

5GMF白書 ミリ波普及による5Gの高度化

1.0版 2023.3.31
第5世代モバイル推進フォーラム
ミリ波普及推進アドホック



注意事項

1. 本文書の著作権は、第5世代モバイル推進フォーラム(5GMF)が所有します。
2. 本文書のいかなる部分も、5GMFの事前の承諾なしで、いかなる形・方法によっても、出版、翻訳、他のウェブサイトへの転載等を行うことはできません。

目次

はじめに.....	4
1 ミリ波の必要性の明確化.....	7
1.1 将来のトラフィック増加に対する周波数リソース確保.....	7
1.2 将来の高速大容量・低遅延サービスへの対応.....	8
1.3 経済性、エネルギー効率.....	9
1.4 新たなユースケース開拓.....	9
1.5 将来の追加周波数割り当てへの足掛かり.....	10
参考文献.....	10
2 国内外の動向.....	12
2.1 全体の動向.....	12
2.1.1 周波数割当動向.....	12
2.1.2 各国におけるミリ波の商用化サービス等の開始状況（概観）.....	13
2.1.3 ミリ波対応端末の状況.....	15
2.1.4 3GPP標準化の動向.....	16
2.2 各国の動向（日本除く）.....	17
2.2.1 米国.....	17
2.2.2 欧州.....	18
2.2.3 中国.....	19
2.2.4 韓国.....	19
2.2.5 インド.....	20
2.2.6 オーストラリア.....	20
2.2.7 東南アジア.....	20
参考文献.....	21
3 ミリ波普及の課題.....	22
3.1 ミリ波導入エリア.....	22
3.2 ミリ波対応基地局装置.....	23
3.3 ミリ波対応端末.....	23
3.4 ミリ波ユースケース.....	24
3.5 全体課題.....	24
参考文献.....	24
4. ミリ波技術概要.....	25
4.1 ビームフォーミング技術.....	25
4.2 MIMO技術.....	25
4.2.1 LoS-MIMO.....	26

4.2.2	Massive-MIMO／分散MIMO	26
4.3	トポロジー改善技術	27
4.4	ミリ波デバイス技術	27
4.5	インフラシェアリング	28
4.6	ミリ波キャリアアグリゲーション (CA)	29
4.7	sub6+ミリ波デュアルコネクティビティ (DC)	29
4.8	High-Power UE (HPUE)	29
	参考文献	30
5	性能評価	32
5.1	5Gミリ波のスループットと遅延性能測定 (一対一通信・理想環境)	32
5.2	5Gミリ波の屋内環境測定	34
5.3	5Gミリ波の屋外環境測定	36
5.4	5Gミリ波の課題とその解決策	38
	参考文献	40
6	ミリ波導入シナリオ	41
7	ローカル5Gとの親和性	42
7.1	ローカル5Gとは	42
7.1.1	制度概要	42
7.1.2	割当周波数帯 (sub6・ミリ波)	42
7.2	ローカル5Gの現状	43
7.2.1	概況 (これまでの経緯～普及状況)	43
7.2.2	ミリ波における状況 (実態)	44
7.3	ミリ波とローカル5Gの親和性	46
7.3.1	エリア規模と電波特性 (ミリ波のカバーエリアと相性がよい)	46
7.3.2	通信容量と通信需要 (高速大容量で相性がよい)	47
7.3.3	システム規模がコンパクト (システム規模と超低遅延で相性がよい) ...	49
	参考文献	50
8	ミリ波ユースケース	52
8.1	eMBB	52
8.1.1	エンターテイメント	52
8.2	FWA	53
8.3	Enterprise Networks	53
8.3.1	製造業	53
8.3.2	自動車	54
8.3.3	医療	54
8.3.4	メディア	55

参考文献.....	56
9 ミリ波普及に向けた既存のソリューション	58
9.1 端末	58
9.2 基地局.....	58
9.3 アンテナ・デバイス	59
9.4 測定評価機器.....	59
9.4.1 FR2 端末の性能試験	59
9.4.2 FR2 エリアテスト	59
9.4.3 電波環境のモニタ	60
おわりに.....	61
付録（ミリ波普及に向けた既存のソリューション 参考情報リンク一覧）	62
端末ソリューション例	62
基地局ソリューション例	62
アンテナ・デバイスソリューション例.....	63
測定器ソリューション例	63

はじめに

国内では5Gの商用化に向け、新たな周波数として3.7GHz、4.5GHzのsub6と称される周波数帯とともに、28GHz帯のミリ波が1事業者当たり400MHzの広い帯域幅で割り当てられた。さらに地域の企業や自治体等の主体によるエリア限定のスポット的な利用向けのローカル5Gに対しても4.7GHz帯とともに28GHz帯が割り当てられている。3GPPにおける国際標準化においても、ミリ波に対応した標準仕様が5Gの初期仕様から盛り込まれた。しかしながら5Gの商用展開は現在のところ、3Gおよび4Gで使用しているローバンドおよびミッドバンドの5G移行と、sub6（本書では5G周波数として新たに割り当てられた3.7GHz帯、4.5GHz帯をsub6とする）を中心に進められており、ミリ波の導入はエリア的にも端末の普及の観点でも十分に進んでいない。世界の状況としても複数の国で26GHz帯、28GHz帯、39GHz帯のミリ波の割り当てが進んでいるが、商用展開は日本と同様にローバンド、ミッドバンドおよびsub6が中心であり、ミリ波の商用展開が開始されている国は極めて限定的である。

その一方で、ミリ波はその広い周波数帯域幅により、5Gの特徴の一つである超高速、大容量通信、低遅延通信等の実現により、新たなサービス分野の創造等において大きな役割が期待されている。トラフィック量も引き続き増加しており、将来的なミリ波によるトラフィック収容の期待も高い。

これらの期待を考慮し、産業利用や社会課題の解決に貢献するとともに、新たな5G/6G周波数割当に向けた前提条件としてのミリ波普及促進を図り、日本のミリ波に関する国際的なイニシアチブを発揮することを目的として2023年1月にミリ波普及推進アドホックが5Gモバイル推進フォーラム（5GMF）内に設立された。本白書は、ミリ波普及推進アドホックの主要な活動の一つとして、ミリ波の国内外の展開状況、課題、技術、ユースケース、ソリューション等を取りまとめたものである。本白書の構成と各章の概要は以下のとおりである。

1. ミリ波の必要性の明確化

社会発展と将来の持続可能な社会を築く上で通信の役割はより一層重要であり、高速大容量・低遅延の特徴を持つミリ波の活用が極めて重要である。本章ではミリ波の必要性について、将来のトラフィック増加に対する周波数リソース確保、将来の高速大容量・低遅延サービスへの対応、経済性、エネルギー効率、新たなユースケース開拓、将来の追加周波数割り当てへの足掛かり、の5つの観点から明確化を図っている。

2. 国内外の動向

5Gサービスは世界各国においてサービスが進展する一方、ミリ波に関しては、周波数の割当は進展しつつも限定的な利用にとどまっている。本章では国内および海外のミリ波の動向として、周波数割り当て、商用化サービス等の開始状況、ミリ波

対応端末状況、3GPP標準化動向の詳細を取りまとめている。

3. ミリ波普及の課題

現在、5Gのエリアは主にローバンド、ミッドバンドおよびsub6を中心に展開されており、ミリ波のトラフィック収容比率は極めて低い。本章ではこのミリ波の状況を改善する上での課題として、ミリ波導入エリア、ミリ波対応基地局装置、ミリ波対応端末、ミリ波ユースケースの4つの観点で分析している。

4. ミリ波技術概要

本章では、3章で述べたミリ波普及の課題を解決するために有効と考えられる技術や、3GPP等の標準化において仕様化または仕様化が検討されているミリ波に関連した技術について網羅的に紹介している。

