

© 2020 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

2020年1月

^{NTT}**docomo**

目次

1. はじめに.....	2
2. 進化の方向性「5G evolution and 6G」	3
2.1. 5G evolution への考察.....	3
2.2. 6G への考察.....	5
3. 要求条件とユースケース.....	7
3.1. 超高速・大容量通信.....	7
3.2. 超カバレッジ拡張.....	8
3.3. 超低消費電力・低コスト化.....	8
3.4. 超低遅延.....	9
3.5. 超高信頼通信.....	9
3.6. 超多接続&センシング.....	10
4. 技術発展と検討領域.....	10
4.1. 空間領域の分散ネットワーク高度化技術（New Network Topology） ..	11
4.2. 非陸上（Non-Terrestrial Network）を含めたカバレッジ拡張技術.....	12
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.....	13
4.4. Massive MIMO 技術および無線伝送技術のさらなる高度化.....	13
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 ..	14
4.6. 移動体通信以外の無線技術のインテグレーション.....	15
4.7. 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...	15
5. おわりに.....	15
参考文献.....	16

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体通信サービスを開始して以来、移動通信の技術は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100Mbps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1Gbpsに近い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]によるサービスを2020年春に開始予定である(2020年1月現在)。

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、ドコモが現時点で考える 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現時点(2020 年 1 月)での考えを記したものである。本内容をもとに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。

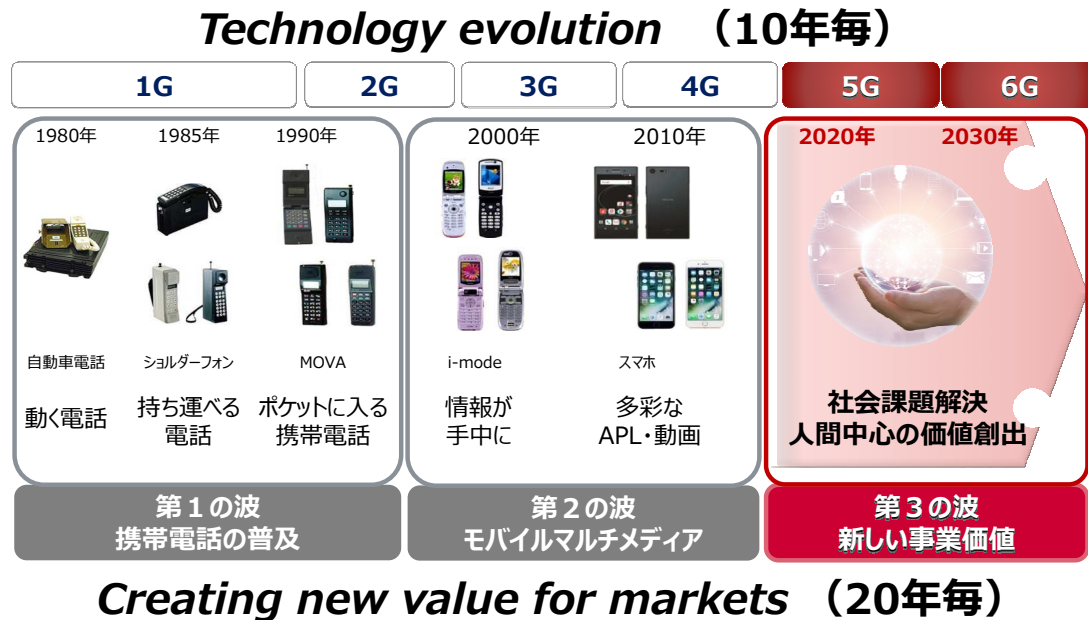


図 1-1. 移動通信における技術とサービスの進化

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 2019 年 9 月より 5G プレサービスを開始し、2020 年春には 5G 商用サービス開始を予定している。その一方で、すでに 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 100MHz 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-Site) 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無線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 (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無線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、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。

