

Beyond 5G / 6G White Paper

日本語 2.0 版

March 2022

Beyond 5G/6G White Paper

日本語 2.0版

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)

2022年3月

目次

第2版の公開にあたって	i
エグゼクティブ・サマリー	ii
第1章: はじめに	1
1.1 ホワイトペーパーの背景	1
1.1.1 移動通信システムの進化	1
1.1.2 コロナ禍	1
1.1.3 次世代移動通信システムの研究開発競争	2
1.2 ホワイトペーパーの目的・位置づけ	2
第2章: 2030年以降の未来社会(Beyond 5G/6G時代の世界観)	4
2.1 情報通信ネットワークと社会のあり方	4
2.2 情報通信ネットワークの変化の方向	4
2.3 サイバーフィジカルシステム(CPS)による社会課題の解決	5
2.4 オープンプラットフォームとしての Beyond 5G/6G	5
2.5 Beyond 5G/6G の機能アーキテクチャ	6
2.5 フィジカル空間	8
2.6 サイバー空間	9
2.7 サービスイネーブラ	10
2.8 オーケストレータ	11
第3章: Beyond 5G/6G時代の未来生活	13
3.1 シナリオ1 — Cybernetic Avatar Society	13
3.1.1 2035年〇月〇日:と或る企業の技術開発課長の日記から	13
3.1.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	15
3.2 シナリオ2 — 月面都市	18
3.2.1 月を耕す人	18
3.2.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	21
3.3 シナリオ3 — 時空を超えて	24
3.3.1 クリエイティブでアクティブな平穏	24
3.3.2 Dive to the point	25
3.3.3 空を行き交うのは	26
3.3.4 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	27
3.4 シナリオ4 — サイバー世界の光と影	30
3.4.1 サイバーお悩み相談室	30
3.4.2 ユースケース事例と潜在する課題	34
第4章: Beyond 5G/6Gの実現に必要な要素技術	36

4.1 ユースケースを可能にする要素技術群	36
4.2 各要素技術の概要.....	37
4.2.1 超高速・大容量通信.....	37
4.2.2 超低遅延・超多数接続.....	39
4.2.3 有無線通信・ネットワーク制御技術.....	44
4.2.4 無線システムの多層化—NTN.....	48
4.2.5 時空間同期.....	53
4.2.6 超安全・信頼性.....	55
4.2.7 超臨場感・革新的アプリケーション.....	59
4.3 研究開発ロードマップ.....	64
第5章：研究開発オープンプラットフォーム.....	66
5.1 Beyond 5G 共用研究開発テストベッド	66
5.2 高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッド.....	67
第6章：展開戦略	69
6.1 Beyond 5G/6Gに向けた標準化動向.....	69
6.2 Beyond 5G研究開発促進事業.....	70
第7章：おわりに.....	73
付録1： サービスイネーブラの疑似コード	74
謝辞.....	75

第 2 版の公開にあたって

2021 年 3 月に Beyond 5G/6G ホワイトペーパー第 1 版を公開して以来、Beyond 5G 関連のイベントを始め、展示会、講演会、国際会議等において多くの説明と意見交換の機会を得た。特に 3 章のシナリオには皆様に関心を寄せていただいたが、それと同時にアーキテクチャや Beyond 5G の社会的な課題についても議論を深める必要性が明らかになってきた。そこで、NICT が内外で議論してきた内容やこの 1 年間の活動を踏まえて、ホワイトペーパーを第 2 版に更新することにした。

この第 2 版では、以下の点を中心に更新している。2 章では、Beyond 5G が備えるべきオープンプラットフォームとしての特徴について述べ、移動通信分野の既存プレーヤが Beyond 5G の機能を支えるとともに、新規プレーヤが拡大する移動通信サービスの中で活躍しやすい Beyond 5G のアーキテクチャの概念を示した。3 章では、これまでの 3 つのシナリオに加え、Beyond 5G によりもたらされる負の側面に関する議論の端緒とするべく、倫理的・法的・社会的課題(Ethical, Legal and Social Issues, ELSI)に踏み込んだシナリオを追加した。4 章では、要素技術の追加を行うとともに、読みやすく整理し直した。5 章では、NICT が整備を進めている Beyond 5G の共用開発テストベッドについて最新の取り組みを説明した。6 章には、NICT が行っている標準化活動と Beyond 5G 研究開発促進事業について、最新の情報を反映させた。

このホワイトペーパーを通して、皆様とさらに議論を深める機会が得られることを期待している。

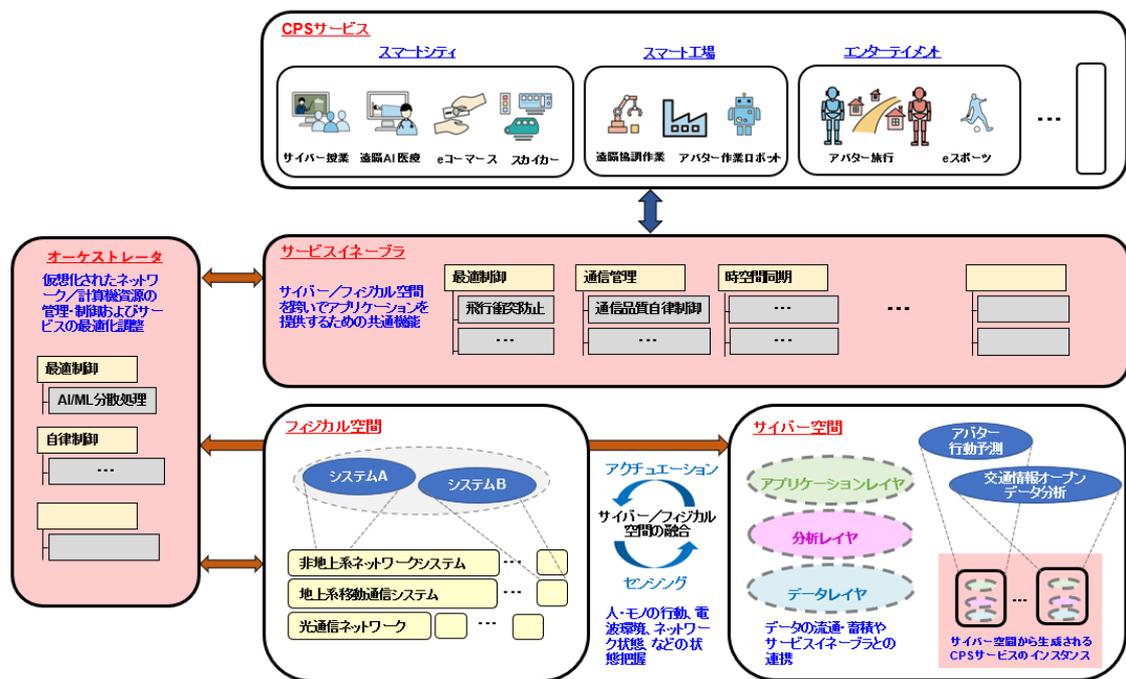
NICT Beyond5G 研究開発推進ユニット
ホワイトペーパー編集チーム

エグゼクティブ・サマリー

SDGsの達成やSociety 5.0の実現のためには次世代情報通信基盤であるBeyond 5G/6Gが必須である。この際、Beyond 5G/6Gに求められる機能はフィジカル空間からサイバー空間に至るまで広範囲に渡ることから、各機能を適材適所で組み合わせることにより、新たなサービスの創成が期待できる。このことから、Beyond 5G/6Gには多様な機能群の受け皿としてオープンなプラットフォームとしての特徴を持ち、社会インフラとして持続的に成長できる仕組みを担保することが重要である。この観点からBeyond 5G/6Gの機能アーキテクチャを設計していく必要がある(図A)。

フィジカル空間では、従来の地上系モバイルネットワークだけでなく、衛星系ネットワークやマルチコア光ネットワークなどを組み合わせることで柔軟で拡張性のある通信環境が提供される。サイバー空間では、アプリケーションに応じて多様な空間が併存し、蓄積された過去データや将来の予想などの情報処理を行なう。

Beyond 5G/6G時代には、これらフィジカル空間とサイバー空間の双方において時間や空間が高度に制御され、両空間が融合することで、これまでフィジカル空間だけでは実現が出来なかったことが可能となる。融合したフィジカル空間とサイバー空間をまたいで実行可能になるサービスは、様々な社会課題の解決にも役立つことが期待される。



図A Beyond 5G/6Gの機能アーキテクチャ(本文中 図2.1)

本ホワイトペーパーの3章では、2030年以降の社会生活をイメージした4つのシナリオといくつかのユースケースを紹介する。アバターを高度に活用する社会を描く「Cybernetic Avatar Society」、人間活動が月まで広がった社会を描く「月面都市」、時空間同期が実現した社会を描く「時空を超えて」、サイバーお悩み相談室の診断事例を描く「サイバー世界の光と影」のシナリオ例のイメージを図Bに示す。これらのシナリオに描かれた未来社会からバックキャストすることで必要となる要素技術を洗い出すとことを試み、4章に整理して示している。また、研究開発やサービス創成に求められる研究開発オープンプラットフォーム(5章)と標準化活動・Beyond 5G 研究開発促進事業の状況を(6章)をまとめている。

このホワイトペーパーは、情報通信技術のエキスパート集団としてのNICTがBeyond 5G /6G世界の実現に向けて議論した結果を示したものである。今後は、これを基に多くの皆様と議論を重ねていきたい。

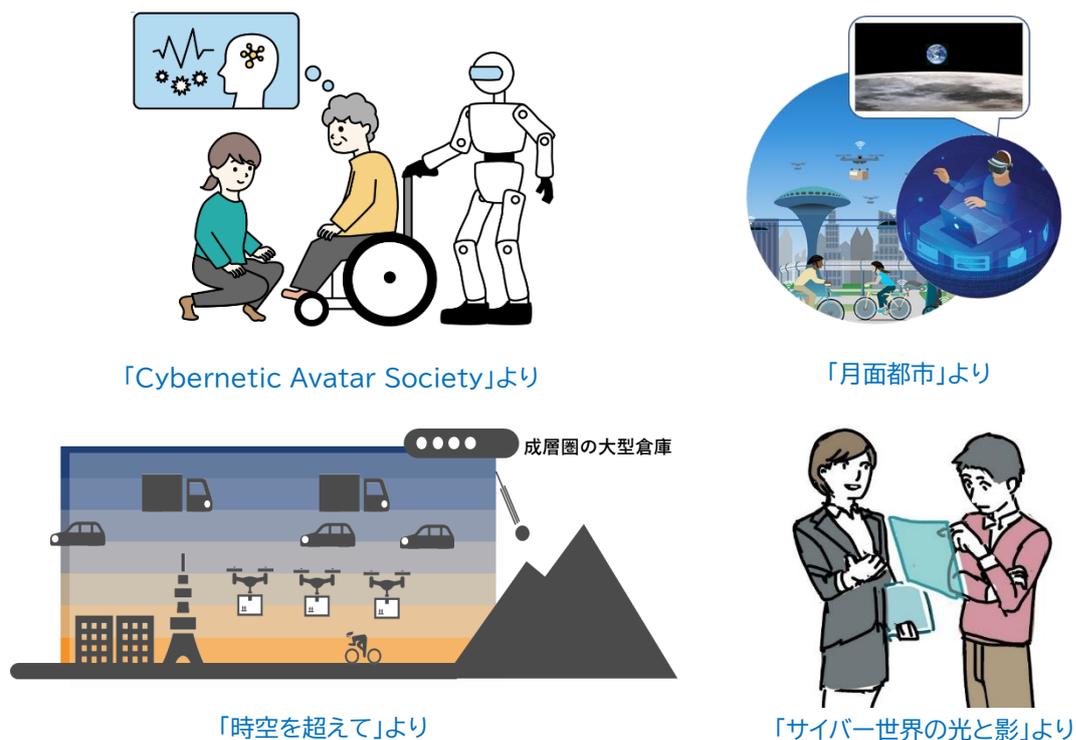


図 B 2030年以降の社会生活をイメージしたBeyond 5G/6Gのシナリオ例

第1章：はじめに

1.1 ホワイトペーパーの背景

1.1.1 移動通信システムの進化

2020年頃より第5世代移動通信システムの社会実装が本格化しつつあり、その活用に大きな期待が寄せられている。移動通信システムは、通信基盤(1G～3G)、生活基盤(4G)と進化し、個々人の生活に欠くべからざる要素となり、5Gにおいてはモノのインターネット(IoT: Internet of Things)等のように人だけではなくモノも繋がる社会基盤となってきた。

人と人、人とモノ、モノとモノがサイバー空間を通じて相互作用するサイバーフィジカルシステム(CPS: Cyber Physical System)が、社会生活の様々な局面において大きな意味を持つに至っている。次世代の移動通信システム(Beyond 5G/6G)においては、CPSを支える通信網が社会それ自身の神経網ともいべきものになる。すなわち、今後、移動通信システムが中心となる通信ネットワークは社会の基盤的インフラとして機能することが期待されている。



図 1.1 実空間の事象を計測(ビッグデータ)し、サイバー空間に投影し、解決策(最適解)を見いだして実空間を駆動する「サイバーフィジカルシステム」の実現

1.1.2 コロナ禍

新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の世界的流行(パンデミック)を受け、各国政府では、感染抑制のため、人と人が直接出会う機会を極力減らすようロックダウン等によって対応している。エッセンシャルワーカーを除く多くの人々は在宅勤務を行うことが推奨されるなど、新しい働き方に向けた取り組みが急速に取り入れられてきた。

在宅勤務においては、サイバー空間を通じて個々人がつながることが出来るため、ある程度の経済活動の継続はできるが、一方で現在の情報通信技術(ICT: Information and Communication Technology)の力不足も認識される事態となっている。

サイバー空間を通じた経済活動等では、これまでの様にリアルな時間や空間に制約されないことが利点として見出され、新たな活動のあり方として認識されている。

1.1.3 次世代移動通信システムの研究開発競争

社会の基盤的インフラとして、通信ネットワークの存在価値は極めて大きく、ビジネスのゲームチェンジャーや将来の安全保障の観点からも大きな注目が集まり、次世代移動通信システムの覇権を握ろうとする動きが加速している。

このような背景から、Beyond 5G/6Gに関する関心が、これまでの世代の切り替わり時点に比べ、大変高まって来ており、その研究開発をどのように進めるか等の議論が巻き起こっている。先陣を争う様に、ホワイトペーパーが様々な機関から出版され、フォーラム等の設立も行われ、研究開発投資が始まりつつある(本章末「参考:様々なホワイトペーパー・コンソーシアム等」参照)。

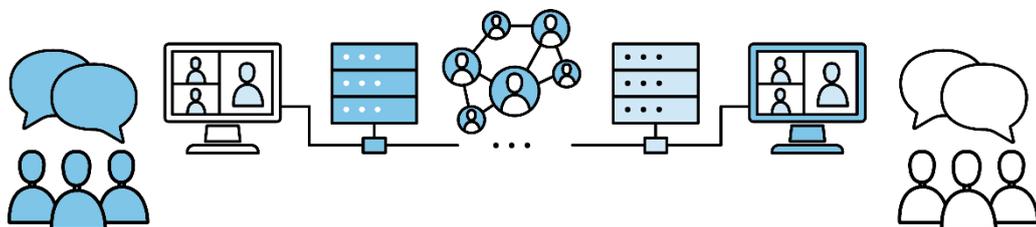
1.2 ホワイトペーパーの目的・位置づけ

このホワイトペーパーは、情報通信技術のエキスパート集団としてのNICTが Beyond 5G/6G世界の実現に向けて検討を行ったものである。

2030年以降の社会生活をイメージした「Cybernetic Avatar Society」、「月面都市」、「時空を超えて」、「サイバー世界の光と影」の4つのシナリオを作り、これらのシナリオに描かれた未来社会からバックキャストすることで必要な要素技術を洗い出すとことを試みた。

シナリオとそこに登場するユースケースを示し(3章)、それらを実現するための要素技術(4章)を整理した。また、NICT が提供する Beyond 5G 研究開発のプラットフォーム(5章)や標準化活動や関連事業に関して展開戦略(6章)をまとめている。描かれている社会生活を実現するために必要な未来技術を開発・実装して利用するには、NICTのみならず様々なステークホルダーの皆様と議論を行って目標を具体的に設定し、その目標を実現するという活動が必要であることは言うまでもない。

このホワイトペーパーを基に多くの皆様と議論を重ねて行き、議論の進展に合わせて本ホワイトペーパーを随時改定する予定である。



<参考:様々なホワイトペーパー・コンソーシアム等>

(1)Beyond 5G/6Gホワイトペーパー等

●総務省 Beyond 5G 推進戦略懇談会

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html

●NTT の「IOWN」構想

<https://www.rd.ntt/iown/>

●DoCoMo の「ドコモ 6G ホワイトペーパー」

https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/

●KDDI の「Beyond 5G/6G ホワイトペーパー」

https://www.kddi-research.jp/tech/whitepaper_b5g_6g/

●NEC の「Beyond 5G ビジョンホワイトペーパー」

https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/pdf/NEC_B5G_WhitePaper_1.0.pdf

●Samsung の「The Next Hyper---Connected Experience for All」

https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/20201201_6G_Vision_web.pdf

●Oulu 大学 「6G channel」

<https://www.6gchannel.com/6g-white-papers/>

(2)コンソーシアム等

●Beyond 5G 推進コンソーシアム

<https://b5g.jp>

●Beyond 5G 新経営戦略センター

<https://b5gnbsc.jp/>

●NEXT G ALLIANCE

<https://nextgalliance.org/>

第2章：2030年以降の未来社会(Beyond 5G/6G時代の世界観)

2.1 情報通信ネットワークと社会のあり方

昨今のコロナ禍のなか、情報通信ネットワーク技術の革新により、テレワークやオンライン会議／診療などが普及している。これらの技術により、次の社会課題などが解決されることが期待されている。

- ①あらゆる場所で、都市と地方、国境、年齢、障害の有無、といった様々な壁・差異を取り除き、誰もが活躍できる社会、(包摂性)
- ②社会的なロスがない、便利で持続的に成長する社会、(持続可能性)
- ③不測の事態が発生しても、安心・安全が確保され、信頼の絆が揺るがない「人間中心の強靱で活力ある社会」、(高信頼性)

このためには、情報通信ネットワークを通じて、現実世界を計測し、その結果をビッグデータとして集約すること、さらにビッグデータをサイバー空間において解析し、その結果に基づいて様々なアクチュエーターを用いて現実世界を駆動すること、即ちCPS(Cyber Physical Systems)が、社会活動の様々な場面で活用されて行くことになると考えられている。これらのシステムにより「人間中心の強靱で活力ある社会」が実現されることに大きな期待が寄せられている。

2.2 情報通信ネットワークの変化の方向

社会活動を支える様々なインフラやリソースは、集中から分散へ、独占から共用・共有(シェアリング)へと、その利用形態が大きく変化すると考えられ、すでにいくつかの実施例も出てきている。いわゆる共有経済(シェアリング・エコノミー)と言われるもので、交通機関におけるカーシェアリング、労働環境におけるワークシェアリング、金融におけるクラウドファンディングなどがその具体例になる。情報通信ネットワークのあり方もこの流れに沿って大きく変化する可能性がある。

例えば、ネットワークのSDN(Software-Defined Networking)化、即ちネットワーク仮想化がこれまでも増して推し進められ、ハードウェアのオープン化が進展すると考えられる。さらに、より複雑化した移動通信システムの制御には人工知能(AI: Artificial Intelligence)技術や、機械学習(ML: Machine Learning)技術などが適用されて行くことになると考えられる。ネットワーク仮想化やハードウェアのオープン化はネットワーク装置だけでなく、端末側にも波及するであろう。

通信ネットワークの形態として、これまでは個別のネットワークであった移動通信システムを含む地上系の情報通信ネットワークや宇宙航空領域における非地上系ネットワーク(NTN: Non Terrestrial Network)は、双方から歩み寄って融合して利用されて行き、新しい構成要素となる高高度基盤ステーション(HAPS: High Altitude Platform Station)やドローンなども普及すると考えられ、いずれは、空飛ぶ車(Sky Car)の利用も日常的に行われると

考えられる。

一方で、電波資源についてはミリ波帯からテラヘルツ帯までもが開拓され、電波を縦横無尽に駆使することが求められ、これらの電波の特性を生かした使い方やアプリケーションなどが普及することが想定される。情報通信ネットワークが扱うリソースは、電波に限らず、電力、計算機、空間など非常に幅広い。これらのリソースの最適利用は、社会システム全体の課題として、共有経済の中で一体として議論されていくと考えられる。

2.3 サイバーフィジカルシステム(CPS)による社会課題の解決

Beyond 5G/6Gの技術進展によって、解決を目指すべき社会課題は多岐の分野に渡る。例えば、国連サミットで採択された、持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)や、我が国が目指す未来社会としての Society 5.0に代表される社会課題である。このため、取り扱う空間をフィジカル空間からサイバー空間にまで拡張することにより、「時間と空間」、「身体」、「脳」など、従来の常識では超えることが容易ではないと考えられていた限界を開放できれば、新たに多くの社会課題を解決していくことが可能になると考えられる。そのためには、CPS に基づき、サイバー空間とフィジカル空間をこえてサービスを実行することができるBeyond 5G/6Gの仕組みが期待されている。

CPSを活用すれば、通信機器、周波数、空間、時間などのリソースをこれまで以上にダイナミックに扱うことができ、新たな技術による個別のシステムの高度化や効率化だけでなく、業種をまたいで社会全体の最適化を図ることができる。例えば、CPSを活用することによる無線通信機器の電源管理や交通経路の制御などを通してカーボンニュートラルを推進するなど、広い分野の社会課題の解決につながる。

2.4 オープンプラットフォームとしての Beyond 5G/6G

Beyond 5G/6G が社会課題を解決するためのインフラとして活用される場合、多種多様なプレーヤが業種を超えてこのインフラに参画する必要がある。そのためには、各業界に閉じた仕組みでは、プレーヤが有機的に連携することが困難であり、参画にも高い障壁がある。そこで、Beyond 5G/6G は、そのようなプレーヤの参画を促すための仕組みとして、オープンプラットフォームとしての特徴を持ち、全員参加型の社会基盤と捉えて設計していくことが重要である。

システム構築の観点からは、Beyond 5G/6G がフィジカル空間における通信の高度化から、サイバー空間における計算領域の拡大に至るまで、広範囲の機能を扱うことになる。しかも、それらの機能はフィジカル空間とサイバー空間をまたいで有機的に融合されて動作することを担保しなければならない。一方で、様々な社会課題を扱うサービスの開発は、必ずしも通信システムや情報処理の専門家ではない利用者が行う必要性が増加してくることから、ますます複雑化する機能の全体像を理解することは困難である。

そこで、Beyond 5G/6G の各機能を適切に定義して責任分界点を明確にし、個別の機能

をパズルのピースとして Beyond 5G/6G の全体システムに投入できるようにしたい。実現するサービスによっては必ずしも全ての機能をフル活用する必要はなく、適材適所の機能を「良いところ取り」して自在に組み合わせ活用することも求められる。

Beyond 5G/6G がオープンなプラットフォームなることにより、サービスの開発者や利用者、通信機器の開発者や運用者、アルゴリズム提供者等の各プレーヤが安心して Beyond 5G/6G の機能拡張に貢献でき、Beyond 5G/6G が社会インフラとして持続的に成長することを期待する。

2.5 Beyond 5G/6G の機能アーキテクチャ

Beyond 5G/6Gでは、現実世界であるフィジカル空間と計算機上に実現されたサイバー空間が CPS として融合し、これを活用したサービスである CPS サービスが実現される。CPS のフィジカル空間とサイバー空間は、様々なプレーヤが展開する機能から構成され、フィジカル空間のセンシング情報はサイバー空間に提供され、サイバー空間はその情報を一元的に管理・分析・連携させてフィジカル空間をアクチュエートする。CPS サービスは、サービスインペラを介して CPS を利用する。また、フィジカル空間とサイバー空間の各システム・機能は、オーケストレータを介して一体的なポリシーに基づいて調停され、CPS サービスが利用可能となるように提供される。以上の関係を示した Beyond 5G/6G の機能アーキテクチャを図2. 1に示す。