5. 性能評価

ミリ波の普及を図る上で、その高速大容量性や低遅延性の定量的な把握が重要である。本章では、5Gミリ波を用いた具体的な実験・測定結果として、ミリ波が屋内および屋外で非常に高いスループットおよび遅延性能を達成でき、屋内では見通し外であっても十分活用できることが示されている。

6. ミリ波導入シナリオ

ミリ波は特に高い周波数帯であるため、その特徴を生かした使い方をすることが重要である。大きな伝搬ロスによりセル半径は比較的小さくなるため、狭域・閉域での用途が有効である。周波数帯域幅が大きいことによる高速大容量性は、トラフィックの多い場所や高速サービスの提供が求められる場所で有効である。本章ではこれらの特徴を踏まえ、複数の具体的なミリ波導入シナリオを挙げている。

7. ローカル5Gとの親和性

ローカル5Gでは比較的狭いエリアで、多数の端末が同時に密に使われることも想定されることから、超広帯域が扱えるミリ波はローカル5Gとの親和性が非常に高いといえる。本章ではローカル5Gの経緯や普及状況とともにミリ波の活用が限定的である状況とその課題を述べる一方で、ローカル5Gでのミリ波活用の有効性として、その親和性をエリア規模と電波特性、通信容量と通信需要、システム規模の観点で説明している。

8. ミリ波ユースケース

ミリ波普及にはミリ波の高速大容量、低遅延性を生かすことができるユースケースを明確にすることが重要である。本章では、「人の集まるスタジアムなどの施設での大容量高速化 (eMBB)」、「FWAによるFTTH代替」、「法人専用ネットワーク」の3つのカテゴリに分け、具体的なミリ波を活用したユースケースを述べている。

9. ミリ波ソリューション

ミリ波の普及を推進する上では、ネットワークを構成する機器、その機器を開発・

製造するにあたってデバイス、測定器が十分調達可能な状況であることが重要である。本章では、端末、基地局、アンテナ、測定器等のソリューションについて実例をもとに紹介している。

上記の通り、本白書はミリ波普及を図るうえで必要な情報を網羅的に記載している。本白書が、国内外でのミリ波の普及推進とエコシステム構築に向けた一助として活用されることを期待する。

1 ミリ波の必要性の明確化

現在までに、1Gから5Gまでの移動通信の発展が社会の発展に重要な役割を果たしてきたことは疑いの余地もない。将来の持続可能な社会を築く上でも通信の役割はより一層重要になると考えられる。これに対応するためには、高速大容量・低遅延の特徴を持つミリ波の活用が極めて重要である。さらに2030年代の6Gに向けては、ミリ波のソリューションは検討のベースとなり、サブテラヘルツ帯活用の検討に向けた前提条件となると考えられる。以下でミリ波の必要性を複数の観点で詳細に述べる。

1.1 将来のトラフィック増加に対する周波数リソース確保

過去数十年にわたり、マルチメディアサービスやスマートフォンの普及に伴い、移動通信トラフィックは継続的に増加している。さらに4Gの導入とともに、人の通信だけでなくIoT (Internet of Things) の普及に伴うモノの通信需要も増加している。また様々な業界において、5Gを活用した有線の無線化ニーズ、およびDXの進展に伴う通信による業務の効率化のニーズが高まっている。これらを背景に移動通信トラフィックは継続的に増加しており、Fig. 1-1の通り、過去一年では1.2倍、過去3年では1.8倍のトラフィック増加となっている。これらの傾向は今後も続くと考えられ、さらに新たな移動通信のニーズが今後生まれる可能性もあり、移動通信トラフィックのさらなる増加も想定される。

移動通信トラフィックの推移

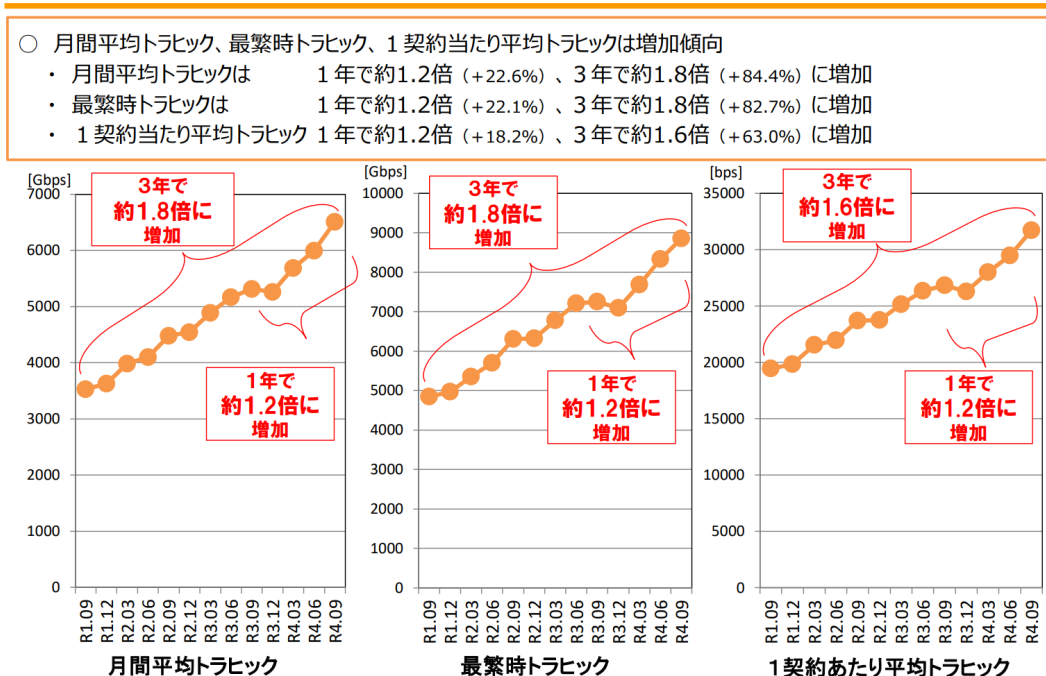


Fig. 1-1 移動通信トラフィックの推移[1]

これらの要因によるトラフィック増加に対し、現在のsub6を主とした5G展開による容量増

大や、移動通信システムの技術的な高度化による通信容量の拡大も期待される場所であるが、これらだけで将来のトラフィック増加に対応することは困難であると考えられる。GSMAのレポート[2]によるとFig. 1-2に示す通り、2030年までにeMBB、FWA、enterprise networksの3種のユースケースでそれぞれ4.5GHz、350MHz、150MHz、合計5GHzのミリ波周波数リソースが必要と報告されている。これらの理由により、ミリ波の周波数リソースの活用が必須である。

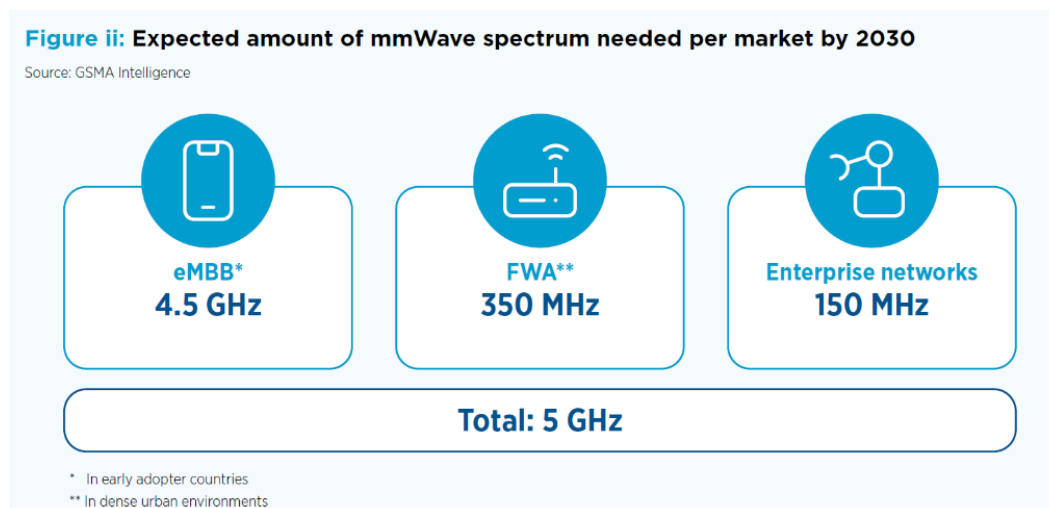


Fig. 1-2 2030年までのミリ波周波数需要予測[2]