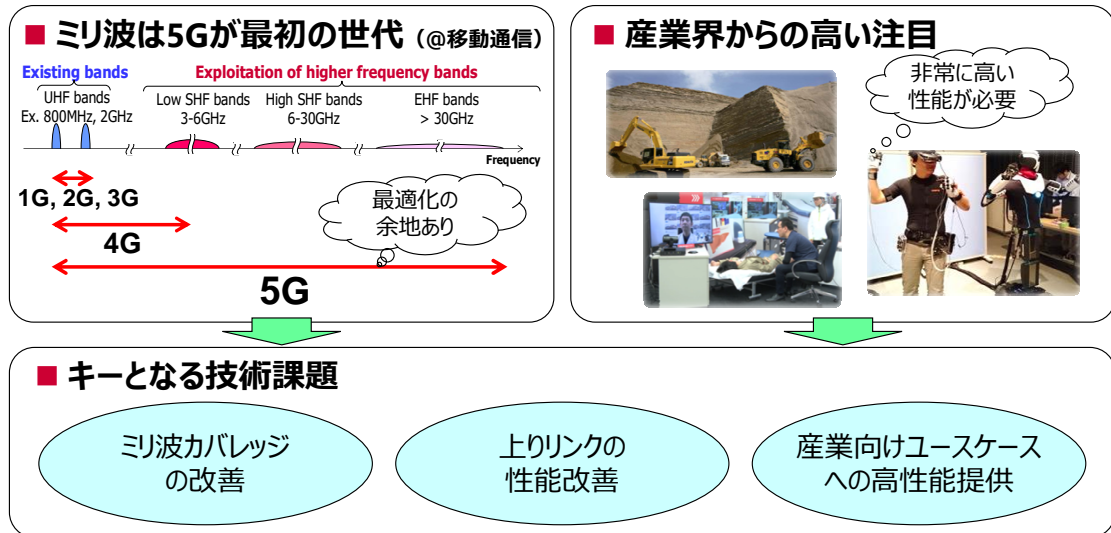


図 2-1. 5G の現状を鑑みた技術課題

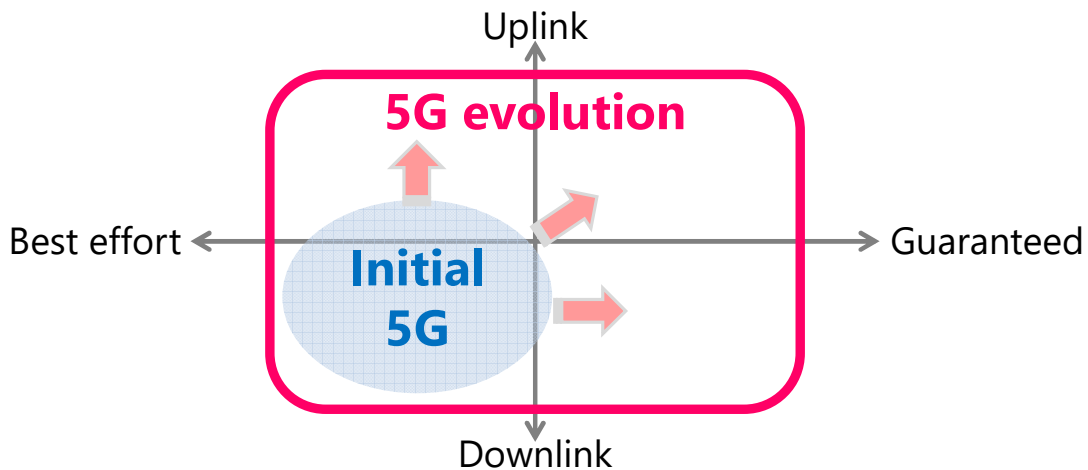


図 2-2. 5G evolution への性能改善の方向性

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。このサイバー・フィジカル融合における無線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な無線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

