から見た上空データ、気象データ、人やモノの位置・動き等、宇宙で観測し生成されたデータ（以下、宇宙生成データ）の活用は重要となり、その大前提としてセキュアでレジリエントな環境による宇宙生成データ活用基盤として Beyond 5G の超安全・信頼性、カバレッジ拡張が求められる。

- 量子暗号技術によるセキュリティ強化  
現在の暗号技術の危殆化を予想し、量子計算機では解読不可能な耐量子暗号技術や、光子を用いた量子暗号技術の開発が行われているが、地上ネットワークでは対応しにくい大陸間通信や移動体通信のセキュリティ向上に、将来、量子暗号鍵の NTN 光通信による配信が期待されている。また、量子暗号技術による衛星間ネットワークのセキュリティ向上も期待できる。[1]



- 宇宙生成データ等の活用基盤

現在、宇宙からのセンシング情報や陸上・海上・上空などの様々な IoT センシングデータを活用する際、それぞれ専用のネットワーク経由で集められた過去のデータは、地上のスーパーコンピューターや地上クラウド上で AI 処理した上で、主に企業向けに提供されている。今後、データ収集時間の短縮やセキュリティの向上が図られたクラウド経由で汎用化・公開化された AI 機能とともに提供され、よりリアルタイムに近いデータ活用が個人で行えるようになる可能性がある。

将来、地上災害の影響を受けにくい宇宙空間にデータセンターを構築し、宇宙生成データの膨大な生データをその場で AI 処理のデータ分析・判定を同時に行うことにより、地上に情報提供するデータ量の大幅な削減を行うことで、宇宙生成データのリアルタイム活用が期待できる。また、データプラットフォームを量子暗号技術によりセキュアにクラウド提供できれば、宇宙生成データ以外にも、個人情報に紐づくデータや安全保障にかかわるデータなど、リアルタイムに地上へセキュアに情報提供されるべきデータを Beyond 5G によって、宇宙空間のデータセンターに個人が直接アクセスし、ユーザーニーズに合った情報を入手できるようになるかもしれない。

また近年、グローバル化による経済圏の拡大及び交流人口拡大によるパンデミック（COVID-19 等）のリスクを受け、一気に顕在化した「ニューノーマル」への対応として、リモートワークや遠隔診療、オンライン教育等に必要な情報を、いつでもどこでも個人が便利に利活用できる通信及びデータ基盤が求められている。前述のスマート通信インフラと、このデータ活用基盤を組合せ、確実な個人認証が保証されるアバター活用が実現できれば、これをテレワークに活用し、例えば、様々な制約で活動範囲の縛られる対象者に労働環境を提供するなど、サイバー空間を通じ、これまでの様にリアルな時間や空間に制約されない生活も可能となる。性別、年齢、国籍、使用言語、ハンディキャップの有無などに囚われない真にインクルーシブな世界を構築し、アバターのみでの活動による生活の維持・発展に必要な環境や対価の獲得など、新たな価値を生むことが期待される。

Beyond 5G の技術進化と宇宙生成データ活用基盤の姿を図 4.15-2 に示す。



通信環境の下、宇宙ホテルからのワーケーションが現実味を持つ。更に、通信技術に加えてロボット技術の向上により、現在は宇宙飛行士が行っている ISS のメンテナンスを、ロボットにより地上からの遠隔操作あるいはロボットの自律化機能により実施することが可能となり、さらには宇宙飛行士ではなし得なかったインフラの緊急修理も実現可能性が高まる。また、地上特有の災害が発生しない宇宙環境を利用して、宇宙空間に生物の種を保存するのと同じアナロジーで、人類の生命を守るため、軌道上におけるバックアップ設備や緊急避難場所（Safe Haven）といったインフラ整備・運用の実現も見込めるだろう。

- **スペースデブリ対策**

宇宙空間で安全・快適に過ごすためには、宇宙の環境保全について配慮する必要がある。最たる課題であるスペースデブリ増加に対する取り組みとして、開発段階でのデブリ化しにくい設計、デブリとの衝突を回避する運用、運用後に軌道離脱させデブリにしないといった策がある。その他、現状はデブリを観測し、追跡・捕獲し、大気圏へ再突入・リリースさせて除去するという、アクティブではあるが個々の対象物に対して運用が必要となる地道な検討も実施していて、デブリの軌道をレーザーにより変更させる案も検討されている。

通信技術が発達し、Beyond 5G 通信利用が出来るようになるとうなるか。秒速約 8km 以上の高速で飛来するデブリ等の障害物を地上レーダー等で検知した結果から、サイバー空間で障害物の軌道を正確に予測し、衝突回避が必要な宇宙機に瞬時に知らせることで、宇宙機は、無駄なく効果的に衝突を防ぎながら軌道上を周回することが出来る。グローバルな宇宙空間とサイバー空間とを連動させることにより、多くの軌道上インフラの安全性・高可用性を保つことが出来るであろう。

- **軌道上サービスと自律運用**

現在、軌道上にあるインフラは大きく「有人拠点（ISS 等）」と「衛星」の二つが存在する。ISS は先述の通り、宇宙飛行士によるメンテナンスが行われているが、衛星は無人機であるため、原則、機器の故障や設計寿命により運用を終えてしまう。しかし、業界における技術が発達すれば、機器交換による修理・アップグレードサービスや衛星への軌道上燃料補給による延命サービスが実現する。一方、衛星機能が向上し衛星の自律化が進展すれば、Beyond 5G 通信を宇宙空間で利用することで、衛星を始めとする様々な宇宙インフラの情報通信ネットワーク、NTN の自動運用、自律化も可能となる。軌道上サービスと組み合わせることにより、地上のインフラに依存しない宇宙空間でのレジリエントなインフラ・通信ネットワークを構築することが期待できる。

- **新たな軌道上インフラ建設**

2020 年末、米国による月探査アルテミス計画への日本の参加について了解覚書が締結された。有人月面探査の中継拠点となる Gateway の建設に向けて、日本実験棟「きぼう」・宇宙ステーション補給機「こうのとり」の開発・運用の知見を活かした日本の貢献が注目されている。また、月面探査に向けたランダーやローバーの開発にはスタートアップを含む日本企業が既に着手しており、官民

連携で推進している。

これらの開発の先には、「宇宙」のためだけでなく「地球」のためのインフラ建設も叶うだろうと考える。例えば工場やプラントを宇宙空間に建設し、ゴミ処理や資源回収等を遠隔運転することで、地球上の環境負荷低減に貢献することが出来る。地球上でもカーボンニュートラルの実現に向けて様々な施策が打ち出されているが、今後は宇宙空間に活路を見出す可能性もある。その他、太陽光による軌道上からの発電・送電等の電力エネルギーネットワークの構築ができれば、天候や災害等に左右されない自然エネルギー安定利用が可能となる。

一方で、宇宙においても地球同様、環境保護を考慮する必要がある。上述のスペースデブリを始めとして、現地資源利用（ISRU：In-Situ Resource Utilization）も目標の一つである。例えば月面に存在する「レゴリス」と呼ばれる砂状粒子を用いた焼結材やウォーターレスコンクリート等を、月面基地の建材として採用する、といった資源の地産地消を目指している。将来的にはデジタルツイン、ロボット技術を駆使して、これら建材加工や組立製造を全て遠隔で自動実施するため、サイバー空間と同期させ、生産計画への反映、不具合時の迅速な対応、無駄のない効率的かつ確実な運用の実施が求められ、その実現のために将来的には高速大容量な Beyond 5G 通信の適用も期待される。

Beyond 5G の技術進化と活動領域拡大活動の姿を図 4.15-3 に示す。

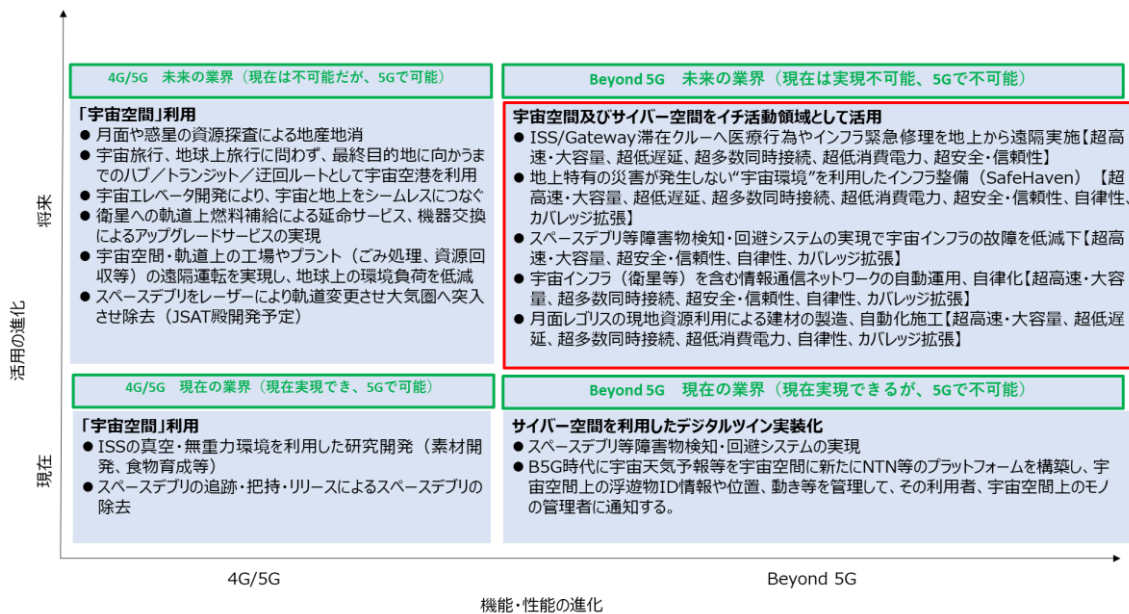


図 4.15-3 Beyond 5G における宇宙業界③

#### d) 「通信」を意識しない、常に情報が手元にある世界で宇宙機ネットワークを制御

モバイル端末所有者の9割がスマートフォンを利用している現代において、欲しいアプリの容量が大きいのでWi-Fi環境でダウンロードしたり、動画を見る頻度が高いためデータ通信量無制限の料金プランを申

し込んだり、今は「通信」を意識する時代である。Beyond 5G 通信が普及すると、超高速・大容量・超低遅延・超低消費電力、といったことが実現され、多くのユーザーにとって「通信」を意識する理由が解消されることとなる。

今、衛星を用いて僻地や島しょ部、移動体向けに通信環境を提供しているが、Beyond 5G 通信が可能となることで、地上・海洋・上空・宇宙をシームレスにつなぎ、あらゆる情報をいつでもどこでも活用することが出来る。

成層圏プラットフォームは、宇宙空間からの電波監視・電波受信とその信号を地上ユーザーに送ることが可能となり、宇宙と地上とのシームレスな通信の一翼を担うことが出来る。また、その実現に向けた一端に、高出力、高効率化が期待されるダイヤモンド半導体の宇宙技術活用による、Beyond 5G インフラの通信能力向上が期待されている。

さらに、月・火星・深宇宙空間と地球上の空間がそれぞれローカルな Beyond 5G 通信環境を整備し、その間を Beyond 5G 通信およびサイバー空間を介して接続すれば、深宇宙と地上はシームレスにつながり、お互いの距離を意識することなく、その情報を活用できるであろう。

Beyond 5G の技術進化と宇宙機ネットワーク制御の姿を図 4.15-4 に示す。

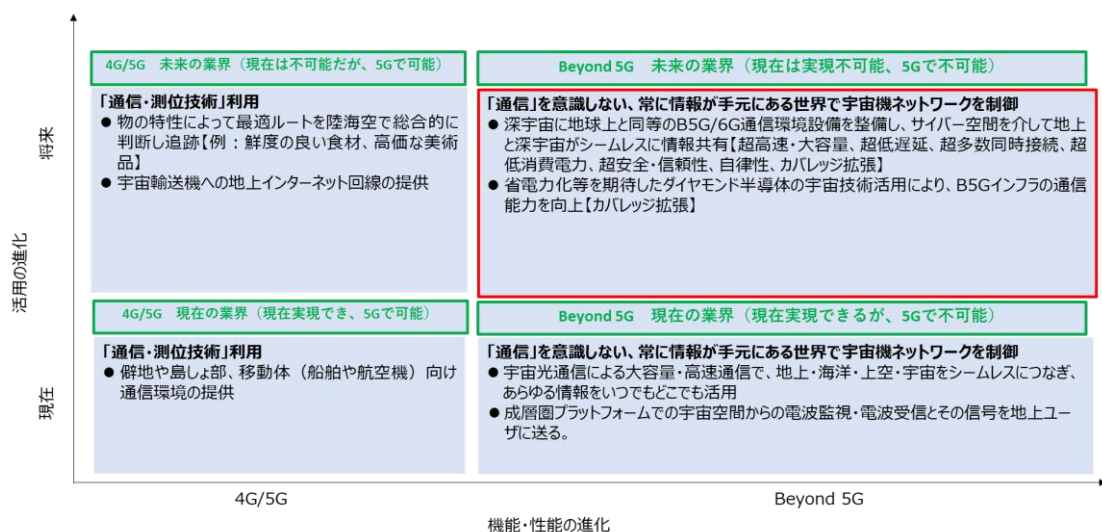


図 4.15-4 Beyond 5G における宇宙業界④

#### e) 宇宙・サイバー空間からの人類活動への貢献

国境のないサイバー空間においては GDP 指標の意味合いも異なり、人々の価値観も富の追及に限定されず、質的な豊かさや世界への貢献を重視する方向に変わると言われている。同じく国境のない宇宙をサイバー空間同然に活用することが可能であり、文化的や宗教的価値観の違う人同士が宇宙・サイバー空間を介してコミュニケーションすることにより、これまでに無い新たな価値観の創造や、多様な生き方を肯定する社会構築の実現が可能となる。



- 災害対策

日本は災害が多く、IoTやセンサー技術を活用して宇宙からの状況把握を今まさに行おうとしているが、通信の観点では冗長構成を組む程度の被害軽減策しか現状講じられていない。今後、地球規模の気候変動の診断や予測精度も向上し、特に Beyond 5G を使用できる環境となれば、世界中をリアルタイム・高頻度・高分解能で宇宙から定点観測することが可能となる。例えば軌道上で気象予測モデルをまわすことで、高精度な予測をタイムリーに行うことができ、更には、軌道上でGPSによる位置情報を取得することで、適切なタイミングでの避難勧告を宇宙空間からピンポイントで個人端末に指示することも可能となるだろう。宇宙と直接通信できることは、地上基地局の被災状況の影響を受けないという点でも強みである。

- 農業・漁業における課題対策

上述の「災害対策」と似た観点で、農業や漁業に対して宇宙が出来る貢献について考える。現状、観測衛星データを用いて農作物の生産管理に利用したり、野生動物被害を防ぐために上空から監視したりしている。更に業界内でDX等が促進されれば、日本中ひいては世界中の農作物の生産状況を監視すると共に、国内あるいは各国の需要情報を捉え、需給バランスを予測することで、食品ロス問題の解決に繋がる。今後のBeyond 5G活用により、宇宙からの観測データの質・量ともに向上が見込まれ、農作物の被害状況や生育状況を精緻に予測して事前対処が可能となるだろう。また、衛星による海面水温等の持続的な観測データの蓄積により、その違いによる水産物の生息地の移動やその生態変化の兆しを知ることで、魚類の生態系に配慮した漁業の在り方に貢献できるだろう。

- 教育への貢献とエンタメによる経済活動への貢献

宇宙を用いた教育として、現状はISSからのライブ中継や、天文観測衛星による宇宙からの天体観測が行える。エンタメ要素としては、一部の富裕層による地球周回旅行でなく、マス層もVRで視覚的に宇宙旅行を楽しむことができ、また無重力環境を体験する設備等も存在する。

ここにBeyond 5G通信が登場すると、バーチャルに用意された宇宙空間に自らのアバターを代理派遣することで、一般ユーザーも宇宙旅行を楽しむことが出来る。触覚信号も伝達できるアバター技術が実現されれば、地球上旅行とは違ったアクティビティを体験することが出来る。また、宇宙空間でなく地球上に目を向けると、場所や時間の制約を受けない教育コンテンツが普及すると考えられ、教育環境のデジタルデバインド解消に繋がることが期待される。触覚信号も伝達できれば、楽器のレッスン受講やバーチャル演奏も可能となる。このように、Beyond 5G通信の確立によって、リアルとバーチャルが融合し、時間や場所の概念を一新した多様な暮らし方が出来る社会の形成が期待される。

Beyond 5Gの技術進化と人類活動への貢献の姿を図4.15-5に示す。



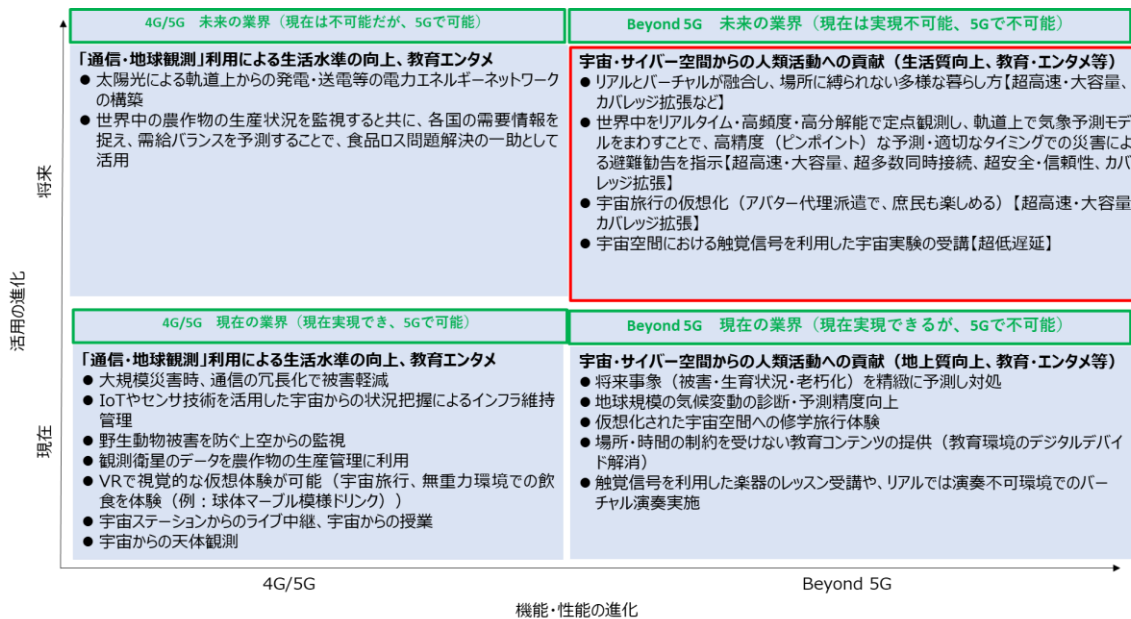


図 4.15-5 Beyond 5G における宇宙業界⑤

#### 4.15.1.4 Beyond 5G に求められる Capability

Beyond 5G に求められる超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続を実現するためにはそれらを実現するための技術開発が必要不可欠となる。以下に Beyond 5G で求められる要素とそれらを実現するために求められる技術を概観する。

##### (a) 超高速・大容量

地上ネットワークを宇宙空間に拡張するには宇宙—地上間の超高速・大容量化が不可欠となる。Beyond 5G においては 5G で採用されている周波数帯 (3.7GHz 帯、4.5GHz 帯、28GHz 帯等) を拡張し、より高い周波数のミリ波、テラヘルツ波、光技術の採用による広帯域通信が可能となる。高周波化に伴い小型化、高集積化の技術もより求められる。また、信号の大容量化のための高速 (広帯域) 信号処理技術、並列信号処理技術は高速化のための技術として不可欠となり、複数アンテナによる MIMO 技術も有望な技術である。

##### (b) 超低遅延

静止軌道衛星とのネットワーク接続には物理的に片道 120 ミリ秒程度の伝搬遅延が発生する。伝搬遅延の許容されないシステムとの接続においては超低高度衛星 (軌道高度 200km 程度)、あるいは HAPS (高度 20km 程度) 等を活用することにより数ミリ秒程度の伝搬遅延に抑える等が可能となる。宇宙通信の組み合わせによりユーザーやユースケースの遅延要求に応じた最適なネットワークを構築することが必要である。

#### (c) 超多数同時接続

Beyond 5G の世界ではより多くの人、モノとの接続が要求され、宇宙からの運用を想定した場合、一つのアンテナカバレッジで同時に多数のユーザーとの通信、あるいは多数のセンサーからのデータを受信できることが大きなメリットとなる。多数接続時の分散処理、あるいはマルチホップ通信を用いた分散ネットワークの技術もリソースに制限のある衛星側の実現性という観点で有効となる。静止衛星からの超広カバレッジと低軌道衛星との短距離通信を組み合わせることでより効率的なネットワークの構築が可能となる。

#### (d) 超低消費電力

高速、大容量化によって消費電力の増大が避けられない。軌道上の衛星は、排熱が大きな課題となるためデバイスの消費電力を抑えることが不可欠となる。現在の通信技術として多く採用されている GaN や InP 等の化合物半導体に加え、より大電力、高効率、高信頼性が期待できるダイヤモンド半導体等の新規半導体材料の開発が求められる。また、信号処理を並列化して動作周波数を下げ低消費電力化を目指すことも今後の大容量化に向けては不可欠となる。

#### (e) 超安全・信頼性

Beyond 5G においてはデータの安全性、信頼性の要求がますます高くなることが予想される。宇宙空間にデータサーバーを置くことによりその安全性、信頼性を確保する、あるいは量子暗号通信を宇宙通信に適用することによりそれらの要求を満足することが可能となる。

#### (f) 自律性

複数低軌道衛星のコンステレーション等、今後の衛星運用はますます複雑化することが予想され、地上のオペレータがすべてを判断して運用することは不可能となる。最適な運用タイミングやユーザーへのサービス提供は AI 等を活用することにより自律的に行う必要がある。また、衛星の運用においても回線の状態を衛星自らセンシングし最適な通信パラメータを自律的に設定するような運用が考えられる。

#### (g) カバレッジ拡張

高度 20km 程度の HAPS、高度数百 km 程度の低軌道衛星、高度 36,000km の静止軌道からの通信はそのアンテナカバレッジと通信容量（通信電力）がトレードオフの関係にある。

軌道高度の違いとネットワークの階層を対応付け、且つデジタルビームフォーミング技術と組み合わせることでより柔軟に、より広範囲なネットワーク拡張が可能となる。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.15-1 に示す。

表 4.15-1 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
宇宙利用によるスマート通信インフラ活用	○ ミリ波、テラヘルツ波の利用 高集積化、複数アンテナ MIMO			○				○ ※	○ AI活用	※HAPS、低軌道衛星、静止衛星等軌道高度の違いとネットワークの階層を対応付け、且つデジタルビームフォーミング技術と組み合わせる
宇宙生成データ活用		○ 超低高度衛星、HAPSの利用		○ 量子暗号				○ ※	○ AI活用	
宇宙空間を活動領域として活用	○			○	○					
常に情報が手元にある世界での宇宙機ネットワーク制御	○	○	○	○					○	
宇宙空間からの人類活動への貢献	○	○						○		

#### 4.15.1.5 まとめ

本節では、宇宙業界の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G の活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、カバレッジ拡張、超安全・信頼性、自律性、超低遅延、超低消費電力、超多数同時接続が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省, 令和 3 年版情報通信白書.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>
- [2] 総務省, Beyond 5G 推進戦略 – 6G へのロードマップ –.  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000696613.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf)
- [3] 内閣府, 宇宙基本計画.  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei\\_fy02/fy02.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei_fy02/fy02.pdf)
- [4] 内閣府, 科学技術・イノベーション計画.  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html>
- [5] 日本航空宇宙学会, JSASS 宇宙ビジョン 2050.  
[https://www.jsass.or.jp/wp-content/uploads/2019/05/JSASS\\_SpaceVision2050\\_20190313\\_JPN.pdf](https://www.jsass.or.jp/wp-content/uploads/2019/05/JSASS_SpaceVision2050_20190313_JPN.pdf)
- [6] JAXA, 宇宙科学・探査ロードマップ.  
<https://www.isas.jaxa.jp/researchers/info/002218.html>
- [7] NICT, Beyond 5G/6G ホワイトペーパー1.0 版, 2021 年 3 月公開.  
[https://www2.nict.go.jp/idi/common/pdf/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v1\\_0.pdf](https://www2.nict.go.jp/idi/common/pdf/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v1_0.pdf)

## 4.15.2 HAPS

HAPS (High Altitude Platform Station)は、無線通信に関する国際標準規格を策定する組織である ITU-R が作成した「2030 年以降に向けた将来技術トレンド」の中でも Beyond 5G の技術の一つとして期待されている[1]。本節では、HAPS の現状と課題を勘案し期待する将来像を描くとともに Beyond 5G で実現が期待される活用例及び求められる Capability について記述する。

### 4.15.2.1 現状と課題

HAPS は高度 20km 程度の成層圏を飛行し続ける無人航空機・飛行船などが基地局となり、山岳部や離島・発展途上国など通信ネットワークが整っていない場所や地域に、安定した移動通信や固定回線の代わりのインターネット接続などを提供することができる。

HAPS のバックホール接続としては、HAPS-地上ゲートウェイ間通信のみでなく、HAPS-HAPS 間通信や HAPS-衛星間通信も考えられ、これらの実現により地上ゲートウェイを配置することが困難な場所にも HAPS を展開できる。また、HAPS-HAPS 間や HAPS-衛星間は大気が薄く遮蔽物もないため、高周波の電波や光でも安定したリンクを張れるというメリットもある。従って、衛星など異なる高度のプラットフォームと HAPS との非地上系ネットワークシステム間の連携を進めていくことも重要である。

近年、国内外の様々な企業で成層圏での通信試験を実施しているが、HAPS が将来普及するためには、以下に示す制度的な課題を解決していく必要があると考えられている[2]。

#### 1. HAPS 向け航空制度整備

無人航空機である HAPS 向けの国際ルールが未整備であり、成層圏での飛行に関する国際および各国での航空制度の整備が必須となる。日本では特区における試験導入を進めることも有効な手段となりえる。

#### 2. 機体の各国共通の審査基準整備

成層圏でのテスト飛行に対しても、各種機体における各国共通の審査基準が定まっていなく、飛行許可を取得するまでのプロセスが見通せない。各国の航空当局が各種機体向けに共通の審査基準を策定することが強く求められる。

#### 3. HAPS 向け周波数の追加特定

現在の ITU の電波規制では、HAPS が携帯基地局として使用できる周波数帯は 2.1GHz のみである。ただし、2023 年 ITU 世界無線通信会議(WRC-23)において追加の周波数帯(694-960MHz,1710-1885MHz,2500-2690MHz)で HAPS が利用できるよう検討している。

#### 4. 隣国との電波干渉調整の制度整備

HAPS は成層圏から超広域カバレッジを形成するため、国境近くでは隣接する国に対する電

波干渉のケアが必要となる。隣接する国への電波干渉調整について各国共通の制度が整備されることが望まれる。

#### 4.15.2.2 期待する将来像

HAPSは従来の地上基地局では展開が困難であった、未接続・接続困難エリア（ルーラルエリア等）のみでなく、上空・海上を含むモバイル産業の未開拓エリアへの効果的な展開を可能とする。これは従来の水平方向に加え、垂直方向も拡張した三次元カバレッジを意味し、あらゆる場所であらゆる人々にインターネットを届けられる世界を実現するとともに、HAPS を活用した他産業からの転換も含む新たな国内産業の創出・育成も期待できる。

加えて HAPS は自然災害の増加、なくならないデジタルデバイド（情報格差）、減らない CO<sub>2</sub> 排出量といった社会課題を解決する手段としての活用も期待できる。具体的には、自然災害に強いネットワークの提供、超広域カバレッジによるデジタルデバイドの解消、ソーラープレーン利用によるカーボン削減といった効果が期待され、これらは SDGs における強靱（レジリエント）なインフラ構築、情報格差の是正、グリーンエネルギー利用による気候変動への対応といった目標達成へ貢献するソリューションとなり得ると考えられる。

#### 4.15.2.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

Beyond 5G で実現が期待される HAPS を活用した主な活用例として、以下 4 つを紹介する[3][4]。

##### 1. 未接続・接続困難エリアへのカバレッジ拡張

世界人口の 40%以上がルーラルエリア等の遠隔地を中心にインターネットにアクセスできない状態にある。HAPS は地上 IMT 基地局と同等の遅延で上空およそ 20km から超広域カバレッジを提供し、未接続・接続困難エリアへの効率的なカバレッジ拡張を実現する。

##### 2. 災害対策・復旧

毎年世界中で多く発生する自然災害の影響は大きく、しばしば地上の通信システムが破壊され、必要な緊急通信ができなくなる。HAPS は成層圏に位置し、航空交通や天候に左右されず自由に移動が可能のため、地上の自然災害の影響を受けず、災害時の救助・復旧活動をサポートする。

##### 3. 都市型エアモビリティ

空飛ぶクルマ、ドローンなどの都市型エアモビリティ（UAM）は、人口が密集した都市で乗客や物資を輸送するための新たなシステムとして近い将来、期待されている。HAPS は上空からそれらエアモビリティに三次元カバレッジを提供することで、遠隔操縦航空機システム（RPAS）や最終的には自律飛行の実現をサポートする。

#### 4. IoT (Internet of Things)

今までインターネットに繋がっていなかったセンサー、家電、機械、車などのモノ向けに通信サービスが提供されることで、新たな産業やビジネスが生まれることが期待される。HAPS は超広域カバレッジを提供することができるため、あらゆるものが、いつでも、どこでも繋がる世界の実現をサポートする。

##### 4.15.2.4 Beyond 5G に求められる Capability

これら活用例を実現するための持続可能な超広域カバレッジ通信の提供に向けて、Beyond 5G では以下に示す新たな Capability が求められる。また、これらに加えて地上 IMT と同じ端末が使えること（人々にとって手の届く範囲の安さで購入できること）、IMT-2020 (5G) の eMBB (enhanced Mobile Broadband : 高速・大容量) 同等の遅延量に収まることも Beyond 5G における Capability として重要である。

- 最大水平カバレッジ  
基地局 1 つでカバーできる最大のエリア半径 (単位 : km/基地局)のこと。基地局 1 つで半径数十 km から数百 km 程度のエリアをカバーすることが求められる。
- 最大垂直カバレッジ  
基地局 1 つでカバーできる最大の高さ (単位 : km/基地局)のこと。地上基地局ではカバーできない上空数 km 程度をカバーすることが求められる。
- カーボンニュートラル  
運用時に CO<sub>2</sub> 排出ゼロで提供する能力のこと。

上記活用例と Beyond 5G に求められる Capability の対応を表 4.15-2 に示す。

表 4.15-2 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
未接続・接続困難エリアへのカバレッジ拡張								半径 数十から数百km		カーボンニュートラル
災害対策・復旧								半径 数十から数百km		カーボンニュートラル
都市型エアモビリティ								上空 数km、半径 数十から数百km		カーボンニュートラル
IoT								半径 数十から数百km		カーボンニュートラル

##### 4.15.2.5 まとめ

本節では、HAPS の現状と課題を勘案して期待する HAPS の将来像を描いた。そして、将来像の実現に向けて Beyond 5G の技術の一つとして期待される HAPS を活用した活用例を紹介し、それらに求められる Beyond 5G としての Capability について記述した。HAPS の活用において求められる



Capability としては、カバレッジ拡張に加え、カーボンニュートラルが考えられる。SDGs に掲げられる様々な社会課題に対応するためには、HAPS のような持続可能な超広域カバレッジ通信を提供できる技術に期待が寄せられている。

#### 参考文献

- [1] ITU-R, Report M.2516(Future technology trends of terrestrial IMT systems towards 2030 and beyond).  
<https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2516>
- [2] HAPS Alliance, HAPS テストフライト白書.  
[https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/SpA\\_Flight\\_Communication\\_Tests\\_White\\_Paper\\_Japanese\\_Final\\_2021.pdf](https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/SpA_Flight_Communication_Tests_White_Paper_Japanese_Final_2021.pdf)
- [3] HAPS Alliance, HAPS 白書.  
[https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/HAPS\\_White\\_Paper\\_JP-1.pdf](https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/HAPS_White_Paper_JP-1.pdf)
- [4] GSMA, HAPS 白書.  
<https://www.gsma.com/futurenetworks/resources/high-altitude-platform-systems-towers-in-the-skies-version-2-0/>

### 4.15.3 社会

#### 4.15.3.1 現状と課題

ここでは、2つの社会課題に着目し「2030年代のあるべき社会」において Beyond 5G をどのように活用するのかについて考察する。

##### ● 世界的な社会課題

世界的な社会課題については国際的な開発目標 SDGs(持続可能な開発目標)で設定された17の世界的目標が代表的である。SDGsは暮らす場所や仕事などそれぞれの状況により様々な解釈が考えられるが、成果文書として発行された「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」[1]では、目標達成のためには経済や社会及び環境の三側面を調和させることが欠かせないことが述べられている。SDGsによる社会課題の解決に向け Beyond 5Gで提供される通信技術のさらなる発展が期待される。

##### ● 日本の社会課題

ここでは、日本が抱える最大の社会課題として、人口減少社会・少子高齢化の人口問題と、脱炭素化の取り組みや気候変動も含めた自然災害に対する被害軽減の取り組みなどの環境問題の2つの問題に焦点をあてる。

人口減少社会・少子高齢化の人口問題[2][3]に関して、日本は、総人口に占める65歳以上人口の割合が世界で最も高い[4]。これにより、働き手不足による生産力低下、地方活力低下に伴う財政の悪化による経済的影響、年金や高齢者医療費・介護費等の社会保障への現役世代の負担の増大などさまざまな課題が挙げられ[5]、これらに端を発してさらに多岐に渡る問題につながっていく事が想定される。また、環境問題に関しては気候変動に伴う昨今の甚大な自然災害の発生が多発している[6]。さらに日本は2011年3月の東日本大震災や1995年1月の阪神淡路大震災、2014年の御嶽山噴火のような地震や津波、火山による災害が発生しやすい国土となっている[7]。日本で一番高い富士山も活火山であり注意喚起が促されている[8]。

##### ➤ 人口問題

人口減少社会・少子高齢化に代表される人口問題は、国内需要の減少による経済規模の縮小、労働力不足、国際競争力の低下、医療・介護費の増大など社会保障制度の崩壊、財政危機など様々な社会的・経済的な課題の深刻化を引き起こすことになる。また、このような国レベルの問題だけではなく、個々人も「人生100年時代」と言われるような長い人生を、いかに有意義に過ごすかなどの問題も含まれる[9]。

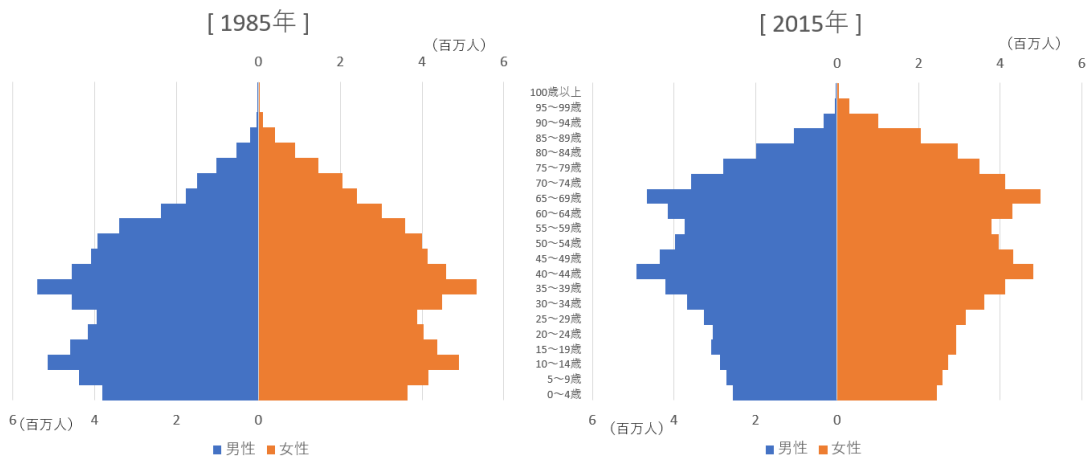


図 4.15-6 1985 年および 2015 年の日本の人口  
 (「国勢調査 (総務省統計局)」より著者作成) [10]

➤ **環境問題**

環境問題とは、人間による化石燃料の大量消費等で大気中の二酸化炭素の濃度が増加する事により地球温暖化が進み、それに伴い気候変動による災害が発生したり、人間の様々な活動による大気や海洋、土壌の汚染などが挙げられ、人類の長期的な生存を脅かす問題である。

4.15.3.2 期待する将来像

● **人口減少社会・少子高齢化対策**

1985 年および 2015 年の人口ピラミッドが示すように人口減少社会・少子高齢化は大きく進んでいる。内閣府発行の少子化対策白書[2]および高齢社会白書[3]では、「希望を生み出す強い経済」、「夢をつむぐ子育て支援」、「安心につながる社会保障」の「新・三本の矢」の取組を通じて「一億総活躍社会」の実現を目指すことにより、構造的な問題である少子高齢化に真正面から挑むと記されている。

● **自然災害対策**

自然災害においては、原因となる地球温暖化や環境破壊などの原因に対して対策が必要となるが、2030 年代ではこれらの上昇をくいとめることが出来ない状況である。さらには自然災害には風水害や地震なども含まれ、伴って発生する通信障害に対して、通信手段をいち早く再確保できる仕組みは今後通信業界に強く求められるだろう。

自然災害が発生した際の人命および財産の確保および災害発生時の早急な支援提供の為に必要となる「事前に災害を予知／検知し避難できる」、「被災してもすぐに安否確認や支援物資や必要な情報が得られる」、「行方不明者をすぐに見つけられる」が、2030 年のあるべき姿であると考えられる。

#### 4.15.3.3 Beyond 5G で実現が期待される活用例

##### ● 人口減少社会・少子高齢化対策

少子高齢化による労働力不足を解決するためには、働きたくても働けない人々の就業促進による労働力の増強と共に、AI や IoT 活用による自動化を促進し生産性を向上させ労働需要を削減する事が必要となる。例えば、加齢や障がいによって失われた能力を補完する技術、子育てをする全ての人々が安心して働く環境を改善する技術、さらには外国人労働者が直面する言語の壁を解消する技術や日本に物理的にいけない労働者がリモート環境で移動することなく日本で働ける技術などが期待される。

長寿命化により高齢者が将来にわたり展望を持ち続け、生き活きと暮らせる社会の実現に向け、現在では高齢者や乳幼児を見守るための IoT サービスや、ウェアラブルデバイスやスマホアプリによる各種健康管理サービスの提供などがおこなわれている。さらに交通弱者対策を一例にとると、自動運転バスは現在も実証実験が盛んに行われているが、バスは決められた場所への移動手段として提供されるものであり、2030 年代には日々の散歩など一人ひとりが行きたい場所に行ったり、移動そのものを楽しんだりといった個々人の多様性に合わせたパーソナルモビリティとそれを支えるインフラシステムなどが整備された社会となる事が期待される。そしてこの取組を通して、単なる交通弱者対策としてだけでなく、見守りサービスの進化や独居支援、生きがい創生などにもつながっていく事が期待される。こうした社会の実現には、Beyond 5G の活用が重要な役割を果たすことになるだろう。

そして 2020 年にはコロナ禍が大きなきっかけとなり、移動制限に伴うリモートワークや遠隔授業などが推進されているが、通信技術の進化による更なる充実化が期待される。例えば、拡張現実技術の活用やロボティクスとの組み合わせによる低遅延・高画質のリモートワーク・遠隔授業の進化、超安全・信頼性を担保したオンライン投票などが考えられ、「一億総活躍社会」を後押しするものとなり得る。

このような通信技術の進化は「拡張リモートワーク」「拡張パーソナルモビリティ&インフラシステム」「低遅延・高画質の遠隔操作システム」のような活用例を生み出し、人口問題に対する課題の解決につながるものであると考える。

##### ● 自然災害対策

現状の対策例としては、監視カメラやセンサーを用いた IoT 機器による監視や緊急速報メール、天気予報アプリなどによる通知サービス等が代表的である。今後激甚化するであろう自然災害に対して人命救助を一例にとると、予知技術やセンシング技術、低消費電力技術やエネルギーハーベスティングのような安定した電源確保の更なる向上が求められ、これに伴いより正確な情報を得ることが期待できる。そしてこの進化に伴い今後実現される Beyond 5G の世界において、年齢や性別、障がい、文化などの違いのような個性や、屋外に留まらず屋内や地下、何階にいるかのような場所、仕事や運転中などの状況に応じ、避難場所やルートの指示、移動手段等の役に立つ情報を含んだパーソナライズされた災害通知サービスが実現できるだろう。

また、居住域以外の山間部や海上などの情報収集による土砂災害や津波などの災害予知、山間部や島しょ部、海上（漁業や海運業）等の僻地で過ごす人々や大規模災害発生地域など救助活動が困難な状況にある人々の救助活動における Beyond 5G への期待例として、通信衛星や HAPS のよ

うな宇宙空間・空中から通信を提供する技術が挙げられる。また、災害発生時のトラフィックバランスの均衡維持や提供エリアの欠落を防ぐという観点で、分散型ネットワークポロジ技術や自律的に災害エリアに対して優先的な通信を提供するための管理システムなども考えられる。

災害時、モビリティサービスなどすぐに必要なサービスが得られない場合や個人の端末が災害時の規制により利用できない場合でも、信号機やデジタルサイネージなどを通して最適な避難経路等のような情報を即座に通知するようなシステムが好ましい。なお、デジタルサイネージとしては路線バスの掲示板や自動販売機等を災害時の案内板として緊急活用する事が考えられる。さらに、定期的な避難訓練の際に最新の地域映像を用いた VR 訓練システムを使って様々な災害現場を再現する事で、災害状況に応じた最適な避難経路などを常日頃から把握でき、有事であっても落ち着いて行動できることが期待できる。

このような通信技術の進化は「個性/場所/状況に応じたパーソナライズされた緊急速報一斉配信」「被災時でも電源確保や圏外の心配なく情報のやり取りができる通信システム」「災害発生時に最適な避難経路の通知ができるシステム」のような活用例を生み出し、自然災害による被害軽減の取り組みの課題解決につながるものであると考える。

#### 4.15.3.4 Beyond 5G に求められる Capability

以上をふまえた上で、着目した社会課題を解決するための活用例に対し、Beyond 5G に求められる特に重要なものを以下にまとめる。

##### 人口減少社会・少子高齢化

- 拡張リモートワーク
  - 超低遅延、超安全・信頼性
- 拡張パーソナルモビリティ& インフラシステム
  - 超高速・大容量、超低遅延、自律性
- 遠隔操作システム
  - 超高速・大容量、超低遅延

##### 自然災害

- 個性/場所/状況に応じたパーソナライズされた緊急速報一斉配信
  - カバレッジ拡張
- 被災時でも電源確保や圏外の心配なく情報のやり取りができる通信システム
  - 超安全・信頼性、自律性、カバレッジ拡張
- 災害発生時に最適な避難経路の通知ができるシステム
  - 超高速・大容量、超安全・信頼性、自律性

以上の対応を表 4.15-3 にまとめる。また、人口減少問題対策と Beyond 5G の進化を図 4.15-7 に、自然災害対策の進化と Beyond 5G の進化を図 4.15-8 に示す。

表 4.15-3 Beyond 5G の活用例と Capability

	超高速・大容量	超低遅延	超多数同時接続	超安全・信頼性	超低消費電力	時刻同期精度	測位・センシング	カバレッジ拡張	自律性	その他
拡張リモートワーク		○		○						
拡張パーソナルモビリティ&インフラシステム	○	○							○	
低遅延・高画質の遠隔操作システム	○	○								
個性/場所/状況に応じたパーソナライズされた緊急速報一斉配信	10Mbps以上							○ 1,000km/h		
被災時でも電源確保や圏外の心配なく情報のやり取りができる通信システム				○				○	○	
災害発生時に最適な避難経路の通知ができるシステム	○			○					○	

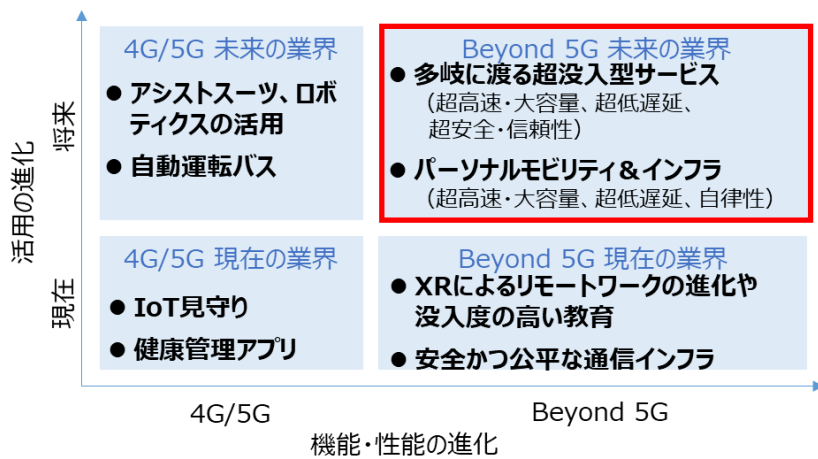


図 4.15-7 Beyond 5G における社会課題解決（人口問題解決）

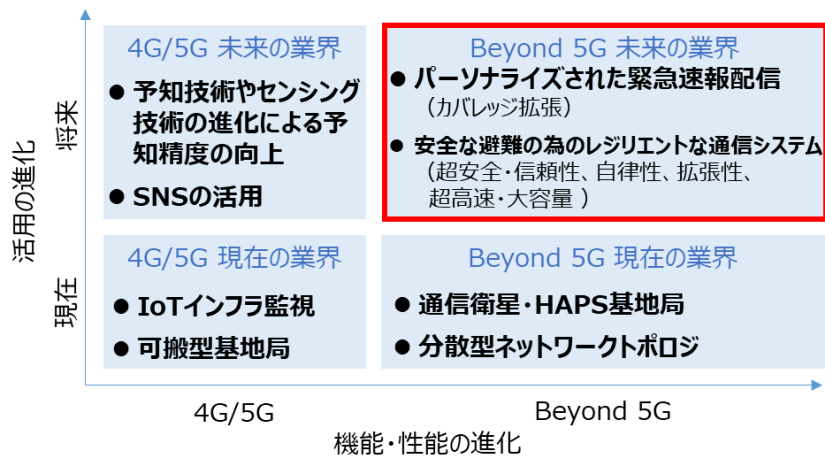


図 4.15-8 Beyond 5G における社会課題解決（自然災害対策）



#### 4.15.3.5 まとめ

本節では、社会（人口問題、環境問題）の現状と課題を調査して、期待する将来像、および Beyond 5G を活用した活用例を示した。Beyond 5G に求められる Capability としては、超高速・大容量、超低遅延、超安全・信頼性、自律性、カバレッジ拡張が考えられる。

#### 参考文献

- [1] 国際連合広報センター, “我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ”.  
[https://www.unic.or.jp/activities/economic\\_social\\_development/sustainable\\_development/2030agenda/](https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/)
- [2] 内閣府, 少子化社会対策白書.  
<https://www8.cao.go.jp/shoushi/shoushika/whitepaper/index.html>
- [3] 内閣府, 令和 3 年版高齢社会白書.  
<https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/index-w.html>
- [4] 総務省統計局, 高齢者の人口.  
<https://www.stat.go.jp/data/topics/topi1291.html>
- [5] 内閣府, 選択する未来 – 人口推計から見えてくる未来像 –, “人口・経済・地域社会の将来像”.  
[https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/sentaku/s2\\_3.html](https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/sentaku/s2_3.html)
- [6] 内閣府 防災情報のページ, “災害情報”.  
<http://www.bousai.go.jp/updates/index.html>
- [7] 内閣府 防災情報のページ, 平成 18 年版 防災白書. “災害を受けやすい日本の国土”.  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h18/bousai2006/html/honmon/hm01010101.htm>
- [8] 内閣府 防災情報のページ, “富士山の火山防災対策”.  
<http://www.bousai.go.jp/kazan/fujisan/>
- [9] 総務省, 平成 30 年版情報通信白書, “人口減少時代の ICT による持続的成長”.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd101200.html>
- [10] 総務省統計局, 統計表一覧 (Excel 集) .  
<https://www.stat.go.jp/data/guide/download/index.html>

# 5. Beyond 5Gで求められる CapabilityとKPI

## 5. Beyond 5G で求められる Capability と KPI

### 5.1 Beyond 5G で求められる Capability

第 4 章では、通信業界以外の様々な業界における、現状の課題や課題解決に向けた打ち手、業界の夢、そして、Beyond 5G への期待をまとめた。本節では、第 4 章の内容から、様々な業界での特徴的なユースケースを洗い出し、それぞれのユースケースで求められる Beyond 5G の性能をまとめる。

- 建設・不動産業界では、サイバー空間と物理空間が連動した自動建設という夢がある（4.2 節を参照）。Beyond 5G の時代の自動建設のようなユースケースから Beyond 5G に求められる性能の一つに測位精度がある。とくに土木工事のユースケースにおいては、1~2cm 程度の測位精度が求められるだろう。
- 倉庫・物流業界では、物流施設の完全自動運転において、Beyond 5G ローカル通信を使った低遅延通信や高精度同期が要求される（4.3.1 節を参照）。遅延は 5G と同等以上（ローカルネットワーク内でミリ秒のオーダー）、時刻同期は無線区間を含めた内部の時計の精度として PTP(Precision Time Protocol)の対応（マイクロ秒）が求められるだろう。
- 航空業界では、超音速旅客機が普及し、大都市間の移動時間が大幅に短縮することが期待されており、機内では、パーソナライズされた環境・エンターテインメントを提供し、より快適な空間・時間を提供することが求められる(4.3.2 節を参照)。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は、航空機内向けに 5G と同等以上の大容量通信である。特に、高度 10km 程度の現状の旅客機に比べて高い高度を飛行する超音速旅客機、および、宇宙空間の高度 100km 超へのカバレッジ拡張である。
- 鉄道業界では、鉄道業務における人手不足という課題がある（4.3.3 節を参照）。そのため、Beyond 5G の時代にはドライバレス運転の実現が期待されている。無線式列車制御システムにおいては列車衝突や速度超過を防ぐため、信頼性の高いリアルタイムな無線通信が必要となる。超高速鉄道の緊急停止では、Beyond 5G に求められる性能の一つとして数ミリ秒程度のエンドツーエンドの遅延時間が求められるだろう。
- 通信、IT 業界では、誰一人取り残さないデジタル化や災害時も途絶えない安定したネットワークの整備という課題がある（4.4 節を参照）。このようなことから、Beyond 5G の時代には HAPS 等の非地上系ネットワークによる超カバレッジのようなユースケースが期待されている。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は、地上系/非地上系ネットワークによる「国土カバー率 100%」である。また、通信、IT 業界では、サイバー空間を通じて様々な社会的損失や課題の解決と経済成長とを両立できる Society 5.0 の実現を目指している（4.4 節を参照）。このようなことから、Beyond 5G の時代には必要なモノ・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供することができる最適化や将来予測のようなユースケースが期待されている。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は AI 技術を活かした機器の自律的な連携によるゼロタッチである。なお、通信業界では、他業界が求める性能要件を満足する通信インフラが求められる。