1.2 将来の高速大容量・低遅延サービスへの対応

5Gの高速大容量性、低遅延の特徴を生かした多くのサービスやアプリケーションが開発され、また今後の発展も期待されている。エンタープライズ向けでは遠隔監視・遠隔操作や、映像のAI処理によるセキュリティ、見守り、故障・障害の予知等のニーズが多く、より高度なサービスが開発されるであろう。これらに対応するために、今後4Kさらには8K映像品質が必要とされ、それを伝送できる通信基盤が必要になると考えられる。

コンシューマーおよびエンタープライズ向けの双方で、XRデバイスを活用したサービスやアプリケーションが既に多く提供されているが、今後XRデバイスの軽量化、映像表現の高精細化、高機能化とともに5G通信機能搭載により、さらに新たな魅力的なサービスやアプリケーションが創出されると考えられる。

ロボティクスについては、工場などでの特殊用途だけでなく、人々が暮らす環境でのロボット導入も今後加速的に普及すると考えられ、ロボットによる監視、見守り、介護などのサービスが普及するであろう。

これらは一例であり、将来的にはデバイスの発展とともに様々な先進的なサービスやアプリケーションが開発されると考えられる。これに伴い、通信の高速大容量性や低遅延性のニーズが高まると考えられる。逆に高速大容量、低遅延なサービスが適材適所に提供されることで、これら先進的なサービス・アプリケーションの開発と普及が促進されると考えられ

る。

1.3 経済性、エネルギー効率

通信トラフィックの急激な増大が見込まれている中、スタジアム、屋内ショッピングモール、鉄道駅、屋外の人の密度が高い場所など特定の場所・エリアにおいては、集中的なトラフィックが発生することが想定される。調査[3]ではFig. 1-3に示す通り、ある特定の場所では2021年から2026年にかけてトラフィックが+116%になる事例が示されている。これに対し、ミリ波のデータ通信量あたりの実装コストが年々低下するなか、2026年にはミリ波の実装コストはミッドバンドに対して75%低下し、また、ホットゾーンあたりのスモールセルの必要数は2025年にはミッドバンドに対して74%低下することに加え、電力消費量を70%程度低減させる効果が見込まれている。戦略的な場所へミリ波基地局を設置することで、高い経済効率性で、増大するトラフィックへ対応することができることから、通信事業者の5G通信網のTCO(Total Cost of Ownership)を低減させることが期待されている。

In the first analysis, we demonstrated that telecom operators could serve 5G subscribers with better profitability and technically superior solution by investing in 5G mmWave.

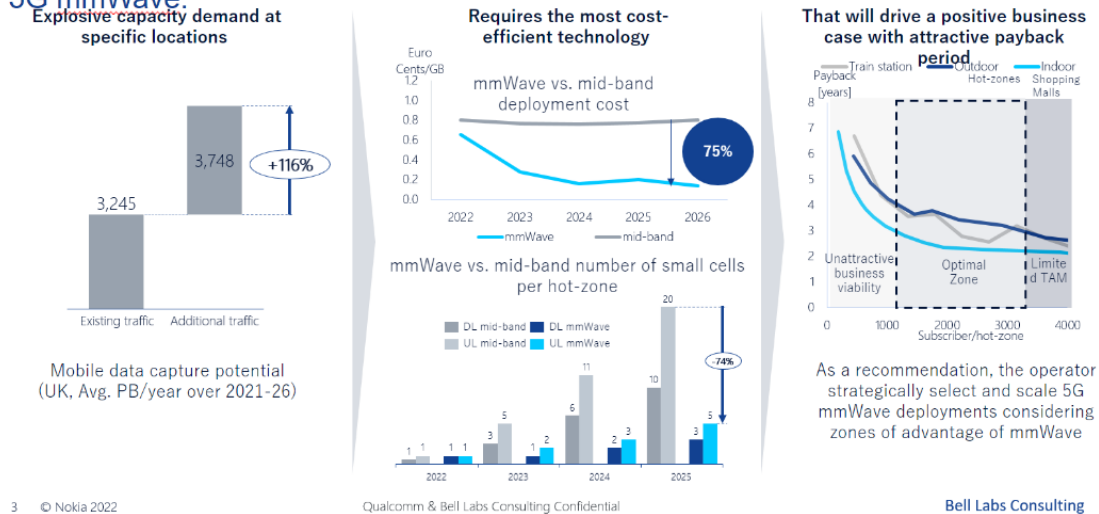


Fig. 1-3 ミリ波の実装コストと電力消費見込みの調査結果[3]

1.4 新たなユースケース開拓

ミリ波の特徴である直進性の高さと広帯域性、そしてビームフォーミングによる運用は、新たなユースケースを開拓する可能性を秘めている。例えば、5G基地局または5G移動局において測位用の参照信号を送受信しその伝搬遅延差や到来角などに基づいて移動局の位置を測位するポジショニング[4-7]では、ミリ波を用いることでセンチメートルレベルの測位精度を達成できることが報告されている[8]。今後さらに、反射された電波を測定することで5G移動局に限らない任意の物体の位置や形状・状態を推測するセンシング機能や、5Gで

一タ通信とセンシングを融合するJoint Communication & Sensing[9]の標準化も想定される。Joint Communication & Sensingでは、例えば5Gネットワークによる交通トラフィックのモニタリング[10]など、これまでにない新たなサービスの創出が期待される場所である。

1.5 将来の追加周波数割り当てへの足掛かり

前述の通り、様々な理由でミリ波の活用が期待されるが、それぞれの理由は短期的なものではなく継続的である。よって、現在割り当てられている28GHz帯を含む周波数だけで将来にわたり十分ということではなく、2020年代中においても追加の周波数リソースの割り当てと活用が必要となると考えられる。今後のさらなる高速大容量、低遅延性の期待を考慮すると、ある程度広い帯域幅を有する周波数リソースが必要であり、準ミリ波以上の追加周波数帯の活用が期待される。これらの追加周波数をタイムリーに活用し、今後の社会発展を推進するためには、現段階から28GHz帯をしっかりと活用できるソリューション開発と運用スキルが必須である。

2030年代の6Gに関する検討が既に精力的に進められている[11-13]が、5Gの10～100倍に及ぶ超高速大容量、超低遅延が要求され、周波数は数百GHzにおよぶサブテラヘルツまで検討されている。ただ、サブテラヘルツの利用を検討するには、ミリ波の活用は大前提であり、逆にミリ波を5Gでしっかりと活用できる技術とスキルを現段階で実用化しない限り、6Gに向けたサブテラヘルツの検討は無意味なものとなる。逆に、ミリ波のソリューションを現段階でしっかりと確立し運用することで、サブテラ波のソリューションを効率的に開発することが可能である。

以上の通り、持続的な社会発展のため、2020年代における5G周波数の追加割り当てと活用や、6Gに向けたサブテラヘルツの検討が重要であり、現状割り当てられている28GHzの普及は重要な足掛かりであり前提条件である。そのためのソリューション開発、ユースケース開発や運用スキルの確立が急務である。

参考文献

- [1] 総務省 情報通信統計データベース
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010602.pdf>
- [2] GSMA Vision 2030: mmWave Spectrum Needs, Full Report
<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2022/06/5G-mmWave-Spectrum.pdf>
- [3] Bell Labs Consulting, The business of 5G mmWave, 2022.
- [4] 3GPP TR 38.855, v16.0.0, Study on NR positioning support
- [5] 3GPP RP-190752, New WID: NR Positioning Support, Ericsson
- [6] 3GPP TR 38.857, v17.0.0, Study on NR positioning enhancements

