



国立研究開発法人
情報通信研究機構
National Institute of Information and
Communications Technology

Beyond 5G / 6G White Paper

March 2021

Beyond 5G/6G White Paper

(1.0版)

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)

2021年3月

目次

エグゼクティブ・サマリー	i
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 サイバー空間とフィジカル空間を統合する Beyond 5G/6Gの全体像	5
第3章: Beyond 5G/6G時代はどんな世界に?(シナリオとユースケース)	8
3.1 シナリオ1 — Cybernetic Avatar Society	8
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	8
3.1.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	10
3.2 シナリオ2 — 月面都市	13
3.2.1 月を耕す人	13
3.2.2 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	16
3.3 シナリオ3 — 時空を超えて	20
3.3.1 クリエイティブでアクティブな平穏	20
3.3.2 Dive to the point	21
3.3.3 空を行き交うのは	22
3.3.4 ユースケース事例とその実現に必要な要素技術	22
第4章: Beyond 5G/6Gの実現に必要な要素技術	26
4.1 ユースケースを可能にする要素技術群	26
4.2 各要素技術の概要	26
4.2.1 超高速・大容量通信	26
4.2.2 超低遅延・超多数接続	29
4.2.3 有無線通信・ネットワーク制御技術	34
4.2.4 無線システムの多層化—NTN	36
4.2.5 時空間同期	40
4.2.6 超安全・信頼性	42
4.2.7 超臨場感・革新的アプリケーション	47
4.3 研究開発ロードマップ	51

第5章： 研究開発オープンプラットフォーム.....	53
第6章： 展開戦略.....	55
6.1 Beyond 5G/6Gに向けた標準化動向.....	55
6.2 Beyond 5G/6G研究開発ナショナルプロジェクト「Beyond 5G研究開発促進事業」	56
第7章： おわりに.....	58
謝辞.....	59

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が必須であり、その機能構成を定義していくことが重要です(図 A)。まず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ます。またサイバー空間では、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います。

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、両空間が統合されることで、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ります。統合されたフィジカル空間とサイバー空間をまたいで実現するイネーブラー(基盤サービス/基盤機能)を組み合わせることにより新たなアプリケーションが提供されて、様々な社会課題の解決にも役立つことが期待されます。

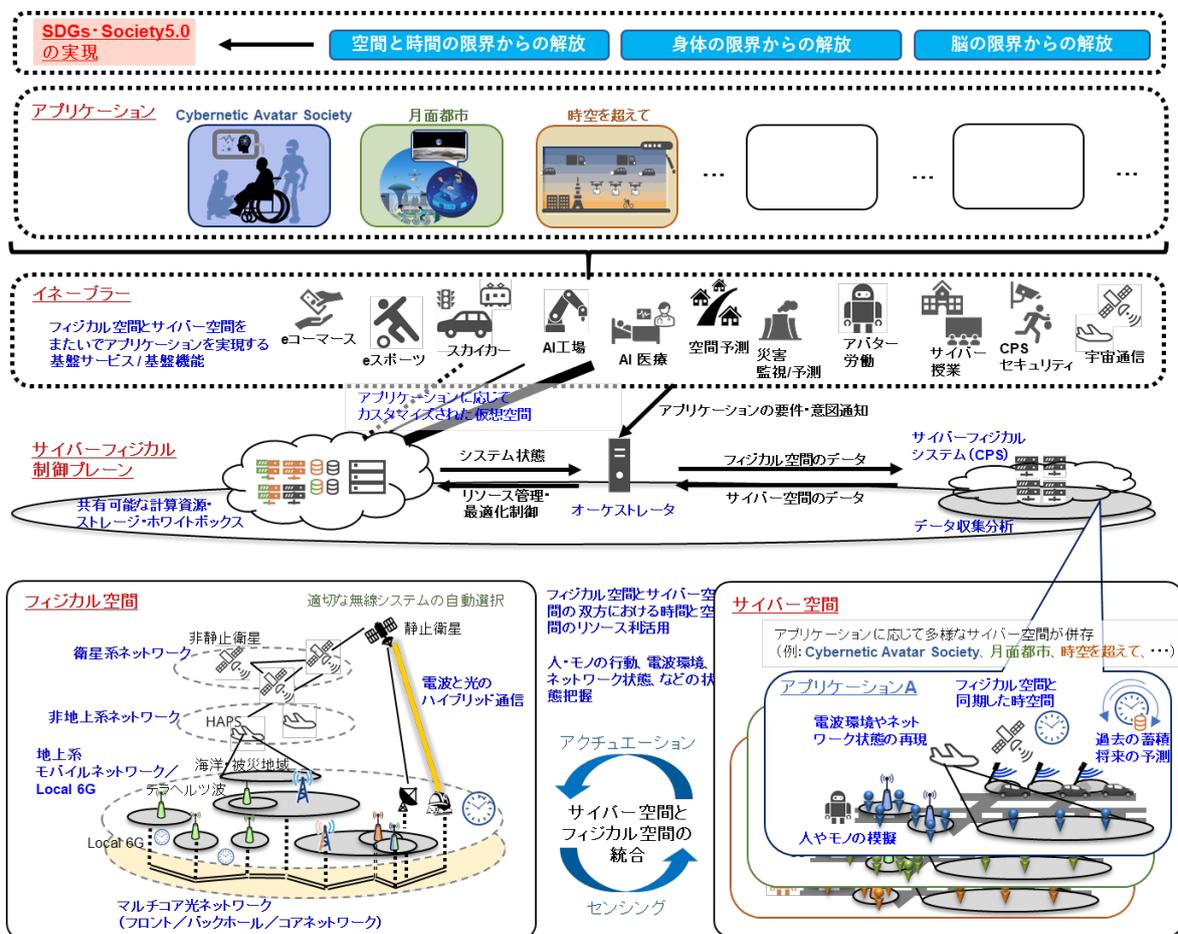


図 A: SDGsの達成やSociety 5.0を実現するBeyond 5G/6Gの機能構成の概要 (本文中 図2.2)。

本ホワイトペーパーの3章では、2030年～2035年頃の社会生活をイメージした3つのシナリオといくつかのユースケースを紹介します。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」の3つのシナリオのイメージを図Bに、各シナリオの想定するロードマップを表Cに示しています。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を試み、ホワイトペーパー後半ではユースケースを実現するための要素技術と要求条件、研究開発ロードマップ(4章)や展開戦略等(6章)をまとめています。

この資料は、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最初の取組です。今後は、これを基に多くの皆様と議論を重ね、その議論の進展に合わせて、本ホワイトペーパーを随時改訂する予定です。

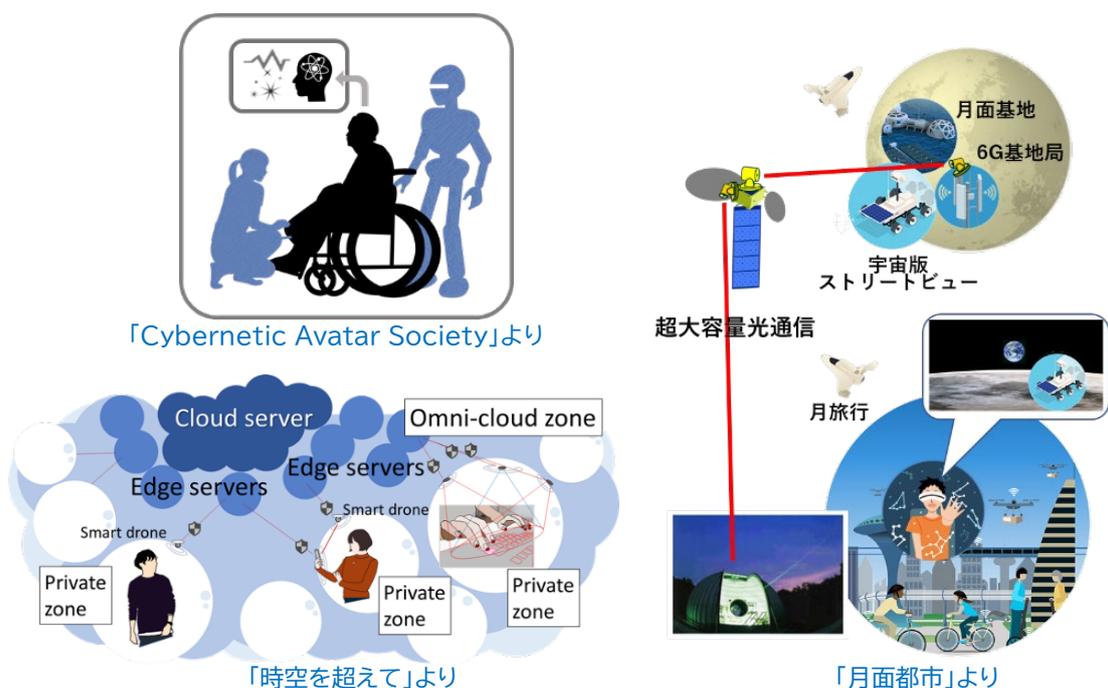


図 B: 2030年～2035年頃の社会生活をイメージしたBeyond 5G/6Gの3つのシナリオ (本文中 図 3. 9、図 3. 16、図 3. 23)。

表C: 各シナリオの想定するロードマップ

	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		▲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
Cybernetic Avatar Society(3-1)		▲月ゲートウェイ	▲月面上実証実験	▲月面開発調査開始
月面都市(3-2)		▲月ゲートウェイ/ARTEMIS計画の推進	▲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よるインフラ保全・環境監視
時空を超えて(時空間同期)(3-3)				

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

現在(2021年3月)、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ます。

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ました。

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ます。

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ります。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ます。



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

現在、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ます。

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/



図 1.2: 空間的に分散した個人が高度な神経網(Beyond 5G/6G)でつながり、サイバー空間を通じて他者やロボット、アバターと協働。いかなる時でも価値を創出し続ける。

強制されています。

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ますが、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ます。

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ます。

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、安全保障の観点からも大きな注目が集まっています。

経済的にも安全保障的にも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ます。

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ます。

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ります(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

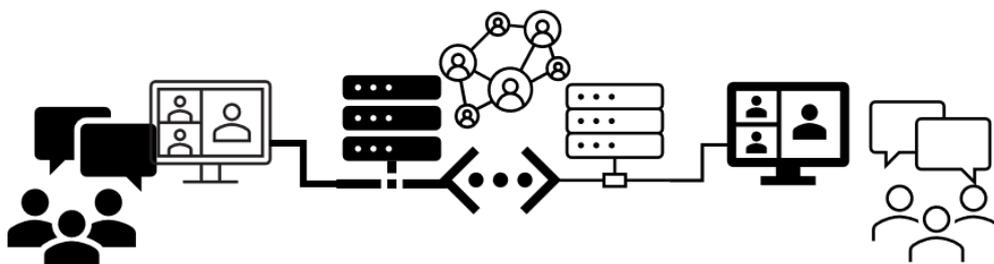
このホワイトペーパーは、情報通信技術のエキスパート集団としてのNICTが Beyond 5G/6G世界の実現に向けて検討を行ったものです。

2030年～2035年頃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」の3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ました。

シナリオとそこに登場するユースケース(3章)、それらを実現するための要素技術と要求条件、研究開発ロードマップ(4章)や展開戦略等(6章)をまとめています。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ありません。



今後は、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たいと考えています。それらの議論の進展に合わせ本ホワイトペーパーを随時改定する予定です。



<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/>

<https://www.6gchannel.com/portfolio-posts/6g-white-paper-validation-trials/>

(2)コンソーシアム等

●Beyond 5G 推進コンソーシアム

<https://b5g.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

情報通信ネットワークの革新により、

- ① (包摂性)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、
- ②(持続可能性)社会的なロスがない、便利で持続的に成長する社会、
- ③(高信頼性)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」、即ち Society 5.0の実現が望まれています。