- メディア業界では、コンテンツリッチ化の観点において、さらなる没入型メディア体験の実現を目指している（4.5 節を参照）。そのため Beyond 5G の時代にはホログラフィックコミュニケーションのようなユースケースが期待されている。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は数十～数百 Gbps のスループットと AI 技術を活用したデータ圧縮やスプリット/リモートレンダリング等の最適化である。
- エネルギー資源素材業界では、山岳や海洋での資源開発現場の厳しい労働環境の改善を目指している（4.6 節を参照）。そのため、Beyond 5G 時代には、現場の高精細映像（8K 等）/センサーと HMD/振動装置などを用いた没入型機器遠隔操作システムがユースケースとして期待されている。このようなユースケースで映像酔いを防止するためには、現場と操作者の間で 100 ミリ秒以下の映像伝送遅延時間が望ましい。例えば、映像圧縮伸張処理のための画像処理による遅延ならびに HMD への表示に要する処理遅延時間が 55 ミリ秒と仮定すると、Beyond 5G に求める性能は 45 ミリ秒となる。また、あらゆる現場での遠隔操作を実現するためには、エリア拡張（HAPS/衛星通信/水中通信）も求められる。
- 自動車業界では、「安全運転支援」、「遠隔運転」、「自動運転」などのユースケースが考えられる（4.7 節を参照）。

Beyond 5G 時代には遠隔運転の用途が、地方のモビリティサービスの一環や、災害発生時の路上駐車車両の除去など多様化することが考えられ、遠隔監視と遠隔制御のようなユースケースが期待されている。これらのユースケースから Beyond 5G に求められる性能は無線区間の伝送速度概ね 50Gbps、エンドツーエンドでの通信遅延 1 ミリ秒<sup>5</sup>、通信信頼性<sup>6</sup>10<sup>-6</sup> 以上が求められる。

都市部の夜間や地方などで車両が単独走行する条件下では、Beyond 5G 基地局のセンシングが有効である。テラヘルツ波の利用などによる、cm レベルのセンシング精度を提供可能とすることが期待される。

また、高度な自動運転時代に向けては、車両単体が得られる多(又は他)視点情報の処理が単体に限定される場合の計算量は、ニューラルネットワークを肥大化させ、車両の GPU・NPU の能力だけでは極めて短い時間内での計算を賄いきれない可能性も考慮する必要がある。そのような要件に備えるため、分散学習・推論の機能を車両や Beyond 5G 基地局に具備することが求められるだろう。

- 機械業界では、モノづくりや製造現場において、生産ラインの柔軟な組み換えや、加工精度の向上、製造量の増大化という現状の課題の解決に加え、カスタマイズ生産の実現といった将来展望がある（4.8.1 節を参照）。このようなことから、Beyond 5G の時代には工作機械と生産コントローラー間が無線で接続されることで、極めてフレキシブルかつ効率の高い生産ラインが構築されるとともに、ユーザー要望通りの製品が即時に製造され届けられる「マイ工場」のようなユースケースの実現が期

<sup>5</sup> 提案数値は 3GPP リリース 16 の要件を参考にした

<sup>6</sup> 通信信頼性が Block Error Rate と相当するもの

待されている。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は、エンドツーエンド(ローカルエリア内通信)で 100 マイクロ秒クラスの遅延時間の実現である。

- 電機・精密業界では、Beyond 5G がエッセンシャルインフラとなっていく中で、社会インフラ/プラットフォーム業界への変貌が求められる(4.9.1 節を参照)。生活シーンや業務で取り扱う各機器の通信機能として Beyond 5G が広く普及するため、身の回りにあるあらゆる家電、電気機器、OA 機器などが複数の業界を横断し連携して動作するために、通信ネットワーク内の機器間のインターフェースおよび通信と通信以外のシステム間のオープン API やオープンインターフェースを具備すること、データ分析/処理やコンテンツ取り扱いのために共通プラットフォームを構成するなど、拡張性に関する機能が重視される。また、ダイバーシティ&インクルージョンが浸透し、高齢化社会が進展することから、電気・精密機器をユーザーが自分で容易に扱えることが求められるようになる。ゼロタッチで機器同士が連携する、マニュアルフリーの直観操作となり複雑な設定無しで作動する、デバイスフリーでいつでもどこでもサービスを利用可能とするなど、各機器の自律性の格段の向上や接続/操作時のユニバーサル対応が重要となる。
- 半導体業界では他の製造業と同様に、工場の省人化や無人化の要求が高まってきている(4.9.2 節を参照)。大きく自動化とリモートコントロールの要求がある。製造の自動化や装置の IoT 化により通常製造時の無人化、稼働状況の可視化、定期診断等の機能は強化されている。ただし、装置の微調整やメンテナンス等を無人化するためには、装置をモニターしながら、調整するロボットをリモートでコントロールする事が必要となる。その際求められる遅延時間は 1 ミリ秒程度が要求されることになる。
- 小売卸流通業界では、主に仕入れ、加工・製造、配送、品出し、販売と多様なオペレーションによるサプライチェーンが存在する(4.11 節を参照)。その中で配送を行う物流業界の存在は小売卸流通業の経営の根幹であり物流業界の課題は非常に重要な問題となる業界である。今回、物流業界の課題を 1) 新型コロナ感染拡大による新たな生活様式の対応、2) 労働力不足対策、3) 持続可能な物流網の対応の 3 点から 2021 年~2025 年で取組されている「次期総合物流施策」を対応していく「Beyond 5G と物流 DX」の実現を利用シーンとして、①輸送・配送の高度化、②スマート物流化(DTC/CPS 内にサプライチェーンの全てのデータを取得しデータ基盤の構築)、③輸送・配送に関わる運行データの取得により環境規制の対応の 3 点をユースケースとする。上記のユースケースに対し、求められる性能は以下の通りである。
  - ユースケース①
    - ◇ 超多数同時接続：店舗
  - ユースケース②
    - ◇ 大容量通信：10 - 100Gbps
    - ◇ 信頼性：サプライチェーンの活用サービスによる
    - ◇ その他：CASE (Connected, Autonomous/Automated, Shared, Electric) 実現のための DTC/CPS 連携

➤ ユースケース③

- ◇ 超多数同時接続：トラック運行車数（ただし、同一エリア内ではなく日本全国）
  - ◇ 大容量通信：テレマティクス仕様による
  - ◇ その他：RIS (Reconfigurable Intelligent Surface)との連携、AI/Location
- \*トラック運行車数/トラック運送事業者 約 62,000、従業員 約 195 万人。

- 医療業界では、超高齢化社会との共生という現状の課題に対して、超高齢化社会を支える医療・介護体制の構築、健康寿命の延伸のような夢がある（4.12.1 節を参照）。このようなことから、Beyond 5G の時代には場所を問わず施術が受けられる遠隔手術やナノマシン・マイクロマシンを用いてリアルタイム健康管理及び低侵襲治療・患部直接治療が体内から行われるユースケースが期待されている。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能として、遠隔手術では高精細な施術映像伝送のために数十 Gbps 超のスループット、施術者とロボット間の操作情報伝送のために  $10^{-7}$  の超安全・信頼性が考えられる。体内からの健康管理及び直接治療では、体内である程度の期間の動作を継続するために体外からの給電やエネルギーハーベスト、更に体外から体内のデバイスを制御、データ連携をする場合、体内に数個から数十個のデバイスが注入されかつ電車内の人の密度を想定すると数百万～数千万個/ $\text{km}^2$ のデバイスの超多数同時接続、また体内のデバイスやカメラの連携を想定すると、ゼロタッチで機器が自律的に連携する事が考えられる。
- エンターテインメント業界では、デバイス技術や通信技術の進化に伴い、これまで体験したことのないような新しいサービス体験が次々と提供されていくことが期待される（4.14.2 節を参照）。特に、これまでの視覚・聴覚中心の視聴体験から、五感をフルに刺激する究極の没入体験や一体感の提供により、これまで味わったことのない体験価値を創造し、人々に驚きと感動を与えるアプリケーションの提供が期待される。このような究極の没入感を実現するために、近年、超高画質で空間自体を丸ごと伝送可能な、ポリュメトリックビデオといったような技術が注目を浴びている。ポリュメトリックビデオでは、実在の人物や場所を三次元デジタルデータに変換し、実世界空間をまるごと取りこみ、後から視聴ユーザー側で自由に視点を動かして視聴する。これと同時に、バーチャル空間とリアルタイムでインタラクティブに接続することで、例えば、音楽ライブやスポーツ観戦などのリモートライブユースケースなどでは、遠隔地にいながら、あたかもその場にいるような究極の臨場感をリアルタイムに体験することが可能となる。このようなユースケースにおいて、Beyond 5G 通信に求められる性能として、約 48-200Gbps (Raw data)の大容量通信や、エンドツーエンドで MTP(Motion To Photon) 10 ミリ秒や TTP(Time To Present) 70 ミリ秒といった遅延時間が要求される。そしてこれらの高速大容量通信と低遅延通信の同時実現を行うことが必要となる。通信提供カバレッジとしては、導入初期では、建物内などのある程度静的な環境で局所的なエリアが想定されるが、通信インフラの展開とともに、新幹線や飛行機といったような高速移動空間上においても、このような通信性能の提供が求められる。
- 4.15.1 節で取り上げた宇宙業界では以下のようなユースケースが期待されている。
  - 宇宙から地球の生活を守る世界中をリアルタイム・高頻度・高分解能で観測（例えば、大学研究室や企業などが製作する小



型観測衛星などの周回衛星による観測、成層圏の HAPS などに搭載されたセンサーによる観測、気球や航空機による観測、地上や海上に広範囲に設置された様々な IoT センサーによる観測や、地上レーダー等による観測など) する動きが活発化している。従来は、収集した観測データを地上に転送して処理解析していたものを、宇宙空間の NTN プラットフォーム (静止軌道上のフルデジタル衛星等) に搭載した AI やストレージと地上クラウドと連携することにより、観測データの収集や転送、並びにデータ処理解析と予測処理の頻度を従来の 1 日 1 回程度から数時間に 1 回程度に高め、さらに複数の観測データを組み合わせて高精度かつピンポイントで解析や予測などを可能とすることが求められる。

例えば、線状降水帯やゲリラ豪雨などの異常気象現象や洪水・浸水などの予測、地震発生による津波観測と到達時刻の予測、火山噴火による火砕流や噴煙・降灰等の流出物による陸上・海上の災害予測などを行い、それに基づく適切なタイミングでの避難勧告や警戒情報の発令を該当するエリアや人・モノに対して地上携帯網を通じて指示・制御や関連する情報提供をきめ細かく行えるようにする。

また、これら気象や災害の予測だけではなく、様々なリアルタイム・高頻度・高分解能で観測されるデータの広範囲な活用によって日常的に地域や場所、産業に特化したオーダーメイドな予測と、それに基づく指示・制御や情報提供が可能となる。

上記のユースケースに対し、求められる性能は以下の通りである。

- 超高速・大容量：さらなる大容量・高速化が求められる静止衛星用フィードリンクでは、フルデジタル衛星 HTS (2025 年頃) で数十~数百 Gbps、VHTS (2030 年頃) で数百 G~数 Tbps が求められる。一方で、低軌道・中軌道における衛星 1 機あたりのサービスリンクでの通信容量としては、数十 Gbps が求められる。
- 超低消費電力：太陽電池で運用
- 超安全・信頼性：地上災害の影響を受けない、低軌道のスペースデブリの影響を受けない (静止衛星)、別の NTN のノードや組み合わせによる異ルート化 (冗長化) が可能
- 自律性：衛星通常運用時は NTN が自律運用
- 拡張性：フルデジタル衛星による他の NTN ノードや他のスタンドアロンセンサーネットワークの統合機能が実現可能

➤ 宇宙活動のための利用 (スペースデブリ)

宇宙環境保全において最たる課題であるスペースデブリ増加への対策に、Beyond 5G の活用が期待される。秒速約 8km 以上の高速で飛来するデブリ等の障害物を地上レーダー/軌道上監視等で検知した結果から、サイバー空間で障害物の軌道を正確に予測し、衝突回避が必要な宇宙機が瞬時に把握することで、宇宙機は無駄なく効果的に衝突を防ぎながら軌道上を周回することが出来る。

上記のユースケースに対し、求められる性能は以下の通りである。

- 超高速・大容量：観測結果や推定軌道等の多岐にわたる情報を高速に通信
- 超低遅延：瞬時に広域にわたり周回する宇宙機へ情報伝搬

- 超多数同時接続：膨大な宇宙機同士による相互接続
- 超安全・信頼性：重大被害を回避する情報を確実に伝達

➤ 宇宙活動のための利用（月惑星探査）

惑星探査のための通信としては、たとえば 5,600 万 km 以上離れた火星近辺の探査機（往復伝搬時間は最大 40 分程度）とのロバストな通信が必要となる。さらに、修復可能な地上通信インフラとは異なり、高い信頼性や自律的な運用を実現する通信が求められる。また、現状は数十 kbps にとどまる遠方からの通信速度の高速化はミッション遂行と科学目的達成に寄与する。

一方、38 万 km 離れた月面上（往復伝搬時間は約 3 秒）での持続的な将来活動の一つとして、現地資源利用（ISRU：In-Situ Resource Utilization）が挙げられる。例えば月面に存在する「レゴリス」を月面基地の建材として採用した構造物建築等、資源の地産地消である。月面の過酷な環境において、これら施工を全て遠隔で自動・自律実施するため、宇宙でのストレージや計算処理、デジタルツイン、ロボット技術を駆使した確実な運用に向けて、大容量通信だけでなく、消費電力低減や通信高信頼化等の Beyond 5G の適用が期待される。

上記のユースケースに対し、求められる性能は以下の通りである。

- 超低消費電力：搭載リソースが極端に限られる月惑星探査機からの要求
  - 超安全・信頼性：修理不可能な宇宙探査機からの要求
  - 自律性：超遠方通信時の緊急時、食（探査機が見えていない）時の自律運用要求
  - 拡張性：月や火星、及び航行中の超遠方通信への拡張要求
- HAPS 業界では、従来の地上基地局では展開が困難であったルーラルエリアや上空・海上を含むあらゆる場所であらゆる人々にインターネットを届けられる世界を実現することや、自然災害時にも災害の影響を受けず救助・復旧活動をサポートするインフラを構築することを目指している（4.15.2 節参照）。それらを実現するためには高高度からの超広域カバレッジ通信の提供が必要であり、Beyond 5G に求められる性能は 1 つの HAPS に搭載される基地局によって半径数十 km から数百 km 程度のエリア、および上空数 km 程度のエリアをカバーすることである。
  - 4.15.3 節で取り上げた社会課題に関して、日本で多く発生している地震や火山噴火、風水害等の自然災害から人命や財産を守るために、自然災害を予知／検知して避難指示を実現することが必要である。Beyond 5G の時代においては、避難指示を一斉にかつ一人ひとりの状況に合わせて届けるようなユースケースが期待される。ここで言う状況とは、例えば、年齢や性別、障がい、文化などの違いのような個性、屋外に留まらず屋内や地下、何階にいるかのような 3 次元的位置情報、並びに、仕事や運転中のような活動状態である。このユースケースから Beyond 5G に求められる性能は、山間部や海上などのような僻遠な場所も含め「どこでもつながる（"connected anywhere"）」ことであろう。また、1,000km/h のような速度を実現する未来の移動手段でも避難指示を受け取ることができる拡張性と、様々な状況に合わせて避難指示を画像や音声で届けることができるよう 10Mbps 以上の通信速度の両立を実現することも Beyond 5G に求められる性能であろう。

以上、各業界から求められる性能をまとめると以下の表になる。

表 5.1-1 各業界から求められる性能

カテゴリ	要求条件	各業界で求められる性能
定量的要求条件	高速・大容量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 数 10～数 100Gbps のスループット（ホログラフィックコミュニケーションでの非圧縮伝送の場合（メディア））</li> <li>・ 50Gbps（遠隔監視と遠隔制御（自動車））</li> <li>・ 10～100Gbps（スマート物流化（小売卸流通））</li> <li>・ 数 10Gbps 超（遠隔手術（医療））</li> <li>・ 48～200Gbps（Volumetric video（エンタメ））</li> <li>・ 数 10Gbps（低・中軌道軌道（宇宙））</li> <li>・ 10Mbps 以上（自然災害対策（社会））</li> </ul>
	超低遅延	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ローカルネットワーク内でミリ秒オーダー（物流施設の完全自動運転（倉庫・物流））</li> <li>・ 数ミリ秒（超高速鉄道の緊急停止（鉄道））</li> <li>・ 100 ミリ秒（没入型機器遠隔操作システム（エネルギー資源））</li> <li>・ 1 ミリ秒（遠隔監視と遠隔制御（自動車））</li> <li>・ ローカル通信で 100 マイクロ秒（モーション制御（機械））</li> <li>・ 1 ミリ秒（ロボットリモートコントロール（半導体業界））</li> <li>・ MTP (Motion To Photon) 10 ミリ秒*、TTP (Time To Present) 70 ミリ秒（Volumetric video（エンタメ））</li> </ul> <p>* アプリレイヤーでの処理遅延時間を含む</p>
	時刻同期精度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 時刻同期は無線区間を含めた内部の時計の精度として PTP (Precision Time Protocol)（マイクロ秒）（物流施設の完全自動運転（倉庫・物流））</li> </ul>
	超安全・信頼性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>10^{-6}</math>（遠隔監視と遠隔制御（自動車））</li> <li>・ <math>10^{-7}</math>（遠隔手術（医療））</li> </ul> <p>単位は、Block Error Rate</p>
	測位・センシング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1～2cm の測位精度（土木工事（建設・不動産業界））</li> <li>・ cm レベルのセンシング精度（夜間、地方の車両単独走行（自動車））</li> </ul>
	超多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 数 100 万～数 1,000 万個/km<sup>2</sup> のデバイス（体内デバイス（医療））</li> </ul>

カテゴリ	要求条件	各業界で求められる性能
	カバレッジ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 10km 程度の現状の旅客機に比べて高い高度を飛行する超音速旅客機、および、宇宙空間の高度 100km 超でのカバレッジエリア（航空機業界）</li> <li>・ 国土カバー率 100%（通信・IT 業界）</li> <li>・ 宇宙空間や月でのカバレッジエリア（宇宙）</li> <li>・ HAPS 1 基で半径数 10～数 100 km のエリアと上空数 km のエリアをカバー（HAPS）</li> </ul>
自律性		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 必要なモノ・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供することができるような自律的な最適化機能や将来予測機能（通信・IT 業界）</li> <li>・ 各機器の自律性の向上や接続/操作時のユニバーサル対応（電機・精密）</li> <li>・ ゼロタッチで機器が自動連係（体内デバイス、カメラ連携（医療））</li> </ul>
超低消費電力		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 搭載リソースが極端に限られる月惑星探査機での使用（宇宙）</li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 分散学習・推論機能（複数の車両や Beyond 5G 基地局を用いて処理を行う（自動車））</li> <li>・ 機器間インターフェースおよび通信と通信以外のシステム間のオープン API やオープンインターフェース、データ分析/処理やコンテンツ取り扱いのための共通プラットフォーム（機器連携（電機・精密））</li> <li>・ 1,000 km/h の速度で移動中でも避難指示を受けられること（自然災害対策（社会））</li> <li>・ NTN ノードが、他の NTN ノードやローカルなセンサーネットワークとの自動接続が可能（宇宙）</li> <li>・ NTN ノード単独、又は別の NTN ノードとの組み合わせによる地上系を介さないメッシュネットワーク構築が可能（宇宙）</li> </ul>

## 5.2 Beyond 5G を象徴する図と利用シナリオ

### 5.2.1 提案内容

5G（もしくは IMT 2020）を象徴する図として、三角形とその頂点に描かれている 3 つの利用シナリオ（eMBB や URLLC、mMTC）が知られている。Beyond 5G（もしくは IMT for 2030 and beyond）は 5G の進化系でありながらも、Beyond 5G ならではの利用シナリオが考えられる。本白書では、図 5.2-1 に示すように、6 つの利用シナリオを提案する。

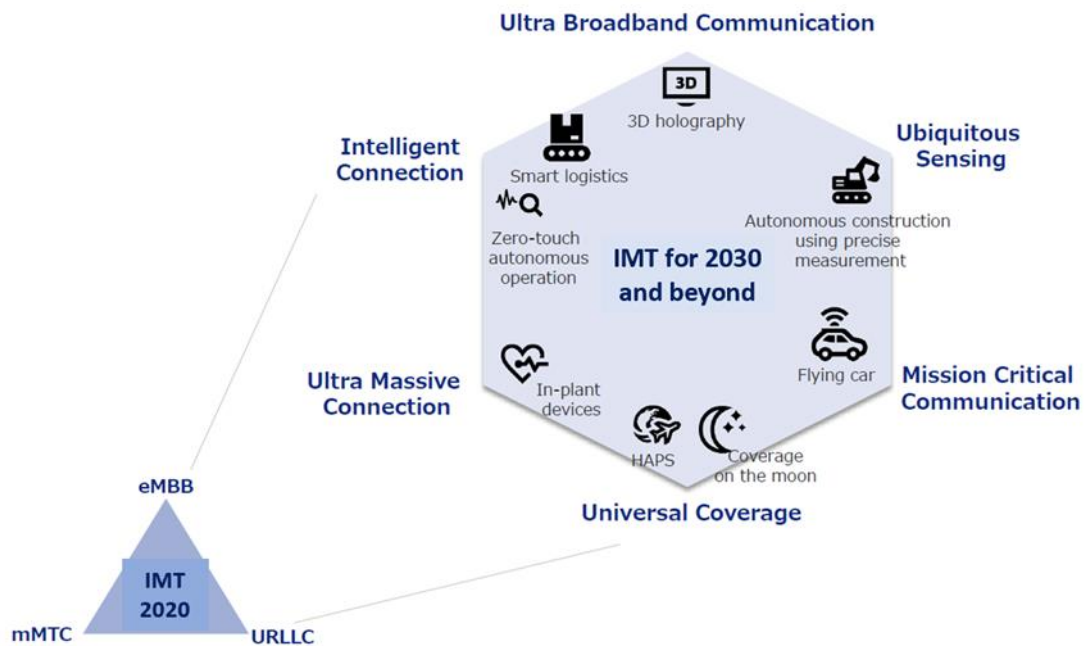


図 5.2-1 Beyond 5G を象徴する図

図 5.2-1 の六角形の頂点に記載している利用シナリオについて、以下にまとまる。

#### Ultra Broadband Communication

この利用シナリオは、5GにおけるeMBBの拡張版としての位置づけであり、没入型XR（拡張現実）やホログラフィック通信といったアプリケーションの利用を想定している。このシナリオでは、非常に高いデータレートが必要になるだけでなく、低遅延性やシステムの大容量化も求められる。利用場所としては、都市部のホットスポットだけでなく農村地域まで、あらゆるエリアが対象となる。

#### Ubiquitous Sensing

この利用シナリオでは、センシングと通信システムを組み合わせた「ユビキタスセンシング」とセンシングデータの受信の実現を目指している。自動建設や倉庫管理、自動運転などのユースケースに必要な、高度な位置測位やポジショニング、姿勢/ジェスチャーの認識、物体追跡、イメージング、マッピングなどにおいてこの利用シナリオが必要となる。このユースケースによって、仮想世界と実世界の間をリアルタイムに相互作用させることが可能になる。

## Mission Critical Communication

この利用シナリオは、5G における URLLC をさらに高度化し、通信回線の信頼性と遅延時間の要件が非常に厳しいユースケースに適用される。典型的なユースケースとしては、Beyond 5G 時代に想定される遠隔操作やロボット間の連携動作、自動運転、遠隔医療手術などが含まれる。これらのユースケースは、通信システムの不具合のみならず、通信性能が不十分な場合に、アプリケーションに対して深刻な結果をもたらす可能性があることが特徴である。

## Universal Coverage

この利用シナリオは、空域や地上だけでなく、農村地域や遠隔地など全人類が存在するあらゆる場所において通信環境を提供するために必要な、世界全体を普遍的にカバーするエリアが提供されることを目指している。典型的なユースケースとしては、人々のすべての居住地では基本的な MBB サービスを提供し、UAV や空飛ぶ車などの有望な航空アプリケーションを接続することを目指している。この利用シナリオでは、地上のセルラーネットワークと、HAPS や衛星などの非地上ネットワークとの間の相互接続が必要である。これにより、災害に強い通信インフラを提供でき、自然災害の発生時においても救助や復旧の支援が容易になる。

## Ultra Massive Connection

この利用シナリオは、5G における mMTC の利用シナリオを拡張したものである。典型的なアプリケーションには、メータの検針や環境モニタリング、さらには、ウェアラブルデバイスを含む大量の電子デバイスやセンサーのような日常生活において散発的にデータが送受信されるようなアプリケーションが含まれる。このように、この利用シナリオでは大量の同時接続をサポートすることも必要になる。

## Intelligent Connection

この利用シナリオは、高度な AI を Beyond 5G のネットワークやデバイスに組み込むことで、さまざまなアプリケーションが高度化されることを特徴としている。たとえば、ローカルエリアのコンピュータ資源のオフロードや、分散学習/推論、AI モデルのトレーニングを活用するとともに、ネットワーク内に存在する AI のエージェント機能と共同で高度な AI が動作することを想定している。典型的なアプリケーションは、協働ロボット用のトレーニングと推論、自動運転用の分散学習と推論、ゼロタッチ運用ができるデバイス間の自律的な連携などである。この利用シナリオのもう 1 つの重要な側面は、AI/ML を使用して、すべてのネットワークレイヤーで Beyond 5G システムが最適化され、無線インターフェースとネットワーク自体の性能と効率が向上することである。



## 5.2.2 ITU-R 勧告との比較

本節では、5.2.1 節に記載した提案内容と、2023 年 11 月に ITU-R にて作成された IMT for 2030 and beyond（以下、IMT-2030）の Framework 勧告[1]の内容との比較をまとめる。

図 5.2-1 の内容を ITU-R Working Party 5D（WP5D）に日本として提案しており、他国からの提案内容も含めて、ITU-R WP5D では「IMT-2030 での利用シナリオと、すべての利用シナリオに共通して求められる設計原則」として下図のようにまとめられた[1]。

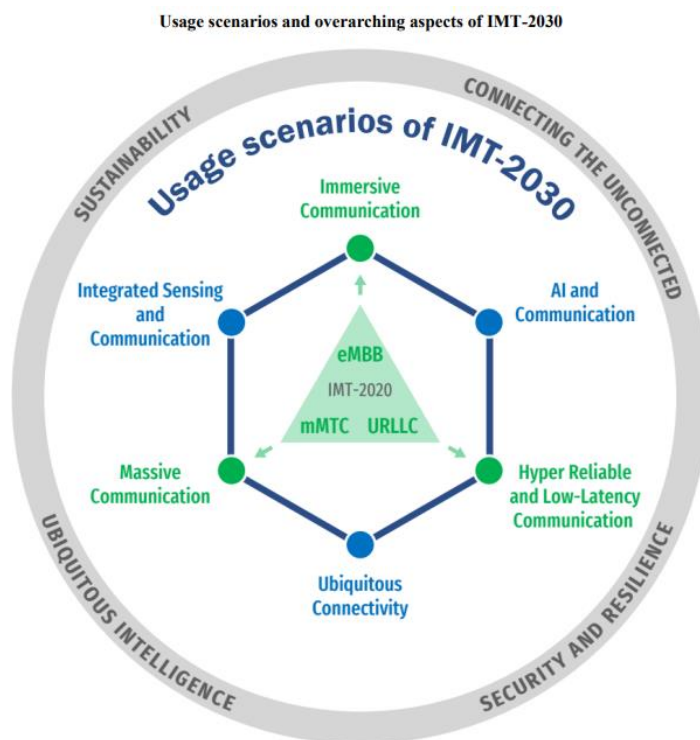


図 5.2-2 ITU-R Framework 勧告[1]で規定された IMT-2030 の図

図 5.2-1 に示した本ホワイトペーパーでの提案内容と図 5.2-2 を比較すると、図 5.2-1 の以下の点が図 5.2-2 に反映されていることがわかる。

- (1) IMT-2030 が IMT-2020 からの進化系であること
- (2) 六角形で表すこと
- (3) 用語は異なるものの、六角形の頂点として記載した利用シナリオが同じであること

六角形の頂点に記載されている用語の対応関係を下図に示す。

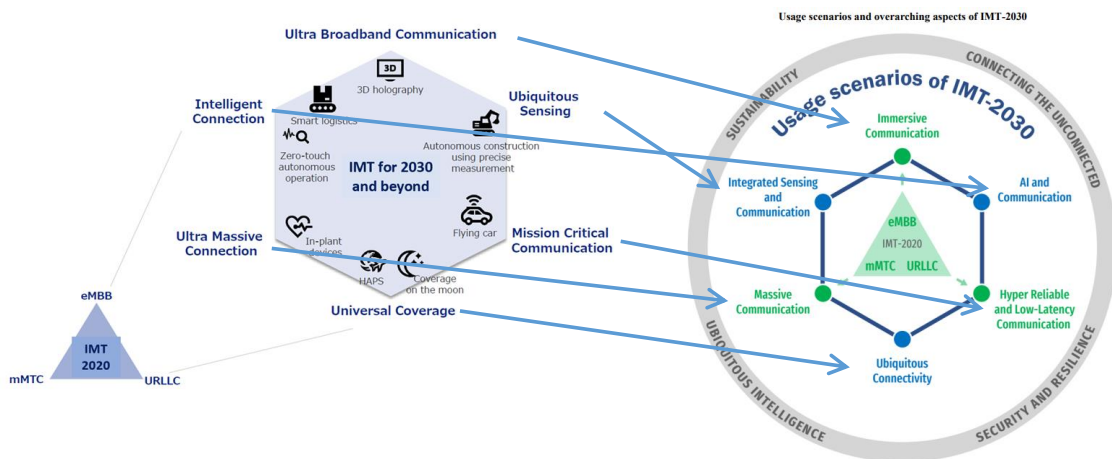


図 5.2-3 図 5.2-1 と図 5.2-2 の対応関係

なお、図 5.2-2 の六角形を覆う円の上に記載されている“Overarching aspects”と呼ばれる設計原則についても、表 5.1-1 内の「定性的要求条件」の内容が採用されている。

### 参考文献

- [1] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R M.2160-0, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” (Nov. 2023).

### 5.3 目標 KPI

#### 5.3.1 Key features for Beyond 5G in the Beyond 5G Promoting Strategy

Beyond 5G 推進戦略懇談会の提言[2]に従い、2020年6月に総務省が「Beyond 5G 推進戦略 –6G へのロードマップ–」を発表した。この提言において、「目指すべき Beyond 5G には、5G の特徴的機能の更なる高度化に加え、新たに 4 つの機能の具備が必要となる」と述べられており、Beyond 5G で求められる要件が図表として示されている(図 5.3-1)。

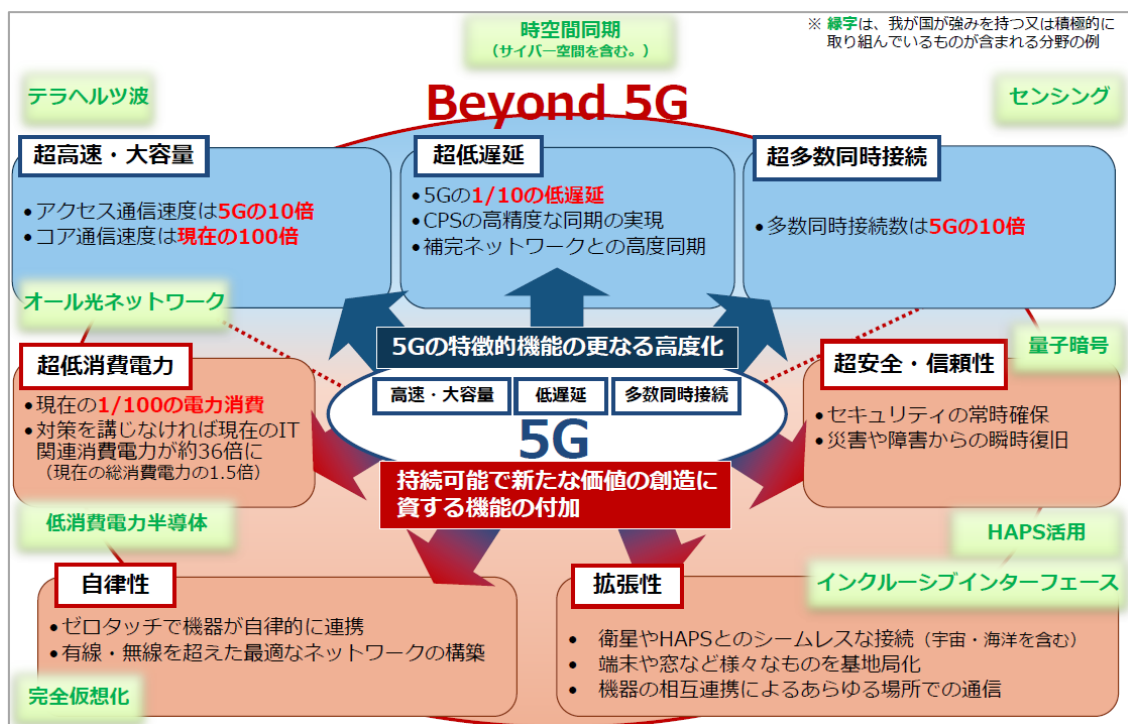


図 5.3-1 Beyond 5G に求められる機能等 [2]

この提言においては、Beyond 5G の主要な要件が以下のように述べられている。

#### (1) 5G の特徴的機能の更なる高度化

まず、5G の特徴的機能を更に高度化させ、「超高速・大容量」、「超低遅延」、「超多数同時接続」といった機能を具備することで、あらゆる場所からの膨大なデータを瞬時に正確に処理できるようになる。

具体的には、2030 年代に想定されるデータ通信量や通信機器数を踏まえると、アクセス通信速度と同時接続数は 5G の 10 倍、コア通信速度は現在の 100 倍が目標となる。また、上記の CPS の高精度な同期を実現するためには、5G の 1/10 の低遅延とそれを補完するネットワークの高度な同期が必要と考えられる。

## (2) 求められる新たな機能

また、こうした 5G からの連続的な進化に加えて、Beyond 5G では次のような新たな機能が具備されるべきである。

- ・「自律性」： AI 技術等を活かし、人手を介さず（ゼロタッチ）、あらゆる機器が自律的に連携し、有線・無線を意識せず即座に利用者のニーズに合わせて最適なネットワークを構築する機能。
- ・「拡張性」： 端末や基地局が、衛星や HAPS (High Altitude Platform Station) 等の異なる通信システムとシームレスに繋がり、また、端末や窓など様々なものも基地局とすること（コビキタス基地局）で、至る所にある機器が相互に連動しつつ、海、空、宇宙を含むあらゆる場所で通信を利用可能とする機能。
- ・「超安全・信頼性」： 利用者が意識しなくてもセキュリティやプライバシーが常に確保され、災害や障害の発生時でもサービスが途絶えず、瞬時に復旧する機能。
- ・「超低消費電力」： 低消費電力化の技術開発がなされない場合、2030 年の IT 関連の電力消費量は 2016 年の 36 倍（現在の総電力消費量の 1.5 倍）となると考えられる。こうした電力消費量の大幅な増加に余裕を持って対応するため、現在の 1/100 程度の消費電力に抑えることを検討する必要がある。

(Beyond 5G 推進戦略懇談会提言より抜粋 [2])

### 5.3.2 Beyond 5G の目標 KPI の検討

以上のように、Beyond 5G の主な特徴について考察したが、これは第 2 章の通信トラフィック動向の検討や第 3 章、第 4 章、5.1 節で述べた市場の期待とも整合している。これらの主要な要件に対応して、図 5.3-2 および図 5.3-3 のように Beyond 5G の目標 KPI を導出した<sup>7 8</sup>。

目標 KPI の各項目は、Beyond 5G 通信システムのどの部分に対する KPI であるかを明確に意識して定義する必要がある。例えば、遅延時間は、ユーザー機器のアプリケーション層から、エッジノードで相対するアプリケーション層との間のエンドツーエンドでの片道遅延時間とし、アプリケーション層の間での最短の転送遅延となるものと定義する（図 5.3-4）。本節で示す目標 KPI については、5.1 節に記載した市場要件に対して必要かつ十分な機能と性能を提供するために検討したものであるが、その詳細の定義については更なる検討が必要である。また、これらの目標 KPI に関連する技術動向や実現可能性については、第 6 章でその一端が述べられているが、今後より包括的な検討が必要と考えられる。

<sup>7</sup> 本白書 1.0 版発行以降の検討を踏まえ、一部の目標 KPI について見直しと更新を行っている。

<sup>8</sup> 図 5.3-3 における「拡張性」の一つの項目である「衛星や HAPS とのシームレスな接続」は、図 5.3-2 における定量的な指標軸の中で「カバレッジ」対象の分類上の拡張（「陸上」→「陸上+海上+空+宇宙」）として指標化しているなど、2つの図の指標には相互に関連するものがある。

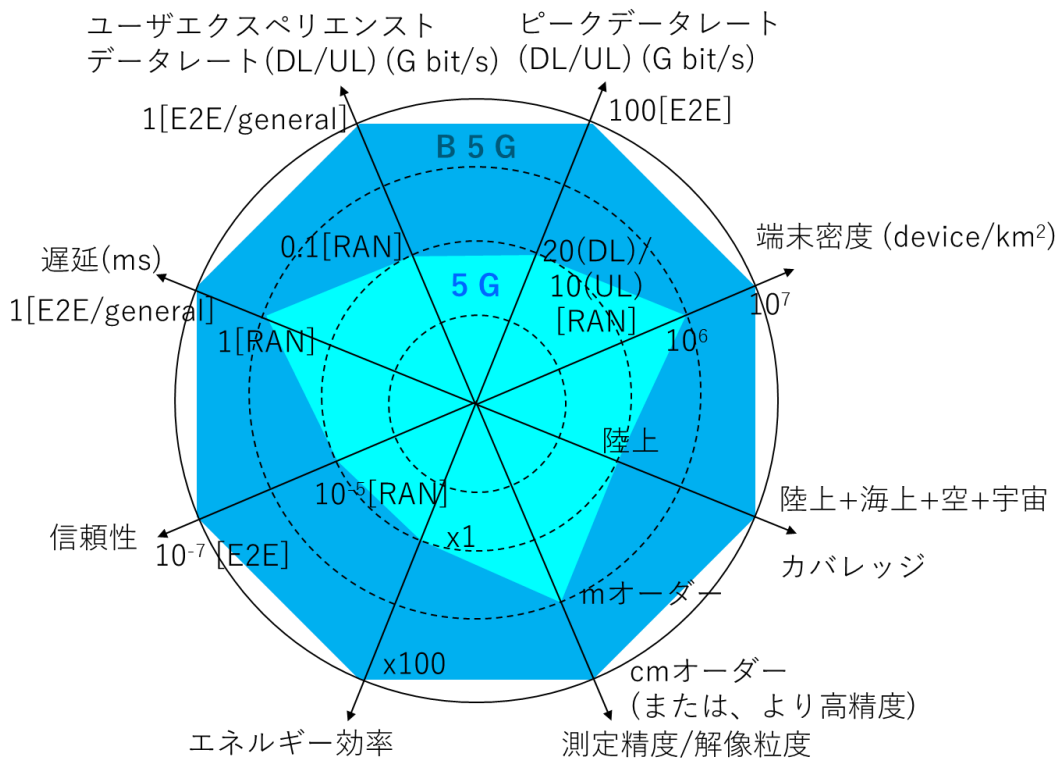


図 5.3-2 Beyond 5G の目標 KPI (定量的要件)

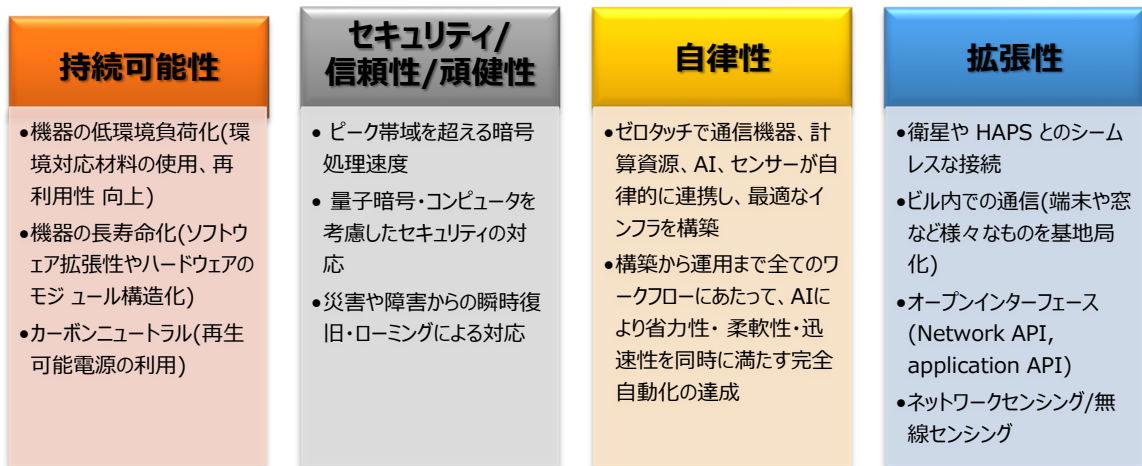


図 5.3-3 Beyond 5G の目標 KPI (定性的要件)

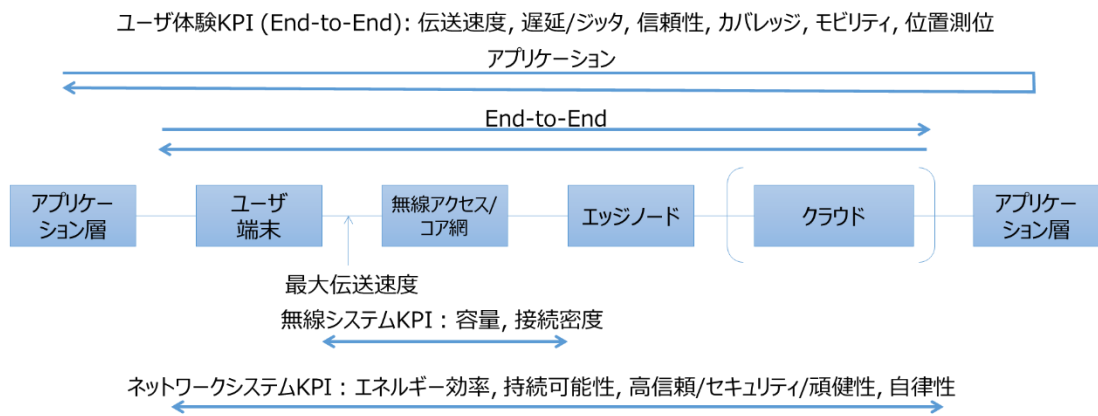


図 5.3-4 目標 KPI のスコープ

### 5.3.3 ITU-R 勧告との比較

本節では、5.3.2 節に記載した目標 KPI の内容と、2023 年 11 月に ITU-R にて作成された IMT for 2030 and beyond (以下、IMT-2030) の Framework 勧告[3]の内容との比較をまとめる。

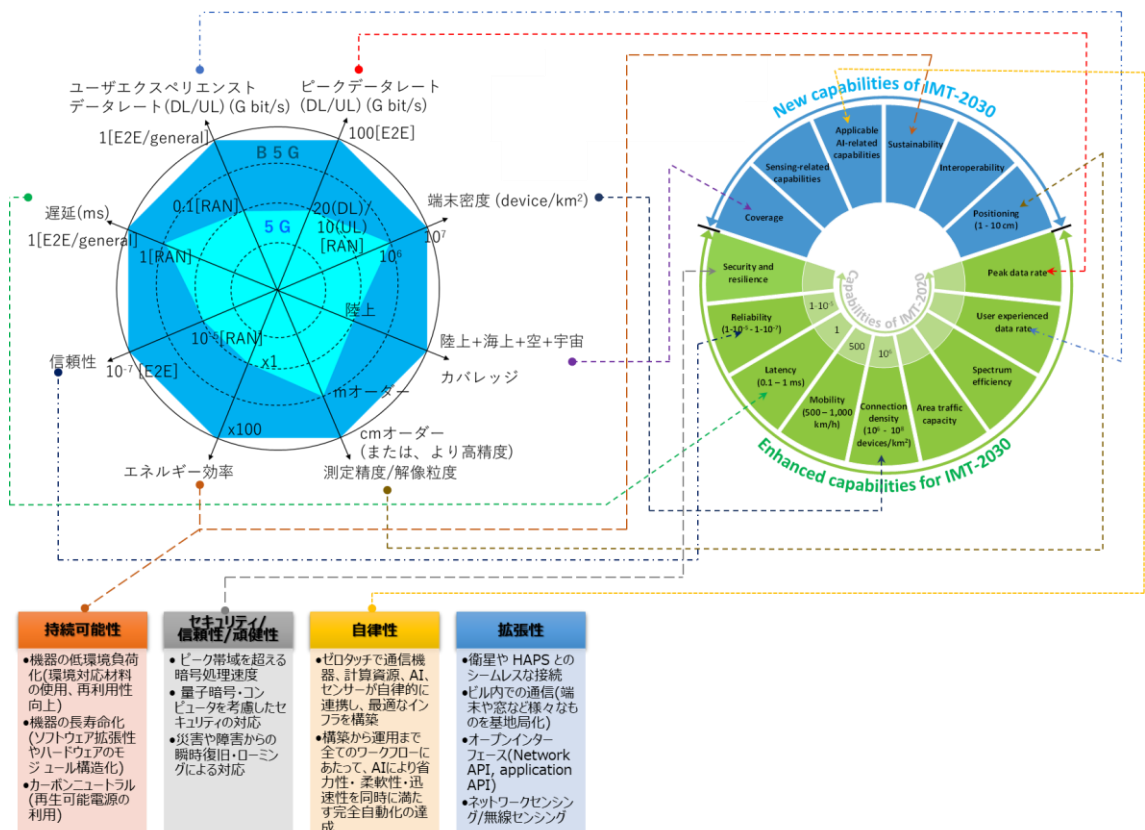


図 5.3-5 本ホワイトペーパー検討 KPI(左)と、IMT-2030 Framework(右)の対応関係



図 5.3-5 に、本ホワイトペーパーで検討を行った KPI と、IMT-2030 Framework にて記載されている Capability の対応関係を示す。本ホワイトペーパーでの提案内容について”拡張性”を除く全ての項目が IMT-2030 Framework に反映されていることがわかるとともに、5 項目については IMT-2030 Framework にて新たに記載されている。それぞれの項目の比較詳細については、表 5.3-1 にてまとめた。大きな違いとして、本ホワイトペーパーでは図 5.3-4 に示した通り E2E における定量的な目標を掲げているが、IMT-2030 Framework においては無線区間におけるスコープとなっている。

表 5.3-1 本ホワイトペーパー検討 KPI(左)と、IMT-2030 Framework(右)の比較詳細

B5G 推進コンソーシアム白書		IMT-2030 Framework	
ピークデータレート (DL/UL, E2E)	100Gbps (E2E)	Peak data rate (under ideal condition per device)	Greater than IMT-2020 (e.g. 50, 100, 200 Gbps)
ユーザエクスペリエンスデータレート (E2E/general)	1Gbps (E2E/general)	User experienced data rate (across the coverage area per device)	Greater than IMT-2020 (e.g. 300Mbps, 500Mbps)
遅延 (msec, E2E/general)	1ms (E2E/general)	Latency (over the air interface)	0.1 – 1 ms
信頼性 (E2E)	$10^{-7}$ (E2E)	Reliability (over the air interface)	from $1-10^{-5}$ to $1-10^{-7}$
測定精度/解像粒度	cm オーダー (または、より高精度)	Positioning (difference between the calculated and the actual horizontal/vertical position of a device)	1 – 10 cm
端末密度 (device/km <sup>2</sup> )	$10^7$ devices/km <sup>2</sup>	Connection density (Total number of connected and/or accessible devices per unit area)	$10^6 - 10^8$ devices/km <sup>2</sup>
カバレッジ	陸上 + 海上 + 空 + 宇宙	Coverage (the cell edge distance of a single cell through link budget analysis)	-
-	-	Spectrum efficiency (average data throughput per unit of spectrum resource and per cell)	Greater than IMT-2020. (e.g. x1.5 x3 greater than that of IMT-2020)

B5G 推進コンソーシアム白書		IMT-2030 Framework	
-	-	Area traffic capacity (Total traffic throughput served per geographic area)	Greater than IMT-2020. (e.g. 30 Mbit/s/m <sup>2</sup> and 50 Mbit/s/m <sup>2</sup> )
-	-	Mobility (Maximum speed, at which a defined QoS and seamless transfer between radio nodes which may belong to different layers and/or radio access technologies (multi-layer/multi-RAT))	500 – 1 000 km/h
-	-	Sensing-related capabilities (range/velocity/angle estimation, object detection, localization, imaging, mapping, etc.)	Could be measured in terms of accuracy, resolution, detection rate, false alarm rate, etc.
エネルギー効率	x100	Sustainability	Important factors include improving energy efficiency, minimizing energy consumption and the use of resources (e.g. optimizing for equipment longevity, repair, reuse and recycling)
持続可能性	- 機器の低環境負荷化 (環境対応材料の使用、再利用性 向上) - 機器の長寿命化 (ソフトウェア拡張性やハードウェアのモジュール構造化) - カーボンニュートラル (再生可能電源の利用)	- Energy efficiency (quantifiable metric of sustainability. It refers to the quantity of information bits transmitted or received, per unit of energy consumption (in bit/Joule)) - Environmental sustainability (the ability of both the network and devices to minimize greenhouse gas emissions and other environmental impacts throughout their life cycle)	

B5G 推進コンソーシアム白書		IMT-2030 Framework	
セキュリティ/信頼性/頑健性	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ピーク帯域を超える暗号処理速度</li> <li>- 量子暗号・コンピュータを考慮したセキュリティの対応</li> <li>- 災害や障害からの瞬時復旧・ローミングによる対応</li> </ul>	Security and resilience	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Security refers to preservation of confidentiality, integrity, and availability of information, such as user data and signalling, and protection of networks, devices and systems against cyberattacks such as hacking, distributed denial of service, man in the middle attacks, etc.</li> <li>- Resilience refers to capabilities of the networks and systems to continue operating correctly during and after a natural or man-made disturbance, such as the loss of primary source of power, etc.</li> </ul>
自律性	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ゼロタッチで通信機器、計算資源、AI、センサーが自律的に連携し、最適なインフラを構築</li> <li>- 構築から運用まで全てのワークフローにあたって、AIにより省力性・柔軟性・迅速性を同時に満たす完全自動化の達成</li> </ul>	Applicable AI-related capabilities (the ability to provide certain functionalities throughout IMT-2030 to support AI enabled applications.)	include distributed data processing, distributed learning, AI computing, AI model execution and AI model inference, etc.

