

© 2021 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

ホワイトペーパー

5G の高度化と 6G

株式会社NTTドコモ

2021年2月（3.0版）

NTT
docomo

目次

1. はじめに.....	3
2. 進化の方向性「5G evolution and 6G」	4
2.1. 5G evolution への考察.....	4
2.2. 6G への考察	6
3. 要求条件とユースケース.....	9
3.1. 超高速・大容量通信.....	9
3.2. 超カバレッジ拡張.....	10
3.3. 超低消費電力・低コスト化.....	10
3.4. 超低遅延.....	11
3.5. 超高信頼通信.....	11
3.6. 超多接続&センシング.....	12
4. 技術発展と検討領域.....	13
4.1. 空間領域の分散ネットワーク高度化 (New Radio Network Topology)	13
4.1.1. “線”による分散アンテナ展開	15
4.1.2. 反射板 (RIS) 技術	15
4.1.3. 端末間協調送受信技術.....	16
4.1.4. センシングや省エネ通信と Win-Win な分散アンテナ展開	16
4.2. 非陸上 (Non-Terrestrial Network) を含めたカバレッジ拡張技術	17
4.3. 周波数領域のさらなる広帯域化および周波数利用の高度化.....	18
4.4. Massive MIMO 技術および無線伝送技術のさらなる高度化.....	20
4.5. 低遅延・高信頼通信 (URLLC) の拡張および産業向けネットワーク ...	21
4.6. 無線通信システムの多機能化およびあらゆる領域での AI 技術の活用... ..	22
4.7. 移動通信以外の無線通信技術のインテグレーション.....	23
4.8. ネットワーク・アーキテクチャ.....	24
4.8.1. フラットなネットワーク・トポロジー.....	24
4.8.2. フレキシブルなネットワーク機能配置.....	25
4.8.3. ネットワークのシンプル化.....	25
4.8.4. OAM (Operation and Maintenance) の高度化.....	25
4.8.5. 複数のアクセス技術方式の統合運用技術.....	25
4.8.6. 超低遅延を支えるコアネットワーク伝送/交換制御技術	26
4.8.7. CPS を支える広域時刻同期と広域確定性通信	26
4.8.8. 超カバレッジを支える位置ベース移動制御.....	26
4.8.9. セキュリティの高度化.....	27
4.8.10. 分散するコンピューティングリソース	28
5. おわりに.....	30
参考文献.....	31
更新履歴.....	35

1. はじめに

日本電信電話公社が 1979 年 12 月 3 日に世界初のセルラー方式による移動通信サービスを開始して以来、移動通信の無線アクセス技術は 10 年毎に新世代の方式へと進化しつつ発展を続けてきた。技術発展に伴ってサービスも進化し続けており、第一世代(1G)から第二世代(2G)の時代にかけては、音声通話がメインで簡単なメールができる程度であったが、第三世代(3G)から i モードによるデータ通信、および写真、音楽、動画などのマルチメディア情報を誰でも通信できる時代になり、第四世代(4G)からは LTE(Long Term Evolution)方式による 100 Mbps を超える高速通信技術によってスマートフォンが爆発的に普及し、さらに多種多様なマルチメディア通信サービスが登場してきた。4G の技術は LTE-Advanced として発展を続け、現在では 1 Gbps を超える最大通信速度に達している。そして、ドコモではさらに技術的に進化した第五世代(5G)の移動通信システム[1-1]による商用サービスを 2020 年 3 月 25 日に開始した。

5G は、高速大容量、低遅延、多接続といった技術的特徴によって、4G までのマルチメディア通信サービスをさらに高度化させることはもちろん、人工知能(AI: Artificial Intelligence)や IoT(Internet of Things)とともに、これからの産業や社会を支える基盤技術として新たな価値を提供することが期待されている。図 1-1 に示すように、移動通信の技術方式は 10 年単位で進化しているのに対し、移動通信のサービスはこれまで約 20 年のサイクルで大きな変化を遂げている。従って、5G によってもたらされるであろう「第3の波」は、5G の高度化(5G evolution)および、さらに次世代である第六世代(6G)の技術によってより大きな波となり、2030 年代の産業や社会を支えていくことが期待される。

本ホワイトペーパーは、ドコモが考える 5G evolution および 6G の技術的な展望を述べるものである。以降、第 2 章において将来の技術的進化の方向性を、5G evolution および 6G のそれぞれの観点から考察し、第 3 章において要求条件やユースケース、第 4 章において技術的な検討領域の展望について述べる。なお、本ホワイトペーパーは 2020 年 1 月に公開した初版から内容を更新し、現時点(2020 年 7 月)での考えを記したものである。現在、総務省主導による「Beyond 5G 推進戦略懇談会[1-2]」や他の国内外での 2030 年代の通信に関する検討[1-3, 1-4]が精力的に進められていることもあり、引き続き、様々な業界の関係者や産学官における議論を推進し、内容を更新していきたい。

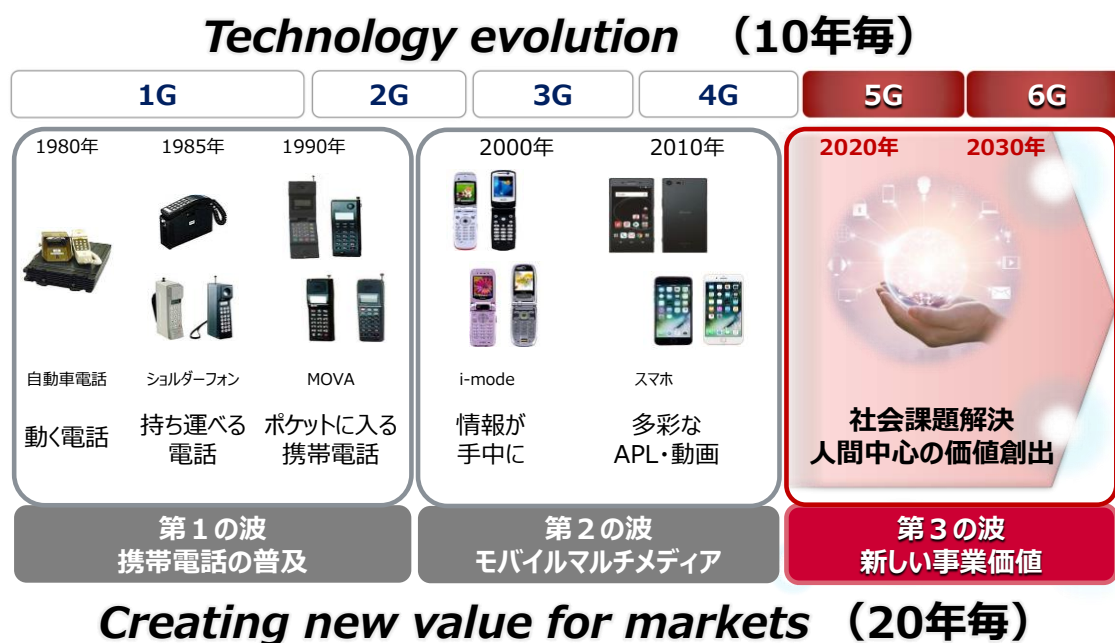


図 1-1. 移動通信における技術とサービスの進化

2. 進化の方向性「5G evolution and 6G」

2.1. 5G evolution への考察

5G は既に世界的に商用導入が開始され、ドコモでも 2020 年 3 月より商用サービスを開始している。その一方で、5G に対する課題や実現すべきさらなる期待も見出されており、数年後さらには 2020 年代中での 5G のさらなる発展としての「5G evolution」の技術開発が必要である。

図 2-1 に、5G の現状を鑑みた技術課題を示す。5G は 10 GHz を超えるミリ波のような高周波数帯をサポートする移動通信システムとしては最初の世代であり、これまでに比較して飛躍的に広い数 100 MHz クラスの周波数帯域幅を利用して数 Gbps クラスの超高速な無線データ通信を実現できる技術であるが、一方で、移動通信におけるミリ波の技術については今後の発展の余地も多くある。特に見通し外(NLOS: Non-Line-Of-Sight)環境などでのカバレッジ改善や上りリンクの性能改善は 5G 関連トライアル等からも見えている課題である。

さらに、5G は将来の産業や社会を支える技術として高い注目を集めており、特に産業向けユースケースにおいては、特殊な要求条件や高い性能が求められる場合が多くある。国内でも、このような産業向けユースケースに特化した「ローカル 5G」の議論が進められており業界で注目されている[2-1]。将来的にも、そのような産業向けの幅広い要求条件に柔軟に対応できるよう 5G の技術をさらに発展させていく必要がある。

初期の 5G(New Radio (NR) Release 15)では、3GPPにおいて、高速大容量(eMBB: enhanced Mobile BroadBand)ならびに一部の超高信頼低遅延通信(URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications)を主眼とした標準化が行われた経緯から、LTEと同様、下りリンクの通信速度を重視したベストエフォート型サービスが主に実現された。一方、5G evolutionでは図 2-2 のように、上りリンクの性能向上を進めつつ、主に産業用途向けに通信品質を保証するタイプの高信頼な通信技術を推進していく方向性が考えられる。特に産業向けユースケースの中には、大量の映像データのアップロードを前提とするサービスや、一定速度の通信品質保証が求められるケースが存在しており、無線通信における上りリンクのカバレッジ・スループットの改善や通信品質保証型技術が、一般向け通信サービスに比較してより重要である。

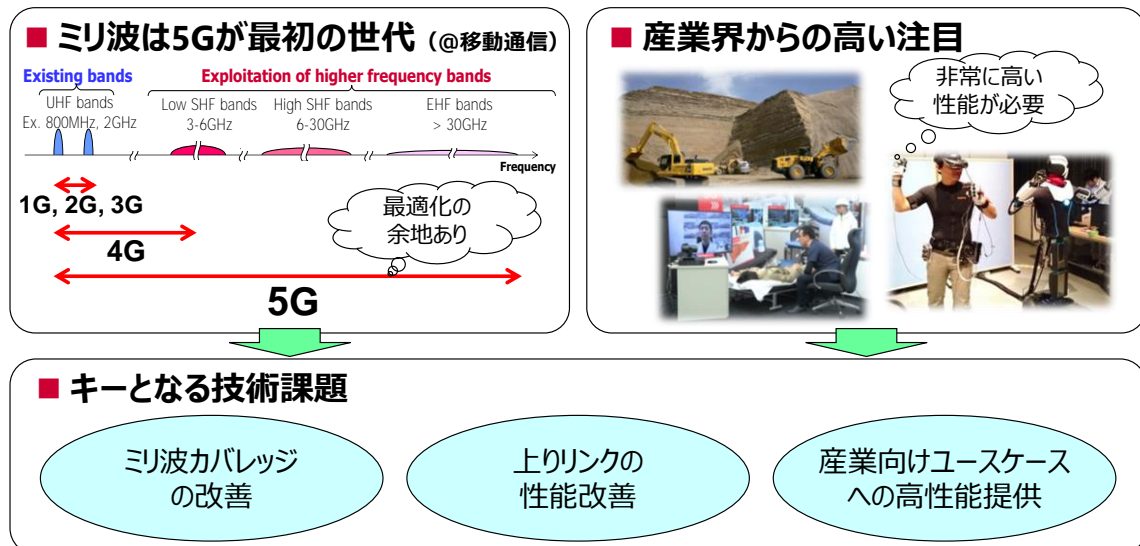


図 2-1. 5G の現状を鑑みた技術課題

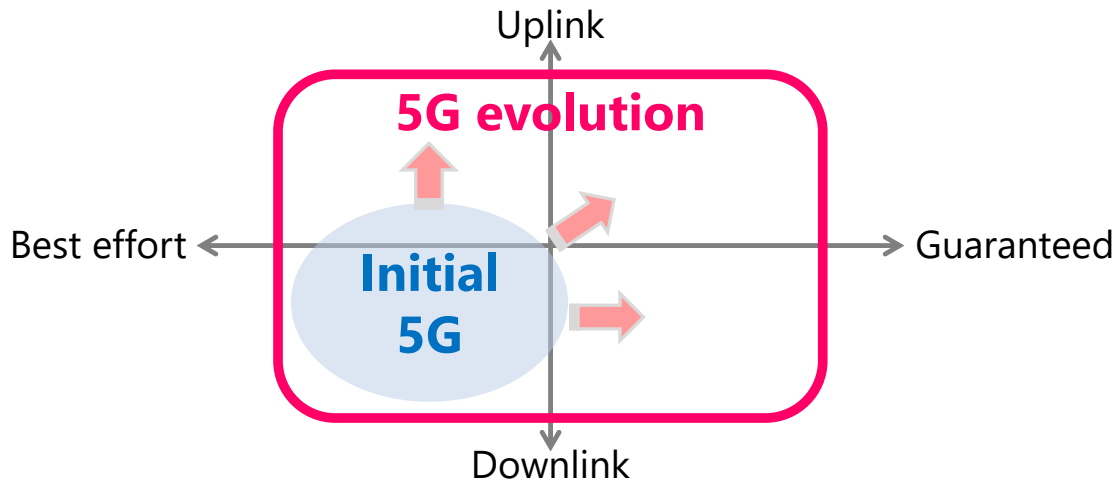


図 2-2. 5G evolution への性能改善の方向性

現在、ビッグデータや AI の普及に伴い、サイバー・フィジカル融合[2-2]に関する関心が高まっている。図 2-3 に示すように、AI が実世界をサイバー空間上に再現し(デジタルツイン)、実世界の制約を超えてエミュレートすることで、「未来予測」や「新たな知」を発見することができる。これを実世界へのサービスへ活用することで、社会問題の解決等、様々な価値やソリューションが提供できる。実世界をサイバー空間の集合の中の一つの世界として捉えると、人やモノ、コトの分身やその変化体の実世界を含めあらゆる世界に大量に存在することで労働力不足や少子高齢化問題の解消に寄与する可能性も考えられる[2-3]。このサイバー・フィジカル融合における通信の役割としては、実世界の映像やセンシング情報などの大容量かつ低遅延な伝送、高信頼かつ低遅延な制御信号伝送による実世界へのフィードバック(アクチュエイト)が想定され、5G の特徴を生かした高性能通信への期待が高まっている。サイバー・フィジカル融合における通信は、人間で例えると頭脳(AI)と目や手足のような各器官(デバイス)との間の情報伝達をする神経の役割に相当すると言え、脳へ入る情報量(上りリンク)が圧倒的に多くなることが想像しやすい。従って、図 2-2 に示した性能改善の方向性がこの場合にもあてはまると考えられる。