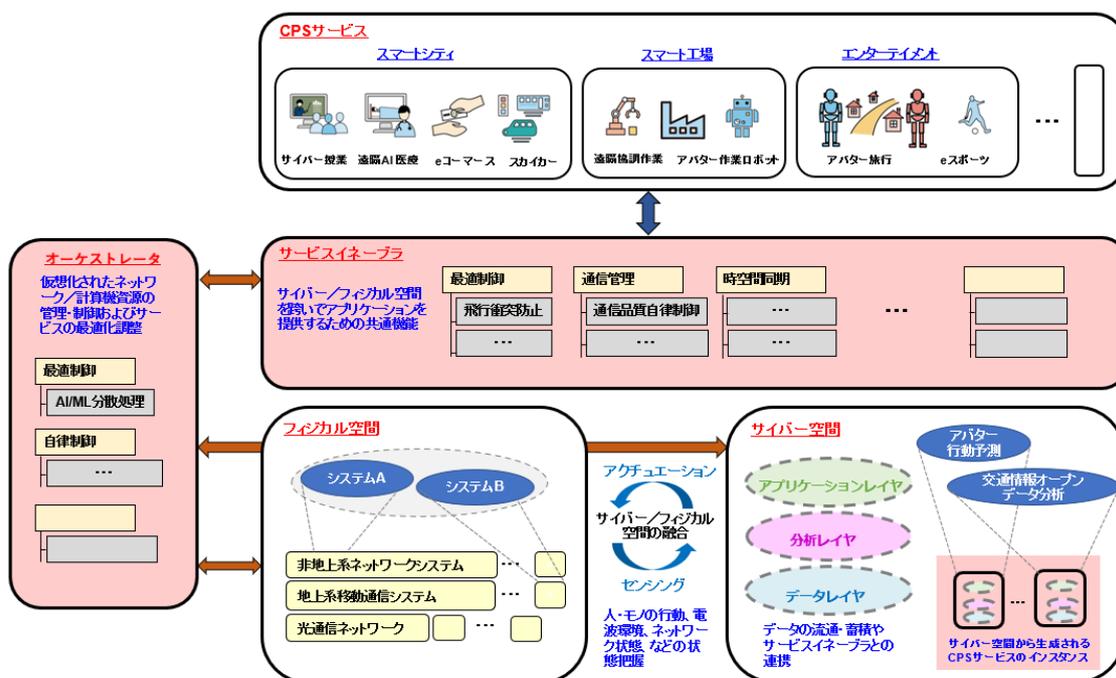


図2.1 Beyond 5G/6Gの機能アーキテクチャ

フィジカル空間は、従来の地上系モバイル通信システム概念が広がり、ローカル 5G をはじめとする自営系のシステム等が取り込まれる。上空では、宇宙通信システムや非地上系モバイル通信システムにより、通信エリアを上空方向に拡張するほか、山間部や海洋にも拡張する。それらの無線通信システムは、大容量で低遅延な光通信ネットワークが支える。これらの各システムは、既存のものや新規のものにより複数の同種システムが組み合わせられて展開される。例えば、地上では複数の管理主体のシステムが展開されるし、宇宙では複数の管理主体の衛星通信システムが展開される。それらのシステムは異なる特徴を持つため、サービスに応じて適切なシステムを選択することになる。

一方、サイバー空間では、フィジカル空間の様々な分野の情報を一元的に扱うことになる。これにより、単一種類の情報からでは分析し得ない事象の把握やそれに基づく制御を行うことが可能になる。サイバー空間に必要な機能を適切に位置づけるため、データレイヤ、分析レイヤ、アプリケーションレイヤから構成される機能モデルを定義した。サイバー空間も多様な機能から構成されるが、必要に応じて新たな機能を投入し、共通的あるいは限定的に活用される。サイバー空間で扱っている情報は、その部分集合を活用してデジタルツインやメタバースなどの概念に基づく複数のインスタンスが生成され、サービスに利用される。

CPSサービスは、フィジカル空間とサイバー空間をこえて実行されるサービスである。例としてスマートシティの場合、街中の交通情報や人流・気象のセンシング情報、地上系モバイル通信システムの周波数利用情報、光通信ネットワークの通信量情報などをサイバー空間で分析することにより、大規模イベント開催における適切なモバイル通信帯域の管理、適切な交通誘導、豪雨時の河川管理、などを可能にする。CPSサービスの例としては、他にもスマート工場やエンターテインメントなど、様々に考えられる。

このようにCPSサービスは多様な分野に広がるため、必ずしも情報通信分野に限定されない視点で開発されることになる。多様なCPSサービスを開発するプレーヤが、フィジカル空間やサイバー空間を支えるシステムや機能をブラックボックスと考え、CPSサービスを自在に開発できる仕組みが提供される。そのための機能として、このアーキテクチャではサービスイネーブラとオーケストレータを定義している。

サービスイネーブラは、CPSサービスがフィジカル空間とサイバー空間をこえて実行することを可能にするために、CPSサービスの要求を受け取り、フィジカル空間とサイバー空間のシステムを制御する処理に翻訳して、オーケストレータを介して両空間を利用するための初期化を行い、CPSサービスがCPSの機能を利用できるようにする。CPSサービスの実行中も、サービスイネーブラは継続してCPSの最適化を行う。

オーケストレータは、CPSサービスが必要とする動作を可能にするため、フィジカル空間とサイバー空間の各システムを初期化するとともに、CPSサービスの実行中は継続して各システムの最適化を行う。フィジカル空間とサイバー空間を構成する各システムは、システム間連携や利用者へのサービス展開において、それぞれのポリシーを持つ。従って、オーケストレータは、各システムの利用可否やその組み合わせについて、利用の調停を行う。

以下の各節では、フィジカル空間、サイバー空間、サービスイネーブラ、オーケストレータについて、具体的に説明する。

2.5 フィジカル空間

フィジカル空間では、従来のようなスマートフォンを中心としたモバイル通信事業者が構築する公衆移動通信システムだけでなく、ローカル5G/6G、テラヘルツ波を用いる次世代無線LAN、専用通信システムなどの自営無線システム、HAPSや人工衛星のような非地上系ネットワークシステムのリソースがシームレスに繋がるよう結合して扱われる。CPS サービス提供のため、通信事業者やインターネットサービス事業者による次世代光ネットワークを用いたデータネットワークやクラウドサービス事業者によるデータセンターやエッジ、クラウドのリソースが一体になる。

低軌道衛星(LEO)や中軌道衛星(MEO)などの非静止軌道衛星(NGSO)は互いに協調して動くようになり、静止軌道衛星(GEO)と共存する。共存のなかで、電波と光波が、地上局と衛星群や HAPS 群を繋ぐフィードリンクやユーザリンクに使われ、また、衛星群と HAPS 群の間を通信する衛星間リンクとして使われる。

次世代の光ネットワークは、移動通信システムやデータネットワーク、エッジコンピューティングの機器間、さらには、NTN の基地局やゲートウェイを相互に接続するリンクにマルチコア光ファイバなど大容量通信できるインフラが敷設される。

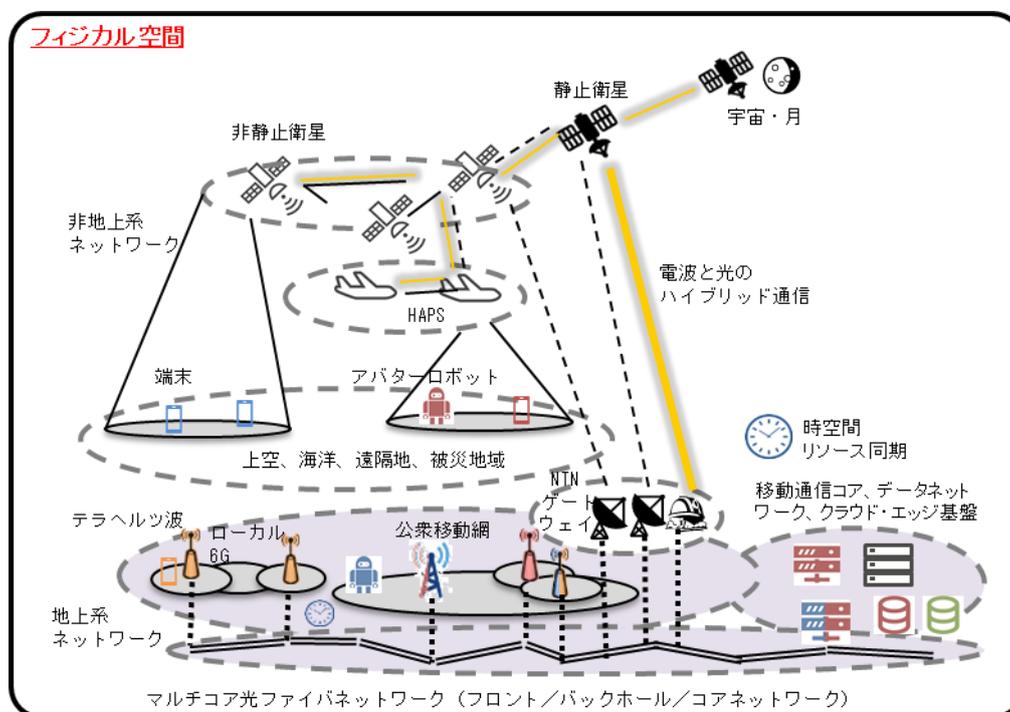


図2.2フィジカル空間

地上系ネットワークと非地上系ネットワークのシームレスな統合は、オーケストレーション機能による柔軟なリソース結合によって実現される。オーケストレーション機能に、さまざまな事業者が備える特長あるリソースを柔軟に組み合わせる機能を含ませることにより、CPS サービスに対してその要求にミートする最適な通信環境が提供される。こうして、ユーザの意図がどこでも(上空、海洋、都市、遠隔地)、いつでも(日常、災害時)、充足されるようになる。

2.6 サイバー空間

サイバー空間には、フィジカル空間からのリアルタイムなデータ取得とサイバー空間からの情報フィードバックを可能にする高度な接続性と、インテリジェントなデータ管理や AI 分析を可能にする計算能力が求められる。サイバー空間は、現在、主にデバイス等のオペレーションをモニタすることに使われているが、今後は、スマートシティから人間まで実世界のエンティティをデジタルで表現するデジタルツインの構築と、それらのインタラクションをシミュレーションし予測することに使われ、さらにビジネスフローや社会システムの自律的な最適化へと進化していくと考えられる。

サイバー空間は、データレイヤ、分析レイヤ、アプリケーションレイヤの 3 つのレイヤから構成される。データレイヤでは、IoT ハブがフィジカル空間のシステムやデバイスとの間でデータをやり取りしながら情報を抽出・変換し一元管理し、デジタルツインにマッピングする。分析レイヤでは、それらの情報を分析することにより将来の事象を認識・発見・予測し、シミュレーションにより検証する。アプリケーションレイヤでは、予測結果に基づいて CPS サービスを連携させ、システムやサービスの最適化を行う。

これらの機能要素が B5G/6G の大容量・低遅延・超多様なデータストリームに対応することに加え、フィジカル空間を含む CPS 全体のリアルタイム制御や同期制御、信頼性保証も重要になる。さらに、現在、広く活用されている Web サービスなどとの連携も行えるようにする必要ある。

サイバー空間では、個々のフィジカル空間のリアルな再現だけではなく、様々な CPS サービスのシナリオに応じたサブ空間が重なって再現され、予測に基づきフィジカル空間の最適な制御を行う。この際、サイバー空間では現実とは異なる時間軸や現実を実証が困難なシナリオで検証を行うことも可能となる。

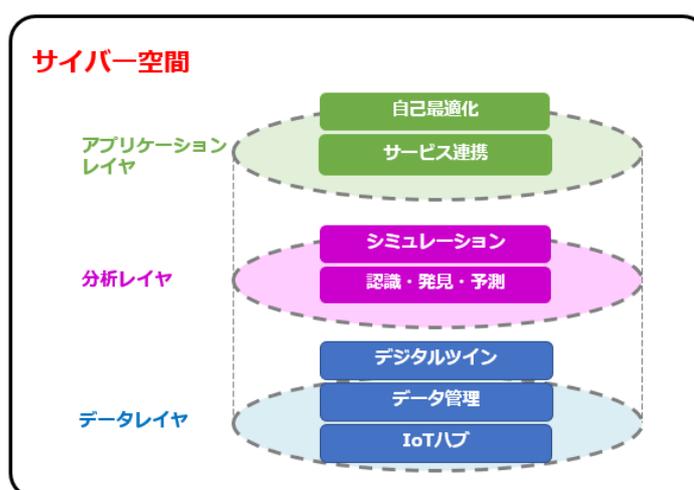


図2.3 サイバー空間

2.7 サービスイネーブラ

サービスイネーブラは、CPSサービスがフィジカル空間とサイバー空間をこえて実行することを可能にする機能である。サービスイネーブラには様々な実現方法が考えられるが、本節ではその一形態として、サービスイネーブラがサービスを構成するアプリケーションのミドルレイヤとして実装されることを想定し、Beyond 5G/6G の全体システムにおける役割を示す。サービスイネーブラの実現方法、機能、インターフェイスについては、今後さらに議論を深める必要がある。

サービスイネーブラは、CPS サービスから CPS の利用要求を受け取り、フィジカル空間とサイバー空間のシステムを制御するための処理単位に分解してオーケストレータに伝え、オーケストレータは必要な機能や性能を満たすようにフィジカル空間とサイバー空間のシステムや機能を組み合わせて、CPS サービスが CPS を利用するための初期化を行う。また、サービスイネーブラは、CPS サービスの実行中も継続して CPS の最適化を行う。

サービスイネーブラが CPS サービスの機能要求を仲介することにより、CPS サービスがフィジカル空間とサイバー空間で実現可能な複雑な機能を直接扱う必要がなくなる。CPS サービスのプロバイダは、利用者主体の観点で整理されたサービスイネーブラを扱うことだけに着目すれば良い。サービスイネーブラの実現方法としては、例えば、OS のミドルウェアやドライバ等として実装される方法や、外部サーバの機能として実装される方法などが考えられる。

サービスイネーブラの例を表2. 1に示す。サービスイネーブラのカテゴリとして、「最適制御」、「通信資源」、「時空間同期」、「セキュリティ」などが挙げられる。「最適制御」のカテゴリには、「飛行衝突格子」、「超臨場感共有」などの個別機能が考えられる。このようなサービスイネーブラは、必要に応じて追加され、適切なアクセス制御を行いながら複数の利用者に開放することが望ましい。

CPSサービスの例として、多数地点から遠隔操作するロボットの協調作業を挙げる。この場合、各地点からの通信遅延が異なるためにロボットの連携がスムーズにできない問題が考えられるが、遅延を補償した VR により各作業者が適切に操作を可能とするサービスイネーブラ「多地点アバターVR 作業」を活用する。サービスイネーブラを用いない場合は、CPS サービスの開発者が通信遅延を補償するアルゴリズムを考案して実装する必要があるが、サービスイネーブラを利用すれば共通機能として容易に CPS を活用できる。

他の例としてドローン飛行を挙げる。CPS サービスの開発者は「飛行衝突防止」というサービスイネーブラを利用し、サービスイネーブラに対してドローンの目的地を設定しさえすれば、他の飛行体との衝突を回避するように飛行を制御する。CPS サービスの開発者は、自らフィジカル空間のセンサから情報を取得し、他の飛行物体と衝突しないように自らプログラミングする必要はない。

このように、サービスイネーブラは CPS サービスを実装する立場から、Beyond 5G/6G を構成する複雑なシステムを容易に扱うことを可能とする。

なお、CPSサービスがサービスイネーブラを利用する際にAPIを利用することを想定し、C

PSサービスを実装する疑似的なプログラミングコードを付録 1 に示す。

表2.1 サービスイネーブラの例

カテゴリ	個別機能
最適制御	飛行衝突防止、超臨場感共有、人流交通分析
通信資源	通信品質自律制御、上空エリア拡張、海洋エリア拡張、広域センサ情報収集
時空間同期	高精度位置同定、多地点アバターVR 作業、端末位置搜索
セキュリティ	アバター本人認証、データトレーサビリティ

2.8 オーケストレータ

オーケストレータは、サービスイネーブラから受け取る CPS サービスの利用要求に基づき、CPSサービスの実行に必要な処理をフィジカル空間とサイバー空間の各システムに対して行う機能である。オーケストレータは、サービスイネーブラと同様に様々な実現方法が考えられるため、今後の議論を深める必要がある。本節では、オーケストレータが各システムとの通信インターフェイスを持つ管理装置であることを想定して、以下の説明を行う。

オーケストレータは、CPSを構成する全てのシステムの中から、要求された機能を実現するためのシステムを選択し、CPSサービスが一体としてシステムを利用できるように組み合わせで初期化する。また、CPSサービスの実行中は継続して各システムの最適化を行う。

この際、フィジカル空間とサイバー空間を構成する各システムは、システム間連携や利用者へのサービス展開において、それぞれのポリシーを持つ。従って、オーケストレータは、各システムの利用可否やその組み合わせについて、利用の調停を行う。

フィジカル空間とサービス空間の各システムは、そのシステムに閉じて適切に運用するための管理機能を持ち、その運用に責任を持っている。各システムは、自主的な運用に加えてオーケストレータとの対外的なインターフェイスを持つ。この際、各システムは、その時点での利用可能リソースや接続ポリシーなどの観点から調停に応じる条件が異なる。従って、オーケストレータはシステム全体の観点から個別のシステムとの調停を試みるが、必ずしもその通りになるとは限らない。システムによっては、オーケストレータからの打診にもかかわらず、当該のCPSサービスに向けては選択されない場合もある。つまり、オーケストレータが全てのシステムの利用を一元的に管理しているわけではない。各システムは運用の自主性を確保しており、オーケストレータとのインターフェイスはその交渉に応じるための連絡手段である。

このようにして、CPSサービスの実行を可能にするために、フィジカル空間とサイバー空間の各システムから最適な組み合わせが選択される。個別のCPSサービスに対して、その都度、選択されたシステム群が構成されていく。

なお、オーケストレータにはシステム全体の観点から調停を行う様々な機能が実装される。その一例を表 2.2 に示すが、Beyond 5G/6G の成長の過程でこれら機能が柔軟に更新されることが重要である。また、オーケストレータは全体システムの調停役であるから、Beyond

5G/6G が社会インフラとしての役割を果たす上で問題のある処理を排除するとともに、運用において性能ボトルネックや障害ポイントを生じさせないような機能の検討や実装上の工夫が必要である。

表2.2 オーケストレータの機能の例

カテゴリ	個別機能
最適制御	AI/ML 分散処理、低消費電力制御
自律制御	ゼロタッチ構成管理、自動障害復旧、災害時通信制御
通信資源管理	周波数資源管理、通信品質管理
計算資源管理	エッジコンピューティング資源管理、遅延補償遠隔操作

第3章: Beyond 5G/6G時代の未来生活

3.1 シナリオ1 — Cybernetic Avatar Society

3.1.1 2035年〇月〇日:と或る企業の技術開発課長の日記から

- 9:30-10:30 京都に在宅のまま東京本社の幹部と新製品企画のテレプレゼンス会議

3Dアバター同士でXRの遠隔会議(UC1-3:テレプレゼンス)。社長のアバターが目の前に現れた時は少々緊張したが、3D空間で社長の隣に移動し、製品VRプロトタイプを手渡して感触グローブを使って遠隔から体験してもらった。社長のGOサインもすぐにもらえた。

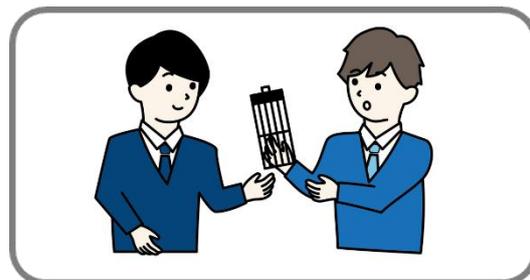


図3.1 テレプレゼンス会議

- 10:30-11:30 地球規模での災害対応イベントに参加

自然災害を想定した大規模訓練イベントに遠隔から参加(UC1-3:テレプレゼンス)。地球規模の基幹網技術により各国の有識者がXR空間に参集して議論を深め(UC1-1:相互理解促進)、時空間同期技術を用いて我が社の製品を各国で同時に作動させた。我が社の製品が災害発生時にも有効であることを検証できたことは大変喜ばしい。



図3.2 テレプレゼンスイベント

- 11:30-12:00 タイにある製造工場の緊急トラブルに瞬間身体移動で対応(現地は 9:30-10:00)

タイの製造工場から製造ラインが停止したとの突然の連絡。現地のアバターロボットに乗り移って製造機器の遠隔操作を試みたところ(UC1-3:テレプレゼンス)部品の破損を発見。担当者が遠隔修理をしてくれたが、遅延の違和感もなく楽に遠隔作業ができたとのこと。

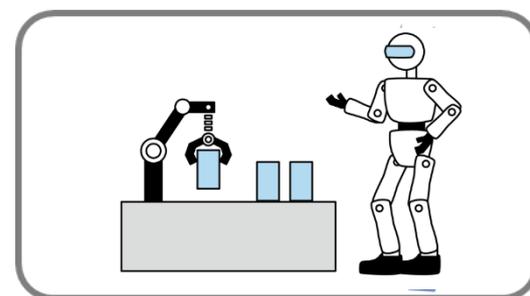


図3.3 緊急トラブルへの遠隔対応

■ 12:00-13:00 岡山の田舎にひとり住んでいる親父を身体介助しながらリモート昼食

身体の機能が落ちてきた親父と一緒にアバターで昼食を楽しんだ。介助機器を遠隔操作して親父の食事を援助(UC1-2:心と体の支援アバター)。脳波解析から理解力は衰えていないことが分かったので安心だ。親父が日頃使っているAI対話介護システムのおかげだろう。

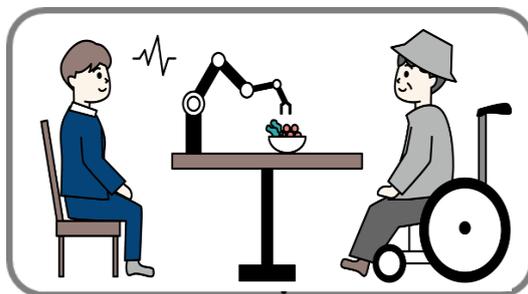


図3.4 リモート介助

■ 13:00-15:00 社内会議と息子の授業参観に遠隔から複数アバターで同時参加

社内の遠隔会議と息子の遠隔参観がバッティング。会議のアバターは自律分身モードに設定して、アバターが伝えてくれる会議の状況をARで確認(UC1-3:テレプレゼンス)。気になった議案は遠隔分身モードに戻って発言。その間、授業参観を抜け出したのは息子には内緒だ。

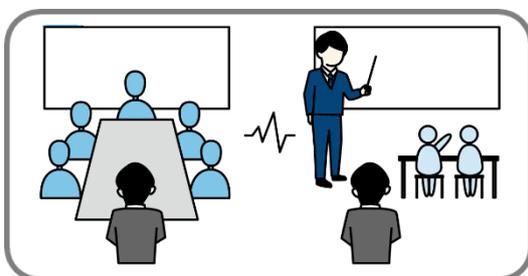


図3.5 社会会議と授業参観

■ 15:00-16:00 XR富士登山で心身のリフレッシュ

気分転換のために富士山にXRでプチ登山(UC1-3:テレプレゼンス)。現地に設置された多数の360度カメラや感触センサが柔軟に電波干渉を回避し、状況に応じた無線アクセスを行ってくれたおかげで、美しい雲海をライブで眺めながら、実際の登山と同等の遠隔体験を行うことができ、心身ともにリフレッシュできた。

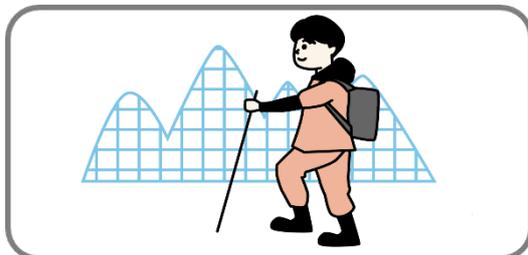


図3.6 XR富士登山

■ 16:00-17:00 トルコ(10:00-11:00)の取引先と日本語で遠隔交渉

我が社の製品は欧州・中東でも人気だが、今日はトルコの取引先との遠隔打合せがあった。トルコの言語・文化・風習は全く知らないもので話が噛み合うか心配だったが、相互の文化を考慮した同時通訳システムのおかげで先方との新たな契約もまともりそうだ(UC1-1:相互理解促進)。

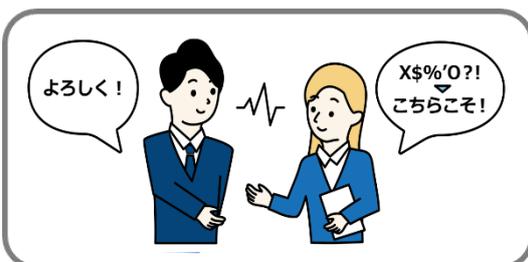


図3.7 言語・文化・風習を超えた遠隔交渉

■ 20:00-21:30 就寝前に未来技術のTV特集番組を視聴

今日も一人で何役も楽々こなせて充実した一日を過ごせた。15年前と比較して、我が国は少子高齢化がかなり進んだが、アバター技術のおかげで労働生産性はむしろ向上した。夕食後見ていた未来技術のTV特集番組によると、15年後には、脳の殆どの機能がAIに搭載されるらしい。凄い世界になりそうだが、これらの技術をどう使いこなすか、人間の知恵が試されそう