B5G 推進コンソーシアム白書		IMT-2030 Framework	
拡張性	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 衛星や HAPS とのシームレスな接続</li> <li>- ビル内での通信 (端末や窓など様々なものを基地局化)</li> <li>- オープンインターフェース (Network API, application API)</li> <li>- ネットワークセンシング/無線センシング</li> </ul>	-	-
-	-	Interoperability (radio interface)	-

### 参考文献

- [1] “「Beyond 5G 推進戦略 – 6G へのロードマップ –」の公表”, 総務省報道資料, 2020 年 6 月 30 日.
- [2] Beyond 5G 推進戦略懇談会提言, Beyond 5G 推進戦略懇談会, 2020 年 6 月.
- [3] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R M.2160-0, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” (Nov. 2023).

### 付録 Beyond 5G の無線区間伝送における「信頼性」の検討例

図 5.3-2 に示した目標 KPI の 1 つである「信頼性」について、「エンドツーエンド のパケット伝送誤り確率(PBLER) $<10^{-7}$ 」という目標 KPI として設定した場合に、伝送システムを構成する無線と有線の伝送区間にもとめられる伝送品質について簡易な検討を行った結果を参考情報として以下に付記する。

検討対象の伝送システムは、図 5.3-4 においてアプリケーション層を搭載したエッジノードを外部のクラウドネットワークを介さずに CORE NW と同じ場所に配置・接続して伝送を行う構成とした。

図 5.3-6 は、ユーザー端末側のアプリケーション層側からエッジノードに装備されたアプリケーション層に向かって上り方向にパケットを伝送する場合の検討モデルを示している。無線区間における再送制御などは仮定せずに単純な一方伝送を前提として検討を進める。

ユーザー端末側のアプリケーション層から送信するデータは NRAN バイトのパケットに分割され、無線伝送路で無線アクセスノードに伝送される。その際の各パケット伝送の成功確率は  $1 - \text{PBLER\_RAN}$  とする。無線アクセスノードで正しく受信されたパケットは、NOPT/RAN ケずつ束ねて NOPT バイトのパケットとして組み立てられ、伝送成功確率  $1 - \text{PBLER\_OPT}$  の有線伝送路を介してコア網ノードに伝送され、エッジノードを介して対向側のアプリケーション層に伝送される。

以下では、無線伝送区間(ユーザー端末と無線アクセス間の伝送区間)の伝送パケット長( $N_{RAN}$ )を32バイト、あるいは、400バイト、有線伝送区間(無線アクセス部とコア網の間の伝送区間)の伝送パケット長( $N_{OPT}$ )を1500バイトとし、有線伝送区間では平均ビット誤り率( $P_{BER\_OPT}$ )が $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-13}$ となる伝送品質の光ファイバー回線を介して伝送を行うものとして、無線区間の伝送で要求されるパケット伝送( $P_{BLER\_RAN}$ )の伝送品質を導出した結果を示す。

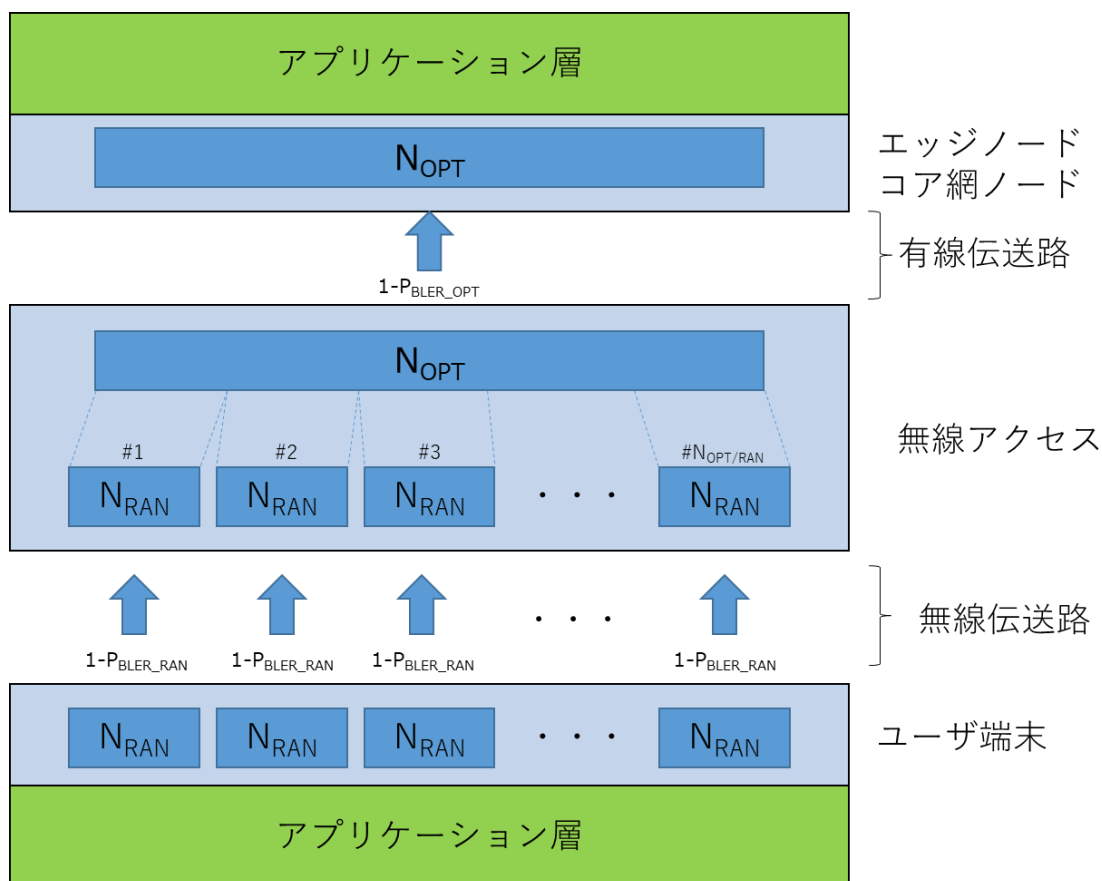


図 5.3-6 エンドツーエンド パケット伝送の簡易検討モデル

有線伝送路のパケット伝送成功率  $1 - P_{BLER\_OPT}$  は、伝送路におけるビット伝送誤り率  $P_{BER\_OPT}$  から次の式で与えられる。

$$1 - P_{BLER\_OPT} = (1 - P_{BER\_OPT})^{N_{OPT}}$$

$P_{BER\_OPT}$  を所与とした場合、目標とするエンドツーエンドのパケット伝送成功率  $P_{BLER}$  を得るには、無線区間の伝送成功率  $1 - P_{BLER\_RAN}$  が以下の関係を満たす必要がある。

$$(1 - P_{BLER\_RAN})^{N_{OPT}/N_{RAN}} \geq \frac{1 - P_{BLER}}{1 - P_{BLER\_OPT}}$$

ただし、

$$N_{OPT}/N_{RAN} = \left\lceil \frac{N_{OPT}}{N_{RAN}} \right\rceil$$

これらの式で、 $N_{OPT}=1500$ ,  $P_{BLER}=1 \times 10^{-7}$  として所要の  $P_{BLER\_RAN}$  を求めた結果を表 5.3-2 に示す。エンドツーエンドの packet 伝送成功確率を  $1-10^{-7}$  以上とするためには、有線伝送路のビット伝送誤り率が  $1 \times 10^{-12}$  以下である必要があり、その条件下で無線回線の packet 伝送の失敗確率  $P_{BLER\_RAN}$  は、無線 packet 長 ( $N_{RAN}$ ) に応じて  $1.9 \times 10^{-9} \sim 3.3 \times 10^{-9}$  より低い必要がある。

表 5.3-2 有線・無線区間の伝送品質とエンドツーエンドの packet 伝送品質の検討例

$N_{RAN}$	$P_{BLER\_RAN}$	$1-P_{BLER\_RAN}$	$N_{OPT/RAN}$	$P_{BER\_OPT}$	$P_{BLER\_OPT}$	$1-P_{BLER}$
32	N/A	N/A	46	$1 \times 10^{-9}$	99.99988%	99.99999%
32	N/A	N/A	46	$1 \times 10^{-10}$	99.99988%	99.99999%
32	N/A	N/A	46	$1 \times 10^{-11}$	99.999988%	99.99999%
32	$1.9 \times 10^{-9}$	99.9999981%	46	$1 \times 10^{-12}$	99.999988%	99.99999%
32	$2.1 \times 10^{-9}$	99.9999979%	46	$1 \times 10^{-13}$	99.999988%	99.99999%
400	N/A	N/A	3	$1 \times 10^{-9}$	99.99988%	99.99999%
400	N/A	N/A	3	$1 \times 10^{-10}$	99.99988%	99.99999%
400	N/A	N/A	3	$1 \times 10^{-11}$	99.999988%	99.99999%
400	$2.9 \times 10^{-8}$	99.9999971%	3	$1 \times 10^{-12}$	99.999988%	99.99999%
400	$3.3 \times 10^{-8}$	99.9999967%	3	$1 \times 10^{-13}$	99.999988%	99.99999%



## 6. 技術トレンド

## 6. 技術トレンド

本章では、6.1 節で技術トレンドの全体像として市場の要請や特に注目すべき技術動向について概略的に述べたのち、6.2 節で Beyond 5G における End-to-End アーキテクチャについて述べる。End-to-End アーキテクチャにおいては、デジタルツイン、Beyond 5G インフラ、Orchestrator といった特徴的な要素について説明し、それらの提供価値やその実現技術について述べる。6.3 節以降は個別の技術トレンドとして、周波数関連技術や、システムプラットフォームとアプリケーション、トラスト確保技術、ネットワークエネルギー効率の向上、非地上系ネットワーク（NTN）によるネットワークカバレッジ拡張、無線通信技術と光通信技術について述べる。

以下本稿では、Beyond 5G における技術トレンド全般をできる限り網羅的に記載している。その上で、特に重要な技術トピックについては、稿を改めそれぞれの技術トピックごとに別冊として発行する。現時点では以下の 8 冊が、Beyond 5G 推進コンソーシアムの成果物として公開されている (<https://b5g.jp/output/>)。なお、これらの別冊は我々 B5G 推進コンソーシアムメンバーの強い技術を世界に発信していくという観点から、英語版のみの発行となっている。

- Cell-Free / Distributed MIMO
- Radio Technologies for higher frequency
- E2E Architecture
- Sustainability and Energy Efficiency
- NTN Technologies
- Relay and Reflector Technologies
- AI/ML Technologies
- Sensing Technologies

### 6.1 Beyond 5G に向けた技術トレンド

ここまでに取り上げた 2030 年代に向けた市場の要請や期待に応えるため、また、前章に掲げた目標 KPI 達成に資するために Beyond 5G に向けた技術開発のさまざまな取り組みが進められている。6.4 節～6.8 節でこれらの技術の果たすべき役割やその概要を述べるのに先立って、以下では市場からの要求や市場への展開動向について Global commons の観点などにも触れながら概観する。

AI/ML 活用、センシング、トラスト確保技術については、関連する事項が本章の記載の中で横断的に存在することから全体の概要をあわせて付記する。

#### 6.1.1 市場の要請

社会インフラとしての情報通信システムの役割と期待が高まるにつれ、求められる価値がより普遍的なものに昇華されてきたことがわかる。このおような市場の要求や動向を踏まえて、2030 年に向けて Beyond 5G コンソーシアムが提唱する、包括的で持続可能かつ信頼できる社会の概念 [1] が考察されたと考えることができる。

これらの考え方を具現化した社会を実現するためには、想定されるユースケースを支えるための目標となるキー・パフォーマンス指標を満たす機能・特性と、実際に実装される技術や性能が必要である。いくつかの KPI を満たすためには技術的なブレークスルーも必要であるため、ステークホルダによる建設的かつ継続的な検討と貢献が重要となる。

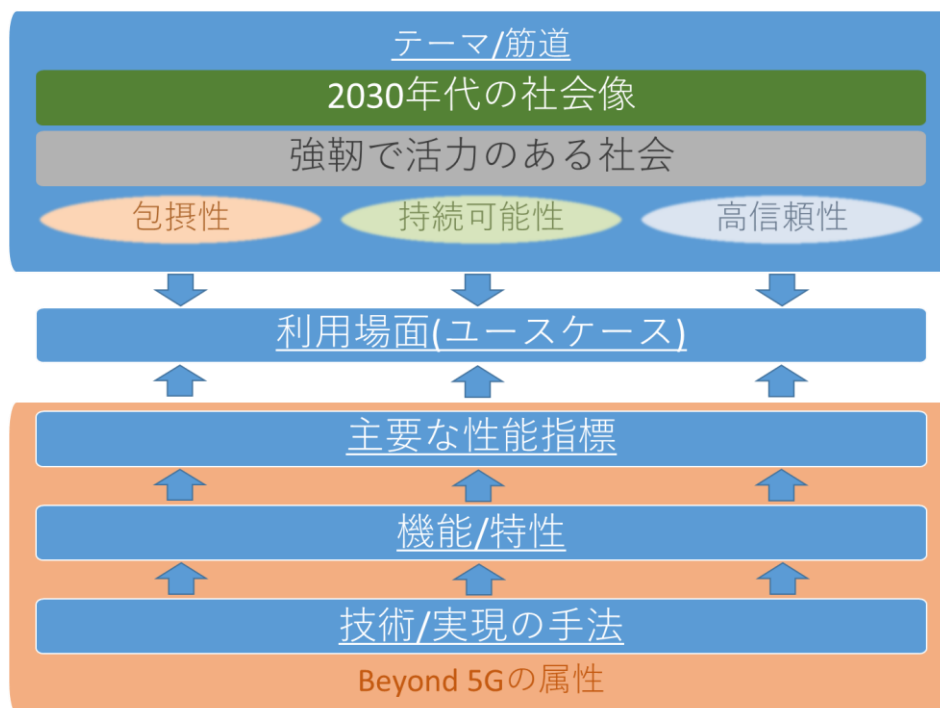


図 6.1-1 2030 年代社会を支える技術、あるいは実現の手法

携帯電話システムの発展は、2.5 節で述べたように、世界共通の統一規格を用いてきたが故の発展という側面がある。今後の世界標準開発の取り組みは、貴重な「金の卵」としてのこれまでの資産を最大限に利用しながら、新しい潜在的なステークホルダの期待や需要をいかに反映して発展させていくかが鍵となる。

別の言い方をするとすれば、既に社会基盤として広く普及している 4G、5G の情報通信インフラを効率的に活用して継承・発展させながら、ブレークスルー技術を適用することで Beyond 5G 時代に相応しい包摂性、持続可能性、高信頼性を有する社会基盤として様々な市場に広くサービスを提供していくことが重要になると考えられる。

6.4 節～6.8 節では、前記 3 つの理念を体現する社会に資する目標 KPI をサポートする様々な技術のトレンドについて、提供する価値や期待される役割、技術の概要・特長などについて述べる。

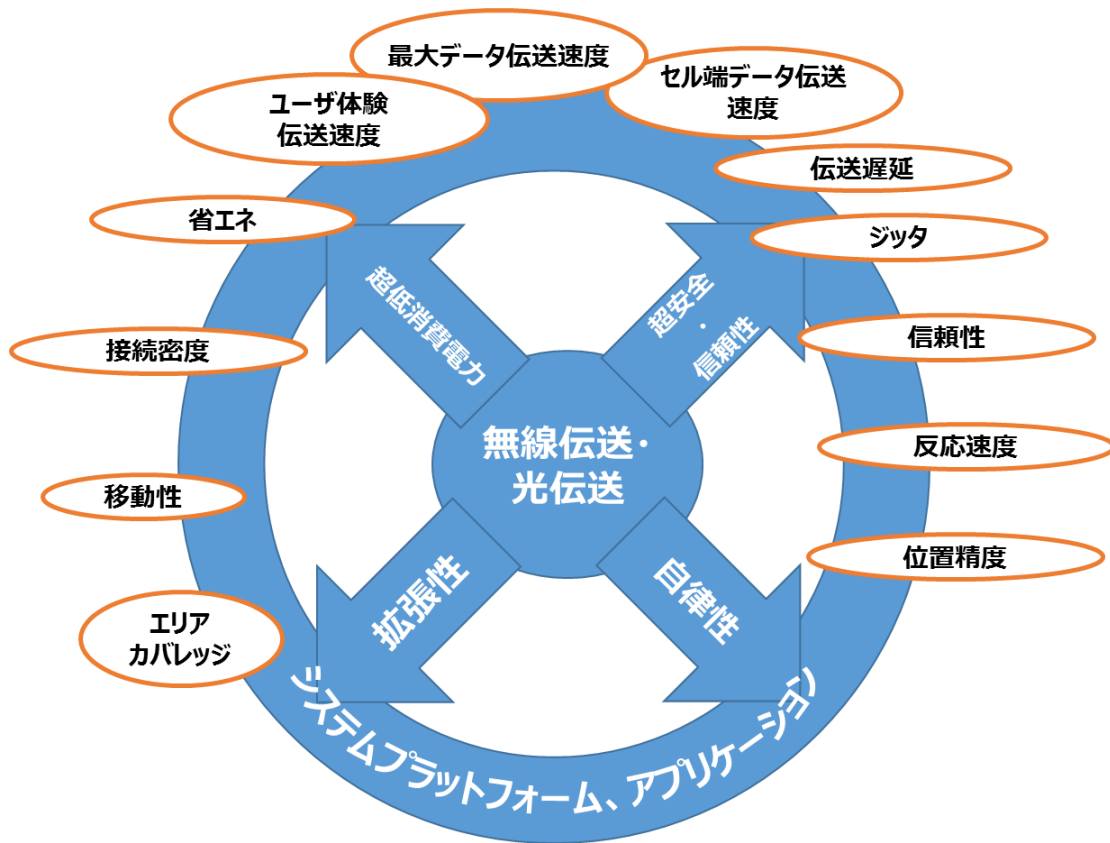


図 6.1-2 目標指標を支える技術

## 6.1.2 主要な技術トレンドの概要

### (1) Beyond 5G アーキテクチャ

2030 年代の未来社会におけるビジョンを実現し、利用者の多様なニーズに対応して、様々なサービスやアプリケーションを実現するための、Beyond 5G のアーキテクチャについて 6.2 節に示している。本アーキテクチャは、下記に示すような、いくつかの機能コンポーネントで構成されていて、それぞれの実現技術について解説している。また、本アーキテクチャを利用した応用例として、ユーザーセントリックサービスを提供するアーキテクチャや、ネットワーク自律運用、ネットワークとサービスの耐障害性アーキテクチャについても示している。さらに、これらの実現技術の詳細については、別冊「E2E Architecture」を参照されたい。

- デジタルツインの管理
- ネットワークコンピューティング融合
- E2E ネットワーク技術
- オーケストレータ
- ネットワーク AI 機能
- マイグレーション機能

### (2) 周波数資源の利活用技術

Beyond 5G に求められる高い性能を提供するためには、既存の周波数資源の有効活用および新たな周波数帯域の開発が不可欠である。6.3 節では、既存および新たな周波数資源の利活用の国内外動向、および電波伝搬特性に関する最新の研究成果を紹介する。

### (3) Beyond 5G と AI/ML 技術

AI と機械学習 (ML) は、Beyond 5G とは切っても切り離せない関係となり、共に助け合って進化する関係である。すなわち、Beyond 5G に向けた様々な技術の進化においては AI/ML 技術の進化を大いに活用していくであろうし (AI/ML for Beyond 5G)、AI/ML 技術を活用した CPS/デジタルツインにおいては Beyond 5G による超高速で低遅延な通信技術は必要不可欠である (Beyond 5G for AI/ML)。本ホワイトペーパーではこれらの観点について、以下のように幅広く取り扱っている。詳細については括弧内に記載の章において説明している。

#### (a) AI/ML for Beyond 5G

Beyond 5G における AI/ML 技術の活用としては、下のレイヤから順番に、物理層特性の把握からその制御、上位層における通信制御からネットワーク最適化、そして運用管理の自動化など、多岐にわたる。これら AI/ML 技術の活用においては、単に従来技術を学習ベースの技術に完全に置き換えるだけでなく、従来から培われてきたネットワークならではの物理特性のモデリングや様々な知見を AI/ML 技術と組み合わせて発展していくことが望まれる。

- 無線通信の経路損失のモデリング (6.3.2 電波伝播に関連する研究動向と成果)
- 無線通信における PHY/MAC 層の効率化とパフォーマンス向上 (6.8.8 ネイティブ AI ベ

ーズの通信のための技術)

- 高度な MIMO/大規模 MIMO のパフォーマンス向上とシステム設計の簡素化 (6.8.3 さらなる RAT/エアインターフェースの高度化)
- トラフィック予測や無線ネットワーク制御によるエネルギー効率の向上 (6.6 ネットワークエネルギー効率の向上)
- 非地上系ネットワークの自律的な運用 (6.7 非地上系ネットワーク (NTN) によるネットワークカバレッジ拡張)
- 自律的なセキュリティ技術 (6.5.2 その他の Beyond 5G の特性に関連するトラスト確保技術)
- アプリケーションから IT およびネットワークに至るシステム全体をワンストップで提供 (6.2.4 ネットワーク自律運用)

#### **(b) Beyond 5G for AI/ML**

大規模な CPS/デジタルツインは Beyond 5G のキラーサービスとなりうると想定され、その実態は端末からエッジ・クラウドにかけて分散したシステムにおける AI/ML の処理である。Beyond 5G はこのような分散処理のために超高速で低遅延な通信路を提供するだけでなく、このようなサービスの実現に向けて Beyond 5G ネットワークそのもののアーキテクチャを新しく検討していく必要があり、またアプリケーション性能や消費電力などの様々な観点での最適化も提供する必要がある。

- デジタルツイン/ロボット制御/現実世界 (フィジカル空間) 再現・拡張などに向けた XaaS (6.4 システムプラットフォームとアプリケーション)
- AI を活用したサービスとアプリケーションをサポートするためのネットワーク AI アーキテクチャ (6.2.1 全体アーキテクチャ)
- アプリケーションを考慮したネットワーク最適化 (6.2.3 ユーザー/アプリケーション中心の通信アーキテクチャ)
- 分散型ネットワークによる AI トレーニングと推論にかかるエネルギー効率向上 (6.6 ネットワークエネルギー効率の向上)

#### **(4) Beyond 5G とセンシング技術**

AI/ML 技術と Beyond 5G の関係と同じく、センシング技術についてもセンシングによる Beyond 5G の高度化に加えて、Beyond 5G を活用したセンシングの両面を考えることができる。本ホワイトペーパーではこれらの観点について、以下のように幅広く取り扱っている。詳細については括弧内に記載の章において説明している。

##### **(a) センシング for Beyond 5G**

Beyond 5G の無線通信においては、データを送りながら無線通信環境のセンシングを行っており、このセンシングをより高精度化することは無線通信性能の向上には欠かせない。また、ここで得られたセンシングデータは、無線通信のためだけでなく、次のパラグラフに記載の通り通信以外の様々な応用も可能である。



- 無線通信にセンシングを統合することによる性能向上と新たなユースケースの実現 (6.8.3 さらなる RAT/エアインターフェースの高度化、6.8.8 ネイティブ AI ベースの通信のための技術)

### (b) Beyond 5G for センシング

Beyond 5G ではミリ波帯以上の高周波数帯の無線の活用が検討されており、その性質を活用した高精度な空間センシングや位置測位の実現も期待される。このようなセンシングは無線通信(固定基地局/UAV 基地)や光通信によって提供される。さらには、このようなセンシングに加えて、カメラ/LiDAR 等のセンサーからの大容量のデータをシステムとして収集/処理するためのネットワークアーキテクチャや、これを活用したデジタルツインとしての実空間のセンシングも期待される。

- 無線通信環境の把握や高精度な位置測位 (6.8.6 統合されたセンシングと通信および高正確度なローカリゼーション)
- UAV 基地局によるセンシング能力の強化 (6.7.3 UAV による無線通信)
- 光無線通信によるセンシング (6.8.11 光無線・音響通信)
- 通信、コンピューティング、およびセンシング機能の統合 (6.2.1 Beyond 5G アーキテクチャ)
- デジタルツインとしての実空間のセンシング (6.4 システムプラットフォームとアプリケーション)

## (5) トラスト確保技術、および、通信ネットワークの耐障害性

Beyond 5G を安全・安心に利用するためのセキュリティ、プライバシー確保、信頼性、レジリエンス(耐性)などのトラスト確保に関わる技術については、「6.5 トラスト確保技術」で、ネットワークトラスト確保技術と、それ以外の関連するトラスト確保技術の 2 つに大別して考察・検討を行っている。

ネットワークトラストの確保については、Beyond 5G ネットワークの設計に関わる技術として、秘密性・完全性の確保、認証・認可技術とトラストモデル、トレーサビリティの確保—ログ/イベント/トラヒックフロー情報収集・管理技術、攻撃・故障への耐性の確保 (可用性の確保)、セキュリティコーディネーションの確保について検討している。また、Beyond 5G ネットワークの運用技術としては、ログ・イベント・トラヒック分析、インシデントに起因する情報の一元管理、統合的な対応及び復旧のための運用自動化技術、プライバシー保護機能、利用者/利用機器の信頼性診断について考察している。さらに、Beyond 5G ネットワークのセキュリティマネジメントに関わる技術として、脅威分析、リスク分析の高度化、動的なポリシーエンフォースメント技術、健全性自動監査技術についての検討を行っている。

関連するトラスト確保技術については、Beyond 5G における超高速・大容量、超低遅延、超同時接続、超低消費電力、自律性、拡張性の各側面における関連技術と仕組みについて考察している。

通信ネットワークの耐障害性については、「6.2 Beyond 5G アーキテクチャ」の中で、システム全体やエンドツーエンドにおけるサービスの耐障害性を確保するためのネットワークアーキテクチャという観点から、また、「6.2.5 耐障害性」の項では、ネットワークの耐障害性とシステムの耐障害性の観点から考察して耐障害性を確保するための Beyond 5G アーキテクチャの応用例を示している。

Beyond 5G においては、これらのトラスト確保技術、および、通信ネットワークの耐障害性に関わる技

術を適用したシステムの構築、展開、運用と維持・管理が重要となる。なお、Beyond 5G が、必須の社会基盤としてさまざまな利用シーンで高度なサービスを広く提供していくことに鑑みると、社会の安心・安全を脅かすインシデントや障害の規模や様態も多岐に渡ることが想定される。このため、トラスト確保技術や耐障害性に関わる技術の継続的な発展・適用とあわせて、社会制度やビジネススキームも含めた総体的に安心・安全な社会インフラとその利用形態として整備・検討を進めることが重要と考えられる。

#### **参考文献**

- [1] “Beyond 5G Promotion Strategy Roundtable Recommendations”, Beyond 5G Promotion Strategy Roundtable, (June 2020).

## 6.2 Beyond 5G アーキテクチャ

本節では、2030年のビジョンを実現し、利用者の多様なニーズに対して、Beyond 5G インフラを提供していくための Beyond 5G の E2E アーキテクチャについて述べる。我が国において Beyond 5G は Society 5.0 を進展するためのものであり、Beyond 5G アーキテクチャは Society 5.0 を進展するために Beyond 5G インフラを用いた通信やサービスといった機能を効率よく提供可能とすることを目的としている。

### 6.2.1 全体アーキテクチャ(Overall Architecture)

#### (1) 機能アーキテクチャ構成(Functional Architecture)

Beyond 5G で実現される通信は、6.7 節や 6.8 節で述べられる通り、様々な技術により、高速化、多接続化、低遅延化が5Gと比較して進化する。また、これまでの地上系ネットワーク(TN : Terrestrial Network)でカバーされていない場所についても、6.7節で述べられている、非地上系ネットワーク (NTN : Non-Terrestrial Network)として、衛星やHAPS(High Altitude Platform Station)などによる通信エリア化が進められる。これらのネットワークにより、ユビキタスな接続性、すなわちいつでもどこでも通信を確保できるようになる。このようなネットワークを実現するため、通信インフラは高度に仮想化され、ソフトウェアで制御できるようになる。また、Beyond 5G の E2Eアーキテクチャは、ユーザーの具体的な意図が元となり、Beyond 5G のインフラ、無線や有線の通信技術、通信エリア、通信帯域の輻輳やセキュリティなどを意識することなく、いつでもどこでもアプリケーションが求める性能やユーザーが必要とする品質を満たす最適な通信機能が提供されるように構成される。なお、Beyond 5Gにおいては、「ユーザー」とは、スマートフォンを利用するような人だけでなく、ロボット、ドローン、センサーといった広義なIoT端末といった、モノ、コトを実現する端末が含まれていると考えられる。すなわち、様々な人、モノ、コトを含むユーザーが中心となって、必要な通信機能をBeyond 5Gインフラから確保する、ユーザーセントリックな通信が実現されることになる。

Society 5.0 は仮想空間と現実空間を高度に融合させた CPS (Cyber-Physical System) により経済発展と社会課題を解決することが期待されている。CPS は 6.4 節で述べる通り、社会に遍在するセンサー等の機器を用いて、様々な人、モノ、コトから情報を収集し、現実空間を仮想空間上に構築、仮想空間上で社会活動を再現し、現実空間に作用することで社会価値をもたらす。Beyond 5Gインフラでは、CPS を実現するため、デジタルツインによる仮想空間と現実空間の接続・制御を行うことができる。デジタルツインにより、様々な Society 5.0 サービスが実現できるようになる。

Beyond 5Gにおけるデジタルツインには2種類存在する。Society5.0を実現し、実際の社会やサービスに対するデジタルツインである「Real-world Digital Twin」と、Beyond 5Gインフラ部分を対象とする「Network Digital Twin」である。Real-world Digital Twinの構築・制御のためには、社会の様々な場所に遍在するセンサー等の機器を用いて、様々な人、モノ、コトから膨大なデータを収集することで、現実空間を仮想空間に投影すること、また膨大なデータを分析・判断した上で仮想空間から現実空間に作用することが求められる。Network Digital Twinは、Beyond 5Gインフラを対象に現実空間と仮想空間の投影と作用を行うことにより、Beyond 5Gインフラの状態を把握するだけでなく、複数の候補のある制御などの作用をあらかじめ検証して、Beyond 5Gインフラが実際の社会に提供する通信機

能やサービスとして最適な作用は何かを判断することが求められる。Real-world Digital Twinと、Network Digital Twinは独立したものではなく、相互に連携するものと考えられる。具体的な例としては、Real-world Digital Twinによって仮想空間に投影された現実空間の状況を用いて、Network Digital Twinによる制御の候補を仮想空間上で検証した上で、現実空間のBeyond 5Gインフラにおいてユーザーごとに必要とする通信を確実に提供できるようにするようなことが挙げられる。

Beyond 5G では、Society 5.0 を実現する様々なサービスやアプリケーションが動作し、それぞれのサービス/アプリケーション要件に最適なネットワーク機能やコンピューティングリソースの提供が求められる。このため、Beyond 5Gでは5Gまでのネットワーク機能に加え、インフラ全体に偏在するコンピューティングリソースもオンデマンドで提供可能なアーキテクチャとする必要がある。さらに、インフラ全体が自律的に制御/最適化を実現可能なOrchestratorも必要となる。また、5Gまでも公共/社会インフラとしてネットワークの耐障害性に関する取り組みは行われていたが、Beyond 5Gはより社会生活に密着した公共/社会システムが動作することが期待されており、インフラ全体を対象としたエンドツーエンドにおけるサービス/アプリケーション/ネットワークの耐障害性を確保するには、OrchestratorやNetwork Digital Twinは大きな役割を果たすと考えられる。

AI (Artificial Intelligence) は、Beyond 5Gでは5Gよりその適用範囲が飛躍的に増加すると考えられる。まず、Real-world Digital Twinにおいては、仮想空間での膨大なデータの分析といった様々な機能においてAIが活用される。次に、Beyond 5Gインフラに着目すると、Network Digital TwinやOrchestratorといった、インフラを制御するためにも利用されるようになる。ただ、5Gでの個々の制御、例えばネットワークリソース割当におけるAIの適用ではなく、インフラ全体を見通した制御にAIが適用されるようになる。具体的なイメージとしては、ユーザーからの意図をもった要求により、Network Digital TwinとOrchestratorにおけるAIが連携して、複雑化したBeyond 5Gインフラ機能を組み合わせてユーザーごとに適した通信を提供するようになる。加えて、ネットワークリソースにもAIが適用されるようになる。例えば、AI for Air-interfaceのように、無線伝搬の推測、無線信号処理におけるエラー訂正、スケジューリングといった無線リソース割当、無線リンクのビームの最適な選択といった、Orchestratorの数百ミリ秒から秒オーダーの制御周期より短い周期であるミリ秒オーダーの制御にもAIが適用されるようになる。前述した以外にも、端末における画像処理といったアプリケーションレベルでのAI活用など、列挙すれば星の数となるほど、Beyond 5G では様々な場所においてAIが活用されると共に、AIと通信の融合が推進されると考えられる。

前述した内容を鑑み、Beyond 5G インフラを用いた通信やサービスといった機能を効率よく提供可能とするBeyond 5Gアーキテクチャ（図 6.2-1）を策定した。

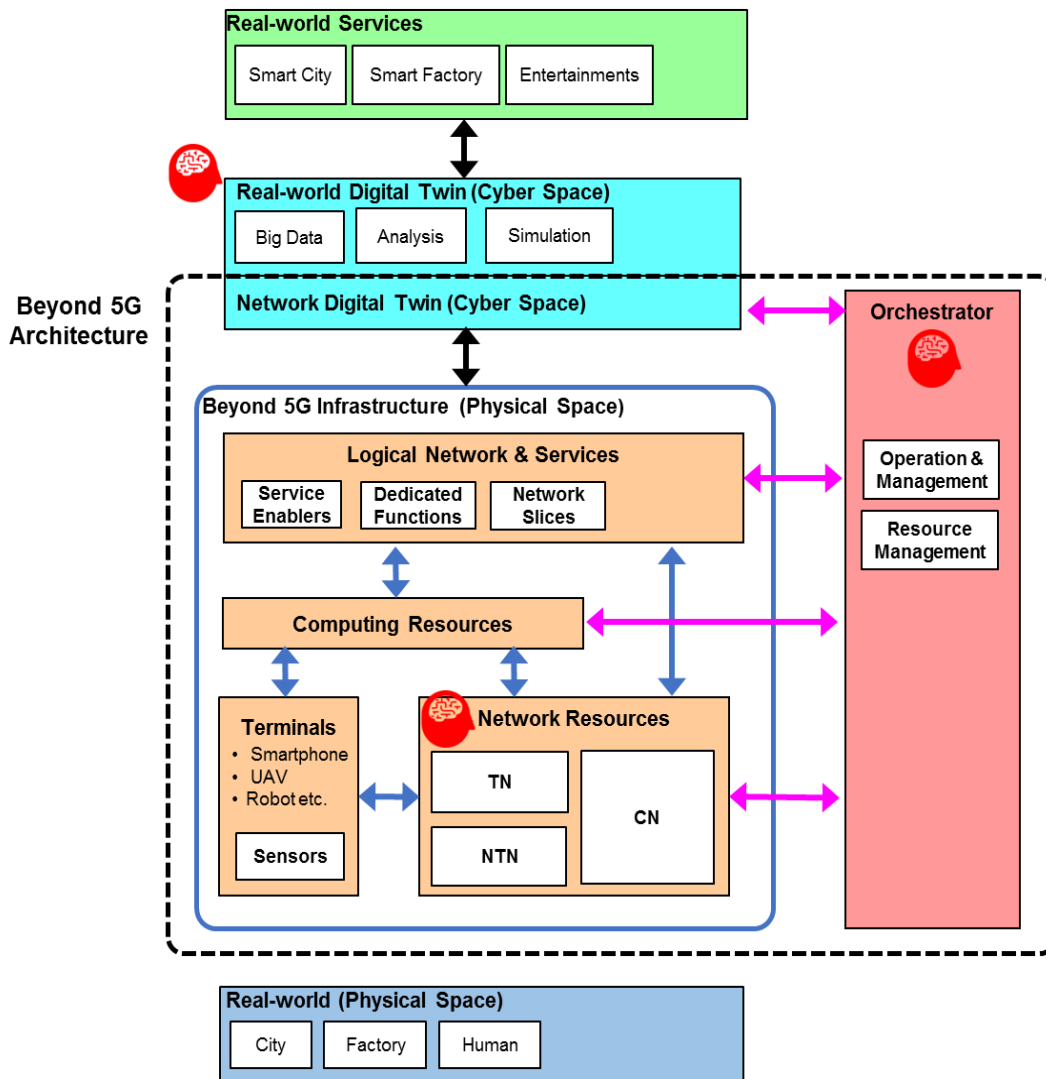


図 6.2-1 Beyond 5G アーキテクチャ

図6.2-1に含まれる構成要素の説明は次のとおりである。なお、以降で「Beyond 5Gアーキテクチャ」と言う場合は、Network Digital Twin、Beyond 5Gインフラ、Orchestratorの部分を目指すものとする。AIについては、前述したように様々な箇所で活用されると考えられるが、Beyond 5Gで特徴的な使い方となる部分にAIアイコンを提示している。

**(a) デジタルツイン**

実際の社会を対象とするReal-world Digital Twinと、Beyond 5Gインフラを対象とするNetwork Digital Twinの2つが存在する。

- Real-world Digital Twin
 

都市、工場、人などといった現実空間（Real-world）を、Beyond 5Gアーキテクチャが提供する通信やサービスを用いて情報収集を行って、仮想空間（Real-world Digital Twin）として投影したものである。仮想空間の中で、収集した情報をビッグデータ化し、分析やシミュレーションを行い、作用する。作用する先としては、スマートシティ、スマート工場、エンタメといった、現実のサー

ビス(Real-world Services)に加え、Network Digital Twinがある。Real-world Digital Twinでは、収集した情報群であるBig Dataの分析 (Analysis) やシミュレーション (Simulation) などの様々部分でAIが活用されることになる。

- ネットワークデジタルツイン(Network Digital Twin)  
Beyond 5Gインフラを現実空間として、それを投影した仮想空間の表現である。Real-world Digital Twinと連携しており、Orchestratorによる制御がどのようにBeyond5GインフラやReal-world Digital Twinにおける現実空間に作用するかを検証することが可能である。検証した結果を用いて、Orchestratorを介して、Beyond 5Gインフラを制御することになる。

## (b) Beyond 5Gインフラ

Beyond 5Gにおいて、通信及びコンピューティングの機能を実体として提供する部分である。次の要素から構成されている。インフラ内の関係性については、図6.2-1において青色の矢印で示されている。

- 論理ネットワークサービス (Logical Network & Services)  
論理的なネットワークやサービスを提供する管理単位で、例えばユーザー単位やサービス単位で作成される。この中には、XaaS (例：MaaS, RaaS, XR) といった実際のサービスを提供可能とするService Enablers、ユーザーやネットワークでの必要とする機能を実現するDedicated Functions、インフラ全体への通信機能の提供だけでなくService EnablersやDedicated Functionsへの通信機能を提供する、論理的なネットワークであるNetwork Slicesが含まれている。管理単位は、後述するComputing ResourcesやNetwork Resourcesといったリソースを用いて、Orchestratorが割当や管理を行う形で構成される。5Gにおける具体的なイメージとしては、NFV/SDN (Network Function Virtualization / Software Defined Network)や仮想化RAN (Radio Access Network) における論理的なネットワークが該当する。
- コンピューティング資源 (Computing Resources)  
Beyond 5Gアーキテクチャにおける計算機リソースの総称である。Beyond 5Gでは、5GでのCloud(Center/Edge)のみならず、Terminalsにあるような計算機リソースなど、様々な場所にあるリソースを柔軟に利用できる。
- ネットワーク資源 (Network Resources)  
Beyond 5Gアーキテクチャにおける通信機能を提供するリソースの総称である。地上ネットワークで主にモバイルネットワークのコアやRANが含まれるTN、衛星やHAPS等によるネットワークであるNTN、有線ネットワークであるCN (Core Network) から構成される。Beyond 5Gにおいては、Network Resourcesの提供のためのミリ秒オーダーの制御のためにAIが活用される。具体的な適用例としては、AI for Air-interfaceのような、無線伝搬の推測、無線信号処理におけるエラー訂正、スケジューリングといった無線リソース割当、無線リンクのビームの最適な選択が挙げられる。
- 端末機器 (Terminals)  
Network Resourcesとの通信を行い、計算機リソースを有する端末部分である。Beyond 5Gにおいては、「端末」とは、人が保有して操作するスマートフォンのような端末だけでなく、ロボット、ド



ローン、センサー等の広義のIoTを実現する端末が含まれている。また、Terminalsには、内蔵されたカメラ等のセンサーによるセンシング、及びNetwork Resourcesと連携したセンシングを行うためのSensor機能を有している。後者の具体的な例としては、モバイルネットワークにおけるISAC (Integrated Sensing and Communications) が挙げられる。

- オーケストレータ (Orchestrator)

Beyond 5Gインフラ、Network Digital Twinと連携して、Beyond 5Gアーキテクチャ全体の制御を司る部分である。図6.2-1では、その関係性について桃色の矢印で示している。

Orchestratorには、運用管理となるOperation & Management、インフラ内のリソース管理を行うResource Managementの機能がある。これらの制御にはAIが活用されるが、その適用範囲は5Gより広がることになる。5Gでは、Operation & ManagementやResource Managementといった個々の機能に対しての制御にAIが適用されていた。Beyond 5Gでは、前項までに述べたような複雑となるインフラ全体を見通して制御を行うためにAIが活用されることになる。

Beyond 5Gアーキテクチャを用いることで次のような内容が実現される。

1. デジタルツイン：Real-worldにおける現実空間と仮想空間を統合したデジタルツインが実現される。Beyond 5Gアーキテクチャにより、現実空間と仮想空間を結合するための通信や計算の機能が提供される。
2. ネットワークとコンピューティング融合：ネットワークリソースだけでなく、サービスやアプリケーションが利用するコンピューティングリソースの提供が可能となる。
3. ユーザーセントリックなE2Eネットワーク：エンドツーエンド通信を実現するのに必要なインフラ機能を、人のみならずモノやコトを含めたユーザーの具体的な意図に基づき、ユーザーごとに必要とする性能や体感品質 (QoE：Quality of Experience) に応じて提供可能とする。
4. Orchestrator: 各サービスに最適なインフラ機能の提供を迅速に行うとともに、Beyond 5G全体の最適化を可能とする。さらに、障害発生時に社会システムを停止させることのないシステム全体、エンドツーエンドの耐障害性を確保可能とする。
5. AIと通信の融合：Beyond 5Gインフラ内も含めて、様々な箇所でAIが活用されることになる。

## (2) 5Gでの実現機能との比較

Beyond 5Gにおいて、5Gからどのように変化するかを知ることは、進化した明確にするという観点で必要となる。このために、図6.2-1を元にした、5Gで実現されている内容を図6.2-2に示す。

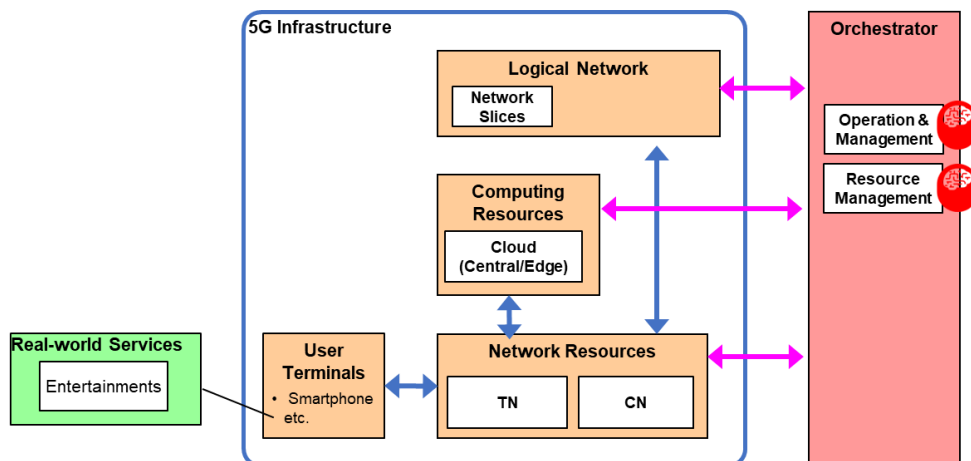


図 6.2-2 Beyond5G アーキテクチャを元にした 5G での実現内容

Beyond 5G アーキテクチャで実現される内容との 5G で実現される内容の相違点としては、次のとおりとなる。

- 図6.2-1で示している、Real-world Digital TwinとNetwork Digital Twinのように、Real-worldとNetworkが強く連携する形でのデジタルツインの実現は行われない。具体的には、デジタルツインのために、Beyond 5Gインフラが最適な形で通信機能やコンピューティングを提供することはできない。5Gベースのデジタルツインでは、あくまで通信のパイプとして5Gのネットワークが用いられることになる。
- Logical Network部分では、Beyond 5Gインフラに存在するサービスに関する機能は提供されない。ネットワークやRANの仮想化によるNetwork Sliceのみが提供される。
- Computing Resourcesは、Cloud (Central/Edge) により提供され、Beyond 5Gインフラで実現される様々な場所にあるComputing Resourceを活用するという部分は実現されない。また、Computing Resourceの利用先は、Network Resourceにおける仮想化ネットワークやRANの実現に限定され、Beyond 5Gインフラにおける様々な機能の実現を行うことはできない。
- Network Resourceは主にTNとCNで提供される。NTNについても、低軌道衛星 (LEO: Low Earth Orbit)を中心に適用が始まっているが、モバイルネットワークのバックホールや、追加のネットワークとしての扱いが主である。Beyond 5Gで想定されるようなTN、NTN、CNが一体となり、ユーザーがその相違を意識しないような通信機能といった、実現されるレベルには大きな違いがあることになる。
- 端末については、スマートフォンを中心とした、User Terminalが主に用いられ、それにより提供されるReal-world Serviceとしては、Webブラウザや動画といったエンタメなどの人に紐づいた内容となる。5Gにおいても、センサー等のIoTデバイスによる通信は行われるが、あくまでユーザーの利用する端末の一種として通信を行っている形である。Beyond 5Gインフラで想定されているような、端末の違いに応じた通信機能やサービスの実現とい

った内容までは実現されないことになる。

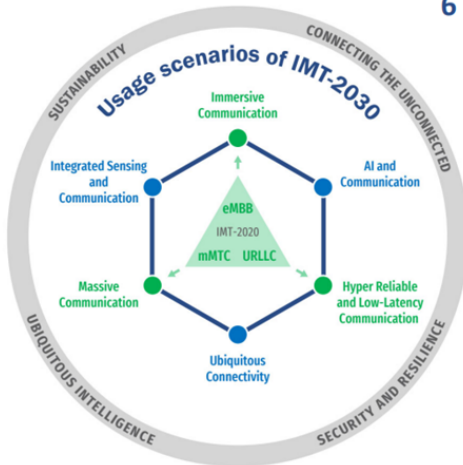
- Orchestratorは5GインフラをOperation & ManagementやResource Managementの観点で管理する。ただ、Beyond 5Gインフラのように複雑性はなく、さらに運用やリソース管理といった個別の観点で管理を行う形となる。また、AIの適用についても、インフラ全体の最適を目指した制御を行うものではなく、Operation & Management、Resource Managementといった個別の制御に対して適用される形態となる。

### (3) 利用シナリオと重要な特徴(Usage Scenarios and Overarching Aspects)

第5章以前で述べられているビジョンの実現を含めて、実際の利用シナリオが、Beyond 5G アーキテクチャでどのように実現されるかを述べる。利用シナリオとして、世界的に認知がある内容として、ITU-R で定義された IMT-2030[1]の Usage Scenario (図 6.2-3) があり、6 個の Usage Scenario と、4 個の Overarching Aspects が示されている。これらの内容が Beyond 5G アーキテクチャのどの機能で実現されるかを、主要な箇所にマッピングした内容を図 6.2-4 に示す。前述した Usage Scenario や Overarching Aspects は全て実現されている(図 6.2-4 の A から J)。Beyond 5G アーキテクチャにおける独自の内容としては、次の項目が挙げられる。(図 6.2-4 の K から M)

- ネットワークとコンピューティングの融合による、Dedicated Functionsでの User/Network functionの実現。これにより高リアルタイム性/広帯域性のアプリケーションやAI推論などを多様な性能の端末にオンデマンドに提供可能となる。
- ユーザーの具体的な意図であるUser Intentに基づく、E2Eでのユーザーセントリックなネットワークの実現。これにより、人だけでなく、モノやコトまでを含めて、それぞれに最適となる通信機能を実現可能となる。
- Orchestratorにおける、Autonomyによる自動化の実現。複雑化するBeyond 5G インフラをこれまでの運用管理の形態で行うと、工数が膨大となる。少子高齢化の時代に向けて、高度なインフラを少ない手数で実現するために重要な技術となる。また、AIについても、自動化を前提とした仕組みの構築を行うことになる。

## Usage scenarios



So called "Wheel diagram"  
Source: Document 5/131 and edited in 5G 5

## 6 Usage scenarios

Extension from IMT-2020 (5G)

- eMBB → Immersive Communication
- mMTC → Massive Communication
- URLLC → HURLLC (Hyper Reliable & Low-Latency Communication)

New

- Ubiquitous Connectivity
- AI and Communication
- Integrated Sensing and Communication

4 Overarching aspects:

*act as design principles commonly applicable to all usage scenarios*

Sustainability, Connecting the unconnected,  
Ubiquitous intelligence, Security/resilience