- [7] 3GPP RP-210903, Revised WID on NR Positioning Enhancements, Intel Corporation, CATT
- [8] ‘Experimental Investigation of 5G Positioning Performance Using a mmWave Measurement Setup,’ 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), George Yammine, et. al.
- [9] ‘Multibeam Design for Joint Communication and Sensing in 5G New Radio Networks,’ 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Carlos Baquero Barneto, et. al.
- [10] <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/10/joint-sensing-and-communication-6g>
- [11] 総務省, Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－,
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf
- [12] 総務省, “Beyond 5G 推進戦略（概要）”, 2020 年 6 月.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000702111.pdf
- [13] Beyond 5G 推進コンソーシアム白書 <https://b5g.jp/output/>

2 国内外の動向

5Gサービスは、大きな経済的効果をもたらす新たな社会基盤として大きな期待が寄せられ、世界各国においてサービスが進展する一方、ミリ波に関しては、周波数の割当は進展しつつも、sub6と共に利用されることで5Gのポテンシャルをフルに生かすために必要であるにも関わらず、米国を除き、各国において限定的な利用にとどまっている。

このような状況の中、日本は、米国に次いで商用化が進んでいる状況であり、今後、世界におけるイニシアティブを持つべく、政府、産業界において議論が進められている。

本章では、これらミリ波に関する国内外の状況について、その概要を紹介する。

2.1 全体の動向

2.1.1 周波数割当動向

世界各国において、5Gサービス用途として、26/28GHz帯で主に400MHzから1000MHz幅が割り当てられている。ミリ波は、2022年12月には31か国で周波数が利用可能となっており、2022年には18か国で事業者に対して周波数が割り当てられ、商用化を行っている事業者数は28（プライベートネットワーク事業者を含む）となっている（Fig. 2-1）。また、日本を含む10か国において、ミリ波が公衆網用だけでなく、プライベートネットワーク用にも割り当てられている（Fig. 2-2）。この他、各国において周波数オークションの実施が計画されているなど、ミリ波の利用が可能となる国・地域が順次増加していくことが見込まれている。

各国でミリ波の利用が進むにつれ、WTP (Willingness To Pay)やARPU (Average Revenue Per User)が向上する傾向が生じる一方で、ミリ波周波数の割当を受けた事業者のうち商用化へ進んでいるのは20%にとどまっていること、ミリ波に対応する端末のシェアが10%であること、各国のフラッグシップ端末がミリ波に対応していないことなど、ミリ波が5Gサービスの進展の中で未だ主流になれていないことが報告されている[3]。

日本では、2019年4月に5G用周波数として、sub6 (3.6GHz～4.1GHz, 4.5GHz～4.6GHz) 及びミリ波 (27.0GHz～28.2GHz, 29.1GHz～29.5GHz) が携帯電話4事業者に対して割り当てられた。また、2019年12月にローカル5Gが、一部周波数 (28.2GHz～28.3GHzの100MHz幅) で制度化され、2019年度末より免許申請の受付が開始された。2020年12月には、ローカル5G用周波数が拡張 (4.6GHz～4.9GHz、28.3GHz～29.1GHz) された。

ローカル5Gに関しては、ミリ波がsub6に比較して早い時期に割り当てられたものの、当初はLTEキャリアをアンカーとするNSAでの運用が前提であったこと、そして携帯電話事業者においてもミリ波の利用が普及する前段階であったこともあり、利活用が進まなかったという側面がある。

現在、日本政府においては、4.9GHz帯 (4.9GHz～5.0GHz) / 26 GHz帯 (26.6GHz～27.0GHz) / 40 GHz帯 (39.5GHz～43.5GHz)の追加割当を行うことを念頭においた、新たな割当方式等に関する議論[4]がなされている。



Fig. 2-1 5Gミリ波周波数割当と商用化の状況（2022年11月時点） [1]

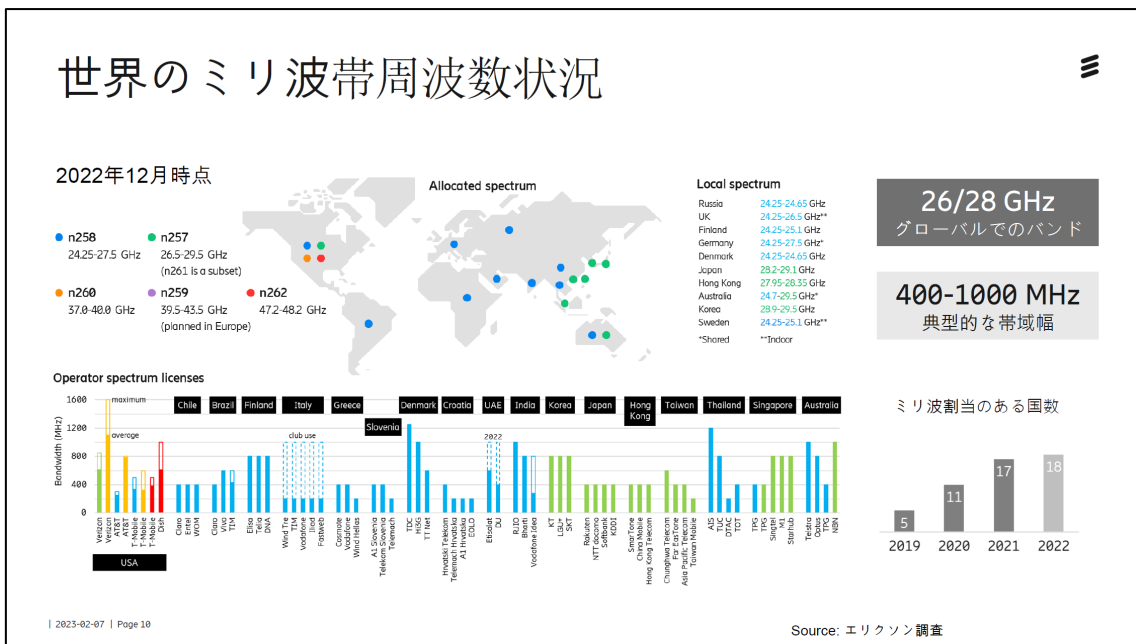


Fig. 2-2 世界のミリ波帯周波数状況（2022年12月時点） [2]

2.1.2 各国におけるミリ波の商用化サービス等の開始状況（概観）

(1) 全体

ミリ波を用いた商用サービスが本格化しているのは、2022年11月時点で米国と日本に限られるなど、限定的な状況となっている。商用化の初期段階にあるのが、ドイツ、イタリア、

フィンランド、スペインの欧州各国、オーストラリア、台湾、香港、シンガポールなどのアジア各国などである。

ミリ波は、1章で述べたようにその経済性などを活かして効率的にネットワークを構築することができることに加え、通信事業者が多様なサービスを提供し、売上を向上させることや、ネットワーク投資を効率的に回収することを可能とすることが期待されている[5]。