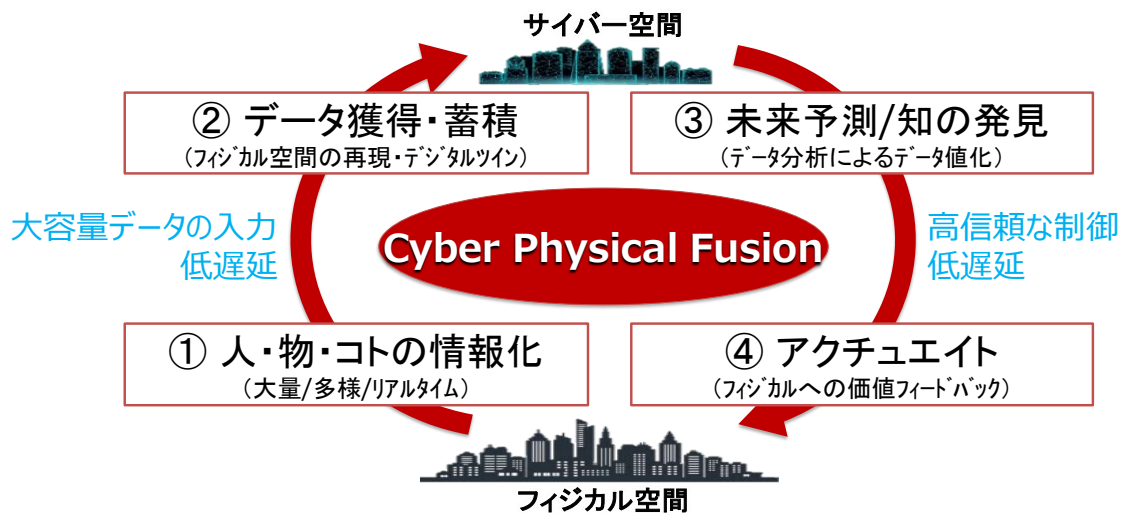


図 2-3. サイバー・フィジカル融合と無線通信

2.2. 6G への考察

6Gに関する要求条件、ユースケース、さらには技術発展を検討するうえで、6Gが導入されるであろう2030年代の社会や世界観について考察する。5Gにて期待されたユースケースや課題解決策は2020年代中になんかなり実現され、普及すると考えられる。それらは2030年代においてもさらなる発展型としてより広く深い普及が求められると考えられる。また信号処理の高速化や各種デバイスの進化等とともに、さらなる高度なサービスや複数のユースケースの融合、新たなユースケースのニーズが創出されると考えられる。以下にいくつかの具体的な世界感を述べる。



図 2-4. 6G 時代における世界観のイメージ

● 社会課題解決

2030年、世界の人口は約77億人の2019年から85億人に増えインド、ナイジェリア、パキスタン、コンゴ民主共和国などのアジア、アフリカ地域の人口増が予想されている[2-4]。GDP観点でみると中国、アメリカ、インドをトップ3とし、世界の経済力が北米、欧州、日本などの既存の先進国からシフトしていくことが予想されている[2-5]。2030年は、世界共通目標SDGs(Sustainable Development Goals)の達成目標の年であり、持続可能でよりよい世界を目指し17の目標と169のターゲットが挙げられている[2-6]。気候変動問題に対しては2015年に採択されたパリ協定により世界の平均気温上昇を抑える目標が定められており、世界各国で省エネルギーや再生利用可能エネルギーの活用など地球環境問題への対策が講じられている。

日本では、少子高齢化が進み3人に1人が65歳以上になるとともに、生産年齢人口の減少、社会保障給付費の増大、遊休資産の増大、社会インフラの老朽化など多くの社会的課題に対処する必要がある。Society 5.0の実現や、健康寿命の延伸、生活の質の向上などさまざまな戦略や政策が議論されている中、社会課題解決先進国を目指し、目指すべき未来や創り上げたい未来を自ら描き行動していく重要性が感じられる[2-7, 2-8, 2-9, 2-10]。

また、新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大により、経済や環境、社会を含め多大な影響が起きている。“Stay Home”の元、人々が家や特定の場所にとどまり、物理的なヒトの移動が劇的に減少した一方、インターネット上のデータは高速にネット空間上で移動しており、現実世界においても大量のモノは移動しているという、いわばねじれの状態が世界規模で生じている。東京を含む大都市圏への一極集中が皮肉にもウイルス拡散に寄与してしまった状況を鑑みると、COVID-19の影響は、これまで経済成長を進めていた世の中に対し、集中し過ぎ、作り過ぎ、売り過ぎ、投資し過ぎ、移動し過ぎ、という「過

ざる」「過剰な」状態に対する警鐘と考えることもできる[2-11, 2-12, 2-13]. 大切なのはこれから先どのような課題意識, 方向性, 目的をもって行動をしていくかであると考えが, このような時代の大きな変化を迎えている昨今において社会課題を見つめ直し, 何が私たちや地球にとっての大きな課題であるかを今一度考え直すことが重要である.

5G で期待されている多くの社会課題解決やニーズへの対応は 2020 年代中にある程度進行していくと考えられる. 地方創生, 少子高齢化, 労働力不足等の社会課題に対して, 高速・低遅延な通信ネットワークにより, テレワーク, 遠隔操作, 遠隔医療, 遠隔教育, 車含む多様な機器の自律運転などの様々な解決策が 2020 年代中に提供されることが予想される. 一方, 現状考えられるすべての社会課題が 2020 年代中に解決できるかどうかは疑わしく, 例えば SDGs にある「貧困をなくそう」, 「人や国の不平等をなくそう」というゴールについては, 開発途上国のみならず先進国内に広がる相対的貧困, 格差も含めた対策が必要であり, 資本主義経済や教育, 社会を含む多様な要素を根本から考え直す必要がある. そのため, 完全なる課題解決と発展のためには 2030 年代に向けて今私たちができることすべきことを一つ一つ紐解いていく必要があり, その中でテクノロジーがどのように社会に寄与するかを総合的に判断することが重要と考える.

地方創生では, COVID-19 の影響もあり, 今後, 開放と疎, 「開疎化」に向かうトレンドが生まれる可能性が考えられる[2-14]. 開疎化は少なくとも数千年にわたって人類が進めてきた密閉と密な価値創造とは逆の方向であり, 大都市圏への一極集中問題解決に寄与する可能性をはらんでいる.

● 人, モノの通信

いつの時代もコミュニケーションは重要であり, コミュニケーションで伝達される情報や手段は日々変化している. 例えば離れた場所にいる人との会話では, 文字や記号(言語情報)を電話やメールで伝えたり, 身体の動きや表情, 感情(非言語情報)をカメラで伝えたりすることができる. 今後のコミュニケーションにおいては, 非言語情報の直接的, 効率的な伝達や, loH(Internet of Human)や loA(Internet of Ability)と呼ばれるヒトや能力, モノやコトがつながる社会が考えられる[2-15]. 例えばスポーツにおける身体的動作, 運動情報を遠くの場所に伝達するには, 耳で聞き(言語情報)目で見ると(視覚情報)のみでなく, 他人の動きを自ら感じ身体を直接動かすことができればより効率的に身体の動きを習得することが可能となるかもしれない.

非言語情報の伝達や能力のつながりでは, 身体能力, 知覚, 認知能力, 存在の拡張を実現する人間拡張(Human Augmentation)や脳関連通信の活用が考えられる. また感覚のつながりという観点では, 従来の聴覚(音声), 視覚(映像)のみならず, 触覚, 味覚, 嗅覚を含めた五感, さらに霧囲気を含めた場所やモノから感じる感覚や, 安心感などの生物として本能的に備わっている生理的感覚も含めた「多感通信」の可能性も感じる.

また人がつながるという観点を別の角度から読み解いてみると, 人の内部, 心の中にあるアルゴリズムや思いの可視化や, 人の内部から外部または外部から内部に働きかけについても考えがおよぶ. これまでの既存技術では人の外部環境に働きかけを行うテクノロジーが多かったように思うが, 今後は人の内部に踏み込む, いわば「内省的テクノロジー」の存在が重要になってくるかもしれない. 近年では well-being というワードで身体的, 精神的, 社会的に良好な状態を示したりもするが「内省的テクノロジー」は人の幸せや生き方を考える上で気持ちや思いに寄り添う技術となる可能性を秘めている. また従来のテクノロジーが人の生活を豊かにするものであったといえる一方, これからのテクノロジーは「人間存在にインパクトを与えるテクノロジー」へと進化する必要性を感じることもできる.

人がつながる際に使われる技術という観点では, XR(VR, AR, MR)デバイス含むウェアラブルデバイスの高機能化, 8K やそれを超える高精細映像やホログラムを活用したリアルでリッチな通信も挙げられる. これにより, ゲーム, スポーツ, ライブ観戦などで革新的なエンターテインメントサービスやエンタープライズサービスが場所と時間の制約なく提供されることが考えられる.

モノのつながりについていえば, IoT サービスの飛躍的な普及と発展により, モノの通信の需要が極めて大きくなるのが考えられる. 高精細映像を含む大量のデータ処理や超低遅延での機器の制御がモノ同士で行われ, 人の能力をはるかに超える高速・低遅延性能が通信に求められる.

- 通信環境拡大

社会課題解決、人、モノの通信における通信の重要性を鑑みると、今後はもはや通信は空気と同様あって当たり前のものとなり、かつ電力や水と同様もしくはそれ以上に重要なライフラインとなる。高層ビル、ドローン、空飛ぶ車、飛行機、船、さらには宇宙空間までも当たり前の活動領域となる。各種センサネットワークや無人工場、無人建設現場などのニーズにより、人がいない環境での通信エリアの構築も必要となる。結果的に、地上、空、海、宇宙のあらゆる場所を通信エリアとする必要がある。

宇宙については、近年活発化している宇宙事業の流れからいくつかのトレンドを読み解くことができる。例えば宇宙空間から地球上にある駐車場に停車している車の数や、モノ、人の流れの情報を見て地球事業につなげる「宇宙ビッグデータ」または宇宙から地球、宇宙空間上の通信環境を構築する「宇宙インターネット」が挙げられる。これらは数年といった短期的レベルで活発化する事業であると考えられる一方、月や火星といった地球外惑星の資源採掘や移住といった「惑星探査」、一般人レベルが旅行感覚で宇宙空間を楽しむ「宇宙旅行」などは、10年以上かけた中長期レベルでの事業とみることもできる。このように考えると2030年代に宇宙空間をエリア化するという考えは非現実的なものでは決してなく、これら複数の宇宙事業にそれぞれ適したエリアや通信方法を段階的に確立していくことが重要ではないかと考えられる。

- サイバー・フィジカル融合の高度化

2020年代にサイバー・フィジカル融合を活用した多くのサービスが創出され、あらゆる環境で実用化されると考えられるが、2030年代にはさらに高度なサイバー・フィジカル融合が求められるだろう。サイバー空間とフィジカル空間の間で大量の情報が遅延なく伝送かつ処理されることで、両空間のさらに密な連携が実現され、究極的には両空間の隔たりのない融合が実現される。人に対しては、前述の脳関連通信等により、ウェアラブルデバイスや人体に装着されたマイクロデバイスにより、人の思考、行動をサイバー空間がリアルタイムにサポートすることが可能となる。車含む輸送機器、建設機械、工作機械、監視カメラ、各種センサーなど、あらゆるモノがサイバー空間と連動し、安心安全、社会課題解決、人の豊かな暮らしをサポートする。

上記のような世界感を実現するための6Gに向けた無線ネットワーク技術発展のイメージを図2-5に示す。将来的には、5Gでも達成できないような究極の超高性能に加えて、5GのeMBB、URLLC、および多数接続（mMTC: massive Machine Type Communication）といった3つのカテゴリーに収まらない新しい組み合わせの要求条件が必要なユースケースも想定される。

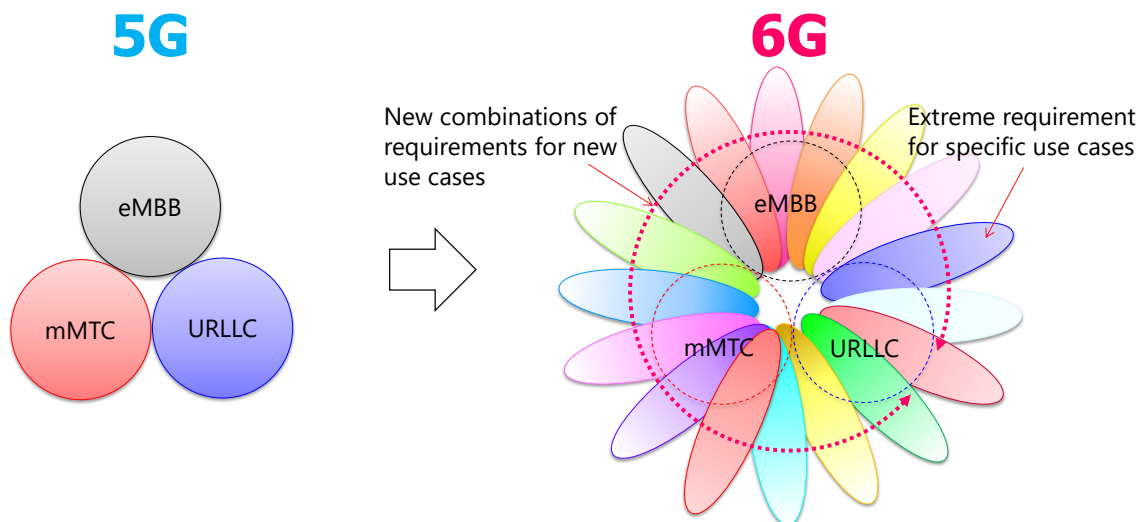


図 2-5. 6G に向けた無線ネットワーク技術発展のイメージ

3. 要求条件とユースケース

図3-1に、5G evolutionを経て、6Gで実現を目指す無線ネットワーク技術への要求条件を示す[3-1]。これらは5Gの要求条件をさらに高めたものであることに加え、5Gでは考慮されていなかった新しい要求条件も加わり、より多岐に広がっている。さらに、5Gと同様、全ての要求条件を同時に満たす必要はないが、ユースケースによって求められる要求条件の組み合わせについては、新しい組み合わせが必要になってくるであろう。以下、各要求条件について、ユースケースを挙げつつ概説する。

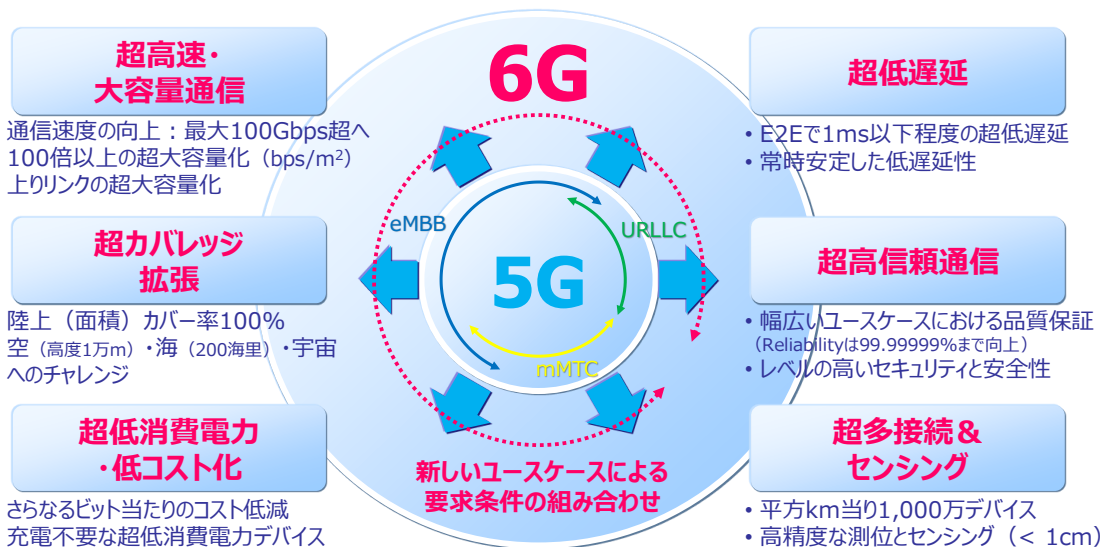


図 3-1. 6G で目指す無線ネットワーク技術への要求条件

3.1. 超高速・大容量通信

さらなる通信速度の向上、例えば 100 Gbps を超える「超高速・大容量通信」の無線技術によって、現実の五感による体感品質と同等、もしくはそれを超える「多感通信」のような新体感サービスを実現できると考えられる。このようなサービスを具現化するユーザインタフェースもメガネ型端末の進化など、よりウェアラブルなものへと進化していくことが予想される。無線ネットワーク通信の大容量化によって、このような新体感サービスは複数ユーザ間でもリアルタイムに共有される。サイバー空間上での仮想共同体感、仮想協調作業など新たなシンクロナ型アプリケーションにも期待できる。また、産業向けユースケースやサイバー・フィジカル融合などのトレンドを考慮すると、様々なリアルタイム情報をネットワーク上の「頭脳」であるクラウドや AI に伝送するため、前章で述べたように上りリンクの性能改善が肝になる。