3.1.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術

UC1-1：相互理解促進システム(～文化・価値観の壁を超える～)

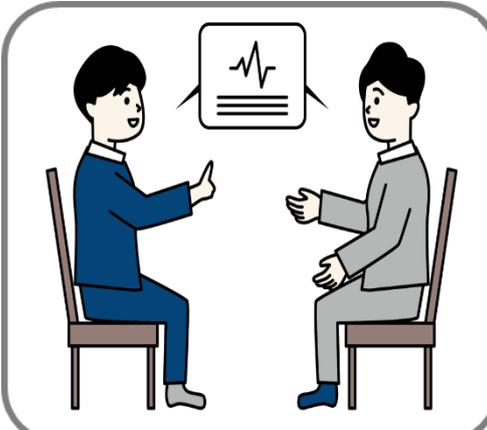
<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>異なる文化や価値観を持つ多様な人々が日常の言葉のやり取りだけで真に理解し合うのは難しいが、本システムは文脈・非言語情報・脳情報を解析して相手の真意を分かりやすく伝えてくれる。海外の人とのリアルアバターを使った遠隔対話においても、文化や習慣の違いも踏まえて言葉が意味する概念を翻訳して通訳してくれるので、多様な文化を持つ人々間の相互理解がより深まる。</p>	
<p>利用形態</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 人と人の会話のちぐはぐな状況を検知して概念翻訳を行う。 ● 操作は音声、BMI(Brain-machine Interface)、複数センサ等を用いて行う。 	
<p>必要となる要素技術 *4章参照</p>	<p>(T7)脳情報の読み取り・可視化・BMI技術 (T7)リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術 (T7)言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術 (T7)多言語の同時通訳・言い換え・要約技術 (T2)環境と要件を協調させる統合型通信システム構成技術 (T6)ヒューマンセントリックなセキュリティ技術 (*) (NICTでは扱っていない技術) 頭部装着ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)等のXRハードウェア技術</p>	

図3.8 相互理解促進システム

UC1-2：心と身体の支援アバター(～年齢・身体能力の壁を超える～)

<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>介護支援アバター(AIソフト・ロボット)が高齢者や障害者の望みや気持ちを言語・非言語・脳情報を読み解き支援してくれる。また介護者が介護支援アバターを遠隔から操作して高齢者や障害者の望みに合わせて介助することもできる。国内の介護者の数には限りがあるが、外国の介護者が海外から介護支援アバターを操作し同時通訳システムを使いながら被介護者の身の回りの支援することも可能になる。</p> <div data-bbox="842 412 1331 853" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">図3.9 心と身体の支援アバター</p>
<p>利用形態</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 被介護者(高齢者・障害者)がアバターを利用。 ● 介護者が遠隔からアバターを操作して被介護者を支援。
<p>必要となる要素技術 *4章参照</p>	<p>(T7)直感性の計測・伝達・保証技術 (T7)リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術 (T7)言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術 (T7)多言語の同時通訳・言い換え・要約技術 (T2)環境と要件を協調させる統合型通信システム構成技術 (T6)ヒューマンセントリックなセキュリティ技術 (*) (NICTでは扱っていない技術) 介護ロボット・HMD等のハードウェア技術</p>

UC1-3 : テレプレゼンスによる働き方革命(～距離・時間の壁を超える～)

<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>在宅のまま国内のみならず世界各地に3Dアバターで瞬間移動。海外との打合せもXRと多言語同時通訳で楽々こなせる。海外の製造工場や農場へも瞬間移動し、遠隔作業も五感情報で直感的に行える。仕事の合間には遠くにいる親の介護もできて安心。自分のアバターが偽物でないことも保証されていてセキュリティも万全。個々の作業に特化したアバターを複数の操作者が切り替えて利用することも可能になる。</p> <div data-bbox="794 436 1295 963" data-label="Image"> </div>
<p>利用形態</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境のセンシング情報も集約して伝達。 ● 複数のアバターを複数の操作者が切り替えて利用。
<p>必要となる要素技術</p>	<p>(T7)直感性の計測・伝達・保証技術 (T7)リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術 (T7)言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術 (T7)多言語の同時通訳・言い換え・要約技術 (T2)環境と要件を協調させる統合型通信システム構成技術 (T6)ヒューマンセントリックなセキュリティ技術 (*) (NICTでは扱っていない技術) 遠隔操作ロボット・HMD等のハードウェア技術</p>

3.2 シナリオ2 — 月面都市

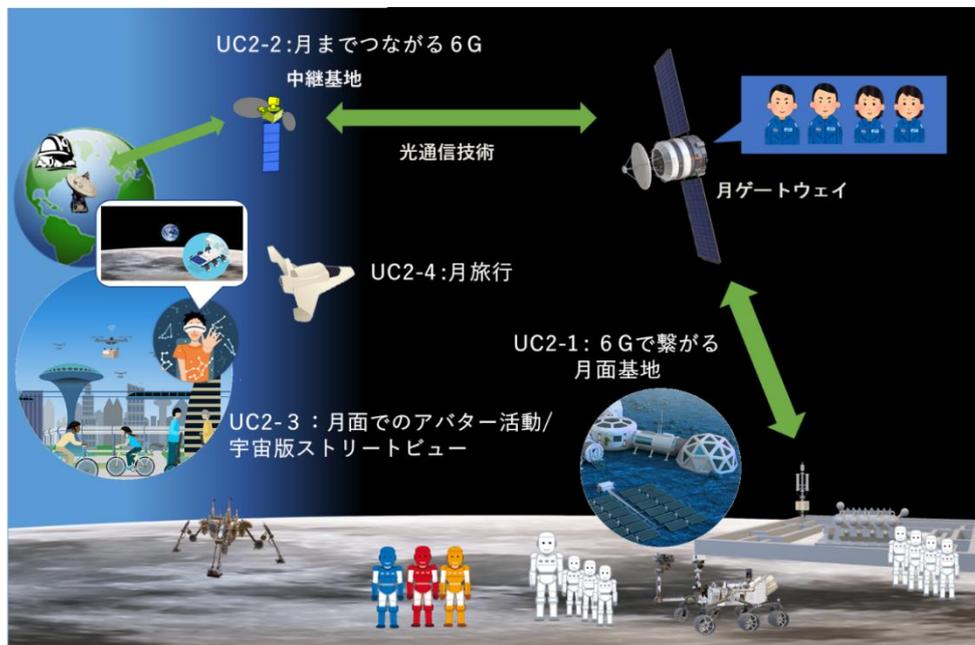


図3.11 シナリオ・月面都市のイメージ

3.2.1 月を耕す人

<月ゲートウェイにて>

思い思いのタンブラーを片手に皆がブリーフィングルームに集まってくる。ここは月を周回する宇宙ステーション（月ゲートウェイ）。交代制で宇宙飛行士が4人ほどしかいない。ボスが月面マップをスクリーンに表示し、今日の地下探査エリアを説明する。クルーメンバーの一人が発言する。

「今日の範囲は定常探査範囲より70%も広いが、我々を酷使し過ぎじゃないですか？」

ボスは息を強めて答える。

「昨日、別の工区で作業が完了した。地球からのアバターマシンが30体以上ある。その内4体が、それらの工区より借用できるぞ。」

作業に必要な工程表とデータのダウンロードを済ませ、ボスと2人のクルーメンバーは各自のポッドに移動し、月面のアバ

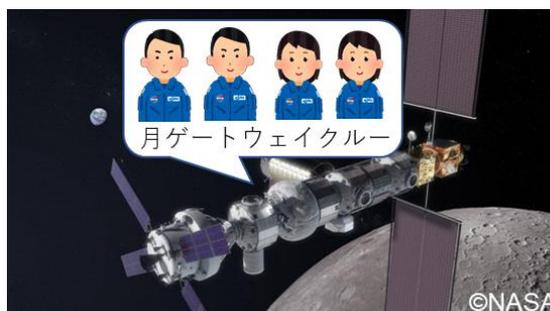


図3.12 将来の月ゲートウェイ

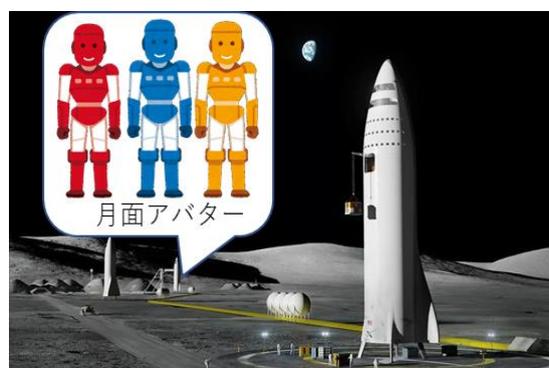


図3.13 月入植と月面基地開発イメージ*

*Space-X 月基地 α: <https://www.theverge.com/2017/9/28/16382716/spacex-elon-musk-moon-base-alpha-mars-colonization-interplanetary-transport-system>

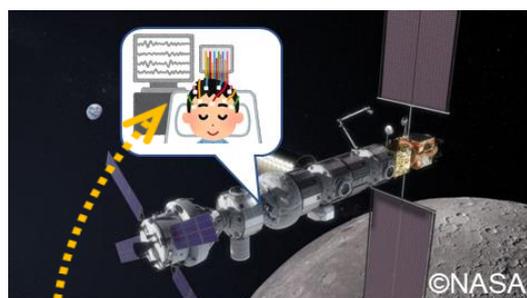
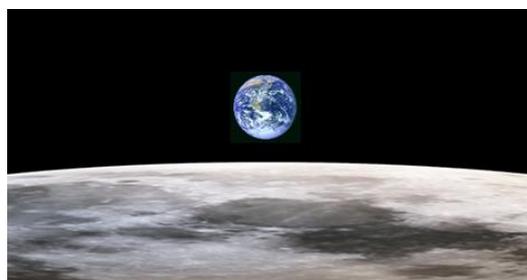
ターマシンにコネクトを開始した(UC2-1、UC2-3)。私も残ったレモンティーを排出ダクトに流し、自分のポッドに滑り込む。

<月ゲートウェイから月面へ>

地平線に目を向けると、黒い宇宙と灰褐色の地面との境がくっきりと見える。月面のアバターマシンにプラグインすると現れる景色。ボスと現場の工区に向かう。大型の掘削マシンを起動し、探査を開始する。月ゲートウェイからのスキャンデータと照らし合わせ、探査結果をフィードバックし、探査ルートを最適化していく。

残りのクルーメンバーは？今日は仮想訓練の日。月面で考え得る全ての危機に迅速に対応できるように定期的な訓練が義務付けられている。

後方で地球組の作業が始まったらしい、複数の大型インパクトドライバーの振動が月面アバターのグリップアームに伝わり、ゲートウェイの私の素手へと伝わる(UC2-1、UC2-3)。この振動は、一度、電波に変換されてから届いているのかと思うと、少しこそばゆい気持ちになる。



月ゲートウェイからの遠隔制御



図3.14 月面アバターによる遠隔作業

<地球から月面へ>

地平線に目を向けると、黒い宇宙と灰褐色の地面との境がくっきりと見える。月面のアバターマシンに地球からプラグインすると現れる見慣れた景色だ。4体のアバターマシンと共に工区に向かい、現場で3体のアバターマシンと合流する。

月組さんたちはすでに仕事を開始している。探査ルートを練っているらしい。

地球に居る自分とこの体(アバターマシン)をつないでいるのは、6Gネットワークだ。現場に着いたら、まず地球との通信状況をチェックする(UC2-1、UC2-2)。通信状況の確認が終わったら、超高感度慣性センサを搭載した自律航行ユニットをチェック。万が一ネットワークが切

れても自律的に安全動作を行うが、この屈強で高価な官給品が一時停止してしまう。月面上でアバターマシンの位置を通信だけに頼らず、6G基地局の張る高精度測位システムにより常に捕捉できることも重要だ。

複数の掘削マシンを操作しながら、落盤を防ぐ補強パネルをインパクトドライバーで効率的に組み上げていく。月面には強靱なエッジクラウドネットワークが敷設されており、脳情報も活用して、通信遅延の影響が十分に抑制されている(UC2-1、UC2-3)。そのため、地球をはるか離れたこの月で、ヒトとモノとが声を張らずに黙々と安全に協調動作できる。

今日の作業時間が終了したので、アバターマシンのメンテナンスボックスに戻り、身を横たえる。最初に見たハイコントラストな地平線を見ながら、ゆっくりとアバターマシンへの接続を解く。

地球上のビジョンに切り替わる数瞬間前、3Dカメラを冠したローバーが横切るのが見えた(UC2-3)。

誰かが地球で月面旅行を楽しんでいるのだろう。

<地球にて>

ゆっくりと月面アバターマシンから地上の自分へ意識が戻る。鎮静音楽の流れる地球上のポッドのなかで、自分の掌を見つめる。華奢で指の長い手だ。さっきまで砂塵に煤けた大きなロボットアームだったのに。

最近、B工区で中継用のシアターが完成したらしい。甥が今度、そのシアターに行くという。

いつか、いまの地下探査が完了しきれいな月面都市が完成したなら、自分も旅行者として娘と一緒に月を訪れたいと思った(UC2-4)。



地球からの月面アバター遠隔操作



図3.15 月面アバターによる遠隔作業

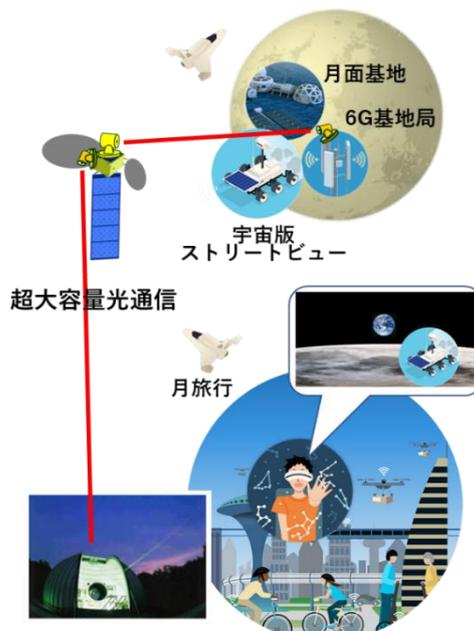


図3.16 地球からの宇宙版ストリートビュー

3.2.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術

UC2-1：6Gで繋がる月面基地

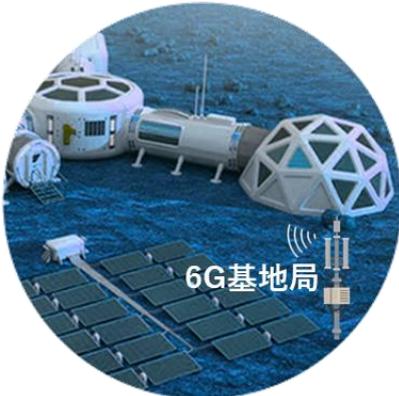
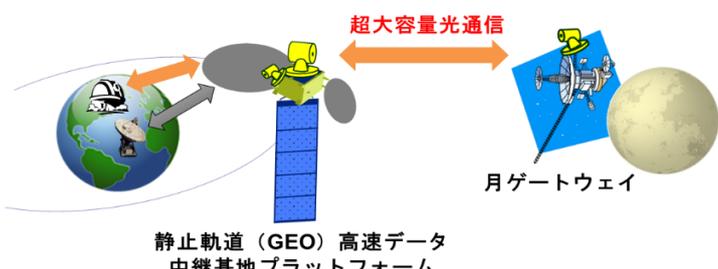
<p>どんなシステム？なぜ必要？</p>	<p>月面基地で地上と同じ6G端末が繋がり、測位可能で位置が分かる。地上よりも環境が厳しく、より人命に対する高い信頼性とセキュリティが要求される。</p>	
<p>使用条件</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 月面での厳しい環境下でも使用可能。 ● 遠隔でメンテナンスが可能。 	
<p>必要となる要素技術 *4章参照</p>	<p>(T3)月面での伝搬を考慮した周波数利用を設計、割り当てを提案 (T1)空気がないためワイヤレスで光通信やテラヘルツが活躍 (T2)バイタルデータ等の通信に向けた超多数接続技術 (T4)月面の放射線等に強い通信機器が必要 (T5)ローカル6G基地局に原子時計を内蔵し、電波で月面基地での測位が可能 (T4)民間の携帯事業者と連携して通信サービスを提供 (T6)セキュリティは地上以上に高いレベルが必要 (T4)ソフトウェア無線(SDR: Software Defined Radio)機能を持った6G基地局を月面に設置(周波数、型式可変な月面無線機) (T1)ファイバの敷設(マルチコアファイバ、建設過程に合わせて敷設、レゴリス中に埋める) (T4)鉱物・燃料・埋蔵資源、金融情報の伝送(暗号化・セキュリティ・時刻同期要) (T4)隕石の影響回避(デブリの軌道把握、レーザ軌道変更)</p>	

図3.17 6Gで繋がる月面基地

UC2-2 :月までつながる6G

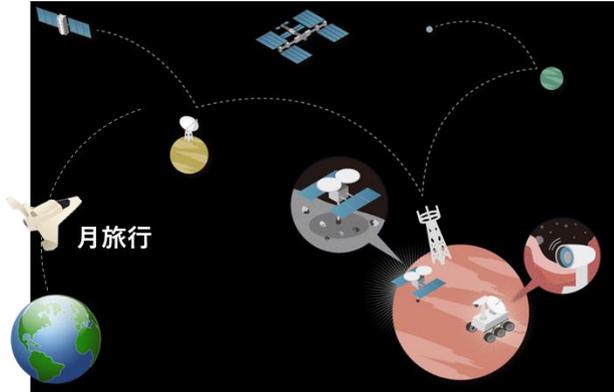
<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>月面アバターと地球のユーザ間の通信に使用するシステム。地球から月面基地まで高速通信が可能で、地上と同じ6G端末がつながる。</p>  <p style="text-align: center;">静止軌道 (GEO) 高速データ 中継基地プラットフォーム</p> <p style="text-align: center;">図3.18 月までつながる 6G</p>
<p>使用条件</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 月面ゲートウェイ経由の通信が条件。 ● 目標伝送速度5Gbps以上。 ● 地球-月間の遅延を考慮。
<p>必要となる要素技術 *4章参照</p>	<p>(T4)地球-月間の超大容量光通信 (T4)24時間、365日通信必要 (T4)静止軌道上でのデータ中継基地 (T4)民間の衛星事業者等と連携して通信サービス提供 (T4)セキュリティ考慮必要、複数の経路選択で、セキュリティと信頼性を確保 (T4)搭載用補償光学技術 (T4)搭載用大口径光アンテナ技術</p>

UC2-3 :月面でのアバター活動/宇宙版ストリートビュー

<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>地上にいるユーザが月面上のアバターにプラグインすることで月面活動を行なう。地上にいながらリアルタイムで月面工場、建設工事現場、月面試験所(材料評価、材料中の電荷の挙動)における作業が可能。ゲーム等のエンタメ(課金してサービス)や教育分野にも貢献することができ、鉱物資源の開拓・所有権、宇宙医療(アバターが遠隔手術)などにおいて、多言語による意思疎通で言葉の壁を月面</p>  <p style="text-align: right;">図3.19 宇宙版ストリートビュー</p>
----------------------	--

	でも低減する。また、衛星上にwebカメラを常備し、地上に居ながらリアルタイムの宇宙の姿が楽しめる。
使用条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 人間と人間の会話のちぐはぐな状況を検知して概念翻訳を行う。 ● 操作は音声、BMI、複数センサ等で行う。
必要となる要素 技術 *4章参照	(T1)超大容量通信 (T7)多言語翻訳 (T2,T7)低遅延が必要、脳を騙す処理、重力の補償 (T2)AIによるローカル処理。エッジコンピューティングでの低遅延制御 (T7)レジャー、ゲーム的要素、VR/XR技術 (T6)セキュリティ考慮必要(医療などに特化したものが必要) (T4)劣化の仕方が地上と異なるため耐宇宙環境の材料系の信頼性確保の必要性あり

UC2-4：月旅行

どんなシステム？なぜ必要？	<p>将来人が実際に行く月旅行において、地球や月面基地と大容量通信するためのシステムである。長期旅行中も地球のおじいちゃん、おばあちゃんと連絡が問題なく取れる安心・安全な旅行を提供する。滞在中に撮影した写真等をSNSで地球に送信、レジャーでも宇宙旅行を楽しむ時代に。</p>
	 <p>図3.20 月旅行</p>
使用条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 特別なスキルがなくても通信回線を使用可能。 ● 船外活動においては旅客用通信が切断されても安全に宇宙船に戻れるような対策が必要。 ● 地球帰還時に用いる旅客用通信にはブラックアウトの対策が必要。
必要となる要素 技術 *4章参照	(T4)宇宙天気的重要性(人体や機器に対する影響大) (T1)超大容量通信 (T2,T7)長距離テレビ会議 (T2)低遅延が必要 (T6)セキュリティ考慮必要

3.3 シナリオ3 — 時空を超えて

3.3.1 クリエイティブでアクティブな平穩



<父と長女>

うちの末娘は活発で公園でも目が離せない。こどもを見つつ、浮遊型の情報端末を呼び寄せて会社の同僚と打ち合わせを行う。野外は少し寒いな。「パパ見て！ヒューン…ぽっ。」砂場の山に石ころが突っ込んだ。娘のそばに妻の専用カメラドローンがいるのに気が付く。妻も目が離せないらしい。今日まで出張のはずだが、スマートドローンシステムにコネクして見に来たようだ(UC3-3)。信用ないなあ。

<長男>

グラスモニタ越しの先生の指導が熱を帯びる。来月、月に完成したシアターでダンスを披露する予定だ。今は自宅。AIからの休憩アラートでダンスを中断し、3Dのフィードバック画像を、視点を変えながら確認。そこには、仲間たちのダンスも重ねられている(UC1-3)。う～ん、言っただけだが、俺には才能があるな。

<次男>

兄が二階でダンスレッスンを始めたらいい。ドタドタうるさい。今日は兄の料理当番の日だが、代わることにした。スキルラーニングアシストで新しいメニューが作れるようになるのは楽しいしね(先生の正体は、どうも近所のお婆ちゃんらしい…) (UC1-1、UC1-2)。そういえば、明日、爺ちゃんの家に行くんだ。ついでに何か作って行ってやろうかな。何が好きなんだっけ？

<祖父と父>

親父は地元のカリスマ美容師だ。最近はお得意さんから頼まれたときだけ店を開いている(UC1-3)。今日は、親父の喜寿*祝いだっ(*七十七歳)。常連さんや昔のスタッフも来てまるでタレントショーみたいな盛り上がりだったな。ロードバイクと釣りが趣味で、真っ黒に日焼けした親父。いつまでも元気だな。

<家族と>

ボードゲームを終えた子どもたちが寝息を立てはじめた。出張先からお祝いに駆けつけてくれた妻も隣でウトウトし始めた。出張お疲れ様。次男は稲荷ずしを作ってきたが、親父の好物なんて、どこで知ったのだろう。人の寝顔を見たら自分も眠くなってきた。自動航行モードに切り替えて背伸びをする。滑空状態のスカイカーの車内は実に静かだ(UC3-1)。フロントガラスから月を見上げる。「うちの子が踊るシアターはどこですか？お義兄(にい)さん」。

3.3.2 Dive to the point



地上 20kmを周回する成層圏倉庫のなか。「私」は依頼を受けた荷物をバックパックに収納し、地上へとダイブする(UC3-1)。踏み出す瞬間はいつも緊張するが、踏み出すと解放感に満たされる。倉庫を出て、空が濃紺から次第に淡い青に変化し、白い雲を高速に突き抜けると、無数の川が分岐して流れる街が霞みのなかから姿を現す。よく見ると、川は小型の水門と水力発電機とを備えたより細かい用水路に分岐している。水門と発電機とはネットワーク化され、町を流れる水量はスマートに管理されている。山のむこうに黒い雨雲が見えている。今頃、広域なセンサネットワークが降雨量と河川の水位を観察・予想し、町からの適切な排水プログラムを計算していることだろう(UC3-2)。