ける無線通信は、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ある場合にもあてはまると考えられる。

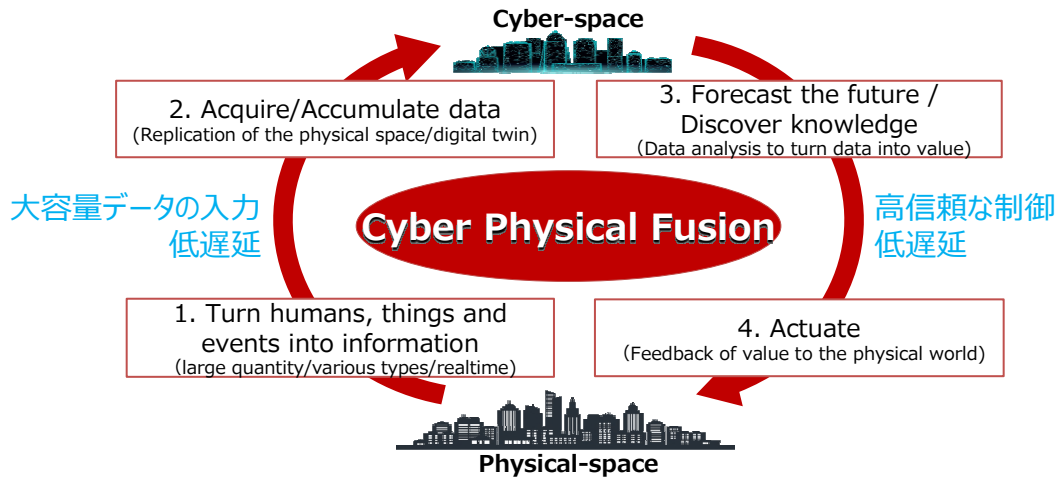


図 2-3. サイバー・フィジカル融合と無線通信

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

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が2020年代中に実現されていると考えられる。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。2030年代には、解決策のさらなる普及やより高度な対応により、完全なる課題解決と発展が求められる。国内外のどこにいても超リアルな体感であらゆる人、情報、物にアクセス可能となり、働く場所や時間の制約を完全に撤廃できる世界となることが期待される。これにより、地方と都市部の社会格差や文化的格差が劇的になくなり、人々の都市集中を回避し、地方の発展が進むとともに、人々の暮らしをストレスのないより豊かなものにすることができる。

- 人、モノの通信

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、触覚含む新たな五感通信等が普及し、人と人、人とモノとの通信が超リアルでリッチなものとなる。これにより、ゲーム、スポーツ観戦、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。

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。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

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。ゆえにユーザは通信の設定や通信サービスエリアを意識する必要がなくなる。通信環境は、人や物の活動領域の拡大に伴い、あらゆる場所で必要となる。高層ビル、ドローン、空飛ぶ車、飛行機、さらには宇宙までも当たり前の活動領域となり、地上だけでなく空や宇宙までも必須の通信エリアとなる。海上、海中までも通信エリアにするニーズが高まる。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、海のあらゆる場所が通信エリアとなる。

- 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、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。