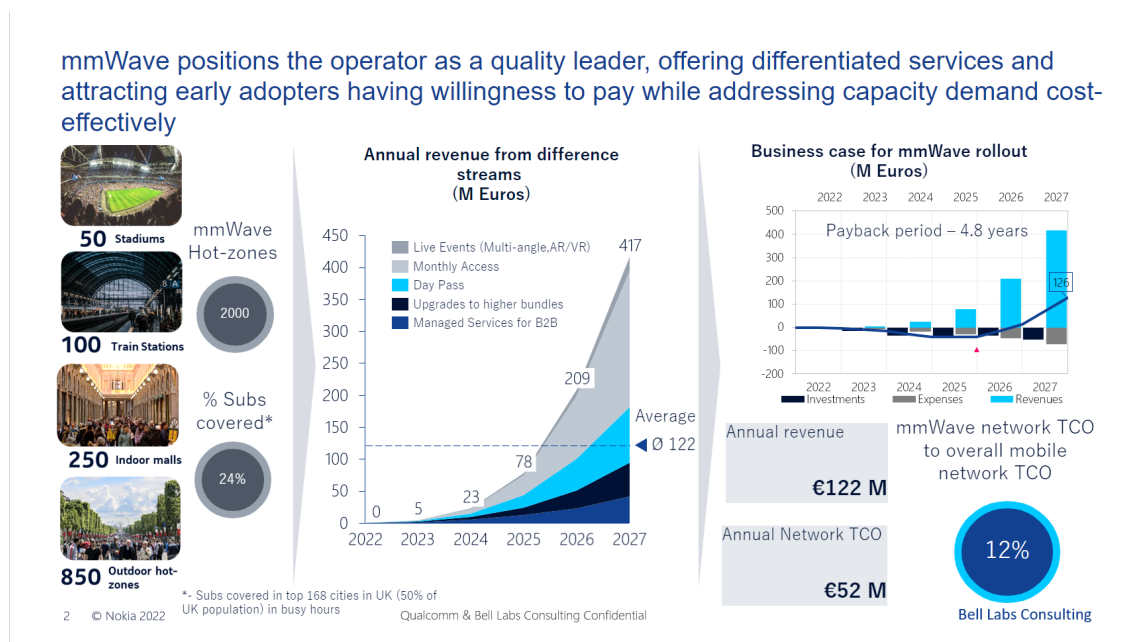


Fig. 2-3 ミリ波による経済効果の例 [5]

(2) 国内

日本においては、2019年に4通信事業者にミリ波が割り当てられており、商用サービスが開始されている。

総務省によれば、5Gの国内人口カバー率は、2022年3月末現在で93.2%に達している[6]ものの、その多くは700MHz、1.7GHzや3.4GHz/3.5GHzといった4G用周波数からのリファーマーミングによる5G基地局数である。これらは、総計44,297局（人口カバー率は最大90.7%）となっており、5Gの人口カバー率の多くを占めている。一方、5G用に新たに割り当てられた周波数のうち、sub6（3.7GHz、4.0GHz/4.5GHz）の基地局数は総計30,531局（人口カバー率は最大31.8%）、28GHzの基地局数は総計13,218局（人口カバー率は0.0%）となっている。人口カバー率への寄与は、3.7GHz、4.0/4.5GHzにおいては0.0%～31.8%であり、ミリ波帯は各社ともに0.0%となっている。帯域別の5Gトラフィック量に関しては、sub6は62.6%となっている一方で、ミリ波は0.2%にとどまっている[7]。国内における端末販売市場において、ミリ波対応端末が5.2%程度（後述）となっている。

現在、総務省において、ミリ波等の高い周波数帯を活用した5Gビジネスの将来像や5Gビ

ビジネスを拡大していくための方策等に関する議論が行われている。

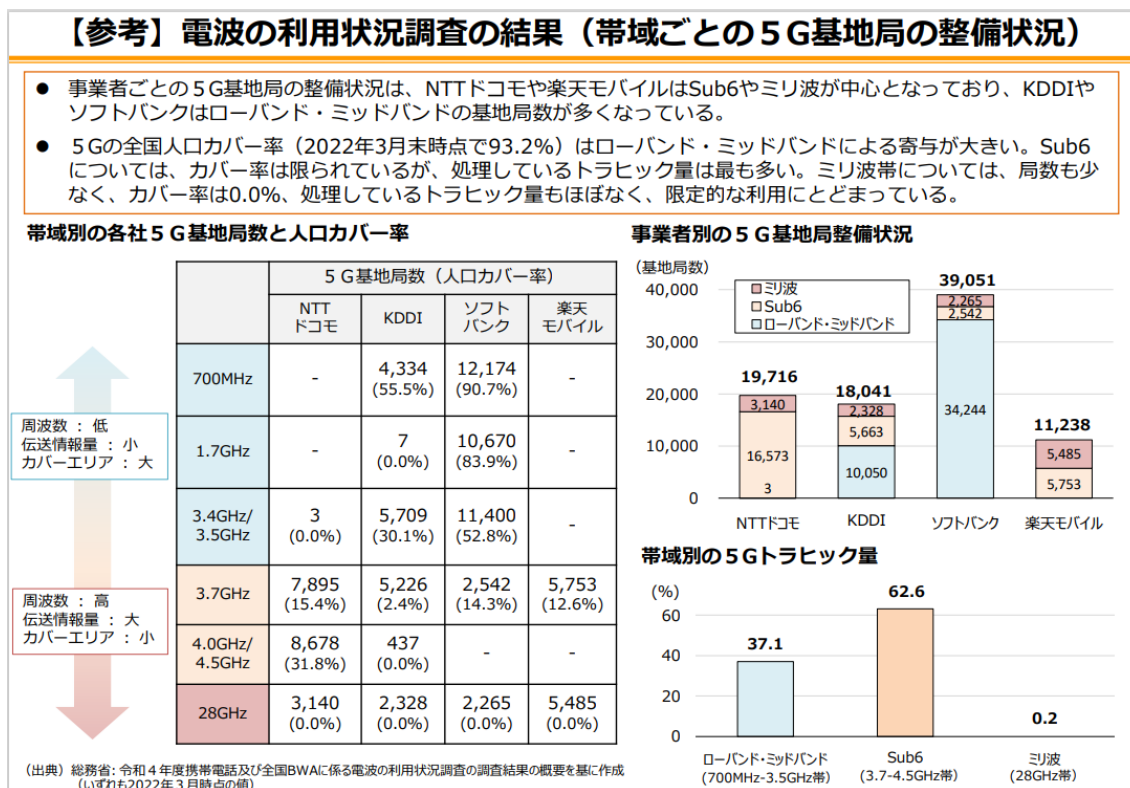


Fig. 2-4 電波の利用状況調査の結果（帯域ごとの5G基地局の整備状況） [7]

2.1.3 ミリ波対応端末の状況

(1) グローバル

ミリ波対応端末は、2022年12月時点で、世界65以上のベンダーから170機種以上の多様な製品が発表・発売されている。スマートフォンの他、PC、WiFiルーターやIoT機器、通信モジュール、CPE（構内無線設備）等の多様な製品が展開されている[1]。現時点では、発売されている国や機種は一部にとどまっているものの、徐々に広がりを見せつつある。また、後述のとおり、米国では新規に出荷される端末のうち、ミリ波対応端末が57.3%を占めるなど、着実に普及しつつある。



Fig. 2-5 ミリ波対応端末の展開状況 [1]

(2) 国内

ミリ波を実装した端末は2022年には日本国内でハイエンド機種を中心に17機種が発売されるなど着実に増加しつつある。一方で、その販売台数は2022年には170万台強、端末販売市場全体の約5.2%程度にとどまっている[1]。米国に比較して、端末販売市場におけるシェアが1/10程度となっていることは、国内で高いシェアを有する端末が、米国とは異なりミリ波に対応していないことや、ハイエンド端末が主な対応機種となっていることの影響が生じているものと思われる。今後は、高いシェアを持つ端末や、ハイエンド端末以外の幅広い価格帯の端末のミリ波への対応が課題となる。

2.1.4 3GPP標準化の動向

3GPPではRel-15以降FR2帯域(24250 MHz - 52600 MHz)として、バンドn257, n258, n259, n260, n261, n262が標準化されてきた。Rel-17においてFR2-2帯域(52600 MHz - 71000 MHz)まで拡張されバンドn263も標準化された。