情報通信ネットワークを通じて現実世界を計測し、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ます。このシステムにより「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ます。

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ます。いわゆる共有経済(シェアリングエコノミー)と言われるものです、交通機関におけるカーシェアリング、労働環境におけるコワーキング、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ります。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しそうです。

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、ハードウェアのホワイトボックス化が進展すると共に、より複雑化したネットワークの制御には人工知能(AI: Artificial Intelligence)技術が適用されて行くことになると考えられます。ネットワーク仮想化やハードウェアのホワイトボックス化は端末側にも波及することでしょう。

これまでは個別のネットワークであった移动通信システムを含む地上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統合化されて行き、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)、ドローン、空飛ぶ車を巻き込んで行くと考えられます。

電波資源はミリ波帯や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ることとなりそうです。

2.3 サイバー空間とフィジカル空間を統合する Beyond 5G/6Gの全体像

Beyond 5G/6Gにおけるフィジカル空間とサイバー空間の統合利用による社会課題の解決の概要を図2.1に示します。Beyond 5G/6Gでは、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、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ります。このようなフィジカル空間とサイバー空間の統合は、制御プレーンによる情報の管理と制御により実現されます。さらに、統合されたフィジカル空間とサイバー空間をまたいでアプリケーションを実現するためには基盤サービス/基盤機能が必要となり、これをイネーブラーと呼びます。イネーブラーの組み合わせにより、様々なアプリケーションが提供されていきます。このようにして提供されるBeyond 5G/6Gのアプリケーションが、今後ますます増加する社会課題を解決していくと期待されます。

次に、図2.1をさらに詳細化した図2.2に基づき、Beyond 5G/6Gの具体的な機能構成について話を進めます。

5Gまでの移動通信システムでは、周波数は重要なリソースとして管理の対象となってきましたが、時間や空間は併せて積極的に管理されるべきリソースとして、十分に認識されてきませんでした。しかし、時間や空間は高度なアプリケーションを実現する上で欠かせないリソースです。そこでBeyond 5G/6Gでは、**時間や空間が重要なリソースであるとの認識に立ち、サイバー空間における予測とそれに基づくフィジカル空間の最適な制御を積極的に行うこと**により、それらを有効に活用することが必要であると考えます。本ホワイトペーパーでは、この考えに従い、図2.2に示すようなBeyond 5G/6Gの機能構成を想定していくことにします。

Beyond 5G/6Gにおいて解決を目指す社会課題は、持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)や Society 5.0に代表されるように多岐な分野に

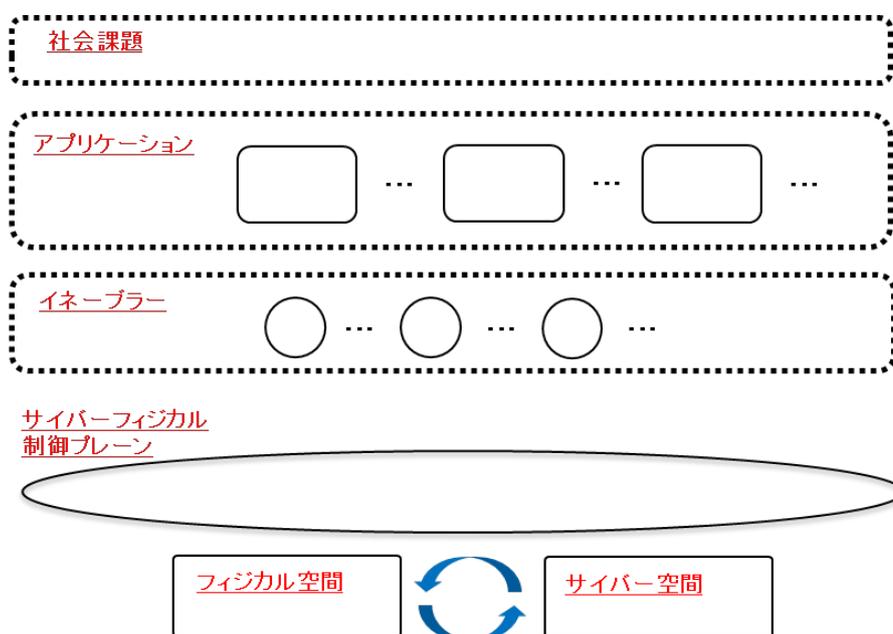


図2.1: Beyond 5G/6Gにおけるフィジカル空間とサイバー空間の統合と社会課題の解決。

渡ります。この際、扱う空間をフィジカルからサイバーにまで拡張することにより、「空間と時間」、「身体」、「脳」など、従来の常識では超えることが容易ではなかった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ります。

社会課題を解決するのは多様なアプリケーションです。アプリケーションの例として、本ホワイトペーパーでは第3章で「Cybernetic Avatar Society」「月面都市」「時空を超えて」の3つのシナリオを紹介します。アプリケーションは、フィジカル空間とサイバー空間をまたぐ基盤サービス/基盤機能としてのイネーブラーにより実現します。イネーブラーは、アプリケーションを実現する機能の構成要素であり、例としてeコマース、次世代アバター、宇宙通信などが挙げられます。イネーブラーは、フィジカル空間とサイバー空間の両方を扱えるCPS readyなものとなります。

フィジカル空間とサイバー空間はサイバーフィジカル制御プレーンにより管理され、時間や空間を含めたりソースの利活用や、人・モノの移動、電波環境、ネットワーク状況などの状態把握、情報共有、最適制御を行います。フィジカル空間からサイバー空間にはセンシング結果を提供し、サイバー空間からフィジカル空間へはアクチュエーションを行うことにより、双方の空間において時空間リソースの高度な制御を可能とします。

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

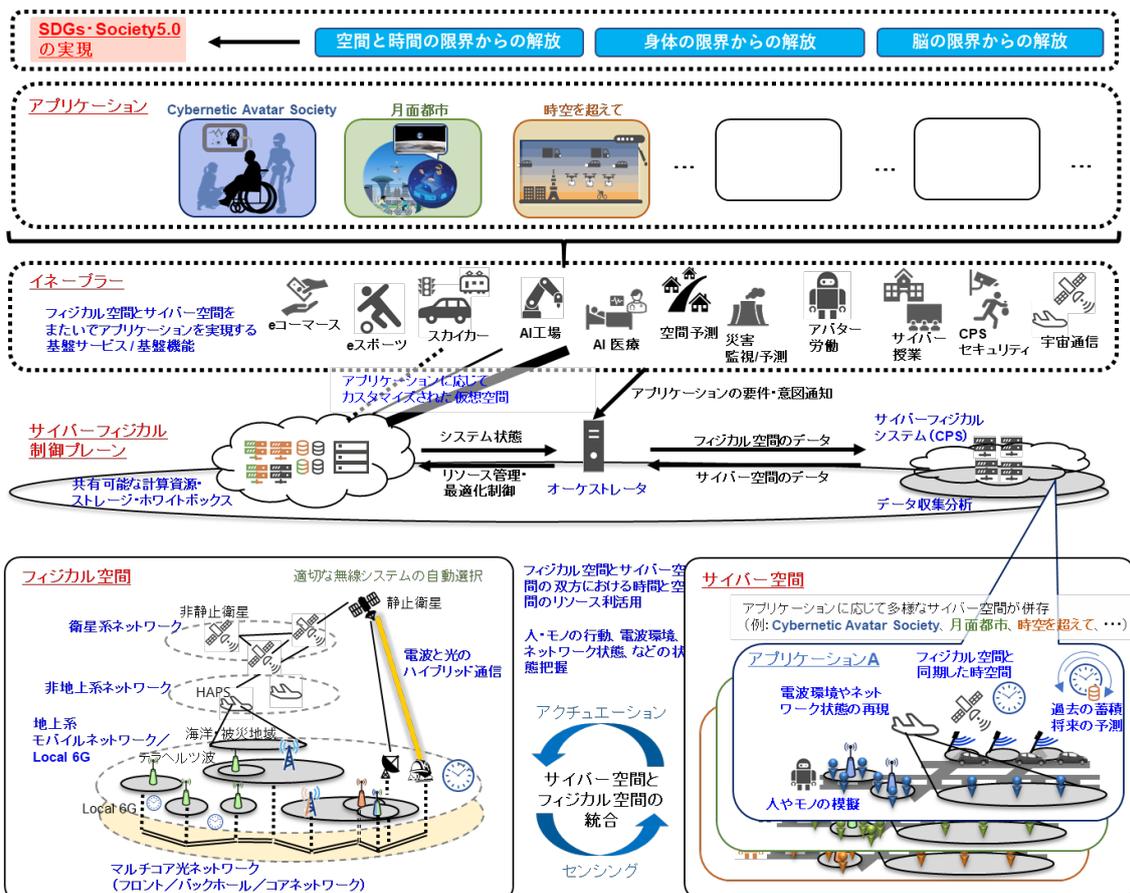


図2.2: SDGsの達成やSociety 5.0を実現するBeyond 5G/6Gの機能構成の概要。

するシステムだけでなく、ローカル5G、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無線システムが統合して扱われます。次世代光ネットワークやデータセンターがそれらのシステムと一体になり、お互いのリソースを柔軟に組み合わせることにより、アプリケーションに対してその要求や意図に応じた最適な通信環境を提供します。

サイバー空間では、フィジカル空間に対応した空間が定義されますが、フィジカル空間のリアルな再現だけではなく、様々なアプリケーション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います。この際、サイバー空間では現実とは異なる時間軸や現実の実証が困難なシナリオで検証を行うことも可能となります。

第3章: Beyond 5G/6G時代はどんな世界に?(シナリオとユースケース)

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。

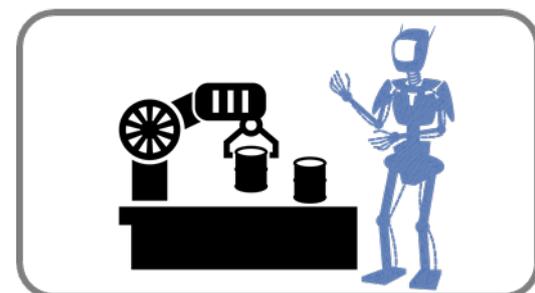


図3.3: 緊急トラブルへの遠隔対応。

■ 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。

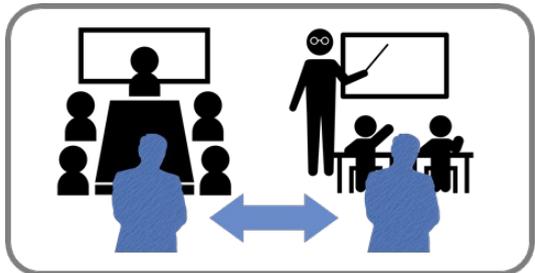


図3. 5: 社会会議と授業参観。

■ 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だ。

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～)

【どんなシステム？なぜ必要？】

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ですが、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ます。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との相互理解がより深まります。

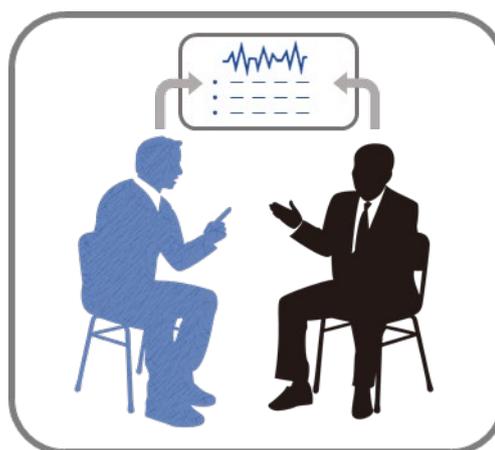


図3. 8：相互理解促進システム(UC1-1)。

【利用形態】

- 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。

【必要となる要素技術】*4章参照

(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

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～)

【どんなシステム？なぜ必要？】

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ます。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ます。国内の介護者の数には限りがありますが、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ります。