図 3-2. 超高速・大容量通信

3.2. 超カバレッジ拡張

あらゆる場所で Gbps 級の通信速度を享受可能になるようエリアカバレッジを拡大するとともに、人がいない環境での通信エリアの構築や宇宙ビジネスの発展を見据え、現在の移動通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などを含むあらゆる場所への「超カバレッジ拡張」を将来的には目指していく。これによって、さらなる人・物の活動環境の拡大と、それによる新規産業の創出が期待できる。特に、ドローン宅配のような物流のユースケースや、農業・林業・水産業といった第一次産業における無人化や高度化のユースケースが有望である。また、空飛ぶ車や宇宙旅行など、未来的ユースケースへの応用も期待できる。



図 3-3. 超カバレッジ拡張

3.3. 超低消費電力・低コスト化

ネットワークおよび端末デバイスの「超低消費電力・低コスト化」は、世界が目指す持続可能な社会の実現に向けて、ビジネスおよび環境双方の観点から 5G までと同様に重要な要求条件である。移動通信ネットワークにおいては、さらなる単位通信速度(ビット)当たりの導入・運用コストの低減、移動通信および移動通信以外の技術発展の組み合わせによって消費電力量の大幅な低減を目指す[1-3]。6G のような未来に向けては、無線の信号を用いた給電技術の発展などによって、デバイスが充電不要になるような世界にも期待できる。



図 3-4. 超低消費電力・低コスト化

3.4. 超低遅延

サイバー・フィジカル融合において、AI とデバイスをつなぐ無線通信は、人間で例えると情報伝達をする神経に相当すると言え、リアルタイムかつインタラクティブな AI によるサービスをより高度に実現するには、常時安定した E2E (End to End) での低遅延性が基本的な要件になると考えられる。AI とデバイスのようなモノとモノとの通信は 6G に向けてさらに発展することが予想され、このようなユースケースでは E2E で 1ms 以下程度の「超低遅延」が要求されると考えられる。これによって例えば、AI によって遠隔制御されるロボティクスによる店舗無人化において、お客様の声のニュアンスや表情等を読み取って、人間と同等以上に気の利く対応をするようなインタラクティブな接客などが実現できるかもしれない。



図 3-5. 超低遅延

3.5. 超高信頼通信

前章で述べたようにベストエフォート型のみならず品質保証型の通信が要求されていくトレンドが 5G evolution および 6G で想定される。産業向けユースケースの中には、遠隔制御や工場自動化など、必要な性能を担保することが要求されるものが多くあるため、高信頼な制御情報の無線通信は重要な要求条件であり、6G では 5G よりもさらにレベルの高い信頼性の実現が期待される。さらにロボットやドローンの普及や、空、海等への無線カバレッジの拡大に伴い、工場等の限られたエリアだけでなく、より広いエリアでの高信頼通信が求められる可能性もあり、様々な場面での高信頼通信の実現も期待される。

さらに、盗聴、なりすまし、改竄、否認、不正操作等を行うサイバー攻撃は、財産・個人情報の盗難・漏洩・プライバシー侵害、システム機能不全化によるサービスの停止、さらには、多くの人命にもかかわる事故、社会活動の機能障害、テロの発生等につながりかねない。サイバー攻撃の高度化や個人情報の漏洩等の増大するセキュリティ脅威の元、多様な産業、行政にまたがるさまざまなネットワーク、端末に対する強固な防衛、セキュアな通信サービスの提供が求められる。



図 3-6. 超高信頼通信

3.6. 超多接続&センシング

ウェアラブルなユーザデバイスや、実世界の映像およびセンシング情報などを収集する超多数の IoT デバイスが 6G の時代にはさらに普及していくものと想定され、5G の要求条件のさらに 10 倍程度 (= 平方 km 当り 1,000 万デバイス) の超多接続が想定される。また、多数の IoT デバイスをネットワークにつなぐというアプローチ以外に、無線通信のネットワーク自身が電波を用いて端末の測位や端末を所持するユーザおよびその周辺の物体検知など、実世界をセンシングするような機能を備えていく進化も想定される。測位については 5G evolution に向けて既に標準化での検討が進んでおり、環境によっては誤差センチメートル以下の超高精度な測位が実現できるものと期待される。センシングについても 無線通信に AI 技術を融合することで、高精度な物体検知に加えて物体識別や行動認識などの実現が期待される。



図 3-7. 超多接続 & センシング

4. 技術発展と検討領域

図 4-1 に、過去の移動通信の世代から 6G までの技術発展イメージを示す。旧世代では各世代の無線アクセス技術 (RAT: Radio Access Technology) を象徴する一つの代表的な技術が存在したが、4G 以降から OFDM をベースに複数の技術の組み合わせで RAT が構成されるようになり、6G ではさらに技術分野が多岐にわたってくると考えられる。これは、OFDM をベースとした技術で既にシャノン限界に近い通信品質を実現できているのと同時に、前章で述べたように要求条件やユースケースがさらに多岐に広がっていくためである。

従って、6G では 5G evolution を経て、さらに多くの無線技術の組み合わせが必要になるとともに、後述するように移動通信以外の技術もインテグレーションすることによって、前章で述べたようなユースケースや要求条件を実現していくものと考えられる。5G は LTE の高度化と NR の組み合わせによって定義されたが、5G の NR は将来の新技术導入を考慮した Future proof に優れた設計になっているため、6G の RAT の定義についても今後検討が必要である。コアネットワークでは 5G で機能のモジュール化および機能間インタフェースでの汎用技術の活用を進めた。この傾向に加えて、ネットワーク機能のソフトウェア化、オープン化が今後さらに加速していくことが想定されることから、6G では RAN を含めてネットワーク全体における機能配置の最適化、装置の汎用化も考慮しながらネットワーク・アーキテクチャを設計していく必要があると考えられる。以下では、5G evolution および 6G で候補として考えられる技術領域およびその課題について概説する。

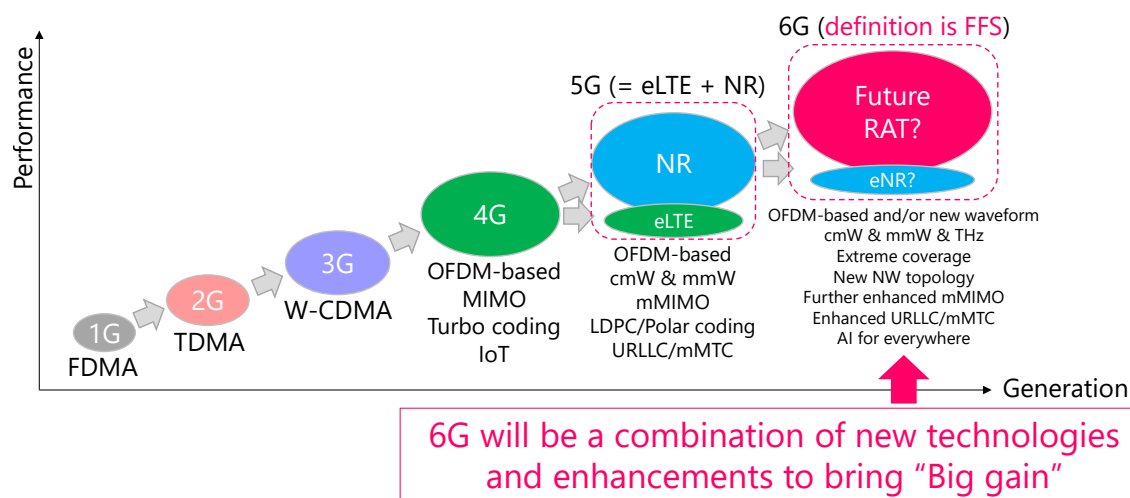


図 4-1. 移動通信における 6G までへの技術発展

4.1. 空間領域の分散ネットワーク高度化 (New Radio Network Topology)

超高速大容量化 (特に上りリンク) や無線通信の信頼性向上を追求すると、できるだけ近い距離や見通し環境 (ロスの少ないパス) で通信すること、および、できるだけ多数の通信路をつくり、パス選択の余地を多くする (冗長性を増やす) ことが理想になってくる。これを実現するには、空間領域で分散したネットワークのトポロジーが必要となる。図 4-2 のように、旧世代のセルラーネットワークはセル間が干渉しないように六角形のセルで構成することが理想とされたが、将来的には 4G から検討されているヘテロジニアスネットワークをさらに拡張し、見通し環境を増やしパス選択の余地を多くするため複数のセルのエリアを重複させ、周囲の移動端末や後述する非陸上 (NTN: Non-Terrestrial Network) も含めてネットワークとの接続経路を増やすような新しい無線ネットワークのかたち (New Radio Network Topology) への進化が考えられる。このような空間領域での分散ネットワークは、後述する高周波数帯の開拓や、分散 MIMO 技術、無線によるセンシング、無線給電などを考慮した場合にも相性がよいものと考えられる。

一方で、これまでの常識で考えると、この New Radio Network Topology は、セル間干渉が発生し、無駄にアンテナを多く設置したあまり好ましくないネットワーク構成ともいえる。干渉についてはビーム制御やパス選択の高度化、およびアンテナ毎にゾーンを形成するセル構成ではなく、多数アンテナで一つのゾーンを構成する Cell-free 構成[4-1]の適用などで技術的に回避する必要がある。また、New Radio Network Topology をいかに経済的に実現するかも基本的な課題になるが、様々なアプローチが考えられる。基本は従来型の基地局アンテナを用いないというソリューションになるだろう。図 4-3 に示すように、街灯、照明、看板、自販機、窓ガラスなど既存オブジェクトの通信のアンテナへの利用、センサーと通信アンテナの統合、IAB(Integrated Access and Backhaul) [4-2]や高周波数帯向けリピータなどの無線中継技術など色々検討の余地がある。また、分散ネットワークのトポロジーを実現し、無線通信の進化に追従するスケラビリティを有する新たな光配線方式・光伝送方式や、フロントホール・バックホール技術の確立も課題である。さらに、このような新しいソリューションを従来型のセルラー構成と組み合わせることも必要だと思われる。以降では、New Radio Network Topology に関連する比較的新しい技術分野を概説する。

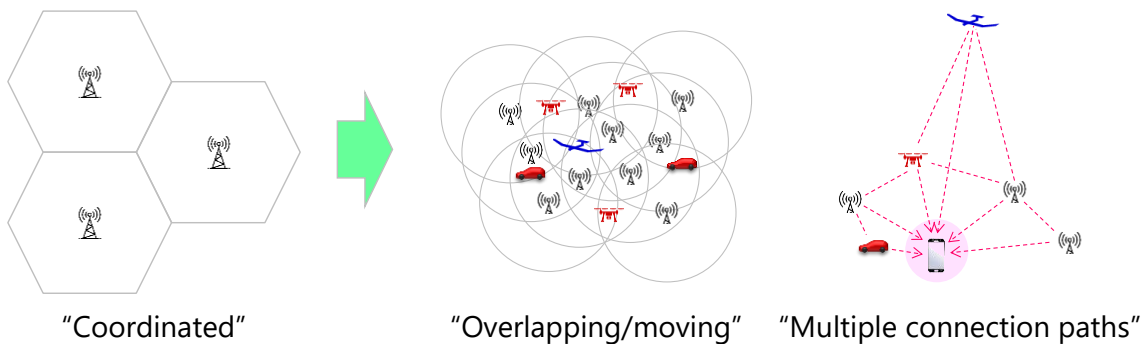


図 4-2. New Radio Network Topology のへの進化イメージ

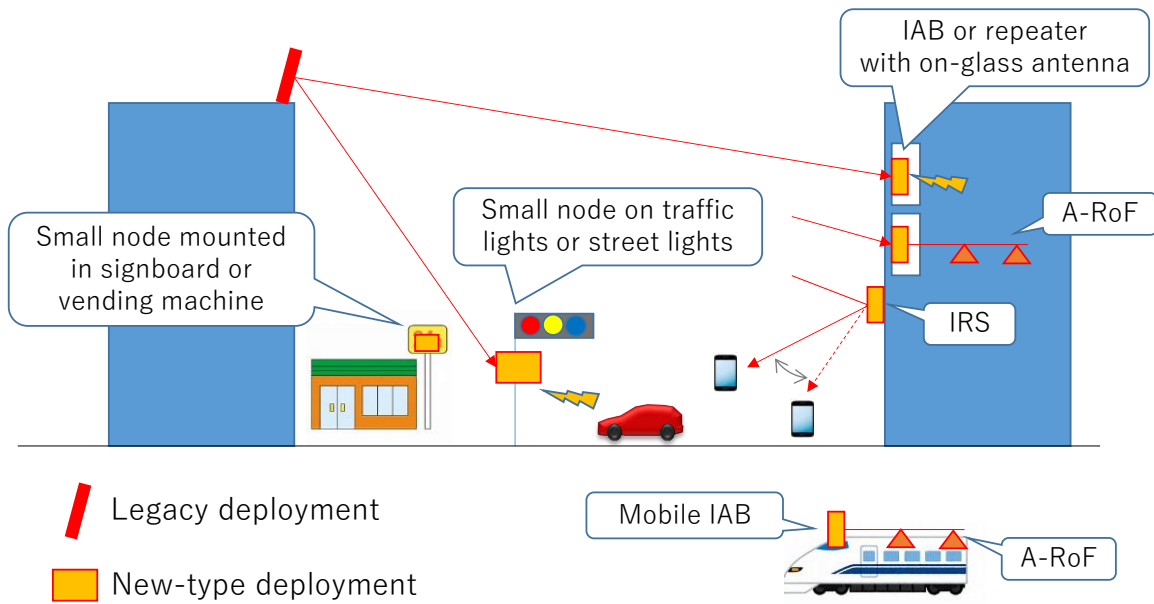


図 4-3. New Radio Network Topology のソリューション例

4.1.1. “線”による分散アンテナ展開

New Radio Network Topology で課題となる多数のアンテナ装置の展開を高効率に実現するため、小型化・経済化した多数のアンテナ装置を“線”で結んで展開するアプローチが考えられる[4-3]. その実現法の一つとして、無線信号をアナログ信号のまま光ファイバを用いてアンテナ装置へ伝送する A-RoF (Analogue-Radio over Fiber) が挙げられる[4-4, 4-5]. A-RoF は、無線信号をデジタル情報に変換して伝送する D-RoF (Digital-Radio over Fiber) と比較して、光伝送時の信号品質の維持が難しい反面、アンテナ装置側に A/D (Analog/Digital), D/A 変換器が不要なことや、必要な光伝送帯域も狭くて済むため、多数のアンテナ装置を小型化・経済化するには有効な手段であると考えられる. A-RoF において、アンテナ装置を多段接続することで、“線”のような分散アンテナ展開を実現することができる. また、図 4-4 のように、A-RoF において波長多重を用いることで離れた場所のアンテナ装置のビームを制御する技術も検討されている[4-5]. 従来は D-RoF が広域なエリアで用いられるのに対し、A-RoF は主に屋内などの限定エリアに用いられてきたが、このような技術によって A-RoF を 10 km 以上の光ファイバ伝送によって、より広域で用いることも期待できる.

また、アンテナの形状自体を“線”にして任意の場所から電波を放射する技術も考えられている. ドコモでは、高周波数帯の電波を伝搬するケーブル(伝送線路)である「誘電体導波路」の任意の箇所をプラスチック小片でつまむだけで、つまんだ箇所の周辺に通信エリアを構築できるエリア化ツールを開発している[4-6].