NR バンド	周波数	デュプレックス	主要地域
n257	26500 MHz - 29500 MHz	TDD	日本、韓国
n258	24250 MHz - 27500 MHz	TDD	欧州、インド、豪州等
n259	39500 MHz - 43500 MHz	TDD	
n260	37000 MHz - 40000 MHz	TDD	米国
n261	27500 MHz - 28350 MHz	TDD	米国

n262	47200 MHz – 48200 MHz	TDD	米国
n263	57000 MHz – 71000 MHz	TDD	

Table. 2-1 3GPP Release 17におけるミリ波バンド

また、ミリ波向けのアプリケーションとして、スマートフォンのような携帯端末以外にも、これまでにFWA型、車載型、高速鉄道向け端末の仕様が標準化されている。キャリアアグリゲーションによる最大連続帯域幅の拡大（1.2GHzから2.4GHzへ）やミリ波バンド間のキャリアアグリゲーションの仕様追加もRel-17までに行われており、4章で紹介するmassive-MIMOのさらなる高度化・機能拡張等、ミリ波通信の性能向上のために3GPP標準の改訂が継続して行われている。

2.2 各国の動向（日本除く）

2.2.1 米国

米国では、AT&T、T-Mobile、Verizon等の各事業者へ周波数がライセンスされており、FWAでの利用や都市部や高トラフィックエリアでのホットスポット利用が進展している。また、ライセンスに際しては、ライセンスを保持するエリアにおいて少なくとも40%の人口カバー率を達成することなどが求められている[1]。

これに対し、Verizonでは全米1500都市以上で、4万局以上のミリ波基地局を、スタジアムや駅などの拠点や、都市部に集中的に設置するなど、積極的な利用が進んでいる。また2025年までに5000万家屋へFWAサービス（ミリ波及びCバンド）を提供することを目指している[1]。

対応端末については、Table. 2-2が示すように、順調に普及が進んでいる。これは、米国で高いシェアを有する端末が2020年以降、一部機種でミリ波に対応していることが要因の一つと考えられる。

年	2019	2020	2021	2022
ミリ波対応 端末のシェア	0.3%	4.3%	43.1%	57.3%

Table. 2-2 米国におけるミリ波対応端末の普及状況（IDCを基に算出）

インフラの充実と、対応端末の普及にあわせ、スタジアム、駅などの交通ハブ、屋内ショッピングモール、屋外の人が多く集まる場所などにおいて、ミリ波の利用が進展することと同時に、放送の中継やスポーツ観戦時などにおける新たなユースケースが生じてきている。アメリカンフットボール、F1、アイスホッケーなどの大規模なスポーツイベントにおけるミリ波を用いた多様な観戦方法も浸透し始めており、好評を博していることが報告されている[3]。このように、ミリ波が積極的に使われている先進的なネットワークを用いた

B2B2Cのビジネスが徐々に広がりつつある。[3]

2.2.2 欧州

Deutsche Telekom (独)、Elisa (フィンランド)、FastWeb (伊) 及びTIM (伊) が商用化の初期段階にある。FWA、スマートフォン、産業向け用途が中心となっている。また、複数のモデルシティを構築するプロジェクトが検討・進行中である[1]。

英国では、26GHz (24.25GHz-27.5GHz) 及び40GHz (40.5GHz-43.5GHz) のミリ波を5Gなどのモバイル技術に割当てることとし、オークション (2024年第2四半期) の設計やローカルライセンスの付与条件等について、2023年3月にパブコメを開始した。周波数割当に際しては、ミリ波の展開が最も多いと予想される主要な町や都市 (高密度エリア) で、共有アクセスライセンスフレームワーク (Shared Access licensing framework) を用いて、先着順でローカルライセンスを付与し、市/町全体での割当をオークションで行うこととしている。また、低密度地域では、展開がまばらになることが予想されることから、共有アクセスライセンスフレームワークを使用して、ミリ波のローカルライセンスを先着順で付与する[8]。

フランスでは、2023年、政府はFrance 2030政策の一環として、新たな提案募集 (2025年までに7500億ユーロ以上の規模の投資を想定) を開始し、支援を行う計画としている[1]。

- 5G の発展と 6G および次世代のネットワークの開発を促進するためのR&D
- 高レベルのセキュリティと信頼性を保証する通信ネットワーク向けソリューションの開発
- 通信ネットワークの環境負荷の改善

またフランスでは他にも、European 5G-TOURS research projectの一環として、26GHz帯を用いたRennes大学病院におけるヘルスケア分野における取組などが進んでいる[1]。

スペインでは、2023年2月末にバルセロナで開催されたMWCの会場では、Telefonica社の初のミリ波商用局 (Ericson社製) が設置され、訪問者やミリ波関連展示で活用された。Qualcomm社のブースでは、ミリ波対応端末の展示やスピードテストのデモが行われた。このデモでは、通信環境により結果が大きく左右されるものではあるが、PC等の遮へい物があった場合においても、速度等が大きく低下することがないことなどが示された。

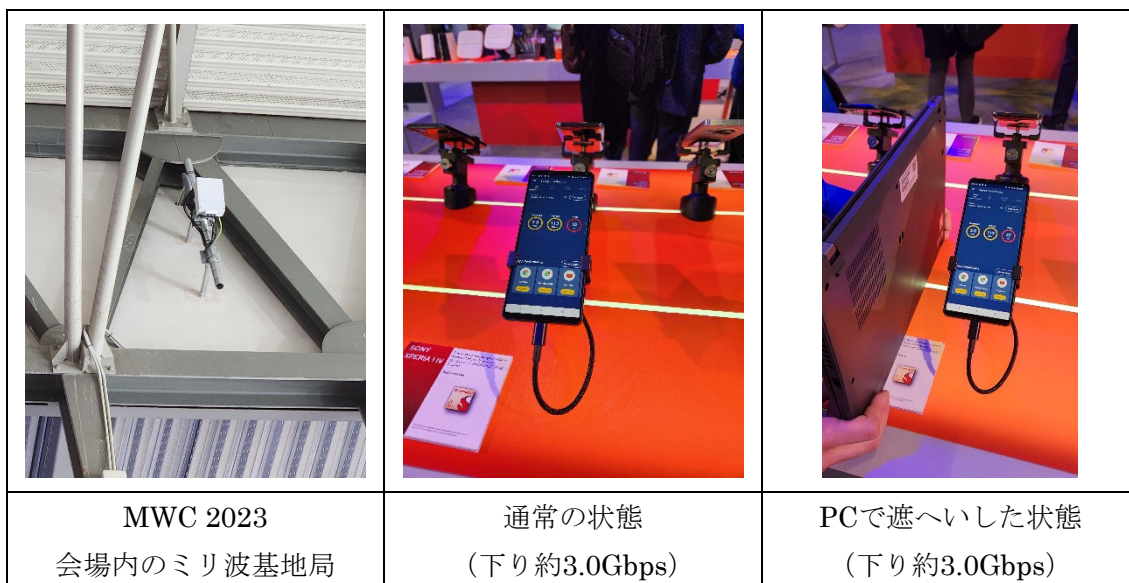


Fig. 2-6 MWC2023でのミリ波関連技術展示

2.2.3 中国

中国では、sub6を用いた5GのNW展開が急速に進み、2022年12月には231.2万局が構築されている。その一方で、ミリ波の通信事業者向けライセンスは、2023年2月時点で付与されていない。プライベートネットワーク向けライセンスとしては、2022年10月には、国内初の商用ライセンス（5925MHz-6125MHz、24.75GHz-25.15 GHzの周波数）がCOMAC（中国の航空機製造メーカー）へ付与された[9]。

ミリ波は、5Gサービスのカバレッジを補い、ネットワークの容量を増加させるものとして期待が寄せられ、これまでに研究開発や試験などの取組が進められてきた。

2019年には主要技術の試験による仕様の統一化を図り、2020年には設備試験による試験環境やパフォーマンス試験システムを完成させ、2021年にはSAサービスの試験、2022年にはミリ波の試験を行うなど、着実に取組を進めている[10]。