図3. 9: 心と身体の支援アバター (UC1-2)。

【利用形態】

- 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。

【必要となる要素技術】 *4章参照

- (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

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~)

【どんなシステム?なぜ必要?】

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ます。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ます。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



図3. 10: テレプレゼンスによる働き方革命 (UC1-3)。

一を複数の操作者が切り替えて利用することも可能になります。

【利用形態】

- 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。

【必要となる要素技術】 *4章参照

(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

3.2 シナリオ2 — 月面都市

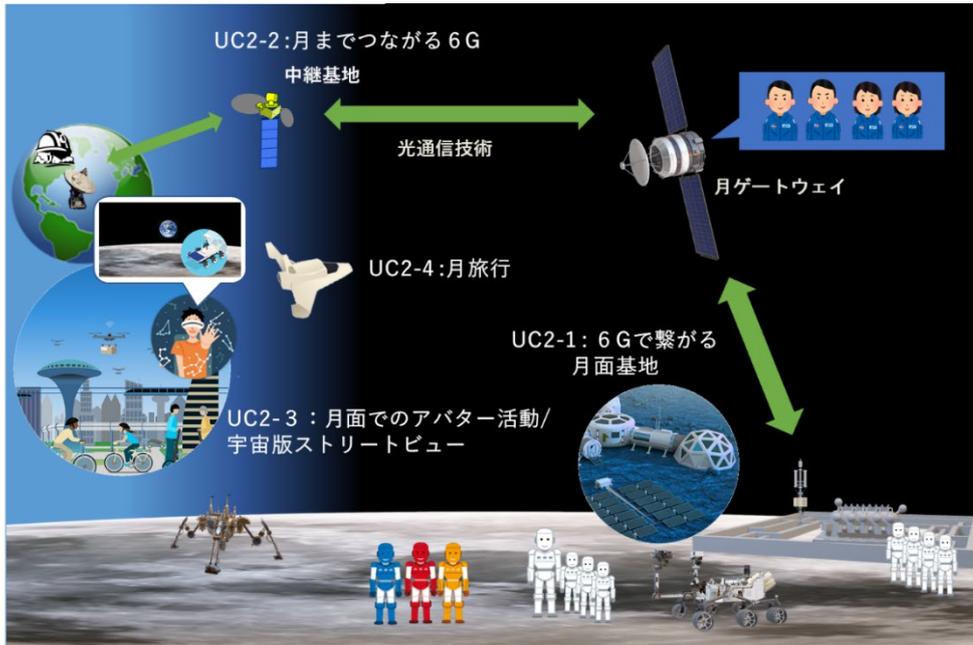


図3.11: シナリオ・月面都市のイメージ。

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%も広いですが、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。

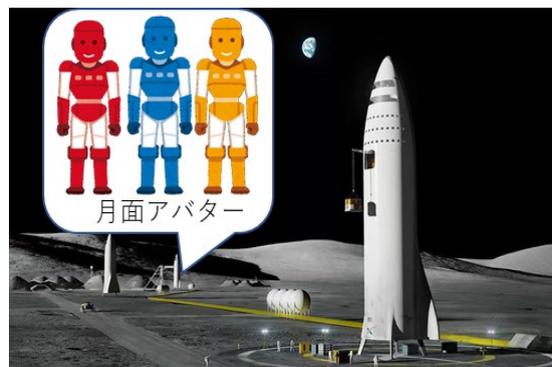


図3.13: 月入植と月面基地開発イメージ*
*Space-X 月基地 α: <https://www.theverge.com/2017/9/28/16382716/spacex-elon-musk-moon-base-alpha-mars-colonization-interplanetary-transport-system>

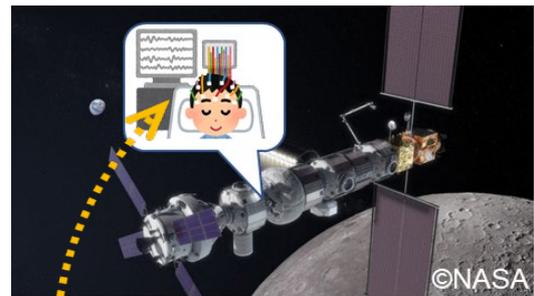
ターマシンにコネクトを開始した(UC2-1、UC2-3)。私も残ったレモンティーを排出ダクトに流し、自分のポッドに滑り込む。

<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

それで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、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。

<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)。

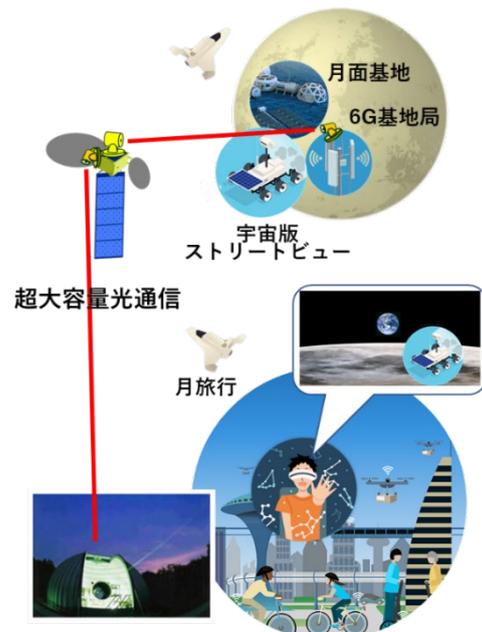


図3.16: 地球からの宇宙版ストリートビュー。

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

【どんなシステム?なぜ必要?】

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ります。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ます。

【使用条件】

- 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。

【必要となる要素技術】*4章参照

(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

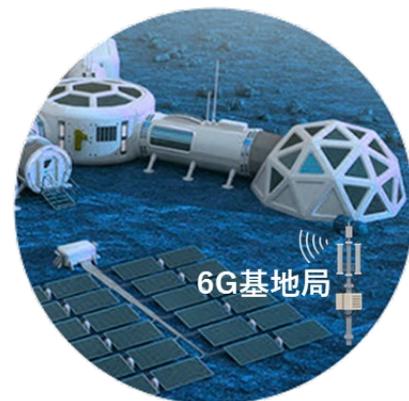


図3.17: 6Gで繋がる月面基地 (UC2-1)。

(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)

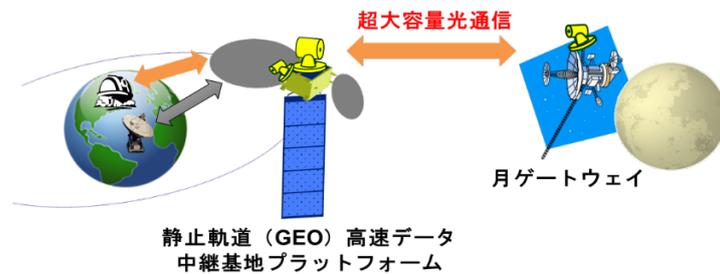
(T4)鉱物・燃料・埋蔵資源、金融情報の伝送(暗号化・セキュリティ・時刻同期要)

(T4)隕石の影響回避(デブリの軌道把握、レーザ軌道変更)

UC2-2 :月までつながる6G

【どんなシステム?なぜ必要?】

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端末が繋がります。



【使用条件】

- 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。

【必要となる要素技術】*4章参照

(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

図3.18: 月までつながる6G(UC2-2)。

UC2-3 :月面でのアバター活動/宇宙版ストリートビュー

【どんなシステム？なぜ必要？】

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います。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でも低減します。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ます。

【使用条件】

- 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や、エッジコンピューティング等での低遅延制御

(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



図3. 19: 宇宙版ストリートビュー (UC2-3)。

UC2-4：月旅行

【どんなシステム？なぜ必要？】

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をするためのシステムです。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・安全な旅行を提供します。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。

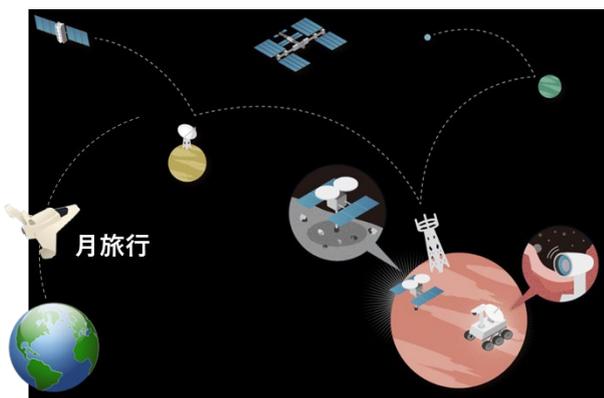


図3.20：月旅行(UC2-4)。

【使用条件】

- 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への対策が必要。

【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穏



<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>

グラスモニター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、言っでは何だが、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*祝いだった(*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。自転車と釣りが趣味で、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。妻も隣で船を漕ぎ始めた。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



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。キーボードホ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。騒がしいのは自転車をチューニングアップしてる祖父の作業音だけ (UC3-3)。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。

チューニングアップの完了した自転車にまたがり、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 : パーティカル ヒト・モノ・コト流

【どんなシステム?なぜ必要?】

スカイカーは夢のある技術です。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す。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ります。

【使用条件】

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します。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す。

【必要となる要素技術】

- (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
- (T7.6)乗用スカイカー
- (T7.7)ドローン

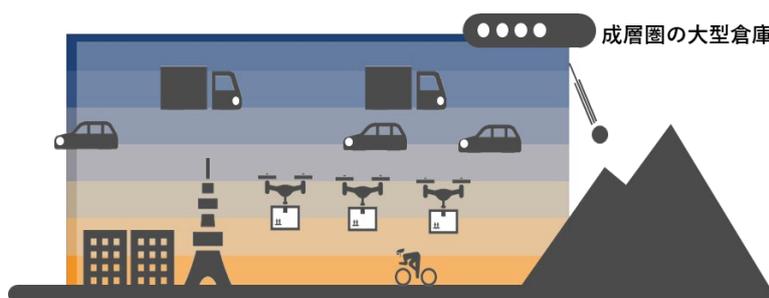


図3. 21: パーティカル ヒト・モノ・コト流(UC3-1)。

UC3-2 : レジリエント里山

【どんなシステム?なぜ必要?】

治水は人口減少の局面で、解決の難しい問題を投げかけます。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きます。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・効率化に役立ちます。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す。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します。

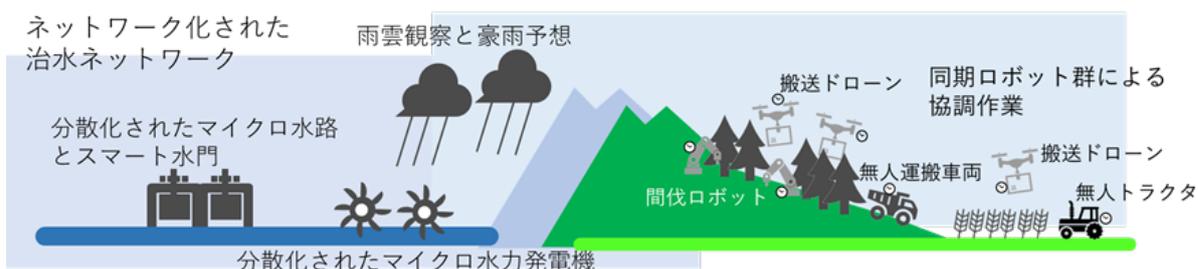


図3. 22: レジリエント里山(UC3-2)。

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します。

【使用条件】

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ます。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。

【必要となる要素技術】

- (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
- (*) (リモート)センサネットワーク

UC3-3：オムニクラウド・ゲートウェイ

【どんなシステム？なぜ必要？】

今までクラウドはつながりに行くところでしたが、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ます。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