上記の世界感を実現するための6Gに向けた未来への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。

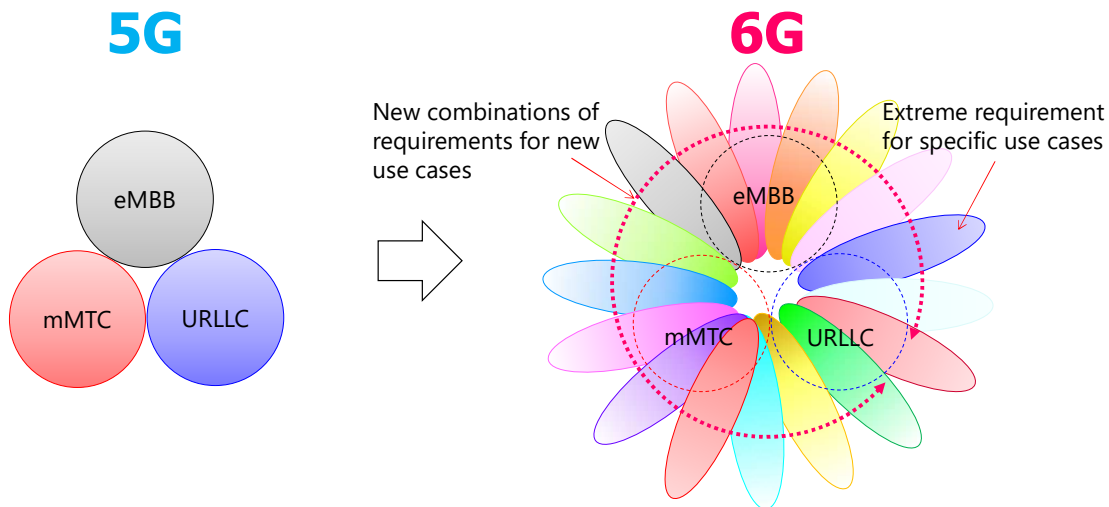


図 2-5. 6G に向けた技術発展のイメージ

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。

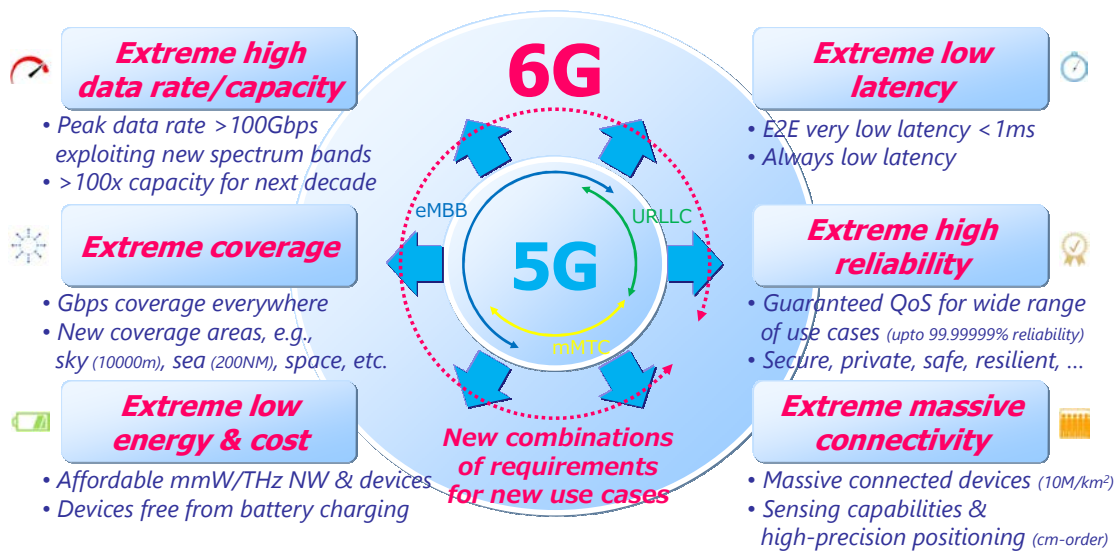


図 3-1. 6G で目指す無線技術への要求条件

3.1. 超高速・大容量通信

さらなる通信速度の向上、例えば 100Gbps を超える「超高速・大容量」の無線技術によって、現実の体感品質と同等、もしくはそれを超える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によって、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。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、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型アプリケーションも期待できる。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「頭脳」であるクラウドや AI に伝送する必要があるため、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・大容量通信のユースケース例

3.2. 超カバレッジ拡張

現在の移动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でのユースケースを想定した「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。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. 超カバレッジ拡張のユースケース例

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、ビジネスおよび環境双方の観点から 5G と同様に重要な要求条件である。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によってデバイスが充電不要になるような世界も期待できる。



図 3-4. 超低消費電力・低コスト化のユースケース例

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。6G に向けて、具体的には E2E で 1ms 以下程度が目標値として考えられる。これによって例えば、ロボティクスによる店舗無人化において、お客様の表情を見て人間のように気の利く対応するようなインタラクティブな遠隔ロボット接客が実現できるかもしれない。



図 3-5. 超低遅延のユースケース例

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や高セキュリティ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、海等への無線力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。



図 3-6. 超高信頼通信のユースケース例

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測位や物体検知など、実世界をセンシングする機能を備えていくような進化も想定される。特に測位については 5G evolution に向けて既に検討が進んでおり、環境によっては誤差数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。



図 3-7. 超多接続&センシングのユースケース例

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)に一つの代表的な技術が存在したが、4G 以降から OFDM をベースに複数の新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、さらに多くの複数の技術の組み合わせによって、前章で述べたような高い要求条件を実現していくものと考えられる。また、6GのRATの定義についても今後検討が必要である。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。