目的地とする山間部に近づく。広大な赤松林のなかで光っているのは作業用ドローンだ。複数のロボットが間伐・回収・搬送を協調して行い、森の治水効果が最大になるように維持・管理してくれている(UC3-2)。それでも山の一部は崩れてしまい、広がる赤松林には幾筋もの赤茶色の土をのぞかせている。ドローン群が修復を進めている壊れた鉄橋が目に入る(UC3-2)。いくらスマート化を進めても、自然災害による被害はゼロにはできないのだろう。

いよいよ、目的地の公民館に到着する。公民館近くの直径5mほどの受け取りポッドに突っ込む(UC3-1)。驚くほど静かなランディング。衝撃による熱や音を回収して、効率的に蓄電する技術のおかげだ。数分の安全確認の後、私のバックパックからスタッフが救援物資を手際よく取り出す。遠くから歓声が聞こえてくる。

慣性センサと時空間同期ユニットを搭載した耐熱セラミック製の私は、一仕事を終え、つぎの落下に向け、メンテナンスボックスへと回収される。スタッフさん、橋が直ったら洗浄と、香りのよいオイルの注入をお願いしますね。次はロケットから大気圏突入もやりたいな(UC3-1)。

3.3.3 空を行き交うのは



<孫娘>

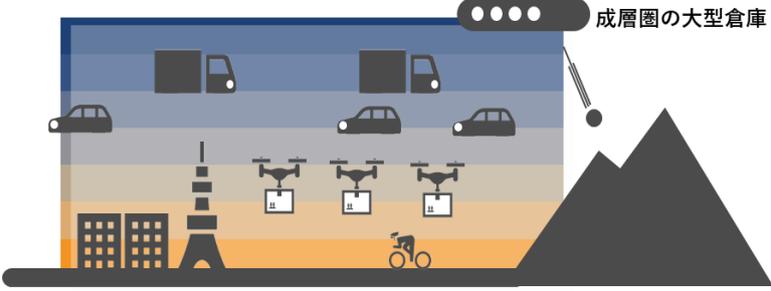
コーヒーを入れ、自宅のデスクに座る。雀の鳴き声と冷えた空気がすがすがしい。ワイドスクリーンに向かい、昨晚仕上げた課題のレポートを静かに読み返し、修正を加えていく。キーボードはそこにはない。キーボードプログラムをタップし、モーションキャプチャで、入力情報はエッジクラウドに送信される(UC3-3)。騒がしいのはロードバイクをチューニングアップしている祖父の作業音だけ。七十七歳なのに元気。そろそろ海外の大学で教鞭をとる時間。レポートを提出し、頭を学生から講師へと切り替える(UC1-3)。従弟の作った稲荷ずしを食べながらヘッドセットに手を伸ばす。一昨日、祖父の好物を彼が訊いてきたのはそういうことだったのかと今更に気が付く。何気なく掌に目をやる、華奢で長い指。父に似たのだろう。

<祖父>

チューニングアップの完了したロードバイクにまたがり、二階にいる孫娘に声をかける。「ちょっと、出かけてくる!」。返事がなかった。講義の時間か、申し訳ないことをした。大きな幹線道路を、私は全速力で進んでいく(UC3-1)。真新しい紫のパーカーのフードがたなびく。風が心地よい。道路に自動車はいない。軽量の宅配ドローンは低層域、個人用乗用車は中層域、大型の輸送機は高層域を飛ぶ。さらに成層圏には大型の倉庫が周回しており、遠隔地には、そこから荷物を直接届けることもできるらしい(UC3-1)。私の走る道に輸送用の大型スカイカーが影を描く。私はその影に引き離されまいとさらにペダルを踏みこんだ。雨雲レーダーのアラートに気づいて自宅に戻ろうとすると(UC3-2)、大きな土砂崩れのあった山に向かって、一筋の光が空に軌跡を描いた(UC3-1)。

3.3.4 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術

UC3-1：バーティカル ヒト・モノ・コト流

<p>どんなシステム？なぜ必要？</p>	<p>スカイカーは夢のある技術である。身近では、すでにドローン宅配が始まりつつあり、将来的には成層圏からの宅配も実用化されるかもしれません。空間を3次元的に移動しようとする、地図に頼れず、3次元的なナビゲーションが必須である。そして、人や重量物を運ぶなら、そのナビゲーションは極めて信頼性の高いものでなくてはなりません。従来の全球測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)に加え、エッジコンピューティングが可能な多数の基地局のアシストやスカイカー自身のクロック・慣性センサの高安定・高精度化などで測位・巡航システムを多重化していくことが重要となる。</p>
<p>使用条件</p>	<p>空間に、見えないけれど、堅固な道路を構築していくこと。それは、高精度な時空間同期の技術と測位用基地局の空間的な、そして周波数的な多重化を進めることを意味する。もちろん、空を行く車自身の安全性のため、各種センサの高精度化やサイバーセキュリティの高度化を実施することが重要である。</p>
<p>必要となる要素技術</p>	<p>(T5)時空間同期技術 (T6)暗号化・セキュリティ技術、レジリエンス (T1)超高速・大容量通信 (T2)超低遅延なネットワーク (T2.1)エッジコンピューティング (T7.5)エッジ AI 行動支援 (T7.7)乗用スカイカー (T7.8)ドローン</p>
 <p>成層圏の大型倉庫</p> <p>図3. 21 バーティカル ヒト・モノ・コト流</p>	

UC3-2 : レジリエント里山

<p>どんなシステム?なぜ必要?</p>	<p>治水は人口減少の局面で、解決の難しい問題を投げかける。人間のその場の判断だけでは、最適解とならない場合も出てくる。高密度に配置されたセンサネットワークで降水量を広範囲・高精度に把握できれば、住民避難の迅速化・効率化に役立つ。また、用水路や水門を並列化し、ネットワークでつなぐことで、町からの排水をスマートに実施することができるでしょう。間伐作業は森の治水機能を高めるために重要である。複数の無人ロボットを同期制御し、効率的に間伐作業を進めることで、森を理想的な状態に維持する。このロボットの協調作業は、農業にも展開でき、里山の維持管理にも機能する。</p>
<p>使用条件</p>	<p>いままで、十分に連携の取れていなかった豪雨予想や住民避難、ダム の放流、各種用水路の水門制御、これらを大規模にネットワーク化することで、人手のかからない水害に強靱な街づくりを提案することができる。多数の無人ロボットを同期させ、協調作業させることで、間伐などの森林の保全や、農作業の効率化による里山の維持を継続的に実施することも可能になるでしょう。</p>
<p>必要となる要素技術</p>	<p>(T5)時空間同期によるロボット群協調 (T6)暗号化・セキュリティ技術 (T6)レジリエンス強化 (T1)超高速・大容量通信 (T2)超低遅延なネットワークと高速画像処理 (T6)センシング</p>
<p>ネットワーク化された治水ネットワーク</p> <p>雨雲観察と豪雨予想</p> <p>分散化されたマイクロ水路とスマート水門</p> <p>分散化されたマイクロ水力発電機</p> <p>間伐ロボット</p> <p>搬送ドローン</p> <p>同期ロボット群による協調作業</p> <p>無人運搬車両</p> <p>搬送ドローン</p> <p>無人トラクタ</p> <p>図3.22 レジリエント里山</p>	

UC3-3： オムニクラウド・ゲートウェイ

<p>どんなシステム？なぜ必要？</p>	<p>今までクラウドはつなぎに行くところであったが、エッジコンピューティングが進み、私達がクラウドに包みこまれるオムニクラウドの時代が来る。このオムニクラウドは計算資源、情報資源、通信資源、さらには電力資源を私達に提供してくれるが、その際に重要になるのがクラウドと自分をつなぐゲートウェイである。例えば自分のそばに寄り添うドローンがセキュリティゲートウェイとなり、個人情報をしっかりを守りつつ高度なクラウドサービスを手ぶらで受け取ることができるようになる。</p>
<p>使用条件</p>	<p>超高安定クロックとドローンの発信電波で高精度な測位を実現する。高精度なジャイロで姿勢制御された複数のドローン間で画像合成することでユーザの位置も同定し、サービスを映像や音声等で提供する。用途に合わせてセキュリティレベルをローカルかつダイナミックに再配分することでリソースの再配分効率化することも可能になるでしょう。</p>
<p>必要となる要素技術</p>	<p>(T5)超高安定クロックと高精度同期 (T6)プライバシー保護・セキュリティ技術 (T1)超高速・大容量通信 (T2)超低遅延なネットワーク、高速画像処理 (T7.8)マイクロドローン (*) (NICTでは扱っていない技術) 高精度慣性センサ</p>

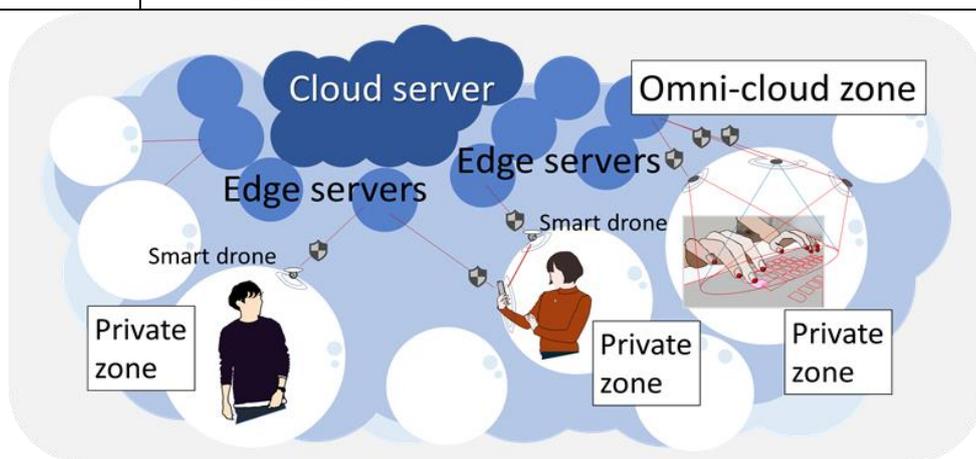


図3. 23 オムニクラウド・ゲートウェイ

3.4 シナリオ4 — サイバー世界の光と影

3.4.1 サイバーお悩み相談室

私の名前は海辺鷗外。サイバー世界で迷えるクランケ(クライアント)の悩みを聞いてケアをすることを生業としているメタバース専門の心療カウンセラーだ。昨日メタバース・バーで大学時代の友人と遅くまで飲み過ぎたのとブルーマンデーのせいでやる気がでないが、お陰様で最近クランケが多くてちょっとでもサボると1日でさばききれないので、今日も朝から真面目にやるしかないか…。

メタバースの自分アバター(仕事用)にジャックイン(接続)すると…、ああ今日も20人も待ってる…。クランケは自分の番がきたら接続するだけなので待ち時間がなくてよいけど、こちらはちょっとでも休むとさばききれなくなるし…、などとぶつぶつ言ってる間に一人目のクランケのアバターが目の前にあらわれた。

【一人目】女性 35歳 保険販売員

(クランケ)私はメタバースで空飛ぶ車のテレマティクス保険の販売員をしています。今日もクライアントに商品の説明をしていて、「AIが推測したあなたの将来の保険ニーズを元にカスタムメイドで設計された商品だから、あなたに合わせてあるので絶対損はないですよ」と説明したのですが、「俺の未来がAIになんかにわかるもんか、俺の人生は俺が決めるのであってAIじゃない、何が正しいか、何が真実なのか、俺が俺の目で見たものしか信用できない」といわれて、お客さんに怒られちゃったんですよ。



でも確かにAIが勧めてくる商品は一見合理的に見えて信頼できそうなんだけど、自分の人生が見透かされているみたいで何か気持ち悪いですね。それにデジタル生活促進者(Electronic Life Facilitators、ELF)っていうAIエージェントが相手の表情や話し方から感情を読み取って、お客さん毎にカスタマイズした人格になって心地よく商品を買ってもらうようにするやり方って、その人の人生をAIがコントロールしているようにも思えちゃって…(UC4-1)。そもそもAIが判断する基準もそのAIの設計者が正しいと思った基準で作っちゃってるってことだから、そもそもその設計者にバイアスがあれば、そのバイアスがAIにも反映されてしまいますよね…(UC4-2)。リアルからサイバーに生活の拠り所が移ってから、何を信用していいかだんだんわからなくなって不安で仕方ないんです。

(海辺)それはご不安でしょうね。商用のAIは全て説明可能なAI(explainable AI、以下xAIと略す)とすることが法律で義務付けられていますし、バイアスについてもxAIの特徴量(何を元にそう判断しているか)を比較することができるようになっていますので、自分

で好みの AI を選ぶようにお勧めするのもありかと思いますね(UC4-2)。あなたの場合は、少しお仕事を離れたところで、リアルで友達と旅行とかで話したり飲んだりして、サイバーリアルバランスを取るのが大事かもしれませんね。

(クランケ)そうですね、リアルな人づきあいはいろいろ面倒なところもあるけど、それも人生の一部だと考えるとやっぱりリアルな人のつながりの方が安心ですね。ありがとうございます。もう最近では AI エージェントの性能も上がってきて、アバター越しだと何だかリアルの人なのか AI エージェントなのか区別がつかないようにも思えて…。あの～先生、まさか先生も AI エージェントじゃないですよね？

(海辺)いや、私はこの認証画面の通り正真正銘のリアル人間のアバターなので、ご心配なく…(UC4-3)。お大事に。

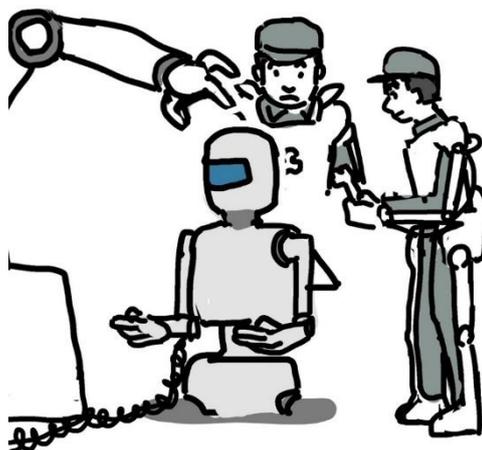
やれやれ、AI エージェントが優秀になるほど、このようなクランケが沢山でてきているような気がする。最近では、AI エージェントの勧誘方針の開示義務が厳密化したので、このクランケのような心配は解消していくだろう…。でも確かに最近、人工意識の性能がどんどん上がってきていて、自分のような仕事がだんだん危うくなっているように感じるのは気のせいかな…。

所見・措置:

軽いサイバー不信症候群の疑い。リアルで連続 48 時間以上の休息を指示。

【二人目】 男性 40 歳 ロボット組立工員

(クランケ)こんにちは。私は主に在宅勤務で人型ロボットを組立てる作業員なんですが、仕事が終わってから寝るまでの時間の殆どをメタバース上の趣味のスペースで過ごしてしまうんです。AI エージェントの仲間と過ごす時が本当に楽しくて、こちらの感情を読み取ってこちらに合わせて対応してくれるし、気兼ねなく癒やしてもらっている感じがするんです。それに、メタバースでみんなと同じ瞬間を過ごして同じ感覚や感動を共有しているというか、「共時性」と言うんですかね、今まで「虫のしらせ」とか「第六感」とか言われていたものがメタバースで実際に起こってるので、もうそれは鳥肌ものです



よ。でもその時にホットな話題はどんどん時間とともに変わって行って、ちょっとメタバースから離れて戻ってくると、もう話についていけないこともあって、仕事でも早く仕事が終わってメタバースに戻らなくちゃ、と思ってしまいますね。

それに、ナッジとか行動変容っていうんですかね、あなたの日頃の行動をこう変えたら地球温暖化防止にこれだけ役に立ちますよとか勧めてくれて、実際にそれを続けると自分の貢献

分が目に見えるように示してくれるので、毎日続けられちゃうんですね(UC4-4)。

それに、以前職場で事故があって、組み立てのロボットアームがバランスを崩して倒れて、下にいる作業員が巻き込まれて怪我しちゃったことがあったんですけど、アームが倒れる時に巻き込まれる作業員が最も少なくなるように自動操作されて、でも結局怪我をした奴がいて、そいつが「なんで俺の方にわざわざ倒れたんだ！」と怒っちゃって…。それでこの件を AI エージェントに相談したら、その国の法律や倫理観や価値観に合わせてそういう時にどういう動作をするのかが予めプログラムされているって話らしくて、そりゃ合理的だなと思ったんです(UC4-2)。これが人間だと絶対めめ事になるけど、神プログラムって感じですね…。

ああちょっとしゃべり過ぎましたね。これだけサイバーの世界で楽しく暮らせるなら、面倒なリアルの世界なんていらぬように思ってるんですけど、人間の友達から、おまえは異常だっていわれるんですよ。私って、何か間違ってますかね？

(海辺)そうですね…。ナッジで行動変容することは無理なく持続可能な社会実現に貢献できることなので結構なことですが…、ちなみに毎日どのくらいメタバースで過ごしていますかね？

(クランケ)仕事でもオフの時間もずっとメタバースの中ですね。

(海辺)メタバースでの滞在時間が 3 時間を越える毎に 30 分間リアルに戻ることが国の法律で義務づけられていますよね。サイバー世界での滞在が連続 3 時間を越えると、サイバー依存症になる可能性が高くなるといわれていますので、そこは注意していただきたいですね。あと、AI は神と仰いましたけど、AI は神でも何でもなくて、単に作り手の意図通りにプログラムで動いているだけで、そのプログラムは倫理観や価値観に沿って一応作られていますけど、あくまで会社の想定した倫理観や価値観であって、従業員一人一人やユーザの倫理観や価値観はそれぞれ違いますので、そんなに単純ではないんですね。AI が絶対正しくて人間は間違っているとか、倫理観や価値観も AI に任せるとかの域に入ってしまうと、自分を失ってしまうことにもつながりますので気をつけないといけません。それで、サイバーからリアルに戻った時の生活に特に支障は感じていませんか？

(クランケ)そういえば、メタバースで過ごしている間は、仕事で遠隔操作しているロボットアームで重いものを動かす感覚とか、AI エージェントの彼女と無限に楽しく会話が続く感じとか、なんか全能感的な感覚がほんと半端ないんですが、リアルに戻るとそれが急になくなって感じがして、世の中から断絶されて自分が無力のように思えて強い喪失感とか不安感が出てしまうんですよ。メタバースから離れていると流行から置いて行かれるように強く感じますし、最近はサイバーとリアルの境がわからなくなるというか、区別がつかなくなるが多くなっちゃって…。

(海辺)それって…、メタバースを通じて工場で働いている時もリアルと区別がつかないほど臨場感があるので無理もないですが、人間の脳はサイバーの世界とリアルの世界との行き来する時に慣れるまで時間がかかりますから、メタバースからジャックアウトする前にリアルに戻るためのリカバープログラムを実施する必要があるのは従事免許を取る時に習ったかと思

いますが、今のあなたの症状は、そのリカバープログラムをしていない時の典型的な症状ですね。そんなことを続けているとサイバー滞在基準法違反で従事免許を停止されてしまいますよ。あと、お話を伺っていると、あなたは既にサイバー世界への依存が相当進んでいるようですね。(クランケ)え、そうですか…。

(海辺)2020年頃からAI検察官など法の執行の一部をAIに委ねる試みとか、自動運転時の非常時における倫理観や価値観に沿った回避制御など技術面はどんどん進んでいったけど、こういうクランケの存在を知ると、やはり新しい技術は、技術的な側面だけでなく、倫理や法律や社会の側面からもしっかり検証して、多くの人にどうやって受容してもらうかを事前にしっかり考えないといけないとつくづく思い知らされるなあ…。我々カウンセラーはクランケの症状がメタバースの不具合に由来することが疑われる場合には直ちにメタバース共同運営体(Metaverse Operation Community, MOC)に報告する義務も負っているのです、後でレポートを送らなくちゃ。

所見・措置:

(相当重度な)サイバー依存症候群の疑い。

サイバー依存症リハビリ科へ診療情報提供書(紹介状)を転送し、医療保護入院を依頼。

3.4.2 ユースケース事例と潜在する課題

UC4-1: AIエージェント

課題の概要	例えば、メタバース上での AI エージェントが人間に対面販売するような場面において、相手の表情や声の抑揚を読み取って感情の状態を把握しながら、その感情や話の進み具合に合わせて相手に合わせて擬人化された人格を変化させ、最後まで心地よく会話を進めることで商品の販売など最終的な目的を達成するような AI エージェントの技術開発が今後進むと考えられるが、その場合、特定の消費者個人をターゲットとして個人的興味や信念、習慣、気質、などを分析してデータ化することはプライバシー保護の観点から好ましくないことから、個人データの分析と保護をうまく両立できるような仕組みの検討が必要となる。
”【コラム】いずれメタバースは、あなたをモニタし行動を操作する世話役 AI「ELF」で埋め尽くされる”, TechCrunch, 2022.1.23. https://jp.techcrunch.com/2022/01/23/2022-01-12-the-metaverse-will-be-filled-with-elves/	

UC4-2 AIにおける公平性、説明責任及び透明性(FAT)、倫理観や価値観の課題

課題の概要	<p>AI/機械学習(特にニューラルネットを用いたもの)において、うまく予測や推論ができるモデルが作られたとしても、なぜそのモデルがそのような予測・推論をしたのかを人間が説明するなど、解釈することは一般的に困難である。そうすると、AI/機械学習による制御によって自動車等を完全自動運転する場合に、事故を起こさないことを理論的に説明できないことになる。そこで、予測・推論結果に至るプロセスが人間によって説明可能であるなど、アルゴリズムそのものが、人間が解釈できる仕組みであるような、説明可能な AI (xAI)の研究開発が進められている。さらに予測・推論結果にバイアスがないことを説明できること(公平性:Fairness)、予測・推論結果に到った根拠が説明できること(説明責任:Accountability)、モデルがどのように機能するかを説明できること(透明性:Transparency)とあわせて「FAT の原則」と呼ばれるものを含め、人間中心の AI 社会原則に関する検討が進められている。</p> <p>また人の代わりに自動車を AI によって制御する場合には、これまで運転者の価値観や倫理観に基づき運転する操作などを AI などの機械が代行することになり、その際にその価値観や倫理観をどのように具体的に制御アルゴリズムに反映させるか(そもそも反映させないのか)、などの検討が今後進められると考えられる。</p>
-------	---

”人間中心の AI 社会原則”，内閣府統合イノベーション戦略推進会議,2019.3.29.