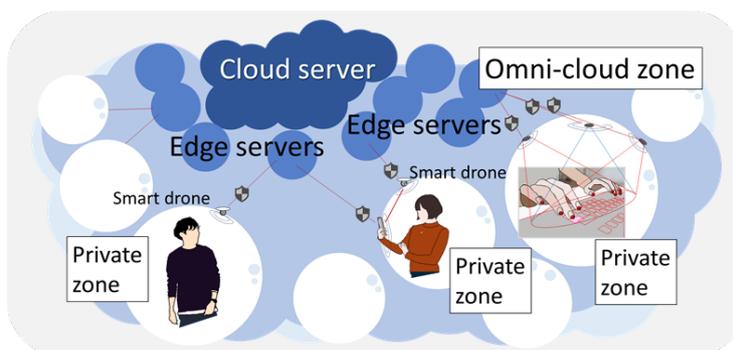


図3. 23: オムニクラウド・ゲートウェイ(UC3-3)。

私達に提供してくれますが、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す。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守りつつ高度なクラウドサービスを手がらで受け取ることができるようになります。

【使用条件】

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します。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します。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。

【必要となる要素技術】

- (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
- (T7.7) マイクロドローン
- (*) 高精度慣性センサ

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ました。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します。ここで紹介する要素技術をまとめたものが表4.1です。

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	技術基準時刻の生成共有技術
T2. 超低遅延・超多数接続		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	遍在社会資源を活用した超多段接続自律M2Mネットワーク構築技術	T6.5	レジリエントICT
T2.6	高度電波エミュレーション	T7. 超臨場感・革新的アプリケーション	
T3. 有無線通信・ネットワーク制御技術		T7.1	脳情報の読み取り・可視化・BMI技術
T3.1	ネットワーク制御技術（ネットワーク運用自動化、ネットワーク内コンピューティング）	T7.2	直感性の計測・伝達・保証技術
T3.2	周波数の割当・共用管理	T7.3	リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術
T3.3	自営無線システム管理（ローカルBeyond5G）	T7.4	言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術
T4. 無線システムの多層化-NTN		T7.5	多言語の同時通訳・言い換え・要約技術
T4.1	衛星・非地上系通信プラットフォーム	T7.6	自動運転
T4.2	光衛星通信	T7.7	ドローン
T4.3	海上通信		
T4.4	海中・水中通信		
T4.5	統合ネットワーク制御		

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どんな技術か：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す。
- ②何に/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します。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ま
す。

- 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ます[1][2]。

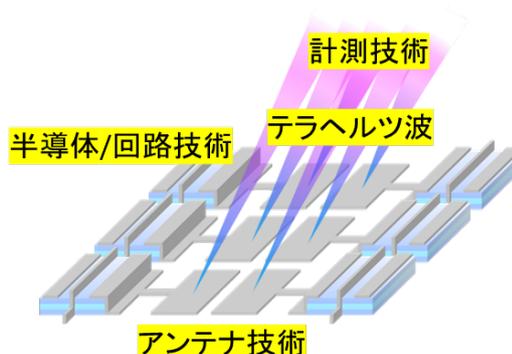


図4. 1: テラヘルツを扱うための要素技術。

- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる

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ります。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ります。

[1] NICTプレスリリース:「每秒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>

T1.2 オール光ネットワーク(大容量光ファイバ通信)

- ①どんな技術か： 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す。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、広く使われています。
- ②何に/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します。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す。
- 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ます[1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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ます。

[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どんな技術か： 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す。

- ②何に/何故必要か： 運動や買い物など、身近な生活では「少し動く」ことが多くありますが、その時にも通信の品質が落ちないようにしたいものです。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になります。
- 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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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ます。

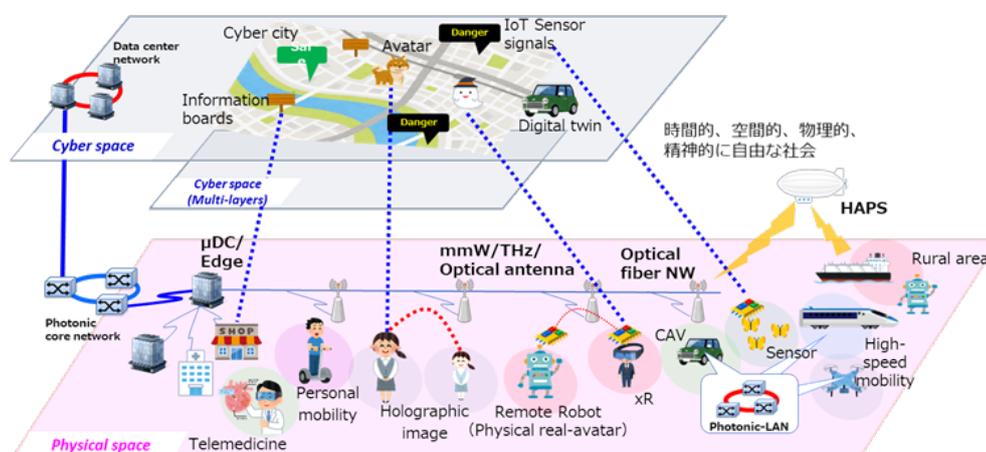


図4. 2： オール光ネットワークによる Cyber Physical Society の実現。

表4. 2： 「超高速・大容量通信」のロードマップ

	2020 - 2024	2025 - 2029	2030 - 2034	2035~
T1.1 テラヘルツ通信	テラヘルツ帯に即した要素技術開発（デバイス・アンテナ素子・信号源・A/D変換）	実装に向けた要素技術の集積化・多重化	テラヘルツ通信のためのシステム化	機能向上（低消費電力化、分解能向上、小型化）
T1.2 大容量光ファイバ通信	高度多値変調技術や広帯域光増幅技術により、光ファイバ1本あたり40Tbps級の伝送容量		マルチコアファイバ技術の導入により、光ファイバ1本あたり100Tbps級の伝送容量。更にその後、1Pbps級の伝送容量。	
T1.3 光・電波融合技術	<ul style="list-style-type: none"> • 100Gbps級光・無線シームレス接続技術 • ~80GHz帯デジタル無線技術 	<ul style="list-style-type: none"> • 空間光やテラヘルツ波等を用いたSub-Tbps級光・無線シームレス接続技術（伝送メディア調和型情報通信技術） • 光や電波の小型集積デバイス技術（マッシュアップ光・電波融合デバイス技術） 	Tbps級伝送メディア調和型ネットワーク	

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どんな技術か： 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す。
- ②何に/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問題もあります。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ります。
- 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を提言しています。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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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ーラビリティが求められます。

T2.2 適応型無線網構築技術

- ①どんな技術か： 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す。
- ②何に/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ます。1) 通信環境に即応して高速伝送性・ロバスト性を調整し、通信を効率化します。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します。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します。
- 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します。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)です。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②の実現のためには、電池無交換で10年

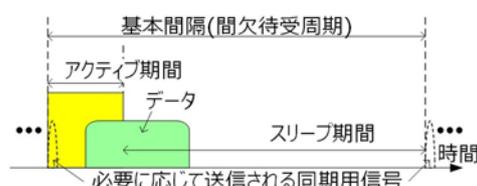


図4.3: 省電力化のための間欠待受け動作。

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す。

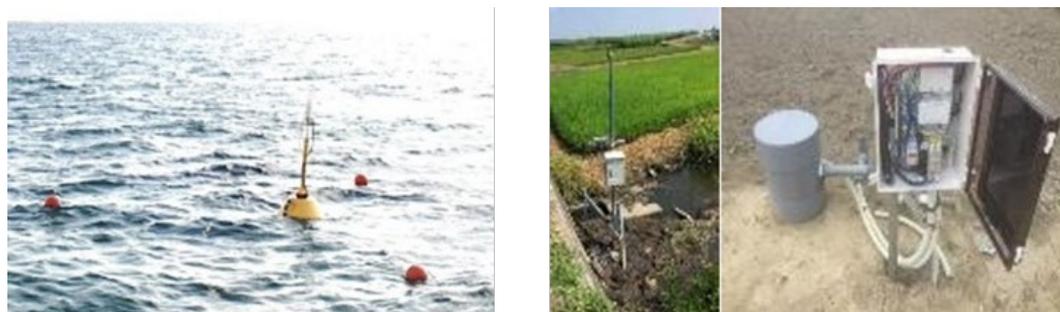


図4. 4: 省電力動作実証(左:漁業、右:農業)

T2.3 適応型無線網アプリケーション技術

- ①どんな技術か: 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す。
- ②何に/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ます。1)優先順位を考慮したセッション管理とトラフィック調整により、情報交換を最適化します。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います。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します。
- 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します[1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件: ②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調に加え、適切なユーザインタフェースの確立が必要です。

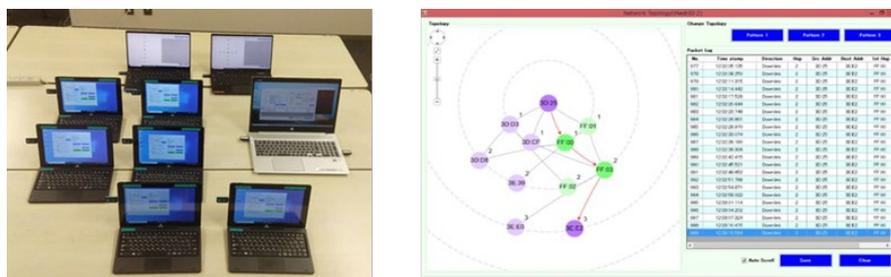


図4. 5: 無線機動作を視覚化するアプリインタフェース(左:無線機群、右:つながり状況)。

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

T2.4 電波放射空間の自律的な局所化・追尾・予約技術

- ①どんな技術か: 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す。

- ②何に/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ます。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ります。
- 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ます[1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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)が求められます。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ます。

[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 遍在社会資源を活用した超多段接続自律M2Mネットワーク構築技術

- ①どんな技術か： 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す。
- ②何に/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あっても、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ます。(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ます)。
- 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します。事例として国内ではスマートメータ分野において、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されています[1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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、が求められます。

[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.

T2.6 高度電波エミュレーション

- ①どんな技術か： 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す。
- ②何に/何故必要か： 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す。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・検証が可能となります。
- ③国内外現状： 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プロジェクトが挙げられます[1]。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ました。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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、等が求められます。