図 6.2-3 IMT-2030 における Usage Scenario

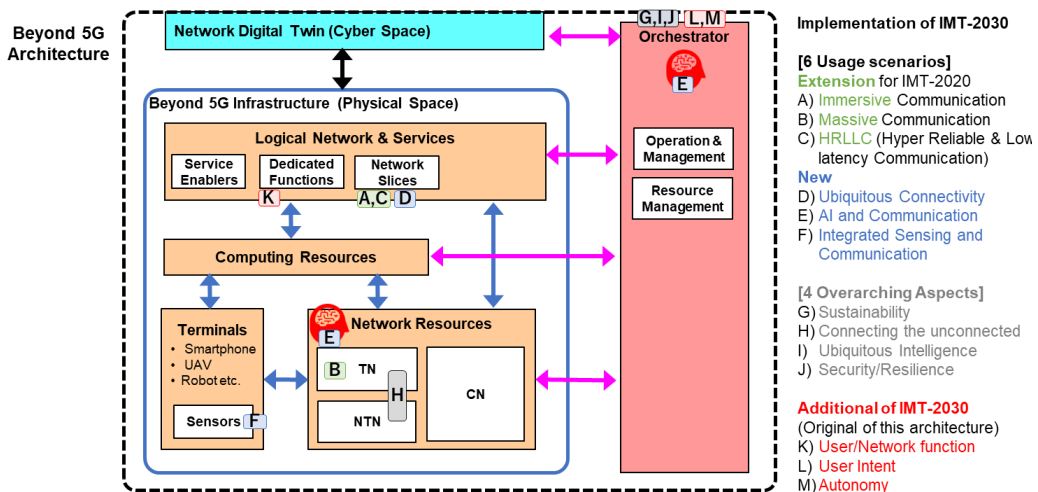


図 6.2-4 Beyond 5G アーキテクチャでの実現内容

### 6.2.2 アーキテクチャの実現技術(Enabler Technologies)

本節では、Beyond 5G アーキテクチャを実現するために、通信機能を司るネットワーク全体に対して必要となる技術の概要を述べる。各々の技術詳細については、別冊を参照されたい。また、個々の要素を実現する関連する技術については、“Cell-Free / Distributed MIMO”や、“Radio Technologies for higher frequency”などといった別冊にそれぞれ紹介されているため、合わせて参照されたい。

#### (1) デジタルツインの管理

Beyond 5G では、現実空間や Beyond 5G 基盤をデジタル化し、仮想空間上でデジタルツインとして管理、制御するための基盤を提供する。Beyond 5G の大きな特徴の一つは、図 6.2-1 に示されて

いる通り、実世界のデジタルツインと、ネットワークのデジタルツインの 2 種類のデジタルツインを統一することである。現実空間においては都市や工場、人間など我々が存在し生活するこの 3 次元空間上に展開され様々なものをデジタルツイン化することで、スマートシティやスマートファクトリ、エンターテインメントなど様々な実空間上でのサービスを提供するための基盤となる(実世界のデジタルツイン)。また同様に、Beyond 5G インフラにおいては、その通信資源や計算資源、端末、そしてそれから仮想的に構築される論理ネットワークやサービスなどをデジタルツイン化し、特にこれらをオーケストレータに提供することで、Beyond 5G の様々なサービスを実現したり最適化したりする基盤となる(ネットワークのデジタルツイン)。これら 2 種類のデジタルツインでは、それぞれ、ネットワークのデジタルツインを用いて Beyond 5G インフラの最適化を行ったり、実世界のデジタルツインを用いて現実空間上のサービスを実現したり最適化したりする。さらに、Beyond 5G においては、図 6.2-5 のように、これら両方のデジタルツインを統合して分け隔てなくアクセスできるようにし、両方の情報をもとに両方の最適化を行うことのメリットは非常に大きい。例えば、一方としては、無線通信環境や計算/通信資源の空き状況などの Beyond 5G インフラの情報をもとに、ロボット制御や交通制御、メディア品質などの実空間上のサービスをダイナミックに最適化することが考えられる。また、他方、実空間上のサービスの状態、たとえばロボットに与えられた業務やロボットの現在位置、まだメディア視聴中のユーザーの興味や状況をもとに Beyond 5G インフラをダイナミックに最適化することも考えられる。そしてこれら双方向の作用によって、Beyond 5G インフラを最適化しその能力と効用を最大限に高めると同時に、実空間上の様々なサービスの効率性や安全性、体感品質を高めることができる。

また、Beyond 5G は、上記のような両方のデジタルツインを管理するための基盤という役割を持つ。Beyond 5G の提供する超高速で低遅延な通信によって、また、分散した高性能な計算基盤によって、実空間に広がる様々な対象物に対して、大量のデジタルツインをリアルタイムに構築し、それらを様々なサービスに提供することができる。

別冊 E2E Architecture の“ Digital-Twin for and by Beyond 5G ”においては、以上のようなデジタルツインについて説明する。そして、確率的デジタルツインやクロスドメインオーケストレーションといった機能デザインについて述べ、最後に、これらのユースケースとして、無線通信の設計最適化や人とロボットのコラボレーション、持続可能なスマートモビリティについて紹介する。

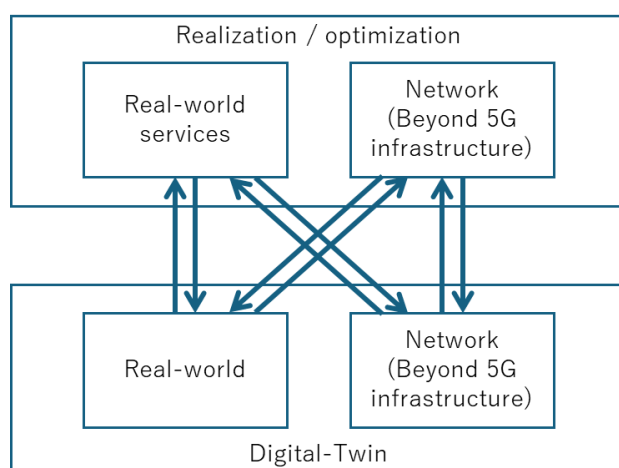


図 6. 2-5 現実空間と Beyond 5G 基盤のデジタルツイン

## (2) ネットワークコンピューティング融合

### (a) 汎用装置を使用した RAN 仮想化

コアネットワークの仮想化は、4G 時代から NFV(Network Function Virtualization)などが注目され、継続的な開発/導入が進められている。Beyond 5G 時代の基地局は仮想化対応されることで、非仮想化の基地局で使用された専用ハードウェアではなく、より汎用的なハードウェアで構築されるようになる。例えば、基地局を構成するアクセラレータが、現行の ASIC (Application Specific Integrated Circuit) に加え、汎用サーバーで使用されるメモリ、CPU (Central Processing Unit)、FPGA (Field Programmable Gate Array)、GPU (Graphics Processing Unit) といった汎用的なデバイスが使用されることになる。

5G 時代においても RAN やコアネットワークの仮想化が進んでおり、Beyond 5G 時代では予測されるトラフィック量と増加する割当周波数幅から、RAN 構成にも影響が起きることが予想される。コンピューティングリソースを RAN にも分散配備し、その上で AI アプリケーションを動作させることで、端末側の能力制限で実行が難しい計算処理を RAN 装置で実行し、非常に低遅延で高性能な AI アプリケーションを容易に実行できるネットワーク環境を提供することが期待できる。

非仮想化の従来型基地局では、処理能力(例：ベースバンド装置毎の処理性能 = 基地局何台)が予め決定していることが一般的であり、トラフィック量の差がある過疎部と都市部でも同一の処理性能の装置を設置する必要があった。基地局が仮想化対応することにより、過疎部のトラフィック量の少ない基地局への計算処理リソースの割当を抑制する一方で、都市部のトラフィック量が多い基地局にその余剰計算処理リソースを割当てることが可能になる。これにより、基地局の計算処理性能リソースの割当が最適化され、過剰な設備投資費の抑制が可能となり、ネットワーク構築のための設備投資額を抑制することが期待できる。

### (b) ネットワーク機能とコンピューティングリソースの最適融合

RAN/コアネットワークの仮想化や様々なアクセス手段 (光ネットワーク、NTN など) も利用可能となる Beyond 5G 時代には、より柔軟かつエンドツーエンドでのネットワーク機能配置が可能となる。ネットワ



ーク機能配置の自由度は論理的/物理的にも高まり、公衆事業者網に加え、ビジネスユーザー向けのプライベート網に対してもネットワーク機能をローカルかつ分散して配置するケースも増加すると予想される[2],[3]。また VR/AR (Virtual Reality/ Augmented Reality) 端末のような高リアルタイム性/広帯域性のアプリケーションや AI 推論などが普及する Beyond 5G 時代では、演算処理を行うコンピューティングリソース (メモリ、CPU、FPGA、GPU など) の需要が更に高まるため、ネットワーク機能と連携した上で分散化されたコンピューティングリソースの適切な利用が重要となる。

これらの実現に向けて、ネットワークトランスポートを APN (All Photonic Network) とした上で、APN を介してネットワーク内の異なるドメイン (RAN、MEC、コアネットワーク、Cloud など) に分散配置されるコンピューティングリソースを通信/アプリケーション要件に応じて最適に選択し、ネットワーク内のエンドポイントとして仮想的なコンピューティングリソースを提供するネットワークアーキテクチャ検討が行われている[4]。

このネットワークアーキテクチャでは、VR/AR 端末で要求される高性能処理をネットワーク側で代行することが可能となり、処理性能の劣る端末であっても高機能サービスの享受が可能となり、サービス事業者は端末の性能制約から解放され、端末の性能制限を受けず、多様な端末に対する高機能サービスを提供することが出来る。また、AI 推論でのトラフィック需要予測に基づいたコンピューティングリソースの配置・リソース配分を自律的かつ動的に最適化することも可能となり、局所的に想定以上のトラフィック需要増が発生した場合も小規模・中規模な範囲の対策で済み、一時的なイベントや不測の事態 (災害等) にも有効と考える。

### (3) ユーザー中心かつアプリ毎に最適化するためのネットワーク技術

現在のモバイルネットワークでは、通信はネットワークの管理下であり、主に人が使うスマートフォン上のアプリケーションが、あらかじめ定められた通信サービスを利用する形態である。しかし、Beyond 5G では、これまでのスマートフォンのような人間自身が直接利用する通信に加え、広義の意味での IoT、例えば、ロボット、ドローンをはじめとした飛行体、AR/VR といった、モノ・コトに関わるような様々な「ユーザー」が端末を利用して、通信を実施し、それらが複合してサービスが提供されることになる。このような通信については、先進国を中心とした少子高齢化に伴う労働力不足や熟練工減少が進む中、Beyond 5G が利用される時代に向けて、加速していくと考えられる。必要な通信環境の実現のためには、それぞれの「ユーザー」やその上での「アプリケーション」が求める通信を確実に提供するために、それぞれの要求に応じて柔軟にネットワークを構築可能な総体的ネットワーク技術が必要である。この実現には、ユーザー中心のネットワーク (User-centric network) と、アプリケーションを考慮したネットワーク最適化 (Application-aware network optimization) の技術が必要となる。詳細については、6.2.3 節を参照されたい。

### (4) オーケストレータ

Beyond 5G では、Society 5.0 を実現する様々なサービスやアプリケーションが動作し、それぞれのサービスやアプリケーションに最適なネットワーク、コンピューティング機能の迅速な提供が求められる。このため、Orchestrator により、Beyond 5G インフラ内に分散するネットワークおよびコンピューティングリソース

スを最適に割り当ててユーザーに提供する。

Beyond 5G で扱うネットワークリソース、コンピューティングリソースは様々なドメインに亘っている。例えば、ネットワークリソースは TN、NTN、CN など管理しているドメインが異なり、コンピューティングリソースは MEC (Multi-access Edge Computing) からクラウドサーバに亘って分散している。Orchestrator はこれらの分散したリソース、異なるドメインで管理されているリソースを統合的に管理し、ユーザーやサービスが求める機能、性能を満たすようにネットワークおよびコンピューティングリソースを割り当てる。

Beyond 5G は社会の重要インフラになることが期待され、Beyond 5G 上で重要な社会サービスが提供されることが予想される。Orchestrator では、上記のように単一ユーザーやサービスのみの要求を満たすだけでなく、社会全体のサービス提供に支障をきたさないように全体最適を実現する。また、近年社会課題になっている大規模災害や大規模障害による通信障害への対応も重要になる。Beyond 5G では、障害発生時に社会システムを停止させることなく、サービスを継続させるため、Orchestrator による耐障害性の確保も重要な機能である。Orchestrator では、ユーザーやサービスユーザー提供品質を低下させてサービス継続を優先させるなどの全体最適を行うことで、システム全体、エンドエンドの耐障害性を確保する。

このように、Orchestrator では、地理的にも管理ドメイン的にも分散したリソースを、単一サービス、ユーザーごとに最適に割り当てること、Beyond 5G 全体や耐障害性などのため全体最適を行うことを両立する。大規模システムの管理制御は人力で行うことは困難であり、Beyond 5G は AI を用いた Orchestrator により自律的に運用される。

Beyond 5G の自律運用を目指すネットワーク自律運用の詳細については、6.2.4 を、重要インフラである Beyond 5G の耐障害性の確保については 6.2.5 をそれぞれ参照されたい。

## (5) ネットワーク AI アーキテクチャ

Beyond 5G 通信システムにおける AI 機能は、その革新的な能力向上を背景に、アプリケーションサービスとネイティブネットワーク機能の両方において、その応用が進む事が予想されている。図 6.2-1 に示される様に、Beyond 5G においては、AI を活用したサービスとアプリケーションをサポートすると共に、エンドツーエンドシステムを一貫し駆動させる AI 基盤機能としてその能力が取り込まれる。具体的には、Beyond 5G のエアインターフェースとネットワークの設計は、エンドツーエンドの AI と機械学習 (Machine Learning, ML) を活用し、カスタマイズされた最適化および自動化された運用管理 (Operation and Maintenance, O&M) を実現する。これは一般的に「AI for Network (AI for NW, AI4NET)」と呼ばれている。更に、各 Beyond 5G ネットワーク要素は、通信、コンピューティング、およびセンシング機能を有機的に統合し、クラウド上の一元化されたインテリジェンスから Beyond 5G ネットワーク内のユビキタスインテリジェンスへの進化を促進する。これが「Network for AI (NW for AI, NET4AI)」または「AI as a Service (AIaaS)」と呼ばれる深化したアーキテクチャコンセプトである。AIaaS では、Beyond 5G 機能は、通信技術、情報技術、データ技術、および産業インテリジェンスを無線ネットワークに統合させインテリジェントで AI ネイティブな統合アーキテクチャとして機能し、大規模な分散型トレーニング、エッジでのリアルタイム推論、ネイティブなデータ鈍感化など、様々な AI の用途に

適応が可能となる。

#### (a) ネットワーク AI アーキテクチャの主な要件

- クラウド AI からネットワーク AI へ

クラウド AI の様な集中型の学習においては、ネットワーク全体からデータを収集し、中央に置かれたエンティティに送信する形態であるため、コスト高となり制約も伴う。一方、ネットワーク内で AI の学習と推論を可能にするネットワーク AI は、エネルギー効率の向上にも役立つ。さらに、集中型の学習では、個人情報を用いた学習に制約もある。また、クラウド AI では、トレーニングデータへのアクセスや、実環境の抽象化されたモデルを用いる事で、オフラインで学習を行う事が多い。しかし、このようなプロセスにおける欠点は、多くの詳細情報が過剰に単純化されたり、重要なメトリックスが無視されてしまう事もあり結果、パフォーマンスの向上に制約を伴う。Beyond 5G (MEC) の高パフォーマンス分散型インフラストラクチャーでは、特に遅延要件が厳しいユースケース（産業シナリオでのクラウドループ制御など）において、リアルタイムネットワーク AI に関する新たな将来性を開く可能性が期待される。

- 密接に連携する ICDT インフラストラクチャー

Beyond 5G ネットワークで AI をより効果的に活用するためには、情報、通信、データ技術 (Information, Communication and Data Technology : ICDT) が密接に融合した新しいネットワーク基盤を構築する必要がある。現在、ネットワーク接続とコンピューティングサービスは比較的独立したシステムであり、相互コラボレーションメカニズムは、管理レイヤーの機能公開インターフェースを介してのみ実現されている。新たに相互連携されたアーキテクチャによって、これらインターフェースのリアルタイム性能が保証されるだけでなく、普遍的で統一された標準システムが確立され、Beyond 5G AI のアプリケーションが大幅に促進される。

- 整理および管理された安全なデータサービス

Beyond 5G システムは、本質的に常時膨大な量のデータを生成し、そのデータは運用から管理、コントロールプレーンからユーザプレーン、環境センシングから端末情報までと多岐にわたる。このようなさまざまな種類のデータは幅広い技術またはビジネス領域に由来するため、Beyond 5G では、データセキュリティとプライバシー保護を考慮しながら、データを効率的に整理および管理する必要がある。

- ネットワーク内での柔軟な AI の展開

一定水準のネットワークおよび IT の専門知識が必要となる場合は特に、外部パートナーからサービスを引き付けるために、導入の容易さが不可欠である。この要件は、主に AI の管理機能およびオーケストレーション機能の設計に関連している。

本セクションの冒頭で述べたように、Beyond 5G アーキテクチャの機能は、エンドツーエンドサービスを最適化し、ネイティブおよびサービスベースでの AI のサポートを可能とする。これらの要求に応え、その特徴を実現するために、以下の 2 つの概念（タスク指向型通信と AI サービスの運用管理）が導入された。

#### (b) タスク指向型コミュニケーション

タスク指向型コミュニケーションは、AI やセンシングなどの新しいサービスをサポートする Beyond 5G の

重要なパラダイムシフトの 1 つである。従来の通信サービスはコネクション指向型であり、エンドユーザーが他のユーザーと通信したいのか、クラウド上のサーバーに接続したいのかに関わらず、エンドユーザーやサービスからの要求に基づいて通信リソースが割り当てられる。その結果、ユーザーの意図に基づいて接続が確立される。

これに対して、タスク指向型コミュニケーションでは、ネットワークがユーザーに提供するタスクに基づいて接続を確立する、全く異なる設計思想が採用されている。たとえば、AI タスクが、ユーザーの移動、リアルタイムの人口分布、または端末利用の頻度に応じ、ある地域のデータを収集し、処理する。公共交通機関のクラウドは、このタスクの情報を活用し、ラッシュ時の都市における移動性を把握することが可能となる。このように、企業は必要な情報を得るために特定のユーザーからデータを収集する Beyond 5G の AI サービスを使用する事で容易に目的を達成することができる。タスク指向型通信の構築には、タスク管理、異種リソースのオーケストレーションおよびスケジューリング、データ管理、接続管理などが含まれる場合がある。Beyond 5G の AI タスクは、コンピューティング、データ、接続、アルゴリズム間の調整を処理する機能を提供する。別冊 E2E Architecture の “Task-Oriented 6G Native-AI Network Architecture” においては、この詳細を述べている。

### (c) AI サービスの運用と管理

ネイティブな AI サポートを検討するうえで、AI サービス運用管理フレームワークは必須の要素である。このフレームワークは、AI サービスの運用、AI サービスの管理を含む AI サービスのシームレスな統合と展開を促進するために使用される。AI サービスの運用で重要な事は、マルチプレイヤーの関与の元で運用が提供される事であり、透過的かつ効率的に機能しなければならない。そのため、ブロックチェーンによる信頼性の確保が必要になる場合がある。AI サービスの管理には、AI ワークフローオーケストレーション、データ管理、異種リソースオーケストレーションなどが含まれる。また、AI サービスの運用、管理には、Beyond 5G の独自のネットワークに AI を活用したネットワーク運用も含まれる。AI を活用した Beyond 5G ネットワーク運用については、6.2.2(4)でも説明する。

## (6) システムアーキテクチャと Beyond 5G に向けたマイグレーション

Beyond 5G を実現する上で、図 6.2-1 に示す Beyond 5G インフラを、過去の世代のインフラから如何にして進化させ、展開していくかが課題となる。特に、各世代の初版標準仕様で策定されるシステムアーキテクチャは、当該世代の基盤となり、その後の高度化は、後方互換性を保つ範囲内での機能拡張になるため、革新的な技術を導入する貴重な機会となる。AI/ML、クラウド基盤でのインフラ構築、ユニバーサルアクセスを提供するための NTN, HAPS 等様々なネットワークへのアクセス手段を統合的に提供するシステム設定が期待される。地球温暖化・気候変動に対処するため、ICT 分野でも、サステナビリティ、エネルギー消費低減を達成するための技術の導入が期待される。一方で、5G の商用サービスも世界的に拡大しつつあり、5G スタンドアローンの商用展開も着実に進んでいる。既存の 5G インフラへの投資も活用しつつ、2030 年ビジョンを実現するための革新的な Beyond 5G インフラを提供するバランスが求められる。4G から 5G へのネットワークマイグレーションにおいては、既存 4G のインフラを活用したノンスタンドアローン運用方式、及び 5G のインフラに完全に移行するスタンドアローン運用方式が、標準仕様で



規定された。コアネットワークも、5GC、若しくは EPC に収容する形態があり、数多くのアーキテクチャオプションが規定された。また、運用周波数を 4G から 5G に円滑に移行するための技術、Dynamic Spectrum Sharing (DSS) も標準化されている。5G 商用サービスが着実に拡大する中で、5G の標準化・商用導入を元に得られた知見もあり、5G から得られた経験を元に、Beyond 5G の商用導入を円滑に進めるための技術を標準化すべく、検討を行う必要がある。更には、5GC で Service Based Architecture (SBA) が採用されており、クラウド基盤でのインフラ構築に即したシステム設計となっている。Beyond 5G に向けては、5GC 向けに採用された SBA をコアネットワーク以外にも適用するのか、既存 5G インフラとのバランスも含めた検討が必要となる。Radio Access Network (RAN) においても、無線アクセス機能を、クラウド基盤上に分散配置し、運用の柔軟性を高めるアーキテクチャが考え得る。詳細は、別冊白書 E2E Architecture で解説する。

### 6.2.3 ユーザー中心かつアプリ毎に最適化するためのネットワーク技術

Beyond 5G では、これまでのスマートフォンのような人間自身が直接利用する通信に加え、広義の意味での IoT、例えば、ロボット、ドローンをはじめとした飛行体、AR/VR といった、モノ・コトに関わるような様々な「ユーザー」が端末を利用して、通信を実施し、それらが複合してサービスが提供されることになる。このような通信環境の実現のためには、それぞれの「ユーザー」やその上での「アプリケーション」が求める通信を確実に提供するために、それぞれの要求に応じて柔軟にネットワークを構築可能な、総体的ネットワーク技術が必要である。この技術として、本節において、ユーザー中心のネットワーク (User-centric network) と、アプリケーションを考慮したネットワーク最適化 (Application-aware network optimization) を紹介する。

#### ユーザー中心のネットワーク

Beyond 5G では、前述したような人だけではなく、モノ・コトを実現する広義の IoT を含めた「ユーザー」(以降、本項では同様の意味で用いる) に対して、確実に通信を提供するため、柔軟にネットワークを構築して提供する必要がある。このようなユーザーを中心に柔軟にネットワークを構築して提供する概念を「ユーザーセントリックネットワーク」(User-centric network) と呼ぶ。ユーザーセントリックネットワークでは、個々のユーザーに関連するネットワーク機能を、ユーザーの具体的な意図 (User intent) に基づき、定義、設定、制御可能とするアーキテクチャを採用する[12]。現在のネットワーク機能中心のネットワークアーキテクチャとは異なり、ユーザーセントリックネットワークでは、有線ネットワークや無線アクセス網等の仮想化技術を用いて、各ユーザーは通信やサービス提供に必要なすべての機能を提供される、専用ネットワークのような論理的な集合体を持っており、それに対して通信やサービスに必要なネットワークや計算機等のリソースが提供されることになる。また、ユーザーは自分が生成したデータまたは自分に属するデータ、およびそのようなデータに対応する処理権限 (認証、許可、アクセスコントロールなど) の制御が可能となる。

## ● ユーザーセントリックネットワークの主な要件

### ① ネットワーク機能中心からユーザー中心へ

各ユーザーは、ネットワーク内の通信リソースや計算機リソースから仮想的に構築された独自の「専用ネットワーク」を持つ。通信に着目すると、地上のモバイルネットワークを含めた、TN (Terrestrial Network)や有線ネットワーク(CN: Core network)だけでなく、衛星や HAPS (High Altitude Platform Station) 等の NTN (Non-Terrestrial Network)を組み合わせて利用する。端末に対して無線を用いて通信を提供する中心となるモバイルネットワークにおいては、これまでのセルラーのように基地局を中心としたエリアの構築でなく、いつでもどこでも通信を利用可能な基地局にとらわれないエリア構築が、様々な通信への要求に対応するために必要となる。また、モビリティ管理、ポリシー管理、セッション管理、ユーザーの個人情報管理を可能にする。ユーザー中心のネットワーク機能は、ネットワーク指向型のネットワーク機能から切り離され、シンプルで柔軟性があり、ユーザーが制御しやすくなる。

### ② 機能の集中化から分散化へ

ネットワークの可用性と堅牢性を考慮すると、分散型アーキテクチャが必要になる。これにより、通信に対する DDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃と単一障害点 (Single Point Of Failure, SPOF) のリスクが大幅に軽減される。加えて、ユーザー個々にネットワーク機能が統合して提供されるという設計原則により、ネットワーク機能間のメッセージ交換が不要となり、通信処理の複雑性、通信遅延が軽減される。さらに、分散化によりユーザーのデータに対する信頼性も向上する。集中型アーキテクチャでは単一のトラストアンカーから個人情報にアクセスされることになるが、分散型アーキテクチャではユーザーセントリックネットワークのアプローチに基づいて、ユーザーのデジタル領域は、豊富なデータリソースを含みつつ、明確に定義された処理権限の境界線を伴い作成される。これにより、監査可能で耐タンパー性のある分散型台帳 (ブロックチェーンなど) の利用が可能となり、データ所有者自身による認証が可能となる。このデジタル領域は、デジタルツインの開発や、デジタル資産管理にも役立つ。

## ● ユーザー中心のネットワークを実現する技術

ネットワークの拡張性と信頼性を向上させ、ネットワーク実装のコストを効果的に削減するには、ネットワーク機能の種類を最小限に抑える必要がある。ユーザーセントリックネットワークでは、いくつかの基本的な機能を導入することで、ネットワーク機能の種類を削減し、サービス全体を実現できる。

### ① ユーザーサービス機能

ユーザーサービス機能は、それぞれのユーザーに特化したネットワーク機能で、モバイルユーザーがサービスにアクセスするために必要なすべての機能が実装される。すべてのユーザーサービス機能は、単一のランタイムエンティティで構成され、ピアツーピアネットワークとして構築され、分散した形式で動作する。その結果、ユーザーサービス機能内での通信インタラクションが減り、複雑性が軽減されるため、柔軟で管理しやすい実装と低遅延が実現される。



## ② ネットワークサービス機能

ネットワークサービス機能は、ネットワーク全体の運用保守の要となるネットワーク指向型機能（ネットワークアクセス、グローバルポリシー、ネットワーク機能の公開など）が実装される。ネットワークサービス機能は、ユーザーがネットワークに接続する最初のポイントとして、Orchestrator と連携して、ユーザーサービス機能のライフサイクル管理とグローバル調整を行う。

ユーザーセントリックネットワーク向けのマルチパーティトラストによるユーザーデータ管理アーキテクチャは、トラストアンカーとして機能するブロックチェーンと分散型ストレージで構成される。認証、許可、アクセスコントロールは、ブロックチェーンに展開されたスマートコントラクトによって実装される。個人情報へのアクセス許可は、すべてデータ所有者によって行われる。

また、ネットワークサービスのかなめとなる通信路の確保という意味では、TN、NTN、CN を Orchestrator と連携して、ユーザーの具体的な通信への要求に応じて使い分けられることになる。また、特にユーザーへの通信の中心となる、モバイルネットワークにおいては、ユーザーの要求に応じた通信をいつでもどこでも提供するために、基地局を中心としたセルによる通信エリア構築から、様々な基地局を要求に応じて動的に連携して利用して通信を実現可能なものとして、セルフリー技術が挙げられる。

## アプリケーションを考慮したネットワーク最適化

Beyond 5G、IoT、AI を活用してデジタルトランスフォーメーション（DX）を推進し生産性が高く豊かな社会を実現していくことが重要になっている。このような背景のもと、従来のエリア毎の平均的なユーザー体感品質（QoE）を向上するポリシーに加えて、DX/IoT アプリケーション性能（作業速度や生産性等）を通信セッション単位且つリアルタイムで緻密に守るポリシーを強化していく必要性が高まっている。そのためにはアプリケーション、ネットワーク、及び現場の状況に応じて、インテリジェント且つ自動的に RAN を制御し、DX/IoT アプリケーションを安定して高い性能で利用可能とする必要がある。本節ではこのような世界を実現するアプリケーションを考慮したネットワーク最適化（Application-aware network optimization）技術について説明する。

### ● 社会背景

先進国を中心に少子高齢化による労働者不足や熟練工減少が進む中、人間にしかできなかった多くのことを機械で代替し社会課題を解決する必要性が高まっており、今後 DX/IoT を活用した自動化・省人化、遠隔監視・制御の必要性がますます高まると予想される。DX/IoT 領域では機器の移動性や設置容易性が求められるユースケースが多く無線通信が必須となり、且つ高い DX/IoT アプリケーション性能（作業速度や生産性等）を担保することが求められ、それに伴い通信品質に対する要求条件も厳しくなる [13]。このような背景から、Beyond 5G に対する期待が高まっている。

### ● アプリケーションを考慮したネットワーク最適化に求められる要件

① アプリケーション要件の多様化と変動に対応

産業活用を含む用途拡大により多種多様なアプリケーション、及びアプリケーション毎に異なる通信品質の要求条件に対応することが求められる。DX/IoT 領域ではアプリケーション性能（作業速度や生産性等）や実世界状況（移動機器の衝突リスク等）に応じてダイナミックに変動する通信品質の要求条件への対応も必要となる。DX/IoT アプリケーションとネットワークの両方を深く理解した専門人材の確保が難しく且つリアルタイム・ダイナミックにネットワーク利用を最適化する必要があるため人手による対応は困難である。

#### ② 上下方向で厳しい通信品質要求条件を保証

DX/IoT 領域では、アプリケーション性能が各企業の本業のパフォーマンスに影響するため、安定して高いアプリケーション性能（例えば、監視カメラの映像分析精度、無人搬送車の運搬スループット、自動運転における安全性）が強く求められる。そして、高いアプリケーション性能を実現するためには、厳しい通信品質要求条件の達成を求められることが多々ある [13]。例えば工場自動化や機器制御等では、上り下りの双方向で、低遅延等の通信品質を、高信頼で保証することが求められる。機器制御・自動化に関わるアプリケーションでは通信遅延時間は概ね 1 ミリ秒～10 ミリ秒以下、可用性は 99.9999%以上が求められる。

#### ③ 複数アプリケーション・トラフィック混在に対応

DX/IoT 領域といってもアプリケーションやその要求条件は多様で、且つ同じアプリケーションでも要求条件が異なる複数種別のトラフィックを生成する場合がある。このため大容量通信を必要とする情報伝送系のトラフィックと低遅延・高信頼性を必要とするアプリケーション制御系トラフィックが混在する場合等への対応が求められる。ネットワークスライシング技術でトラフィック種別毎にスライスを構築する方法も考えられるが、電波資源の有効利用や同一アプリケーションが複数種別のトラフィックを生成する場合などでスライス分離が適さない場合も考えられる。その場合、低遅延・高信頼を維持しながら大容量通信を実現する等幅広い要求条件に同時に対応できる必要がある。

### ● アプリケーションを考慮したネットワーク最適化技術

Beyond 5G 時代に向けモバイルネットワークの仕様は高度化されていくが、機器の移動や通信環境変化に伴う無線品質変動に対しては、運用中の知的且つ自動的なネットワーク最適化機能で対応していく必要がある。

#### ① アプリケーション要件の多様化と変動に対応

アプリケーション要件の多様化と変動に対応していくためには、学習機能を搭載した AI で DX/IoT アプリケーション、ネットワーク、及び実世界の状況をリアルタイムで分析し知的且つ自動的にネットワークや通信を最適化し、システム全体でアプリケーション性能を最大限に高める技術が必須となる。これにより高度化されたモバイルネットワークの機能・性能を使いこなし、DX/IoT アプリケーションを高い性能で安定的に利用可能とする。その実現のためには様々な AI の開発が必要不可欠である。

#### ② 上下方向で厳しい通信品質要求条件を保証

無線品質が変動する中、上下方向で厳しい通信品質要求条件を保証するためには空間ダイバーシティを活用する必要がある。高信頼な通信環境を構築するためには多数の通信路をつくり、アプリケ

ーション、ネットワーク、実世界の状況に応じて知的且つ自動的にパスを選択できる余地を多くする（冗長性を増やす）ことが有効である。知的且つ自動的にビーム管理、チャンネル選択、通信路選択等が鍵となる。

### ③ 複数アプリケーション・トラフィック混在に対応

複数アプリケーション・トラフィック混在に対応していくためには、要求条件が異なる様々なアプリケーションやトラフィックを柔軟に収容する無線リソース割当を実現する必要がある。要求条件の異なる様々なアプリケーションを収容するため、異なる Numerology を有する信号を周波数領域で多重する Mixed numerology や無線資源割当スケジューラを知的且つ自動的に最適化することが鍵となる。

## ● 実現する上での課題

ネットワークの普及や社会実装を考える上では、標準化の課題を解決していく必要がある。O-RAN Alliance では多種多様なアプリケーションへの対応を見据え機械学習を利用した自律的且つ自動的にネットワーク最適化の標準仕様を検討しており、オープンなインターフェースの活用による RAN のインテリジェント化やネットワーク全体の最適化の実現を目指している [14]。こういった標準化の動きを更に活発化していく必要がある。

今後、下記のような課題も解決して Application-aware network optimization 機能実現の社会実装を推進していく必要がある。

- ① アプリケーションが多様化する中、その性能や要求条件を定義する作業を如何に共通化していくか
- ② AI が必要とするデータ（例えば、RAN 関連データ）が適切に公開されるか
- ③ RAN を最適化するための機能やインターフェースが適切に公開されるか
- ④ 空間ダイバーシティ確保のために複数ベンダーのネットワーク機器や、複数オペレータのネットワーク、及び異種ネットワークを横断で使いこなせるか

## ● Beyond 5G の進化が、IoT アプリケーションや AI の開発加速を促進

これまでは IoT 機器はベンダーや機種毎にインテリジェントな制御機能が搭載され、コントローラソフトウェアも特定機器・機種に紐付くことが多かった。Beyond 5G により、低遅延で安定した無線通信環境が実現されると、クラウド・エッジサーバ側でインテリジェント且つ高負荷なデータ処理が可能となる。これによりクラウド・エッジサーバに搭載されたコントローラが複数ベンダーや複数機種の IoT 機器を協調制御しシステム全体の最適化を実現し易くなる。更に IoT 機器の簡素化・軽量化・汎用化により普及が進み、結果として DX/IoT アプリケーションや AI の開発も加速していくと考えられる。

### 6.2.4 ネットワーク自律運用

5G、AI、IoT を活用して DX を推進し、生産性が高く豊かな社会を実現していくために、誰もが様々な用途においてネットワークを迅速に活用できるようにすることが求められている。そのためには、業務の要

求及び現場の状況に応じて、インテリジェント且つ自動的に、アプリケーションから IT (Information Technology) およびネットワークに至るシステム全体をワンストップで提供可能とする必要がある。本節ではこのような世界を実現するネットワーク自律運用 (Autonomous network operation) のアーキテクチャについて説明する。

## ● 社会背景

社会に 5G/AI/IoT が浸透する中、その活用を前提に業務の抜本的な改革を図る DX が注目を集めている。DX によって業務の効率化や新たな価値の創出を行うためには、ネットワークの活用が不可欠であり、用途毎の要件に応じたネットワークを誰でも柔軟かつ迅速に活用できることが求められている。しかしながら、先進国を中心に少子高齢化による労働者不足や熟練工の減少が進む中では、常に十分な技術者を確保することは難しい。そもそも、業務の現場で求められるネットワークを提供するには、関連するアプリケーションや IT インフラ等を含むシステム全体を構築する必要があり、これには高度な技術的知見が必要である。高まるネットワークの需要を減りゆく技術者によって支える体制は限界を迎えつつあり、Beyond 5G がもたらす自律性による解決への期待が高まっている。

## ● Beyond 5G に何が求められるか

Beyond 5G のネットワーク運用では、構築から運用まで全てのワークフローにあたって、省力性・柔軟性・迅速性を同時に満たす完全自動化の達成が求められる。ネットワーク運用の自動化技術の進展について、TMForum では以下の通り 6 段階で定義している [15]。

レベル 0: 手動運用 (Manual Operation & Maintenance)

レベル 1: 運用支援 (Assisted Operation & Maintenance)

レベル 2: 部分自律運用 (Partial Autonomous Network)

レベル 3: 条件付き自律運用 (Conditional Autonomous Network)

レベル 4: 高度自律運用 (High Autonomous Network)

レベル 5: 完全自律運用 (Full Autonomous Network)

運用のプロセスを実行 (Execution)、検知 (Awareness)、分析 (Analysis)、判断 (Decision)、意図/経験に基づく判断 (Intent/Experience) に分け、レベルが上がるとより後段のプロセスが自動化され、レベル 5 ではあらゆる状況に対応できる自動化を目指す。5G では Awareness、Analysis の一部の自動化にとどまるレベル 2 からレベル 3 であった自動化レベルを、Beyond 5G では Decision を自動で実行できるレベル 4 から 5 に引き上げる。

このため、以下の課題への対応が必要となる。

### ① 業務の要求に基づくネットワークの提供

今後ネットワークを求める利用者は様々な産業の従事者であるから、その要求は ICT (Information and Communication Technology) の言葉で表現されるのではなく各産業の言葉で表現されてしかるべきである。ネットワークを提供するにあたっては、各産業の言葉で表現された

要求を解釈し、ICT の要件へと翻訳して、その実現手段を講ずることが求められる。産業の種類は多岐に渡るため、多種多様な要求に対応することが求められる。また、業務の状況に応じた様々な制約条件を踏まえて、適切な実現手段が検討されることが望ましい。

### ② アプリケーション/IT/ネットワークを横断したエンドツーエンドネットワークのワンストップな提供

業務の現場で活用できるネットワークを提供するには、RAN や基幹ネットワークなどの通信インフラ、オンプレミスやクラウドなどの IT インフラ、および関連するアプリケーションなどを含むシステム全体を構築する必要があるが、これらはワンストップで提供されることが望ましい。これらの構成要素を個別に手配するには、各構成要素について理解し、これらを組み合わせる必要が生じるため、技術的知見や作業工数を要すると共に、ネットワーク提供のリードタイムを長期化させる要因となる。

### ③ 人間による細かな指示を必要としない自律的な判断

様々な要求に応じてネットワーク全体を構築して提供するにあたっては、多様な状況に合わせて適切な実現手段が検討される必要がある。この際、例えば、利用するネットワークの種類やクラウド基盤の種類、或いはネットワーク機器の型番やその設定値など、あらゆる詳細についての判断が求められる。また、運用中における障害やセキュリティリスクの発生といった事象に対して、部品交換のような局所的な対応からアーキテクチャ変更のような抜本的な構成変更に至る様々な対応方法の中から、適切な手段を選択する必要がある。こうした判断にあたって、逐一人間の指示を仰ぐようでは、今後増加するネットワークの需要を少ない技術者でまかなうことは困難となる。そこで、ネットワーク自身が自律性を発揮し、判断能力を獲得することが求められる。

## ● 必要となるネットワーク機能

前述の課題を解決するために必要となる機能について考察する。ネットワーク運用の全体は複数の階層や機能群から成り立っている。これらの要素は、いずれも自律的なネットワークの実現に向けて改革される必要があるが、全ての要素を一挙に置き換えることは難しい。以下では、ネットワークの運用に必要な機能群を 3 つの階層に分けて、それぞれの望ましい形態について考察する。

### 第 1 階層：構成要素のソフトウェアライゼーション

ネットワークは複数の構成要素からなるシステムであって、あらゆる運用上の作業の具体的な実体は、各構成要素に対する起動・停止・設定変更・状態参照などの操作である。これらの操作が人間の作業員によって実施されるようでは、ネットワークの迅速な提供は難しい。各操作は、プログラムから発せられる電子的な命令によって機械的に実行されることが望ましく、構成要素をそのように操作可能なものに置き換えることをソフトウェアライゼーションという。ソフトウェアライゼーションは、代表的には機器の仮想化と Application Programming Interface (API)の整備によって達成される。

### 第 2 階層：ネットワーク全体に渡る監視と制御の自動化

電子的に操作可能となった構成要素を統括して、ネットワーク全体を運用するにあたっては、一連の操作を正しい順序で実行したり、複数の構成要素の状態を一元的に把握したりする必要があり、その



ために自動化された監視や制御の機能が必要となる。

### 第3階層：高度な知性による状況判断と対処方針立案の自律化

監視や制御の自動化によって、従来ネットワークの運用に必要とされてきた多くの作業を自動化することができるが、これだけでは、「作業の内容を計画する」という作業が依然として人間に委ねられることになる。すなわち、要求に基づいてネットワークの具体的な構成を設計すること、設計したネットワークの構築に必要な一連の作業手順を計画すること、ネットワークの構成要素の状態の変化から要求の満足に影響するような異常を検知すること、検知した異常に対して引き続き要求の満足を維持するために必要な作業を計画することなどが、自律的に実行されることが求められる。

#### ● 実現する上での課題

前述の機能のうち、特に第3段階に挙げた自律化については、これを実現して社会基盤として安心・安全に活用するにあたって、下記に挙げる課題を解決していく必要がある。

##### ・高度な知性の実現

ネットワークの構築や運用においては、極めて多様な状況や未知なる状況が発生する。その全てについて人が事前に対応方法を指示しておくことは不可能である。そこで、過去の事例から対応方法を獲得したり、自ら様々な事例を生み出して試行したり、過去の類似した事例に基づいて未知の状況を判断したりするような、自律的な能力が必要となる。その実現に向けては AI/ML の活用が鍵になると考えられる。

##### ・説明性と人との協調

自律化されたネットワークの中身がブラックボックス化すると、意図しない動作をした際に収集が付かなくなる恐れがあるため、ネットワークの提供者はそのような仕組みを運用することは難しい。自律性が与えられることは判断の裁量を与えられることであり、その見返りとしての説明責任が求められる。また、必要に応じて人の指示に従って判断を調整する能力も必要である。

##### ・拡張性

ネットワークに纏わる構成要素や技術要素には様々なものがあり、多様な企業や団体によって提供されている。それらは日々新た々に開発されており、今後も日進月歩で進化を続けると考えられる。そのため、自律的なネットワークによって扱われる構成要素や技術要素もまた、第三者によって自由に拡張できることが必要であり、また常に更新され続ける必要がある。

以上の課題の克服にあたっては、適切な標準化を図ると共に様々な団体と協調連携して、技術開発の取り組みを活発化していく必要がある。そのような事例として、ここでは ONAP(Open Network



Automation Platform) と ITU-T(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector)における取り組みをそれぞれ紹介する。

### 取り組み事例 1: ONAP

ONAP では、設計時と運用時を含む多種多様な機能に関する標準化を推進しており、オープンなインターフェースの活用によるネットワーク全体の最適化の実現を目指している [16]。また、適用シナリオとして、5G, VPN, vCPE などの様々な通信サービスを対象としている。

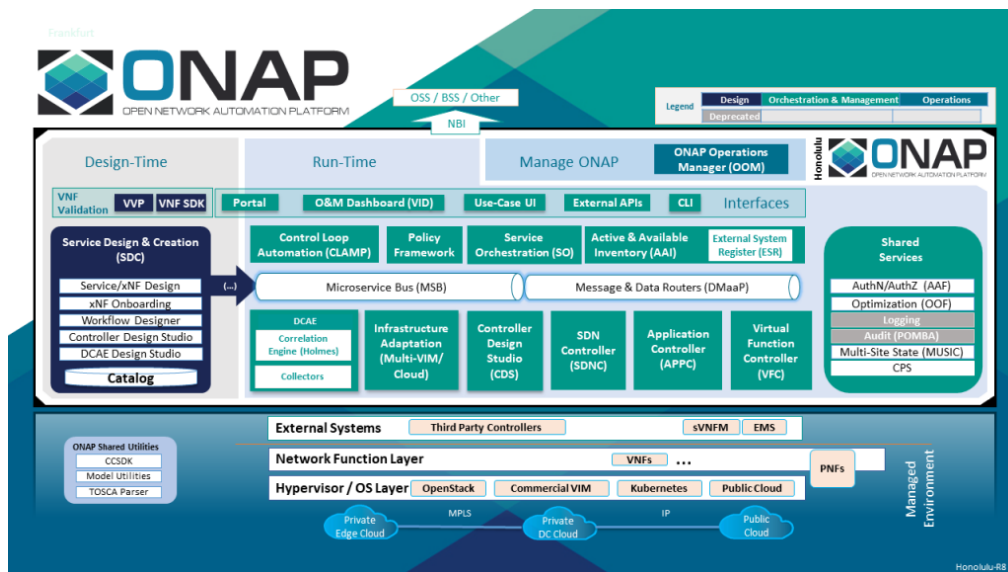


図 6.2-6 ONAP 全体アーキテクチャ

図 6.2-6 に ONAP の全体アーキテクチャを示す。Design-Time フレームワークにおいて、ネットワークに関する設計情報(例 : Helm chart, YAML)を管理し、その設計情報をもとに Run-Time フレームワークにおいて通信サービスを構成する通信機器(例 : ルータ、モバイルコア)を制御する。さらに、Northbound Interface (NBI)を通して、通信事業者や顧客のリクエストを受信する。自律的なネットワーク運用の実現のためには、通信事業者や顧客の意図や期待を表す Intent に基づいて通信サービスを制御する必要がある。2022 年 11 月現在における ONAP 最新リリースである Kohn リリースでは、Intent による通信サービス制御に関する機能の開発が進められている [17]。NBI を介して通信事業者や顧客から Intent 情報を受領し、その Intent を満たすように通信サービスを自律的に構成・制御することで、自律的なネットワーク運用が実現可能になると期待されている。

### 取り組み事例 2: ITU-T

ITU-T では、Focus Group on Autonomous Networks (FG-AN) において、ネットワーク自律運用を実現するためのアーキテクチャやユースケース等のハイレベルな要件の定義を進めている [18]。FG-AN にて議論されているアーキテクチャの一例を図 6.2-7 に示す [19]。図 6.2-7 のア

アーキテクチャは、自律的に運用される UCN を実現するフレームワークに関するものである。ユーザーのエンドツーエンドの通信要求品質を満足するために、同図の Knowledge Base subsystem に蓄積されたデータに基づいてネットワークコントローラを更新し、ネットワークの混雑状況等の種々の条件に応じて、適切なネットワークコントローラを選択・適用する。

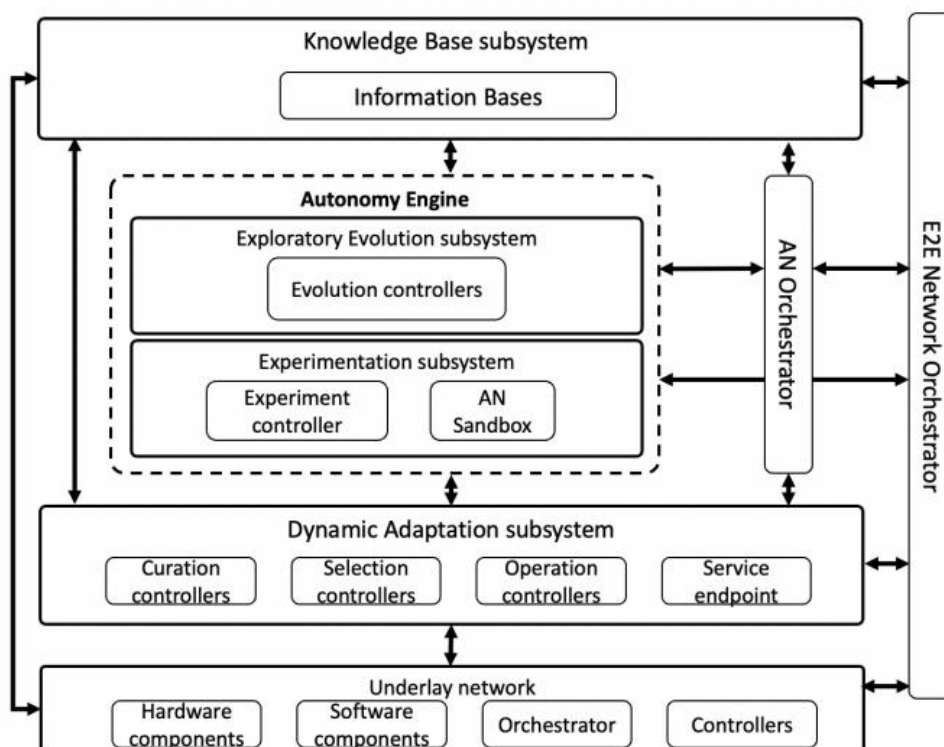


図 6.2-7 Autonomous Network の制御アーキテクチャ例

以上のように各種団体との協調連携を強化しつつ、今後、下記のような課題も解決して自律的なネットワークの標準化を推進していく必要がある。

1. マルチベンダー環境であっても、容易に互いの共通理解が得られること
2. オペレータが共通的な環境を持つことにより、円滑にオペレーションの妥当性を検証できること
3. ソースコードの提供により希望する仕様や機能を反映できること

● **Beyond 5G の進化が人のボトルネックを解消しネットワークインフラの更なる高度化を加速**

これまでは人間の技術者が日々のネットワーク運用を担ってきたが、ネットワークが自律化されることによって、人間は定常的なルーチンワークから解放されることが期待される。その後は、新しい障害事象への対応方法の開発や、より高度なネットワーク基盤の開発など、自律化されたネットワークの更なる強化に労力を集中させることができるようになる。これにより、ネットワークインフラの更なる高度化が加

速度的に進展し、DXの実現を支える基盤が実現される。

## 6.2.5 耐障害性

2030年代以降のBeyond 5Gの時代では、Beyond 5Gの各種特徴を生かした様々なサービスが提供されると想定され、益々重要な社会インフラになることが考えられる。このため、2030年代以降のアーキテクチャ[20]について検討する上で、耐障害性の確保は重要な要件となる。例えば、自動車の自動運転のみならず、カバレッジ拡張に伴い、船舶の自動運転や、将来的には、空飛ぶクルマの自動運転も実用化の可能性がある。また、超低遅延や超高速大容量の特徴を生かした遠隔手術なども実用化されつつあり、これらミッションクリティカルなサービスについては、高いQoSを確保することが益々重要になると考えられる。このように、Beyond 5Gはネットワークと様々なシステムのパーティカルな組み合わせによってサービスが提供される。そこで、Beyond 5Gの耐障害性を確保する対象として、ネットワークとシステムの2つの観点に着目し、Beyond 5Gに求められる耐障害性について考察する。さらにこれらの耐障害性を確保したBeyond 5Gアーキテクチャについて示し、その仕組みについて解説する。