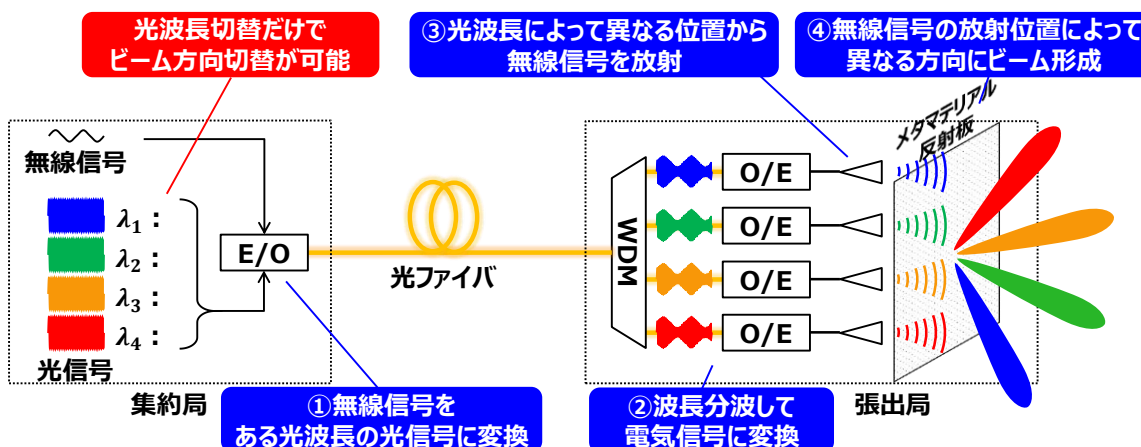


図 4-4. A-RoF を用いて離れた場所のアンテナ装置のビームを制御する技術

4.1.2. 反射板 (RIS) 技術

反射波によるマルチパスの利用は、移動通信において古くからの検討分野であるが、近年、壁や窓ガラスに取り付けることで電波の反射や透過を制御してエリアを形成しつつ、様々な無線性能を改善する反射板 (RIS: Reconfigurable Intelligent Surface) 技術とその制御技術が主にミリ波以上の高周波数帯向けに着目されている[4-7, 4-8].

ドコモでは、透明なガラスをアンテナ化する技術[4-9, 4-10]や、それらと組み合わせた RIS 技術の研究開発に取り組んでいる. 図 4-5(a)に示すメタ材料反射板を用いた実験では、ミリ波帯の電波を任意の方向に反射させ、通信エリアを拡大する技術について検証した[4-11]. 図 4-5(b)に示す透明動的メタサーフェスを用いた実験では、ミリ波帯の電波を透明なガラス基板によって透過させたり反射させたりすることができる技術を実証した[4-12]. さらに、図 4-5(c)に示すメタサーフェスレンズを用いた実験では、屋外から到来したミリ波帯の電波を、本技術を実装した窓ガラスによって屋内の一点に集中させることができる技術を実証した[4-13].

RISの実用化に向けては、ユースケースやサイズ設計、適用効果の明確化等の技術検討が必要である。また、RIS やリピータにおいてビーム方向等をリモートで制御することができれば、特に高周波数帯での通信エリア拡大に有効だと考えられ、その実現法も検討課題である。

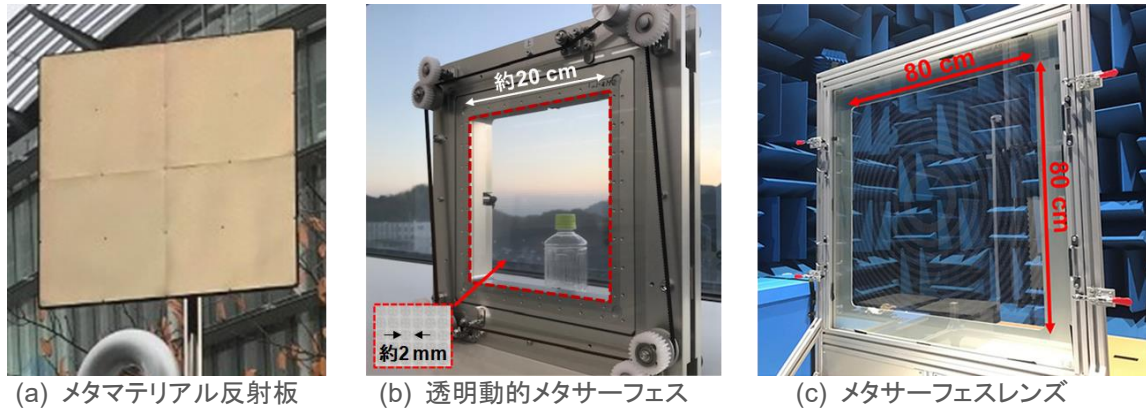


図 4-5. 反射板(RIS)技術の実証実験

4.1.3. 端末間協調送受信技術

New Radio Network Topology を実現する一手法として、端末間で協調して送受信する技術[4-14]も考えられる。5G の多接続(mMTC)における要求条件は 1 平方キロメートル当り 100 万接続であるが、6G ではウェアラブル型端末やサイバー・フィジカル融合の高度化を背景に、そのさらに 10 倍程度の“超多接続”が想定される。これは 1 平方メートル当り 10 端末の密度に相当し、このような多数の端末が密に存在する環境では、ネットワーク側のアンテナ装置を増やさなくとも、端末間の協調によって多くの通信路をつくることができると考えられる。このような“超多接続”のユースケースでは高機能端末から省エネ通信端末まで、端末のバリエーションもさらに拡大すると考えられ、幅広い端末能力(UE Capability)を考慮した技術方式の検討が必要になると考えられる。

4.1.4. センシングや省エネ通信と Win-Win な分散アンテナ展開

後述するように、5G evolution および 6G に向けて、通信の電波を用いて位置推定や物体検知などのセンシングを行う技術が検討されている[4-15]。また、バッテリーレス端末を実現する Backscatter 通信のような省エネ通信技術も近年着目されている[4-16]。これらの技術を実現するネットワーク形態には共通の特徴があると考えられ、例えば、無線センシングや Backscatter 通信では、図 4-6 のようにソースになる信号を基地局や移動局もしくは何らかの電波を発生するデバイス(図中 Signal transmitter)によって、通信エリア内に放射する必要があり、さらに通信エリア内に観測用の受信ポイントが必要になる。本図では、前述の“線”による分散アンテナ展開によって、複数の受信ポイントを展開することをイメージしている。無線センシングでは、物体からの反射波を分散アンテナで受信し、ネットワークで解析することで位置推定や物体検知などを実現する。Backscatter 通信では、バッテリーレス端末がソース信号を用いて給電を行いつつ、ソース信号に外部変調を行うことによって低消費電力で情報をネットワークへ伝えることができる。

このようなセンシングや省エネ通信に用いられるネットワークの形態を無線通信システムに自然なカタチで取り込むことについても、New Radio Network Topology のコンセプトの一部として目指していく必要がある。

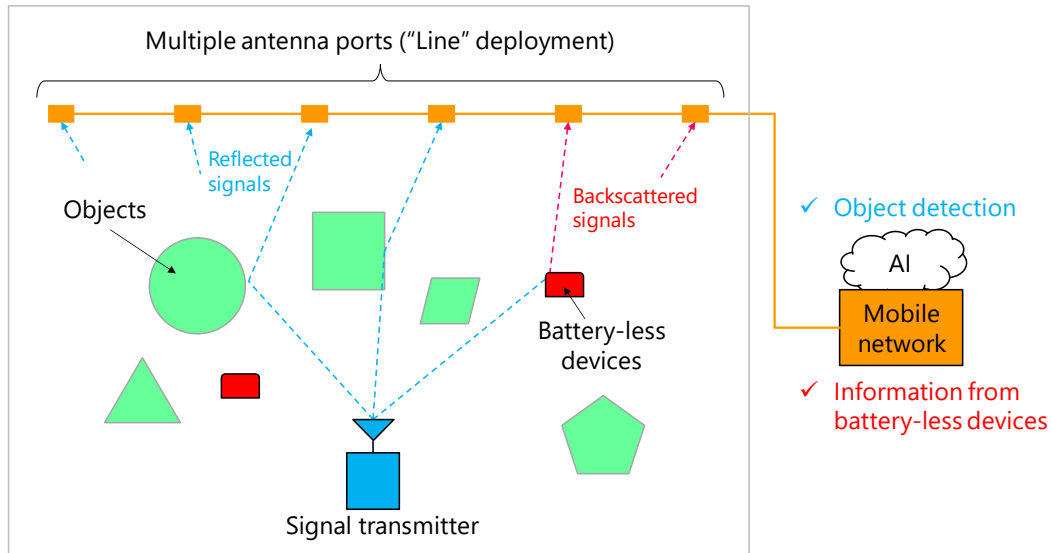


図 4-6. センシングや Backscatter 通信を想定したネットワーク形態の一例

4.2. 非陸上 (Non-Terrestrial Network) を含めたカバレッジ拡張技術

空・海・宇宙を含むあらゆる場所でのユースケースを想定した「超カバレッジ拡張」では、ドローンや空飛ぶ車、船舶、宇宙ステーションなど、これまでの移動通信ネットワークではカバーできなかったエリアへサービスを提供するためにエリアカバレッジ拡張が必要になる。従って、前述の New Radio Network Topology を垂直方向含めて三次元的にも検討する必要がある。さらに、5G evolution および 6G では、少なくとも数 10 km 程度以上の長距離無線伝送を高効率に実現する技術が必要になると考えられる。

図 4-7 のように、静止衛星 (GEO: Geostationary Orbit)、低軌道衛星 (LEO: Low Earth Orbit)、および高高度擬似衛星 (HAPS: High-Altitude Platform Station) の利用を視野に入れることで、山間・僻地、海上、宇宙空間までカバーすることが可能になり、通信サービスを新たなエリアに提供することができる [4-17]。GEO は高度 36,000km の静止衛星である。衛星から地上局アンテナ間の片道伝搬時間が約 120ms と比較的長いものの、3~4 機で地球全体をカバーし、かつ常時通信が可能であることから、現在でもモバイルバックホールとして地上ネットワークを補完している。6G 時代では更なる大容量化が必要となることから、衛星の電力・周波数をマルチビーム間で最適化することでシステム容量を向上させる VHTS (Very High Throughput Satellite, 超高スループット衛星) の実現が検討されている [4-18]。LEO は軌道高度数百 km ~ 約 2,000km の周回衛星であり、GEO と比較して低高度、かつ片道伝搬時間約 3ms という低遅延の特徴を活かし、現在は衛星携帯電話や衛星センシングで利用されている。衛星製造コストの低廉化や MIMO 等の適用による通信容量の拡大、また将来的に複数衛星が協調してネットワークを構成する衛星コンステレーションにより、大容量低遅延バックホールとしての利用が期待されている [4-19]。

HAPS は約 20 km の高度で一定の場所に常駐することができ、陸上にセル半径 50 km 以上のカバレッジエリアを形成できることから、昨今再注目されている [4-20]。LEO と比較してさらに低高度であるため、セル半径にもよるが片道伝搬時間約 0.1ms 程度とさらに低遅延を実現できる。従って、災害対策はもちろんのこと、5G evolution および 6G で想定される多くの産業向けユースケースにも有効だと考えられる。図 4-8 に示すように、HAPS では衛星に比較してさらに高速大容量な地上ネットワーク等へのバックホール用途 (固定系) に加え、LTE や NR 等の無線規格を用いて移動通信の端末を直接サポート、もしくはリレー (IAB) やリピータを中継して端末をサポートする用途 (移動系) も可能であるため、これらを合わせた幅広い用途への利用が期待される。無線技術的には、長距離通信に適した無線インタフェースの拡張や、地上ネットワークとの効率的な周波数有効利用方法、HAPS 搭載局と地上ネットワークの高効率な連携を実現するネットワーク設計などが課題であり、検討する必要がある。

3GPP では、これら衛星や HAPS を用いた NR の非陸上ネットワーク (NTN) への拡張検討が開始されている [4-21]。

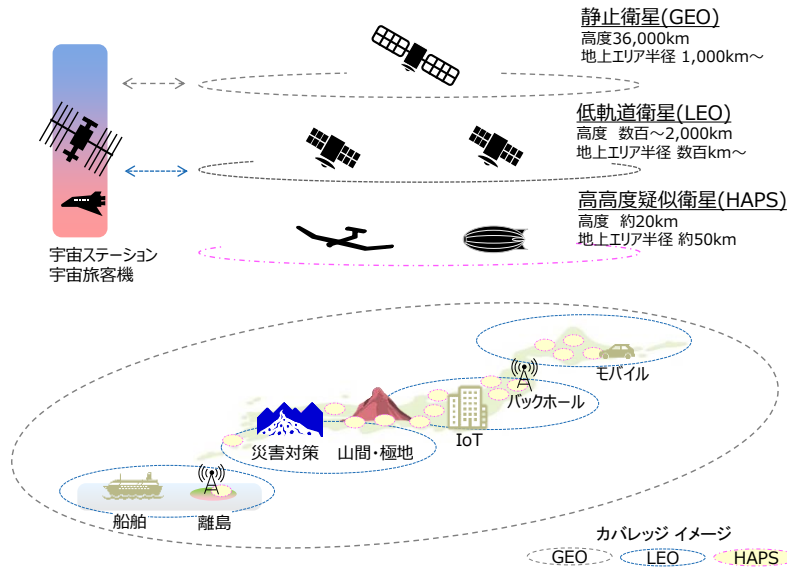


図 4-7. 衛星や HAPS を用いる空・海・宇宙へのカバレッジ拡張イメージ

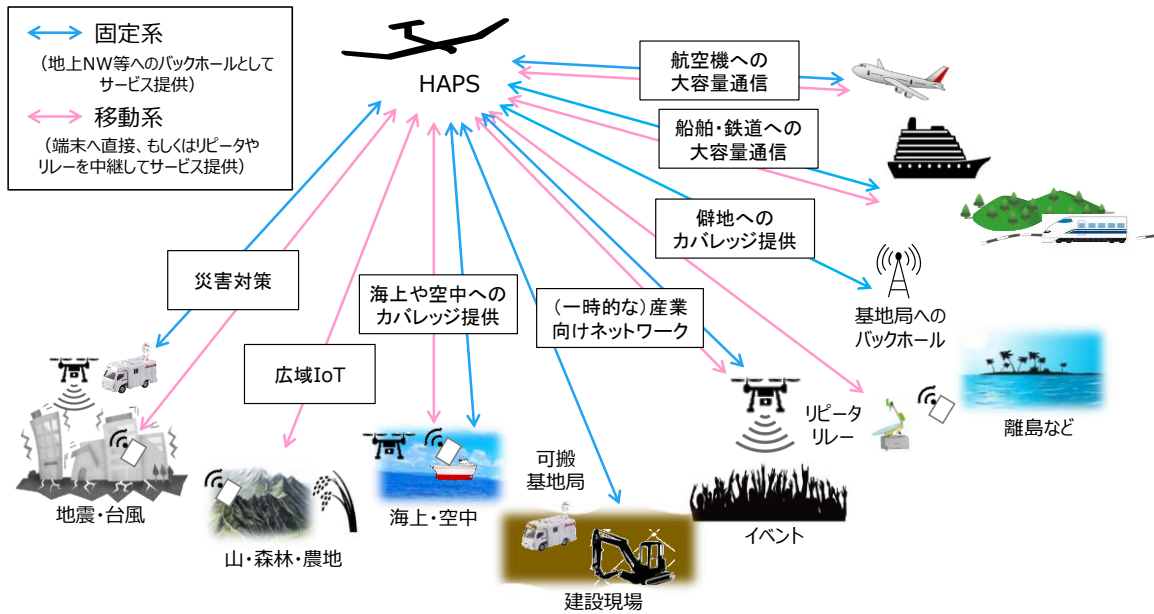


図 4-8. HAPS で期待される様々なユースケース

4.3. 周波数領域のさらなる広帯域化および周波数利用の高度化技術

図 4-9 に示すように、5G NR では、52.6 GHz までの周波数帯がサポートされ、将来リリースに向けて 90 GHz 程度までの拡張が検討されている。さらに、米国の連邦通信委員会(FCC)は 95 GHz~3 THz といった 5G よりさらに高い周波数帯を 6G 向けに検討するよう推奨している[4-22]。このような「ミリ波」の高周波数帯から「テラヘルツ波」にかけての高周波数帯では、5G に比較しても飛躍的に広い周波数帯域幅が利用できるため、100 Gbps を超えるような「超高速・大容量」の実現に向けて検討されている[4-23, 4-24]。現時点では、図 4-9 に示すように、300 GHz 程度までの「電波」を 6G の検討範囲として考えている。しかしながら、「テラヘルツ波」は「ミリ波」よりもさらに電波の直進性が高まり、遠くへ飛ばなくなる課題があるため、テラヘルツ波における電波伝搬特性の明確化、伝搬モデルの構築、高精度伝搬