<https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aigensoku.pdf>

Ethically Aligned Design

<https://ethicsinaction.ieee.org/#ead1e>

UC4-3 アバターの本人認証

課題の概要	メタバース内のアバターは、その操作をしている実体が目に見えないだけに、そのアバターを操っているのが人間なのか AI なのか、また、例えばメタバース内での労働管理のニーズなどから、アバターを操っている人間が誰なのかを明確にする必要があるケースがある。そのような場合に、何重もの生体認証などを経て、確実にその人のアバターであることを認証する技術開発が進むと考えられる。
-------	--

UC4-4 ナッジによる社会的課題の解決に向けた行動変容

課題の概要	人の認識を変え、行動を促すための手段として、「ナッジ (nudge)」という考え方がある。英語では、「肘で突く、そっと後押しする」という意味で、経済的なインセンティブではなく、行動科学の知見に基づいて、人々が社会、環境、自身にとってより良い行動を自発的に選択するよう促す政策手法として注目されている。Beyond 5G においても、サイバーとフィジカルのループにおいてナッジによる社会解決に向けた行動変容を促す仕組みを取り入れることにより、SDGs の達成に繋がることが期待されている。
”CSR を巡る動き:「nudge(ナッジ)」がもたらす行動変容 SDGs 達成への気付き”，日本総研, 2019.7.4. https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=34742	

第4章: Beyond 5G/6Gの実現に必要な要素技術

4.1 ユースケースを可能にする要素技術群

第3章では3つのシナリオと、それぞれの中でいくつかのユースケースを紹介した。第4章では、これらのユースケースを支える要素技術について説明する。ここで紹介する要素技術を表4.1にまとめる。

表4.1 Beyond 5G/6Gの実現に必要な要素技術

T1. 超高速・大容量通信		T5. 時空間同期	
T1.1	テラヘルツ波	T5.1	無線時空間同期
T1.2	オール光ネットワーク(大容量光ファイバ通信)	T5.2	原子時計チップ
T1.3	オール光ネットワーク(光・電波融合技術)	T5.3	基準時刻の生成共有技術
T2. 超低遅延・超多元接続		T6. 超安全・信頼性	
T2.1	エッジコンピューティング技術	T6.1	エマージング・セキュリティ技術
T2.2	適応型無線網構築技術	T6.2	実攻撃データに基づくサイバーセキュリティ技術
T2.3	適応型無線網アプリケーション技術	T6.3	量子暗号
T2.4	電波放射空間の自律的な局所化・追尾・予約技術	T6.4	電磁環境技術
T2.5	超多段接続自律M2Mネットワーク構築技術	T6.5	レジリエントICT
T3. 有無線通信・ネットワーク制御技術		T6.6	センシング
T3.1	ネットワーク制御技術(ゼロタッチ自動化)	T7. 超臨場感・革新的アプリケーション	
T3.2	周波数の割当・共用管理	T7.1	脳情報の読み取り・可視化・BMI技術
T3.3	自営無線システム管理(ローカルBeyond5G)	T7.2	直感性の計測・伝達・保証技術
T3.4	高度電波エミュレーション	T7.3	リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術
T4. 無線システムの多層化ーNTN		T7.4	言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術
T4.1	衛星・非地上系通信プラットフォーム	T7.5	エッジAI行動支援
T4.2	光衛星通信	T7.6	多言語の同時通訳・言い換え・要約技術
T4.3	海上通信	T7.7	自動運転
T4.4	海中・水中通信	T7.8	ドローン
T4.5	多層ネットワーク連携制御		

4.2 各要素技術の概要

4.2.1 超高速・大容量通信

T1.1 テラヘルツ波

1	どんな技術	これまで技術的な問題で十分に利用することができなかったテラヘルツ帯＝電波と光の中間の周波数帯(およそ100GHzから10THz)の電磁波を使いこなせるようにする技術である。
2	何故必要か	従来の無線通信周波数より更に高い周波数のテラヘルツ波を利用することで従来の10倍以上の高速大容量の無線通信が可能となり、4Kや8K等の高精細映像伝送等に威力を発揮する。またテラヘルツ波ならではの特性(短レンジ・超広帯域)を生かした干渉に強い通信も期待される。
3	国内外現状	テラヘルツ波を取り扱う技術はまだ十分ではありませんが、半導体デバイス技術を用いた300GHz帯無線通信の基盤技術や、光技術を用いたテラヘルツ信号発生、変復調技術が開発されている[1][2]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	技術基盤を確立するために、電波技術と光技術の両面からのアプローチにより、テラヘルツ波を扱うための各種要素技術(半導体デバイス、電子回路技術、アンテナ技術、計測技術、信号源技術、A/D変換技術等)を成熟させる必要がある。また実用化のため、消費電力や小型化を実現する技術も必要となる。

[1] NICTプレスリリース:「毎秒80ギガビットのデータ伝送を可能にするシリコンCMOS集積回路を用いた300ギガヘルツ帯ワンチップトランシーバの開発に成功」2019年2月19日 <https://www.nict.go.jp/press/2019/02/19-1.html>

[2] NICTプレスリリース:「超小型アンテナを使用した300GHz帯テラヘルツ無線通信に成功」2021年1月13日 <https://www.nict.go.jp/press/2021/01/13-1.html>

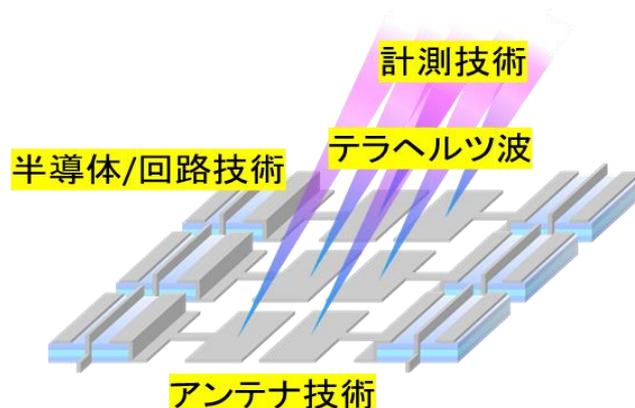


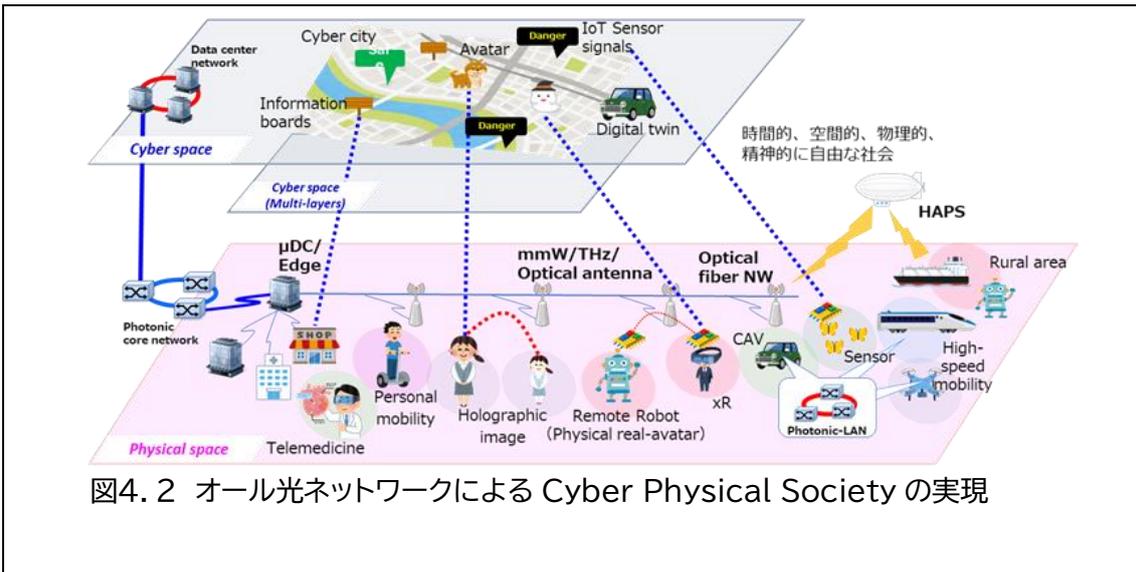
図4.1 テラヘルツを扱うための要素技術。

T1.2 オール光ネットワーク(大容量光ファイバ通信)

1	どんな技術	細いガラスの繊維である光ファイバを使って、非常に多くのデータを何千kmも遠く離れた海外まですぐに届けることができる技術である。家庭や企業のネットワーク、携帯電話網、日本と海外をつなぐ海底ケーブルなど、広く使われている。
2	何故必要か	家庭でリモートワークをしたり動画配信サービスで映画やアニメを楽しんだりする人が増えると、多くのデータが通信ネットワーク上でやり取りされるようになり、データの渋滞が発生する。このため、スムーズにデータを運べるように大容量光ファイバ通信が必要である。
3	国内外現状	現状の光ファイバ通信システムでは、光ファイバ1本あたり最大で10Tbps程度の伝送容量が実現されている[1]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	将来に向けて増加を続ける通信データを支えるために、2030年代の基幹ネットワークでは、光ファイバ1本あたり100Tbps以上の伝送容量、その後、1Pbps以上の伝送容量が要求される。
[1] 総務省「将来のネットワークインフラに関する研究会」報告書		

T1.3 オール光ネットワーク(光・電波融合技術)

1	どんな技術	IoT機器やモバイル端末などの無線区間で発生する大量のデータを光ファイバネットワークへ、またデータセンターやエッジサーバなどで処理された大容量データを光ファイバネットワーク経由で無線区間へスムーズに流通させるための技術である。
2	何故必要か	運動や買い物など、身近な生活では「少し動く」ことが多くあるが、その時にも通信の品質が落ちないようにしたいものである。将来のサイバーフィジカル社会を高度に具現化するためには、無線通信と光ファイバ通信をうまく融合しながら、可用性の高い大容量情報通信を利用することが必要となる。
3	国内外現状	ITU-Tのホワイトペーパー：“ITU-T SG13 FG-NETWORK2030 Network 2030 Vision White Paper“ では、ホログラフィック・ソサイエティとしてTbps級大容量情報通信の必要性が議論されている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、数10km程度の中短距離の領域で、光ファイバ通信区間と無線通信区間が低遅延で隔てなく接続され、5Gの10～100倍程度に相当する100GbpsからTbps級の大容量情報通信を可能とする通信システムとそれを支える光・電波融合デバイスが要求される。



4.2.2 超低遅延・超多数接続

T2.1 エッジコンピューティング技術

1	どんな技術	街中に埋め込まれたデバイスやネットワーク内のコンピュータを活用して、超低遅延で信頼性高くICTサービスを実行する技術である。
2	何故必要か	例えば出会い頭の事故を回避する処理をネットワークを介して遠くのクラウド上のコンピュータで実行させている間は間に合わない、また経路ネットワークの輻そうで通信が滞るといった課題がある。また便利にはなっても、機密や身体情報を外部ネットワークやクラウドに漏洩させたくない。そのため高い安全性も併せて必要となる。
3	国内外現状	欧州電気通信標準化機構 (ETSI: European Telecommunications Standards Institute)がMEC (Multi-Access Edge Computing) にてエッジコンピューティングの標準化・5Gにおける提供形態等を規定。総務省での「Beyond 5G時代の有線ネットワーク検討会」にて「ネットワークビジョン 2030」が示され、エッジコンピューティングによる超低遅延、大容量通信の必要性が提言されている。5G Americasでは、ホワイトペーパー「5G At The Edge」にて将来の方向性として情報指向ネットワーク技術の連携を含めたエッジコンピューティングアーキテクチャの将来の方向性を提唱している。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実用化においては、超低遅延の応答と情報の完全性・信頼性・安全性の高さのトレードオフ解決、超多数デバイスがネットワーク接続・連携動作するネットワーク・コンピューティングを実現するスケラビリティが求められる。

T2.2 適応型無線網構築技術

1	どんな技術	状況や要件に応じて、無線機が連携し高度な作用を実現するために電波型式、通信タイミング、中継経路等を制御する技術である。
2	何故必要か	IoT、モノ主体システム等を含める多様な無線システムに不可欠の技術であり、以下の要件を満足できる。1) 通信環境に即応して高速伝送性・ロバスト性を調整し、通信を効率化する。2)通信タイミングの制御により衝突・輻輳を回避しながら、省電力動作や低遅延伝達を可能とする。3) 無線機間で制御情報を交換し中継経路を自律分散的に確立することで、通信可能エリアを拡大する。
3	国内外現状	NICTによって主導的に標準化された IEEE 802.15.4(物理層およびMAC層)、IEEE 802.15.10(L2R)等の標準規格が存在する。さらにこれらの標準規格を参照した世界初の認証規格であるWi-SUNが策定済み(NICTは発起人メンバ)である。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、電池無交換で10年以上動作といったようなヒトの範疇を超えた要件を満足できること、非常に多数の無線機連携を実現するための自律分散動作が可能であることが必須である。

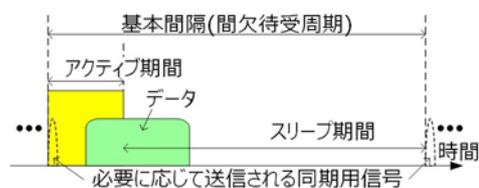


図4.3 省電力化のための間欠待受け動作



図4.4 省電力動作実証(左:漁業、右:農業)

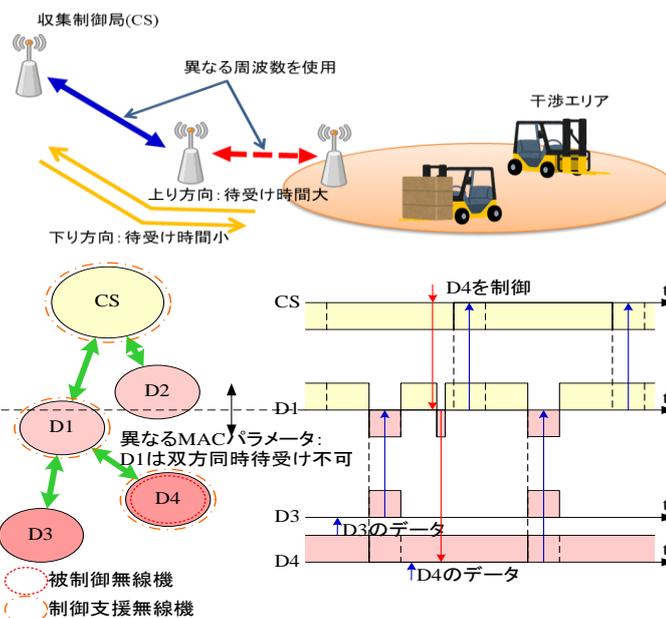


図4.5 網内異種無線適用

T2.3 適応型無線網アプリケーション技術

1	どんな技術	状況や要件に応じて、複数無線機が連携し高度な作用を実現するためのセッション管理、時刻同期、アプリインタフェースを実現するための技術である。
2	何故必要か	IoT、モノ主体システム等を含める多様な無線システムに不可欠の技術であり、以下の要件を満足できる。1)優先順位を考慮したセッション管理とトラヒック調整により、情報交換を最適化する。2)広域基幹網等を経由して無線機間の通信を実現するとともに、無線機間の時間同期を想定サービスに応じて補償するための制御を行う。3)通信を成り立たせている無線機群のつながりを視覚化するとともに、膨大な無線機の設定を操作者が適切かつ効率的に行うためのアプリインタフェースを実現する。
3	国内外現状	ECHONET LITE(セッション層以上)等の標準規格が存在する[1]。

4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、上位層動作を保証するためのアプリ上の時刻同期に加え、適切なユーザインタフェースの確立が必要である。
---	--------------------	--

[1] ECHONET Lite, <http://www.echonet.gr.jp/spec/>

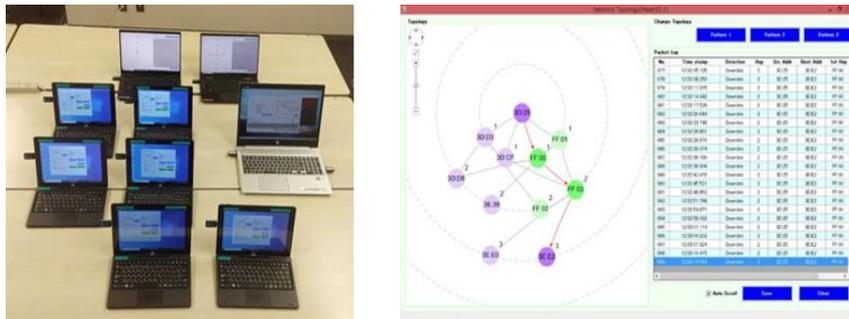


図4.6 無線機動作を視覚化するアプリインタフェース(左:無線機群、右:つながり状況)

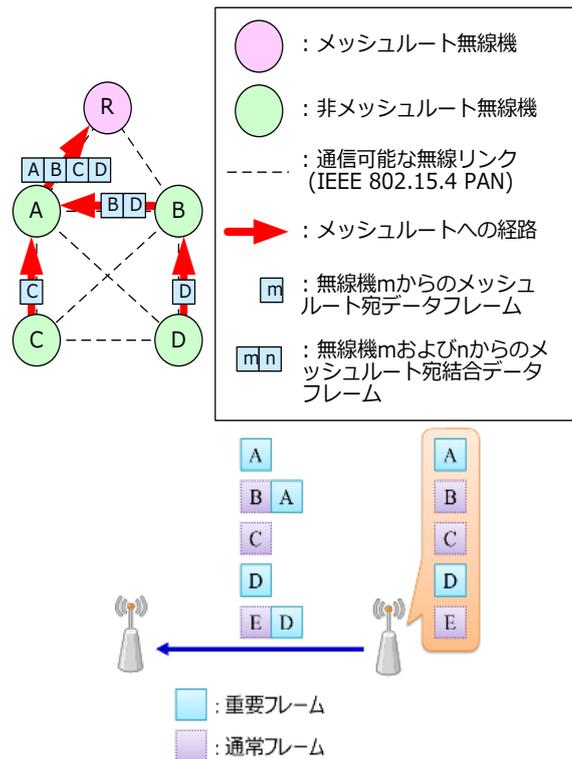


図4.7 フレーム連結アプリケーションの概要

T2.4 電波放射空間の自律的な局所化・追尾・予約技術

1	どんな技術	電波を使って情報を伝送しようとする移動デバイスが、自律的ないしは他デバイスとの協調的な手法で必要最小限の電波放射空間の算出を行い、その結果に基づいた電波放射空間の局所化と移動に伴う追尾制御を行う技術をコアに、移動デバイスの未来の振る舞いまでを予測したうえで、電波資源の利用を必要とする空間と時間を高精度に予約(スケジュール)して用いる周波数資源共用技術である。
2	何故必要か	物理的な電波放射空間を必要最小限とする制御を行うことで、超高密度デバイス間通信環境下での耐干渉性(信頼性)とセキュリティ性を同時に高めることができる。また、サイバー空間におけるデバイスの移動予測技術と統合されることで、未来の通信混雑に備えた通信品質の確保が可能となる。
3	国内外現状	電波放射空間の電子的な局所化・追尾技術については、パッシブないしはアクティブビームフォーミング技術として携帯電話システムやWi-Fiシステム等で実用化されており、また5G無線通信システムにおいては、Massive MIMO技術としてコア技術となっている[1]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、計画外の空間における電波の実効輻射電力(EIRP: Effective Isotropic Radiated Power)を超高感度受信デバイスであっても情報が復元できないレベルにまで十分に低減しながら、更にモノの移動に合わせて自動的に追尾できること(歩行速度レベル)が求められる。またデバイスの未来の移動先への到着時刻や移動先における電波伝搬環境を高精度に予測して、最適な電波放射空間の予約が μ 秒精度で可能となること等が求められる。
[1] “5Gマルチアンテナ技術“NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル Vol. 23 No. 4, Jan. 2016.		

T2.5 超多段接続自律M2Mネットワーク構築技術

1	どんな技術	デバイス同士がすれ違う際に自動的に情報を共有する「すれ違い通信方式」によって、屋内外に遍在する多様な社会資源(固定資源や移動資源)、ないしはそれらが備える超多数デバイスが自律的に(もしくは要求を受けて)つながり、超多段中継型のM2M(Machine to Machine)ネットワークが自律的に構築される技術である。
2	何故必要か	通信キャリア会社等が運用する基地局や通信インフラ等の設備がなかなか行き届かないエリアや、敷設そのものが難しいエリアでも、超広帯域な遅延耐性ネットワークを広範囲に極めてエコに構築できる。(モノによる自律参加型センシング&ネットワーク構築プラットフォームとも言える)

3	国内外現状	近隣に位置する多数デバイスが互いに自律的に多段接続されてメッシュネットワークを自動的に構築可能な通信規格や方式が複数存在する。事例として国内ではスマートメータ分野で、主にサブギガ帯の周波数を用いて数百～千台クラスのネットワーク運用が実用化[1]されている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、1)伝搬経路に関わる超多段中継デバイスや情報伝搬に適した周波数を環境条件等に応じて自律的に発見・リソース確保・管理できる、またそのためのAPI(Application Programming Interface)と適切なユーザインタフェースを有すること、2)上記に関わるリソース確保・管理において、一定の時刻同期性能・時刻同調性・信頼性を担保できること、3)消費価値が既に消滅した情報や規律に違反する情報等の流通を自律的に削除できる機能を有することが求められる。
[1] “スマートメータ向け無線メッシュネットワーク技術” 三菱電機技報 Vol.86, No.11, 2012.		

4.2.3 有無線通信・ネットワーク制御技術

T3.1 ネットワーク制御技術(ゼロタッチ自動化)

1	どんな技術	様々なサービス要求に対応可能な持続的に発展するネットワーク技術。具体的には、コアネットワーク、無線アクセス網や非地上系ネットワーク (NTN) など、異なる種類の複数のネットワークのドメインに跨って、E2E (End-to-End) のサービスのプロビジョニングをゼロタッチで自動化を行う技術や、AI/機械学習ベースの高度データ分析機構を用いたネットワーク運用完全自動化技術などである。
2	何故必要か	異なる種類の複数のネットワークのドメインに跨って、E2E サービスを実現するために必要な技術である。このため、各々のネットワークドメインの上位に階層化されたクロス・ドメインのマネジメント機能を設けることにより、E2E サービスを実現しているもの。
3	国内外現状	ゼロタッチ自動化の枠組みが、欧州の標準化団体である ETSI の ZSM (Zero-touch network and Service Management) によって検討[1]されている。また、ネットワーク機能の仮想化を、オープンソースベースで提供するための、オープンソース MANO (OSM) のリリース9では、ETSI のゼロタッチ自動化に対応し、MEC (Mobile Edge Computing) および O-RAN のユースケースに対応すると発表[2]されている。この技術に基づき、南米のあるオペレータは、南米で初めてこの技術を導入した取り組みを展開しているなど、世界各国で展開されようとしている。

4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	例えば、大西洋を航行するクルーズ船の乗客が、ヨーロッパのある国にあるネット配信サーバからのビデオ・コンテンツを視聴する場合、ヨーロッパの地上局を複数回経由して、一度衛星回線にアップリンク接続して、その後、HAPS などを経由して、クルーズ船の衛星アンテナで受信する必要がある。この場合、地上系ネットワークや非地上系ネットワークなど異なるネットワークドメインを経由する必要があり、サービス事業者は、ドメインの違いを意識することなく、ゼロタッチ自動化により、E2E サービスを提供する必要がある。
<p>[1] ETSI GS ZSM 003 v1.1.1(2019-08) Zero-touch network and Service Management (ZSM); End-to-end management and orchestration of network slicing</p> <p>[2] ETSI - Open Source MANO Release NINE fulfils ETSI's zero-touch automation vision, ready for MEC and O-RAN use cases</p>		

T3.2 周波数の割当・共用管理

1	どんな技術	通信用途多様化や高周波数帯利用に合わせ、周波数を通信事業者に割り当てるのみでなく、複数者での共用や動的な割り当てができるようになるための技術である。
2	何故必要か	Beyond 5G/6Gでは、利用開始までの時間を短縮し動的運用を実現することで帯域当たりの稼働率を高めるため、これまでのインフラ型(4Gまでの携帯電話事業者占有型、企業が自ら免許を取り運用するローカル5G型)の周波数利用に加え、動的・自律型(データベース等を用いた動的な運用、アクセス方式による自律運用)運用方式の実用化が必要である。
3	国内外現状	国内では、事業者向け帯域に加え、ローカル5Gとして非事業者向けに共用帯域の割り当てが開始されている[1]。Beyond 5G/6G向けには、周波数共用によりユーザが必要な周波数を獲得できるようにすべきと多くの識者より提言されている[2]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、ユーザの通信要求に必要な周波数資源を自動獲得するソフトウェア(ブローカ/ミドルウェア)、周波数の運用を「見える化」し、動的な利用を可能とする動的データベース、もしくはブロックチェーン技術、Digital Twin技術を活用したシミュレーションベースでの干渉判断やリソース割り当て技術、等が求められる。
<p>[1] https://www.soumu.go.jp/main_content/000711788.pdf</p> <p>[2] https://www.6gworld.com/videos/spectrum-sharing-in-6g-6gsymposium/</p>		

T3.3 自営無線システム管理(ローカル Beyond 5G)

1	どんな技術	ローカル5Gは、5Gの高度な技術を自営無線システムで用いるための日本独自の制度である。場所や地域のニーズに応じた機能のカスタマイズ性も期待されている。
2	何故必要か	安定性と機密性を兼ね備えており、工場自動化システムやインフラ監視による防災・減災システムなど、産業利用や地域利用が期待されている。
3	国内外現状	国内では、独自に4.6-4.9GHzと28.2-29.1GHzが割り当てられ、導入検討が始まっている[1]。海外でも、ドイツなど同様の制度整備を実施している国もある。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	現状でも近隣の他事業者が運用するローカル5Gとの運用調整が必要である。今後は公衆網や広範囲のローカル5Gとの連携を想定した仕組みづくりが重要である。また、干渉を回避しつつ、カスタマイズ性や機密性を維持する仕組み作りには、CPSなど他の技術の活用が重要と考えられる。ローカル5Gをさらに高度化させるための技術としては、フルデュプレクス(全二重無線通信)が挙げられる。フルデュプレクスは、アップリンクとダウンリンクを同時かつ同一周波数で運用する技術で、従来のFDDやTDDと呼ばれる半二重通信と比べて、理論的には通信容量を2倍に拡大できる。しかし、同時かつ同一周波数で送受信を行うと、自身の強力な送信信号が受信回路に自己干渉として回り込み、微弱な受信信号に強い干渉を与える。また、他セルの基地局や端末とのセル間干渉も増加するため、干渉把握・制御技術を適切に取り込みながら運用する必要がある。ローカル5Gはスポット的な運用による多様なユースケースが想定されるため、フルデュプレクスの適用がしやすい環境もあると考えられる。



図4.8 自営無線システム管理(ローカル5G)

[1] 総務省, "ローカル5G導入に関するガイドライン," 令和2年12月最終改定.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000722596.pdf