### (1) ネットワークの耐障害性

Beyond 5Gの時代に特に重要なインフラとして位置づけられるのは通信ネットワークであり、ネットワーク自体の耐障害性を確保することは益々重要となってきている。通信ネットワークが障害を発生する主な要因としては、通信機器や設備の故障や破損などであり、経年劣化によるものや工事などの人為的ミスによる場合もある。これらは、障害の規模から、特定リンクや特定機器などの小規模障害から、複数の基地局や、複数の通信リンクや機器に及ぶ大規模障害などもある。また、大規模障害は、特定のオペレータのみに発生し、他のオペレータは全く影響がない場合もある。一方で、地震や津波など自然災害による大規模障害が発生する場合がある。

表 6.2-1 ネットワーク障害の規模と主な要因

	障害箇所例	原因
大規模障害	複数通信ノード、通信リンク 特定オペレータ障害など	地震や津波などの自然災害 複数設備・機器の同時故障など
小規模障害	特定通信リンク、通信ノード 特定機器など	機器の劣化、 工事ミスなど

これらの障害規模により、耐障害性を確保するための対策も異なると考えられる。特定の通信リンクや機器の障害のように小規模障害の場合は、障害箇所を回避するための迂回経路の設定を行う方法がある。この場合に、ネットワークの構成管理情報から障害箇所を特定し、最短の迂回経路をダイクストラ法などにより特定し、ゼロタッチオペレーションで、一斉に切り替える方法などがある。このとき迂回経路は、オペレーションシステムと呼ばれる集中管理制御センターで人工知能(AI)や機械学習(ML)などを利用して特定され、関連する迂回ノードに伝達されて一斉に切り替えが行われる。管理制御は特定の集中管

理制御ノードで行われるため、大規模災害時には当該ノード自体も被災する可能性があり、耐災害としては適さないと考えられる。一方で、障害に隣接する通信ノードや基地局がいち早く障害箇所を特定し、自律分散的に、迂回経路を探索する方式[21]がある。この場合、障害に隣接するノードが自発的に探索を開始するため、集中管理制御方式と比較して、復旧時間が短く、分散管理であるため、中規模障害程度まで対応できる可能性があると考えられる。

表 6.2-2 管理制御方式による分類と特徴

	対応障害	復旧時間
<b>集中管理制御</b>	小規模障害	比較的に長い
<b>分散管理制御</b>	小規模～中規模障害程度	短い

なお、地震や津波などの自然災害時による大規模障害などで、集中管理制御も分散管理制御も機能しなくなった場合を想定すると、地上系ネットワーク(TN)だけでなく、非地上系ネットワーク (NTN) を迂回経路として一時的に利用する場合も考えられる。また、特定のオペレータのみ大規模障害が発生した場合に、他のオペレータが運用する基地局を一時的にシェアリングして、トラフィックをオフロードすることも考えられる。

特に、防災や減災のための情報通信システムについては、災害時でも防災拠点間で確実につながる通信手段を有し、システム連携や情報共有が可能となることが求められる。このため、各防災拠点にサーバーを設置し、サーバー間を複数の様々な通信手段で接続し、同期・連携することによりデータを共有する取り組み[22]も進められている。

このように、障害発生時の自動障害復旧機能としては、Beyond 5G とは言っても、従来から研究開発されてきたように、ネットワーク自体を、NTN や HAPS (High Altitude Platform Station) などを含め、メッシュ状やループ状 (リング状) に、冗長構成とすることや、障害発生個所を瞬時に特定し、迂回経路を自動的に SDN(Software Defined Networking)技術などを使って再構成する機能などが重要となる。また、迂回経路探索にあたっては、AI/ML 機能を使って、サービス利用者の QoS 要求に応じた自動復旧サービスをゼロタッチオペレーションで提供できるような仕組みも重要になると考えられる。なお、ネットワークの自律運用に関しては 6.2.4 節も参照されたい。

## (2) システムの耐障害性

今後、Beyond 5G の特徴を生かした様々なサービスや機能が、ますます重要な役割を果たすようになると考えられ、前述の耐障害性が確保されたネットワークを通して提供されることが期待される。これらのサービス・機能を提供するシステムについても、ネットワーク自体と同様に耐障害性を確保する必要があると考える。今後、ますます多様なサービスが提供されることになれば、それらを構成する機能がますます複雑になる。複雑なシステムを一体で構成すれば、いざというときの再構成の柔軟性が低下することが考えられる。このため、障害からの回復力の高いシステムを構築するには、システムの構成要素であるサブシステムが持ち寄られ、それぞれのサブシステムの状況を見極めた上で必要に応じてサブシステムを他のサブシステムで置き換えるなどして、柔軟に対応することにより、全体としてシステムの動作が持続可能とすること

が必要であと考えられる。例えば、下図に示すように、飛行管理システムが、ある宇宙通信システム (NTN)と地上通信システム(TN)のサブシステムが組み合わさりサービスが提供されている場合を想定する。この時、NTN や TN のサブシステムで障害が発生した場合に、持ち寄られた別の障害がないサブシステムに切り替えることにより、サービスの持続性を確保することが可能となる。サブシステムの切り替えや、最適な組み合わせの選択は、オーケストレータの役割である。このため、オーケストレータとサブシステム間は、オープンな共通インターフェースを提供することが望ましい。サービスとして、飛行管理システムの代わりに、アバターロボット制御システムやスマートシティ管理システムなどと組み合わせたシステム構成の場合も同様に扱われる。このようにして、サービスの耐障害性を確保することにより、サービスの持続可能性を確保することが可能になる。

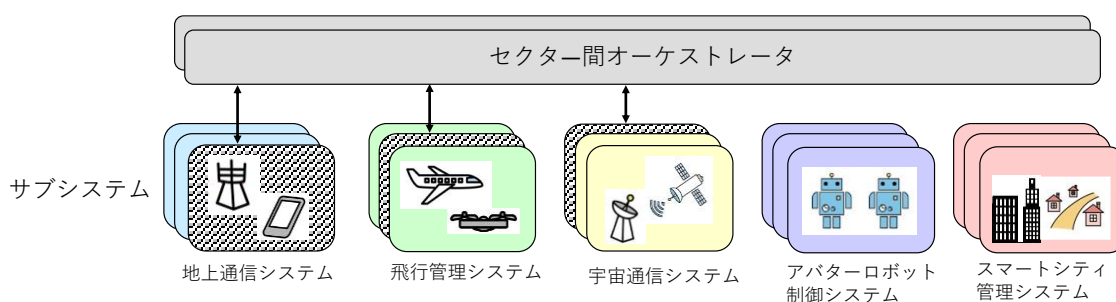


図 6.2-8 サブシステムのオーケストレーション<sup>9</sup>

上記の再構築の判断やサブシステムの組み合わせは、これまでは人間がある程度関与してきたが、システムが複雑化するに従い、対応する時間や判断能力の限界が出てくる可能性がある。このため、オーケストレータにより、サブシステムの組み込みや切り離しなどを自動化する機能を備え、合意できるルールの下、その中に様々なサブシステムを位置付けていく仕組みが重要となる。また、サブシステムの存在をブラックボックス化して複雑性を隠ぺいすることにより、サービス提供者が障害時に必要なサービスの立ち上げ等に注力する環境を提供する必要がある。

### (3) 耐障害性 Beyond 5G アーキテクチャ

Beyond 5G において耐障害性を実現するために、ネットワークやシステムを跨いでサブシステムを最適に組み合わせるオーケストレーション機能に加えて、サービス提供者によるサブシステムの取り扱いを容易にするサービスイネーブラー機能を提供するための仕組みも備えた Beyond 5G アーキテクチャ[23]を下図に示す。ここでサービスイネーブラーは、3GPP SA6で検討が進められている SEAL(Service Enabler Architecture Layer for Verticals)[23]と同様に、関連する業界に跨って共通のサービス機能の一部を提供することを想定しているが、ここで示すアーキテクチャでは、ネットワークサービスに限定するものではない。また、オーケストレータは、いわゆる ETSI で検討されている ZSM(Zero-touch network and

<sup>9</sup> 図の一部は NICT 提供



Service Management) [25]のように、NTN や TN などの異種ネットワークに跨る通信ネットワークサービスをゼロタッチオペレーションでつなぐ機能だけではなく、ここで示すアーキテクチャでは、複数の事業者（以下、セクターと呼ぶ）が運用するサブシステムを跨いで、最適なサブシステムの選択や組み合わせを行う。このように、セクター間で最適化するためのゼロタッチオペレーションも可能とすることにより、持続可能なサービスを提供することが可能となる。このアーキテクチャにより、前述のネットワークの耐障害性だけでなく、サービスを提供するシステムの耐障害性も確保できる仕組みが提供できると考えられる。なお、Beyond 5G アーキテクチャの全体像については、図 6.2-1 も参照されたい。

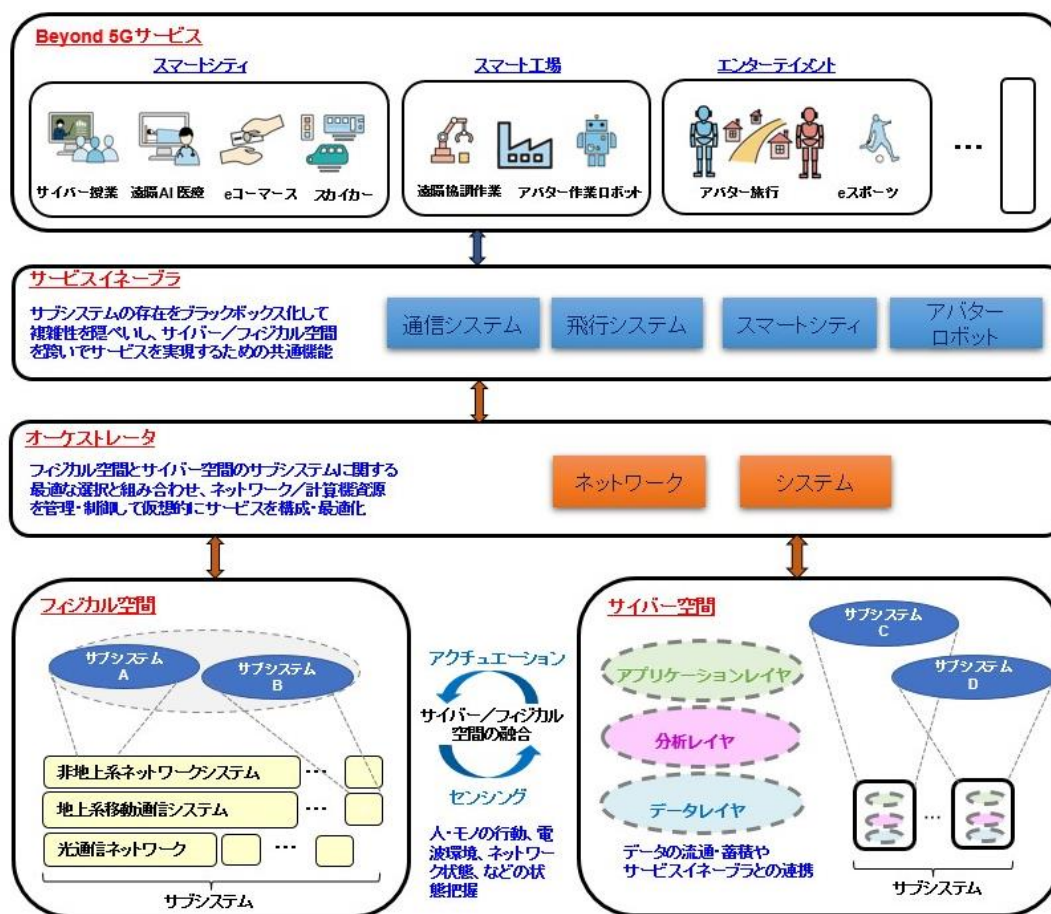


図 6.2-9 Beyond 5G アーキテクチャの耐障害性への応用<sup>10</sup>

本アーキテクチャにおける、サービスイネーブラー機能の例として表 6.2-3 に示す。Beyond 5G により、通信サービスの提供領域が、陸上だけでなく、海上や宇宙にまでカバレッジ拡張されることが想定されるため、これに対応するサービスイネーブラー機能として、通信システムに対応して、高信頼上空通信や広域

<sup>10</sup> 図の一部は NICT 提供



海洋通信などの機能が必要となることが想定される。また、ドローンの普及や、今後の、空飛ぶクルマの実用化など、飛行システムに対応して、高精度位置同定や最適飛行経路などのサービスイネーブラーも重要と考えられる。さらに、メタバースの普及に伴い、様々な場面で、アバターが活躍することが想定されるため、業界共通のアバターの VR 協調作業や、超臨場感共有機能などのサービスイネーブラーも必要となる。また、アバター同士の活動も活発になることも想定されることから、アバターの本人認証のサービスイネーブラーも重要になることも想定される。スマートシティに対応して、対象とする都市全体の仮想化のために、デジタルツイン管理のサービスイネーブラーや人流や交通量を把握するためのサービスイネーブラーも重要になると考えられる。

表 6.2-3 サービスイネーブラーの機能例

対象システム	個別機能
通信システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 高信頼上空通信</li> <li>➤ 広域海洋通信</li> </ul>
飛行システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 高精度位置同定</li> <li>➤ 最適飛行経路</li> </ul>
アバターロボット	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ VR 協調作業</li> <li>➤ 超臨場感共有</li> <li>➤ 本人認証</li> </ul>
スマートシティ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ デジタルツイン管理</li> <li>➤ 人流把握</li> </ul>

一方で、本アーキテクチャにおける、オーケストレータ機能の例として表 6.2-4 に示す。前述のネットワークの耐障害性に対応して、ネットワーク自体の自動障害復旧機能やサービス利用者のための QoS を確保するために、通信品質管理が重要となる。また、カバレッジ拡張により、ドローンや空飛ぶクルマだけではなく、HAPS の移動や、衛星 LEO(Low Earth Orbit)や GEO(Geostationary Orbit)などが飛行する軌道に伴い、利用周波数の周波数資源管理機能なども重要となる。一方で、システムでの対障害性確保のために、サブシステムの自動障害復旧機能や、人流や人口密度の時間的変動に対応した、エッジコンピュータ資源管理機能などもオーケストレータの機能として重要になるものと考えられる。

表 6.2-4 オーケストレータの機能例

耐障害性を確保するための対象	個別機能
ネットワーク	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 自動障害復旧</li> <li>➤ 通信品質管理</li> <li>➤ 周波数資源管理</li> </ul>
システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 自動障害復旧</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ エッジコンピュータ資源管理</li> <li>➤ 人工知能・機械学習</li> <li>➤ 分散処理</li> <li>➤ 低消費電力制御</li> </ul>
--	---

#### (4) まとめ

耐障害性を確保する事象として、ネットワークの耐障害性とシステムの耐障害性について示した。これらの耐障害性を確保するための Beyond 5G アーキテクチャ例について示し、その構成要素としての、オーケストレータやサービスイネーブラーの各種機能や仕組みについて示した。特に、サービスイネーブラーについては、対応するシステムに依存するため、ユースケースごとに異なる機能が考えられる。また、オーケストレータについても、対象とするネットワークやシステムにより必要とされる機能がそれぞれ異なることを示した。

#### 参考文献

- [1] ITU-R Recommendation M.2160 (11/2023), “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond”
- [2] A. Singla, “The birth of the distributed Cloud”, The Next Platform, online <https://www.nextplatform.com/2020/02/25/the-birth-of-the-distributed-cloud/>, last access: 28.10.21
- [3] A. Sahai, “Distributed Cloud is The Way Of The Future – What This Means For Your Business”, Forbes, online [available at: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/06/21/distributed-cloud-is-the-way-of-the-future--what-this-means-for-your-business/>], last access: 29.10.21]
- [4] IOWN GLOBAL FORUM, “IOWN GF System and Technology Outlook -Open All-Photonic Network (APN) and Data-Centric Infrastructure (DCI) Work Items-, ” 2021.
- [5] C. Filsfils, S. Previdi, L. Ginsberg, B. Decraene, S. Litkowski, R. Shakir, “Segment Routing Architecture,” IETF RFC8402, July, 2018.
- [6] C. Filsfils, P. Camarillo, J. Leddy, D. Voyer, S. Matsushima, Z. Li, “Segment Routing over IPv6 (SRv6) Network Programming,” IETF RFC8986, Feb, 2021.
- [7] S. Matsushima, C. Filsfils, M. Kohno, P. Camarillo, D. Voyer, C.E. Perkins, “Segment Routing IPv6 for Mobile User Plane,” IETF Internet-Draft, October 2021.
- [8] H. Chan, D. Liu, P. Seite, H. Yokota, J. Korhonen, “Requirements for Distributed Mobility Management,” IETF RFC7333, August 2014.

- [9] C.J. Bernardos, A. de la Oliva, F. Giust, J.C. Zúñiga, A. Mourad, “Proxy Mobile IPv6 Extensions for Distributed Mobility Management,” IETF RFC8885, October 2020.
- [10] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, B. Patil, “Proxy Mobile IPv6,” IETF RFC5213, August 2008.
- [11] 3GPP, “System architecture for the 5G System (5GS),” TS 23.501, Dec 2017.
- [12] W. Tong, P. Zhu, et al, 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [13] 3GPP, “Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains,” TS 22.104, V17.4.0, Oct 2020.
- [14] ORAN Working Group 2, "AI/ML workflow description and requirements," Technical Report v1.1, 2020.
- [15] TMForum, “Autonomous Networks: Empowering Digital Transformation For the Telecoms Industry,” May. 15, 2019, <https://www.tmforum.org/wp-content/uploads/2019/05/22553-Autonomous-Networks-whitepaper.pdf>
- [16] Open Network Automation Platform, <https://www.onap.org/>
- [17] ONAP, “R11 General Intent Model and General Intent Interface Requirements”, <https://wiki.onap.org/display/DW/R11+General+Intent+Model+and+General+Intent+Interface+Requirements>
- [18] ITU Focus Group on Autonomous Networks <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/an/Pages/default.aspx>
- [19] ITU-T, Focus Group on Autonomous Networks, Technical Specification, Architecture framework for Autonomous Networks, <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/an/Documents/Architecture-AN.pdf>
- [20] ITU-T Network 2030 “Network 2030 Architecture Framework”, (June 2020)
- [21] Mitsuhiro Azuma, Yasuki Fujii, Yasuyuki Sato, Takafumi Chujo, and Koso Murakami, “Network Restoration Algorithm for Multimedia Communication Services and Its Performance Characteristics,” IEICE Trans. Commun., Vol.E78-B, No.7, pp.987-994, Jul. 1995.
- [22] ITU, “Utilizing telecommunications/information and communication technologies for disaster risk reduction and management”, Output Report on ITU-D Question 5/2, ITU publications.
- [23] NICT, Beyond 5G/6G white paper version 3.0” (June 2023) [https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v)

3\_0.pdf

- [24] “Service Enabler Architecture Layer for Verticals (SEAL); Functional architecture and information flows,” 3GPP TS 23.434 V17.4.0 (2021-12).
- [25] “Zero-touch network and Service Management (ZSM); End-to-end management and orchestration of network slicing,” ETSI GS ZSM 003 V1.1.1 (2021-06).

## 6.3 周波数資源の利活用技術

### 6.3.1 周波数資源の利活用動向と 7-15GHz 帯の利用状況調査

Beyond 5G に求められる高い性能を提供するためには、既存の周波数資源の有効活用および新たな周波数帯域の開発が不可欠である。本節では、既存および新たな周波数資源の利活用動向の概要についてまず述べる。次いで、Beyond 5G 用の新たな周波数を検討する上で 100MHz 程度以上の広帯域なチャネル帯域幅を収容できる可能性がある周波数に注目して、WRC-23（世界無線通信会議-23）の結果を示す。このうち、WRC-27 議題 1.7 において今後検討される周波数範囲として 7125 - 8400 MHz および 14.8 - 15.35 GHz を取り上げ、我が国のその利用状況調査を述べる。また WRC-23 が議題 1.2 において IMT 用に特定した 周波数範囲 6425 - 7125 MHz の国内および 3GPP の状況を説明する。

#### 6.3.1.1 周波数資源の利活用動向

3GPP の 5G NR においては、図 6.3-1 に示すように第 4 世代 LTE-Advanced の利用している無線周波数を拡張する形で、サブ 6GHz 帯域(FR1 領域)と 24.25GHz より高い周波数周波数帯(FR2-1, FR2-2 領域)で利用可能な周波数帯を規定して利活用を進めてきている。

図 6.3-1 の横軸は周波数、縦軸は規格で規定されている周波数帯の帯域幅を対数軸として示しており、図中の斜めの線は中心周波数( $f_c$ )に対する各周波数帯の帯域幅(BW)の比が各々 0.3%から 30%になる点を示している。FR1 の周波数が低い領域では、上りと下りの回線を周波数軸上で分離して同時送受信を行う周波数分割複信(FDD: Frequency Division Duplex)が主に利用されるため、上下回線間で十分な干渉抑圧が得られるように  $BW/f_c$  は数%程度以下に抑えられている。一方、FR1 領域の中でも 3GHz より高い周波数帯や FR2-1, FR2-2 の領域では、上下の回線を時間軸で分離する時間分割複信(TDD: Time Division Duplex)が用いられることから  $BW/f_c$  が 10%を超える周波数帯も規定されていて、より広い帯域を利用した高速通信や大容量通信の実現が可能となっている。

Beyond 5G においては、上記の周波数帯域の周波数資源の更なる有効利用に加えて、より広帯域・高速通信が可能な EHF 帯(図 6.3-1 で薄青色に示した部分)の利活用を進めることで、更なる広帯域伝送や大容量通信を提供していくことが有用になると考えられる。

我が国における周波数の割り当て状況を図 6.3-2 に示す。EHF 帯までの電波資源を様々な電波利用システムが極めて稠密に利用しており、Beyond 5G に向けては、既に 4G, 5G で利用されている帯域における複数の免許主体による周波数共用なども含めた更なる周波数の有効活用をしながら、新しい帯域を効率的に公共の福祉に資するように利活用していく取り組みが重要となる。

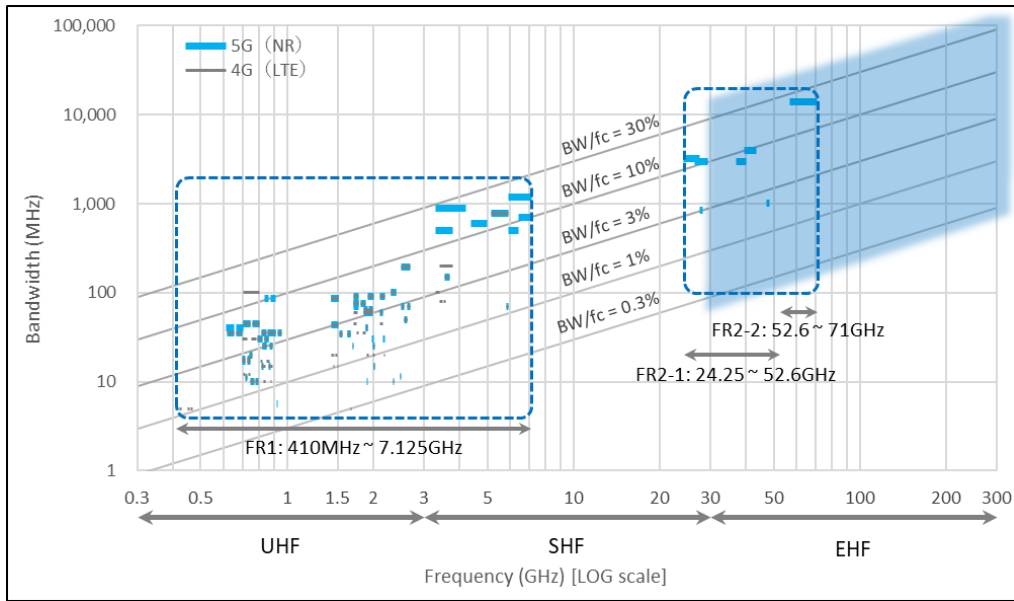


図 6.3-1 4Gと5G用の周波数帯(3GPP規格 [1][2][3][4])とEHF帯への展開

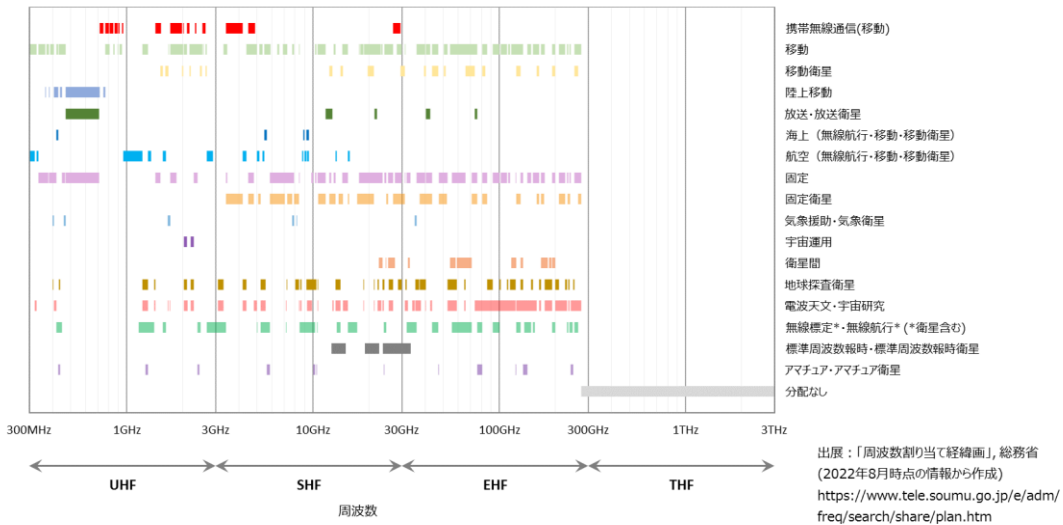


図 6.3-2 我が国における周波数割り当て [5]

将来の無線周波数に利用に関しては、様々な組織およびグループで以下のような議論が行われ、見解が示されている。Beyond 5G においては、さらなる広帯域が可能となる 6GHz 帯以上、ミリ波およびテラヘルツに及ぶ新たな周波数資源の活用が検討されているが、一方複数の組織が 6GHz 帯未満の既存周波数と新たな周波数の一体的利用の重要性についても言及している。

ITU-R WP 5D は、報告 ITU-R M.[IMT.Above 100 GHz] を作成中である。本報告は、100GHz を超える帯域での IMT の技術可能性について、伝搬環境とチャネルモデルの情報、および移動・受動素子、アンテナ技術、展開アーキテクチャ、シミュレーションとテスト結果などの新たな技術要素を



示すことを目的としている。この新報告は 2024 年 5 月に完成予定である。なお電波伝播に関連する研究動向は、本白書の 6.3.2 節にも示している。

APG-23 (APT Conference Preparatory Group for WRC-23) は、WRC-23 (世界無線通信会議-23) に向けてアジア・太平洋地域の共通の意見をまとめ、共同提案を作成するための組織である。2023 年 2 月開催の APG23-5 会合は、WRC-23 議題 10 (WRC-27 議題の新提案) に向けて、以下の提案を継続検討することを確認した。

- 275-300 GHz 帯の移動業務 (MS)、固定業務 (FS)、電波天文業務 (RAS)、および地球探査衛星業務 (受動) (EESS(passive)) への一次割当、
- 2030 年およびそれ以降の IMT

AWG (APT Wireless Group) は、アジア・太平洋地域の来るべきデジタル融合時代に対応するために IMT/IMT-Advanced を含む新しい無線システムの様々な側面を検討している。AWG は、「アジア・太平洋地域の 7.125-24 GHz および 92-300 GHz 帯の現状と将来の利用」の調査報告を 2023 年 5 月に完成した。この報告は、周波数利用の調和および IMT システムの効率的・効果的な展開の見地から、IMT 用の追加周波数帯の可能性検討の一助となること目的としている。[11]

Hexa-X は、2021 年 4 月に 6G に向けた将来の研究を導くビジョンを説明する報告を出した。[6] この報告は、周波数境界の拡張、52.6GHz を超える帯域の周波数割当、周波数利用率の改善など、6G における周波数進化の側面について示している。また 2022 年 2 月発行の Hexa-X の報告「6G の目標と要求条件 - 初期のエンドツーエンドアーキテクチャ」[7]は、6G サービス要求条件に対応するために、既存周波数範囲 (低周波数領域、中周波数領域、ミリ波) と新しい周波数範囲 (100 - 300 MHz 超え) の両方で利用を拡張すること、および柔軟な周波数の使用と管理など、周波数進化の側面についてさらに論じている。

Next G Alliance は、民間主導の取り組みを通じて今後 10 年間の北米のモバイル技術のリーダーシップを進めるイニシアチブである。その活動は、研究開発、製造、標準化、市場準備のライフサイクル全体を網羅する。Next G Alliance は 2022 年 6 月に 6G 技術の報告を発表した。[8] その報告は、6G の技術革新に対応するには、さらに多くの周波数が必要であり、ミリ波周波数帯域の上位への拡張とともに、7 - 24GHz 帯周波数の新しい使用方法についてさらなる研究が必要と述べている。また、7 - 24GHz 帯では Massive MIMO 技術を活用して、良好なカバレッジを確保し容量を向上させること可能であり、さらにはミリ波およびテラヘルツ周波数では高いデータ レートを提供し、正確な位置特定とセンシングが可能とも述べている。

IMT-2030 (6G) 推進グループは、6G の研究開発と国際協力を推進する中国の旗艦プラットフォームであり、中国の 6G 技術と産業に関する最先端の研究を推進している。IMT-2030 (6G) 推進グループは 2021 年 6 月にホワイトペーパーを発表して、6G 周波数のニーズを満たすための高周波、中周波、低周波帯域の効率的な使用、およびテラヘルツや可視光通信について説明している。[9]

韓国の 5G フォーラムは、2030 年ごろの 6G を含む 5G のさらなる進化を促進することを目的とした組織である。2021 年 2 月に発行された 5G フォーラムのホワイトペーパーは、次のように述べている。[10]

- テラヘルツ帯や光など、新たな広域周波数の活用が重要である。
- 100GHz を超える新しい周波数は、6G 通信システムにますます多くの関心を集めてはいるが、6GHz 帯未滿の周波数資源は、高周波帯よりもはるかに広いカバレッジを実現する能力があるので依然として非常に重要。6GHz 帯未滿、ミリ波、およびテラヘルツの周波数資源を一体的に利用する必要がある。

### 参考文献

- [1] 3GPP TS 36.101, (V18.0.0), "E-UTRA; User Equipment (UE) radio transmission and reception", 2022-12.
- [2] 3GPP TS 38.101-1, (V18.0.0), "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone", 2022-12.
- [3] 3GPP TS 38.101-2, (V18.0.0), "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone", 2022-12.
- [4] 3GPP TS 38.101-5, (V18.0.0), "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements", 2022-12.
- [5] 総務省, "周波数割当計画", (2022 年 8 月時点の情報により作成).
- [6] Hexa-X, Deliverable D1.2, "Expanded 6G vision, use cases and societal values – including aspects of sustainability, security and spectrum", April 2021
- [7] Hexa-X, Deliverable D1.3, "Targets and requirements for 6G - initial E2E architecture", February 2022
- [8] Next G Alliance, "Next G Alliance Report: 6G Technologies", June 2022
- [9] IMT-2030 (6G) Promotion Group, "White Paper on 6G Vision and Candidate Technologies", June 2021
- [10] 5G Forum, "6G Technology Trends", February 2021
- [11] AWG "APT Report on current status and future plan of usage in the frequency ranges of 7.125-24 GHz and 92-300 GHz in Asia Pacific region", May 2023

#### 6.3.1.2 WRC における IMT 地上系コンポーネント用周波数の特定

WRC（世界無線通信会議）は、各周波数帯の利用方法、衛星軌道の利用方法、無線局の運用に関する各種規程、技術基準等を始めとする国際的な電波秩序を規律する無線通信規則（RR: Radio Regulations）の改正を行うための会議で、通常 3～4 年毎に開催される。WRC の決定に基づいて、各国では、国内の各周波数帯の利用方法などを定めることになり、Beyond 5G の新たな周波数を検討する上でも重要な会議である。

WRC-23 は、2023 年 11 月 20 日から 12 月 15 日にかけて開催され、将来の地上系 IMT 周波数に関する以下の決定を行った。WRC-23 の議題 1.2 は、6425 – 7125 MHz の IMT 地上系コ

ンポーネット用の周波数として以下の結論を得た。

- 6425 – 7025 MHz を第 1 地域<sup>11</sup>全体と第 3 地域の三ヶ国（カンボジア、ラオス、モルジブ）で IMT に特定
- 7025 – 7125 MHz を第 1 地域および第 3 地域<sup>12</sup>で IMT に特定
- 6425 – 7125 MHz を第 2 地域<sup>13</sup>の二ヶ国（メキシコとブラジル）で IMT に特定

さらに WRC-23 では将来の地上系 IMT 周波数を含む WRC-27 の新しい議題が設定された。地上系 IMT 周波数については、既存業務との共有・両立性の研究を実施し、以下の周波数帯域で IMT を使用するための技術的条件を検討する議題である（WRC-27 議題 1.7）。

- 4400 – 4800 MHz
- 7125 – 8400 MHz
- 14.8 - 15.35 GHz

また WRC-23 は、102 - 109.5 GHz、151.5 - 164 GHz、167 - 174.8 GHz、209 - 226 GHz および 252 - 275 GHz における IMT 特定のための周波数関連事項を検討する WRC-31 の暫定議題にも合意した。これを WRC-31 の議題とするかの可否、およびその周波数帯域は WRC-27 で見直され、変更される可能性があることに注意が必要である。

## 参考文献

- [1] World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23) “Provisional Final Acts”, December 2023

### 6.3.1.3 周波数範囲 7125 MHz – 15.35 GHz の利用状況に関する調査

周波数範囲 7125 MHz - 15.35 GHz の日本国内の利用状況に関する調査を行い、既存無線システム、その利用状況、連続で広い帯域が得られる可能性を評価した。以下は、WRC-27 の議題 1.7 の検討範囲である 7125 – 8400 MHz および 14.8 - 15.35 GHz に関する見解である。

#### 1) 7125 – 8400 MHz

この周波数範囲の日本国内の利用状況は、7425 - 7725 MHz が電気通信業務用、公共業務用、一般業務用、および放送業務用の固定通信システムによって使用されている。7425 – 7725 MHz の無線局数は 2021 年時点で約 3750 局である。7250 – 7750 MHz (宇宙から地球)と

---

<sup>11</sup> 第 1 地域: 欧州、ロシア、アラブおよびアフリカ

<sup>12</sup> 第 3 地域: アジアおよび太平洋

<sup>13</sup> 第 2 地域: 南北アメリカ

7900 – 8400 MHz (地球から宇宙) は、電気通信事業用および公共業務用に固定衛星、移動衛星が利用している。また 8025 – 8400 MHz を地球探査衛星 (宇宙から地球) が利用している。なお ITU の無線通信規則ではこの周波数範囲全体が移動業務に一次割当てされている。またこの周波数範囲は、7025 – 7125 MHz が日本を含む第三地域などにおいて IMT 特定されたことを考慮すると、IMT 用に広く連続した帯域が取れる可能性がある。WRC-23 において、ASMG<sup>14</sup> と CITEL<sup>15</sup> から将来の IMT 周波数検討用に提案された帯域であり、APT 地域でもベトナム、ラオスから同様の提案がなされた。インドからは 7125-7750MHz を対象に同様の提案がなされた。

## 2) 14.8 – 15.35 GHz

この周波数範囲の日本国内の利用状況は、14.4 – 15.35 GHz が電気通信事業用に固定および移動通信システムに利用されている。14.8 – 15.35 GHz の無線局数は、2021 年時点で 1085 局である。14.7 – 14.9 GHz、15.25 – 15.35 GHz は、公共業務用に移動システムが利用している (15GHz 帯ヘリテレ画像伝送システム)。15GHz 帯ヘリテレ画像伝送システムの無線局数は、2021 年時点で 63 である。

なお ITU の無線通信規則ではこの周波数範囲全体が移動業務に一次割当てされている。WRC-23 において、ASMG と RCC<sup>16</sup> から将来の IMT 周波数検討用に提案された帯域であり、APT 地域でもベトナム、ラオス、インドから同様の提案がなされた。また日本からも、14.9-15.2GHz の検討につき提案を行った。

これら将来の IMT 周波数帯の一部は、既存の無線システムによって広く利用されている。したがって、これらの無線システムと IMT の間の両立性を調査し、既存のシステムを保護しつつ Beyond 5G の展開が可能となるような共用条件を見出すことが重要となる。

## 参考文献

- [1] [総務省 電波利用ホームページ 利用状況の詳細 \(令和 5 年 3 月 1 日現在\)](#)
- [2] [総務省 電波利用ホームページ 周波数割当計画 \(令和 5 年 12 月 22 日現在\)](#)

### 6.3.1.4 周波数範囲 6425 MHz - 7125 MHz の状況

前述の通り、WRC-23 は IMT 地上系コンポーネントを検討する議題 1.2 において、6425 – 7125

---

<sup>14</sup> Arab Spectrum Management Group (ASMG): アラブ周波数管理グループ

<sup>15</sup> The Inter-American Telecommunication Commission (CITEL): 米州電気通信委員会

<sup>16</sup> The Regional Commonwealth in the field of Communications (RCC): 旧ソビエト連邦構成国による合同通信地域連邦

MHz を一部の地域および国で IMT に特定している。この 6425 – 7125 MHz は、前節 6.3.1.3 で利用状況調査を実施した 7125 MHz-15.35 GHz と連続する周波数範囲であり、今後 Beyond 5G で期待される連続で広い帯域を確保する観点からも重要な帯域である。

この帯域は、国内では令和 3 年度から令和 4 年度の陸上無線通信委員会において、6GHz 帯無線 LAN と既存システム（電気通信業務用固定局、公共・一般業務用固定局、衛星通信システム（アップリンク）、電波天文、放送番組中継システム）との共用検討が実施された。

グローバルでは、3GPP において 5.925-7.125 GHz に対する各国/地域の Regulatory framework を調査する Study item が進行中で、2024 年 3 月完了を目標としてその調査結果を TR 37.890 にまとめる作業が行われている。また、6GHz 帯におけるバンドプランも既に規定されており、既存システム保護を前提とした IMT 利用可能性についても今後の検討課題である。

表 6.3-1: 3GPP における 6 GHz 帯（ライセンスドバンド）バンドプラン

バンド番号	周波数下限 (MHz)	周波数上限 (MHz)
n104	6425	7125

表 6.3-2: 3GPP における 6 GHz 帯（アンライセンスドバンド）バンドプラン

バンド番号	周波数下限 (MHz)	周波数上限 (MHz)
n96	5925	7125
n102	5925	6425

なお、中国では既にこの帯域を IMT 利用として割り当てており、2023 年 7 月 1 日から正式に施行されている。[1]

## 参考文献

Ministry of Industry and Information Technology, "中华人民共和国无线电频率划分规定", July 2023

### 6.3.2 電波伝播に関連する研究動向と成果

本節では、電波伝搬特性に関する最新の研究成果や関連する話題のいくつかを取り上げて概要を紹介する。

#### (1) 市街地マイクロセル環境における 2GHz, 26GHz 及び 300GHz 帯の伝搬損失特性

東京駅周辺の市街地マイクロセル環境で行った 2 GHz, 26 GHz 及び 300 GHz 帯での伝播損失測定結果が[1] [2]で報告されている。図 6.3-3 に示すような典型的な市街地マイクロセル環境で伝播損失測定が行われている。

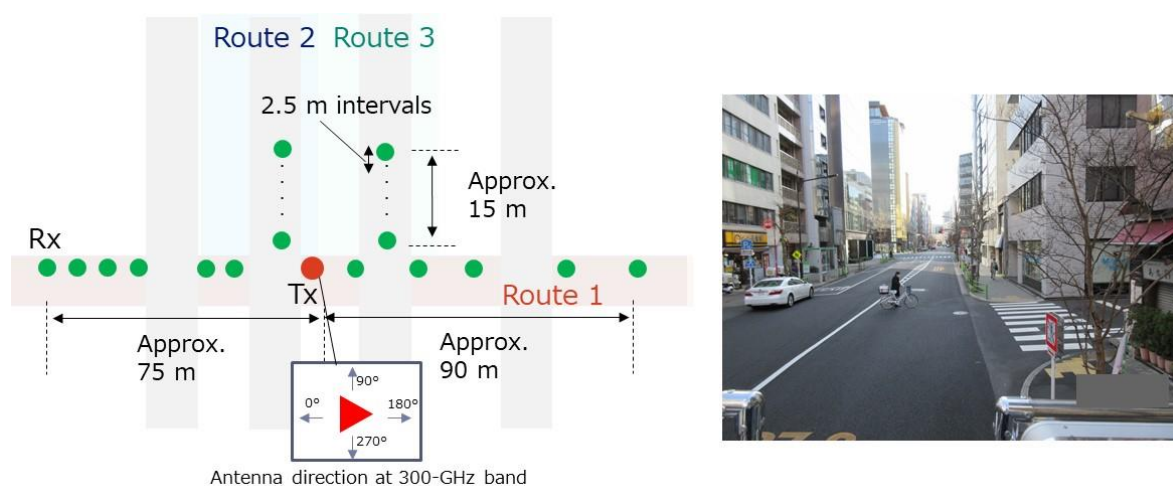
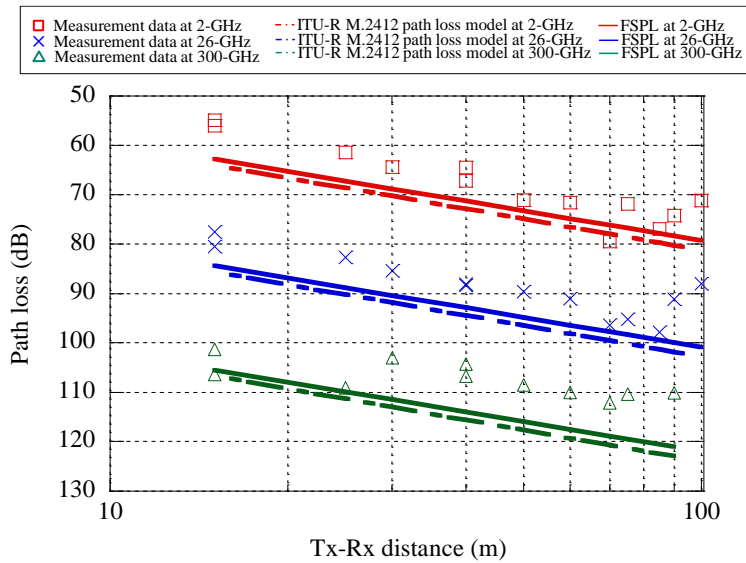


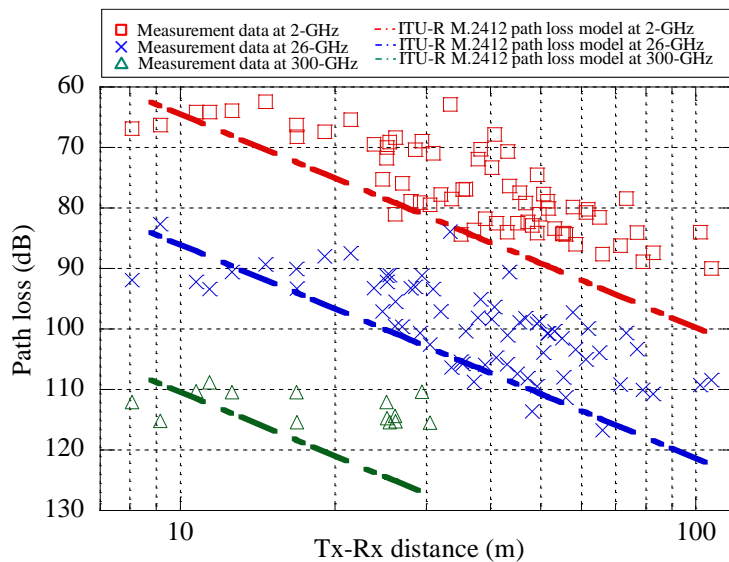
図 6.3-3 市街地マイクロ環境での伝搬損失測定の配置

図 6.3-4 に、測定結果を ITU-R M.2412[3]における自由空間伝播損(FSPL)モデルによって算出した結果と共に示す。ルート 1 での測定経路損失は、周囲の物体からの反射と散乱のために ITU-R M.2412 の伝搬損失モデルより低く、ルート 2 と 3 における伝播損失の測定結果は、2 GHz と 26 GHz における ITU-R M.2412 経路損失モデルと同様の傾向を示している。また、Tx-Rx 距離 8m から 20m の範囲では同様の傾向を示したが、距離 30m での測定結果は ITU-R M.2412 の伝搬損失モデルで算出した値より低かった。





(1) ルート 1



(2) ルート 2、および、3

図 6.3-4 伝播損失特性の測定結果

参考文献

- [1] 猪又他, "第 6 世代移動通信システムにおけるテラヘルツ波帯利用に向けた電波伝搬特性", 信学技報, RCS2020-98, (2020-10).
- [2] 猪又他, "6G に向けた市街地マイクロセル環境おる 2-100GHz 帯", 信学技報, A・P2021-51, (2021-08).
- [3] ITU-R M.2412, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020," Sep. 2017.