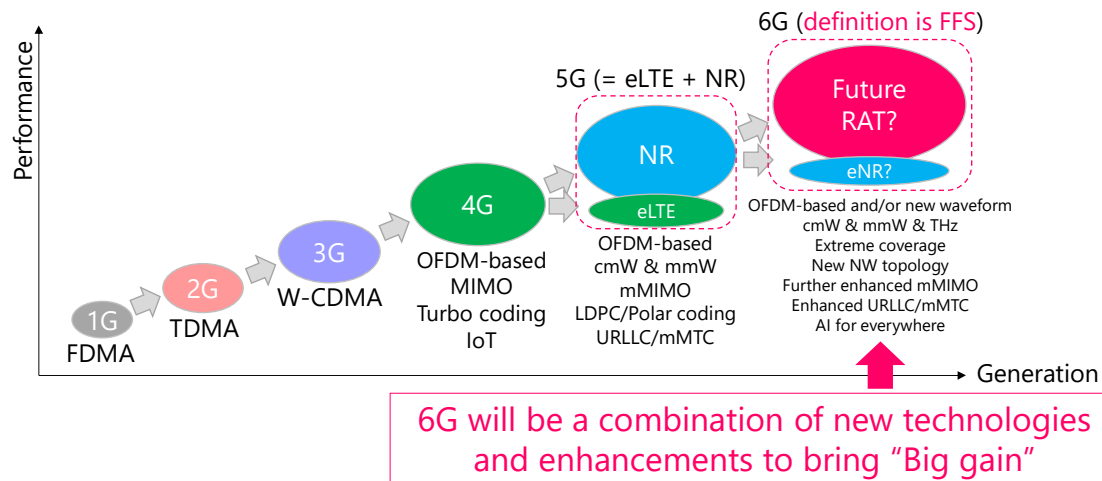


図 4-1. 移動通信における 6G までへの技術発展

4.1. 空間領域の分散ネットワーク高度化技術 (New 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。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、パス選択の余地を多くするため、図 4-2 のように、もはやセルという概念を捨てて、空間的に非直交な分散ネットワークのトポロジーを追求していく方向になると考えられる。このような分散ネットワークのトポロジーは、後述する高周波数帯の開拓や、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 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良くないネットワーク構成である。干渉についてはビーム制御やパス選択で技術的に回避できそうだと考えられるが、これをいかに低コストで実現するかという基本的な課題は残る。色々なアプローチが考えられるが、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。ガラスアンテナ[4-1, 4-2], 反射板[4-3], センサーと通信アンテナの統合, 端末間連携[4-4], 端末 like な基地局, 分散ネットワークのトポロジーを実現する新たな光配線方式・光伝送方式や, IAB (Integrated Access and Backhaul) [4-5]含むフロントホール・バックホール技術の拡張, 上りリンク専用受信ノードなど色々検討の余地がある。New Network Topology をより効率よく効果的に機能させるため, AI 等を活用したトポロジー管理及び制御技術も重要な要素となるだろう。また, これらを駆使した New Network Topology 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。