シミュレーション手法の確立に加えて、デバイス技術の進展や前述の New Network Topology を前提とした活用などの技術検討が必要である。

例えば、デバイス技術としては、さらなる広帯域化に対応可能なデジタル信号処理回路、DAC (Digital to Analog Converter)、ADC (Analog to Digital Converter) を低コストかつ低消費電力で実現する必要がある。また、高周波数帯で動作するアンテナ、フィルタ、増幅器、ミキサ、局部発振器等を後述する Massive MIMO の多数アンテナ素子に対応できるように開発する必要がある。100 GHz を超える高周波数帯における RF (Radio Frequency) 回路の高性能化・高集積化に加えて、実際の商用サービスで使用できるレベルの精度とコストで半導体デバイスとして製造できる必要がある。また、同高周波数帯では配線損失も大きいことからチップ・回路の構成、アンテナとの接続等の実装方法も大きな課題である。デバイス自体の性能追求と、デジタル信号処理によるデバイス性能向上は、将来の半導体製造技術の進化等も踏まえて、その最適化が研究課題になると考えられ、化合物系とシリコン系のどちらの半導体を採用するのかが 5G evolution および 6G において継続した課題である。さらに、それらの半導体デバイスを端末に活用することを考えると小型化や低消費電力化、高い放熱性も課題である。

また、このような高周波数帯の開拓と、前述の空・海・宇宙を含む「超カバレッジ拡張」をあわせて考慮した無線アクセス技術のコンセプトを図 4-10 に示す。これらは、それぞれ異なる発展の方向性であるが、周波数利用効率に比較して、カバレッジや電力効率がより重要となってくる領域という意味では共通の技術課題がある。無線技術としては OFDM に比較してシングルキャリアの信号波形が優位になってくる領域でもあり、将来的に IAB も含め無線技術の適用領域を拡張していくにつれ、電力効率のよいシングルキャリアのような無線技術の重要度が増してくるかもしれない[4-25, 4-26]。

さらに、既存の周波数帯にミリ波、テラヘルツ波のような新しい周波数帯を加えていくと、これまでに比較して非常に幅広い周波数帯を利用していくことになる。従って、用途に応じた複数帯域の使い分けの最適化や、セル間の周波数繰り返し法の再検討、上下リンクのデュープレクス法の高度化、さらには低い周波数帯の利用法の再検討など、多くの関連する検討分野があると考えられる。また、図 4-9 に示すように、5G においてミリ波だけではなく Sub6GHz (3.7/4.5 GHz) 帯が重要な周波数帯であったと同じように、6G に向けてもミリ波帯よりも低い周波数帯における新たな周波数帯の開拓や性能改善は、あらゆる場所でユーザ体感を向上でき、移動通信事業者にとっても 6G 導入のモチベーション向上につながることから重要であると考えられる。上述した New Radio Network Topology、4.6 節で説明する AI 技術、サイバー・フィジカル融合による最適化技術、高周波数帯と連携した高精度センシング技術等の、5G までには実現できなかった技術を新たに導入することで、既存周波数帯の周波数利用効率の向上、新たなユースケースへの対応拡大が考えられ、改めて検討が必要である。加えて、4.4 節で解説する高度化された無線伝送技術もミリ波帯よりも低い周波数帯に広く応用することができる。また、既存の周波数帯では 5G NR 等の既存技術と共存可能な新無線技術の設計も重要な要求条件になる。

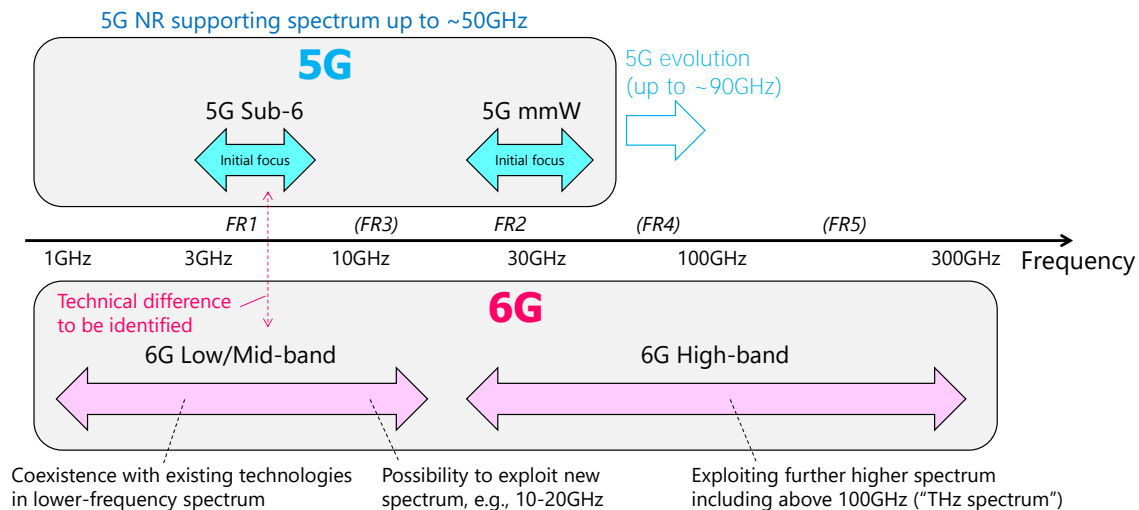


図 4-9. 6G に向けた周波数帯の開拓

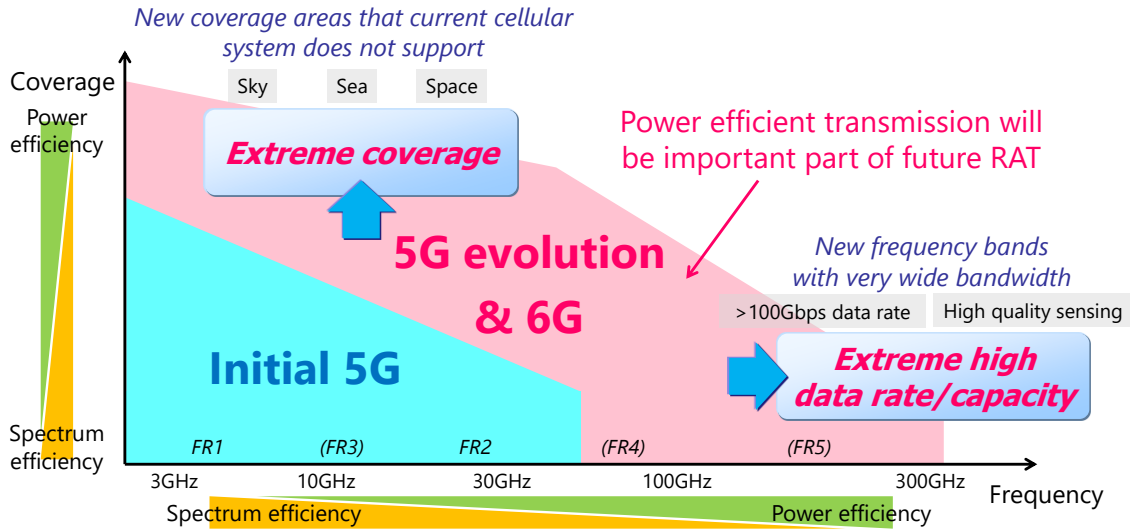


図 4-10. 高周波数帯開拓とカバレッジ拡張を目指した無線アクセス技術の拡張

4.4. Massive MIMO 技術および無線伝送技術のさらなる高度化

5G においては、特にミリ波を有効利用する技術として多数アンテナ素子を用いる Massive MIMO (mMIMO) 技術が一つのキーであった[1-1]。5G evolution および 6G においても、さらに多素子／多レイヤな mMIMO [4-27, 4-28] や New Radio Network Topology と組み合わせた分散型アンテナ配置の mMIMO 技術など、さらなる高度化が進むと想定される。分散 MIMO については、New Radio Network Topology との組み合わせによって、ミリ波、テラヘルツ波などの高周波数帯で特に有望であり、図 4-11 に示すように、移動端末に対して高確率で見通し伝搬経路を確保するための分散アンテナ展開技術、ユーザ端末の移動等に応じて通信経路の切り替えや極狭ビームの追従を行う分散伝搬路制御技術、端末間通信なども活用して多数のユーザ端末の大容量同時伝送を実現する分散協調 MIMO 技術などの実現が検討課題になると考えられる[4-5]。

また、OFDM ベースの技術でほぼシャノン限界に達している無線アクセス技術についても、時間領域で周波数帯域幅よりも大きいサンプリングレートを用いて信号を非直交に圧縮伝送する FTN (Faster-than-Nyquist) 信号などの研究が行われている[4-29]。限られた帯域幅内で一定の伝搬路を考慮した場合は、FTN を用いてもシャノン限界を超えるのは難しいが、PAPR (Peak to Average Power Ratio) などの別ファクターを考慮した場合にはゲインが得られる可能性がある[4-30]。さらに、図 4-12 のように、単一のアンテナで mMIMO 相当の空間多重ゲインを実現する技術として、仮想大規模 (VM: Virtual Massive) MIMO 技術が提案されている[4-31]。VM-MIMO 技術では、FTN 同様に周波数帯域幅よりも大きい受信サンプリングレートを用いつつ、さらにアンテナ特性を超高速かつ周期的に変動させることで超多数の仮想的アンテナを生成し、空間多重数を増大させる。FTN と比較すると、こちらは伝搬路を高速変動させるためシャノン限界の帯域幅を拡張するような効果が期待でき、適用条件や実環境下での実現性等の課題は残るものの、理論的には大きなゲインが得られるポテンシャルがあると考えられる。

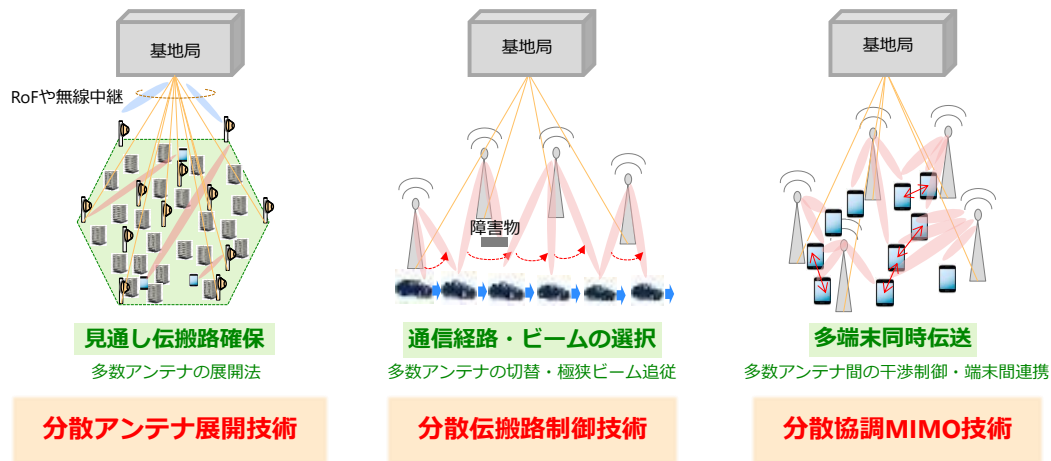


図 4-11. 分散 MIMO の検討課題

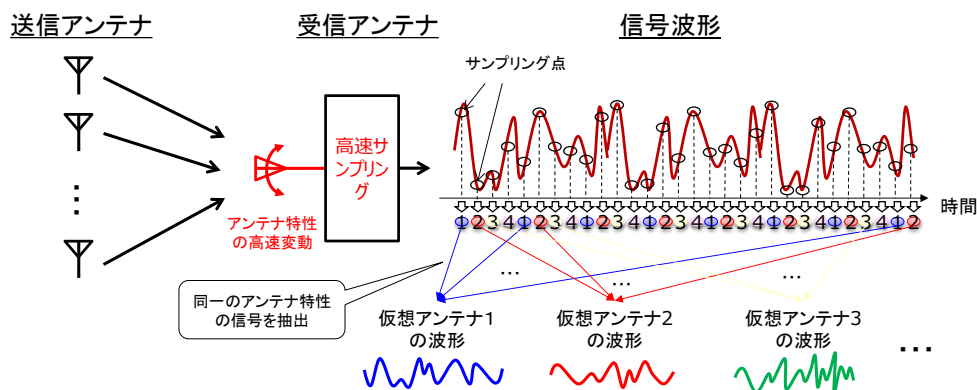


図 4-12. 周波数帯域幅よりも大きいサンプリングレートをを用いる非直交伝送技術の例 (VM-MIMO)

4.5. 低遅延・高信頼通信 (URLLC) の拡張および産業向けネットワーク

産業向けユースケースの中には、遠隔制御や工場自動化など、必要な性能を担保することが要求されるものが多くあり、公衆網のベストエフォート型サービスとは異なる産業向けに特化したネットワーク (NPN: Non-Public Network) の高効率な実現法が昨今注目されている。国内で議論されている「ローカル5G」のみならず、5G-ACIAのようなグローバルな検討プロジェクトにも企業が多数参加している[4-32]。各産業および用途によって要求条件のバリエーションが広いという特徴があり、必ずしも低遅延が必要ではない場合もある一方、単なる平均的な低遅延だけではなくゆらぎのない安定した低遅延まで求められるような非常にシビアなケースまで想定されている。

例えば、工場内自動化においては、様々なアプリケーションを用いる事で、より効果的な工場自動化が期待される。図 4-13 のように、大容量通信を必要とする情報伝送系のシステムと、低遅延・高信頼性を必要とする制御系システムを同時運用するような「Mixed Traffic」に対応する必要があると想定され、低遅延・高信頼性を維持しながら大容量通信を実現していくなど幅広い要求条件に応えられるシステムの実現が課題である[4-33]。また、6G では5G よりもさらにレベルの高い信頼性や高セキュリティの実現も同時に期待される。

図 4-14 のように、一般のユーザが利用する公衆網 (Public Network) と産業向けの NPN との間のモビリティや、ネットワーク構成などについても、性能やコスト、導入の迅速性などの要件に応じて様々なオプションが考えられており、5G-ACIA 等でも議論されている。