2.2.4 韓国

韓国では、Kore Telecom、SK Telecom、LG Uplusへ2018年6月、周波数オークションの結果、28GHz帯で各社へ800MHzの周波数が割り当てられた。3年以内に15,000局の基地局設置の義務が課されていた。

政府からは、28Ghz帯への投資が継続的に奨励されていたものの、各事業者は3.5GHzへの投資を優先した結果、当初の周波数割当期限である2023年11月を待たずに、2022年12月23日、28GHz帯の割当停止等の措置（SKTは免許期間が6か月短縮、LG U+とKTは割当停止。なお、SKTは2023年5月31日までに15,000局が開設されなければ割当停止）が取られた。ただし、現在使用中の地下鉄サービスについては、当初の割当期限まで使用可能とされている[11]。

2023年1月31日、韓国政府より、市場参入の敷居の低下、初期ネットワーク構築支援、サービス運営支援などからなる新規事業者参入支援法案が示された。2023年第2四半期には周波数割当の公告、第4四半期には新規事業者の選定が行われる見通しとなっている[11]。

その一方で、政府NWを5Gで構築することや、3億ドルのGiga-Korea高速プロジェクトによる高速ネットワークの開発支援が行われている[1]。

2.2.5 インド

インドでは2022年7月に周波数オークションが行われ、RJIO に1GHz幅(SA)がインド全域で、Airtelに800MHz幅(NSA)がインド全域で、BSNLへ400MHz幅(SA/NSA(TBD))がインド全域で、Vodafoneへ200-800MHz幅(NSA)が主要マーケットで、Adani Data Network(5Gプライベートネットワーク事業者)へ400 MHzが運用を行っている主要マーケットでn258のミリ波が割り当てられた。

今後、2023年前半にはフィールドデモによりFWAやモビリティのユースケースのフィールド実証などを行い、1年以内での商用サービスの開始、以後3年、5年時点でのカバレッジに関する展開義務が政府より課されている[1]。

2.2.6 オーストラリア

オーストラリア通信メディア局 (ACMA) の26 GHz 帯域のオークションで、5 社が周波数を獲得した。Telstra Corporation Limited はほとんどの地域で1GHz幅を、Optus Mobile Pty Ltd はほとんどの地域で 800 MHz幅を、Mobile JV Pty Limited (Vodafone Hutchison Australia と TPG Telecom の JV)は、ほとんどの地域で 600 MHzを、Dense Air Australia Pty Ltd (5G テストベッドの中立ホスト事業者)は、限定的なエリアで200MHzを、Pentanet Limited (パース市のローカル ISP) は2地域で400 MHzをそれぞれ落札した。

オークションで落札されたライセンスは、今年後半に発効し、2036年までの15年間の有効期間となる[1]。

オーストラリアでは、2860万ドルの5G Innovation Initiativeプログラムにより、ユースケース開発や5Gにより生み出される価値のデモンストレーション等に資金が提供されている[1]。

2.2.7 東南アジア

東南アジアでは、2020年にはSingtel (シンガポール) 、CHT 及び APT (台湾。APTはミリ波プライベートNW事業者)、21年にはTRUE 及び AIS (タイ) 、CMHK及びHKT (香港) 、Viettel (ベトナム) といった、5か国・地域の8事業者がミリ波事業を開始している。

また、これら8事業者を含め、5か国・地域の16事業者がミリ波の周波数を獲得している。シンガポールでは、2,250万ドルの5Gの新たなソリューションを開発するためのグラント

プログラムや、5,000万ドルの最先端の通信技術等の開発支援が行われている。

台湾では、Advanced Semiconductor Engineering (ASE)社により、5GmmWave NR-DC SAによるスマートファクトリー事業を立ち上げる計画などがもたれている[1]。

参考文献

- [1] クアルコムジャパン, 5G ビジネスデザイン WG 第 2 回会合クアルコム資料.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000860192.pdf
- [2] エリクソン・ジャパン, 5G ビジネスデザイン WG 第 2 回会合エリクソン資料.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000860162.pdf
- [3] GSMA, 5G mmWave Circa 2023- State of the Market and Look back at our Accomplishments (MWC2023 GSMA 資料).
- [4] 総務省, 「5G ビジネスデザインワーキンググループ」運営方針.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000857639.pdf
- [5] Bell Labs Consulting, The business of 5G mmWave.
- [6] 総務省, 5G の整備状況 (令和 3 年度末) の公表
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000561.html
- [7] 総務省, 5G ビジネスデザインワーキンググループ (第 3 回) 配布資料.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000860636.pdf
- [8] Ofcom, Enabling mmWave spectrum for new uses.
- [9] European 5G Observatory, “The Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) has granted the license to a domestic aero plane manufacturer.
<https://5gobservatory.eu/china-grants-first-5g-private-network-licence/>
- [10] 中国信通院(CAICT), Setting Sail on a New Journey with 5G Commercialization (MWC2023CAICT 資料) .
- [11] サムスンネットワークス, 5G ビジネスデザイン WG 第 2 回会合サムスン資料.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000860119.pdf

3 ミリ波普及の課題

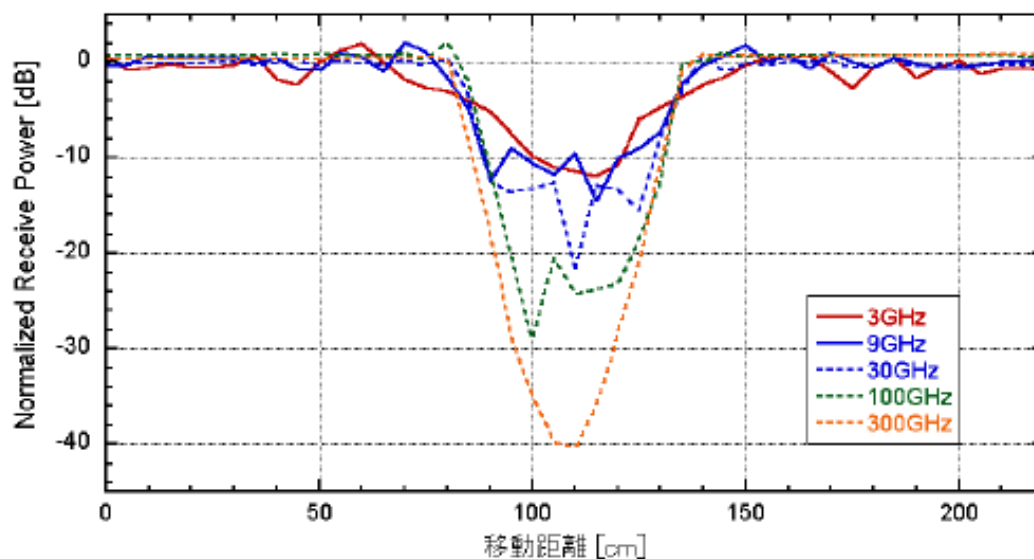
ミリ波では広い帯域幅によりsub6よりも高速・大容量化が期待できる一方で、現在、5Gのエリアは主にローバンド、ミッドバンド、sub6を中心に展開されており、ミリ波のトラフィック収容比率は極めて低い。この状況を改善する上での課題として、ミリ波導入エリア、ミリ波対応基地局装置、ミリ波対応端末、ミリ波ユースケースの観点で分析し、以下に述べる。これらの課題に対して、既に多くの技術やソリューションの研究開発および導入が進められている。それらについては4章 ミリ波技術概要、および9章 ミリ波普及に向けたソリューションを参照頂きたい。

3.1 ミリ波導入エリア

電波伝搬の自由空間損失は式1で示される。これは電波伝搬ロスが周波数が高くなるほど、周波数の増分の2乗の割合で大きくなることを意味している。

$$\text{伝搬損失} L = (4\pi d f/c)^2 \quad d:\text{距離}, f:\text{周波数}, c:\text{光速} \quad (\text{式1})$$