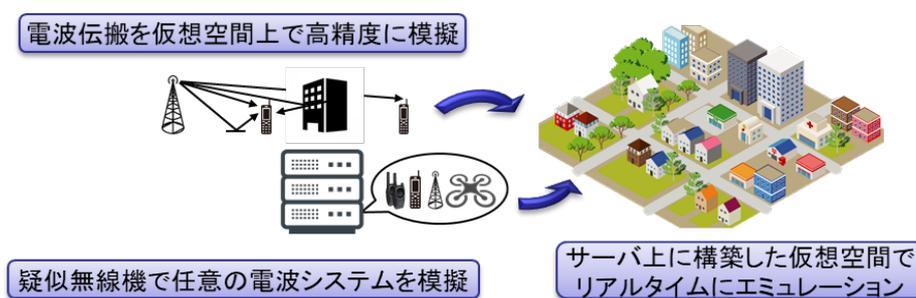
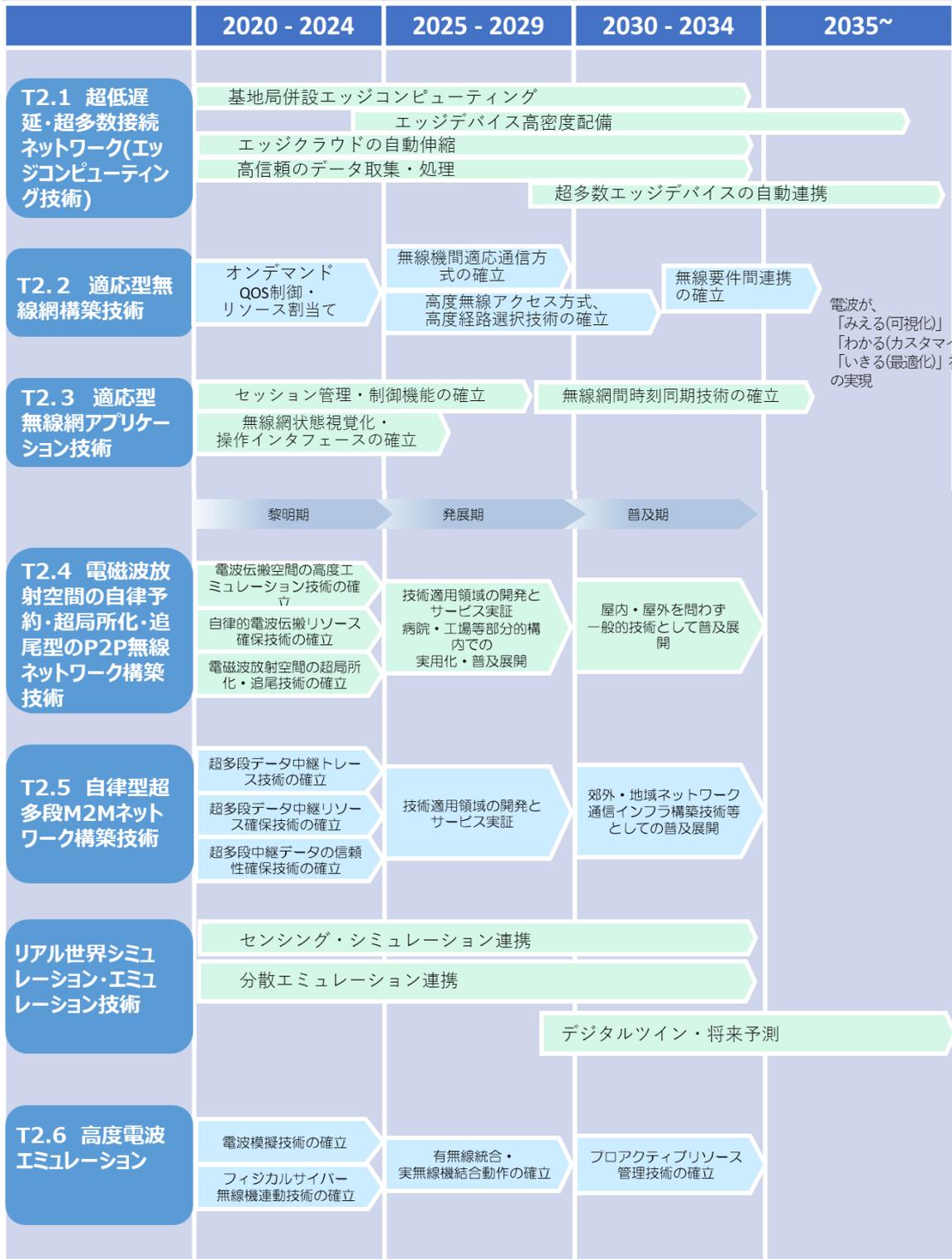


図4.6: 高度電波エミュレーション。

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

表4.3: 「超低遅延・超多数接続」のロードマップ



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(ネットワーク運用自動化、ネットワーク内コンピューティング)

- ①どんな技術か： 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 1)ネットワークテレメトリーや 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、2)情報指向型通信やエッジネットワーク技術を応用した超低遅延かつ高信頼なネットワーク内コンピューティング技術、等です。
- ②何に/何故必要か： 6G時代の安全・安心・便利な社会の実現に向けて、生産人口減少といった将来の社会問題の解消や、6G時代が求めるアプリケーション要件/要求を満たし、かつ膨大な情報から真に必要・有効・信頼出来る情報を選択して迅速に提供するには、①の技術が必須です。
- ③国内外現状： ITU-Tが提唱する「Network2030」が掲げる6Gに向けた新しいネットワークは国際的競争領域です[1]。EUではフィンランドのOulu大を中心とした「6Genesis」プロジェクトがあり[2]、国内ではNTTドコモやNECが2020年にBeyond 5Gや6Gに関するホワイトペーパーを公開しています[3,4]。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エッジコンピューティング技術と情報指向ネットワーク技術の連携が提唱されました[5]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②の実現のためには、オープンソースフレームワーク等を活用し、極力人手を介さずにネットワーク環境を構築する自動化技術、及びアプリケーション品質(超低遅延、高速処理、耐障害等)や情報の信頼性を担保する仕組みが求められます。

[1] https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/White_Paper.pdf

[2] <https://www.oulu.fi/6gflagship/>

[3] https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20210203.pdf

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

[5] <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/10/5G-Americas-EDGE-White-Paper-FINAL.pdf>

T3.2 周波数の割当・共用管理

- ①どんな技術か： 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するための技術です。
- ②何に/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す。

- 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ます[1]。Beyond 5G/6G向けには、周波数共有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ます[2]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件: ②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、等が求められます。

[1] https://www.soumu.go.jp/main_content/000711788.pdf

[2] <https://www.6gworld.com/videos/spectrum-sharing-in-6g-6gsymposium/>

T3.3 自営無線システム管理(ローカル Beyond 5G)

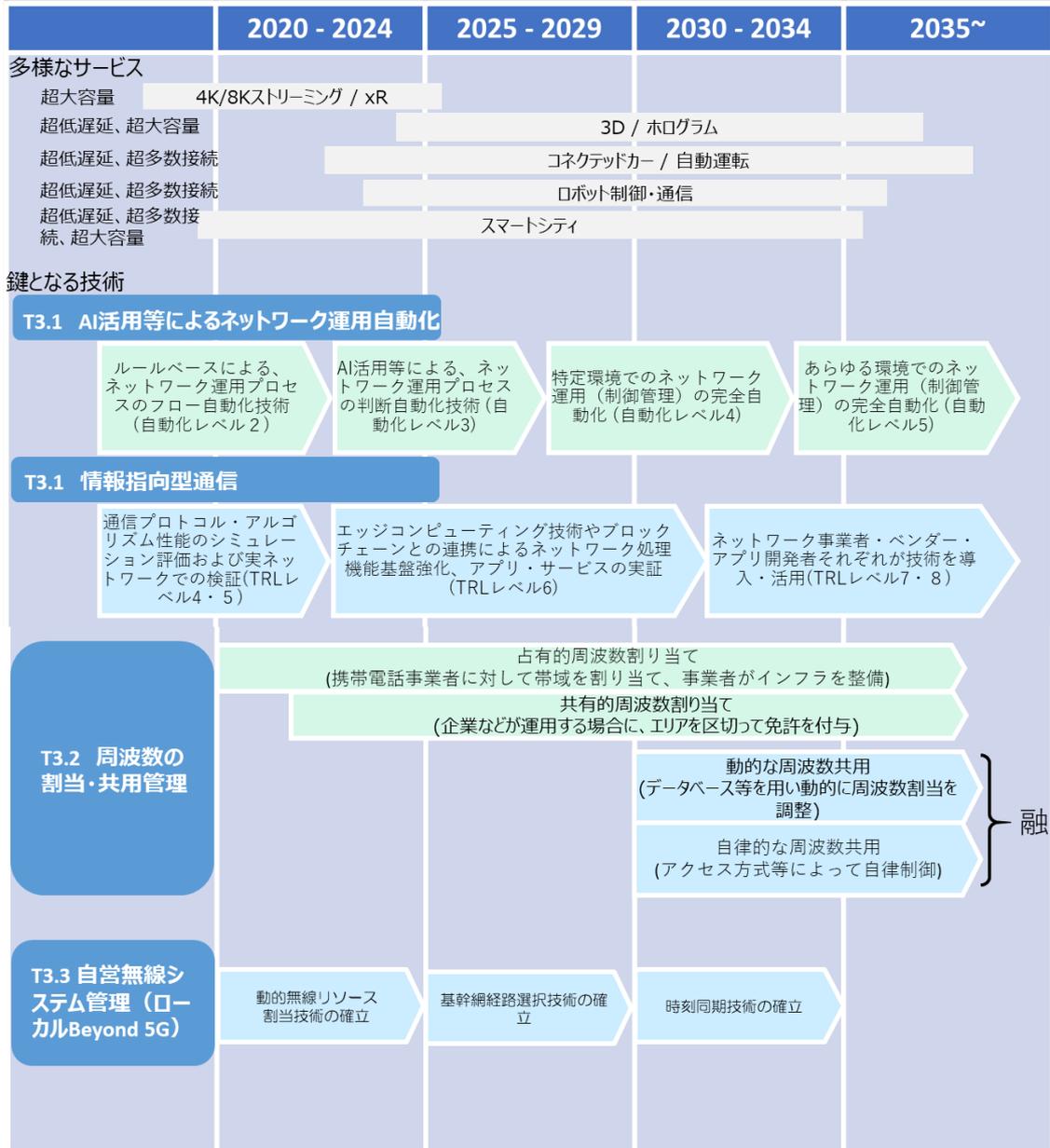
- ①どんな技術か: ローカル5Gは、5Gの高度な技術を自営無線システムで用いるための日本独自の制度です。場所や地域のニーズに応じた機能のカスタマイズ性も期待されています。
- ②何に/何故必要か: 安定性と機密性を兼ね備えており、工場自動化システムやインフラ監視による防災・減災システムなど、産業利用や地域利用が期待されています。
- ③国内外現状: 国内では、独自に4. 6-4. 9GHzと28. 2-29. 1GHzが割り当てられ、導入検討が始まっています[1]。海外でも、ドイツなど同様の制度整備を実施している国もあります。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件: 現状で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すが、今後は公衆網や遠隔地のローカル5Gとの連携が想定されます。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ます。



図4. 7: 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

表4. 4: 「有無線通信・ネットワーク制御技術」のロードマップ



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どんな技術か: 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す。

- ②何に/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ます。
- 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ます[2]。3GPPで非地上系ネットワーク(NTN)の標準化が進んでいます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件：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、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、小型化、低コスト化が要求されます。

[1] Rep. ITU-R M.2460-0

[2] <https://hapsalliance.org/>

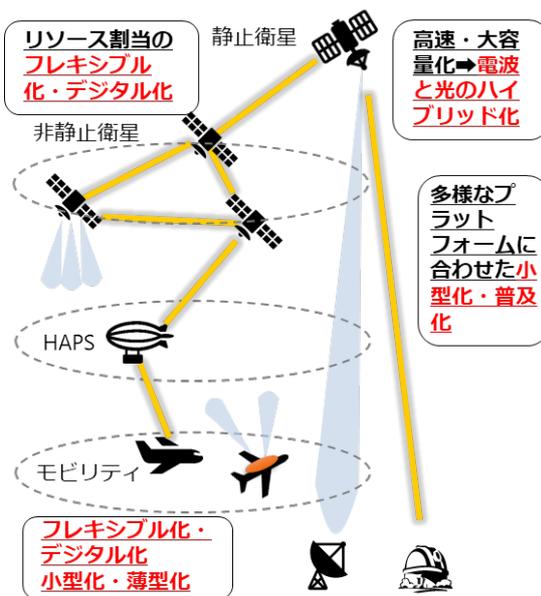


図4. 8: 衛星・非地上系通信プラットフォームとその要求条件。

T4.2 光衛星通信

- ①どんな技術か：宇宙空間において、光(レーザ)を用いる大容量の無線通信技術です。超高速・低遅延・大容量通信を目指します。
- ②何に/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ります。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します。
- 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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件：光通信の場合ビー