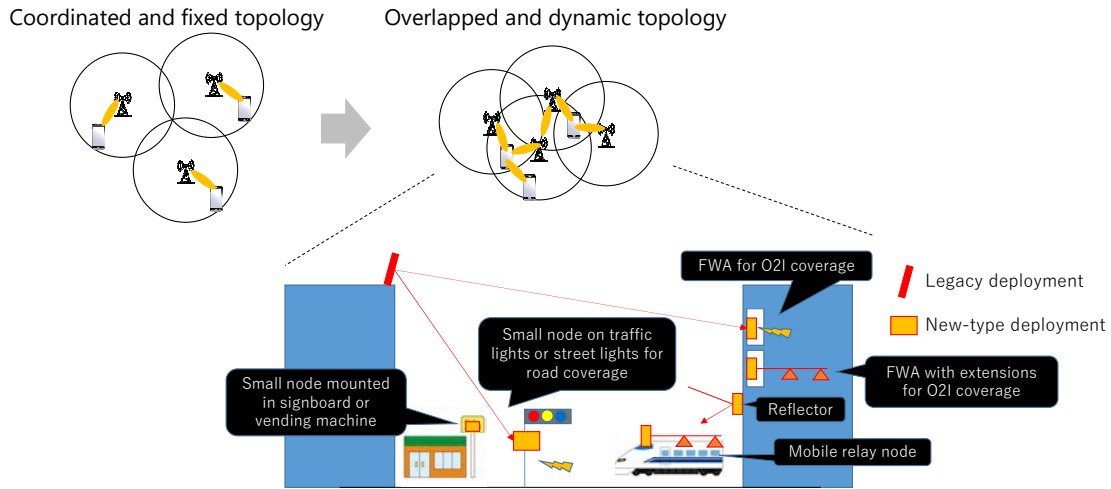


図 4-2. New Network Topology のイメージ

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 Network Topology を垂直方向を含めて三次元的にも検討する必要がある。さらに、少なくとも数 10 km 程度以上の長距離無線伝送を実現する技術が、主に無線バックホールや IAB 用途を想定して必要になると考えられる。

超カバレッジ拡張では、静止衛星(GEO)、低軌道衛星(LEO)、および高高度擬似衛星(HAPS)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[4-6]。特に、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 以上の広い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。図 4-3 に示すように、HAPS には上記の広いカバレッジの他、タイムリーかつ簡易に可搬基地局へのバックホールを提供できることや、陸上の通信ネットワーク(公衆網)との独立性を確保できるといった利点があり、災害対策のみならず、5G evolution および 6G で想定される産業向けの多くのユースケースにも有効だと考えられる。

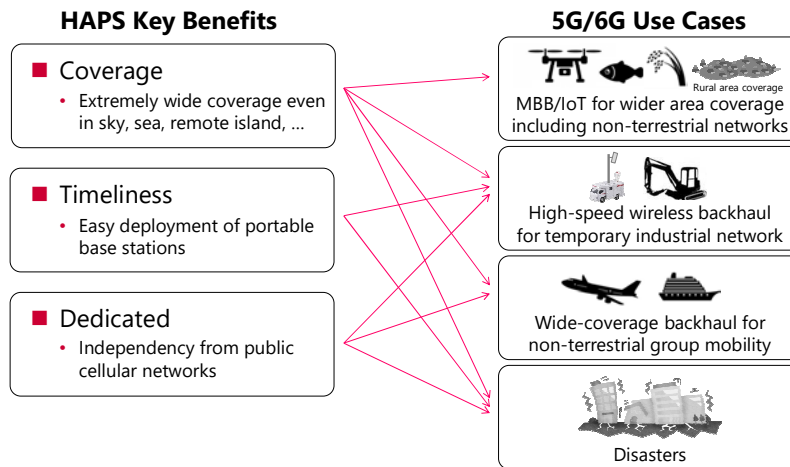


図 4-3. HAPS の利点とユースケース

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

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 100 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[4-7]。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、100Gbps 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[4-8, 4-9]。現時点では、図 4-4 に示すように、300GHz 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、遠くへも飛ばなくなる課題があるため、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。

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 4-4 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[4-10, 4-11]。