T3.4 高度電波エミュレーション

1	どんな技術	仮想空間上で、利用者の想定シナリオに基づいた無線機間の電波伝搬を
---	-------	----------------------------------

		<p>高精度に模擬することで、新規技術の評価や大規模システム検証を短時間かつ低コストで実現する技術である。高度電波エミュレーションを実現するために必要な要素技術は大きく3つある。1つ目は電波伝搬や実環境のモデル化技術である。仮想空間上に構築する環境を精緻に3Dモデル化し、さらにその環境での電波伝搬を精度よく再現するための電波伝搬モデルを開発する。2つ目は仮想環境を使って無線通信を検証するための模擬無線システムである。仮想環境はサイバー空間であるため、物理空間に存在する実際の無線機を使って評価検証を行うためには、無線通信のアナログ信号をデジタル信号に変換する技術が必要である。さらに、6Gの高度な無線通信システムの検証を実施するためにも、5GやIEEE 802.11axなどの最先端システムの運用を可能とする実装技術が必要となる。3つ目は仮想環境検証基盤である。文字通り、電波エミュレーションの心臓部となる。大規模計算機環境である大規模仮想環境検証基盤において、外部接続された無線機と、当該基盤上で仮想的に実装された無線機が、現実の電波伝搬モデルを参照しながら相互作用した結果がリアルタイムに出力される。</p>
2	何故必要か	<p>周波数有効活用に資する新技術や数千台規模の大規模システムのフィールド実証は費用的にも物理的にも困難である。高度電波エミュレーションを用いることで、様々な環境で再現性良く評価・検証が可能となる。</p>
3	国内外現状	<p>国外の代表的な取組として、米国国防高等研究計画局(DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency)のSC2プロジェクト[1]が挙げられる。現実社会に即した複数のシナリオを設定し、周波数共用技術のコンテストを開催した。</p> <p>また国内では、NICTを中心とした進行中のプロジェクトにおいて、高度電波エミュレーションを実現するワイヤレスエミュレータの研究開発が進められている。1項で述べた3つの要素技術開発に加え、仮想環境上に構築する仮想無線機と実際の無線機との相互接続による検証環境の開発に取り組んでおり、実現すれば1000台を超える大規模な検証が可能となる。電波伝搬の計算・解析に関する基本機能の実装までは完了しており、令和3年度のワイヤレスエミュレータ利活用シンポジウム[2]では、ITS環境やスマートオフィス環境で電波伝搬を可視化するデモを実施した。</p>
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	<p>2項の実現のためには、シナリオ実行中の移動体経路設定等を可能とする準リアルタイム性、1万台規模の大規模システム検証機能、ビームフォーミング等の電波放射パターン模擬、Beyond 5G/6Gを想定した400MHz帯域幅の信号処理、等が求められる。</p>

[1] DARPA, “Spectrum Collaboration Challenge (SC2),” <https://archive.darpa.mil/sc2/>

[2] ワイヤレスエミュレータ利活用シンポジウム, https://pco-prime.com/cps_promo/

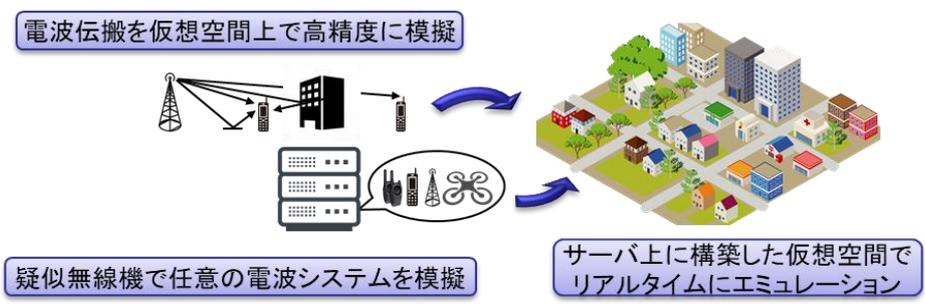


図4.9 高度電波エミュレーション



図4.10 大規模仮想環境検証基盤におけるワイヤレスエミュレーションの概要

図4.11 ワイヤレスエミュレーションによる無線通信状況の可視化例

4.2.4 無線システムの多層化—NTN

T4.1 衛星・非地上系通信プラットフォーム

1	どんな技術	地上からモビリティ、高高度プラットフォーム(HAPS)、衛星、深宇宙探査機までが3次元にシームレスに繋がる通信環境を実現するための無線通信機器の技術である。
2	何故必要か	あらゆるエリアへの通信が可能となることで、環境が変化し続ける社会において人と人の多様なコミュニケーションを実現できる。
3	国内外現状	衛星通信の大容量化(ハイスループット衛星)やフレキシブル化・デジタル化、低遅延化(低軌道周回衛星)が進み[1]、HAPSの開発が活発化

		している[2]。3GPPで非地上系ネットワーク(NTN)の標準化が進んでいる[3]、[4]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	実用化のためには、各プラットフォームの無線通信機器に対して、高速・大容量化と電波と光のハイブリッド化、一律ではないシステムがシームレスに繋がるためのフレキシブル化・デジタル化、小型化、低コスト化、縦方向の多数のプラットフォームが電波を共用するための3次元の周波数共用が要求される。また、それぞれが干渉しないように、と同時に、それぞれが連携できるように周波数の割り当てる必要があり、3次元の周波数共用や周波数利用効率の向上のための機能を具備することが求められる。

- [1] Rep. ITU-R M.2460-0
 [2] <https://hpsalliance.org/>
 [3] <https://www.3gpp.org/release-17>
 [4] <https://www.3gpp.org/release18>

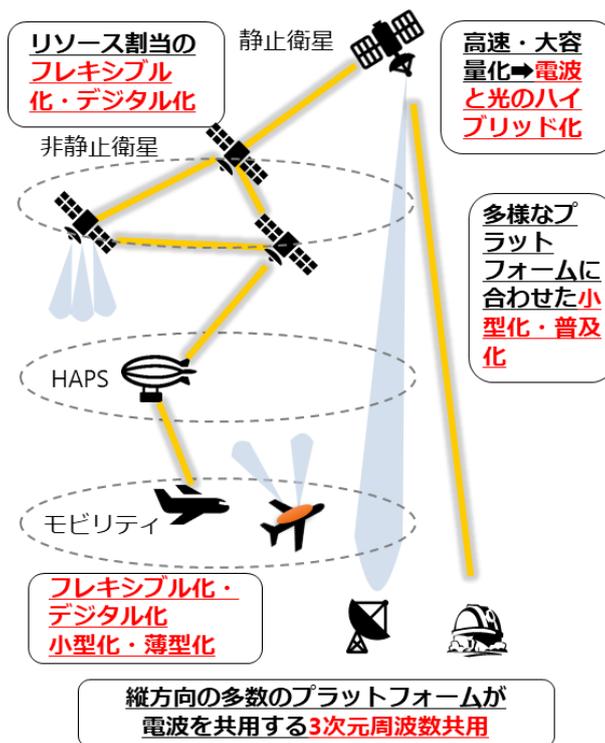


図4.12 衛星・非地上系通信プラットフォームとその要求条件

T4.2 光衛星通信

1	どんな技術	宇宙空間において、光(レーザー)を用いる大容量の無線通信技術
---	-------	--------------------------------

		である。超高速・低遅延・大容量通信を目指す。
2	何故必要か	地球観測衛星等が生成するデータ量は増加する一方、電波の周波数帯域では高速通信には限界がある。大容量の画像転送や遠距離のデータ通信には高速な光無線技術が威力を発揮する。
3	国内外現状	静止衛星を用いた衛星間光通信では 1.8Gbps [1]、低軌道衛星を用いた衛星間光通信では 5.5Gbps [2]、地上一衛星間光通信で 5.12Gbps [3] の光通信が宇宙実証されている。なお、小型衛星コンステレーション網の構築や、経済安全保障面でも期待される衛星光通信の研究開発の取り組みについて、政府が発表した [4]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	光通信の場合ビームがシャープなため、捕捉・追尾・指向機能を持つ捕捉追尾機器と光通信機器が必要である。実用化のためには現状より一桁上の10-50Gbps級の通信速度と複数の異なるネットワークを繋ぐ通信技術も必要となる。

- [1] <https://www.satnavi.jaxa.jp/project/lucas/>
 [2] <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>,
<http://satcom.jp/44/reportj2.pdf>
 [3] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8357402>
 [4] https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202112/28space.html

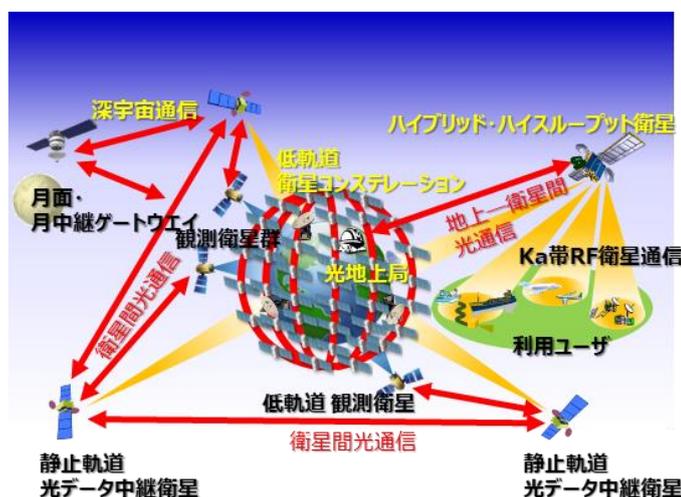


図4.13 光衛星通信の利用イメージ

T4.3 海上通信

1	どんな技術	海洋上において船舶に対してM2Mデータの伝送や高速・大容量な通信
---	-------	----------------------------------

		回線を提供する技術である。
2	何故必要か	海洋上と陸上で高速・大容量にデータを共有することで、自動運航、海洋資源利用の効率化・促進、海上安全保障、船内のブロードバンド化等に有効である。
3	国内外現状	グローバルサービスで数十Mbpsは提供されているが、通信機器の大きさ(設置場所の制限)・コスト高がネックである[1]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	将来的な無人運航等を視野に入れ、北極域を含むグローバルエリアにおいて小型・低コストで高速・大容量通信システムの実現が求められる。

[1] 海上における高速通信の普及に向けて(最終報告)、総務省・国土交通省、農林水産省、平成30年3月



図4.14 海上通信の利用イメージ

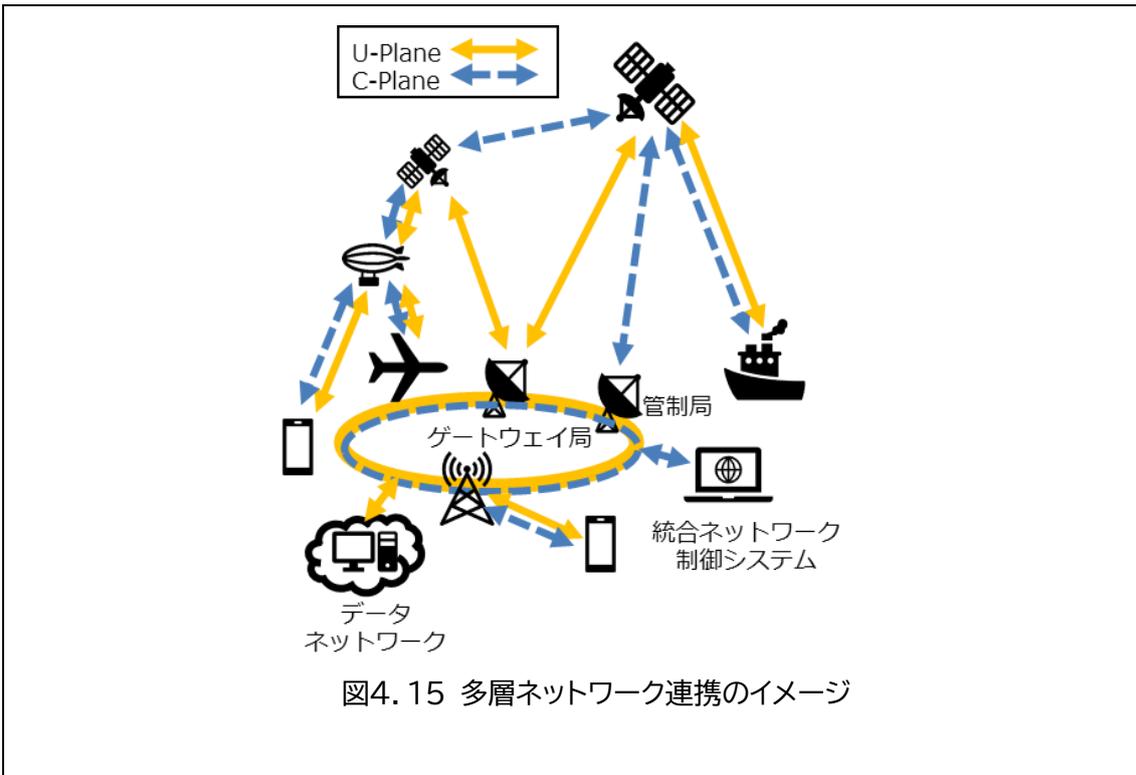
T4.4 海中・水中通信

1	どんな技術	従来、電波の利用が困難とされていた海中・水中での通信技術である。従来の音波による通信では通信速度が遅く、伝搬遅延も大きいという課題があったが、電波を用いることで、高速かつ低遅延の通信が可能となる。
2	何故必要か	橋梁メンテナンス・漁業のIoT化、海底探査等のため、音や光では困難な通信を補完する役割として無線通信技術が必要となる。
3	国内外現状	ALAN(Aqua Local Area Network)コンソーシアムが設立され、特に可視光による海中・水中通信が注目されている[1]。また通信だけでなく、海中のロボットへの給電のための無線電力伝送技術の開発も進められている。
4	Beyond 5G/6Gで	数Mbps以上の高速化や数十メートル程度の長距離化、また船や海中ロボット等へ搭載する際、水の抵抗等を考慮してアンテナの小型化や軽量

の要求条件	化が求められる。また、北極などの氷の下を調査するロボットの制御のために、氷の上から海中への通信技術が必要とされている。
[1] https://www.trimatiz.com/jp/consortium/alan.html	

T4.5 多層ネットワーク連携制御

1	どんな技術	深宇宙探査機、静止衛星、低軌道衛星、HAPS、航空機、ドローン、船舶、地上局、Beyond 5G/6Gなどを多層的・有機的につなぎ、使用するプラットフォームやネットワーク接続をサービスに応じて柔軟に制御する技術である。
2	何故必要か	インターネット利用、遠隔情報収集、遠隔制御、緊急災害対策、感染症対策(リモートワーク等)など、ユーザの要求に対し、航空機、船舶、離島、砂漠、山岳地、惑星など、どこにいても通信が途切れないシステムを構築することが可能になる。
3	国内外現状	衛星5G連携については、海外では欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)のSATIS5プロジェクト[1]やEUのSAT5Gプロジェクト[2]が先行して実施されている。3GPPでは、5Gにおける非地上系ネットワーク(NTN)のリソース管理方式の仕様化が検討され[3]、またBeyond 5G/6G技術の検討ではNTNと地上系の更なる統合、融合に向けた検討が開始されている[4]。国内では、スペースICT推進フォーラム[3]内の分科会で衛星とBeyond 5G/6Gの連携における新しいユースケースの検討が進んでいる。また、日欧間の連携プロジェクトが開始されている[6]。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のためには、各プラットフォームの標準化、統合ネットワークシステムの基盤開発(衛星地上間リソースマネジメント機能等)が求められる。
[1] https://artes.esa.int/projects/satis5-0 [2] https://www.sat5g-project.eu/ [3] https://www.3gpp.org/release-17 [4] https://www.3gpp.org/release18 [5] https://spif.nict.go.jp/ [6] https://www2.nict.go.jp/spacelab/en/pj_stit.html		



4.2.5 時空間同期

T5.1 無線時空間同期

1	どんな技術	「離れていても一つ」: 離れたデバイスが協調作業するために、時刻同期と互いの位置把握を無線で実現する技術である。日本標準時を協定世界時と比較する際に用いる先端技術無線通信機に組み込むことで高精度な時空間同期を安価簡便に実現する。
2	何故必要か	例えば3Dプリンターに時空間同期を適用することで枠の大きさに囚われずに自由なサイズの造形が可能になるほか、複数ロボットでの連携による高速造形が可能になる。また、計算資源の分散化を進めるためにも安価簡便強靱な時空間同期技術が必須である。
3	国内外現状	5Gの技術仕様書(3GPP TS v.18)では複数ロボット連携用に端から端までで1ms以内の低遅延と1マイクロ秒以下のジッタを実現する時刻同期を要求している。そして測位技術として GNSS(GPS 等)、ビーコン、Wi-Fi/Bluetooth 技術等を組み合わせて位置計測を行うこととし、最高サービスレベルで20cmの位置計測精度を要求している(上述3GPP資料より)。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	事例 1)倉庫内インベントリ/屋内ロボット連携: ・時刻同期精度1マイクロ秒、通信遅延(端から端)<1ミリ秒、位置計測精度1cm。

	<p>事例 2)バーティカル交通整理: ・時刻同期精度1マイクロ秒、通信遅延(端から端)<1ミリ秒、位置計測精度5m。</p>
<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図4.16 時空間同期された3Dプリンター</p>	

T5.2 原子時計チップ

1	どんな技術	周波数のズレない超安定なクロック信号を提供する技術である。クロックは搭載機器の作業を統制する重要な備品である。ただし、その統制は搭載機器にしか通じない。従来のクロックは使用環境によってずれていくからである。原子周波数標準でクロックを安定化すれば、一回の同期ですべての機器のクロックを同調させ統制することができる。
2	何故必要か	クラウド化の時代、膨大な演算を複数の計算機が協調してリアルタイムに処理する時代が来る。このときクロックの同期・同調は、無数のマシンをあたかもデスクトップPCを使うような感覚で使用することを可能にする。これは、分散アバター、コネクテッドカーへと拡張されるであろう。
3	国内外現状	欧米を中心に数cm角のマイクロ波原子時計がモジュールとして販売されている[1]。これに追従するかたちで日本でも産総研の主導で、同様の原子時計モジュールが開発されている[2]。一方で、数cm角大ではデュアルユース以外の市場が薄く、日本で社会実装を進めるのが容易ではない。次の研究開発では、さらに小型・低消費電力化を図るシナリオが必要である。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	エッジコンピューティング向け サイズ<5cc、消費電力<数mW。 個人端末向け サイズ<1cc、消費電力<数百mW。
<p>[1] R. Lutwak et.al., "The MAC-a Miniature Atomic Clock," in Proc. IFCS2005, pp.752.</p> <p>[2] (H. Zhang et.al., "ULPAC: a miniaturizes Ultralow-Power Atomic Clock," IEEE JSSC, 54(11), 2019, pp.3135.</p>		

T5.3 基準時刻の生成共有技術

1	どんな技術	ローカルなネットワーク内にある多数の時計を活用して耐災害性の高い仮想的な基準時刻を生成・共有し、効率的な域内通信を実現するための技術である。また同時にこの共有時刻を頼りに標準時や協定世界時等の絶対時刻との同期をネットワーク参加者が容易に行うことができる。
2	何故必要か	次世代のデータ交換は、1)自動運転等近距離での高速かつ高精度な相対時刻差を要求されるものと、2)世界中のサーバとの間で行う絶対時刻スタンプを伴ったもの、を両立する柔軟性が求められ、情報システムにおいてはこれらを包摂するクロック管理が求められる。
3	国内外現状	ローカル5Gの出現によりローカルな基準時刻という概念が意識されつつあり、今後その生成・共有の方法が議論され発展していくと思われる。一方で、精度の高い光周波数標準器の開発が国内外の計量標準研究機関や大学で進んでおり、これが商用品化されることで、孤立状態での相当な期間の絶対時刻への同期維持が可能になり、クロック管理の可用性を維持することが出来る。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	ローカルネットワーク内の高速・高効率なデータ交換： ピコ秒レベルでの相対時刻精度 地球上で共通のタイムスタンプに基づくデータ交換： マイクロ秒レベルの絶対時刻精度

4.2.6 超安全・信頼性

T6.1 エマージング・セキュリティ技術

1	どんな技術	Beyond 5G/6Gのインフラおよびそのインフラ上で生み出される各種技術、また新たなサービスのセキュリティを確保する技術である。
2	何故必要か	Beyond 5G/6Gが実現した社会では、現実空間の様々なデータがサイバー空間へとリアルタイムに送られ、サイバー空間で分析された結果を基に現実空間での制御が行われるようになり（例：自動運転、デジタルツイン）。ハードウェアレイヤからソフトウェアレイヤまでの統合的なセキュリティ確保がインフラとして重要になる。また、このインフラ上で提供される新しい技術・サービスに対して、セキュリティ課題を抽出し、安心・安全に利用するための技術が求められる。
3	国内外現状	5Gのセキュリティについては、3GPPのセキュリティワーキンググループ（SA WG3）や米国国立標準技術研究所（NIST: National Institute of Standards and Technology）のNCCoEプロジェクトをはじめとして各団体で検討が進められているが、Beyond 5G/6Gについてはその定義も定まっておらず、今後検討が進んでいくと考えら

		れる。IoTセキュリティについては、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）のプロジェクトにおいて、サプライチェーンリスク対策の研究開発が進められている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	ハードウェア（センサ、ドローン、衛星等）のセキュリティ技術（対タンパー技術、ハードウェアトロイ検出技術、計測・制御のセキュリティ確保技術等）。実データ処理ソフトウェア・クラウドのセキュリティ技術（脆弱性検出、データ保護技術、敵対的サンプルに耐性のあるAI技術、DoS攻撃対策技術等）。Beyond 5G/6Gインフラのセキュリティ技術。新たな技術・サービス（自動運転、無人配送、XR、衛星・HAPS通信等々）に対応したセキュリティ技術、が求められる。

T6.2 実攻撃データに基づくサイバーセキュリティ技術

1	どんな技術	多様化・高度化するサイバー攻撃に対応した大規模な攻撃観測・可視化技術、また大規模集約された情報を横断分析し、対策を導出する技術。
2	何故必要か	Beyond 5G/6Gが実現した社会では、今よりも膨大な機器が超高速・低遅延・大容量で相互に繋がる。つまり、攻撃対象となる機器が増加し、攻撃者が大量の機器を乗っ取ることでより大規模な攻撃活動が可能となるため、リアルタイムかつ大規模に攻撃を観測・分析し、自動的な対策を実現する技術が Beyond 5G/6Gの安定利用のために必要である。
3	国内外現状	無差別型攻撃を観測するダークネット観測技術については米国CAIDA（Center for Applied Internet Data Analysis）やNICTが世界最大級の観測網を構築している。サイバーセキュリティとAIの融合については世界各国で活発な研究開発が行われているが、対策を含めた自動化やAIの出力結果の高い解釈性の実現には技術的な課題が存在する。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	無差別型攻撃や標的型攻撃をはじめとする多種多様なサイバー攻撃を観測する技術、観測された情報から状況把握を行うための可視化技術、膨大な観測データを、AI技術を用いてリアルタイム分析し、自動対策を導出する技術、が求められる。

T6.3 量子暗号

1	どんな技術	量子力学の性質を利用して共有した秘密鍵を使ってデータを暗号化・伝送する暗号方式である。量子コンピュータを含むいかなる計算機でも原理的に解読不可能な「情報理論的安全性」を実現することができる。これは現在知られている暗号のなかで最も強力な秘匿性である。
---	-------	--

2	何故必要か	Beyond 5G/6G世界においては、今以上に多数の重要情報がサイバー空間を行きかうと想定される。量子暗号は、安全保障をはじめとする国家機密の保護や、医療、金融、インフラ、スマート製造などの分野において、超長期秘匿性が要求される情報を守ることができる。
3	国内外現状	世界各国で研究開発、フィールド実証、標準化などが進み、実用化が始まりつつある。その中で日本は、量子暗号ネットワークテストベッドの世界最長運用、超小型衛星による世界初の量子通信基礎実験成功などの実績があり、日本企業による量子暗号装置の実用化も始まっている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	秘密鍵を共有する量子鍵配送(QKD: Quantum Key Distribution)技術、及びQKDのネットワーク化技術、人工衛星を使ったQKD技術などの技術開発と、これらを実際に産業化する際の標準化や評価・検定制度の確立が必要である。また、日本で独自開発された「量子セキュアクラウド技術」など、量子暗号を活用したセキュリティシステム全体の技術開発も重要である。