## (2) 屋内見通し内環境と屋外の市街地ストリートキャニオン環境

屋内見通し内(LOS)環境と屋外の市街地ストリートキャニオン環境における 3 GHz と 97 GHz のレイトレーシングによる伝搬シミュレーション、加えて、伝搬損失(3 GHz、20 GHz、97 GHz、160 GHz、300 GHz)と電波到来角(28 GHz、40 GHz、97 GHz、160 GHz、300 GHz)の実測、および人体損(0.8 GHz~150 GHz)の実測による検証が行われている[1]-[5]。以下では、これらの検討結果について簡単に紹介する。

- 屋内見通し内(LOS)環境におけるレイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較

図 6.3-5 に、3 GHz と 97 GHz における屋内 LOS 環境におけるレイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較を示す。両周波数で、自由空間損失と比較しレイトレーシングによって求めた結果の分布は非常に類似しているが、97 GHz においては伝搬損失の絶対値が 3 GHz の場合より大きくなっている。

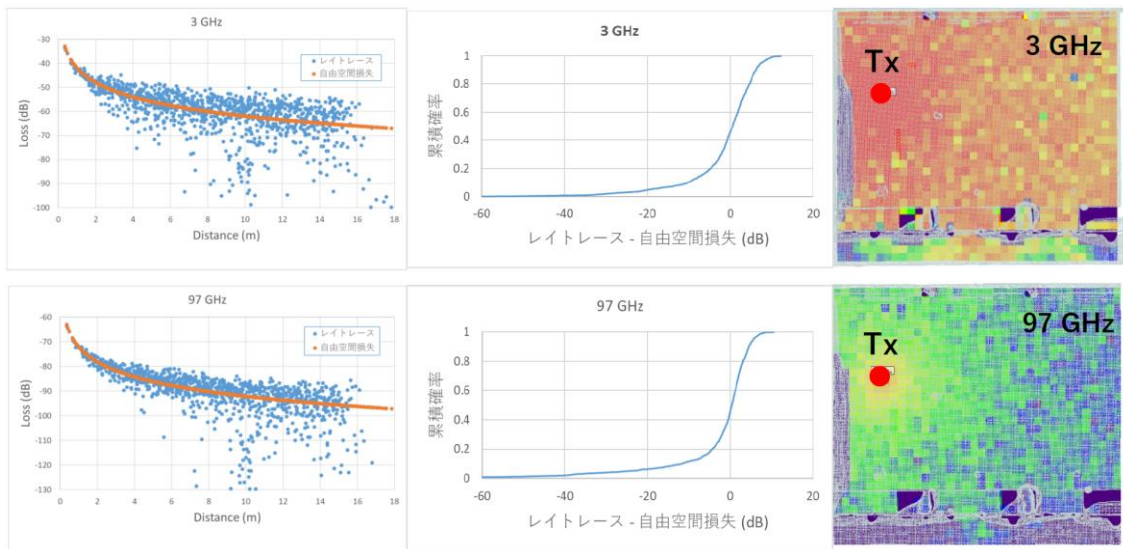


図 6.3-5 レイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較(屋内環境) [1]

- 市街地ストリートキャニオン環境におけるレイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較

図 6.3-6 に、3 GHz と 97 GHz における屋外市街地ストリートキャニオン環境におけるレイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較を示す。両周波数で、自由空間損失と比較しレイトレーシングによって求めた結果の分布は非常に類似しているが、97 GHz においては伝搬損失の絶対値が 3 GHz の場合より大きくなっている。



図 6.3-6 レイトレーシングと自由空間伝搬モデルの比較(市街地ストリートキャニオン環境) [1]

• 屋内見通し環境測定結果

屋内見通し環境での自由空間伝搬モデルと実測による伝搬損失の比較を 3 GHz、20 GHz、97 GHz について行った結果を図 6.3-7 に示す。周波数による伝搬損失の差は、主に自由空間損失モデルで記述されている項と関連しており、従来の屋内伝搬モデルを拡張して応用することができると思われる。

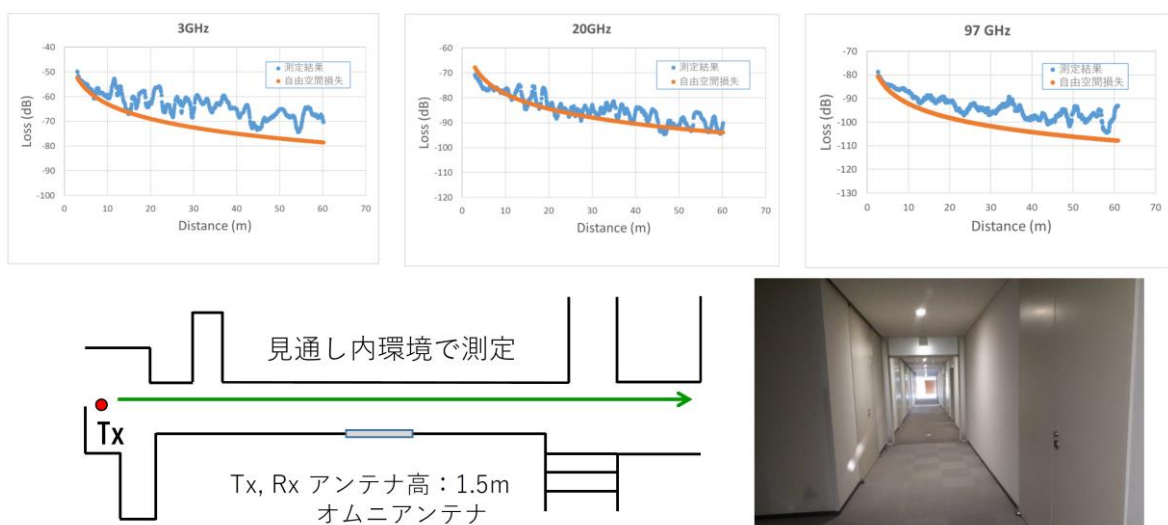


図 6.3-7 屋内見通し環境での測定結果 [1]

- 100 GHz 帯までの帯域での遅延分散・到来角分散  
100 GHz 帯までの帯域における遅延分散と到来角分散についての更なる研究が行われている[2]。
- 160 GHz 帯及び 300 GHz 帯での電波到来角  
300 GHz 帯での反射波の影響について、シミュレーションによる研究が行われている[3]。また、160 GHz 帯及び 300 GHz 帯で直接波や反射波の伝搬損失について、廊下や会議室環境において測定が行われている。なお、160 GHz 帯の結果について[4]、[6]で報告されている。  
屋内見通し環境である会議室で、160 GHz 帯と 300 GHz 帯の電波到来角の測定結果を、図 6.3-8 に示す[5][6]。

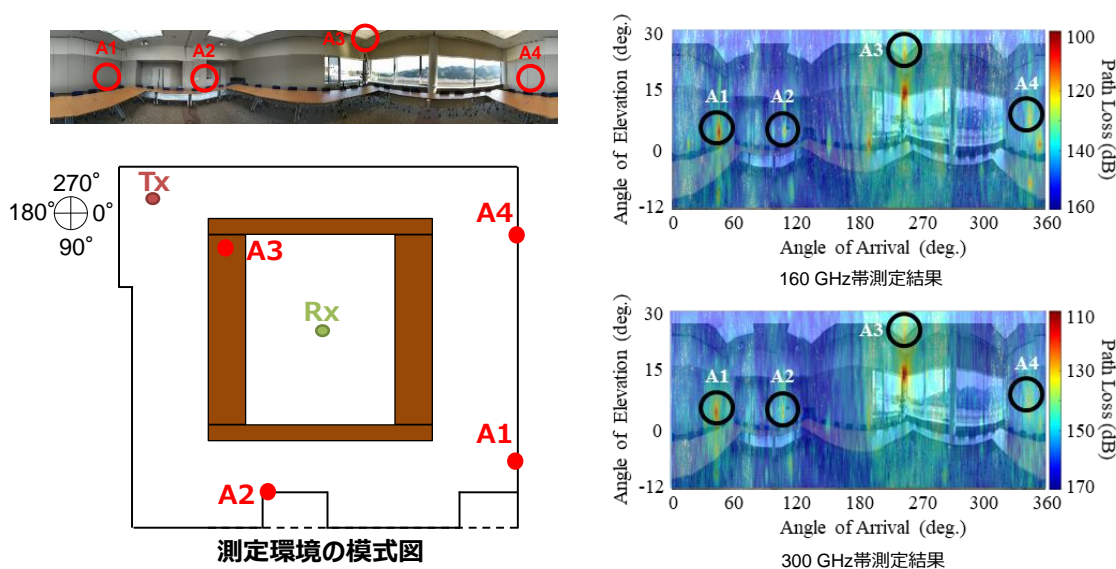


図 6.3-8 屋内見通し環境での測定結果 [5]

#### 参考資料

- [1] 小田, “テラヘルツ波の電波伝搬特性に関する技術検討”, Beyond 5G 推進コンソーシアム 企画・戦略委員会, (2021 年 3 月).
- [2] 中村他, “屋内環境での 100GHz 帯までの遅延および角度スプレッド”, 信学技報 AP2020-105, (Jan. 2021).
- [3] 中村他, “屋内環境シミュレーションによる 300 GHz 帯反射波の効果”, 2022 信学全大, B-1-23, Mar.2022.
- [4] 中村他, “屋内環境における人体遮蔽時の 160 GHz 帯反射波の測定”, 2022 信学ソ大, B-1-12, Sep.2022.
- [5] 中村他, “屋内環境における 160 GHz 帯および 300 GHz 帯マルチパス波の測定”, 信学技報 AP2022-40, (Jun. 2022).
- [6] “PATH LOSS STUDY in indoor scenario TOWARDS A PDN Report ITU-R

### (3) 機械学習を用いた経路損失モデリング

電波伝搬特性の統計的なモデル化では、伝搬損失を建物高さや道路幅などの環境パラメータを持つ式で表現して多重回帰分析法を行い、実際の測定データをシミュレートするように調整する手法が一般的である。

特定の場所や環境に対するモデルを得るためには、建物高さや道路幅などのパラメータを空間情報の入力データ、例えば地図などから抽出する必要がある。ディープラーニング技術を用いて地図データからこれらのパラメータを求める方法が検討されている [1] [2] [3]。この方法を用いることで、任意の場所に対して、それぞれの地点に特化した高精度な電波伝搬特性モデルを構築することができる。

伝搬モデルを構築するには、受信機のみ位置、あるいは、受信機と送信機両方の位置における情報を利用する。具体的には航空写真または図 6.3-9 に示す建物占有率の画像情報を用いる。これらのモデルにより求めた伝搬損失と測定結果との差分の二乗平均平方根誤差(RMSE)を図 6.3-10 に示す。送受信点両方の建物占有情報を用いることにより、より正確な伝搬損失の推定モデルが得られることがわかる。



図 6.3-9 航空写真（左）と建物占有率（右）の画像

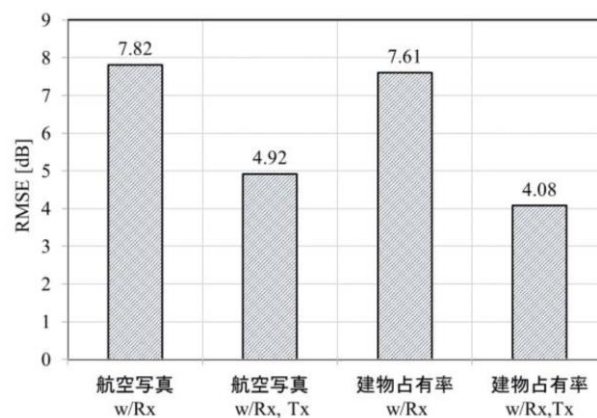


図 6.3-10 画像の種類の違いによる推定結果



## 参考文献

- [1] T. Hayashi, T. Nagao and S. Ito, "A study on the variety and size of input data for radio propagation prediction using a deep neural network," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020.
- [2] T. Nagao and T. Hayashi, "Study on radio propagation prediction by machine learning using urban structure maps," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020.
- [3] T. Nagao and T. Hayashi, "Geographical Clustering of Path Loss Modeling for Wireless Emulation in Various Environments," [Manuscript submitted for publication] 2022 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022.

### (4) 100GHz 帯を用いる地上～成層圏フィードリンク通信の設計

高高度プラットフォームステーション (HAPS) 、あるいは、航空機をフィードリンクに適用するための検討として、地上から高度約 20 km までの鉛直方向の回線設計の検討について紹介する[1][2]。なお、HAPS の周波数割り当てについては、ITU-R Working Party 5C (WP 5C)のワーキンググループにおいて、Q バンドを割り当てる議論がされている状況である[3]。

海拔高度 0 km から 20 km までの大気ガス減衰モデル(図 6.3-11)[4]によれば、W帯以上では 100GHz 近傍の大気吸収が最も小さい。雲や降雨の影響も考慮しても、100GHz 帯は HAPS や航空機への良好なリンクを可能にする帯域と考えられる[2]。

図 6.3-12 に示すフィードリンクのシステムモデルにおいて、高度 20km の HAPS と 100GHz 帯を用いて晴天時 20Gbps、小雨で 10Gbps の実効データ速度を実現するための検討を行った。表 6.3-1 に回線設計の例を示す。おもに鉛直方向の運用となることから、マルチパスフェージングや低仰角で生じるシンチレーションフェージングの影響は小さいと考える。表 6.3-1 の晴天において、受信の搬送波対雑音密度比( $C/N_0$ )は、153.2dB・Hz であり、表 6.3-2 では帯域幅 2GHz の 256-QAM-OFDM の要求  $C/N_0$  の 110.9 dB・Hz との差から 42.3dB のマージンとなる。同様に、表 6.3-1 の小雨において 131dB・Hz、表 6.3-2 では帯域幅 2GHz の 64-QAM-OFDM の要求  $C/N_0$  の 106.4dB・Hz との差から 24.6dB のマージンとなる。

一例として、以下に示す条件における実効データ速度の計算例を示す。1 チャンネルを 2GHz の周波数帯域とすると、256-QAM-OFDM の条件では 11.4Gbps が得られる。同様に、64-QAM-OFDM では 8.3Gbps が得られる。

帯域幅	2.0GHz/チャンネル
変調ビット数	8bit/シンボル (256-QAM)、6bit/シンボル (64-QAM)
OFDM シンボル長	4.5ms(GI=0.404 ms)
FFT 長	8192



有効サブキャリア数	6900
LDPC 符号化率	1344/1440

さらに 2 チャンネルのアグリゲーションを用いることで、晴天時の実効データ速度 20Gbps、小雨で 10Gbps の実現が可能となる。

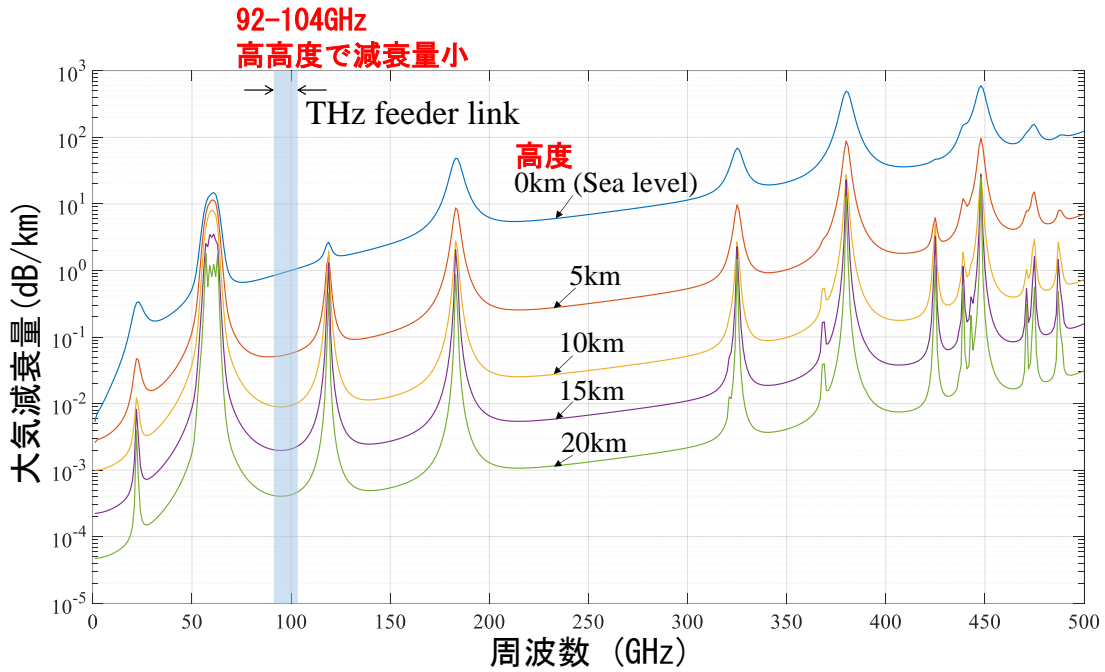


図 6.3-11 大気ガス減衰モデルを用いた損失の対周波数特性 [4]

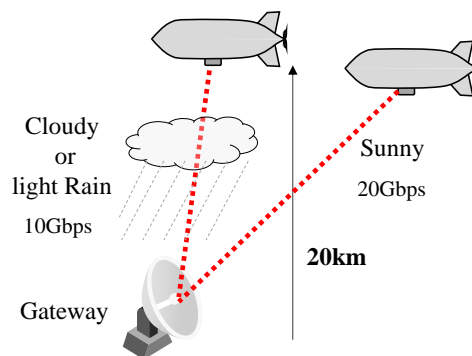


図 6.3-12 100GHz 帯を用いる地上～成層圏のフィーダリンクのシステムモデル

表 6.3-1 100GHz における地上～成層圏 20km の搬送波対雑音密度比

		Sunny	Clouds	Light Rain	Severe Rain
Transmitter (HAPS)	Transmitter Output Power [dBm]	30	30	30	30
	Backoff and Loss [dB]	-20	-20	-20	-20
	Transmitter Antenna Gain [dBi]	40	40	40	40
	EIRP [dBm]	50	50	50	50
Propagation distance: 0-20km	Free Space Propagation Loss [dB]	-158.5	-158.5	-158.5	-158.5
	Atmospheric Absorption Loss [dB]	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
	Propagation Loss by Cloud [dB]	0	-2.1	-15.6	-26.9
	Propagation Loss by Rainfall [dB]	0	0	-6.6	-21.6
Receiver (Gateway)	Receiver Antenna Gain [dBi]	75	75	75	75
	Receiver Level [dBm]	-35.8	-37.9	-58.0	-84.4
	Antenna Noise Temperature [K]	217.2	217.2	217.2	217.2
<b>Receiver C/No [dBHz]</b>		<b>153.2</b>	<b>151.1</b>	<b>131.0</b>	<b>104.6</b>

表 6.3-2 100GHz 帯通信の要求搬送波対雑音密度比

Modulation	16-APSK	QPSK-OFDM	64-QAM-OFDM	256-QAM-OFDM
PAPR [dB]	0.9dB	8.5dB	9.2dB	9.3dB
Symbol length [μs]	2.3 (GI=0.4)		4.5 (GI=0.4)	
Occupied Bandwidth [GHz]	0.7	2.0	2.0	2.0
	[dBHz]	93.0	93.0	93.0
Desired Eb/No [dB]	16.7	10.5	18.7	23.8
	SNR [dB]	22.7	13.5	26.5
Coding Gain [dB] @BER=1E-6	5.6	5.0	5.3	5.9
<b>Desired C/No [dBHz]</b>	<b>104.1 dBHz</b>	<b>98.5 dBHz</b>	<b>106.4 dBHz</b>	<b>110.9 dBHz</b>

## 参考文献

- [1] 川西他, “THz 帯 NTN 通信システムの設計,” 2022 信学全大, CI-7-2, Mar.2022.
- [2] K. Tamesue, et.al, “Scheme Design for High-Throughput Terahertz feeder link in Non-Terrestrial-Networks,” The 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2002), Sept., 2022.
- [3] Working Party 5C (WP 5C) - Fixed wireless systems; HF systems in the fixed and land mobile services. <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5c/Pages/default.aspx>>
- [4] Recommendation ITU-R P.676-12(2019), Attenuation by atmospheric gases and related effects.

## (5) 300GHz 帯における室内伝搬特性

将来の大容量無線 LAN の実現に向けて、300GHz 帯における屋内の電波伝搬特性を測定した。WR-3.4 のアンテナ利得 24dBi の直線偏波ホーンアンテナ（垂直偏波[V]）、利得 8.7dBi の導波管アンテナ（垂直偏波[V]、水平偏波[H]）、利得 3.4dBi のパッチアレイアンテナ[1]（右旋円偏波[RHCP]）を用いて経路損失と交差偏波識別度を、廊下とロビーおよび中庭において計測した[2]（図 6.3-13）。計測条件は、ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)を用いて 300GHz±8.64GHz（帯域

幅 17.28GHz) 、送信電力-7dBm、計測点数 2501 とした[2]。

廊下において、3種類のアンテナを組み合わせた場合の伝搬損失を図 6.3-14 に示す。点線は ITU-R M.2412 の Friis の公式から導出された自由空間損失(FSPL)に各アンテナ利得の補正をした理論カーブである。この結果から、S21 の結果との一致が確認され、25m 程度の通信距離が得られていることがわかる。

導波管アンテナを使って、垂直と水平の交差偏波識別度の室内構造物による影響を調べた結果を図 6.3-15 に示す。見通し内伝搬(LoS)に比べて床・壁・天井による反射の影響により交差偏波識別度の劣化が確認された。

図 6.3-16 に、導波管アンテナ同士(青の棒グラフ)と導波管アンテナとパッチアレイアンテナの組み合わせ(赤の棒グラフ)に対して、3種類の場所と、障害物 (LoS と人物) の条件を変えて伝搬損失を求めた結果を示す。300GHz で 10m 伝送における第一フレネルゾーンは 5cm なので、直接波は人体で遮られる。その結果、障害物による影響が最も大きいことを確認した。廊下で伝搬損失がほかの場所と比べて比較的小さいのは、壁が比較的近距离にあるのでその反射を受信した影響である。

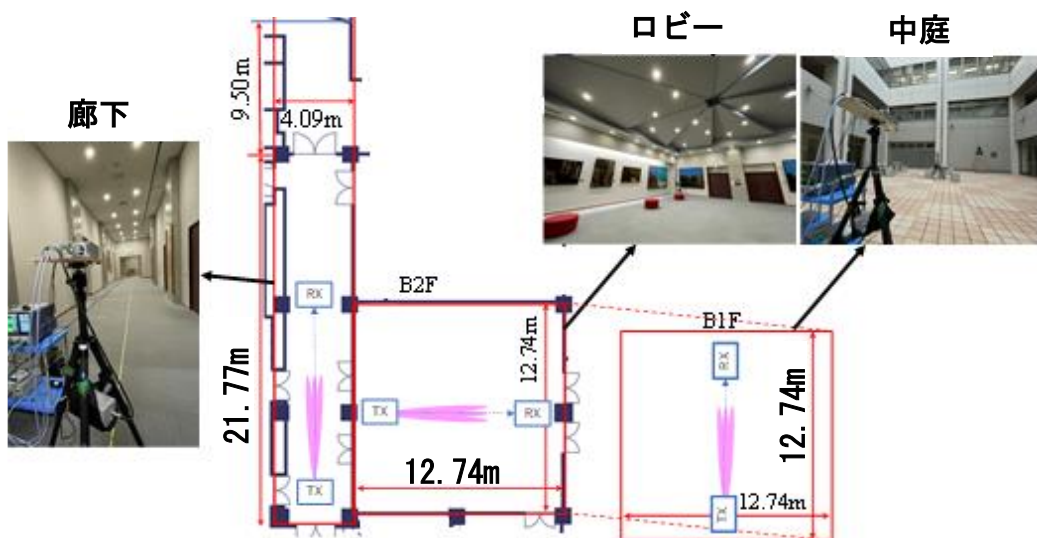


図 6.3-13 伝搬実験の実施場所 (早稲田大学内)

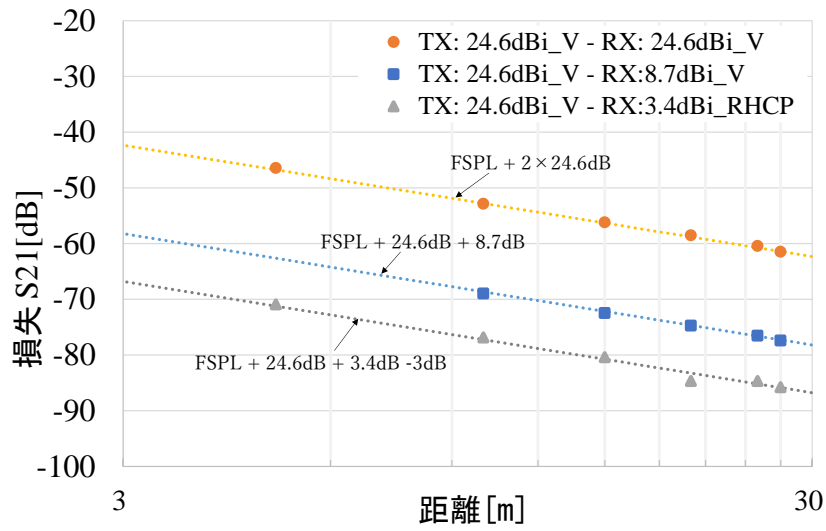


図 6.3-14 廊下における伝搬損失

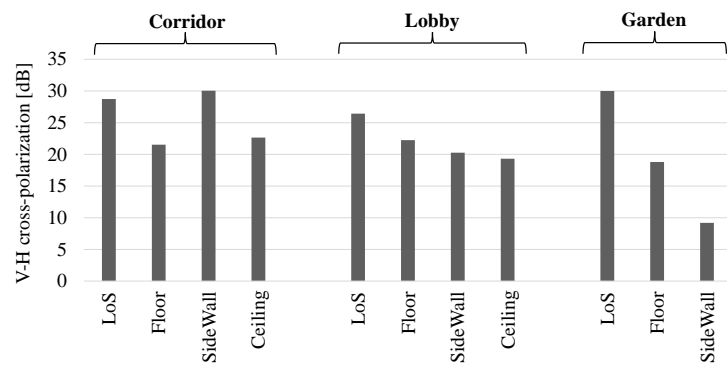


図 6.3-15 室内構造物への反射による交差偏波識別度への影響

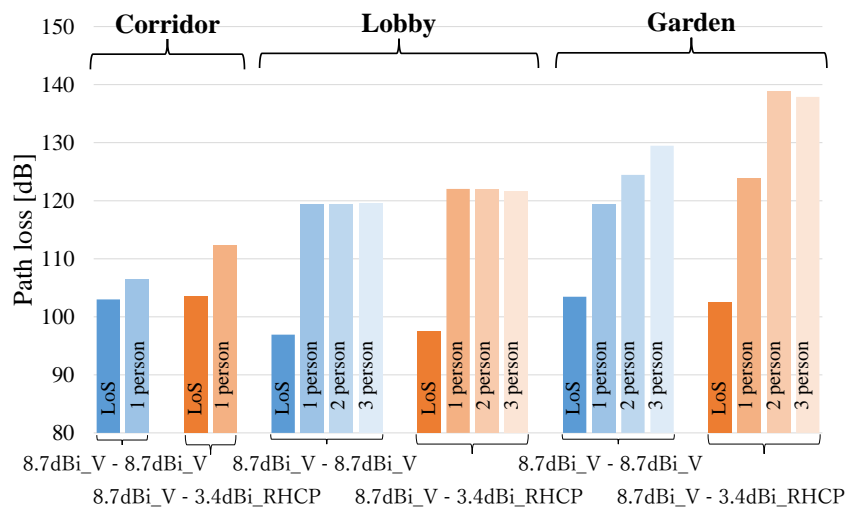


図 6.3-16 伝搬損失の場所および人体遮蔽による影響

#### 参考文献

- [1] S. Nishi, et. al., "A 280 GHz Circular Polarized 4x4 Elements Antenna Array," 2022 the 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (IEEE MAPE 2022), Aug. 2022.
- [2] K. Tamesue, et. al., "300GHz Indoor Propagation Measurement, Simulation and Characterization," 2022 the 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (IEEE MAPE 2022), Aug. 2022.

## 6.4 システムプラットフォームとアプリケーション

本節では、第4章までに述べた2030年ごろのビジョンを意識し、後述するBeyond 5Gの通信インフラに関する技術に基づき、利用者の多様なニーズに対応するためのサービスを実現していくことを考える。

特に、我が国においてBeyond 5Gは、別途提唱されたSociety 5.0を進展させるためのものとしてとらえられている[1]。Society 5.0は、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステム、すなわち“CPS”により経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会（Society）と言われており、その絵姿を踏まえると、通信インフラに直接関係する技術だけでなく、図6.4-1に示す通り、それに付随するプラットフォーム・アプリケーション技術に対する考察をあわせて行っていくことが重要となる。

例えば、CPSを踏まえ、Robotics-as-a-Service（RaaS）、Mobility-as-a-Service（MaaS）、XRのようなサービスを考えていくためには、以下のような様々なプラットフォーム、アプリケーション技術が必要となることが考えられる。

### ● RaaS :

RaaSの目的は、ロボットの導入容易性を高めることで、多数のロボットと人の協働を通じて、様々な社会活動を支援することにある。例えば、物流倉庫では、作業員とロボットがピッキング、検品、梱包、搬送といった作業を協働して行うことで、作業効率の大幅な改善が期待できる。また、建設現場においては、現場監督が日々の作業目標を設定するだけで、複数の建設機械が目標達成に向けて連携作業を行うことで、効率的で安全な現場作業が実現可能となる。

RaaS実現のためには、ロボットを効率的かつ安全に制御するために、プラットフォームを通じて、現実空間の状況を把握し、制御による将来変化をシミュレーションできることが望ましい。さらに、プラットフォームを通じて、複数のロボットの運転計画や状態を共有し、ロボット全体で最適操作を実現できることが望ましい。これらの機能を通じて、プラットフォームは、様々な現場における多数のロボットを制御可能とする。

### ● MaaS :

MaaSは公共交通機関などの様々な移動手段をシームレスに連結することで、移動などの効率を向上させるサービスである。

例えば、ある場所まで移動する際、各交通機関のサービスを横断して利用可能となることが想定される。スマートフォンで目的地を検索したり、その移動ルートを予定表に登録したりするだけで、自動で配車予約が可能となる。更にユーザーの位置情報を把握できれば、ユーザーが目的位置に到着したタイミングで、自動で配車を行うなどのサービスも可能となる。

このようなサービスを実現するためには、認証、検索、予約、決済などのプラットフォームへのアクセス機能を有し、地域毎のニーズに合わせたアプリを短時間で開発可能とする基盤が必要となる。さらに、プラットフォームは、位置推定、地図基盤、データ管理、データガバナンス（プライバシー管理基盤）などの機能に加えて、経路検索、配車計算などMaaS特有の機能をマイクロサービス化し、各地域の二



ーズに応じて、サービス API として自由に組み合わせて利用できることが望ましい。

- **(サービスとしての) XR :**

XR は VR や AR、MR など、サイバー空間とフィジカル空間を融合させた結果を人間の知覚にフィードバックする技術の総称である。これらを扱ったサービスとして、AR 等による安全運転支援（4.7.1 節）、工作機械・農業等の分野での AR/VR 空間を通じた遠隔からのダイレクトティーチング（4.8.1 節、4.10.1 節など）、医療分野での遠隔からの触覚のフィードバック（4.12.1 節）、3D 空間内でのエンターテインメントの提供（4.14.1 節など）、VR 空間を活用した防災訓練（4.15.3 節）など様々なものがある。

このようなサービスを実現するためには、現実世界を仮想空間上に単に再現するだけでなく架空の風景やモノまで重ね合わせる現実世界（フィジカル空間）再現・拡張技術、そのための物体の位置・姿勢の推定、認識・識別技術、及び、人間と同様に様々な知覚を組み合わせて周辺環境を理解し、ユーザーに提示するマルチモーダル連携などの技術が必要になる。加えて、人間の認識・反応速度等に合わせて、情報提示やインタラクションを実現するため、高効率・超低遅延空間伝送技術が必要となる。

図 6.4-1 に示す通り、「プラットフォーム」として、例えば、現実世界（フィジカル空間）をサイバー空間にコピーした「デジタルツイン」があり、アプリケーション／サービスがデジタルツインを利用するための認証、検索、データ管理などのアクセス機能と、センサーデータをデジタルツインに反映させていくための機能（転送、認識など）を持つ。そして、アプリケーション技術で、プラットフォームのデータをさまざまな形で表現（再現）しフィジカル空間で体現できる形にしている。これらを通じ、利用者には一人ひとりのニーズに最適化された環境の提供が、サービスには（Beyond 5G 通信インフラに基づき）システム構築を容易にするための技術・基盤の提供が、さらに社会全体には CPS 化を加速するための要素技術（群）の提供がそれぞれ可能となると考えている。

以下では、ここで述べた要素技術について、セキュリティ・プライバシー技術等、他の節で述べられるものを除き解説する。

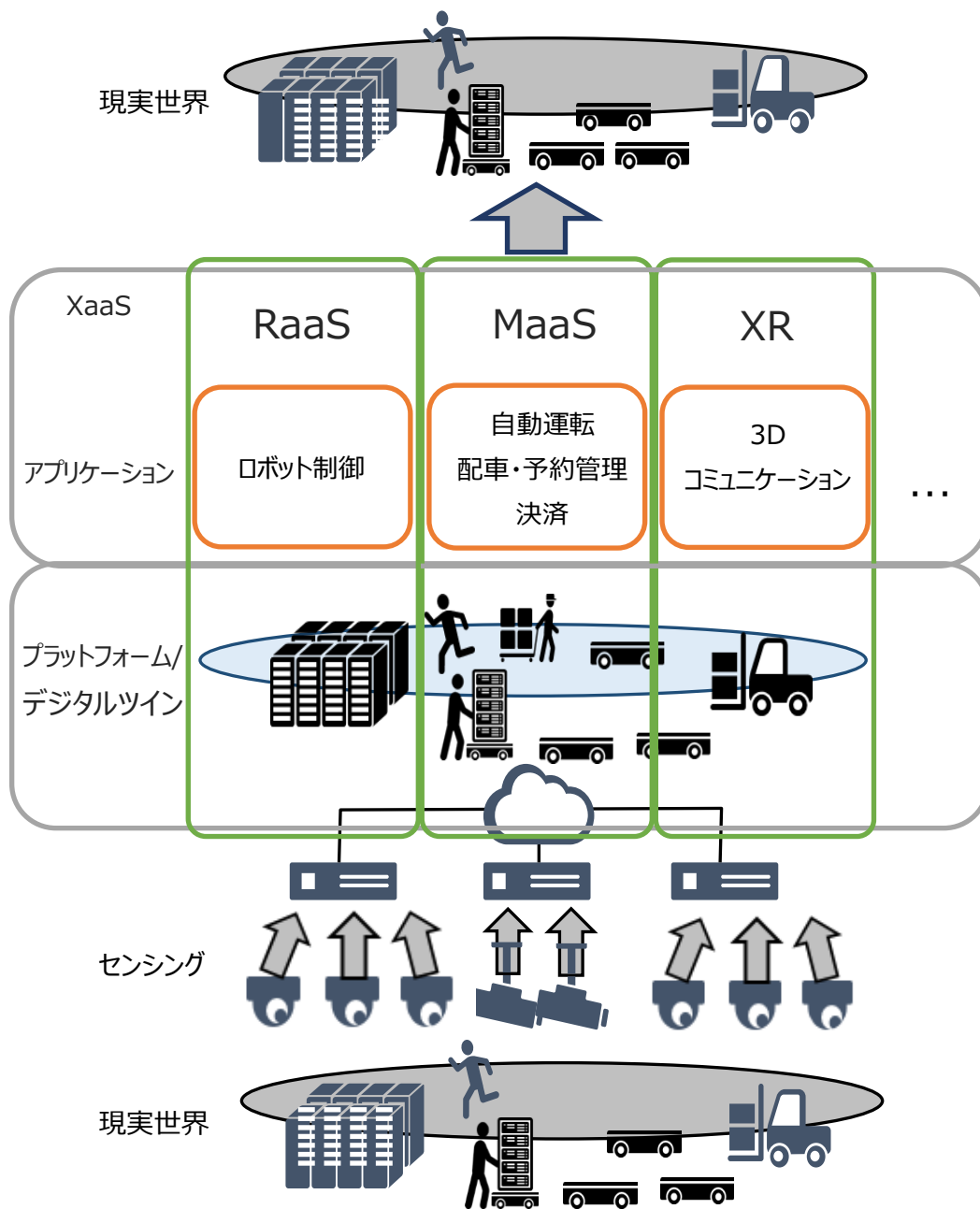


図 6.4-1 CPS におけるサービス (XaaS) とプラットフォーム/アプリケーション技術<sup>17</sup>

<sup>17</sup> 図の一部は日本電気株式会社提供。

#### 6.4.1 XaaS 等に必要要素技術例

##### ● デジタルツインにおける物体の位置・姿勢の推定技術

ロボットの効率的かつ安全な制御のためには、デジタルツインにおける物体の距離や姿勢を正確に把握することが重要である。例えば、倉庫におけるピッキング作業では、ロボットアームと把持対象の距離や姿勢の精度が、把持の成功率を左右する。また、搬送ロボットにおいては、障害物との正確な距離や姿勢を把握し、ロボット自身の将来位置を高精度に予測することで、衝突を回避することが可能となる。そのため、物体の位置・姿勢は高精度に推定できることが重要であり、さらに多数の物体に対応するため、エッジで分散的に処理できることが望ましい。

##### ● デジタルツインにおける物体の認識・識別技術

ロボットの効率的な作業のためには、デジタルツインにおける物体認識とその特性の把握が必要である。例えば、ピッキング作業においては、把持対象の硬さや重さを把握することで、適切な力での把持が可能となる。また、物体を一意に識別し、常にトラッキングすることで、検品作業を省略できる可能性がある。物体の認識・識別のためには、大量データによる事前学習手法に加え、ロボットの導入容易性を高めるために、事前学習なしで物体の認識・識別を可能とする技術も重要である。また、死角等により一時的に物体を追跡できない場合でも、その特徴量から死角の前後で物体を一意に識別できる技術が重要となる。

##### ● デジタルツインを用いた現実世界の予測技術

現実世界の物体を正確に再現するデジタルツイン構築の目的の 1 つは、現実世界の予測にある。例えば、現実世界の 5 秒先の未来を予測することができれば、現場で発生する様々な危険事故を回避することが可能となり、さらに、一歩先の行動を計画することでより効率的な作業が可能となる。このような未来予測は、デジタルツインにおいて時々刻々と変化する物体の位置や姿勢の時系列分析と、物体の種類や特徴を基にしたモデル分析とを組み合わせることで実現可能となる。

##### ● 安全で受容性・効率性のあるロボット制御

ロボットが人と共生する上では、安全性やサービス価格の妥当性の面で、ロボットが社会的、経済的に受け入れられることが重要になる。例えば、コミュニティサポートサービスにおいて、ロボットはユーザーの健康状態や気質を把握して、さりげなく散歩を促す。また、ビジネスサポートサービスにおいて、ロボットは倉庫での業務において簡単な貨物運搬タスクを行い、作業員が複雑な作業に従事するなどである。

両方の場合において、サービス受容性や効率等、安全性とサービス特性の両要件を満足するロボット制御を実現することが重要となる。

このようなロボット制御を実現するためには、デジタルツイン等を通じて物理的空間の状況や将来の変化を推定し、安全性の保証、サービス受容性、作業効率等の観点からロボットの挙動を評価し、適切な行動を選択する必要がある。

### ● 現実世界（フィジカル空間）再現・拡張

この技術では、あらゆる場所に設置された IoT デバイスやセンサー等によりフィジカル空間の情報をスキャンし、サイバー空間でそのまま再現する。単に再現するだけでなく、架空の風景やモノまで重ね合わせる。それを高効率に行うために「高効率・超低遅延空間伝送」が重要であり、フィジカル空間のセンシング情報、更にはサイバー空間で拡張されたコンテンツが、高効率にデータ圧縮された形で、タイムラグを感じさせることなく互いの空間を行き来する。その結果、CPS においてシームレスな体験をもたらす。

### ● マルチモーダル連携

さまざまな知覚表現を組み合わせて提示する技術。前述の現実世界転送・再現・拡張は平面的な映像の表示のみに留まらず、VR/AR グラスでの立体表現はもちろん、実物と見分けがつかない立体映像を表示するホログラフィ、場の広がりまでも感じられる立体音響、モノに触れた感覚を得られるフォースフィードバックなど、複数のモーダルを連携させることが重要になると考えられる。

### ● 高効率・超低遅延空間伝送

前述の現実世界の再現が進むにつれ、視覚体験は 2D ディスプレイから空間へと広がり、そこで取り扱われる情報の主体も 2D の映像情報から 3D の空間情報そのものへと変化していく。一方、3D 空間を表現する点群情報は従来の映像情報と比べて膨大であるため、点群データを対象に高効率な圧縮伝送を行うための符号化方式である Point Cloud Compression (PCC) 技術 [2] やその後継技術が確立され、モバイル回線においても 3D 空間情報を安定的に扱えるようになる。また、3D 空間を再現・伝送できるようになると、遠隔からの手術やロボット操縦など、インタラクティブ性の高いアプリへのニーズが高まる。このような用途では、前述の圧縮性能を維持したまま、3D 空間を瞬時に伝送する超低遅延伝送技術が重要となると考えられる。

### 参考文献

[1] 総務省, “Beyond 5G 推進戦略 –6G へのロードマップ–”, 2020 年 6 月.

[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000702111.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000702111.pdf)

[2] MPEG-3DG, “MPEG Point Cloud Compression”.

<http://www.mpeg-pcc.org/>

## 6.5 トラスト確保技術（セキュリティ、プライバシー、信頼性、レジリエンス（耐性））

Beyond 5G 時代の多様化されたお客様のニーズに対応するためには、機能面・性能面での技術革新に加え、あらゆるステークホルダが安全な状態で、かつ安心して使えるためのネットワークインフラの提供が不可欠となる。後者に相当するのが、セキュリティ、プライバシー、信頼性、レジリエンス（耐性）<sup>18</sup>などのトラスト確保に関わる技術である。

例えば、Beyond 5G ネットワークの超安全・信頼性を確保するためには、秘匿性・完全性のための耐量子公開鍵暗号技術、耐量子共通鍵暗号技術、認証・認可のためのトラスト確保技術、サイバー攻撃などの攻撃・故障への耐性を確保する技術、インシデント情報の一元管理やインシデント対応・復旧に向けた運用自動化技術、脅威・リスクの高度分析技術など、多様な技術を確立することが重要となる。また、個々の技術の確立を支援するために、AI、コンフィデンシャル・コンピューティング、マルチパーティ計算などの個別技術の高度な活用を推進していくことも必要となる。準同型暗号などのプライバシー保護を想定した分析や管理技術についても検討が必要となる。

以下では、これらのトラスト確保技術を、我が国の Beyond 5G 戦略に即して考えてみたい。我が国では、Beyond 5G に求められる 7 つの機能等を定めており、本節で言及されている技術はその中でも特に「超安全・信頼性」に貢献するものとなっている。さらに、7 つの機能それぞれに対し、表 6.5-1 に示す通り、様々なセキュリティ要件が想定される。これらを考慮しつつ、さらに Beyond 5G 時代を意識すると、以下の技術が必要となることが想定される：

### ● ネットワークトラスト確保技術（ネットワークの超安全・信頼性技術）（6.3.1）

Beyond 5G のネットワークに関する様々な機能に基づき、ネットワークに統合すべき様々なトラスト確保関連技術が存在する。以下の 6.5.1 節では、多々あるトラスト確保技術を、「設計」、「運用」、「マネジメント」のカテゴリで分類し、このカテゴリにおいて、Beyond 5G ネットワークの信頼モデル、安全性かつプライバシーを配慮したネットワークインフラストラクチャー、ハードウェアセキュリティ、コンフィデンシャル・コンピューティングなどである。これにより、Beyond 5G ネットワークのライフサイクル全体のトラスト確保に貢献する。

### ● それ以外のトラスト確保技術（その他の Beyond 5G の特性）（6.3.2）

Beyond 5G の超安全・信頼性以外の特性に関連するトラスト確保技術を 6.5.2 節にまとめた。多くの内容は、ネットワークの超安全・信頼性技術で触れた技術要素を Beyond 5G の特性の視点から整理している。

例えば AI/ML（機械学習）（以下 AI と書く）は Beyond 5G と連動して進化しているため、AI を用いた（自律型）セキュリティ技術に加え、ネットワーク内の各要素で使われる AI 自体のセキュリティや AI によるネットワーク攻撃の進化も考えられる。

これらにより、Beyond 5G 時代のネットワークを含むシステム全体の信頼性を確保することに貢献する。以下では、ここで述べた各技術・基盤について解説する。

---

<sup>18</sup> ネットワークの信頼性（reliability）については、6.8.4 節で触れる。

表 6.5-1 Beyond 5G の 7 つの機能に対するトラスト確保に関わる要件（文献[1]改）

機能	トラスト確保に関わる要件
<b>超高速・大容量</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 耐量子共通鍵暗号（超高速な暗号化/復号）</li> <li>• トラフィック監視、侵入検知などの処理ロジックの超高速化</li> <li>• 格納データの高度圧縮技術、分散格納技術などの格納・管理手法</li> </ul>
<b>超低遅延</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 軽量のセキュリティ</li> <li>• Beyond 5Gでのブロックチェーンの活用</li> </ul>
<b>超多数同時接続</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 効率的認証・認可（アグリゲート認証、放送型認証等）</li> <li>• 効率的セキュリティ監視・処理手法</li> </ul>
<b>超低消費電力</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• セキュリティ機能のハードウェア実装</li> <li>• 軽量のセキュリティアーキテクチャ</li> </ul>
<b>超安全・信頼性</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 秘匿性・完全性の確保（耐量子公開鍵/共通鍵暗号技術、コンフィデンシャル・コンピューティング等）</li> <li>• 認証・認可技術とトラストモデル</li> <li>• トレーサビリティの確保（ログ/イベント/フロー情報の収集・管理）</li> <li>• 攻撃・故障への耐性</li> <li>• セキュリティコーディネーションの確保</li> <li>• 高度なログ/イベント/トラフィック分析</li> <li>• インシデントに起因する情報の一元管理</li> <li>• 統合的な対応及び復旧のための運用自動化</li> <li>• プライバシー保護</li> <li>• Beyond 5Gの利用者/利用機器の信頼性診断</li> <li>• 脅威分析、リスク分析の高度化</li> <li>• 動的ポリシーエンフォースメント</li> <li>• 健全性自動監査</li> </ul>
<b>自律性</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 運用や監査の自動化/自律化</li> <li>• 攻撃・故障への耐性確保のための自律性</li> <li>• AIの視点からのトラスト確保メカニズム</li> </ul>
<b>拡張性</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• トラスト確保の機器やシステムの統合管理</li> <li>• 拡張構成モジュールの随時把握と構成統合管理システム</li> </ul>



## 6.5.1 ネットワークの超安全・信頼性に関するトラスト確保技術

Beyond 5G ネットワークにおいて、トラスト確保を実現するためには、Beyond 5G における超安全・信頼性の特性に対応する技術が重要となる。以下に、設計、運用、セキュリティマネジメントの3つの視点から、それぞれの技術について以下に述べる。

### 6.5.1.1 トラスト確保に向けた Beyond 5G ネットワークの設計に関わる技術

#### (1) 秘匿性・完全性の確保

Beyond 5G ネットワークが提供する機能として、トラストを十分に確保するうえで、非常に高いレベルの秘匿性・完全性の確保が重要な要件となる。Beyond 5G で扱うすべての管理データ、利用者データなどに対する秘匿性（正当なものを以外データを秘匿化すること）、及び完全性（データが不当に改ざんされないこと）を確保するためには、現状の計算機環境だけではなく、Beyond 5G で活用されることが想定できる、量子コンピュータ（量子技術）を用いたネットワーク環境を考慮した暗号システムの構築が必須となる。

物質とエネルギーの物理的性質を活用した量子コンピュータの研究は20年以上前から行われており、従来のコンピュータでは解くことが難しい整数の素因数分解や離散対数問題の計算を行うことができる。現在の公開鍵アルゴリズムであるRSAや楕円曲線暗号（Elliptic Curve Cryptography; ECC）などは、解くことが難しい数学的な問題とした安全性に帰着しているが、Shorのアルゴリズム [2] により、量子コンピュータが実現すれば簡単に解くことができると言われている。また、Groverのアルゴリズム [3] により、AES等の現行の共通鍵暗号の解読は、量子コンピュータを用いることで大幅に高速化されるため、量子計算時代の到来を想定し、必要な鍵長を増やすことなどが必要である。

以上の想定により、量子計算時代に適切に対応できる秘匿性・完全性機能として、以下 A)、B) に示すような暗号基盤を開発し、Beyond 5G のトラスト確保のための基盤整備（プロトコルやAPIへの組み込み）を推進することが重要となる。また、上記のような量子計算時代を想定した暗号基盤を構築する前に、Beyond 5G のトラスト確保のための基盤技術として、以下に掲げる C) 量子鍵配送技術や D) セキュア・コンピューティングなどの技術が考えられている。

#### A) 耐量子公開鍵暗号技術

量子計算機時代に備える公開鍵暗号として、「耐量子公開鍵暗号技術（単に、「耐量子暗号技術とも呼ばれる）」が注目されている。これらの技術は計算時間がかかるため、実時間でデータを暗号化する共通鍵暗号と同等には活用できず、基本的に鍵カプセル化メカニズム（Key Encapsulation Mechanism; KEM）として、共通鍵暗号で用いる「暗号鍵」をカプセル化して共有するために利用される。しかしながら、耐量子公開鍵暗号では、多くの方式（アルゴリズム）が提案されており、それぞれのアルゴリズムには、以下のような耐量子公開鍵暗号技術の高度化に備えた特徴を有する。

- 属性ベース暗号（アクセス特権がある人のみ情報復号が可能）
- 検索可能暗号（暗号化したまま、検索が可能）
- 準同型暗号（暗号化したまま、演算が可能）

- 代理人再暗号化方式（暗号化したまま、復号できる権限者を変更可能）
- 放送型暗号（送信者 1 人で多数の受信者の通信が可能）
- 閾値暗号（閾値以上のデータにより、復号が可能）

したがって、Beyond 5G ネットワークにおいては、ネットワークとしての基盤技術として KEM が提供され、Beyond 5G を活用する多様なアプリケーションとして、上記のような耐量子暗号公開鍵技術の高度化に備えた特徴を有する方式の活用が考えられる。

#### B) 耐量子共通鍵暗号技術

Beyond 5G ネットワーク環境における管理データ及び利用者データは、上記の耐量子暗号（公開鍵）による KEM で設定された暗号鍵を用いて、耐量子共通鍵暗号で秘匿性・完全性を確保する。共通鍵暗号の安全性の視点から、現在活用されている共通鍵（AES）における 128bit 鍵と同等レベル以上の安全性を量子計算環境においても確保するためには、共通鍵暗号の鍵サイズを現状の 2 倍以上にする必要があり、6.5.2.1 節で記載するように、Beyond 5G の通信速度である 100Gbps に追従するために、暗号化の処理を超高速化するための検討が必要となる。さらに、Beyond 5G のコアシステムと比較して計算資源が多少乏しい Beyond 5G のエッジシステムにおいても、超高速の暗号化・復号化を実現することも必要となり、Beyond 5G ネットワーク全体として、超高速化を実現するための耐量子共通鍵暗号の配備を前提とした検討が必要となる。

#### C) 量子鍵配送

量子鍵配送（Quantum Key Distribution; QKD）とは、光ファイバー伝送路において、1 ビットあたり 1 個の光子に鍵情報を載せて伝送することで、2 者間で安全に暗号鍵を共有する技術である。この方法は、量子力学の原理を応用することで、盗聴を検知できる通信チャネルを形成でき、ひとたび盗聴が検知されると送信された暗号鍵は破棄され、別チャネルで安全に送ることが想定されている。このため、伝送距離に制限があるものの、完全な量子コンピュータが活用される以前に、盗聴の検知・防止の視点から、暗号鍵の安全な配送方法として、本技術は活用される可能性がある。

#### D) データを保護したまま演算する技術

多くの外部・内部からの攻撃に対して、通常のネットワークのシステムでは、データに暗号化を施すことでデータの機密性を確保しており、多くの場合、データを保存しているストレージ上での暗号化やネットワーク上の伝送路を通るデータの暗号化が実施されている。しかしながら、何等かの手段でネットワークシステムに侵入を許してしまった場合、利用中（処理中）のデータが露呈される可能性がある。すなわち、コンピュータ上の処理は、コンピュータのメモリにデータを展開し、計算処理を行うが、一般的には計算処理の前に暗号化データは復号化され、平文の状態となるため侵入した攻撃者によるメモリダンプなどの手法によりメモリ上のデータが露呈することになる。

コンフィデンシャル・コンピューティングとは、上記の脅威に対抗するために、機密データの処理を行う技術ソリューションの提供を目的としたコンピューティング技術である。例えば、モバイルシステム内での伝送デー

データの保護は、通常ネットワーク機能間のホップ毎の暗号化処理で実現しているが、ネットワークノード内で処理もしくは保持されているデータは、コンフィデンシャル・コンピューティングによって保護することができ、トータルなネットワークシステムの秘匿性確保という点で有効となる。このような保護は、TEE (Trusted Execution Environment) [4] と呼ばれるハードウェアの保護機構を用いて、隔離環境上で安全な処理をさせるメカニズムによって実現される。

コンフィデンシャル・コンピューティングをホップ毎のセキュリティと組み合わせれば、端末からネットワーク内のスライス終端までのエンドツーエンドで、分離されたネットワークスライスの提供が可能となる。なお、TEE はインテル SGX、AMD SEV、またはインテル TDX 等で実装されている。これらのハードウェアセキュリティは遠隔認証の枠組みに基づいており、エンドユーザーはそのアプリケーションが正当で適切に構成されたハードウェア上で確実に実行されることが検証できる。また、認証が成功した場合にのみ機密データまたは鍵の書き込みが可能である。このアプローチは、NIST のゼロトラスト原則 [5] に十分に適合していると言われている。

さらに、コンフィデンシャル・コンピューティングに関連するものとして、完全準同型暗号およびマルチパーティ計算と呼ばれる手法が考えられている。特に完全準同型暗号では、6.5.1.1 節 A) でも触れたが、暗号化されたデータの処理（任意の演算）が可能である。この方式の場合、データを暗号化またはデータを復号する枠組みが必要で、さらに処理アルゴリズムを暗号化されたデータの処理に適合させる必要がある。これらの処理の演算には時間を要することから、ハードウェアアクセラレーション技術を利用することが、完全準同型暗号実現の第一歩につながると考えられる。

## (2) 認証・認可技術とトラストモデル

Beyond 5G ネットワークを支えるシステム構成要素（ノード/クラウド等）が適切なメカニズムによってそれぞれが認証され、認可されたものであることを確実なものにする必要がある。具体的には、各構成要素に設定された ID（識別子）を統合的に管理し、それぞれのアクセス権（各構成要素が何ができるか）を適切に管理するための仕組みを構築する必要がある。さらに、ネットワーク内でアクセスが発生する時点において、リアルタイムの構成要素間の相互認証を行う必要がある。

さらに、悪意をもった Beyond 5G の利用者やアプリケーションを適切に排除するために、利用者やアプリケーションの認証、認可を保証するための基盤構築も必要となる。特に、6.5.2.3 節に記載する超同時接続の特性を加味すると、多数の利用者等の認証・認可を実時間で実施することも必要となり、認証・認可を支えるためのメカニズムの開発が重要となる。