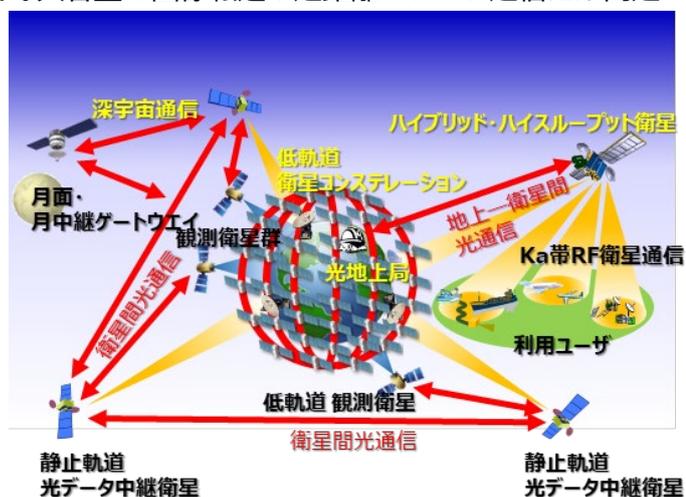


図4. 9: 光衛星通信の利用イメージ。

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す。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ります。

[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>

T4.3 海上通信

①どんな技術か： 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す。

②何に/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す。

③国内外現状： グローバルサービスで数十Mbpsは提供されていますが、通信機器の大きさ(設置場所の制限)・コスト高がネックです
[1]。

④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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ます。



図4.10: 海上通信の利用イメージ

[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

T4.4 海中・水中通信

①どんな技術か： 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す。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りましたが、電波を用いることで、高速かつ低遅延の通信が可能となります。

②何に/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ります。

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ます[1]。

④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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化が求められます。

[1] <https://www.trimatiz.com/jp/consortium/alan.html>

T4.5 統合ネットワーク制御

- ①どんな技術か： 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す。
- ②何に/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ります。

- 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ます。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ます。

- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②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)が求められます。

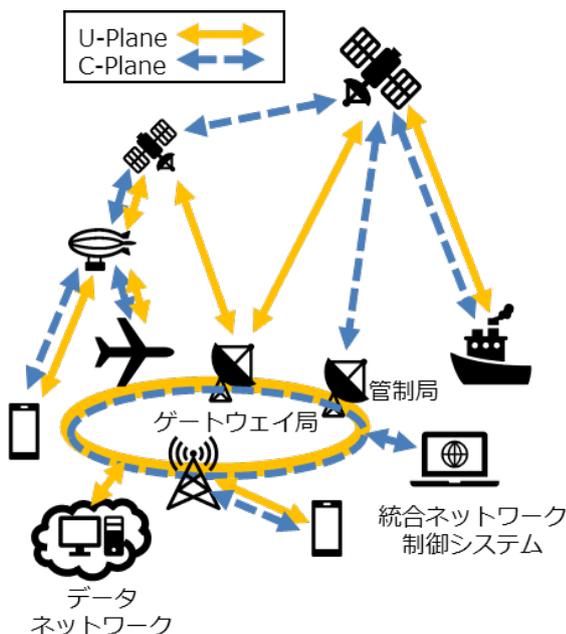


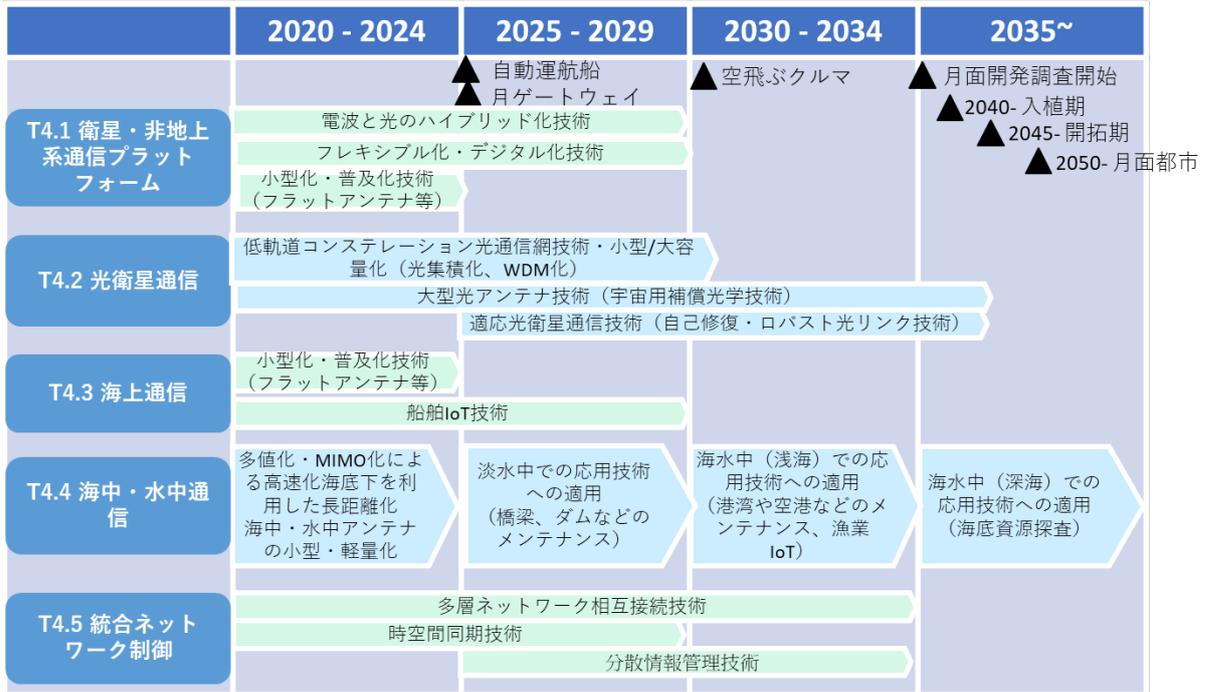
図4. 11: 統合ネットワークのアーキテクチャのイメージ。

[1] <https://artes.esa.int/projects/satis5-0>

[2] <https://www.sat5g-project.eu/>

[3] <https://spif.nict.go.jp/>

表4.5: 「無線システムの多層化ー非地上系ネットワーク(NTN)」のロードマップ



4.2.5 時空間同期

T5.1 無線時空間同期

- ①どんな技術か: 「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す。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します。
- ②何に/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ります。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す。
- 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ます。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ます (上述3GPP資料より)。

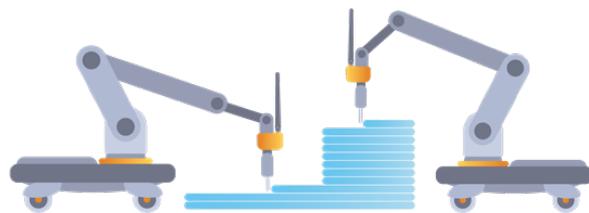


図4.12: 時空間同期された3Dプリンター。

④Beyond 5G/6G世界で必要となる要

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。

事例 2) パ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。

T5.2 原子時計チップ

- ①どんな技術か: 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す。クロックは搭載機器の作業を統制する重要な備品です。ただし、その統制は搭載機器にしか通じません。従来のクロックは使用環境によってずれていくからです。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ます。
- ②何に/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ます。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します。このことは、分散アバター、コネクテッドカーへと拡張していくでしょう。
- 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ます[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ます[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ありません。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す。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件:
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。

[1] R. Lutwak et.al., "The MAC-a Miniature Atomic Clock," in Proc. IFCS2005, pp.752.

[2] (H. Zhang et.al., "ULPAC: a miniaturizes Ultralow-Power Atomic Clock," IEEE JSSC, 54(11), 2019, pp.3135.

T5.3 基準時刻の生成共有技術

- ①どんな技術か: 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す。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ます。
- ②何に/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)世界中のサーバー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

ク管理が求められます。

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ます。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ます。

④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件：

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

表4.6：「時空間同期」のロードマップ

	2020 - 2024	2025 - 2029	2030 - 2034	2035~
T5.1 無線時空間同期	時刻同期網の構築	時刻同期網のセキュリティ強化	時空間認証とそのサービス展開	
	屋内外測位技術	地上から宇宙までの応用		
T5.2 原子時計チップ	要素部品の量産化技術の確立	原子時計チップの試作・製造	無線機への組込	商用サービス展開
	企業コンソーシアムの形成と規格化・標準化			
T5.3 基準時刻の生成共有技術	ローカルな時刻情報の共有法開発	共有手法の情報ネットワーク適用	ローカル・グローバルを両立するクロック管理システムの運用	
	光周波数標準器の商用品化			

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どんな技術か： 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す。

②何に/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ります。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ます。

- 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ます。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ます。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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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、が求められます。

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どんな技術か： 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です。
- ②何に/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ります。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す。
- 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ます。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ますが、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しています。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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、が求められます。

T6.3 量子暗号

- ①どんな技術か： 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

する暗号方式です。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ます。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す。

- ②何に/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ます。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ます。
- 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ります。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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件: 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す。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す。

T6.4 電磁環境技術

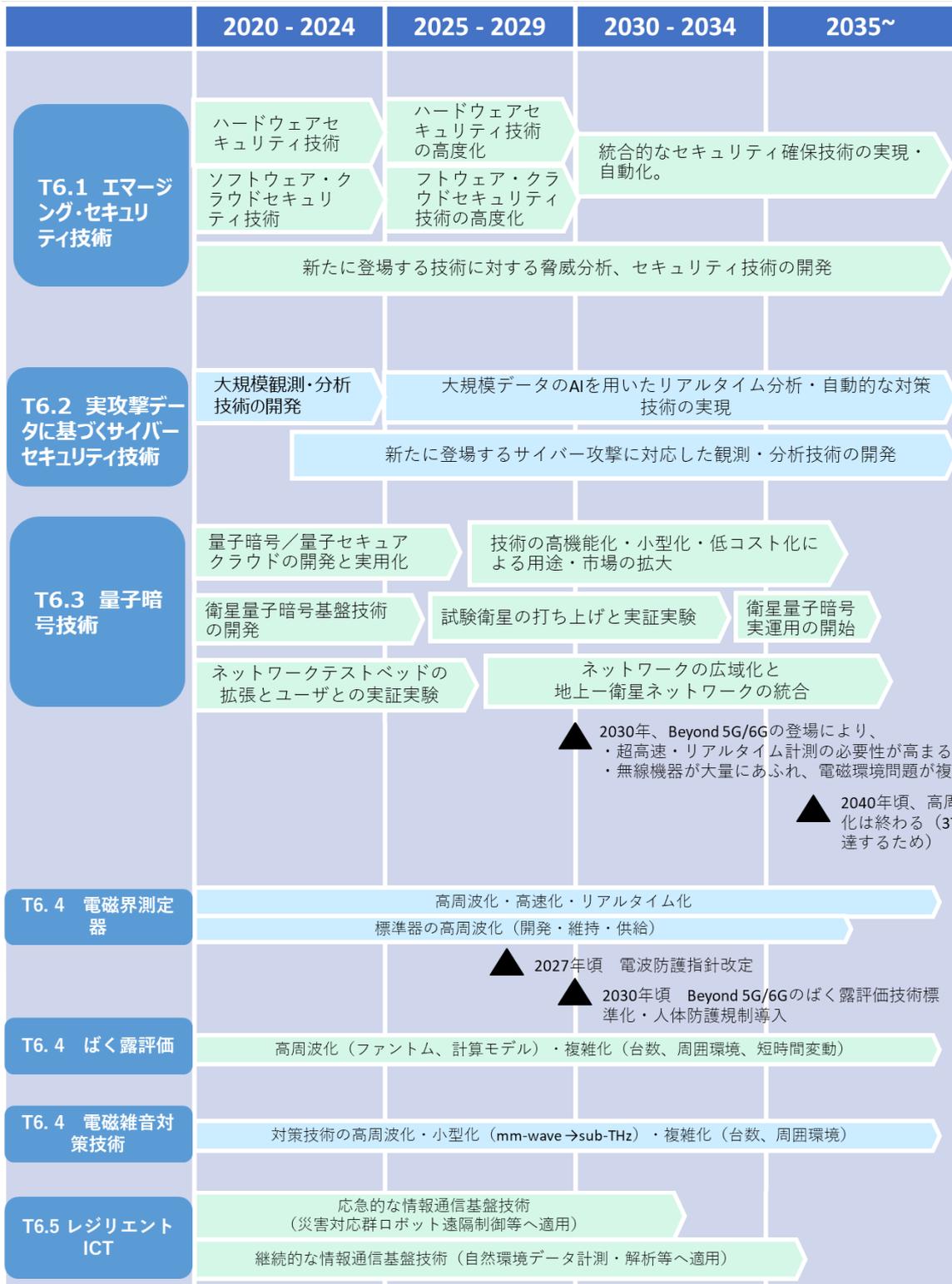
- ①どんな技術か: 無線機器とその周辺の電気電子機器が、互いに妨害を与えず共存できる電磁環境を維持するために必要な技術です。また、身の回りの無線機器や電気電子機器から発射する電波が、人体に吸収される量(ばく露量)を評価し、健康に影響することなく電波を最大限に活用できる環境を構築する技術です。これらを実現するための測定器の開発・高精度・高信頼な電波計測技術も含まれます。
- ②何に/何故必要か: 安心・安全な電波利用、電磁環境の保全のために必要です。
- ③国内外現状: 電気電子機器から生じる電磁雑音については6GHzまでの周波数利用を見込んで、業界による自主規制(一般財団法人 VCCI協会)が行われています。国内の電波防護指針は、現状300GHzまでの周波数利用を想定しています。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ません。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件: ②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、などが求められます。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・標準化も必要です。

T6.5 レジリエント ICT

- ①どんな技術か： 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す。
- ②何に/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ります。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になります。
- 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ます。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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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します。

[1] FG NET-2030 Sub-G1, Representative use cases and key network requirements for Network 2030, Jan. 2020.