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。

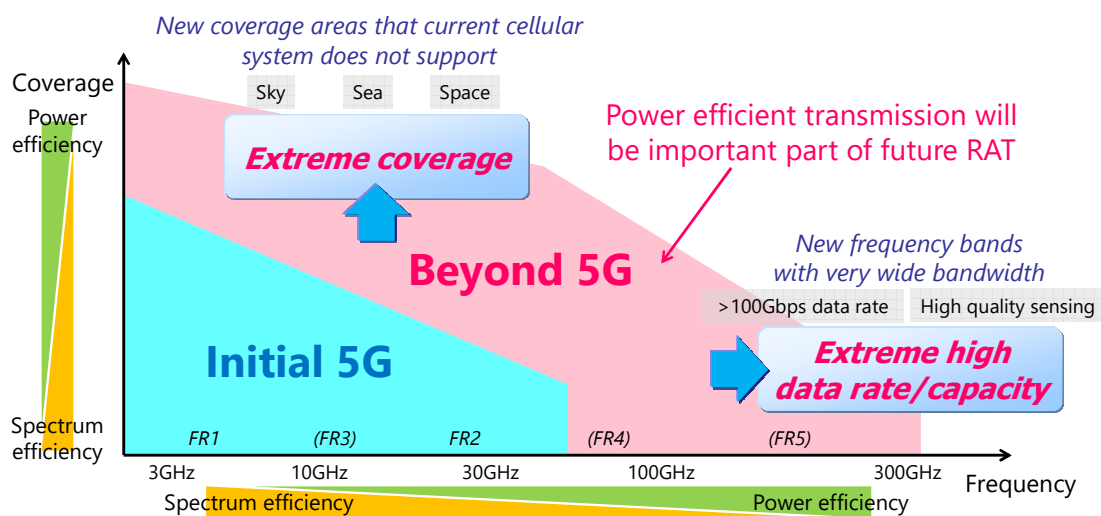


図 4-4. 高周波数帯開拓とカバレッジ拡張を目指した無線アクセス技術の拡張

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/多レイヤーな mMIMO や New 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[4-12]。

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。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[4-13]。さらに、図 4-5 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[4-14]。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。

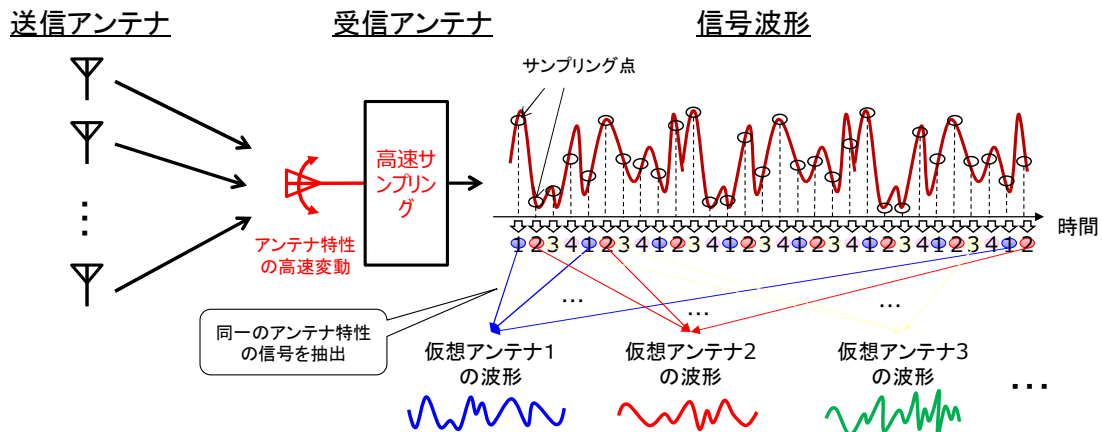


図 4-5. 周波数帯域幅よりも大きいサンプリングレートを用いる非直交伝送技術の例 (VM-MIMO)

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 (個別網) 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[4-15]。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。

図 4-6 のように公衆網と個別網間のモビリティや、ネットワーク構成などで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。

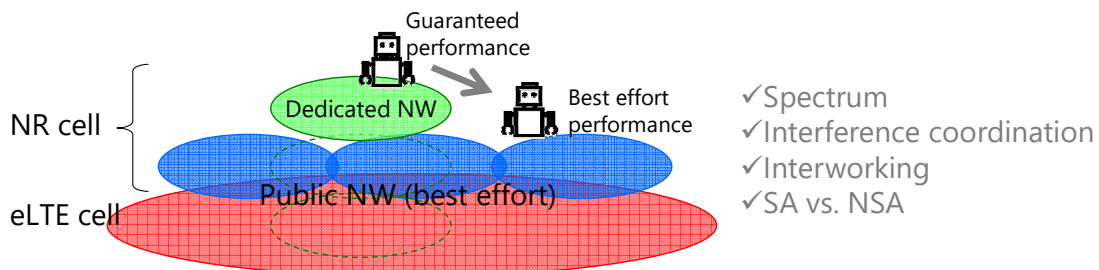


図 4-6. 公衆網と産業向け個別網のオーバーレイ

4.6. 移動体通信以外の無線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4-7に示すように、既存の各種用途に特化した移動体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などアンライセンスバンド帯無線通信との連携は引き続き重要であり、それに加えて、海中音響通信[4-16]など電波以外の波を用いる無線通信との新たな連携も考えられる。一方、移動通信技術のアンライセンスバンドへの拡張(LAA: License Assisted Access) [4-17]や、移動通信技術のアクセスリンクと無線バックホールリンク技術の統合(IAB)などが例として挙げられるが、これまで異なる規格や周波数帯を用いていた無線技術を移動体通信技術に統合していくアプローチも考えられる。これらの連携や統合によるインテグレーションによって、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の確立が期待できる。