特に、認証・認可技術を実装する環境においては、多角的なトラストモデル [6] の整理が興味深い。文献 [6] で提案している Beyond 5G の多角的トラストモデルでは、トラスト要件を満足するために 3 つの異なるモードに整理している。既存のモードとして、集中型での認証／承認に基づく Bridge モード、及び、第三者による検証、評価、認証に基づく Endorsement モード、そして新しいモードとして、マルチパーティのフラットなネゴシエーションに基づく Consensus モードである。Consensus モードに基づくことで、すべてのネイティブなトラスト属性は、分散型／非集中型ネットワークのアーキテクチャやサービスの要件をより効果的に満足することができるとしている。

### **(3) トレーサビリティの確保—ログ/イベント/トラフィックフロー情報収集・管理技術**

Beyond 5G ネットワークを構成・運用するシステムモジュールは多岐に渡っており、大量なモジュールから多種多様なログ情報が吐き出され、健全な Beyond 5G ネットワークの運用に資するためにログ情報の活用が重要となる。しかしながら、ログ情報を一元的に管理し、ログ情報に対して必要なトレーサビリティを確保するためには、統合かつ一元管理ができるログ管理システムの構築が必須となる。また、Beyond 5G ネットワークに配備される監視モジュールや不正検知モジュールが排出するイベント情報についても同様な統合・一元管理を徹底することが求められる。さらに、トラフィックのフロー情報を効率的に管理運用することにより、Beyond 5G ネットワークの健全運用に資することも可能となる。

すなわち、Beyond 5G ネットワークの健全な運用に資するためには、ログ情報、イベント情報、及びトラフィックフロー情報を十分に収集し、適切な管理を行うための収集管理基盤を整備することで、ネットワーク運用で活用する情報のトレーサビリティを確保でき、健全な運用を実施することが可能となる。なお、これらは、各国の法制度やプライバシー保護を前提とする必要がある（6.5.1.2 節（1）、（2）も同様）。

### **(4) 攻撃・故障への耐性の確保（可用性の確保）**

Beyond 5G ネットワークへの攻撃やシステム障害などが発生した場合でも、可用性確保のために、ネットワークシステムとして動き続けることが必要となる。従来技術においても、ネットワークシステムの適正な 2 重化技術として、ネットワーク資源（メモリや構成情報等）の 2 重化、ネットワーク計算資源（スイッチなど）の 2 重化、ネットワークストレージ資源（ネットワーク維持に必要な情報資源等）の 2 重化などが開発されているが、Beyond 5G ネットワークにおいては、既存の 2 重化技術をより洗練した形で統合的に実現できる耐性確保が重要となり、特にサイバー攻撃に対する耐性については、高度な攻撃による 2 重化部分を狙うことも想定されることから、上記（3）で確保したログ/イベント情報などの収集管理基盤で得た情報を高度に分析することにより、早期に予兆的な攻撃挙動を把握し、動的な対応や回復を図る仕組みを構築する必要がある。

また、サイバー攻撃を受けてから対応を開始する従来の「受け身」の体制から、オープンソース情報（Open-Source INTelligence; OSINT）やダークウェブの情報などを事前に収集分析し、ログ/イベントやフロー情報から見える予兆と突合させることにより、攻撃への耐性をよりアクティブに確保していくことが重要となる。

さらに、サイバー攻撃の一つとして、ネットワーク管理者にとって対処しにくいのが Distributed Denial of Service (DDoS) 攻撃であるが、広域な規模での DoS 観測システムを導入することで、DoS の攻撃先情報を早いタイミングで把握し、DoS のトラフィックを識別し、排除したり、分散化などによりトラフィックを吸収したりする等の対策資源（メモリ等）を潤沢に準備することで、DoS への耐性の強いネットワークを構築することも必要となる。

### **(5) セキュリティコーディネーションの確保**

異なる Beyond 5G ネットワークやサービス/アプリケーションでは異なるトラスト確保のための具体的な



実装を行うことになるため、異種の Beyond 5G の相互接続等を想定した Beyond 5G の全体の系で  
トラスト確保を考える場合、異種のトラスト確保機構との間を調整し、保護などの衝突を回避する必要  
がある。例えば、Beyond 5G の構成要素の管理者が必要とする物理、仮想化リソース（エッジ、ネット  
ワークコア、クラウド等）やそれらの上で動作するサービス等に対して、トラスト確保が実施する制御レベ  
ルの調整を適切に行う必要がある。すなわち、Beyond 5G を構成するこれらの異なる当事者が混在する  
ような構築・運用の環境で、様々な物理および仮想化リソース、並びに様々なトラスト確保機構のメカニ  
ズムなどを全体の系としてコーディネートした形で設計、構築、展開、運用できるようにすることが理想とな  
る。そのために必要となるメカニズムとして、異なる当事者間で異なるトラスト確保のメカニズムを調整する  
ためのコーディネーション機能の配備が必要となる。セキュリティを含むトラスト確保機能の調整は、多様な  
保護メカニズムの相互運用性と調和を目指すことになる。

### 6.5.1.2 トラスト確保に向けた Beyond 5G ネットワークの運用に関わる技術

Beyond 5G ネットワークインフラの日常的な運用と保守のためのトラスト確保機能を提供することが必  
要となる。例えば、Beyond 5G の環境に実施している多種多様なトラスト確保機能とそれらの有効性  
を監視し、攻撃などによって健全な Beyond 5G の運用維持に影響を与える保護機能や構成要素など  
を管理者に対して適切に報告したり、何らかの理由でトラスト確保機能に変更を与えた場合は、対象と  
なる保護機能に関連する下位のトラスト確保機能に対して、その変更内容を通知・警告したりすること  
が含まれる。すなわち、Beyond 5G の運用者は、運用上で発生するログやイベントなどの報告や警告に基  
づき、Beyond 5G ネットワークに関連する適切なインシデント、監査情報、コンフィギュレーション・デー  
タなどを確認し、健全な Beyond 5G の運用を継続することが求められる。

#### (1) 高度なログ・イベント・トラフィック分析

これまでの境界防御を軸としていたネットワーク環境とは異なり、Beyond 5G においては、ネットワー  
ク上に多様な機能が分散し、更に、仮想化技術によるネットワーク構成により、セキュリティ対策が必要とな  
る範囲が面的に拡大するため、攻撃を誘発する脆弱点（攻撃ベクター）も広範囲となり、より高度なト  
ラスト確保機能を配備することが必要となる。したがって、多種多様な攻撃や異常・不正通信を検知し、  
不正利用者の侵入を防止するために、異常や不正の検知技術を高度化する必要がある。上記の  
6.5.1.1 節(3)で述べたログ収集・管理機構を活用し、収集したログ、イベント、トラフィックフロー情報の高  
度分析（横断的な相関分析、多要素にまたがる深層分析等）を実施する必要がある。なお、高度分  
析に活用するデータとしては、他の Beyond 5G ネットワークで得られた知見データなどの活用を考  
える必要がある（情報の一元的管理については、6.5.1.2 節(2)を参照）。

#### (2) インシデントに起因する情報の一元管理

6.5.1.1 節(3)で述べたログ/イベント/フロー情報の収集・管理基盤に加え、ネットワーク運用に関連  
するインシデント情報（発生個所、原因、影響、復旧方法、課題等）の情報を Beyond 5G の環境  
全体として一元的に管理し、個々の Beyond 5G ネットワーク運用に活用することが求められる。すなわ

ち、Beyond 5G ネットワークの運用に関連する情報を他のネットワーク事業者間、アプリケーション提供者間で共有することにより、同種のインシデント発生の予防や迅速な対応に資することが可能となる。

### (3) 統合的な対応及び復旧のための運用自動化技術

ネットワークのトラスト確保に必要となるセキュリティ機能としては、侵入検知（Intrusion Detection System; IDS）、ファイアウォール（Firewall; FW）、パッチ処理・管理、ネットワーク構成管理、ログ管理など、多種多様な機能群があり、それらを従来は人手で IDS シグネチャ、FW フィルタールール、パッチ管理モジュールの管理/パッチ運用などを行ってきた。これらの多様化したセキュリティ機能の運用管理を全面的に自動化することにより、人的リソースの削減や精度の高いオペレーションを実施できる。また、新たな攻撃を発見した後、新しいシグネチャやルール生成においても、それぞれの生成メカニズムを導出しておくことで、自動的にシグネチャやルールのアップデートが可能となる。さらに、新たな攻撃に対向するために、ログ情報/イベント情報などにより、現状の攻撃挙動分析を行うことで、自動的に新たな攻撃の予兆を検知するためのメカニズムの導出も可能となることが期待できる。

なお、パッチの処理については、運用と通常のルーティンとして、Beyond 5G ネットワークの環境でパッチ管理の必要となる機器（ファームウェアを含む）、ソフトウェア（仮想化などを含む）、ミドルウェア、OS などの把握・管理を徹底することが必要であり、それぞれのパッチ管理対象となるベンダーからの情報、OSINT、及び最新の脆弱性情報などを用いて、パッチ管理対象の情報の最新化を実施しておく必要がある。最新化された情報に基づき、自動でパッチ適用（管理対象の更新やアップデート等）を実施することが望ましい。ただし、提供されるパッチの内容によっては、パッチ適用が現状の運用にどの程度影響を与えるかの評価を行う必要がある対象機器やソフトウェアなどが存在する。その場合は、試験環境を用いて、提供パッチが適用できるかどうかの確認が必要となり、その適用性の確認までをすべて自動化できるかは、今後の AI などのロジックの組み方に依存すると言える（6.5.2.5 節を参照）。

### (4) プライバシー保護機能

Beyond 5G ネットワークの環境では、利用者個人に関わる情報（Personally Identifiable Information; PII: 利用者を特定できる情報）を扱うこととなり、それらの中にはプライバシー保護の対象となるものが存在する。Beyond 5G の環境でネットワークサービスを設計・構築する場合においては、プライバシー保護を提供する機能を活用することが必要となる。さらに、実際の通信から得られるログ情報などを用いて、通信特性の分析やネットワーク機能の改善に向けた利用者分析などを実施する場合は、プライバシーを保護した状態でこれらの分析作業を実施することが望ましく、6.5.1.1 節(1) D) で述べた完全準同型暗号の活用などが具体的なメカニズムとして考えられている。

さらに、複数のサービス事業者が存在する Beyond 5G 環境でのデータ利用は複雑であるため、データ利用に対する利用者の意向に柔軟な対応が必要となる。すなわち、Beyond 5G 利用者によって PII のプリファレンス（PII を特定の目的のためにどのように処理すべきかの具体的な選択）を設定でき、ネットワーク/サービス事業者はそれに従った PII の収集・共有を行い、利用者情報を他事業者に共有した履歴を利用者に提供できるなどの収集・管理・運用を実施することが、Beyond 5G ネットワーク/サービ



事業者にとっては必要となる。このような仕組みは、IoTを対象としたITU-T勧告X.1363で標準化されており[7]、Beyond 5G環境でも参考になる。

### **(5) Beyond 5Gの利用者/利用機器の信頼性診断**

人々の様々な社会活動に通信ネットワークがより密接に組み込まれていくBeyond 5G時代においては、人々が適切なセキュリティ対策行動を取ることがますます重要となるため、Beyond 5Gサービスに参加する利用者において、適切なセキュリティ対策行動を支援する取り組みが運用の一環として必要である。具体的には、ネットワークのトラスト確保技術として、サービスの利用する人や活用する機器の信頼性を定量化し、信頼関係に基づいてネットワークへの接続を制御する技術により不正利用者や脆弱な機器による接続を防止するといった仕組みの構築が重要となる。このような技術は、6.5.1.1節(2)の認証・認可技術にも関係が深く、設計段階での考察が重要となる。

#### **6.5.1.3 トラスト確保に向けた Beyond 5G ネットワークのセキュリティマネジメントに関わる技術**

Beyond 5G ネットワークのセキュリティマネジメントとは、Beyond 5G ネットワークサービス事業者が適切なセキュリティ機能の設計・実装・運用・改善などを実施するための仕組みを指す。基本的には、ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27002, ISO/IEC 27011 (ITU-T 勧告 X.1051) によって規格化されている要件やガイドラインに従うことになるが、Beyond 5G では、以下に示すようなセキュリティマネジメントの高度化に関わる検討が必要になる。

##### **(1) 脅威分析、リスク分析の高度化**

セキュリティマネジメントの基本は、対象となる Beyond 5G 事業者に想定するリスクをいかに算定し、いかにリスクに備え、事業者のリスクを低減・回避等を行うことである。そのため、事業者にとっては、組織で想定できる脅威（サイバー攻撃等を指す）を洗い出し、洗い出された脅威の組織への影響度（該攻撃が絶大なダメージを与えるか否か等）を算定し、影響度の大きい脅威をベースとした想定リスクを特定する作業が最も重要となる。近年のサイバー攻撃の傾向によると、攻撃手法の多様化、複雑化、高度化などが観察でき、攻撃の変化は年単位ではなく、月/週単位で起こっているのが実情である。したがって、組織における脅威分析、影響度分析、リスク分析の実施は、頻度高く行う必要があり、さらに机上検討だけでなく、具体性をもったペネトレーションテストを含めた分析作業を迅速に実施することが必要となる。

##### **(2) 動的なポリシーエンフォースメント技術**

上記(1)で述べたリスク分析の結果に従い、Beyond 5G 事業者としての事業リスクが算定されると、それに従ったセキュリティマネジメントを実施するために「ハイレベルポリシー」が策定される。通常は、各組織のセキュリティ責任者らによる会議によって、ハイレベルポリシーは策定され、組織が総合的にトラスト（セキュリティ）を確保するために遵守すべき方針となる。しかしながら、ハイレベルポリシーの下に個別のポリシー文書が存在し、例えば、アクセスポリシー（パスワード管理等）、侵入検知のポリシー（検知レ

ベルの設定等)などが規定される。Beyond 5G 時代におけるサイバー攻撃の変化が激しい環境への適合を考えると、少なくとも個別ポリシーについては、上記(1)のペネトレーションなどの短期でのリスク分析の結果に基づき、動的に改善される必要があり、その修正・改善されたポリシーに従って、リアルタイム処理に近い形で不正なアクセス者をフィルターするなどの処理を実施することが重要となる。本動的なポリシーエンフォースメントについては、6.5.1.1 節(4)の攻撃耐性の確保にもつながる活動となる。

### (3)健全性自動監査技術

トラスト確保が十分になされているかを「監査する」ことは、セキュリティマネジメントの一部として認識されており、健全にトラスト確保の機能が設計され、実装され、運用されているかを定期的に監査することも重要な作業となる。通常はセキュリティマネジメントの見直しを行うタイミングで監査をすることが多いが、上記(2)でも述べたように、サイバー攻撃の変化に追従し、Beyond 5G 環境を総合的な視点から健全性を監査・検証することが重要になり、そのための監査シナリオの自動生成、頻度の高い健全性自動監査などを実現できる技術開発、及び運用が重要となる。本健全性自動監査は、上記のリスク分析との連動や 6.5.1.2 節(3) (運用の自動化) と関連する技術である。

## 6.5.2 その他の Beyond 5G の特性に関連するトラスト確保技術

### 6.5.2.1 超高速・大容量

6.5.1.1 節 (1) B)耐量子共通鍵暗号でも述べたように、Beyond 5G の通信速度は 100Gbps 超となり、様々な端末でこの要件に対応できるより高速・軽量な暗号方式の研究開発が必要となる。超高速化は、共通鍵暗号が対象となり、現在 (AES 暗号で) 使用されている 128bit 鍵と同等のセキュリティレベルを維持するためには、鍵長は 256bit 以上である必要がある [8]。すなわち、Beyond 5G 時代の通信速度に基づき、256bit 鍵を使用し、100Gbps を超えるスループットで対処できる暗号システムの開発は必須となる。このような超高速処理を実現することにより、大容量なデータの転送、処理のトラストの確保がなされることとなる。

一方、大容量のデータの送受に関連し、大容量のトラフィックの監視、大容量のデータ格納リソースの確保も重要な要件となる。例えば、大容量なトラフィックが超高速で処理される Beyond 5G 環境において、トラフィック情報を監視し、不正な侵入を検知するための処理ロジックも超高速に処理される必要がある。すなわち、従来の境界型セキュリティ機器 (IDS、FW 等) についても、超高速化に耐えられるような超高性能化することが求められる。

さらに、大容量の送受データ、管理データを格納するストレージ機器やその管理手法についても、十分な検討が必要となる。例えば、1 日単位で収集格納すべきデータサイズが 100 倍以上になることを想定すると、格納データの高度圧縮技術、分散格納技術などの格納・管理手法の研究開発も必要となる。

### 6.5.2.2 超低遅延

Beyond 5G の超低遅延特性を支援するトラスト確保の技術は、6.5.1.1 節(1)で述べた暗号基盤の整備が関係する。量子計算の環境を想定した場合、公開鍵を提供する耐量子暗号では、KEM を想

定した認証などにかかる処理応答を考えると、Beyond 5G の超低遅延特性を満足できない。しかしながら、認証・認可などの暗号環境の設定後においては、超高速な耐量子共通鍵暗号を用いた処理を用いることで、超低遅延性を確保できると考えられる。

一方、Beyond 5G ネットワークでブロックチェーンを活用していくためには、その超低遅延性を考慮すると、高速なコンセンサスアルゴリズムの実現や集中型のネットワークアーキテクチャにおける分散型のブロックチェーンの統合などが課題になると考えられる。ブロックチェーンの実用化のためにはこれらの課題の打開のための研究開発が不可欠となる。

### 6.5.2.3 超多数同時接続

非常に多くのエッジシステムが同時に接続される Beyond 5G の特性においては、接続されるエッジシステム（利用者や活用機器等）との認証・認可の処理が同時に必要となる。したがって、同時接続がなされる状況においては、処理としては重い認証・認可の処理が同時に走るため、認証を提供するシステム側の処理負荷が大きくなり、何等かの対策が必要となる。

例えば、認証を実施する単位を複数にかためることにより、アグリゲート認証を用いて、複数のエッジシステムを同時に認証したり、同時接続されたエッジシステムに優先度がある場合は、放送型認証などのメカニズムにより、同時接続の部分集合にあたるエッジシステムの認証を優先したりするメカニズムの検討が必要となる。

### 6.5.2.4 超低消費電力

6.5.1.1 節(1) D)に記載のコンフィデンシャル・コンピューティングで述べたように、トラスト確保メカニズムのコア部分をハードウェア処理に依存する方法が検討されており、Beyond 5G の超低消費電力の特性に関連する技術としては、トラスト確保に関わる高処理負荷（電力消費の高い部分）をハードウェア化することが考えられる。さらに、トラスト確保のレベルをできるだけ落とすことなく、保護メカニズムを軽量化（ライトウエイト化）することにより、消費電力の軽減に貢献する技術開発が考えられる。

### 6.5.2.5 自律性

6.5.1.2 節(3)における運用の自動化、及び 6.5.1.3 節(3)における健全性自動監査で述べたように、Beyond 5G において自律的にトラスト確保を実現するシーン（場面）は多々存在する。運用や監査の自動化/自律化のみならず、6.5.1.1 節(4)の攻撃・故障への耐性を確保するためにも、自律性をもった確保メカニズムの導入が必須となる。これらの自動化/自律化の実現においては、AI の活用が重要となり、以下に AI の視点からトラスト確保メカニズムについてまとめる。

アーキテクチャ、プロセス、テクノロジーの各ドメインに AI が普及することで、セキュリティ面の弱点の 2 つの主要な要因（脆弱なソフトウェア、安全でない運用慣行）を効果的に減らすことができる。AI は、攻撃検出・応答の自動化、攻撃検出の正確性とアカウントビリティの向上、高度なハードウェアおよびソフト

ウェアの安全性検証など、ネットワークの信頼性の向上に貢献する。例えば、WarpDrive<sup>19</sup>プロジェクト [9] においては、大量の Web アクセス情報を収集・蓄積し、我が国のセキュリティ研究機関 7 組織が協力して AI を用いた分析・研究を行う基盤を構築・運用して、数々の有望な成果を創出している。

また、Beyond 5G 技術における AI の活用によって、自己監視、自己最適化、自己構成が可能なネットワークに関する新たな展望が切り開かれる。Beyond 5G ネットワークアーキテクチャを AI などの主要技術と統合することで、インテリジェントな防御メカニズムで完全自動化されたシステムを構成できることも期待される。さらに、生成された膨大な量のデータに、AI を使用し継続的に分析することで、将来の Beyond 5G ネットワークに不可欠となる堅牢なリアルタイム監視およびリアルタイム脅威検出が可能になる。しかしながら、このようなシステムを設計するためには、AI コンポーネントの信頼性、ディープラーニングモデルのセキュリティとプライバシーの問題、データの復元性など複数の課題を考慮する必要がある。

#### 6.5.2.6 拡張性

Beyond 5G の環境において、動的にシステムの構成要素の拡張が容易になっていく特性を受け、トラスト確保に関連するセキュリティ機器の追加やセキュリティシステムの拡張が必要となる。これらの追加や機能拡張により、トラスト確保を提供する構成の変更やログ情報やイベント情報の収集・分析・管理するためのメカニズムにも機能拡張や修正が及ぶことになる。したがって、Beyond 5G の拡張性を担保するためには、トラスト確保の機器やシステムの統合管理を実施するだけでなく、拡張された Beyond 5G の構成モジュールとトラスト確保の機器・システムとの対応関係を随時自動で把握できるような構成統合管理システムの仕組みを導入する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 三宅優, セキュリティ WG 活動報告, Beyond 5G 推進コンソーシアム国際委員会第 10 回会合, [https://b5g.jp/w/wp-content/uploads/pdf/international\\_doc10\\_SWG.pdf](https://b5g.jp/w/wp-content/uploads/pdf/international_doc10_SWG.pdf)
- [2] P.W. Shor, "Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring," Proc. 35th Annual IEEE Symp. on Foundations of Computer Science, pp.124-134, Santa Fe, NM, USA, Nov. 1990.
- [3] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," STOC '96, pp.212-219, <https://doi.org/10.1145/237814.237866>
- [4] 「Trusted Execution Environment の実装とそれを支える技術」, 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ Fundamentals Review, vol.14, no.2, pp.107-117, 2020 年 10 月.
- [5] NIST SP800-207 「ゼロトラスト・アーキテクチャ」の解説と日本語訳.  
<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/column/awareness-cyber->

---

<sup>19</sup> Web-based Attack Response with Practical and Deployable Research Initiative.

[security/zero-trust-architecture-jp.html](https://www.warpdrive-project.jp/security/zero-trust-architecture-jp.html)

- [6] W. Tong, P. Zhu, et al, 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [7] ITU-T, X.1363: Technical framework of personally identifiable information handling in Internet of things environment, 2020.
- [8] 情報通信研究機構・情報処理推進機構, “CRYPTREC report 2019,” 2020年3月.  
<https://www.cryptrec.go.jp/report/cryptrec-rp-3000-2019.pdf>
- [9] WarpDrive Project.  
<https://warpdrive-project.jp/>



## 6.6 ネットワークエネルギー効率の向上

### 背景と動機

接続されるデバイス、基地局、オブジェクトの数が増加すれば、かつてないほどのデータトラフィックと大量の接続が発生するだけでなく、ネットワークのすべての部分でエネルギー消費量が大幅に増加することになる。ビット/ジュールとして定義されるエネルギー効率は、長い間、5G における重要な設計目標の 1 つでしたが、Beyond 5G ネットワーク設計においてはさらに重要な要件となる。それは、あつた方が良い機能ではなく、Beyond 5G モバイルネットワークの成否を左右する要件となるでしょう。エネルギー効率に加えて、ネットワークのライフサイクルエネルギー消費の削減は、電気代を節約する有効な手段であると同時に、温室効果ガスの排出を削減する重要な社会的義務であると考えられるべきである。エネルギー効率の高いネットワーク設計が ICT 産業を持続可能な発展へと導く一方で、ICT 産業全体が、人類のよりクリーンで健康的な生活環境のために、世界の CO<sub>2</sub> 排出量を削減するという重要な役割を果たすことができる。2030 年までに ICT によって世界の CO<sub>2</sub> 排出量を 2015 年比で 20%削減できると期待されている。その一方で、Beyond 5G 通信システムは、新しいビジネスユースケースを見出して、適用シナリオを拡大し、その他の産業の役に立ち、全体として持続可能な社会の発展というより大きな目標に向けて取り組む必要がある。

### Beyond 5G のエネルギー効率の目標

このことから、環境に優しく持続可能な発展は、Beyond 5G におけるネットワークと端末の設計の中核要件であり、究極の目標でもある。Beyond 5G では、環境に優しい設計コンセプトとネイティブ AI 機能を導入することで、ネットワーク全体のエネルギー効率（ジュール当たりのビット数で定義）を 100 倍に向上させ、合計エネルギー消費量（ジュール単位）を 5G よりも低く抑えながらも、最適なサービスパフォーマンスと体験を実現することを目指している。デジタルエコノミーの中核となるインフラストラクチャーである Beyond 5G は、人類の持続可能な発展に独自の貢献をする必要があるだろう。

### 技術と研究の方向性に関する考察

#### 1. ネットワークのエネルギー効率を設計および評価するためのフレームワーク

エンドツーエンドの環境に優しい Beyond 5G ネットワーク設計の研究の方向性の観点から、エネルギー効率を実現するための潜在的な技術は、アーキテクチャ、材料、ハードウェアコンポーネント、アルゴリズム、ソフトウェア、プロトコルなど多岐にわたる。エコシステム全体のエネルギー効率を評価するための方法論について、業界のコンセンサスを得る必要がある。エネルギー効率の高い Beyond 5G 通信システムを実現するために、慎重に検討する必要がある要因として、ネットワーク展開の高密度化（伝搬距離の短縮）、RAN アーキテクチャの集中化（セルサイト数の削減とリソース効率の向上）、エネルギーを考慮したプロトコル設計、ユーザーと基地局の連携が挙げられる。環境に優しいネットワーク設計のためのフレームワークは、[1]で提案されており、その提案では、ネットワークの設計と評価に関する 4 つの基本的なトレードオフ（展開効率とエネルギー効率のトレードオフ、スペクトル効率とエネルギー効率のトレードオフ、帯域幅と電力のトレードオフ、遅延と電力のトレードオフ）が特徴付けられている。この 4 つのトレードオフによ



り、異なる伝送方式とネットワーク方式の下での主要なネットワークパフォーマンス/コスト指標が結び付けられる。

## 2. ハードウェア面（特に PA 効率）

一方、使用する周波数が増え高くなっていくので、より高いハードウェア効率を持つ革新的な方法を見出すことも、エネルギー効率の高いネットワーク設計のための重要な要因である。たとえば、電力増幅器（PA）の効率低下への対応が大きな課題となっている[2]。各 RF チェーンは PA を備えているため、無線周波数（RF）チェーンの数が増えると、無線ネットワークのエネルギー消費の課題はさらに対応が困難になる。より少ない RF チェーンを利用しながらも、フル RF チェーンに近いパフォーマンスを実現する新たなアンテナと RF アーキテクチャは、追求する価値のある方向性の 1 つである。

## 3. ネットワーク面（サービスの提供は時間と空間におけるトラフィックダイナミクスに従う）

ネットワーク面から、全体的なエネルギー効率を改善するには、サービスの提供が空間と時間におけるトラフィックダイナミクスに従うことが重要であり、トラフィックが必要ない領域と時間へのエネルギー放射の無駄を避けることができる[3]。もちろん、高速サービスアクセスとエネルギー消費削減の最大化との間にはバランスがある。上記の目標を達成するには、動的なスイッチオフをサポートする異種カバレッジの多層ネットワークアーキテクチャ設計が有効です。アーキテクチャに加え、人工知能（AI）技術を活用した相互カバレッジ識別とトラフィック予測のアルゴリズムが有望なソリューションである。無線ネットワークにおける AI 技術の幅広い応用は、複雑な非凸最適化問題を解く代わりに、深層強化学習などのツールを用いてネットワークリソース管理を最適化する新たな機会を提供するだろう。

## 4. 再生可能エネルギー、受動伝送など

さらに、再生可能エネルギーの利用と、あらゆる種類のエネルギーハーベスティング技術の応用も、環境に優しいネットワーク設計の潜在的な方向性として検討するべきである。太陽光発電は、マイクロ基地局だけでなく、マクロ基地局の運用でも広く利用されている一例である。一方、光ワイヤレス、受動メタサーフェス、または後方散乱通信による低電力伝送スキームは、それぞれ異なる適用シナリオにおける Beyond 5G 通信向けの新たな候補である。

## 5. 集中型の AI トレーニングと推論能力の問題を解決する分散型ネットワーク

もう 1 つの大きな課題は、AI の台頭に伴う演算能力の消費である。人間の脳は、平均して 20,000Tbps のデータレートを達成し、わずか 20W を消費するだけで 200TB の情報を保存できると推測できる。一方、AI の演算能力は、ムーアの法則をはるかに超えて、2 ~ 3 か月ごとに倍増しています。ニューラルセンターが人間の脳と同じ能力を発揮するには、ムーアの法則の終焉に近い時点で 1,000 倍の差が生じる。ニューラルセンターがデータセンターを取って代わり、AI の潜在能力を十分に活用するには、持続可能な AI ベースの Beyond 5G を促進する著しく高度な ML 技術の使用が不可欠である[4]。分散型コンピューティングアーキテクチャとソフトウェアオーケストレーションを実装するための標準化さ

れたアプローチによって、Beyond 5G ネットワークは多様なエコシステムのための効率的なプラットフォームになることができるだろう。

上記の 3.と 4.については、6.8.5 節で、Beyond 5G ネットワーク向けの類似の技術やアイデアについてもさらに詳しく説明している。

#### 参考文献

- [1] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu and G. Y. Li, "Fundamental trade-offs on green wireless networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 30-37, June 2011.
- [2] J. Joung, C. K. Ho, K. Adachi, and S. Sun, "A survey on power-amplifier-centric techniques for spectrum- and energy-efficient wireless communications." In IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 315-333, Firstquarter 2015.
- [3] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 11, pp. 74-79, November 2010, doi: 10.1109/MCOM.2010.5621970.
- [4] Neil C. Thompson, Kristjan Greenewald, Keeheon Lee, and Gabriel F. Manso, "The computational limits of deep learning." arXiv:2007.05558v1 [cs.LG] 10 Jul 2020.

## 6.7 非地上系ネットワーク（NTN）によるネットワークカバレッジ拡張

非地上系ネットワーク（NTN）は、将来の IMT のカバレッジを地上から上空、宇宙まで拡大させ、通信のユニバーサル化を実現するとともに、無人システム、モニタリング（映像・データ）、モバイル eMBB、IoT、物流システムとの接続、緊急時のバックホール、スマートフォン連携などの新しいユースケースが期待される。

2030 年頃やそれ以降に実現される将来の IMT の通信ネットワークは、宇宙から地上までを多層的に結ぶネットワークが前提となることが考えられる。このような通信ネットワークの実現に向けて、以下のような研究開発を行う必要がある。

### 1. 超高速・大容量化

NTN 通信の超高速・大容量化が必要となる。既に衛星では動的ビームフォーミング、柔軟なビームホッピング、オンボード処理、さらに周波数の再利用等の技術検討が進んでおり、今後数百 Gbps～最大 1Tbps までのスループットの提供を目指している。また、より周波数の高いミリ波、テラヘルツ波、光技術の採用により広帯域通信が可能となる。一方で高周波数帯を利用する上では雲や降雨による減衰の影響をうけやすいため、耐気象変動に有効な送受信機技術の開発が必要となる。また信号の大容量化のための高速（広帯域）信号処理技術、並列信号処理技術は高速化のための技術として必要となる。

### 2. 低遅延化

静止軌道衛星とのネットワーク接続には物理的に片道 120 ミリ秒程度の遅延が発生する。遅延の許容されないシステムとの接続においては低軌道衛星（軌道高度 100km～1,000km 程度）、あるいは HAPS（高度 20km 程度）等を活用することにより数ミリ秒程度の遅延に抑える等が可能となり、特に、HAPS から地上への通信の遅延は、地上の IMT と同等と見なすことができる。今後、ユースケース・アプリケーションの要求品質に応じた最適なネットワークを構築することが必要となる。また MEC の活用によりエッジでデータを処理することにより、データ処理の低遅延化も可能となる。

### 3. IoT 向けの多数接続

Beyond 5G では、より多くの人、モノとの接続が要求され、宇宙からの運用を想定した場合、一つのアンテナカバレッジで同時に多数のユーザーとの通信、あるいは多数のセンサーからのデータを受信できることが大きなメリットとなる。また、多数接続時の分散処理、あるいはマルチホップ通信を用いた分散ネットワークの技術もリソースに制限のある衛星側の実現性という観点で有効となる。広域カバレッジが可能な静止衛星と伝搬遅延の少ない低軌道衛星など、異なる種類の NTN を組み合わせることで、より効率的なネットワークの構築が可能となる。

### 4. 光通信技術

宇宙・上空の空間における光通信技術の確立も必要となる。レーザー通信ターミナル（LCT）：

Laser Communication Terminal) を用いた自由空間光通信技術が必要となる。NTN プラットフォーム間の通信 (衛星間, 衛星-HAPS 間, HAPS-HAPS 間など) にこの技術を適用することで大容量・高速通信が可能と期待される。

#### 5. 最適経路接続技術、及びマルチコネクティビティ技術

地上と NTN の一つである通信衛星との最適経路接続技術、及びマルチコネクティビティ技術も必要となる。これにより通信需要のあるエリアに対して、複数経路・同時接続のデータ通信が可能となり通信エリア拡張のほか信頼性向上が期待される。アプリケーションやユースケース毎の遅延・要求品質に応じた最適な経路・接続形態の実現が可能となる。

#### 6. 量子暗号化通信

Beyond 5G においては、宇宙から見た上空データ、気象データ、人やモノの位置・動き等、宇宙で観測し生成されたデータ (以下、宇宙生成データ) の活用は重要となり、宇宙生成データ活用基盤としての超安全・信頼性、拡張性が求められる。そこで大陸間通信や移動体通信のセキュリティ向上に、将来、量子暗号鍵の衛星間光通信による配信が期待されている。また、量子暗号技術による衛星間ネットワークのセキュリティ向上も期待できる。

#### 7. 自律的な運用

多数の低軌道衛星コンステレーション等、多くの NTN プラットフォームが上空に配備されると、今後の運用の複雑化が予想され、地上のオペレータが判断して運用することが不可能となる。最適な運用タイミングやユーザーへのサービス提供は AI 等の活用により自律的に行う必要がある。また各 NTN コンポーネントが回線の状態を衛星自ら把握し最適な通信パラメータを自律的に設定するような運用が考えられる。

#### 8. エッジコンピューティング技術

NTN インフラが整備されると、ドローンや CubeSat など宇宙空間に存在する IoT からの大量のデータ収集や処理結果に基づく自動運行指示などの遅延にセンシティブなアプリケーションへの対応が予想される。遅延を短縮するためには、LEO や HAPS のような NTN コンポーネントそのものだけでなく、NTN コンポーネントに搭載されるエッジコンピューティング技術も重要な選択肢になる。

### 6.7.1 成層圏通信プラットフォーム (HAPS)

HAPS (High Altitude Platform Station) は、高度 20km 程度の成層圏を飛行・滞空するプラットフォームに設置された無線局を指す。成層圏は雲の遥か上に位置する大気層であるため、降雨や降雪の影響を受けず、更には気流の影響も非常に穏やかである特徴を有する。そのため、他の大気層に比べてより安定的に飛行・滞空することが可能である。

また、衛星よりもはるかに地上に近い高度で運用される HAPS は、地上通信網と同等の遅延でサービ

スを提供できる点も大きな特徴である。よって、HAPS を携帯電話の基地局として利用した場合、以下のような利点を有する。

- HAPS1 基で半径 100km 程度までカバー可能なため、地上基地局と比較し効率的な広域カバーが可能
- 専用端末が必要な移動衛星通信と異なり、既存の携帯電話端末（スマートフォン等）をそのまま利用可能
- 自然災害（地震や津波など）による停電・倒壊等の被害を受けにくいネットワークの構築が可能
- 地上基地局ではカバーがしづらい上空（空飛ぶ車・ドローンなど）や海上（船舶など）にも携帯電話通信を提供可能

HAPS には航空機型、飛行船型（気球型を含む）が存在し、それぞれのタイプには一長一短がある。

航空機型は飛行・滞空の操作性の高さが強みであり、特に小型・中型タイプは運航の容易さから開発を進める企業が数多く存在する。一方、大型タイプは高い安全性が求められ、開発の難易度が高まるものの、小型・中型タイプに比べて翼に貼り付けられたソーラーパネルの面積が相対的に大きく発電量が多いため、目的地への迅速な飛行や機体に搭載する通信機器やセンサーへの潤沢な電力提供が可能となる。

飛行船型は潤沢な浮力と余りある球皮上の集光面積から大量のエネルギーを発電することが可能となる。しかし、定点滞空性能では大きな形状抵抗を有するため航空機型には劣り、補助動力などの対策が必要になる。

HAPS の発展は電池とソーラーパネルの性能向上に支えられていると言っても過言ではない。近年の電池容量と太陽光パネルの発電効率の大幅な上昇が、成層圏での長期間飛行を可能にした。電池と太陽光パネルの性能は今後も向上していく見込みであり、そのため HAPS もますます発展していき、人類にとって必要不可欠なインフラになることが保証されていると言える。

## 6.7.2 衛星通信

通信衛星は宇宙から地上までが多層的に接続される非地上系ネットワークを実現するために必要な NTN プラットフォームの一つです。通信衛星は地上のカバレッジの補強、または上空・海上・宇宙など地上ではカバーできないエリアをカバーするプラットフォームとして重要な役割を持つ。

通信衛星には静止衛星（GSO）と非静止衛星（NGSO）があり、それぞれに長所と短所がある。

静止衛星は、地球に対して固定点から広範囲なエリアをカバーすることが可能である。一方で地表から約 36,000 km の静止位置では、約 250 ミリ秒（ラウンドトリップ遅延の場合は 500 ミリ秒）の伝搬遅延が発生する。

また GEO は広範囲でカバーし、かつ常時通信が可能であるため、カバーエリア配下に存在する多数の NTN コンポーネント（LEO/HAPS）と連携することが可能となる。また LEO/HAPS カバレッジ外では



GEO にて補完もすることも可能となる。

非静止衛星システムは、一般に静止衛星よりも低い軌道で展開し、遅延に敏感な一部のアプリケーションに対して有用である。一方で非静止衛星は地球の周りを周回しているので、シームレスなカバレッジには衛星コンステレーションの展開が必要である。

従って NGSO コンステレーションで一定のスループットを提供するためには、コンステレーションプレーンあたりの衛星機数を増やして対応する必要がある。

またユーザーターミナルは刻々と周回する衛星を追尾しつつ、目視外となる前に次の目視内の衛星に切り替える（衛星ハンドオーバー）必要がある。

現在、通信衛星は緊急時のバックホール利用、携帯端末との直接通信、海上及び上空の移動体との通信、衛星 IoT 等で活用されている。

今後の NTN において、衛星は IMT 接続を多層的にあらゆる場所で提供するためには必要不可欠なプラットフォームとなる。

### 6.7.3 UAV による無線通信

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は一般にドローンと呼ばれる無人航空機的一种であり、コントローラーを介しオペレータが遠隔操作することができる。一定の範囲で自律飛行が可能であり、将来的には完全な自律飛行が可能になる。UAV はサイズや重量は幅広く存在し、将来のスマートシティや生活において様々なビジネス分野で活用される可能性がある。例えば、空撮、物流、建築物の空撮検査、環境モニタリング、精密農業などに広く利用されている。Keystone 社の予測によると、今後数年間の UAV 市場は、全世界で 410~1140 億ドルに達するとされている[1]。そうなれば、ネットワーク上において UAV は特殊なモバイル端末として機能することになる。

しかし、UAV の基本的な特徴である空中での機動性、一定の貨物を運ぶためのプラットフォームであることを生かし、将来的には基地局や中継機として利用し、一時的にネットワークを形成して移動通信を拡張することも可能である。このような UAV による無線通信の利点は、短時間でオンデマンドのネットワーク展開ができる柔軟性と俊敏性であり、自然災害や混雑したスタジアムでのコンサートなどの短期イベントにおいて、固定インフラを補完する非常に重要なものとなる。

一方、UAV により基地局とユーザーとの距離が縮まり、LOS (Light-of-Sight) 通信が可能になることも考えられる。これにより、サービス品質向上や消費電力削減に貢献できる可能性がある。例えば、農場や森林など、あまりカバーされていないエリアから IoT データを収集し、基地局と IoT デバイスの双方の電力削減が可能となる。さらに、UAV の基地局は Beyond 5G のセンシング能力を強化する拡張モバイルセンサーとしても機能し、通信に必要な環境情報の取得や、自律走行に必要な 4D シティマッピングの作成も可能になる。

上記のような機能を実現するためには、多くの技術的な課題が存在する。HAPS と同様に、UAV の電力供給（搭載バッテリーの制限）とエネルギー効率は大きな課題の一つであり、その適用範囲やシナリオは制限される。また、柔軟な無線ネットワークアーキテクチャ、UAV の基地局と地上ユーザー端末間のチャンネルモデリング、高度なアンテナ技術と信号処理アルゴリズムによる干渉制御と除去、効率的でユビキ



タスな無線バックホール、オンボードセンシングとコミュニケーションの協調設計などの技術は、さらなる研究が必要となる。

#### **参考文献**

- [1] HUAWEI Technologies (UK) CO., "White paper: Connected drones a new perspective on the digital economy," 2017.

## 6.8 無線通信技術と光通信技術

### 6.8.1 新しい無線ネットワークポロジ

#### (1) 特長と強み

本技術の特徴は、従来のセルベースの無線ネットワークポロジと異なり、従来の基地局や移動端末に加えて、分散アンテナ、リピータ/リレー、反射板、仮想移動端末を利用した新しい無線ネットワークポロジを生成し、制御することである。これにより、大容量化、カバレッジの拡大、通信の安定性の向上、低消費電力化を実現している。

#### (2) 提供される価値

本技術は、エンドユーザーにとっては、ユーザーの場所に関係なく、安定性の高いサービスやアプリケーションを提供する。環境問題に対しては、移動端末や無線ネットワークの低消費電力化に貢献する。サービスプロバイダにとっては、無線ネットワークシステムの設計と運用の高い柔軟性に寄与する。

#### (3) 果たすべき役割

これにより、Beyond 5G 時代のサービスやアプリケーションに求められる 5G の 100 倍の大容量通信を、ユーザーの場所を問わず提供することができる。

#### (4) 技術概要

新たな無線ネットワークポロジでは、基地局と移動端末との間に設置される空間的に分散した多数のアンテナ、リピータ/リレー、RIS (Reconfigurable Intelligent Surface)などの反射板を利用し、端末間連携により端末アンテナ数を仮想的に増加させることで、ユーザーの位置によらず安定した大容量通信とカバレッジ拡大を実現している。

##### (a) RIS 技術

RIS 技術は、波長より細かな構造体を利用したプログラム可能な 2 次元メタマテリアルを使用して、デジタルコーディングによって電磁波を積極的かつインテリジェントに調整し、振幅、位相、偏波、および周波数を制御可能な電磁界を形成する。RIS は、物理的な電磁界と情報科学のデジタル界の間のインターフェースを提供する。RIS は、従来の無線通信では制御不可能であった無線伝搬環境のアクティブ制御を実現し、三次元空間における信号伝搬方向の調整、干渉の抑制、信号の強化を実現し、Beyond 5G の新しいパラダイムとなるインテリジェントでプログラマブルな無線環境を構築できる。例えば、基地局とユーザーとの間にある障害物によって遮蔽される場合に、RISによるインテリジェントな反射制御によって、障害物をバイパスし、基地局とユーザーとの接続を確保できる。この仮想的なリンクは、遮蔽の影響を受けやすいミリ波の利用を拡大するために有効である。

RIS は、通信品質を向上させ、高周波帯のカバレッジを向上させ、エッジユーザーのパフォーマンスを向上させるなど、従来のトランシーバに代わる新しいトランシーバとなる。さらに、RIS は、高精度ポジショニング、無線電力伝送、センシングと通信の統合などの新しい分野の性能も改善できる。RIS 技術

は、Beyond 5G の少なくとも 2 つの要件を満たしている。

- RIS は、伝送性能を大幅に改善し、通信システムのカバレッジを向上させることで、Beyond 5G の伝送速度、カバレッジ、およびエネルギー効率を改善することができる。
- RIS は、Beyond 5G ネットワークでのセキュリティの確保、電磁汚染の低減、位置認識の補助などの必要な無線機能に従って、無線通信環境を積極的にカスタマイズし、無線信号を柔軟に制御することができる。

Beyond 5G ネットワークの開発に向けて、RIS 技術が解決すべき課題には、チャネル状態情報の取得、チャネルモデリング、ビームフォーミング設計、パッシブな情報伝送、AI に基づき設計、プロトタイプシステム検証、ネットワーク展開、およびネットワーク設計がある。

RIS は、低コスト、低消費電力及び容易な展開という特徴を持つ。グリーンな通信をサポートし、インテリジェントなワイヤレス環境を実現し、より多くの新機能を実現する。RIS は、新しいネットワークパラダイムをもたらし、将来的には新しい Beyond 5G の時代を開くだろう。

## (b) 広域分散 MIMO

無線通信業界における最も重要な特徴の一つは、カバレッジと高スループットを提供するために使用されるマルチアンテナシステムである。まず、MIMO システムはマルチユーザー伝送の強化に重点を置いていたが、その後の大規模 MIMO(Massive MIMO)システムが 5G の重要なコンポーネントとなった。マルチアンテナシステムにおける次の進化を検討するためには、接続性、信頼性、適応性、持続可能性およびセキュリティの側面を考慮した将来のユースケースの動的要件を満たすために、Beyond 5G ネットワークが提供すべきニーズを定義すべきである。Beyond 5G は、均一で信頼性の高いサービス品質と耐障害性に優れた伝送方式により高いデータレートを提供することが期待されている。広域分散 MIMO (D-MIMO) は、セルフフリー大規模 MIMO として知られ、重要なコンポーネントである D-MIMO は、超高密度ネットワーク、大規模 MIMO、および協調マルチポイント伝送の組み合わせとして見ることができる。この協調マルチポイント伝送では、デバイスが多数の緊密に協調したネットワーク伝送ポイントに対して同時に物理リンクを持っている。これは、非干渉型の柔軟で堅牢なネットワークを構築するのに役立つ [1]。高密度化により干渉が問題となり始めると、D-MIMO は、分散アクセスポイント(AP)を大容量フロントホールリンク(光ファイバーケーブルなど)を介して中央処理装置(CPU)と協調させることにより、著しい性能向上を提供する [2]。

ネットワーク高密度化、ビームフォーミングを伴う高周波における広帯域伝送、様々な展開オプションを考慮した集中型アクセスバックホール-フロントホール、およびハードウェア性能が、均一で非常に高い性能を提供するための鍵となる。一方、高周波帯域では伝搬環境がより困難となるが、モビリティを提供する堅牢なアクセスリンクを実現する必要性が依然とある。空間ダイバーシティには、特に見通し外において、高い信頼性と耐障害性を達成する利点があり、さらに D-MIMO ネットワークでは、遮蔽を克服するために、より高次のマクロダイバーシティから利得を得ることができる。

それにもかかわらず、より高い周波数帯域での実際的なビーム管理および伝送アプローチに対処する様々な機能分割オプションを考慮して、どの程度の広いエリアで協調するかを理解する必要がある。位相コヒーレント伝送による集中処理では最高の性能が得られるが、AP間の協調は伝送ネットワークへの要求条件は厳しくなる。ただし、多数の冗長 AP リンクを使用した協調非コヒーレント伝送では、リソースの使用効率は十分ではない。Beyond 5G MIMO は、スケーラビリティ、堅牢性、および高パフォーマンスを実現する必要があるが、アーキテクチャとハードウェアの面でエネルギー効率が最適化されるべきである。帯域幅が広い場合、AP でのデジタル処理は電力を消費し、サイズが大きくなるため、デジタル処理をネットワークの中央に移動する必要がある。つまり、AP と CPU 間のフロントホール(FH)インターフェースはアナログになる。Beyond 5G の伝送では、分散したアンテナと処理装置をバックホールネットワーク経由で複数のサイトに接続する必要があり、この場合 Beyond 5G Lower Layer Split (LLS)を既存 5G ソリューションに一定の変更と拡張を行って構築するかもしれない。集中型の大規模 MIMO と比較して、D-MIMO は AP 用に多くのサイトを必要とする。したがって、LLS は展開の点で D-MIMO は有用である。

### (c) ユーザーセントリックの RAN アーキテクチャ

通信環境や個々の通信要求に応じてユーザーごとに通信エリアを形成するユーザーセントリックなネットワークの実現が重要となる。

ユーザーセントリック RAN アーキテクチャ[3]では、特定のエリアのユーザーにサービスを提供する特定の基地局の代わりに、複数の基地局が連携して各ユーザーにサービスを提供する。そのために必要な技術は次の通りである。

- セルフリー大規模 MIMO (Cell-free massive MIMO)技術を実現すること：セル境界における無線品質の劣化を低減するための、分散 MIMO 技術と大規模 MIMO 技術(6.8.3 節参照)を組み合わせた技術。多数の基地局アンテナを高密度に配置し、各基地局アンテナが互いに連携して個々のユーザーにサービスを提供する。集約局に大規模 MIMO 技術を適用することで、従来のセルラアーキテクチャで問題となっていたユーザー間干渉を抑制し、セル境界における無線品質劣化を低減することが可能となる。詳細については、前項(b)を参照されたい。
- 仮想化対象の拡大： 移動通信網のバックホールや基地局と端末との間の無線回線を含めた仮想化対象の拡大により、各ユーザーの論理的なネットワークを提供する [4]。具体的には、仮想化手法を用いてユーザー毎に無線処理部と無線部(アクセスポイント、AP)を配置し、AP間で無線信号の分散処理を行う。これらは、ユーザーごとに異なる無線環境や通信サービスに適応するための基地局機能を配置・制御できるため、進化した RAN アーキテクチャによりユーザーごとに移動通信網を提供する。
- “Radio on THz”技術 (仮想化端末技術) の実現 [5]： UE と周辺装置がテラヘルツ波を用いた広帯域無線で接続し、周辺装置がテラヘルツ波を基地局と接続するための異なる(低い)周波数(例えば、ミリ波帯およびサブ 6 ギガヘルツ帯)に変換して AP に接続する技術である。具体的には、この接続により、単一のユーザー装置に起因する電力伝送や集積アンテナ