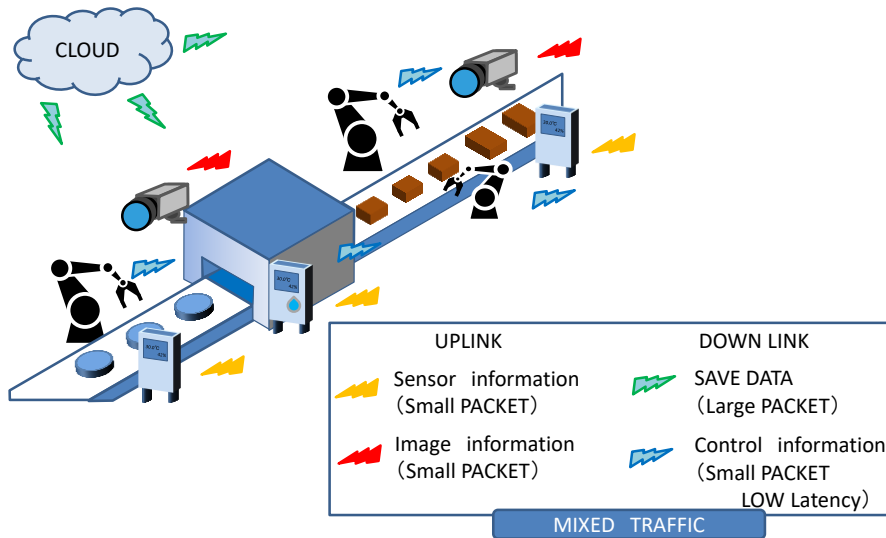


図 4-13. 産業向けネットワークにおける様々なトラフィックのサポート

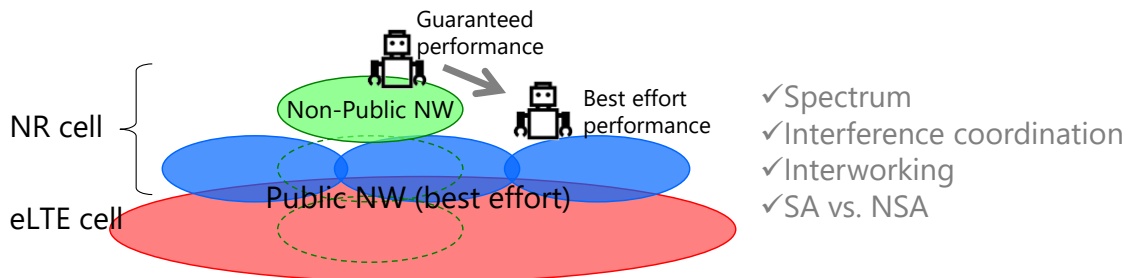


図 4-14. 公衆網と産業向けネットワークのオーバーレイ

4.6. 無線通信システムの多機能化およびあらゆる領域での AI 技術の活用

サイバー・フィジカル融合では、IoT デバイス等を通じて映像や多様なセンシング情報がネットワークに伝送される。従って、無線通信の電波で測定した情報に加えて、このような多様な情報を AI 技術で解析し、伝搬路予測やビーム制御など無線通信制御の高度化に取り入れるような技術分野が考えられる。また、無線通信の電波を情報伝送に加えて様々な用途にも利用していく進化も有望であり、測位、物体検出などのセンシング[4-34, 4-35]や無線での給電技術(Energy harvesting [4-36]など)に活用することが考えられる。特に、ミリ波、テラヘルツ波といった高周波数帯は、高速・大容量通信という目的だけではなく、高精度な測位やセンシングの実現に適しているという側面も無視できない。ここでも、AI 技術の活用はキーであり、無線通信の電波で測定した情報に加えて多様な情報を AI 技術によって解析することで、測位や物体検知などの精度を大きく向上させる可能性が期待できる。

さらに、昨今の計算機の能力向上および AI 技術の進化に起因して、人間などの物体検知を超えて物体識別や行動認識への技術領域の拡大が進んでいる。具体的には、侵入検知(一人、複数人)、あるエリア内の混雑率、人の行動認識(歩く、座る、料理中、テレビ視聴中など)、指や腕によるジェスチャー認識、バイタルサインモニタリング、ユーザ識別など幅広い検討が進められている。技術的観点から考えると、従来の物体検知技術では、受信電力の変化から検知するアプローチが主流であった。一方で、近年の OFDM や MIMO の普及によって、周波数方向および空間方向のより詳細な伝搬チャネル情報(CSI: Channel State Information)を取得することができるようになり、解析に用いることができる情報量が爆発的に増加している。このように無線ネットワークから取得できる情報には、依然として多くの価値が眠っていることから、今後も継続的に発展すると考えられる。

図 4-15 に示すように、無線通信における様々な制御やアルゴリズム、ネットワークやデバイスの管理、ユースケースや環境に対して自動最適化する機能など、無線通信システムのあらゆる領域において AI 技術の活用が考えられている。例えば、AI を利用して、非直交多元接続(NOMA: Non-orthogonal Multiple Access)における遅延や信頼性を向上する技術[4-37, 4-38], 移りゆく環境を先読みして伝搬環境や通信品質を予測する技術[4-39, 4-40], 予測した伝搬環境や通信品質を基に、統合連携する他の無線技術との間のインテリジェントな経路切り替えを行う技術[4-41], 移動式基地局を常に最適な設置場所へ自律的に配置する技術[4-42]など色々挙げられる。前述した New Radio Network Topology を効率よく効果的に機能させるためには、AI 等を活用したトポロジー管理および制御技術も重要な要素となるだろう。AI の活用によって取得したセンシング情報は付加価値としてユーザへの提供を行うだけでなく、5G evolution および 6G におけるネットワークの制御やパラメータ最適化にも有効であると考えられ、安定的なネットワークの運用にも期待できる。

このような AI 技術の活用に適した無線ネットワーク規格の検討が課題であるが、将来的には無線ネットワークインタフェースの設計自体も AI 技術によって行われるかもしれない。

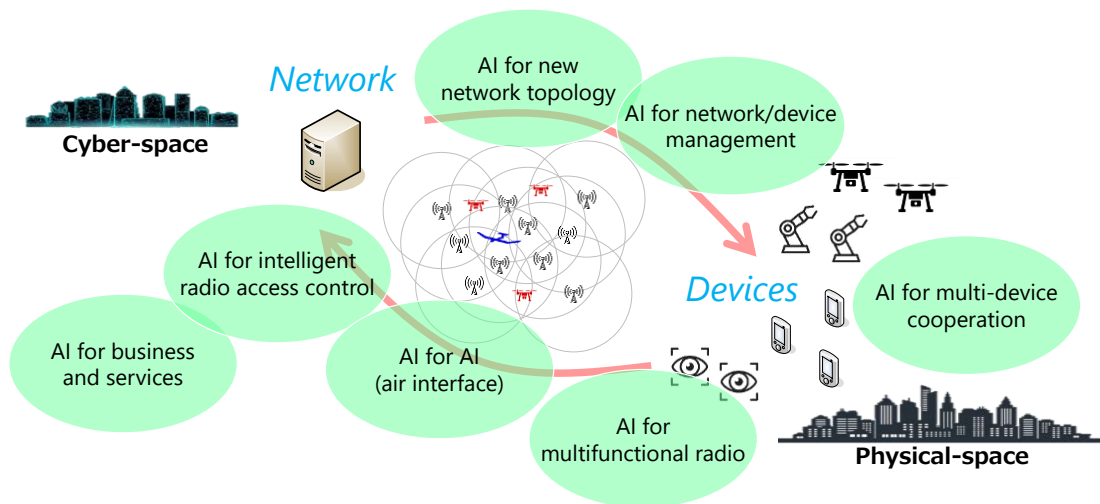


図 4-15. 移動通信システムのあらゆる領域における AI 技術の活用

4.7. 移動通信以外の無線通信技術のインテグレーション

あらゆるユースケースのサポートを目指して 5G evolution および 6G の技術領域を拡張していくと、図 4-16 に示すように、既存あるいは将来の各種用途に特化した移動通信以外の無線技術との連携や統合を考慮する必要が生じてくる。5G と同様、無線 LAN や Bluetooth などアンライセンスバンド帯無線通信や近距離無線通信の補完的な利用や連携は引き続き重要であり、それらに加えて、光無線通信 [4-43, 4-44] や海中音響通信[4-45]など電波以外の波を用いる無線通信との新たな連携、固定通信と移動通信とのさらなる融合も考えられる。前述のように空・海・宇宙へのカバレッジ拡張を実現するには、衛星通信システムとの連携も重要である。

一方、移動通信技術のアンライセンスバンド帯への拡張(LAA: License Assisted Access) [4-46]や、移動通信技術によるアクセスリンクとバックホールリンクの統合(IAB), 5G における NTN の検討などが例として挙げられるが、これまで異なる通信規格や周波数帯を用いていた無線技術のユースケースを、移動通信技術の拡張によって統合的にサポートしていくアプローチも考えられる。

5G evolution および 6G の要求条件やユースケースを全て実現するには、このような複数の無線ネットワーク技術の連携や統合によるインテグレーションが必須であるとともに、その実現方法が課題である。それは 6G の「定義」にも関係するかもしれない。理想は、ユーザにどの無線ネットワーク技術を使用しているかを意識させることなく、より幅広いユースケースをサポート可能なエコシステムを確立することである。

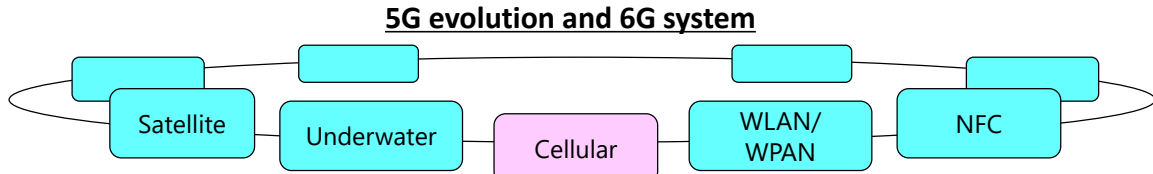


図 4-16. 無線通信技術のインテグレーション

4.8. ネットワーク・アーキテクチャ

5G のネットワーク・アーキテクチャとしては、高速・大容量、低遅延、高信頼、超多数端末接続等の要求条件や、マーケットの多種多様なサービスやアプリケーションに対応するために、無線アクセスネットワークだけでなく、コアネットワークにおいても仮想化技術、ネットワーク・スライシングやサービスベースのアーキテクチャ(SBA: Service Based Architecture)等の新たな技術やコンセプトが導入された。しかしながら2020年代後半および2030年代のマーケットトレンド、要求条件のさらなる高まりや市場変化の速さに追従するために、ネットワーク・アーキテクチャの抜本的な見直しも含めた検討が必要である。

検討を進めるうえで留意すべき要求として、以下が考えられる。

- ① 幅広い業界からのさらなる多種多様なユースケースの実用化
- ② サイバー・フィジカル融合が進んだ時代のクルマ、カメラ、センサー等のモノからのデータを中心とした飛躍的なトラヒックの増加への対応
- ③ 通信ネットワークのライフライン化、各産業の重要通信対応要求の高まり、災害の頻発等に対する通信システムの更なる堅牢性の確保
- ④ ウェアラブルデバイス等の人の使うデバイスの多様化と増加、通信業界にも及ぶシェアリングエコノミーの拡大への対応
- ⑤ 地球温暖化ガス排出抑止・脱炭素化・リユースビリティといった持続可能な地球環境保全への対応
- ⑥ 速まる市場の変化スピードに伴う迅速な新サービス実用化
- ⑦ サイバー攻撃の高度化、個人情報漏洩等の増大するセキュリティ脅威への強固な防衛、セキュアな通信サービスの提供
- ⑧ COVID-19 の感染拡大による急激なりモート社会への変革

これらに対し、検討すべきネットワーク・アーキテクチャの課題を以降に述べる。

4.8.1. フラットなネットワーク・トポロジー

移動通信では現在までツリー構造やスター構造のネットワーク・トポロジーが主に使われているが、将来的にもこれらの構造が公衆網では使われると考えられる。しかし、今後の多種多様なユースケースの創出やシステムの堅牢性要求を考慮すると、ネットワーク・トポロジーも新規のものも含め適材適所に選択できる多様性を考慮すべきである。ローカル5Gに代表されるプライベートネットワーク的なユースケースが今後さらに普及することが予想され、ネットワーク機能を一体化した小さなネットワーク構成も今後普及すると考えられる。カバレッジ拡張のため、アンテナの分散配置、リレーノードの活用や端末間のホッピング等の技術の導入と普及も考慮すべきである。さらに、災害対応、サービスエリアの飛躍的拡張や低コストかつ効率的なネットワーク運用を目的とし、HAPS や衛星を活用した非陸上通信技術や移動通信以外の無線通信技術とのインテグレーションを考慮したネットワーク・トポロジーも考慮する必要がある。

4.8.2. フレキシブルなネットワーク機能配置

将来の多種多様なユースケースに対応するためには、前述の多様なネットワーク・トポロジーと合わせ、フレキシブルなネットワーク機能配置を可能とすべきである。RAN(Radio Access Network)やCN(Core Network)の機能配置について、公衆網では大規模施設に集約して配置するケースが多いが、今後プライベートネットワーク的なユースケースでは、セキュリティ向上や低遅延伝送を重視し、多くの機能をローカルかつ分散して配置するケースが増えるであろう。さらには移動機の機能についてもネットワーク側に配置することで移動機のコストやサイズ、消費電力を抑えることも考慮すべきである。

昨今のネットワーク機能のコンテナ化を含む仮想化やソフトウェア化の潮流は、この方向性を促進するものであり、既に現段階でもかなりフレキシブルな実装が可能な状況である。現在はコアネットワーク機能を中心に仮想化され、加えて通信事業者によって MEC/クラウドサービスも提供され始め、RAN 機能の仮想化も始まっている。これらの多種多様なネットワーク機能やクラウドサービスをより柔軟に分散配置しかつ統一的に安定して運用するために、堅牢性や運用性および保守性の高度化について、今後さらなる改善が必要である。また、小規模から大規模までの通信性能要求に対してネットワークサービスのスケーリングの確保、ソフトウェア技術による低消費電力化や、ハードウェアそのものの低消費電力化や省スペース化や経済化がさらに求められる。

4.8.3. ネットワークのシンプル化

多様なユースケースにフレキシブルに対応するために、多くの機能やオプションが実装されることで、5G システム全体としては複雑化している。また、ある機能を制御するための複数のパラメータ値には、幅広い値や多様な組み合わせが規定されている。それにより、機能動作確認や装置間、ベンダ間の相互接続性試験項目が増大し、システム開発に大きな労力とコストを必要としている。これに対応するため、システムのフレキシビリティを維持しつつ、複雑性を抑える工夫が今後重要となる。対策として以下が考えられる。

- ① マーケットで必要な機能・オプションの厳選
- ② RAN と CN 間の冗長性排除
- ③ プロトコルスタックの層数削減
- ④ ユースケースのグルーピングとグループ毎のパラメータ値・組み合わせの選定
- ⑤ 仮想化環境における RAN と CN の設置や構成変更などライフサイクルマネジメント手段の統一化

4.8.4. OAM (Operation and Maintenance) の高度化

オペレーション稼働やコストの削減、新機能のシステムへの迅速な導入などを目的とし、AI 技術を活用して人手を介さずシステムが自律的かつダイレクトにネットワークやサービス運営を可能とするゼロタッチオペレーションが世界的に注目され、標準化やシステム開発が精力的に進められている。現段階では自律化の範囲は限定的であり、保守者の介入が必要なケースが多々あるが、今後、段階的に自律化領域を広げ、保守者の介入領域を減らしていく必要がある。

4.8.5. 複数のアクセス技術方式の統合運用技術

既に 3GPP では無線 LAN や固定通信含む複数のアクセス技術を收容する機能を CN 内の機能として標準化しているが、今後、固定通信、衛星・HAPS 通信、放送等の多様なアクセス技術を適材適所に選び、ユーザが意識することなく、効率的に最適なアクセスを選定できるような高度な統合運用技術が必要になると考えられる。将来ネットワークに向けて今後検討すべき課題としては以下が考えられる。