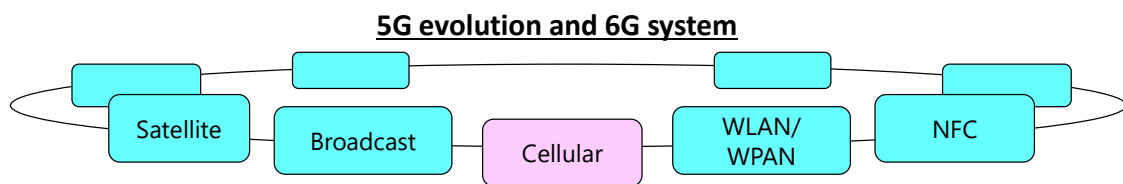


図 4-7. 無線通信技術のインテグレーション

4.7. 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、このような情報を AI で解析し、ビーム制御や伝搬路推定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も考えられている。AI を利用して、非直交多元接続(NOMA: Non-orthogonal Multiple Access)の低遅延性や信頼性を向上する技術[4-18]、移りゆく環境を先読みし、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などの検討が行われている[4-19]。

また、無線通信の電波を、情報伝送以外の様々な用途にも利用していく進化も有望であり、測位や物体検出などのセンシング[4-20, 4-21]や無線での給電技術(Energy harvesting)への活用などが考えられている[4-22]。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。特に、測位については5G evolutionでも検討が進んでおり、環境によっては誤差数センチメートルの超高精度な測位が実現できると期待されている。ここでも、AI 技術の活用はキーであり、無線通信システムのあらゆる領域、将来的には無線インタフェースの設計自体にも AI 技術が使われるようになるかもしれない。

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。

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、5Gの高速・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、高速・大容量や低遅延などの要求条件を同時に実現する「複数要求条件の同時実現」、テラヘルツ波などの「新たな高周波数帯の開拓」、これまでの移動通信方式では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」、 「超低消費電力・低コストの通信実現」などをめざし、引き続き、5G evolutionならびに6Gの技術規格の検討および研究開発を推進していきたい。

参考文献

- [1-1] H. Holma, A. Toskala, and T. Nakamura, "5G technology: 3GPP new radio," Wiley, Dec. 2019.
- [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.
- [2-2] 内閣府, "第 5 期科学技術基本計画," 2016 年 1 月.
- [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] 報道発表資料, "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.
- [4-2] 報道発表資料, "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.
- [4-3] 報道発表資料, "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.
- [4-4] 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.
- [4-5] O. Teyeb, A. Muhammad, G. Mildh, E. Dahlman, F. Barac, and B. Makki, "Integrated access backhauled networks," IEEE VTC2019-Fall, Sept. 2019.
- [4-6] 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.
- [4-7] FCC News Release, "FCC takes steps to open spectrum horizons for new services and technologies," Mar. 2019.
- [4-8] 報道発表資料, "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.
- [4-9] T. S. Rappaport, "Wireless beyond 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond," IEEE COMCAS Keynote, Nov. 2019.
- [4-10] 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.
- [4-11] 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.
- [4-12] 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.
- [4-13] 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.
- [4-14] 村上, 大宮, 中平, 石原, 林, "Virtual Massive MIMO (VM-MIMO)の提案," 信学総大, 2019 年 3 月.
- [4-15] <https://www.5g-acia.org/>
- [4-16] 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.
- [4-17] 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.
- [4-18] 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. on Industrial Informatics, vol. 15, no. 5, pp. 2995-3005, 2019.
- [4-19] 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.
- [4-20] 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.

- [4-21] 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.
- [4-22] 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.