表4. 7: 「超安全・信頼性」のロードマップ



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どんな技術か： 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す。
- ②何に/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します。
- 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りますが、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ます [1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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ります。

[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どんな技術か： 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す。
- ②何に/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す。
- 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ますが、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ります [1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 無意識レベルも含めた直

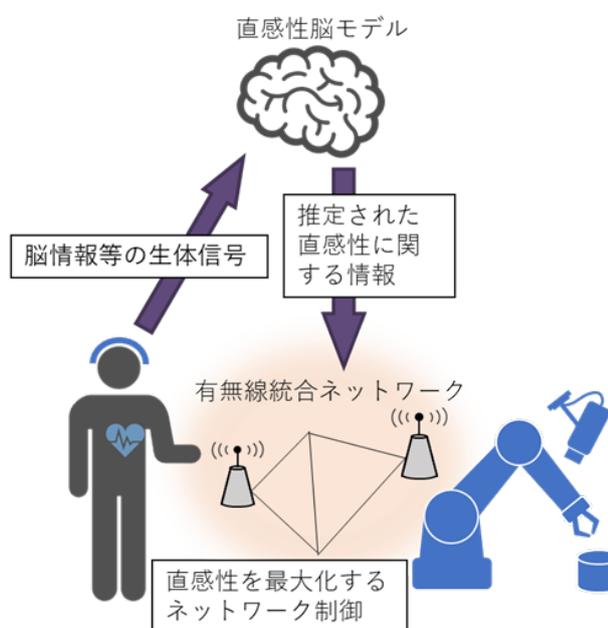


図4.13: 直観性の計測・伝達・保障技術。

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ります。

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

T7.3 リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術

①どんな技術か： 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です。

②何に/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します。

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・実現が求められています[1]。

④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： ②の実現のためには、遠隔で人が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ます。



図4. 14: 空間・時間・身体の壁を超えた超臨場コミュニケーション。

[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)

T7.4 言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術

①どんな技術か： 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、精緻化する技術です。

②何に/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す。特に、人材不足が深刻な高齢者介護、研究開発、教育等では必須です。

- ③国内外現状： AIスピーカー等の一般家庭への普及、人を超える精度のテキスト分析技術も見られますが、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。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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ります。

T7.5 多言語の同時通訳・言い換え・要約技術

- ①どんな技術か： 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まれます。
- ②何に/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ります。

- ③国内外現状： NICTはGAF(A Google ・ Amazon ・ Facebook ・ Apple)やBAT(H (Baidu ・ Alibaba ・ Tencent ・ Huawei)と競争状態にありますが、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ます [1]。



図4. 15： 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)

- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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ります。

[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)

T7.6 自動運転

- ①どんな技術か： 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ります。

- ②何に/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ます。
- ③国内外現状： 自動運転の実現に向けたの取組が交通・通信・産業の様々な分野で行われています[1]。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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、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および大容量情報通信(数十Gbps以上)・リアルタイム通信技術(1ms以下遅延)が要求されます。

[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

T7.7 ドローン

- ①どんな技術か： 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す。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します。「空の産業革命」とも言われていますが、今後は「空の移動革命」を担う空飛ぶクルマにも発展します。
- ②何に/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します。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す。
- 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ます。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ます。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ます。
- ④Beyond 5G/6G世界で必要となる要求条件： 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な無線通信とそのための周波数共用・周波数拡大技術、及び地上や宇宙・HAPSのネットワークとの連携・融合が必要になります。

表4.8: 「超臨場感・革新的アプリケーション」のロードマップ

	2020 - 2024	2025 - 2029	2030 - 2034	2035~
T7.1 脳情報の読み取り・可視化・BMI技術	脳活動による視覚情報等の推定	人工脳の初期モデル	感情や理解度を脳波等から推定	会話/運動意図脳情報の低/非侵襲的抽出
T7.2 直感性の計測・伝達・保証技術	通信遅延に伴う遠隔作業効率低下の知見	違和感の計測技術、直感性の指標構築	直感性指標に基づく動的遅延/ジッタ制御	無意識的な直感性を保証するネットワーク
T7.3 リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術	CGアバターを用いた遠隔VR会議	リアル3Dアバターを用いた遠隔XR会議	触覚を含む五感情報の取得/伝達/XR再現	五感情報を用いたXR遠隔作業/介護等
T7.4 言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術	Web情報を用いた対話の実現	対話の目的、ポリシー等を持つ仮想的人格を用いた対話技術	多言語情報を含め、専門家が参考にできるレベルの推論を行いつつ対話を行う技術	外部の検索サービス等への依存を減らし、プライバシーを担保できる対話技術
T7.5 多言語の同時通訳・言い換え・要約技術	日常生活やビジネスを支える翻訳	文脈・話者の意図等を補う同時通訳	シビアな交渉にも使える同時通訳	自律成長型の同時通訳
T7.6 自動運転	自動運転車(条件付き自動運転車)	完全自動運転車(屋外での完全な自動運転)	オール機器完全自動運転(屋内外すべての完全な自動運転)	Intelligent完全自動運転(知的自律運転)人型ロボットへ(人なみの移動)
T7.7 ドローン	マルチホップ技術の実用分野での実証(一部の特殊エリア)機体間通信技術の安全飛行への応用研究	通信技術の実用領域の拡大(山岳、海洋、都市部等)通信の長距離・大容量化(ドローン飛行台数の増加と活動エリアの増大に対応)周波数共用の高度化	衛星やHAPSとの連携周波数の拡大空飛ぶクルマへの拡張	宇宙-HAPS-上空-地上/海上/海中の3次元ネットワークの実現

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ますが、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となります。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ます。

表4.9: 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よるインフラ保全・環境監視
超高速・大容量通信 (4-2.1)		基盤技術開発 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 1Pbs級伝送、Tbps級ネットワーク	
超低遅延・超多数接続 (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、無線網間時刻同調技術	社会展開・ビジネス化 サービス要件間協議の確立、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 運用自動化技術、網内コンピューティング技術、ローカルB5G、無線制御等	技術拡張・連携・サービス実証 運用自動化進展、網内コンピューティング機能基盤強化、ローカルB5G進展、周波数割当効率化等	実用化・社会展開 運用完全自動化、高度な網内コンピューティング、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	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	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	
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	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	
超安全・信頼性 (4-2.6)		基礎技術の確立と高度化 量子暗号通信新方式 ネットワーク制御管理技術	ローカル・都市間量子暗号ネットワーク	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、遠隔XR技術 (リアル3Dアバター)	実用化に向けた技術開発 高度な推論を含む対話技術、シビアな交渉用同時通訳	社会展開 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 3 GPP Rel. 17	技術性能要件一標準策定 ビジョン勧告 Release 18 Release 19 Release 20 Release 21	ITU-R 技術トレンド調査 Release 22 Release 23	技術性能要件一標準策定 ビジョン勧告 Release 24
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

Beyond 5G推進戦略懇談会による提言を受けて、「Beyond 5G推進戦略 —6Gへのロードマップ」が公表されました(令和 2 年 6 月)。その中で研究開発オープンプラットフォームに関して以下の様に言及しています。

「Beyond 5Gの中核技術のうち、我が国として重点的に取り組むべき戦略的に重要な要素技術の研究開発を、期間を限り、関係府省が連携して集中的に推進することが適当である。その際、先端的な要素技術の研究開発を効果的に推進するため、SINETやスーパーコンピュータ「富岳」等の研究基盤や若手研究者に対するファンディングプログラム 等との連携も図るとともに、「Beyond 5G研究開発プラットフォーム」をNICT等に構築し、電波エミュレータ等のテストベッドを含む高度な研究環境を国内外の多様なプレイヤーに提供することで、これらの環境を活かした共同研究等を推進する。」

Beyond 5G/6Gに求められる技術は、高度かつ多岐の分野にまたがっており、産学官の多様なプレイヤーとの連携はもとより、国際的に連携した体制によりイノベティブな研究開発を行ってことが必須です。

上記を受けて、情報通信分野の研究開発を専門とするNICTでは技術実証等を行う環境として、Beyond 5G/6G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ために必要となるBeyond 5G/6G共用研究施設・設備(以下①～③)を新たに整備すると共に、既存の研究開発基盤(サイバーセキュリティ、データ利活用、量子情報通

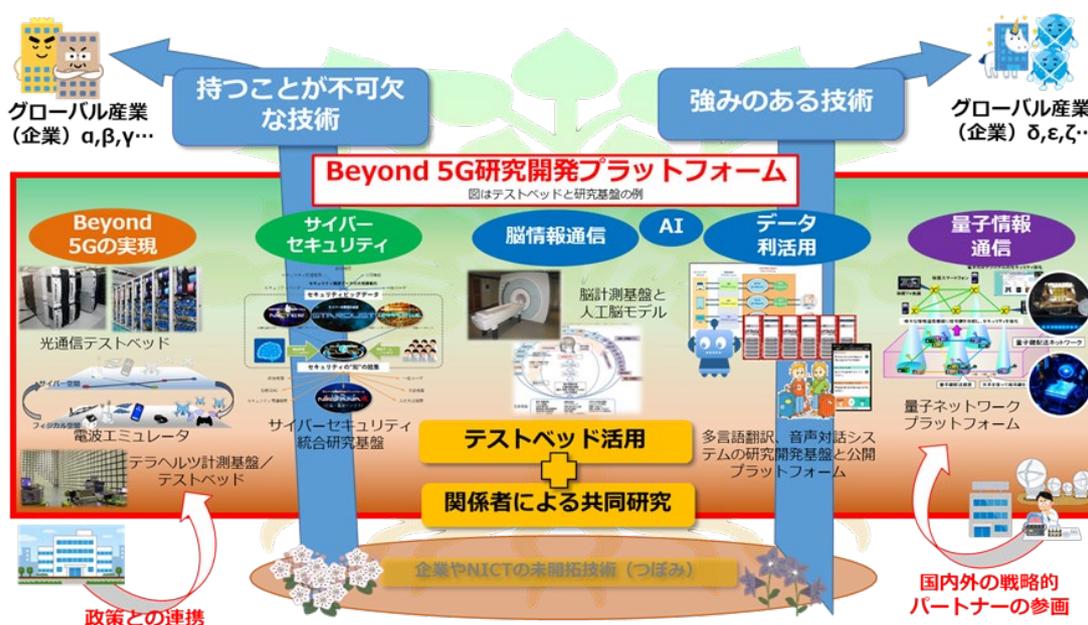


図5. 1: Beyond 5G研究開発オープンプラットフォームの全体像。「Beyond 5G推進戦略 —6Gへのロードマップ」(令和 2 年 6 月)より。

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オープンな研究開発を推進する体制を構築して行きます。

<p>① Beyond 5G/6G伝送基盤技術開発環境 -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</p>	
<p>② Beyond 5G /6Gを支える超高速光通信技術開発設備 -Beyond 5Gの超高速・大容量の無線通信を支える超高速光通信技術の研究開発を推進</p>	<p>超大容量光ネットワーク</p>
<p>③ 高信頼・高可塑Beyond 5G /6G-IoTテストベッド -Beyond 5Gネットワークの高い信頼性・可塑性確保のための研究開発を推進</p>	