- ① 共通サービスのサイト分散(Global/Local, Central/Edge 等)方法
- ② ひとつの端末が複数のアクセス・アドレス・スライスを使い分ける方法
- ③ 一人のユーザが持つ、異なるアクセス技術をサポートする複数のデバイスの運用方式

4.8.6. 超低遅延を支えるコアネットワーク伝送/交換制御技術

低遅延の実現は 5G の成果の一つである。端末は複数の U プレインノードに接続でき、当該ノードの端末移動契機やアプリ契機での切り替えができる。E2E 遅延の監視もできる。最近傍のアプリサーバの選択や、U プレインノードの切り替えとアプリサーバの切り替えの連携も仕様化されつつある。しかし、5G では E2E の低遅延の実現は通信制御機能から見える範囲での U プレインの経路選択のみに頼っていた。つまり 5G では(i)実際に敷設してある伝送路、(ii)実際の交換設備、(iii)無線部分と有線部分の接続部分、を考慮して遅延削減を図ることはなかった。今後 E2E の超低遅延を実現するには、そういった 5G では検討範囲外としていた部分も考慮し遅延削減を進める。つまり例として、(i)通信制御機能を伝送路の実際の物理媒体を制御するまで拡充し、経路選択/設定に加えスケジューリングも制御出来ることとし、(ii)交換設備内で媒体変換(e.g. 光->電気->光)を行わない、伝送部分でも媒体変換はなるべく行わない[4-47]、(iii)無線部分と有線部分でデータ送受のロット割当を整合させ待ち合わせを解消する、という方式を採用することも考えられる。この方式は、副次的効果として、確定性通信の効率化や低電力化を進めることとなる。

4.8.7. CPS を支える広域時刻同期と広域確定性通信

産業用閉域網に必要な時刻同期、確定性通信(i.e. Deterministic な通信。すなわち、時刻指定で到着し遅延の変動が限られた通信。周期的通信が主な用途)を実現した点も 5G の成果の 1 つである。工場内生産技術を支援する IEEE TSN 仕様を 5G でサポートした。映像音響制作に必要な IP ベースの時刻同期も仕様化されつつある。送電網保安に必要な時刻同期、時刻維持、確定性通信の検討も開始された。しかし、5G では現時点で(i)距離の制限無く広い範囲に散在するデバイス間の産業用閉域網の場合と同等の時刻同期、(ii)距離の制限無く広い範囲での確定性通信、(iii)IP ベースの確定性通信、(iv)有線部分伝送路でのスケジューリング、をサポートしていない。今後は、広域での時刻同期や確定性通信は CPS のアクチュエーションを支えるとして検討を進める。これはまた、新たな通信品質として触覚や複数感覚(i.e. マルチモーダル)を用いた臨場感あふれる新サービス創出にも寄与する。進め方を考えるにあたり、(i)(ii)(iii)に関し、まず、通常トラヒックと際立った特性を持つトラヒックを混ぜて制御することは非効率と想定される。そこで、今後、図 4-17 に示すように、特定のトラヒック特性を持つデータ伝送に特化した複数の高度伝送路を毎々に選択的に使う仕組みを拡充することから始める。この伝送路は通信品質を細かくオフパスで制御できるべきである。(iv)に関し、確定性通信の制御ノードが生成するユーザデータ発生時刻/周期の情報を有線部分の上述の伝送路でのスケジューリングにも生かす、ことが考えられる。

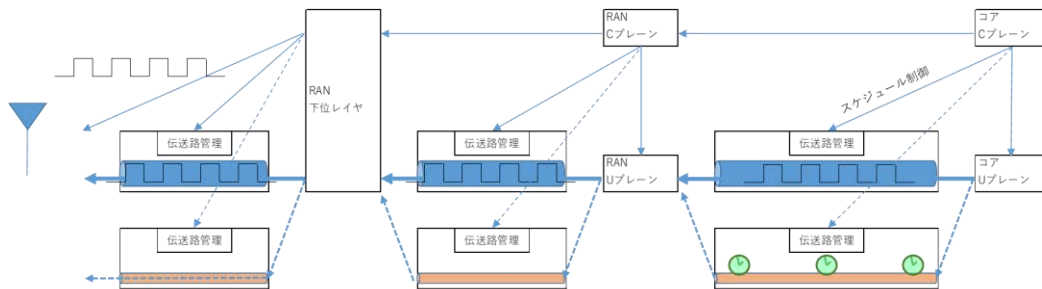


図 4-17. 広域確定性通信のためのアーキテクチャ例

4.8.8. 超カバレッジを支える位置ベース移動制御

5G では移動制御は EPC と大きく変わらなかった。つまり、5G では現時点で(i)セルや基地局が地面に対して移動する、(ii)セルと基地局の組み合わせが変わる、(iii)セルが国境をまたがるほど大きい、という場合に移動制御(および、端末在圏国の規制に依存する緊急呼等のサービス)が適切に動作しない。今後は、前記の場合は普通に起こり、かつ、地上/空/宇宙でエリアをカバーし端末や基地局が 3 次元空

間で動くことから、移動制御の再検討が見込まれる。よって例えば idle モードに関し位置ベースの移動制御を採用することも考えられる。これは、図 4-18 に示すように(a)エリアを 3 次元で緯度/経度/高度でサイコロ状に仕切ったものとして定義し、(b)位置情報取得機能を持つ端末が自らエリア内外にいることを判定する、(c)セル-基地局-コア NW 間のリンク接続確立も拡充しセルがカバーするエリア情報を随時コア NW まで更新する、との要素からなる。この方式は、副次的効果として、端末登録位置情報を、位置(と時間)でデータを管理する CPS のサイバー空間に、NW のデジタルツインとして、そのまま格納できる。他のデジタルツイン(e.g. 市街地情報、交通情報、災害情報)と容易に重ね合わせることができ、別途 AI も使いながら、刻々の情報を NW の運用/保守に生かすことが出来る。

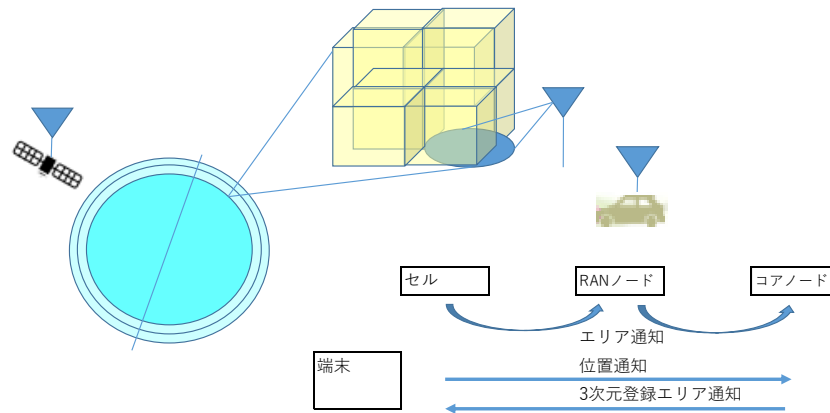


図 4-18. 位置ベース移動制御

4.8.9. セキュリティの高度化

ランサムウェア、EMOTET、さらにもっと複雑な標的型攻撃等、サイバー攻撃が日々ますます高度化している。6G の技術進展によってもたらされる接続性やモビリティによって、攻撃の範囲が広がり、脅威が増大してしまう。現在、6G においては、超多接続、デジタルツインの常態化、クラウド事業者等のサードパーティとの連携、移動通信以外の無線通信技術の連携等を想定している。同時に、重要なインフラとしての活用が期待される一方で限られたリソースしか持たない低消費電力デバイスの利用も増大すると考えている。6G 技術の進展と共に、我々の想定以上にダークウェブでの技術が進展することも考えられる。これらの状況は、6G の時代では今日よりもはるかに多くのセキュリティ攻撃の可能性があることを示している。AI による脅威がだんだん現れるようになり、低電力でリソースが限られたデバイス等が作り出すセキュリティ面での脆弱な部分を足掛かりとした攻撃も発生し、個人情報と企業機密情報の漏洩につながる可能性がある。したがって、全体的にセキュリティを考慮しなくてはならない。

安心安全なサービス提供、業界を超えた連携の実現には、これら増大する脅威からシステムやデータを守り、その機密性/完全性/可用性を確保しうるセキュリティ高度化が重要な課題となる。

サイバー攻撃からサービスやネットワークを守るには、脆弱性を排除し、サイバー攻撃を迅速に検知し、攻撃を局所化しながら、迅速に修復措置できるソリューションが必要になる。脆弱性や攻撃の検知技術の高度化をはじめ、サイバー攻撃の検知と措置の自動化(現在はマンパワーとコストの増大が必要とされる)、サイバー攻撃の予防技術に基づく予測など、AI 技術や NW デジタルツインを活用したセキュア技術の研究が行われている。これら最先端のセキュア技術の導入により、機密性/完全性/可用性を強固にする堅牢なセキュリティプロテクションを実現できると考えられる。これらはまたゼロトラストセキュリティの考慮も必要である。

高速データ通信では、十分なリソースを持つデバイス(メモリ、CPU 等)だけでなく、少ないリソース/低消費電力のデバイスとの連携が必要となるので、プロトコルのシンプル化や軽量暗号、NW 側での通信異常検知技術等の活用が必要になるだろう。このような拡張は、低電力消費デバイスでも複雑なプロト

コルによって生じるセキュリティリスクを減らす高度なセキュリティ機能を実行可能とする。加えて、秘密計算技術[4-48]や暗号化されたトラフィック分析の適用は潜在的サイバー攻撃回避に役立つと考える。分散型台帳技術の活用も 6G ネットワークにとってセキュアな通信に有益となる可能性がある。

6G では、量子コンピューターの実用化を考慮すべきである。万量子計算機は現在主流の公開鍵暗号 (RSA、楕円曲線暗号等) を現実時間で解読可能な Shor のアルゴリズムを実行できると言われている。したがって、6G 時代において、耐量子計算機暗号技術[4-49]の適用が必要になる。すべてのこれらのセキュリティの側面もネットワーク・アーキテクチャに関連した考慮が求められる。

以上、セキュリティの高度化についてのイメージを図 4-19 に示す。

最後に、堅牢化、ID・パスワード・アクセス権限の管理、監視、タイムリーなパッチ適用によるソフトウェアの最新化といった基本的なセキュリティ管理を忘れてはならない。また、セキュリティの強さはビジネス (通信性能・コスト・ユーザビリティ等) とトレードオフであるため、適切なバランスを見つける必要がある。

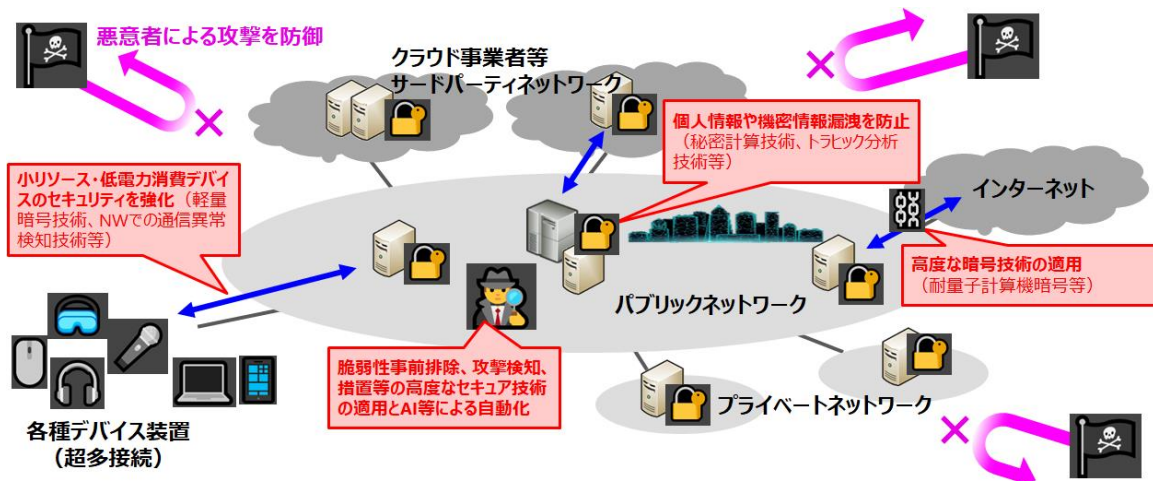


図 4-19. 6G ネットワークにおけるセキュリティ高度化

4.8.10. 分散するコンピューティングリソース

サイバー・フィジカル融合、デジタルツインを作るためにはフィジカル環境からサイバー環境への情報収集が必要となる。フィジカル情報の一つである高精細画像を絶え間なく送り続けると、多量のカメラデバイスからデジタルツインまでの通信リソースが大量に必要なってくる。この通信リソース消費を抑えるために、圧縮や集約して冗長な部分を取り除いたり、冗長さで高精細化する等の事前処理をデバイスやデバイスに近いエッジ環境に分散配置されたコンピューティングリソースで行うことが想定される。

また、観光案内 AR 等のサービスでは、ユーザの満足度を上げるためにリアル世界とのラグを感じないほどの低遅延が要求される。デバイスに閉じて AR 等の処理できれば良いが、デバイスの軽さや低消費電力との兼ね合いから、エッジ分散コンピューティングリソースを使用したサービス提供が想定される。

別のユースケースとしては、現状は人が持っているスマートホンで実行しているようなことを、人の生活の周りに存在する入出力デバイス、例えば家庭内のディスプレイや屋外の公的に設置されたカメラを使って行うようなサービスが考えられる。このようなサービスでは、エッジ分散コンピューティングリソースから制御する形も想定され、ヒトの移動に応じて、入出力デバイスだけでなく使用するコンピューティングリソースを移動させて QoE を保つようになるだろう。現状、ドコモではパブリック向けのエッジコンピューティングリソースとして dOIC・クラウドダイレクトサービスを提供している。全国 4 か所から始め設置場所

を増やしていく。また、ローカル 5G のように法人・自治体等がプライベートに設置するシステムができつつあるが、その中でもコンピューティングリソースが含まれているものが増えるだろう。

デジタルツインや AR が当たり前になってくる 6G 時代では、どの程度の量のコンピューティングリソースが、どの程度の分散さで配置するべきだろうか？ 都道府県、政令指定都市に一つ程度の分散さでは、遅延要求の面から十分ではないだろう。スタジアム等の特別な施設や各地の観光名所にもそれぞれ置かれる程度には分散配置されていくだろう。RAN 装置もソフト化仮想化される方向もあり、RAN 装置と共有する形ですべての RAN 装置ビルに、ユーザが使えるコンピューティングリソースが配置されることになるかもしれない。さらに、小型化技術が進めば、すべてのアンテナ設備にコンピューティングリソース設置されるようになる可能性もある。図 4-20 に示すように、大規模データセンターのような形態だけでなく、あらゆるところに中規模・小規模なコンピューティングリソースが分散配置されるだろう。そしてこれらのリソースをすべて活用することにより、6G 時代が要求する処理量を捌くことができるようになるだろう。

このような様々な場所にあるリソースを、ユーザが簡単に安全に使うことができるように、分散リソースを统一的に扱えるようにするオーケストレーションの自動化や、そのリソース上に様々なプレーヤがデータやロジックを組み合わせるサービスを提供していくために、データ・ロジックの保護・秘匿等の技術開発がより重要になると考える。



図 4-20. 分散するコンピューティングリソース

5. おわりに

本ホワイトペーパーでは、5G の高度化である 5G evolution, および、2030 年代の社会や世界観を想定した 6G に向けた移動通信技術の進化の方向性を考察し、要求条件やユースケース、技術的な検討領域についてのコンセプトを述べた。表 5-1 に、4 章で述べた各技術領域において今後検討が必要な主な課題をまとめる。