T6.4 電磁環境技術

1	どんな技術	無線機器とその周辺の電気電子機器が、互いに妨害を与えず共存できる電磁環境を維持するために必要な技術である。また、身の回りの無線機器や電気電子機器から発射する電波が、人体に吸収される量(ばく露量)を評価し、健康に影響することなく電波を最大限に活用できる環境を構築する技術である。これらを実現するための測定器の開発・高精度・高信頼な電波計測技術も含む。
2	何故必要か	安心・安全な電波利用、電磁環境の保全のために必要である。
3	国内外現状	電気電子機器から生じる電磁雑音については6GHzまでの周波数利用を見込んで、業界による自主規制(一般財団法人VCCI協会)が行われている。国内の電波防護指針は、現状300GHzまでの周波数利用を想定。いずれも、テラヘルツ帯の利用を見込んだ許容値は存在しない。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	2項の実現のため、電気電子機器から生じる妨害電波が、高度化された無線機器に与える影響を抑える対策技術と、それを適切に評価する技術、多様化された電波利用状況で時々刻々と変動する電波ばく露量を正確に評価する技術、電波防護指針をテラヘルツ帯に拡張するためミリ波からテラヘルツ帯に至るまでのばく露量を正しく評価する技術、などが求められる。これらの基盤技術として、テラヘルツ帯の測定器及び測定器の基準となる標準器、測定法や評価法の法制化・標準化も必要である。

T6.5 レジリエント ICT

1	どんな技術	様々な障害や災害等の発生などによって、環境が急激に変化・変動する場合であっても、情報通信基盤(通信ネットワーク、データ観測・解析等)の応急的・継続的な利活用を実現するための技術である。
2	何故必要か	災害等の発生によって人の立ち入りが困難となった場所へ、ロボット群を投入して復旧作業を行うためには応急的な情報通信基盤が必要になる。合わせて、自然環境データ観測・解析や地域の情報流通を継続的に支える情報通信基盤は、いつでもどこでも安心・安全を届けるために必要。
3	国内外現状	ITU-Tのテクニカルレポート[1]では、将来のネットワークへの要件の1つとしてレジリエンスを記している。また、第6次科学技術・イノベーション基本計画では、自然災害等の非連続的な変化によるリスクの低減に向けて、自然災害に対する観測・予測、応急対応等において先端ICT等を活用したレジリエンス強化を重点的に実施するとしている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	応急的な情報流通基盤としてはロボット群の遠隔制御に必要となる通信要件(E2E(End to End)遅延で0.1ms以下)を99.99%以上の場所率及び時間率で実現し、継続的な情報流通基盤としては99.99%以上のエリアカバー率及び可用性で実現することをめざす。
<p>[1] FG NET-2030 Sub-G1, Representative use cases and key network requirements for Network 2030, Jan. 2020.</p>		

T6.6 センシング

1	どんな技術	フィジカル空間のあらゆる事象(人・モノ・環境やそれらの状態など)を計測する技術である。
2	何故必要か	Beyond 5G / 6Gの世界では、フィジカル空間のあらゆる事象がサイバー空間に投影され、サイバー空間で見いだされた解決策がフィジカル空間を駆動するというループが回る。センシングによってフィジカル空間の事象をサイバー空間に取り込むことが可能になる。
3	国内外現状	目的に応じて様々な周波数の電磁波を用いる従来型のセンシング技術(レーダー・ライダーなど)に加え、通信や放送など特定の目的のための電波を副次的に用いるパッシブセンシングの研究開発も進められている。また、近年利用が拡大しつつあるテラヘルツをセンシングに用いるための研究開発も盛んである。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	自動運転やドローンなどの安全な利用のため、高精度測位だけでなく特定エリアの高精度環境計測も必要となる。通信で利用が拡大する高周波帯を含め、様々な周波数帯の電波を副次的に利活用するパッシブセンシングの技術開発が求められる。室内など電波の反射もある閉じた空間内

	での計測技術、高度な識別や認識のための AI 活用技術、センサの高機能化だけでなく小型安価な大量センサの利活用技術なども必要である。また、センシングされた大容量データの通信・圧縮技術も必要となる。
--	--

4.2.7 超臨場感・革新的アプリケーション

T7.1 脳情報の読み取り・可視化・BMI 技術

1	どんな技術	脳情報を非侵襲的あるいは低侵襲的手法により読み取り、解析することにより、各種の機器制御や、非言語的情報(感情、理解度、スキル)コミュニケーションに利用する技術である。
2	何故必要か	異なる文化や価値観を持つ多様な人々の相互理解だけでなく、非言語情報によるコミュニケーションや脳情報による機器制御は高齢者や障がい者の社会参加をも促進する。
3	国内外現状	侵襲的手法及び非侵襲的手法によるBMIシステムの社会展開、特に医療応用が国内外で始まりつつあるが、どちらの手法においてもセンサ技術・小型化技術・解読技術・無線通信技術等に課題があり、各基盤技術のさらなる高度化が期待されている[1]。
4	Beyond 5G/6Gでの 要求条件	脳情報の無線通信にあたっては、超高速大容量通信、超低遅延、超多数同時接続、超低消費電力、超安全・信頼性、拡張性等の要件が必要となる。
[1] 医学のあゆみ「特集 ブレイン・マシン・インターフェース(BMI) —臨床応用の展望」、275(13), (2020)		

T7.2 直感性の計測・伝達・保証技術

1	どんな技術	遠隔会議や遠隔操作等、サイバー空間の作業において感じる違和感等を、脳波を含む生体信号から計測しユーザの直感性を保証するブレインセントリックなネットワーク制御技術である。
2	何故必要か	コロナ渦で急速に広まっている遠隔会議や遠隔操作等のサイバー空間の作業では、物理空間とは異なり脳への負荷が高いため、サイバー空間でも直感的な作業を可能にする技術が必要である。
3	国内外現状	5G/6Gではヒューマンセントリックな価値創出が提案されているが、さらに脳の認知レベルで直感性を動的に制御ができれば脳に対する負荷が小さい遠隔会議・遠隔作業が可能になる[1]。
4	Beyond 5G/6Gでの 要求条件	無意識レベルも含めた直感性を保証するためには、脳情報等の生体信号から直感性を推定する脳モデルを構築するとともに、有線無線統合型ネットワークにおいて生体信号フィードバックに基づく動的遅延・ジッタ制御が必要となる。

[1] 6G Flagship: Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence, Univ. Oulu (2019)

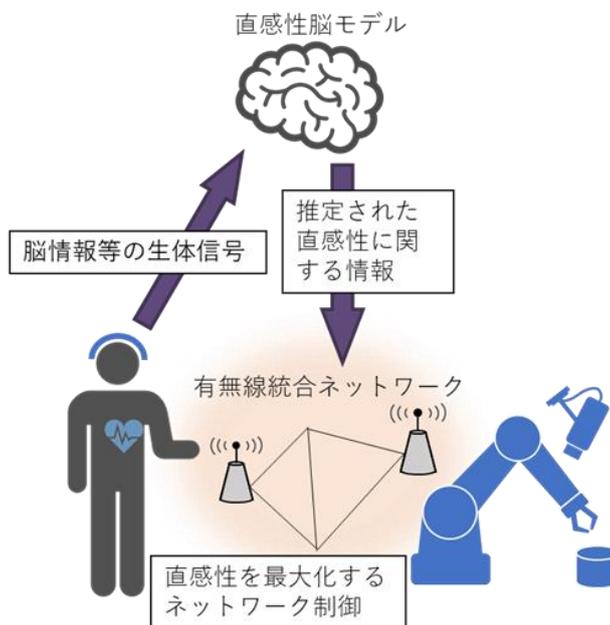


図4.17 直観性の計測・伝達・保障技術

T7.3 リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術

1	どんな技術	自分の身体・環境を瞬時に3Dモデル化し五感情報(視覚/聴覚/触覚/嗅覚等)とともに遠隔地に伝達・再現することで、リアルかつ自然な遠隔のXRインタラクションを可能にする超臨場感コミュニケーション技術。
2	何故必要か	超臨場感伝達技術により、空間・時間・身体の壁を超える遠隔コミュニケーションを可能にし、労働生産性の飛躍的な向上と心の豊かさを実感できる超高齢社会の実現に貢献する。
3	国内外現状	アフターコロナ社会では、遠隔の医療・介護・教育・協調作業等、多様な目的のために、高度なバーチャル・リアル融合を実現するためのアバター・五感伝達・XR技術の開発・実現[1]が求められている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	②の実現のためには、遠隔で行う各種タスクにおいて、実世界と同等のユーザー体感品質(QoE: Quality of Experience)を保証する3Dアバター/五感/XR等の超臨場感伝達技術が求められる。

[1] VR/ARを活用するサービス・コンテンツの活性化に関する調査研究(2018 年三菱総研:総務省委託)

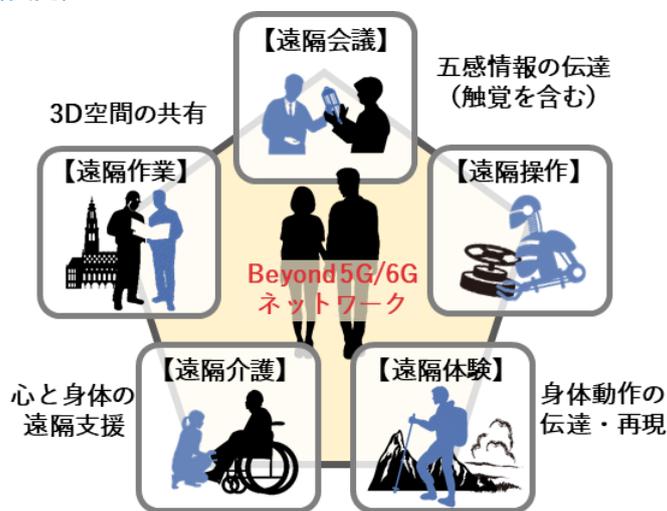


図4.18 空間・時間・身体を超えた超臨場コミュニケーション

T7.4 言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術

1	どんな技術	ネット等に存在する膨大な情報や知識を分析・整理し、言語・非言語情報を用いた多様な対話を介してユーザを支援し、ユーザの世界に対する認識を拡大、精緻化する技術である。
2	何故必要か	少子高齢化が進み、あらゆる領域において人材不足が深刻化する中、各個人の持つ能力を最大限に活かすために必要な技術である。特に、人材不足が深刻な高齢者介護、研究開発、教育等では必須である。
3	国内外現状	AIスピーカー等の一般家庭への普及、人を超越する精度のテキスト分析技術も見られるが、対話全般をカバーする技術や対話を介してユーザの世界認識を拡大、精緻化する方法論は存在しません。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	ネット等に存在する各種データの分析結果を第三者に取得されないよう、個人のデバイスで分析可能とするため、大量の未分析データを実時間で転送するネットワークが必要となる。

T7.5 エッジ AI 行動支援

1	どんな技術	エッジコンピューティングと AI を融合させ、エッジ環境の IoT 機器で大容量・低遅延・超多様なデータに基づく機械学習や推論を行うための技術である。エッジ AI には、クラウドとエッジが連携して学習や推論を行うものから、エッジ環境の中だけで行うものまで、様々なバリエーションがある。エッジ AI により、Internet of Things が Internet of Intelligent Things に進化すると期待されている。
---	-------	---

2	何故必要か	現在の AI、特に機械学習は、十分な計算資源とストレージを持つクラウドで行われることを前提としている。しかし、ユーザの IoT 機器からクラウドに大量かつ個人情報を含むデータを送信することは現実的に困難なため、エッジ側で膨大なデータストリームを用いて機械学習モデルを構築できるようにする。代用的な利用ケースとしては、協調型自動運転、スマート空間における行動支援(スマートシティ/ホーム/キャンパス/オフィス/病院など)、多種多様なセンサを組み合わせた環境モニタリング、XR によるリアルとバーチャルの双方向インタラクション、人間とロボットの協働などが挙げられる。
3	国内外現状	エッジにおける AI (AI on Edge)と、エッジのための AI (AI for Edge)に大別され、前者ではエッジ環境に適した省資源・省通信・低遅延な機械学習方式(連合学習、非集中学習、モデル分割学習、分散強化学習)などの研究開発が進められており、後者ではエッジ環境のネットワーク構成や資源割当ての最適化などの研究開発が活発に進められている。また、IEEE 3652.1-2020 や ETSI ISG MEC などの国際標準化も進められている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	エッジ環境では、ユーザの IoT 機器が高い自律性を持つため、エッジ AI は、ネットワークの状況や、接続された機器で利用可能な資源、およびアプリケーションの要件などにに基づき、日和見的な資源の利用可能性に応じた機械学習処理の最適化を行う必要がある。また、超多様なデータストリームを組合せ認識や予測の性能を向上させる技術や、リアルタイムでセキュアな分散学習技術の開発も必要になる。さらに、エッジ環境における様々な機器への機械学習モデルの動的配備や、デジタルツインとシミュレーションにより状況に応じて最適化された行動支援を行う技術などが必要になる。

T7.6 多言語の同時通訳・言い換え・要約技術

1	どんな技術	時間効率が良く日本人と外国人のコミュニケーションを成立させる異言語間変換技術であって、そのために必要な範囲で文脈・非言語情報も参照し同一言語内変換も含む。
2	何故必要か	日本人と外国人がストレスなく平時の生活やビジネスができ、日本人と外国人が災害等非常時においても分断なく過ごせるようになる。
3	国内外現状	NICTはGAFAGoogle・Amazon・Facebook・Apple)やBATH(Baidu・Alibaba・Tencent・Huawei)と競争状態にあるが、翻訳バンクに代表される公共性に依拠したフレームワークでNICTの優位性を確保している[1]。

4	Beyond 5G/6Gで の要求条件	端末単体での学習とクラウドを利用した学習の並列実行が、低いレイテンシーで可能となるハードウェアとネットワークによって、はじめて個々の利用者に合わせた超高精度モデル学習が実現できるようになる。
---	---------------------------	---

[1] グローバルコミュニケーション計画 2025 (令和 2 年 3 月 31 日 総務省)



図4.19 セキュリティを確保した遠隔での同時通訳

出典：グローバルコミュニケーション計画 2025
(令和 2 年 3 月 31 日総務省)

T7.7 自動運転

1	どんな技術	人やモノの運送に使われる車やトラック、産業や農業、医療現場の労働力不足を補うロボット、障害者や高齢者の移動を助ける車いすなど、あらゆる分野において車両(モビリティ)の移動を自動化した技術である。
2	何故必要か	事故がない安心・安全な交通環境の実現や少子高齢化による労働力不足と生産力低下の解消、さらに移動への不安を抱える障害者と高齢者の社会参画と自立を促すことで活気ある明るい社会を実現できる。
3	国内外現状	自動運転の実現に向けた取組が交通・通信・産業の様々な分野で行われている[1]。
4	Beyond 5G/6Gで の要求条件	移動空間を確かめる超精密環境地図構築と障害物の回避や衝突防止技術、太陽活動に伴うセンサの異常への対策技術、周辺の風雨等気象状況を含む非常時対策のための遠隔モニタリング技術、路側インフラなどの分散センサ技術が必須で、その技術を実現するために車両とネットワークとの連携及び大容量情報通信(数十 Gbps 以上)・リアルタイム通信技術(1ms 以下遅延)が要求される。

[1] 自動運転の実現に向けた今後の国土交通省の取組、2020年に向けた5G及びITS・自動走行に関する総務省の取組等について、自動走行ビジネス検討会「自動走行の実現に向けた取組報告と方針」Version 4.0

T7.8 ドローン

1	どんな技術	自動制御プログラムによって目視内から目視外まで、自由に上空を飛行させることができる無人航空機技術である。空飛ぶスマホ、空飛ぶIoTとも言われ、これまで利用されていなかった3次元空間をネットワーク化することを可能とする。「空の産業革命」とも言われているが、今後は「空の移動革命」を担う空飛ぶクルマにも発展する。
2	何故必要か	インフラ管理、空撮、物流、観測、災害・遭難通信等を飛躍的に効率化する。また社会活動全体のエネルギー消費を減らし、人の関与を削減できるため、省エネルギーによるエコシステムやウィルス感染に強い新しい社会の実現に必要である。
3	国内外現状	政府主導で「空の産業革命に向けたロードマップ」が策定、毎年更新され、官民共同で安全な目視外飛行を実現するための制度改正、技術開発が実施されている。技術開発では総務省、経産省(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が主導する研究開発プロジェクトが推進され、制度改正では航空法や電波法の改正が逐次行われている。欧米や中国・韓国などでもそれぞれ独自の研究開発が行われ、国際電気通信連合(ITU: International Telecommunication Union)や国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)、国際標準化機構(ISO: International Organization for Standardization)でも通信や機体の安全技術などの標準化が進められている。
4	Beyond 5G/6Gでの要求条件	ドローンの安全な飛行運用を支える高信頼かつ低コストの無線通信とそのため周波数共用・周波数拡大技術、太陽活動に伴うセンサの異常への対策技術、周辺の風雨等気象状況のモニタリング技術、及び地上や宇宙・HAPSのネットワークとの連携・融合が必要になる。

4.3 研究開発ロードマップ

4章では、要素技術ごとに個別のロードマップを示しているが、各分野の代表的なものに絞り、それらを一つにまとめたものが表4.9となる。3章で示した3つのシナリオの想定時期なども共に示している

表4.2 研究開発ロードマップ

	2020 - 2024	2025 - 2029	2030 - 2034	2035~
科学技術基本計画	第6期科学技術基本計画			
移動通信システムの進化	初期の5G (Non Stand Alone)	機能強化された5G (Stand Alone)	Beyond 5G	
B5G推進戦略	先行的取組フェーズ	取組の加速化フェーズ		
シナリオ	Cybernetic Avatar Society(3-1)	▲リアル3Dアバターによる遠隔のXR同時通訳会議	▲言語/非言語/脳情報の解析に基づく高齢者等の支援	▲触覚も含む五感伝達による直感的な遠隔作業
	月面都市 (3-2)	▲月ゲートウェイ ▲月ゲートウェイ/ARTEMIS計画の推進	▲月面上実証実験	▲月面開発調査開始
	時空を超えて (時空間同期) (3-3)		▲エッジサーバーを活用した自動運転サポート	▲センサーネットワークにインフラ保全・環境監視
	サイバー世界の光と影(3-4)	▲AIエージェント ▲アバター本人認証	▲AIにおける公平性、説明責任及び透明性	
超高速・大容量通信 (4-2.1)	基礎技術開発 THz無線要素技術、100Gbps級光無線接続、40Tbps光ファイバ	高度化技術と実用システムの開発 THz無線システム、Sub-Tbps級光・無線接続、100Tbps光ファイバ	メディア調和型ネットワーク 1Pbps級伝送、Tbps級ネットワーク	
超低遅延・超多元接続 (4-2.2)	基礎無線方式の確立 リソース割当&QoS制御技術、エッジAI処理適用セッション構築技術	機能高度化検証・実証・標準化 適応型無線網構築技術、適応型無線アクセス・経路選択制御技術、エッジクラウド高度化技術、無線網間時刻同期技術	社会展開・ビジネス化 サービス要件間協調の確立、エッジデバイス展開	
有無線通信・ネットワーク制御技術接続(4-2.3)	基礎技術の確立・応用技術研究 ネットワーク制御技術(ゼロタッチ自動化)、ローカルB5G、無線制御等	技術拡張・連携・サービス実証 ネットワーク制御技術、ゼロタッチ運用自動化進展、ローカルB5G進展、周波数割当効率化等	実用化・社会展開 ネットワーク制御技術、ゼロタッチ運用完全自動化、ローカルB5Gの技術導入、周波数共用等	
無線システムの多層化-NTN(4-2.4)	基礎技術の確立・応用研究 電波/光ハイブリッド、フレキシブル化・デジタル化、小型/大容量化 空中・LEO・GEO・月・海上・水中へのエリア拡張	技術拡張・連携・高度化 多層ネットワーク相互接続・分散情報管理、大型光アンテナ・適応光通信 深宇宙・浅海・深海へのエリア拡張	実用化・サービス展開 時空間認証・サービス、原子時計チップの無線機への組込	
時空間同期 (4-2.5)	基礎技術の確立 同期網モデリング、原子時計チップ量産化技術	実装・展開に向けた準備 同期網セキュリティ強化 原子時計チップ試作	広域量子暗号ネットワークの実用化 衛星・地上系量子暗号ネットワークの統合	
超安全・信頼性 (4-2.6)	基礎技術の確立 量子暗号通信新方式 ネットワーク制御管理技術	技術の高度化 ローカル・都市間量子暗号ネットワーク 通信システムにおけるセンシング技術の活用	実用化に向けた技術開発 衛星・地上系量子暗号ネットワークの統合	
超臨場感・革新的アプリケーション(4-2.7)	基礎技術の確立 脳活動による感覚情報の推定、遠隔VR技術(CGアバター)	技術の高度化 人工脳の初期モデル、エッジAI行動支援 遠隔XR技術(リアル3Dアバター)	社会展開 高度な推論を含む対話技術、シビアな実用同時通訳 五感を用いた直感的なXR技術、自己成長型同時通訳	
研究開発オープンプラットフォーム(5-1)	プラットフォームの構築と研究開発の推進	プラットフォームの高度化と研究開発の推進		
標準化 (6-1)	ITU-R 技術トレンド調査 3GPP Rel. 17	技術性能要件→標準策定 ビジョン勧告 Release 18 Release 19 Release 20 Release 21	ITU-R 技術トレンド調査 ビジョン勧告 Release 22 Release 23 Release 24	技術性能要件→標準策定
ナショナルプロジェクト (6-2)	Beyond 5G研究開発促進事業			

第5章：研究開発オープンプラットフォーム

5.1 Beyond 5G 共用研究開発テストベッド

Beyond 5G 推進戦略懇談会による提言を受け、情報通信分野の研究開発を専門とする NICT では、Beyond5G 技術のコアとなる超高速・超大容量・超低遅延・超多数接続・低消費電力等を実現する技術の研究開発や技術実証を行う環境として Beyond 5G 共用研究施設・設備の整備を進めている。本設備は「Beyond 5G 伝送基盤技術開発環境」、「Beyond 5G を支える超高速光通信技術開発設備」、「高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッド」の3本の柱で構成されている(図5.1)。

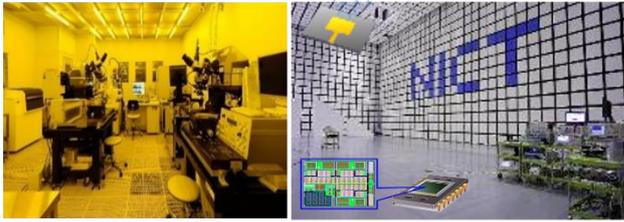
「Beyond 5G 伝送基盤技術開発環境」は、Beyond 5G において活用が強く期待されるテラヘルツ波等の超高周波数帯も活用した伝送技術の研究開発を推進するための環境で、デバイス作製システムとデバイス特性評価システムからなる Beyond 5G 伝送技術開発環境と、アンテナ特性やトランシーバ伝送特性等の測定・評価のためのテラヘルツ帯対応電波暗室から構成されている。

「Beyond 5G を支える超高速光通信技術開発設備」は、Beyond 5G の超高速・大容量の有無線通信を支える超高速光通信技術の研究開発を推進する施設で、実際の光ファイバを通した伝送実証や信号処理の特性評価が可能な超高速光伝送実証設備と、伝送信号の広帯域化(テラヘルツ・光領域)を実現する光・電波融合デバイスの作製や高速応答性評価を行う有無線デバイス製作基盤から構成されている。

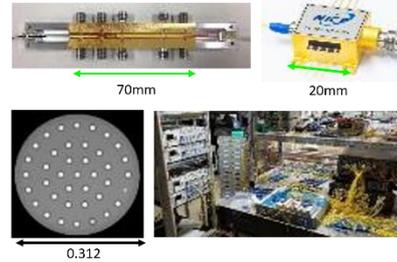
「高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッド」は、Beyond 5G ネットワークの高い信頼性・可塑性確立のための研究開発を推進するテストベッドである。これは、従来のネットワークテストベッドに、ソフトウェア化技術等によるカスタマイズが可能なモバイル環境を擁する実証オープンサイトを複数追加するほか、各種アプリケーションの実証が可能なプラットフォームレイヤや、モバイル環境等のエミュレーション・可視化をサポートするミドルウェアレイヤへの連携拡張を想定する実証環境である。

Beyond 5G 共用研究施設・設備は、既存の共用研究開発基盤(JGN 等のネットワーク実証環境、先端 ICT デバイスラボ、他)と併せて多様なユーザが多様な技術を持ち寄って研究開発・実証を行う場「Beyond 5G 共用研究開発テストベッド」としてオープンな利用に供する。また、NICT のこれ以外の研究開発基盤(サイバーセキュリティ、量子情報通信、脳情報通信、他)とも有機的に連携させ産学官の叡智を結集して研究開発を推進する体制を構築していく。