数などの制約から生じる問題を解決することが可能となる。

## 6.8.2 広帯域化・周波数利用高度化技術

### (1) 特長と強み

ミリ波からテラヘルツ波までの高周波スペクトルでは、5G に比べて大幅に広い帯域幅を利用することができる。このため、極めて高いデータレートである 100 Gbps を超える超高速・大容量通信を実現できる。さらに、THz スペクトルの極端に短い波長のため、アンテナ素子はミリ波で設計されたものよりはるかに小さくなる。その結果、超大規模 MIMO システムは、ペンシルビーム成形によるカバレッジ拡張だけでなく、より高い空間分解能と周波数再利用を利用することによりスペクトル効率の改善も提供する。

### (2) 提供される価値

既存の周波数帯にミリ波やテラヘルツ波などの新しい周波数帯を加えると、従来よりもはるかに広い周波数帯が利用できるようになる。このため、アプリケーションに応じて複数の帯域の利用を最適化することが可能となり、既存の周波数帯域の周波数利用効率の向上、新たなユースケースへの適用範囲の拡大、あらゆる場所でのユーザーエクスペリエンスの向上が期待できる。

### (3) 果たすべき役割

2030 年に向けて、物理空間とサイバー空間との間のデータのやり取りが今後飛躍的に増加することが予想される。既存の周波数帯に加え、ミリ波やテラヘルツ波などの広い周波数帯を利用することで、100 Gbps を超えるピークデータレートを実現し、場所を問わず膨大なデータを瞬時かつ正確に処理することが可能になる。

### (4) 技術概要

ミリ波からテラヘルツ波までの高周波スペクトルでは、大幅に広い帯域幅を使用することが可能である。しかし、テラヘルツ波はミリ波に比べて直進性が高く、長い距離を進むことができない。この問題に対処するためには、テラヘルツ波の電波伝搬特性の解明、伝搬モデルや高精度な伝搬シミュレーション技術の確立、デバイス技術の進展などの技術的検討が必要である。また、周波数共用や低周波帯における周波数利用方法の見直しなど、幅広い周波数利用技術が重要となる。

広帯域化、高利得アンテナ性能、周波数選択性などの特徴を持つテラヘルツ通信では、超高速データ転送に加え、高解像度のセンシングやイメージング、高精度測位などのアプリケーションが実装できる。高利得アンテナは、ビームが非常に細く、形成されるエリアが狭いため、隣接するテラヘルツ通信エリアと空間的に分割され、干渉が低減されやすい傾向がある。

テラヘルツ帯は波長が非常に短いため、ミリ波帯で設計されたアンテナ素子よりもはるかに小さくなり、同じアンテナ面積の中に、より多くのアンテナ素子を組み込むことが可能である。この Ultra-Massive MIMO システムは、ペンシルビーム形成によるカバレッジの拡大だけでなく、より高い空間分解能と周波数再利用によるスペクトル効率の向上が可能である。Ultra-Massive MIMO やテラヘルツ帯の Massive

MIMO システムは、将来の IMT システムの性能を向上させるために活用されることが考えられる。

さらに、ミリ波 RIS 技術のように部屋や建物の壁面に RIS 反射板を取り付けることで、電波の届かないエリアへのカバレッジの拡張が可能である。

### 6.8.3 さらに RAT/エアインターフェースの高度化

#### (1) 特長と強み

新しい波形、変調、コーディング、マルチアクセス、全二重方式、高度な MIMO /大規模 MIMO などの Beyond 5G に特化した無線アクセス技術 (RAT) とエアインターフェースにより、Beyond 5G の非常に高い能力と性能、例えば、100 Gbps を超えるピークデータレートや 5G の 100 倍のシステム容量を実現できる。また、Beyond 5G に新たに提供され、5G から拡張されたユースケースもサポートできる。

#### (2) 提供される価値

信号伝搬、システムとハードウェアの複雑さ、消費電力、およびコストの課題に対処しながら、広域およびローカルエリア通信の超大容量およびデータレートが提供される。センシングにネットワークを活用することで、新しいユースケースがサポートされる。

#### (3) 果たすべき役割

デジタルデバイドの橋渡し - 誰でも、どこでもアクセスできる。物理的なリソース計画とリソース管理を改善するためのセンシングによる環境認識の向上。より持続可能な社会につながるロジスティクスと輸送の無駄を減らす。高品質の医療と教育への公平性でユビキタスなアクセス。その他の潜在的な使用例には、たとえばディスプレイおよびコンピューティングデバイス間での短距離通信やラック間通信が含まれる。

#### (4) 技術概要

無線伝搬の問題、ニューモロジー、および高帯域での広いキャリア帯域幅とサブキャリア間隔のフレーム構造に対処するための波形、変調、およびコーディング技術の調査と分析が重要である。高度な MIMO およびアンテナ方式は、超高密度化と高データレートをサポートするためのエネルギー効率の確保にとって重要である。

##### (a) 新しい波形、変調、コーディング、多元接続、全二重

Beyond 5G の究極のデータレートは、サブ THz 帯域で利用可能な広いキャリア帯域幅を活用することによって実現される。これらの帯域での Beyond 5G の運用は、屋内ホットスポットの大容量の需要を満たし、統合されたアクセスおよびバックホールアーキテクチャを使用して都市のカバレッジを拡大し、高精度センシングに基づく新しいユースケースを可能にする。

高周波で効果的に動作するための波形の設計では、高周波での高減衰による短距離での信号伝搬特性を考慮する必要がある。これは、短波長で簡単にブロックされる可能性がある。

波形設計では、スペクトルを最も効率的に使用するために信号伝搬特性を考慮するだけでなく、パ



ワンプの非線形性、低い量子化分解能、非常に短いチャネルコヒーレンスなど、ハードウェアとチャネルによってもたらされる実際的な制限も考慮する必要がある。時間と帯域幅、位相とインパルス性ノイズ。与えられたスペクトルから最高の容量を抽出するには、新しい変調方式、パイロットシーケンス、およびコードを開発する必要がある。

プリアンプ、パイロット、コード化ビット、およびサイクリック冗長性の従来のフレーム構造は、ショートメッセージの送信には最適ではない場合がある。通信とセンシングを同時に行うことで、新しい波形設計も推進される。大容量のカバレッジエリアを最大化しながら、実装の複雑さと消費電力を最小化するには、スペクトルシェーピングを備えた拡張シングルキャリア波形を分析する必要がある。

コーディング技術とともに低 PAPR 変調方式を調査する研究の動機となる高位相ノイズの問題に対処するためのソリューションを調査する必要がある。高位相ノイズ設定での高データレートの場合、サイクリックプレフィックス長を短縮しながら、サブキャリア間隔を大きくすると堅牢な動作に役立つ。ニューメロジには注意深い分析が必要になる。フレーム構造の設計の一環として、制御および基準信号の設計、初期アクセス、およびビーム管理も検討する必要がある。

通信用 AI の分野の進歩に伴い、波形、変調、およびコーディング技術を AI によって動的に適応および最適に設計して、ビットを確実に送信するだけでなく、さまざまな無線環境、ハードウェア、およびデータトラフィックの需要にも適応する実用的なシステムを構築できる。

## (b) 高度な MIMO/大規模 MIMO

高度な MIMO 技術は、低帯域 (< 6 GHz)、中帯域 (2.5–4.9 GHz)、およびミリ波 (24–71 GHz) 帯域で利用可能なスペクトルから最高のパフォーマンスを引き出すために重要である。大規模 MIMO は、サブ THz 帯域でのカバレッジを最大化しようとしている間、送信ビットあたりの消費電力を確実に制御するために重要である。ビーム管理と予測、CSI 圧縮、予測とフィードバック、および参照信号のオーバーヘッドの削減のための AI/ML 技術を調査して、パフォーマンスを向上させ、システム設計を簡素化する必要がある。

ミリ波およびサブ THz 周波数での超高密度展開には、分散 MIMO 技術によって提供されるスケラブルで分散信号処理機能が必要になる。CSI 取得を改善するための CSI および SRS フレームワークの拡張により、分散信号処理の高度なアルゴリズムが補完される。

より大きなアレイサイズをサポートを含むカバレッジと容量の拡張のための MIMO の使用は、5G FR1/FR2 帯域の場合ですでに調査されている。これらの手法によるメリットを分析する必要がある。この分野でのさらなる強化、およびインテリジェントな反射面の役割は、将来の研究にとって興味深いトピックである。UE 側では、複数のサブパネルの手法とその管理を、新しい帯域での運用のために研究する必要がある。

### 6.8.4 超高信頼性と低レイテンシの通信をサポートする技術

#### (1) 特長と強み

各ノードが必要な時刻同期精度に応じた、複数の同期手法を実現（キャリア周波数での位相同期、

もしくは仮想共通クロックへの自律同期)する。さらに時空間同期技術ではさらにユーザー端末を含めて各ノードに原子時計を配置した、自律分散的なクロックスキームを実現する。上記の時空間同期技術を活用することにより、超低遅延通信はエンドツーエンドで 1 ミリ秒以下の超低遅延を実現できる。また、Beyond 5G における超高信頼・低遅延通信(URLLC)は、5G URLLC よりも高い信頼性を実現することが期待され、Beyond 5G では 5G と比較して 1 桁の向上(信頼性  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$ )を目標値としている。

## (2) 提供される価値

現状の様々な技術のほか、さらに時空間同期技術は、2 つの近距離ノード間でピコ秒レベルで同期したクロックを提供し、ローカルな地上系ネットワークではナノ秒レベルで共有出来るクロックが提供される。超低遅延通信は、サイバースペースからの低遅延フィードバックによる「違和感」なしに、より高度なリアルタイム対話型 AI サービスを提供できる。極めて信頼性の高い通信により、ミッションクリティカルな業界をサポートできる。今後、ロボットやドローンの広範な普及、空・海・宇宙への電波の到達範囲の拡大に伴い、より広い地域での信頼性の高い通信の実現が求められている。

## (3) 果たすべき役割

ユーザーの手元の端末や、車等の移動体とエッジサーバの間で低遅延かつ大容量な通信のための正確かつ安定なクロックインフラを実現し、5G を超える低遅延を実現する。このことにより、複数の基地局やユーザー端末の同期協調動作による通信・電力伝送や、通信するノード間での同期の確立や維持に必要なパケット量を低減すること等を通じ、電力や周波数資源の低減・効率化に貢献できる。

産業用のユースケースは、業界やアプリケーションによって異なる広範な要件によって特徴付けられる。低レイテンシは必ずしも必要ではない。ただし、非常に要求の厳しい条件を必要とするユースケースを想定する必要がある、平均的な低待機時間では単純に満たされないが、変動しない安定した低待機時間を要求する。工場における自動化システムは、その自動化オペレーションをより効果的にするために異なるアプリケーションを使用することが期待されている。Beyond 5G は、異なる通信要件を持つ異なるシステムが共存する「混合トラフィック」をサポートする必要がある。極めて高い信頼性と低レイテンシを維持しながら、極めて大容量の通信を実現するなど、幅広い要求に対応できる Beyond 5G システムの実現が必要である。

## (4) 技術概要

各ノードに要求される時間同期精度(キャリア周波数での位相同期または仮想共通クロックへの自律同期)に応じて、複数の同期技術を実現する。サイバーフィジカル融合における高レベルのリアルタイムおよびインタラクティブサービスを実現するためには、常に安定したエンドツーエンド低遅延を持つことが重要である。Beyond 5G 向けの拡張 URLLC 技術では、高精度な時空間同期などを用いて、エンドツーエンドベースで 1 ミリ秒以下という極めて低いレイテンシを実現し、5G URLLC よりも高い信頼性( $10^{-6}$  -  $10^{-7}$ )を実現する。時空間同期技術では、ユーザー端末を含む各ノードに原子時計を配置し、自律分散クロック方式を行う。

## 6.8.5 エネルギー効率改善と低消費電力化技術

### (1) 特長と強み

カーボンニュートラルの実現は情報通信分野に限らず普遍的に重要な課題となっている。Beyond 5G システムにおいても、高速大容量通信サービスを提供する際に消費電力を犠牲にすることは許容されない。

移動通信業界では、これまで機器や設備の周波数利用効率や消費電力を改善してきた長い歴史があり、より長時間のバッテリー動作が可能な低消費電力のユーザー端末などを提供してきた。Beyond 5G 時代に向けては、カーボンニュートラル達成のためにレガシー技術をさらに改良・発展させ、あわせて新しいブレークスルー技術も開発・併用されていくことになる。

### (2) 提供される価値

通信システムのエネルギー効率を 5G に対して 10 倍に向上させ、持続可能・カーボンニュートラルな通信、および、情報処理サービスを提供する。

### (3) 果たすべき役割

5G のシステム自体が過剰な二酸化炭素を発生させずに ICT サービスを提供することは勿論、5G の通信技術を適用することであらゆる社会活動や経済活動における不要なエネルギー消費を排除することを通して、カーボンニュートラルに貢献していく。

### (4) 技術概要

光、熱、振動、電磁波などのエネルギーを電力に変換するエネルギーハーベスティング技術、電池を使わずに既存の信号を送受信するアンビエントバックスキヤット通信技術、高密度に展開された基地局からの無線給電技術などの活用により、5G に比べてさらに高い電力効率と低消費電力の実現が期待される [6][7]。

通信システムの基盤となるハードウェア装置の低消費電力化については、電気信号を用いるよりも、設置されているサイト内の装置間、あるいは装置内の素子間の情報伝達に光データ伝送を適用することで、一層の低消費電力化を実現できる可能性がある。経験的に、金属導体を用いた電気信号による伝送と光ファイバーを用いた信号の伝送の使い分けは「1 Gbps・km」が境界線と言われてきた [8] が、今後は、光信号伝送技術を近距離の情報伝送にも適用することで更なる消費電力の低減が期待されている [9]。

通信インフラ全体の効率化については、例えば、通信トラフィック量に応じてシステム内の適切かつ高度なリソース管理を適用することにより実現することが考えられる。

加えて、Beyond 5G システムのエッジデータ処理機能を用いたエッジノードにおける情報の「地産地消」は、不必要なデータ転送を減らし、冗長なデータ処理を排除することで、カーボンニュートラルの実現に資することが期待される。

## 6.8.6 統合されたセンシングと通信および高正確度なローカリゼーション

### 統合されたセンシングと通信 (ISAC)

#### (1) 特長と強み

Beyond 5G には、単純な測位の範疇を超え、ネットワーク化されたセンシング機能が備わる [10]。通信システムは、周波数帯、帯域幅、アンテナの継続的な増加により、無線センシング機能を統合し、電波伝送、エコー、反射、散乱を通じて物理的世界を探索する。この統合された設計により、センシング情報が利用可能になったときに、より効率的なビームフォーミングと干渉抑制技術を使用して、ミディアムアウェアな通信に関する通信パフォーマンスの改善が可能となる。一方、ISAC ネットワークでは、位置特定、イメージング、マッピング、アクティビティ検知など、効率的なオンデマンドセンシングサービスを可能にする新たな利用シナリオも生み出されている。このような状況に基づき、センシング能力について、センシング精度、センシング解像度、検出/誤報確率など、複数の新しい主要パフォーマンス評価指標 (KPI) が導入されている。

#### (2) 提供される価値

高解像度かつ高精度のセンシング、ローカリゼーション<sup>20</sup> (測位を含む)、イメージング、および環境再構築の機能により、通信パフォーマンスが向上し、より広範なネットワークサービスシナリオがサポートされ、インテリジェントなデジタルワールドを構築するためのデータ基盤が構築される。将来の ISAC システムによってサポートされる可能性のある新しいサービスは、以下の 4 つのカテゴリに分類できる [11]。高正確度なローカリゼーションと追跡、同時に実行されるイメージング、マッピング、およびローカリゼーション、人間の感覚の拡張、ならびに身振り・しぐさおよび動作の認識である。ISAC システムによって、Beyond 5G 向けに、デバイスベースの測位サービスとデバイス不要のローカリゼーションサービスの両方が提供され、ドローンの自動ドッキングや複雑な作業のためのロボット同士の連携など、高正確度のローカリゼーションを必要とするユースケースのサポートへとつながる。さらに、イメージング、マッピング、ローカリゼーションが同時に実行される Beyond 5G ベースのセンシング機能のそれぞれのパフォーマンスが相互的に向上し、3D 屋内外見通し外のイメージングおよびマッピングの可能性も広がる。より高い周波数帯を使用することで、ISAC システムをポータブルデバイスに実装して、人間の感覚を拡張し、人間の目の限界を超えて「見る」ことも可能になる。たとえば、将来のスマート病院で、血管/臓器の状態やその他のバイタルサインに関する情報を得ることも可能になる。センシングと機械学習を連携した機能に基づくデバイス不要の身振り・しぐさおよび動作の認識により、非接触型ユーザーインターフェースおよびカメラ不要の患者や高齢者の見守りが促進され、緊急事態のタイムリーな特定を可能にすることも、ISAC の用途として期待できる点の 1 つである。

---

<sup>20</sup> この節において、測位によってデバイスの座標が定義され、ローカリゼーションによってデバイス、物体、環境に関する情報が提供される。

### (3) 果たすべき役割

ISAC システムでは、センシング機能と通信機能が同一システム内で相互に恩恵を与え合う。一方では、通信ネットワーク全体がセンサーの役割を果たす。他方では、センシングから得られる高正確度なローカリゼーション、イメージング、および環境再構築の機能が、より正確なビームフォーミング、より迅速なビーム障害からの回復、チャンネル状態情報（CSI）を追跡する際のオーバーヘッドの軽減など、通信のパフォーマンスを支援し、向上していく。さらに、センシングは、物理的および生物学的な世界を観測し、サンプリングし、サイバーの世界と結びつける「新しいチャンネル」と捉えることができる。このように、物理的な世界を真の意味でリアルタイムに再現するデジタルツインという概念を実装して将来的に実現するには、高度な AI 技術とリアルタイムセンシングの併用が不可欠である。

### (4) 技術概要

センシング機能と通信機能の統合は、疎結合から完全統合、周波数やハードウェアの共有から信号処理とプロトコルスタックの共有、さらにはモジュール間やレイヤー間での情報共有に至るまで、さまざまなレベルで実現でき、相互に恩恵を与え合う。Beyond 5G ネットワークにおける ISAC により、基地局とユーザーデバイス間の大規模な連携、通信とセンシングで共同設計した波形、高度な信号処理技術を活用した技術革新がもたらされる。統合された ISAC システムの設計によって、センシングと通信間での効率的なリソース共有が可能になる。このように、統合された設計の主な利点は、時間的、周波数的、および空間的なリソースが共有される際に、2 つのシステム間の干渉を回避または緩和できる点にある。また、システムがある程度統合され、同一の RF、IF、およびデジタル化サブシステムが共有されると、電力利用効率も格段に向上する。さらに、この統合により、過去およびリアルタイムのチャンネル環境の特性に関する検知された知識に基づいた、より優れた機敏で予測型の通信が可能になる。

将来の通信システムのコア技術として、ISAC を設計・評価して実用的な実装に至るまでには、引き続き大きな課題がある。何よりもまず、利点と欠点を特定するために、現在の ISAC ソリューションのパフォーマンスを分析および評価する理論的な枠組みが必要である。現在の ISAC システムの設計では、ベースバンドと RF ハードウェアを機能的に共有することが求められており、トレードオフとして、歪みパラメータがセンシング性能に与える影響を慎重に検討する必要がある。共同波形設計の課題は、通信とセンシングの KPI が大きく異なるため、両者を最適化することは単純なことではない点である。モバイル通信ネットワークの ISAC により、同期したマルチスタティックセンシングに大きな機会とメリットがもたらされるが、ここでの技術的な課題は、最適融合化されたセンシング結果を達成するための同期、共同処理、ネットワークリソースの割り当てにある。そのため、ISAC の重要な技術的な方向性としては、一般的な ISAC ネットワークのパフォーマンス解析、ISAC 向け無線アクセスネットワークの設計、センシング支援型/活用型通信、通信支援型センシング、センシング支援型測位がある。このような方向性により、センシングと通信の統合に近づいていく。



## 高精度位置決めのための無線時空間同期

### (1) 特長と強み

現在の GNSS は基地局にピコ秒レベルでの同期精度を提供できないが、無線時空間同期はこれを提供することができ、ミリ波領域においても基地局間での位相同期を可能にする。この新しいレベルの同期精度は、超音波、光および電波のような進行波の飛行時間 (ToF) 測定に基づく位置決め技術にとって重要である。同期を必要とするもう 1 つの位置決め技術は、ステレオビジョンベースの位置決めである。

### (2) 提供される価値

無線時空間同期は、センチメートルもしくはそれを超える精度でデバイスの相対位置の測定を提供できる。

### (3) 果たすべき役割

同期技術が 2030 年に向けてより良く成熟するにつれて、将来の IMT における無線時空間同期が 2030 年頃までに利用可能になり、位置ベースサービスが完全に高精度位置決め能力を装備することを可能にすることが考えられる。

### (4) 技術概要

無線時空間同期は、(キャリアフェーズ)を利用した双方向通信による時刻および周波数伝送の実装である。ピコ秒の精度で電磁波の伝送遅延を測定し、センチメートル以上の精度でデバイスの相対位置を測定するとともに、リモートデバイスのローカルクロックを同期させる。

## 6.8.7 無線アクセス/コアネットワークおよびその他の無線システムの管理

### (1) 特長と強み

様々な用途での電波活用が望まれる中、有限な電波資源を有効に活用できるようにしていくための電波資源管理技術、及び各種無線の統合技術に加え、モバイルコアネットワークでの制御技術。これらの技術により、大容量化、低遅延化などの価値を提供可能。

### (2) 提供される価値

ユーザーに対しては、柔軟なサービス等の享受が可能となる。サービスに対しては、有限な電波資源の有効活用できるようになる。

### (3) 果たすべき役割

Beyond 5G 時代のサービス・アプリケーションに要求される高速大容量通信を、当該の場所での電波資源をベースに提供することが可能となる。



#### (4) 技術概要

##### (a) 各種無線技術の統合

モバイル通信以外の各種無線システムをモバイル通信と統合し制御する技術。ユーザーのニーズやモバイルネットワーク事業者の意向に応じ、（モバイル通信以外の）無線システムを適切な場所で管理することにより、限られた無線リソースを有効に活用する。

##### (b) コアネットワーク管理

複数通信の接続を同時に行うことにより通信容量を増加させるマルチセッション通信技術、及び、端末管理を簡素化して複数同時接続を促進する技術。

#### 6.8.8 ネイティブ AI ベースの通信のための技術

##### (1) 特長と強み

このネイティブ AI ベースの通信では、AI を密接に統合し、システム全体のパフォーマンスを向上させることで、従来のモジュールベースのエアインターフェース設計に大きな進展をもたらしている。さらに、究極のエアインターフェースにより、エンドツーエンドインテリジェント通信が実行され、野心的な Beyond 5G の要件を満たすことができる。

##### (2) 提供される価値

AI は、ネイティブ AI ベース通信の内蔵機能として組み込まれている。これにより、消費電力と周波数利用の面でより効率的になり、通信とセンシングの効率的な統合がサポートされ、オーバーヘッドと複雑性が少ない、よりシンプルなプロトコルとシグナリングメカニズムが提供される。

##### (3) 果たすべき役割

Beyond 5G では、AI は未来の通信システムの設計タブレットであり、あらゆる場所にインテリジェンスを生み出すための基礎となる。Beyond 5G での多様なサービスの需要や新たな KPI に対応するために、通信における AI の統合は、無線ネットワークアーキテクチャとエアインターフェース設計に大変革をもたらす重要な技術であると考えられる。

#### (4) 技術概要

##### (a) AI を活用したインテリジェント PHY および MAC コントローラー

膨大な収集データに基づく、AI による非線形マッピング問題の解決およびインテリジェントな予測と意思決定の最適化が可能になることで、インテリジェント PHY および MAC コントローラーの設計が促進される。物理層では、モジュールをディープニューラルネットワークなどの AI モデルに置き換えることができ、センシングによって収集された膨大な量のチャネルおよび環境データを活用して、チャネル取得、ビーム形成とビーム追跡、センシング、測位などのパフォーマンスを改善できる。MAC 層では、AI モデルはインテリジェント MAC コントローラーとなり、インテリジェントな送受信ポイント（TRP）管理をサポートし、膨

大なデータ処理とゼロ遅延のインテリジェント制御を可能にする。また、ネットワークセンターとエッジの負荷を調整し、リアルタイムのビーム管理と動的な周波数設定を行うことができる。さらに、変調および符号化方式（MCS）、ハイブリッド自動再送要求（HARQ）メカニズム、干渉管理、電力制御なども推進できる。

さらに、機械学習（ML）を使用して、物理層の RACH 検出、チャネル推定、シンボルデマッピングなどの一部の受信機処理ブロックを強化することは、ML と非 ML の処理ブロックが混在するハイブリッドシステムを使用した AI-AI に向けた最初のステップの 1 つとして期待できる。次のフェーズでは、ジョイントチャネル推定、等化、デマッピングなどの複数の機能を組み合わせた ML モデルが見込まれる。ハードウェアアクセラレーション機能の改善と ML モデルの信頼性の向上により、ML のみのシステムが実現可能になる。

### **(b) AI を活用したインテリジェントプロトコルとシグナリング**

インテリジェントプロトコルおよびシグナリングメカニズムは、AI を活用してパーソナライズされたエアインターフェースの重要な構成要素であり、インテリジェントな PHY および MAC 制御を可能にするための十分な可能性を備えている。さらに、自己学習、自己運用、自己保守を通じた、シグナリングオーバーヘッドの削減とシステム効率の向上が期待されている。フレーム構造については、より柔軟な波形パラメータと伝送期間を設計し、Beyond 5G の多様な要件（例えば、ローカライズ通信のため、遅延時間が 0.1 ミリ秒と指定されている場合など）を満たす必要がある。制御シグナリングに関しては、簡素化した、アジャイルで前方互換性のあるメカニズムを実現するために、制御シグナリングのサイズをより柔軟にし、フォーマットを低減する必要がある。

さらに、AI / ML を使用してプロトコルを設計し、ネイティブ AI/ML 処理に最適なソリューションが実現されるだろう。つまり、事前にすべての側面を修正しないで、代わりにオンライン学習とモデル改良のためのフックが挿入される。シグナリング手順では、変調方式や波形を指定することなく、分散型のエンドツーエンドの学習を有効にする必要があり、これにより、展開時に最適化が行われる。さらに、オンライン学習が不可能な場合には、完全に学習された対応物と一緒に使用できるように、事前に設計または学習された AI/ML 駆動の波形と変調方式を含めることができる。

### **(c) エンドツーエンドインテリジェント通信**

従来のシャノンの通信フレームワークでは、ビット伝送に重点を置き、エラーのないメッセージの配信と復元を行っている。将来の無線通信システムでは、無線リンク手順と AI 技術が共同で設計されて、効率的な情報処理、伝送環境センシング、インテリジェントエアインターフェース機能が実現される。送信側のニューラルネットワークは情報源のリアルタイムな変化に対しインテリジェントに適応し、受信側のニューラルネットワークは特定のタスクに応じて受信したデータから有効な情報を抽出する。これにより、情報がその内容に基づいて交換され、セマンティック通信の実現が可能となる。

## 6.8.9 光通信・伝送技術

### (1) 特長と強み

一般に、光通信技術は長距離、高速、大容量通信に適している。携帯電話システムにおける無線伝送の場合、UHF~SHF帯(300 MHz~30 GHz)での伝搬損失は、伝搬距離の3.5~4乗に比例して急激に増大するが、対数スケール(dB)で表した光ファイバーの伝送損失は距離に(一次)比例する(図6.8-1)。

単一モードファイバーの最小固有減衰は約0.2 dB/kmである[12]。細径・軽量の光ファイバーケーブルを用いた実用的な伝送システムでは、0.3 dB/kmが達成されており、数10 km以上の高速・大容量通信が可能となっている[13]。

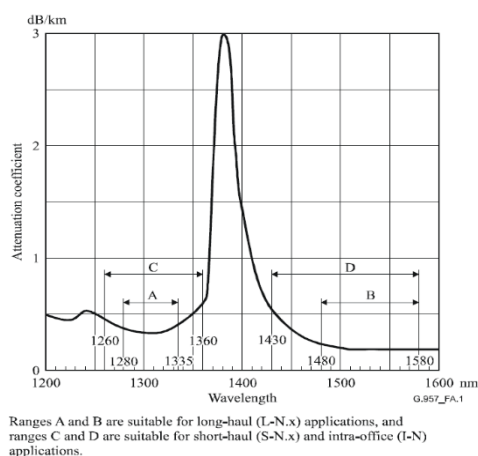


図 6.8-1 光ファイバーケーブルの光損失特性例 [13]

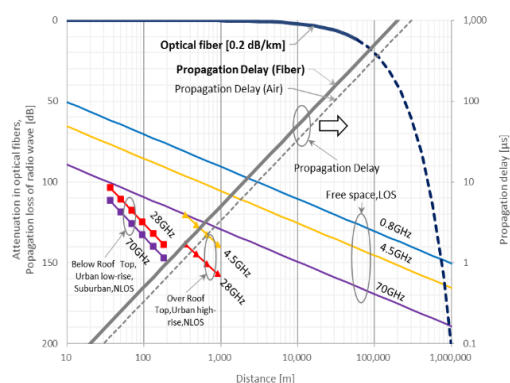


図 6.8-2 光ファイバーの光損失と電波の距離減衰特性 [13][14]

我が国には、光ファイバー通信の黎明期からの数十年間にわたる技術開発の歴史があり、日本全国に高速光通信網が張り巡らされている。充実した光通信インフラと最新の有線・無線通信技術を組み合わせ、Beyond 5G に向けて想定されるさまざまなユースケースをサポートするための機能実証が効率的に行える先進的な環境が整っている。

### (2) 提供される価値

Beyond 5G の各通信ノード間の接続に光伝送を適切に適用することで、より効率的で大容量の通信を安定して実現することを可能とし、旺盛な増加が継続している通信トラフィックに対応しながら快適でストレスのない通信サービスを提供することが可能となる。

### (3) 果たすべき役割

先進的な通信インフラとして持続可能な社会を支えるために、Beyond 5G 時代に向けて開発が進められている光ファイバー通信技術は、既存の光ファイバーネットワークを活用した高度な通信を提供するだけでなく、無線通信ネットワークのフロントホールやバックホール、さらにはロングホールを含む通信ネットワ

ーク全般において、最新技術を活用した高速・大容量で安定した通信リンクを提供することが期待されている。

さらには、低電力ブロードキャスト伝送または通信トラフィック挙動に応じたアクティブ経路管理・資源管理機能の提供などを通して、通信サービスのカーボンニュートラル化においても重要な役割を果たすことが期待される。

#### (4) 技術概要

Beyond 5G に向けて開発が進められている無線通信技術を支えるためには光通信技術の高度化も必然であり、より高速なデータ通信を実現するためのマルチコアファイバーを含むファイバー技術や次世代光通信技術の高度化に加え、光電融合の技術によって、より柔軟で低消費電力な光通信ネットワークを実現していくための取り組みなどが進められている [10][15]-[17]。

なお、低遅延伝送が重要な性能指標となる場合の技術検討・システム構築にあたっては、Beyond 5G の送受信ノードや中継ノードにおける伝送処理遅延や情報処理遅延に加えて、物理的な伝送距離による遅延時間が加わる(図 6.8-2 右軸)ことに注意をする必要がある。

### 6.8.10 光無線融合 (Radio over Fiber (RoF))

#### (1) 特長と強み

Beyond 5G 時代に必要となるユーザーデータ速度を収容するための大容量のモバイルフロントホール伝送技術。大量の分散アンテナ・基地局の配置 (6.8.1 節参照) で課題となる電力・スペース等の問題を回避する技術。

#### (2) 提供される価値

ユーザーに対しては、大容量のユーザーデータ速度を提供可能。一方サービスに対しては、分散アンテナ・基地局の配置で課題となる電力・スペースの問題を回避することが可能。

#### (3) 果たすべき役割

- Beyond 5G 時代に必要となる大容量のユーザーデータ速度を提供できること
- 大量の分散アンテナ・基地局を設置したときの省電力化・省スペース化

#### (4) 技術概要

光無線融合技術：無線信号の生成・復調処理を集約局で行い、モバイルフロントホール区間では無線信号波形をそのまま光ファイバー伝送する技術。

- Intermediate Frequency over Fiber (IFoF) 技術 [18]：無線信号を 1ch ずつ伝送せず、各基地局アンテナ向けの無線信号を周波数軸上で多重化し、高効率に大容量無線信号を伝送する技術。

## 6.8.11 光無線・音響通信

### (1) 特長と強み

無線周波数スペクトラムは限られたリソースであり、高データレートや通信容量への需要の高まりにより、スペクトラムリソースの逼迫はますます深刻となっている。超広帯域スペクトラムを利用した光無線・音響通信は、複数のシナリオで RF スペクトラムの危機を克服する有望なソリューションである。同時に、光は測位やセンシングにも利用可能である。

### (2) 提供される価値

光無線・音響通信システムは、RF ベースの通信と比較して、優位性（免許不要の周波数帯、低コスト、低消費電力の通信、セキュリティなど）をもつ。通信エリアとサービスエリア（水中など）の両方を拡大できる。一方で、通信および関連する光の測位技術とセンシング技術の融合など、複数の課題も存在する。

### (3) 果たすべき役割

超広帯域スペクトラムを利用した光無線・音響通信は、複数のシナリオで RF スペクトル上の危機を克服する有望なソリューションである。

### (4) 技術概要

- 新しい高帯域変調器を使用して、単一の光源の放射帯域幅を広げ、MIMO や波長分割技術などの多チャンネル技術を考慮している。
- 物理レイヤーでは、既存の OFDM 技術の再利用を考慮する必要があるが、同時に、光無線通信システムの特性を考慮して OFDM 変調技術を設計する必要がある。
- 光通信の直接見通し内通信特性により、システムには送信機と受信機間のアライメント調整を可能にする技術を考慮に入れる必要がある。

光周波数帯には、通信とセンシングに利用できるサブミクロン波長の膨大なスペクトラム資源がある。そのため、光スペクトラムを活用する通信とセンシング技術は、将来の Beyond 5G 適用シナリオの多くに対応でき、Beyond 5G 時代の超高データレート（Tbps レートなど）、高精度測位、高精度センシングをサポートするために、Integrated Sensing and Communication with Optical Wireless (ISAC-OW) のアーキテクチャと技術を検討する必要がある [10]。

#### (a) 主な要件とシナリオ

超高伝送データレート（Tbps など）に対応するには、光学部品および材料、物理レイヤー技術、アップリンク チェーン実装技術などの技術を研究する必要がある。その一方で、ISAC-OW システムのアーキテクチャと運用スキームについても検討する必要がある。

ISAC-OW システムは、高精度測位機能とセンシング機能と共に、超広帯域スペクトラム、電磁干



渉がない、高セキュリティ機能といった特徴を備えている。そのため、病院、工場、航空機内、車両に適している。病院向けのシナリオでは、ISAC-OW は、ユーザーの病状の監視、身振り・表情などの認識、屋内での測位とナビゲーション、さらには信頼性の高い超高データレート通信サービスの提供に利用できる。工場向けのシナリオでは、波形設計により、1本の光ビームで照明、信号の送信、さらには機械の振動が感知可能である。ISAC-OW 技術によって、車両間通信、物体識別も可能。

### **(b) ISAC-OW 向けの通信とセンシングを結合するアーキテクチャ設計**

多くの屋内シナリオでは、照明は、反射や屈折、ランプ シェードやカバーを使ったり、壁や他の物体に向けられたりして、慎重に行われている。そのため、受信機が送信機から直接見えなくても高速通信が可能な技術の開発が必要となる。

光ベースの位置確認は、精度や正確さなどの指標を大きく改善できるが、堅牢性、拡張性、複雑性に関する課題が残存する。赤外線センシング技術は、エアコンモニター、ジェスチャー認識、画像認識に使用されている。しかし、可視光信号などの他の波長の信号によるセンシング技術の開発が必要となる。

さらに、統合されたセンシング機能と通信機能をサポートするために、運用スキームに沿った新たなシステムアーキテクチャ、光源と受信機の配置の最適化、通信とセンシングの同時実行のための波形設計を検討する必要がある。

### **(c) ISAC-OW 向けの光学部品および材料**

超高データレートを提供するには、これに対応する部品と材料を考慮する必要がある。

**広帯域 LED**：発光ダイオード（LED）は、低消費電力かつ長寿命であることから、最も重要な光源の1つであり、LEDの帯域幅を増やすことで送信機でのデータレートの改善に役立つ。LED光源を利用した OWC システムの普及には絶好の機会である。

**高感度 PD**：光検出器（PD）は、光センサー、通信システム、フォトニック相互接続に不可欠な部品である。

**統合されたマイクロ光学アレイ**：マイクロ光学アレイシステムの大規模な並列化により、空間ダイバーシティと多重化技術をサポートし、スループットが大幅に向上する。マイクロ LED 技術と空間多重化技術の両方が成熟し、費用対効果が高まり、さまざまな波長に基づく白色光は波長分割によってスループットが向上する。

**受動光デバイス**：受動光部品は、光導波路、光フィルター、回折格子、光アンテナなど、光システムの重要な構成要素です。シリコン技術、新素材、新たな構造の組み合わせにより、新たな成果が数多く生まれている。

**再構成可能な光デバイス**：光の振幅と位相を変えることで、電気光学的変調とビーム調整の実



現が可能である。見通し外（NLOS）、マルチユーザーアクセス、高精度測位など、OWC の用途を拡大できる。

#### (d) ISAC-OW 向けの物理レイヤーの技術

同時に、標準化団体は、より多くの産業界のパートナーを将来の技術研究投資に惹きつけ、技術研究と産業への応用を推進することも必要である。標準化のための主な研究ポイントは以下の通り。

**チャンネルモデルと容量：**OWC（光無線通信）受信機は、見通し内（LOS）光信号と、反射による多数の NLOS のコピーを受信する。一方、OWC のチャンネル利得は、時不変であるが送信機と受信機の位置などの幾何学的パラメータに影響されるランバートモデルとしてほぼモデル化されるが、ここでは実用的なチャンネル特性を考慮する必要がある。RF とは異なり、OWC のチャンネル容量については、(i) 調光条件、(ii) ピーク光量の制約、(iii) 照明要件と LED ダイナミックレンジ、(iv) 入力信号が非負の実数値となる必要性を考慮する。

**変調：**OWC の変調は LED の光量を変化させることで実装されており、光信号は実数の非負信号である。OWC のチャンネル応答は非線形であるため、前述の変調方式では符号間干渉が発生する。この問題を解決するために、OFDM 方式は、IFFT 後に実数の非負信号となるように変更される。たとえば、直流バイアス光 OFDM（DCO-OFDM）、非対称クリップ光 OFDM（ACO-OFDM）、さらには直流バイアスを必要とせず ACO-OFDM よりも高い周波数効率を持つ混合 OFDM（X-OFDM）など。

**多元接続：**たとえば、NOMA 技術によって、複数のユーザーが、サブキャリア、タイムスロット、拡散コードなどの 1 つのリソースコンポーネントを共有できる。OWC ネットワークでは、ユーザーごとに異なる電力レベルを設定する電力領域 NOMA（PD-NOMA）が注目されている。協調的な NOMA 技術は、より高い電力（より良いチャンネル条件）を持つユーザーがメッセージをデコードし、リレーとして機能することができるため、ネットワークに利点をもたらす。

**MIMO：**超高データレート（1Tbps など）に対応するためにデータレートを上げるには、1 つのチップ上でのマイクロ LED マトリクスと CMOS ドライバアレイのハイブリッド化が必要になる場合がある。OWC で使用される MIMO アルゴリズムには、繰り返し符号、空間多重化、空間変調がある。

**OAM：**トポロジカルチャージの異なる軌道角運動量（OAM）は互いに直交している。これは、OWC にとって重要な技術の 1 つである。

#### 参考文献

- [1] G. Wikström et al., "6G – Connecting a cyber-physical world," Ericsson White Paper, Feb 2022, Online: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>.

- [2] G. Interdonato, E. Bjornson, H. Q. Ngo, P. Frenger, and E. G. Larsson, "Ubiquitous cell-free massive MIMO communications," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [3] K. Yamazaki, T. Ohseki, Y. Amano, H. Shinbo, T. Murakami and Y. Kishi, "Proposal for a User-Centric Ran Architecture Towards Beyond 5G," 2021 ITU Kaleidoscope: Connecting Physical and Virtual Worlds (ITU K), 2021, pp. 1-7.
- [4] Naoki AIHARA, Akio IKAMI, Takahide MURAKAMI, Yu TSUKAMOTO, Hiroyuki SHINBO, "A User-Centric RAN Architecture using Cell Free massive-MIMO for 6G System, " 2021 IEICE Society conference BS-3-9, Sep. 2021. (In Japanese).
- [5] T. Kawanishi, K. Inaga, A. Kanno, N. Yamamoto, T. Aiba, H. Yasuda, T. Wakabayashi, "Terahertz and Photonics Seamless Short-Distance Links for Future Mobile Networks," *Earth and Space Science Open Archive*, doi: 10.1002/essoar.10503612.1.
- [6] Z. Xu et.al, "Potential Transmission Choice for Internet of Things (IoT): Wireless and Battery less Communications and Open Problems," *China Communications* (Vol.18, Issue 2, Feb. 2021).
- [7] K. Ishibashi, "Wireless Communications Design with Energy Harvesting," *IEICE Fundamentals Review*, Vol.15, No.1 (Jul. 2021) [in Japanese].
- [8] M. Rakowski, "Silicon photonics platform for 50G optical interconnects," *Photonics Summit and Workshop 2017* (Sep. 2017).
- [9] T. Sogawa, "Basic Technologies toward the All-Photonics Network," *NTT R&D website*, Mar. 2020.
- [10] W. Tong, P. Zhu, et al, *6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [11] D. K. P. Tan, J. He, Y. Li, A. Bayesteh, Y. Chen, P. Zhu and W. Tong, "Integrated Sensing and Communication in 6G: Motivations, Use Cases, Requirements, Challenges and Future Directions," in *1st IEEE International Online Symposium on JC&S*, 23-24 February, 2021.
- [12] "Optical Fibers and Cables," ITU:  
[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/0b/04/T0B040000552C01PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/0b/04/T0B040000552C01PDFE.pdf)
- [13] ITU-T Recommendation G.957: Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy, *Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union* (Mar. 2006) (Mar. 2006).
- [14] ITU-R Recommendation P.1411-1: Propagation data and prediction methods

for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union (Aug. 2019).

- [15] K. Katayama, "R&D Innovative Optical Transmission Line Technologies," Tsukuba Forum 2020 ONLINE, Apr. 2021.
- [16] "319 Tb/s Transmission over 3,001 km with 4-core optical fiber," National Institute of Information and Communications Technology (Jul. 2021).
- [17] "Development of a new transmission method for nine-fold improvement of optical fiber signal-to-noise ratio," KDDI, (Jul. 2021).
- [18] "World's First Demonstration of Radio over Fiber Technology for Mobile Networks with Large Capacity Transmission and Superior Installability," NICT, KDDI Research, Yazaki Corp. and Waseda Univ., (Dec. 2020).

# 7. おわりに

## 7. おわりに

本白書では、2030年頃の実用化が見込まれている Beyond 5G に対し、利用者の日常生活、あるいは、多くの産業にまたがる広範囲の利用シナリオを想定した検討を行い、これを通して多角的な観点から社会基盤としての通信システムが備えるべき要件の検討を行った。さらに、高い品質や先端的なサービスを要求するユーザーの動向も踏まえ、社会や市場の動向調査・分析を通じ、2030年代の利用シナリオやアプリケーションを予見した。それらの典型的な利用シナリオに基づき、Beyond 5G のキーコンセプト、周波数、ネットワークに対する要件、能力、アーキテクチャ、キーテクノロジーを検討し取りまとめた。さらに、日本の技術力の国際的なアピールや標準化への寄与を目的とし、日本の強みや注目の高いテーマ等、「日本の売り」となる技術トピックの研究成果を取りまとめ、第 3.0 版の公開に合わせ別冊として公開した。本検討は継続して行われるものであり、検討結果に応じ本白書を随時更新していく予定である。

Beyond 5G 推進コンソーシアム 白書分科会は本検討結果をベースに、ITU-R での IMT for 2030 and beyond の標準化活動に関する日本提案作成をサポートした。結果的に本白書の多くの主要なコンセプトが IMT for 2030 and beyond の Framework 勧告などに反映されるに至った。今後も、ITU や 3GPP における周波数調整や標準化活動、ならびに、Beyond 5G に関わる団体との国際的な協調関係の構築に貢献する所存である。さらに様々な産業界等に対して Beyond 5G の訴求活動を進め、業界間の連携や協創の促進を図りたいと考えている。これらの活動を通じて得た多くの知見をもとにさらに検討を進め、白書の内容を充実させていく予定である。本白書をお読みいただいた方々には、是非白書分科会までご意見を頂きたい。本白書の検討結果が、研究開発、標準化、無線周波数調整、普及活動等に関する国際的なパートナーシップの強化・拡大、Beyond 5G の特徴的な能力を活かすことができる産業界との協力関係の構築に資することを期待している。



略語集



## 略語集

略語	原語
6DoF	Six Degrees of Freedom
3GPP	Third Generation Partnership Project
ACO-OFDM	Asymmetrically Clipped Optical OFDM
AGV	Automated Guided Vehicle
AI	Artificial Intelligence
AIaaS	Artificial Intelligence as a Service
API	Application Programming Interface
APN	All Photonic Network
APs	Access Points
AR	Augmented Reality
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BaaS	Banking as a Service
BMI	Brain Machine Interface
BtoBtoC	Business to Business to Consumer
BtoC	Business to Customer
BW	Band Width
BWA	Broadband Wireless Access
CASE	Connected, Autonomous/Automated, Shared, Electric
CAPEX	Capital Expenditure
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPRI	Common Public Radio Interface
CPS	Cyber Physical System
CPU	Central Processing Unit
CSI	Channel State Information
DaaS	Data as a Service
DCO-OFDM	Direct Current biased Optical OFDM
DDoS	Distributed Denial of Service
D-MIMO	Distributed MIMO
DMM	Distributed Mobility Management

略語	原語
DNA	Deoxyribonucleic Acid
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DT	Digital Twins
DTC	Digital Twin Computing
DX	Digital Transformation
ECC	Elliptic Curve Cryptography
eCPRI	enhanced CPRI
EESS	Earth Exploration Satellite Service
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EC	Electronic Commerce
ECC	Elliptic Curve Cryptography
ECU	Engine Control Unit
EHF	Extremely High Frequency
ETC	Electronic Toll Collection System
EV	Electric Vehicle
FA	Factory Automation
FDD	Frequency Division Duplex
FG-AN	Focus Group on Autonomous Networks
FH	Fronthaul
FPGA	Field Programmable Gate Array
FR	Frequency Range
FS	Fixed Service
FSPL	Free Space Path Loss
FW	Firewall
GDP	Gross Domestic Product
GEO	Geostationary Orbit
GPU	Graphics Processing Unit
GPS	Global Positioning System
GSO	Geostationary Earth Orbit
HAPS	High Altitude Platform Station

略語	原語
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HEMS	Home Energy Management System
HMD	Head Mounted Display
HMI	Human Machine Interface
HUD	Head-up Display
I/F	Interface
IC	Integrated Circuit
ICDT	Information, Communication, and Data Technology
ICT	Information and Communication Technology
IDS	Intrusion Detection System
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IFoF	Intermediate Frequency over Fiber
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPS	Induced Pluripotent Stem
IPv6	Internet Protocol version 6
ISAC	Integrated Sensing and Communication
ISAC-OW	Integrated Sensing and Communication with Optical Wireless
ISRU	In-Situ Resource Utilization
ISS	International Space Station
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transport Systems
KEM	Key Encapsulation Mechanism
KPI	Key Performance Indicator
LCT	Laser Communication Terminals
LED	Light-Emitting Diode
LEO	Low Earth Orbit Satellite
LiDAR	Light Detection and Ranging
LLS	Lower Layer Split
LOS	Light of Sight
LTE	Long Tern Evolution

略語	原語
MaaS	Mobility as a service
MAC	Media Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MEC	Multi-access Edge Computing
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
ML	Machine Learning
mMTC	massive Machine Type Communication
MR	Mixed Reality
MS	Mobile Service
MTP	Motion to Photon
MUP	Mobile User Plane
NBI	Northbound Interface
NGSO	Non-Geostationary Orbit
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLOS	Non-Line of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NPU	Neural network Processing Unit
NR	New Radio
NTN	Non-Terrestrial Network
O&M	Operation and Maintenance
OAM	Orbital Angular Momentum
ODD	Operational Design Domain
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ONAP	Open Network Automation Platform
OPEX	Operating Expense
O-RAN	Open Radio Access Network
OSINT	Open-Source INTelligence
OTA	Over The Air
OWC	Optical Wireless Communication
PA	Process Automation
PA	Power Amplifier

略語	原語
PCB	Printed Circuit Board
PCR	Polymerase Chain Reaction
PD-NOMA	Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access
PDs	Photodetectors
PF	Platform
PHR	Personal Healthcare Record
PHV	Plug-in Hybrid Vehicle
PHY	Physical Layer
PII	Personally Identifiable Information
PMIPv6	Proxy Mobile IPv6
PPM	Privacy Policy Manager
PPP	Purchasing Power Parity
PUE	Power Usage Efficiency
QKD	Quantum Key Distribution
QoE	Quality of Experience
RaaS	Retail as a Service
RaaS	Robotics as a Service
RACH	Random Access Channel
RAN	Radio Access Network
RAS	Radio Astronomy Service
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RMSE	Root Mean Square Error
RoF	Radio over Fiber
RSA	Rivest-Shamir-Adleman
RTT	Round Trip Time
SDGs	Sustainable Development Goals
SDN	Software Defined Networking
SEAL	Service Enabler Architecture Layer for Verticals
SISO	Single-Input Single-Output

略語	原語
SNS	Social Networking Services
SPOF	Single Point of Failure
SR	Segment Routing
SRS	Sounding Reference Signal
SRv6	Segment Routing version 6
SRv6 MUP	Segment Routing IPv6 Mobile User Plane
TAT	Turn-around-Time
TCO	Total Cost of Ownership
TDD	Time Division Duplex
TEE	Trusted Execution Environment
ToF	Time-of-Flight
TRP	Transmission Reception Points
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCN	User Centric Network
UE	User Equipment
UI	User Interface
UMTS	Universal Traffic Management System
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
UX	User Experience
V2X	Vehicle To Everything
VHTS	Very High Throughput Satellite
VR	Virtual Reality
vRAN	Virtual Radio Access Network
XaaS	X as a Service
X-OFDM	Mixed OFDM
XR	Extended Reality
ZSM	Zero-touch network and Service Management