今後、多種多様な産業分野にわたって 5G が活用されることが期待される中、将来の市場動向、ニーズ、社会的課題、技術進化を見据え、5G のさらなる先を見据えた研究開発が望まれる。ドコモは、さらなる無線技術の高度化や高周波数帯の開拓などによって、5G の特長である「高速・大容量」、「低遅延」、「多数接続」の各性能をさらに高めるとともに、これまで十分なエリア化が難しかった「空・海・宇宙などへの通信エリアの拡大」、持続可能な社会実現に向けた「超低消費電力・低コストの通信実現」、産業向け用途をさらに広げる「超高信頼通信」および「無線通信システムの多機能化」など、移動通信における新たな技術領域へも挑戦し、引き続き 5G evolution および 6G の無線技術やユースケースの研究開発を推進していきたい。

表 5-1. 5G evolution および 6G に向けた技術領域における主な課題

技術領域	課題
空間領域の分散ネットワーク高度化 (New Radio Network Topology)	<ul style="list-style-type: none"> ・低コストな分散アンテナの展開方法およびフロントホール/バックホール技術 ・高密度な分散アンテナ展開における干渉制御技術 ・センシングや省エネ通信と Win-Win な分散アンテナ展開
非陸上 (NTN) を含めたカバレッジ拡張技術	<ul style="list-style-type: none"> ・NTN へ対応可能な無線インタフェースの拡張 ・高効率な地上ネットワークとの周波数利用方法 ・HAPS 搭載局と地上ネットワークとの連携の実現方法 ・宇宙へのカバレッジ拡張
周波数領域のさらなる広帯域化および周波数利用の高度化技術	<ul style="list-style-type: none"> ・THz 帯電波伝搬特性の明確化、伝搬モデルの構築 ・THz 帯向けデバイス技術における課題 (小型化, 低消費電力化, 高い放熱性など) ・THz 帯などに適した信号波形や無線技術の確立 ・既存周波数帯を含む複数帯域の使い分けの最適化
mMIMO 技術および無線伝送技術のさらなる高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・多素子/多レイヤな mMIMO 技術の検討 ・分散 MIMO における伝搬路制御技術等 ・既存周波数帯向け新無線技術の開拓
低遅延・高信頼通信 (URLLC) の拡張および産業向けネットワーク	<ul style="list-style-type: none"> ・非常にシビアな要件や「Mixed Traffic」を含む幅広い要求条件のサポート ・さらなる高信頼、高セキュリティ通信の実現 ・公衆網と個別網の連携やネットワーク構成
無線通信システムの多機能化およびあらゆる領域での AI 技術の活用	<ul style="list-style-type: none"> ・無線通信とセンシング技術や無線給電技術等の同時実現 ・AI 技術の導入に適した無線規格の検討
移動通信以外の無線通信技術のインテグレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・他技術との連携もしくは統合の方法 ・ユーザにどの無線技術を使用しているかを意識させない制御
ネットワーク・アーキテクチャ	<ul style="list-style-type: none"> ・フラットなネットワーク・トポロジー ・フレキシブルなネットワーク機能配置 ・ネットワークのシンプル化 ・OAM の高度化 ・複数のアクセス技術のサポート ・超低遅延を支えるコアネットワーク伝送/交換制御 ・CPS を支える広域時刻同期と広域確定性通信 ・超カバレッジを支える位置ベース移動制御 ・セキュリティの高度化 ・分散するコンピューティングリソース

参考文献

- [1-1] H. Holma, A. Toskala, and T. Nakamura, "5G technology: 3GPP new radio," Wiley, Dec. 2019.
- [1-2] 総務省, "「Beyond 5G 推進戦略 –6G へのロードマップ–」の公表," 2020 年 6 月.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html
- [1-3] J. Sawada, M. li, and K. Kawazoe, "IOWN beyond the internet," NTT Publishing Co., Ltd, ISBN-978-4-7571-8299-8, Mar. 2020.
- [1-4] 2nd 6G Wireless Summit 2020, <http://www.6gsummit.com/>
- [2-1] 総務省, "ローカル 5G 検討作業班報告書骨子(案)," 2019 年 2 月.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000604240.pdf
- [2-2] 内閣府, "第 5 期科学技術基本計画," 2016 年 1 月.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- [2-3] 稲見昌彦, <https://star.rcast.u-tokyo.ac.jp/>
- [2-4] 国際連合, "世界人口推計,"
https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/33798/
- [2-5] PwC, "2050 年の世界,"
<https://www.pwc.com/jp/ja/japan-knowledge/archive/assets/pdf/world-in-2050.pdf>
- [2-6] 国際連合, "2030 アジェンダ,"
https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/
- [2-7] 内閣府, "高齢社会白書,"
<https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2018/html/zenbun/index.html>
- [2-8] 内閣官房まち・ひと・しごと創生本部事務局, "将来に予想される社会変化,"
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/sousei/meeting/senryaku2nd_sakutei/h31-03-11-shiryou6.pdf
- [2-9] 内閣府, "2030 年展望と改革タスクフォース報告書,"
https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/minutes/2017/0125/shiry0_04-2.pdf
- [2-10] 内閣府, "経済財政諮問会議 成長戦略実行計画案,"
https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/minutes/2019r/0621/shiry0_01.pdf
- [2-11] トマピケティ, "最悪の事態を避けるには,"
https://www.msiz.co.jp/topics/piketty_le_monde20200414/
- [2-12] 日本経済新聞, "コロナ禍が変える社会と市場の未来,"
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO58041910U0A410C2000000/>
- [2-13] 関根拓, <https://gotheweb.jp/person/slug-n0d308c526f6>
- [2-14] 安宅和人, "開疎化がもたらす未来,"
<https://kaz-ataka.hatenablog.com/entry/2020/04/19/131331>
- [2-15] 暦本純一, <https://lab.rekimoto.org/about/>
- [3-1] 岸山, 中村, "5G の発展と 6G に向けた現実と未来," MWE2018 ワークショップ FR2A-1, 2018 年 11 月.
- [4-1] H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson, and T.L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 16, no. 3, Mar. 2017.
- [4-2] O. Teyeb, A. Muhammad, G. Mildh, E. Dahlman, F. Barac, and B. Makki, "Integrated access backhauled networks," IEEE VTC2019-Fall, Sept. 2019.
- [4-3] Radio Stripes: re-thinking mobile networks
<https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/radio-stripes>
- [4-4] 伊藤, 菅, 白戸, 北, 鬼沢, "アナログ RoF を活用した多様な高周波数帯無線システムの効率的収容," NTT 技術ジャーナル, 2020 年 3 月.
- [4-5] 内田, 岩国, 北, 鬼沢, 岸山, 須山, 永田, 浅井, "6G 時代に向けた高周波数帯分散アンテナシステムの検討について," 信学技報 RCS2020-148, pp. 73-78, 2020 年 12 月.

- [4-6] NTT ドコモ報道発表, “世界初、ケーブルをつまむだけで通信エリアを構築できるアンテナを開発,” 2021年1月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2021/01/20_00.html
- [4-7] M.D. Renzo, et al., “Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come,” EURASIP Journal on Wireless Commun. and Networking 2019, no. 129, May 2019.
- [4-8] M. Iwabuchi, T. Murakami, R. Ohmiya, T. Ogawa, Y. Takatori, Y. Kishiyama, and T. Asai, “Intelligent radio-wave design: distributed intelligent reflecting surface with direction-based control for millimeter-wave communications,” 2020 international conference on emerging technologies for communications (ICETC), Dec. 2020.
- [4-9] NTT ドコモ報道発表, “5G コネクテッドカーに向けた「車両ガラス設置型アンテナ」による 5G 通信に成功,” 2018年7月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2018/07/25_01.html
- [4-10] NTT ドコモ報道発表, “世界初, 28GHz 帯に対応する 5G 端末向けのガラスアンテナで通信に成功,” 2019年5月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2019/05/29_00.html
- [4-11] NTT ドコモ報道発表, “世界初, メタマテリアル技術を適用した反射板による, 28GHz 帯の 5G エリア拡大の実証実験に成功,” 2018年12月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2018/12/03_00.html
- [4-12] NTTドコモ報道発表, “世界初, 28GHz 帯 5G 電波の透過・反射を動的制御する透明メタサーフェス技術の実証実験に成功,” 2020年1月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2020/01/17_01.html
- [4-13] NTT ドコモ報道発表, “メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功,” 2021年1月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2021/01/26_00.html
- [4-14] M. Ji, G. Caire, and A. F. Molisch, “Wireless device-to-device caching networks: basic principles and system performance,” IEEE JSAC, vol. 34, no. 1, pp. 176-189, Jan. 2016.
- [4-15] J. Liu, H. Liu, Y. Chen, Y. Wang, and C. Wang, “Wireless sensing for human activity: A survey,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 3, pp. 1629-1645, 2019.
- [4-16] W. Liu, K. Huang, X. Zhou, S. Durrani, “Next generation backscatter communication: systems, techniques and applications,” in EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Mar. 2019.
- [4-17] 鬼沢, 立田, 北, 山下, “固定無線, 衛星通信システムにおける最近の研究開発について,” 信学技報 RCS2019-32, pp.53-58, 2019年5月.
- [4-18] J. Bejarano, C. Nieto, and F. Piñar, “MF-TDMA scheduling algorithm for multi-spot beam satellite systems based on co-channel interference evaluation,” IEEE Access, vol. 7, pp. 4391-4399, Dec. 2018.
- [4-19] B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, and G.Y. Li, “Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, pp. 47-62, Dec. 2018.
- [4-20] HAPS Alliance, “Introducing the HAPS Alliance,” <https://hapsalliance.org/>
- [4-21] 3GPP, RP-193234, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN),” Dec. 2019.
- [4-22] FCC News Release, “FCC takes steps to open spectrum horizons for new services and technologies,” Mar. 2019.
- [4-23] NTT ドコモ報道発表, “5G のその先へ 世界初の超広帯域チャネルサウンダを開発し新たな周波数帯を開拓,” 2018年11月.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2018/11/27_00.html
- [4-24] T. S. Rappaport, “Wireless beyond 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond,” IEEE COMCAS Keynote, Nov. 2019.
- [4-25] 佐和橋, “無線アクセス・バックホール統合網における物理レイヤの技術課題,” 信学ソ大 BS4-1, 2018年9月.

- [4-26] 太郎丸, “Beyond 5G デジタル変調方式の展望 –FFT ベースの変復調は当面続くのか?–,” 信学ソ大 BS4-3, 2018 年 9 月.
- [4-27] S. Jacobsson, G. Durisi, M. Coldrey, T. Goldstein, and C. Studer, “Quantized precoding for massive MU-MIMO,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 11, pp. 4670-4684, Nov. 2017.
- [4-28] H. Sasaki, D. Lee, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu, “Experiment on over-100-Gbps wireless transmission with OAM-MIMO multiplexing system in 28-GHz band,” *IEEE GLOBECOM2018*, Dec. 2018.
- [4-29] M. Yuhas, Y. Feng, and J. Bajcsy, “On the capacity of faster-than-Nyquist MIMO transmission with CSI at the receiver,” *IEEE Globecom Workshops*, Dec. 2015.
- [4-30] J. A. Lucciardi, N. Thomas, M. L. Boucheret, C. Poulliat, and G. Mesnager, “Trade-off between spectral efficiency increase and PAPR reduction when using FTN signaling: Impact of non linearities,” *IEEE ICC2016*, May 2016.
- [4-31] 村上, 大宮, 中平, 石原, 林, “Virtual Massive MIMO (VM-MIMO)の提案,” 信学総大 B-1-123, 2019 年 3 月.
- [4-32] 5G-ACIA, <https://www.5g-acia.org/>
- [4-33] N. Shibata, P. Zhu, K. Nishimura, Y. Yoshida, K. Hayashi, M. Hirota, R. Harada, K. Honda, S. Kaneko, J. Terada, and K. Kitayama, “First demonstration of autonomous TSN-based beyond-best-effort networking for 5G NR fronthauls and 1,000+ massive IoT traffic,” *ECOC2020, Th3B.3*, Dec. 2020.
- [4-34] T. Murakami, M. Miyazaki, S. Ishida, and A. Fukuda, “Wireless LAN based CSI monitoring system for object detection,” *MDPI Electronics*, vol.7(11), no.290, Nov. 2018.
- [4-35] T. Murakami, S. Otsuki, T. Hayashi, Y. Takatori, and K. Kitamura, “Wildlife detection system using wireless LAN signals,” *NTT technical review*, vol. 17, no. 6, pp. 45-48, Jun. 2019.
- [4-36] N. Zhao, S. Zhang, F. R. Yu, Y. Chen, A. Nallanathan, and V. C. M. Leung, “Exploiting interference for energy harvesting: a survey, research issues, and challenges,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 10403–10421, May 2017.
- [4-37] N. Ye, X. Li, H. Yu, L. Zhao, W. Liu, and X. Hou, “DeepNOMA: a unified framework for NOMA using deep multi-task learning,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 2208-2225, April 2020.
- [4-38] N. Ye, X. Li, H. Yu, A. Wang, W. Liu, and X. Hou, “Deep learning aided grant-free NOMA toward reliable low-latency access in tactile internet of things,” *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 2995-3005, May 2019.
- [4-39] T. Wang, C. K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, “Deep learning-based CSI feedback approach for time-varying massive MIMO channels,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 416–419, 2019.
- [4-40] 北尾, “移動伝搬研究 —進化する伝搬モデル及びシミュレーション—,” 信学誌, vol. 99, no. 8, pp. 820-825, 2016 年 8 月.
- [4-41] 若尾, 河村, 守山, “複数無線アクセス最適利用のための品質予測技術,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 32, no. 4, pp. 11-13, 2020 年 4 月.
- [4-42] 新井, 五藤, 岩淵, 岩國, 丸田, “オフロード効率改善を実現する適応可動 AP システムの提案,” 信学技報 RCS2016-43, pp. 107-112, 2016 年 5 月.
- [4-43] M. Khalighi and M. Uysal, “Survey on free space optical communication: A communication theory perspective,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 4th Quart. 2014.
- [4-44] Y. Hasegawa, T. Ito, Y. Ono, and M. Arikawa, “A Throughput Model of TCP-FSO/ADFR for Free-Space Optical Satellite Communications,” *IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, 2019.
- [4-45] 藤野, 福本, 中野, 椿, 坂元, “海中機器遠隔操作に向けた Mbps 級の高速音響通信へのチャレンジ,” 信学技報 RCS2019-232, pp. 163-168, 2019 年 11 月.
- [4-46] 原田, 村山, 永田, “3GPP におけるアンライセンス周波数を用いる 5G セルラ通信技術の検討,” 信学技報 SRW2018-70, pp. 61-65, 2019 年 3 月.

- [4-47] 河原, 関, 須田, 中川, 前田, 持田, 築島, 白井, 山口, 石塚, 金子, 越地, 本田, 金井, 原, 金子, “オールフォトニクス・ネットワークを支える光フルメッシュネットワーク構成技術,” NTT 技術ジャーナル, 2020 年 3 月.
- [4-48] 三品, “暗号化したままディープラーニングの標準的な学習処理ができる秘密計算技術を世界で初めて実現” NTT 技術ジャーナル, 2019 年 12 月.
- [4-49] 阿部, 徳永, Mehdi, 西巻, 草川, “計算環境の変化に対応する暗号理論研究の最前線” NTT 技術ジャーナル, 2020 年 2 月.

更新履歴

日付	版	更新内容
2020年1月22日	1.0	初版の公開
2020年7月17日	2.0	2章と4章を中心に内容の追加および修正を実施
2021年2月2日	3.0	4章における4.1節(New Radio Network Topology)と4.8節(ネットワーク・アーキテクチャ)を中心に内容の追加及び修正を実施