図5.2:新たに整備するBeyond 5G/6G共用研究施設・設備。

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ます。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)で決定されますが、ITU-Rで行う移動体通信の標準化は、これまでITU-R SG5(地上無線通信)のWP5D(移動体通信・IMT関連)で行われています。

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ます。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す。

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のとおりです。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月から開始予定です。

総務省ではBeyond 5G推進コンソーシアムを12月に設立しました。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ます。また2021年6月(第38回)のWP5Dへ提案することを計画しています。

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

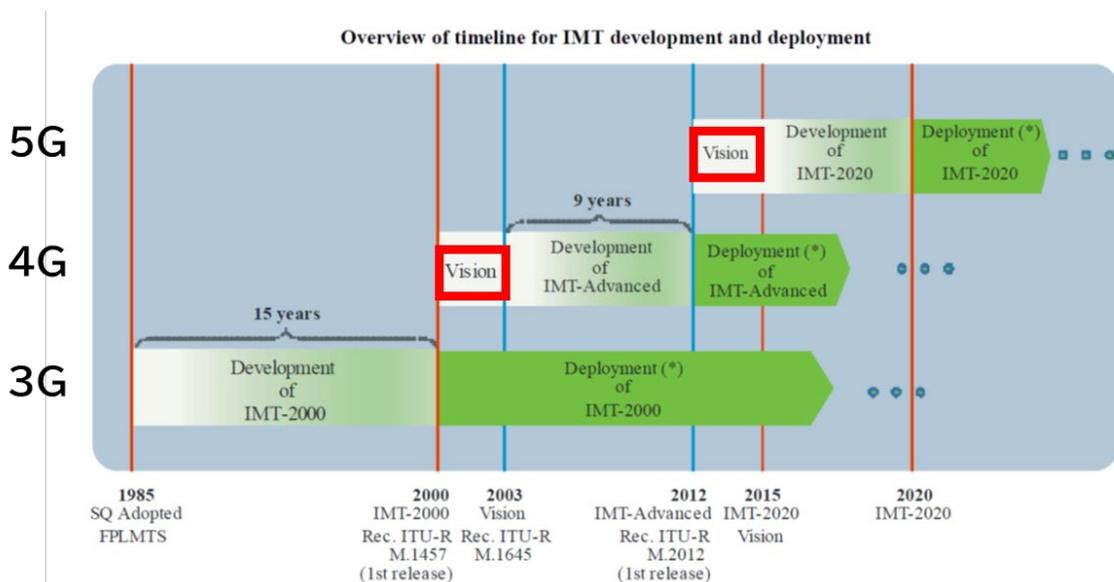


図6. 1: 3G、4G、5Gのプロセス。ITU-R勧告 M.2083 Figure 1 より。Visionの赤枠及び左側の「3G, 4G, 5G」はNICTで追記。

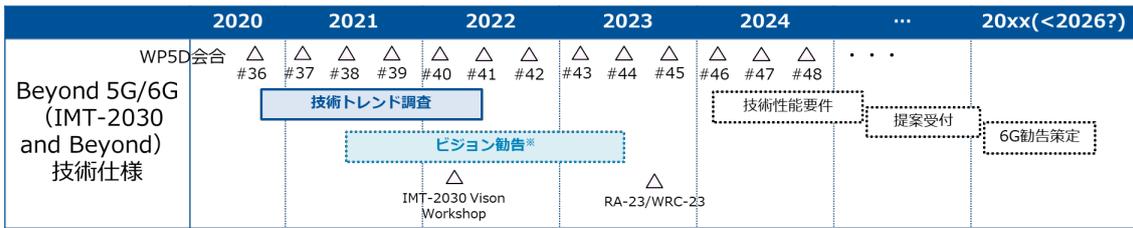


図6.2: 第34回WP5Dで合意された標準化プロセス。

ることを考えています。

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す。

6.2 Beyond 5G/6G研究開発ナショナルプロジェクト「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—」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ます。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、総務省による「Beyond 5G研究開発促進事業 研究開発方針」(令和3年1月28日)(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た「Beyond 5G研究開発促進事業」を推進しています。

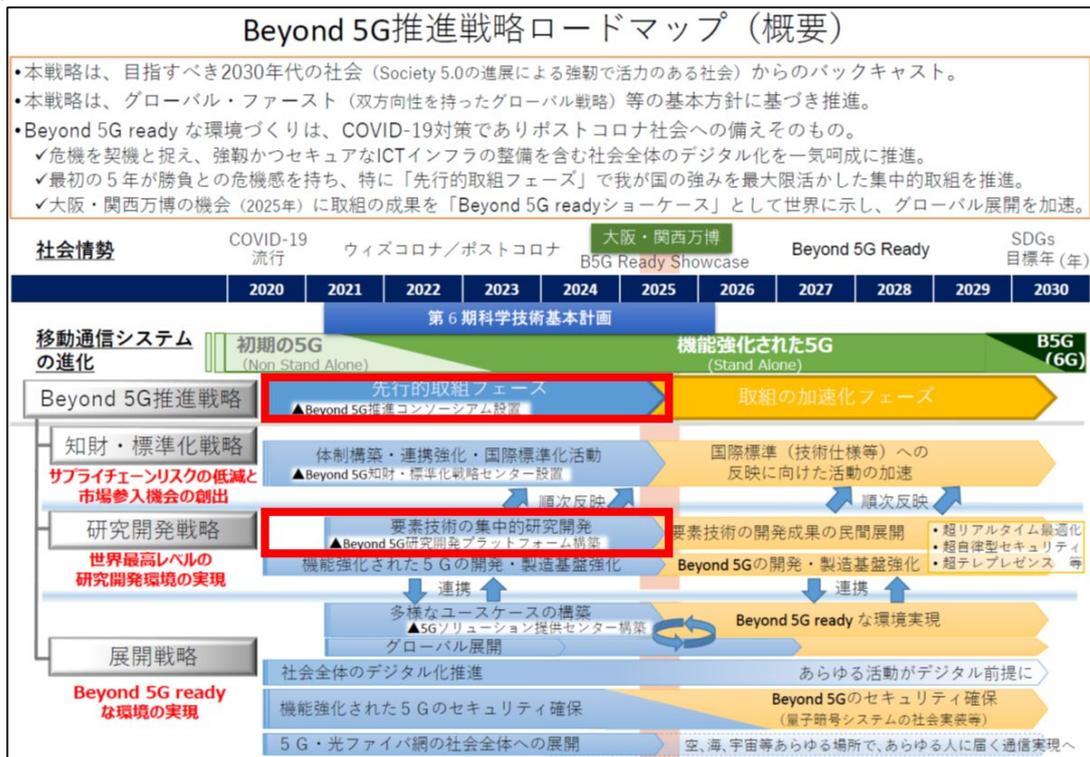


図6.3: Beyond 5G推進戦略 —6Gへのロードマップ—より(総務省:令和2年6月)。

「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ます。

- 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/6G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、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(第一版)(図6.4)から以下の二つのスキームを用いて、個別の研究開発課題を順次公募いたします。この候補リストは今後更新されていくものと考えています。

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」

「Beyond 5G機能実現型プログラム」では、2025年頃から順次要素技術を確立し、3GPP等での国際標準に反映していく予定です。

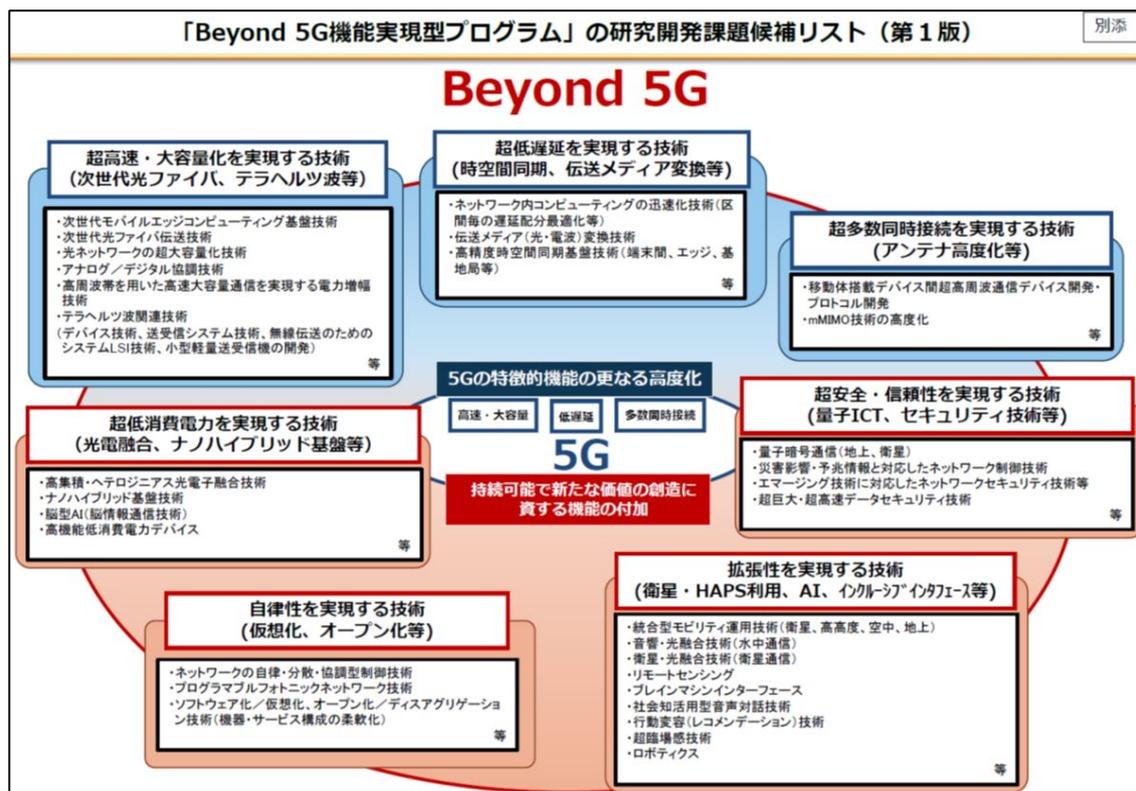


図6.4:「Beyond 5G研究開発促進事業 研究開発方針」(令和3年1月28日)。

第7章：おわりに

本ホワイトペーパーでは、2030年～2035年頃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ました。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ました。

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す。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行きます。議論の結果をNICT自らの研究開発に反映させるだけでなく、ホワイトペーパーへも反映させ改訂版を出して行く予定です。

謝辞

本ホワイトペーパー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・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・Callan Daniel・川崎 耀・川村誠治・菅 智茂
菅野敦史・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・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・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



Beyond 5G/6G White Paper

2021年3月発行

ISBN978-4-904020-12-8

国立研究開発法人情報通信研究機構

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

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

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

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