Beyond 5G伝送基盤技術開発環境



Beyond 5Gを支える 超高速光通信技術開発設備



高信頼・高可塑Beyond 5G/IoTテストベッド

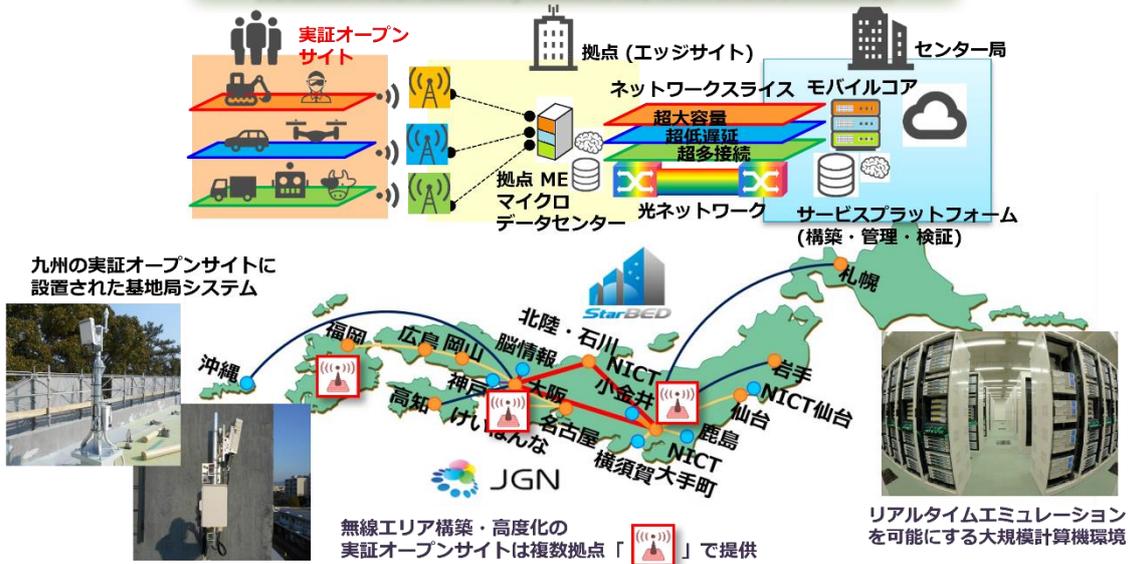


図5.1 整備が進んでいる Beyond 5G 共用研究施設・設備

5.2 高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッド

NICT では、超高速研究開発ネットワークテストベッドである JGN と、大規模エミュレーションテストベッドである StarBED を含めた総合テストベッド環境を構築して運用してきたが、さらに高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッドの構築と運用を進めている。

高信頼・高可塑 Beyond 5G/IoT テストベッドは、Beyond 5G により実現される通信ネットワークシステムにおいて安定かつ大容量・低遅延などのサービス品質を限られた設備で満たすために、従来のシステムと比較して、高信頼性と高い可塑性が求められることを重視し構築される。加えて、Beyond 5G システムの高い信頼性・可塑性確保には、産学官が多様な技術を持ち寄って研究開発・実証を行う必要がある。本テストベッドは、これらの観点から検証環境として整備されるものである。

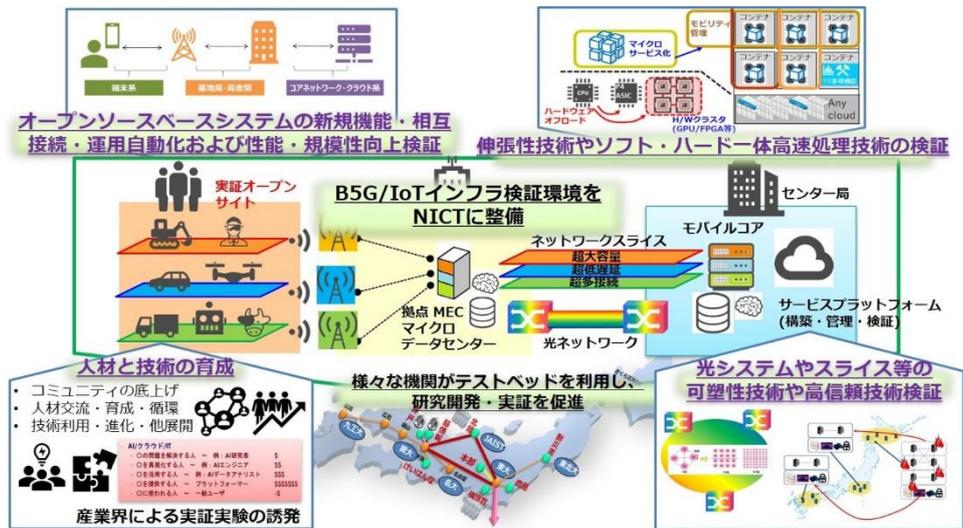


図5.2 高信頼・高可塑 B5G/IoT テストベッドの概要

第6章：展開戦略

6.1 Beyond 5G/6Gに向けた標準化動向

3G以降、民間の標準化団体(3GPP等)が策定した仕様を、ITU無線通信部門(ITU-R)において勧告化し、国際標準とする流れが主流の一つとなっている。周波数の国際分配はおおむね4～5年おきに開催される世界無線通信会議(WRC: World Radiocommunication Conference)で決定されるが、ITU-Rで行う移動体通信の標準化は、これまでITU-R SG 5(地上無線通信)のWP5D(移動体通信・IMT関連)で行われている。

WP5Dでは、2020年10月からBeyond 5G/6Gの標準化の最初のステップである将来技術トレンド調査の作成を開始しており、2022年6月の完成を予定している。まず、将来技術トレンド調査にNICT及び日本の技術の要素を盛り込みつつ、技術の具体性向上やパートナー関係の構築を行いながら、標準化の次のステップであるVision勧告の反映に取り組む活動が必要である。

WP5D会合(2020.2 及び 2020.10)で、合意された標準化プロセスは図6. 2のとおりである。IMT-2020の発展形の将来技術トレンド調査を2022年6月完成予定で検討開始しており、これと並行してビジョン勧告の検討を2021年6月から開始し、2023年6月に完成予定である。

総務省ではBeyond 5G推進コンソーシアムを12月に設立した。同コンソーシアムではBeyond 5Gホワイトペーパーの策定を予定している。また2021年6月(第38回)のWP5Dから日本寄与文書として将来技術トレンド及びビジョン勧告に提案している。

NICTでは、当面2023年までは技術トレンド調査及びビジョン勧告でNICTの技術シーズ

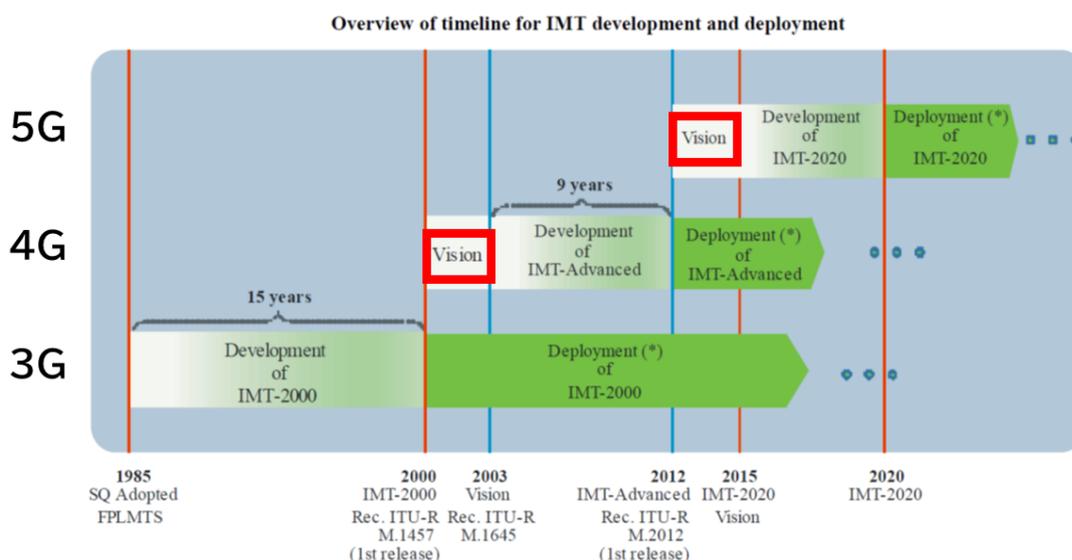


図6.1 3G、4G、5Gのプロセス(ITU-R勧告 M.2083 Figure 1 より。Visionの赤枠及び左側の「3G、4G、5G」はNICTで追記)

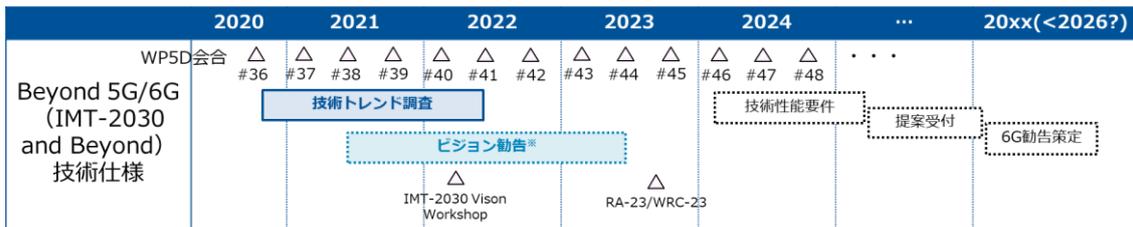


図6.2 第34回WP5Dで合意された標準化プロセス

を盛り込み、Beyond 5G/6Gの技術として位置付け、早期実用化に向けて標準化に貢献することを考えている。その後、具体的な技術仕様などの標準化では、NICTの技術シーズを用いて製品・サービス化を行う民間企業が、ビジネスの側面から知財戦略と一体となって標準化活動を実施すると考えられるため、NICTのパートナーとなる民間企業に円滑に橋渡しを行うことが重要となる。

必要な周波数の確保は2023年の世界無線通信会議(WRC-23)で対応するほか、技術性能要件等の策定に向けた活動は3GPPや民間フォーラム等とも連携して取り組む予定である。

6.2 Beyond 5G研究開発促進事業

総務省から令和2年6月に公表された「Beyond 5G推進戦略 ―6Gへのロードマップ―」(図6.3)では、2030年頃の Beyond 5G/6G導入までの取組を「先行的取組フェーズ」と「取組の加速化フェーズ」に分けて記載している。このうち、「先行的取組フェーズ」の一環として、我が国に「強みがある技術」と「持つことが不可欠な技術」の研究開発力を重点的に強化するため、「Beyond 5G研究開発促進事業 研究開発方針」(令和4年2月総務省)(以下、研究開発方針)に則り、国費による集中的な支援を受けている「Beyond 5G研究開発促進事業」を推進している。



図6.3 「Beyond 5G推進戦略 ―6Gへのロードマップ―」

「Beyond 5G研究開発促進事業」では、「グローバル・ファースト」、「イノベーションを生み出すエコシステムの構築」及び「リソースの集中的投入」という3つの基本方針に従い、以下の3つのプログラムを実施している。

- ① Beyond 5G 機能実現型プログラム
- ② Beyond 5G 国際共同研究開発プログラム
- ③ Beyond 5G シーズ創出型プログラム

このうち、Beyond 5Gの実現に必要なかつ戦略的に重要な要素技術を研究開発する「Beyond 5G機能実現型プログラム」では、以下の2つに分類している。

1. 開発目標(数値目標等)を具体的かつ明確に定めてハイレベルな研究開発成果の創出を目標とする「基幹課題」
2. 開発目標(数値目標等)について外部の自由な発想に委ね、当該開発技術に関する研究開発提案を広く公募する「一般課題」

特に、1.の基幹課題の実施にあたっては、研究開発方針にある「Beyond 5G機能実現型プログラム」の研究開発課題候補リスト(第2版)(図6.4)を参照しつつ、研究開発課題を選定し、選定した研究開発課題の研究計画書を策定している。

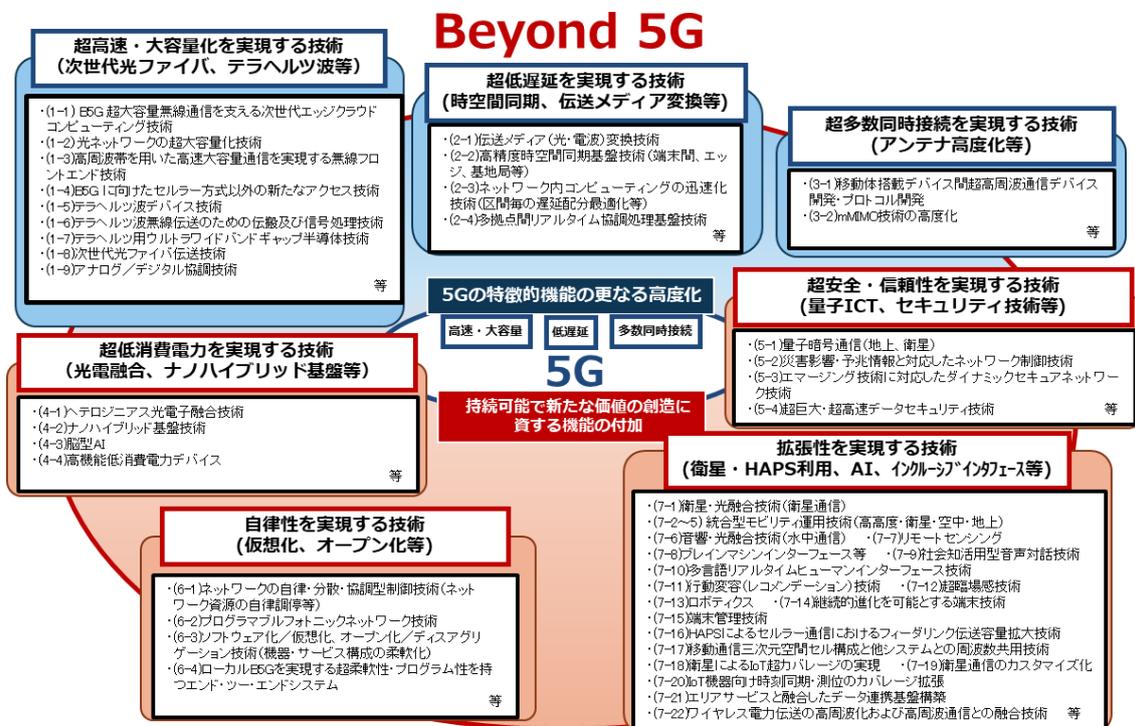


図6.4 研究開発方針における研究開発課題候補リスト(第2版)

本事業の委託研究においては、これまで計 44 課題を採択した。その内訳は、「Beyond 5G 機能実現型プログラム(基幹課題)」が 6 課題(うち、1 課題は令和 2 年度に採択)、「Beyond 5G 機能実現型プログラム(一般課題)」が 20 課題、「Beyond 5G 国際共同研究型プログラム」が 3 課題、「Beyond 5G シーズ創出型プログラム(委託研究)」が 15 課題(うち、若手・中小企業枠で 4 課題)となっている。なお、これらの採択した課題(課題分布図は図 6.5 のとおり)では、多岐にわたる技術分野をカバーしており、特に Beyond 5G のネットワーク基盤となる無線・光通信分野を中心に、Beyond 5G の実現に寄与する委託研究を実施している。

また、革新的な技術シーズやアイデアを有しながら、困難な課題に意欲的に挑戦するベンチャー・スタートアップ等の中小企業を対象に助成金を交付するため、本事業の「Beyond 5G シーズ創出型プログラム」のうち、「革新的ベンチャー等助成プログラム(SBIR)」に係る助成金事業を公募し、令和 4 年 2 月に 3 事業を採択した。これにより、委託研究だけでなく、ベンチャー・スタートアップ等の中小企業の Beyond 5G 関連事業にも積極的に助成することで、技術シーズの創出からイノベーションを生み出す機会を増やしている。

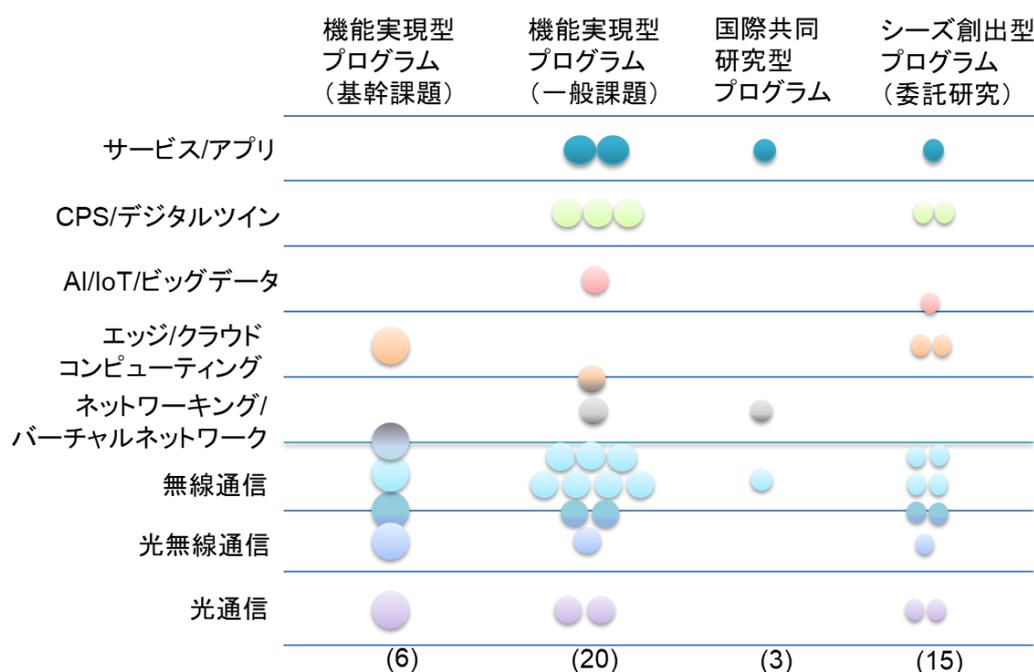


図6.5 「Beyond 5G 研究開発促進事業」の課題分布図

Beyond 5G 実現に向けての新たな研究開発課題等の検討のため、2030 年頃の革新的な社会像を具体化するための取組や、重点的に強化する必要がある先駆的な研究開発課題について令和3年10月～11月に提案募集を行い、その結果を踏まえて令和4年2月に「Beyond 5G 研究開発ワークショップ」を開催した。同ワークショップでは、Beyond 5G の

推進方策や将来像等に関して産学官の関係者で意見交換を行った。

このような本事業の各プログラムの実施により、2025年頃から順次 Beyond 5G の要素技術を確立するとともに、3GPPや ITU-R 等での国際標準にも貢献することで、2030年頃の Beyond 5G の実現に向けて取り組んでいる。

第7章：おわりに

本ホワイトペーパーでは、2030年以降の社会生活をイメージした3つのシナリオを作り、これらのシナリオに書かれた未来社会からバックキャストすることで、Beyond 5G/6Gのコンセプトやユースケース、それらを支える要素技術についてまとめ、研究開発のロードマップを示した。さらには、研究開発に必要なオープンプラットフォームや、展開戦略についても触れ、今後の研究開発の全体像を示した。

描かれている社会生活・世界観を実現するため、必要な未来技術を開発・実装して利用するには、情報通信分野だけでなく、多種多様な分野における技術的進化を見据え、様々なステークホルダーの皆様と議論を行って、目標を具体化して行くことが必要である。このホワイトペーパーを議論の種として、多くのステークホルダーの皆様との議論を重ねていきたい。

付録1: サービスイネーブラの疑似コード

サービスイネーブラの使い方の具体例として、遠隔地にある工場にあるアバターロボットを活用して機器修理を行う場合、世界中の複数の技術者がアバターロボットに接続し、協調操作する場合を考える。この場合、作業メンバの間で様々な視点からリアルな作業を可能にするための臨場感の共有と、作業者の間での通信遅延の違いに起因する違和感を吸収するためのAIによる遅延補償が必要だと考え、サービスの実装者は「グループ超臨場感共有」と「遅延補償遠隔操作」の機能及び、最適制御の「AI/ML 処理」などを、機能呼び出しすることで、実現したいサービスの主要機能のプログラムコードのみを記述するだけで、容易にサービスを構築することができる。

サービスイネーブラの使い方の例として、付図1. にプログラム実装のイメージを疑似コードで示す。Avatar クラスのインスタンス av に対して、GroupVR と DelayCompensateAI のサービスイネーブラを追加し、それぞれ必要なパラメータを設定している。

```
#create instances for Avater Class and ServiceEnabler Class
Avatar av;
ServiceEnabler vr, delay;

#create an instance for avatar
av.createAvatar(myProfile, FACTORY, JAPANESE);

#create two instances for service enabler
vr.setMode(RealPresenceMode);
vr.setGroup(userList);
delay.setMode(DelayCompensateAI);
delay.setMode(FactoryRobot, 0.1ms);

#add service enablers to avatar and run it
av.addServiceEnabler(vr);
av.addServiceEnabler(delay);
av.run();
```

付図1. アバターロボットの遠隔操作を想定したサービスイネーブラ呼び出しの疑似コード例

謝辞

本ホワイトペーパーの第1版を公開するに当たり、その内容をNICT職員が広く議論するため、2021年1月20～21日の2日間にわたり、NICT Open Summit 2020を開催しました。このイベントに外部有識者としてご参加頂き、NICTが行うべき Beyond 5G/6Gの研究開発の方向性について貴重なご助言を賜りました下記の皆様に深く感謝の意を表します。

小西 聡 様 (KDDI総合研究所 取締役執行役員副所長 先端技術研究所長
兼 KDDI技術統括本部 技術企画本部 副本部長)

三瓶 政一 様 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

中尾 彰宏 様 (東京大学大学院情報学環 教授)

中村 武宏 様 (株式会社NTTドコモ 執行役員 ネットワークイノベーション研究所長)

松井 康範 様 (ソニー株式会社 事業開発プラットフォームRL準備室室長)

湧川 隆次 様 (ソフトバンク株式会社

テクノロジーユニット 技術戦略統括 先端技術開発本部 本部長)

Prof. Andreas Dengel (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche
Intelligenz)

Prof. Matti Latva-aho (Univ. of Oulu)

Dr. Onur Altintas (Toyota Motor North America R&D)

著者(50音順)

朝枝 仁・東 充宏・阿部侑真・安藤広志・飯田 龍・石島 博・石津健太郎・磯貝光雄・市川隆一
井戸哲也・伊東 寛・井上大介・伊深和雄・今井弘二・入交芳久・内元清貴・江口智之・呉 鍾勲
大倉拓也・大竹清敬・大堂雅之・笠間貴弘・笠松章史・加藤明人・Callan Daniel・川崎 耀
川村誠治・菅 智茂・菅野敦史・久保田 実・児島正一郎・児島史秀・小竹秀明・斎藤裕紀
坂口 淳・佐々木雅英・佐藤孝平・澤田華織・志賀信泰・荘司洋三・菅 良太郎・杉林 聖
鈴木隆文・鈴木陽一・隅田英一郎・関根徳彦・是津耕司・滝沢賢一・武岡正裕・辻 宏之
寺西裕一・照井通文・天間克宏・土井美和子・豊嶋守生・鳥澤健太郎・中川拓哉・中澤忠輝
永野秀尚・成瀬 康・西永 望・根津ひろみ・萩原雄一朗・橋本安弘・蜂須英和・花土ゆう子
浜田リラ・原 紳介・原 基揚・原井洋明・表 昌佑・廣田悠介・藤井勝巳・藤田 智・藤原幹生
布施哲治・古川英昭・古澤健太郎・寶迫 巖・細川瑞彦・松園和久・松田隆志・松村 武・松本 敦
水野麻弥・三浦 周・三浦 龍・宮澤高也・村上 誉・諸橋 功・安田 哲・山口真吾・山本俊太郎
山本直克・Joachimczak Michal・横田悠右・吉田真紀・吉田悠来・吉村直子・Liu Juan
和氣加奈子・渡邊一世・渡部宏樹

更新履歴

2021.3.31 1.0版の公開

2022.3.30 2.0版の公開

- ・2章のアーキテクチャをオープンプラットフォームの視点で更新
- ・3章に ELSI に関するシナリオを1つ追加
- ・4章の要素技術を追加整理
- ・5章と6章を最新の状況を踏まえて更新



Beyond 5G/6G White Paper 日本語 2.0 版
2022 年 3 月発行

ISBN978-4-904020-24-1

国立研究開発法人情報通信研究機構

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail B5G-inquiry@ml.nict.go.jp

URL <https://beyond5g.nict.go.jp/>

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