また、遮蔽によるロスも周波数が高くなるほどより急峻となり、見通し外での受信レベルの低下がより大きくなる (Fig. 3-1)。



(Fig. 3-1 遮蔽ロスの測定結果例 [1])

これらの電波伝搬上の特性により、同一の実効輻射電力で比較した場合にはミリ波のセル半径はsub6より小さくなる。また、遮蔽ロスが急峻で大きいことから、できる限り見通し環境を確保できる場所にアンテナを設置する必要がある。これらは通信事業者にとってコ

ストやアンテナ設置場所の確保上の課題であることから、現状は運用しやすいsub6から主に導入されている。ミリ波のエリア改善のためには、電波伝搬特性を踏まえた上でのアンテナ性能の改善や小型化、アンテナ設置場所の制限を緩和する新たなソリューション等が必要である。

3.2 ミリ波対応基地局装置

ミリ波は5Gで新たに移動通信向けに使われる周波数帯で、新規開発が必要であり、その普及度合いはsub6と比較して限定的で無線デバイスの規模の経済効果も現状は低い。

基地局アンテナについては、sub6に比較して小型アンテナの実現が容易であり、伝搬ロスの増加に対応するアンテナゲインの飛躍的な向上を図るために、超多素子アンテナを利用するのが主流となっている。また、装置内のロスも増大することから、ロスを最小限にするアンテナと増幅器を一体化したアナログRFICによる実装が通常使われる。このようにミリ波基地局は実装上新しい点が多く、今後の進化が期待される。例えば、基地局の増幅器の効率としてはsub6は数十%程度なのに対し、ミリ波は十数%と低い。現状は超多素子アンテナを利用する実装によりシステム全体の効率を高めており、今後はアンプ自体の効率も向上する。MIMOレイヤ数に関しては、ミリ波では装置規模の制約から2レイヤが主流となっている。また、超多素子アンテナによるビームフォーミング機能に関しても、フルデジタルによる高性能化は装置規模の観点でいまだ商用実装には至っておらず、アナログとデジタルのハイブリッド実装が主流である。これらの機能の発展は将来的な高度化の可能性として検討されている。

3.3 ミリ波対応端末

白書全体でも述べられているがミリ波のユースケースはまだ十分でなく、加えて、現在、ミリ波を利用できるエリアは十分でない。ミリ波を実装した端末は増加しつつあるが、いまだハイエンド端末に限られていることが現状である。前述のミリ波アンテナ、モジュール、ベースバンド、関連するSW等の開発等、ミリ波を導入することに伴うコスト増加は端末価格の上昇を招き、ローエンド端末への普及が困難となっている。この価格上昇分に見合うメリットを見いだせていない点、エンドユーザーが享受できてない点も現状の課題である。また、ミリ波導入で部品点数が増えることで、端末のデザインにも制約が生じる可能性がある。今後ミリ波導入のコスト、アンテナ・モジュール等の小型化、アンテナ特性の高カバレッジ化が端末への普及のカギとなる。

併せて、ミリ波では増幅器等の半導体デバイスの電力効率がマイクロ波と比べまだ低く、これが一つの主要原因となり消費電力が高い。これはバッテリー消費量や発熱等にも影響し、エンドユーザーの使用感に大きな影響を及ぼす課題である。これらを解決することもミリ波端末の普及へのカギとなる。

3.4 ミリ波ユースケース

5G特有のユースケースとして動画サービスの高品質化や、遠隔監視・制御のニーズなど広がりつつある。しかし、現状のほとんどのユースケースがsub6の性能でも満足できるレベルにとどまっており、ミリ波の高速・大容量性能を必要とするレベルではないことから、ミリ波の普及につながっていない。今後、ミリ波を必要とするさらなるユースケースの高品質化や新たなユースケースの創出に向け、他業界へのミリ波の有効性の訴求と実証が必要である。

3.5 全体課題

以上、ミリ波普及の課題としてミリ波導入エリア、ミリ波対応基地局装置、ミリ波実装端末、ミリ波ユースケースに分類して述べたが、これらは独立な課題ではなく、相互に関連しており、現状はある意味負の連鎖を生じていると考えられる。例えば、ミリ波特有の高速・大容量性を生かしたユースケースが存在しないことは、ユーザ数増/ARPU増によるミリ波導入の費用対効果を見込むことができないため、通信事業者がミリ波のエリア拡大に消極的な理由の一つとなっている。ミリ波を実装した端末が限定的であるのはミリ波のエリアが限定的であることも理由である。ミリ波特有のユースケースが創出されていないのはミリ波エリアが限定的で、ミリ波実装端末が普及していないことも理由であろう。よって、ミリ波普及に向けては、上記の3つの課題をすべて解決し、正の連鎖とする必要がある。

さらに上記のミリ波の状況と課題は国内だけのものではなく、世界的な課題であり、海外のほうがより深刻な状況である。ミリ波の周波数割り当ては海外でも徐々には広がっているものの、いまだ一部の国にとどまっている。ミリ波の周波数割り当てが行われた国でも、エリア展開がされていない、もしくはごく一部のエリア、ごく一部の用途にしか導入されていない。通信事業者に周波数割り当てされたものの、エリア展開されていない状況から、割り当て免許をなく奪われたケースが海外で発生した。ミリ波の普及に向けては、世界規模でのエコシステムの構築による価格低減、コスト削減、技術革新が必須であり、国内のみに注力すればよい問題ではない。今後、ミリ波の課題と解決方法を世界的に共有し、グローバルなエコシステムを構築することが国内での普及に向けても極めて重要である。

参考文献

[1] 豊竹和孝, 他, “テラヘルツ帯における人体遮蔽損失,” 信学総大, B-1-5, Mar. 2022.

4. ミリ波技術概要

本章では、3章で述べたミリ波普及の課題を解決するために有効と考えられる技術や、3GPP等の標準化において仕様化または仕様化が検討されているミリ波に関連した技術について、その概要を紹介する。

4.1 ビームフォーミング技術

伝搬ロスが大きくなり、増幅器の出力や効率が低くなる課題を解決するために、ミリ波ではビームフォーミングが必須の技術となっている。基地局に多素子アレーアンテナを用いることで高いアレーゲインが得られるため、伝搬ロスの課題を解決できる。また、多素子アレーアンテナのアンテナ素子と同数または素子数に比例した数の増幅器を用いることで、増幅器一つ当たりの出力や効率が低くなる課題もカバーできる。一方、アンテナ素子数を増やしてアレーゲインを高くするとビーム幅が細くなるため、より追従性に優れたビームの指向性制御が必要となる。なお、多素子アレーアンテナによるアレーゲインの増大は、下りリンクだけでなく上りリンクのカバレッジ拡大にも有効である。

ビームフォーミング方式は、アナログビームフォーミング、デジタルビームフォーミング、それらを組み合わせたハイブリッドビームフォーミングに分類される[1]。多素子アンテナを用いることに加えて、ミリ波は信号帯域幅が広いことから、アナログビームフォーミングが一般的に用いられる。これは、広帯域に対応した高速DAC/ADCは消費電力が大きいいため、DAC/ADCの数が最少（信号多重数と同数）で済むアナログビームフォーミングが適しているためである。なお、ミリ波の多重数は、VH偏波を利用して、1枚のアンテナパネルで2多重とする方法が一般的である。

将来のトラフィック増大に対応し、ミリ波の有用性をより高めるためには、ミリ波の多重数を2よりも増やして行く必要がある。アナログビームフォーミングで多重数を増やすには、複数のアンテナパネルを用いる方法があるが、この場合アレーアンテナの面積とともに増幅器などの回路数も増大する。1枚のアンテナパネルを分割して、分割した複数の小規模アンテナパネルを用いる方法もあるが、この方法ではアレーゲインが減少してしまう。そこで、多重した信号を1つのアンプでまとめて増幅する機能を持ったマルチビーム多重対応のミリ波RFチップを開発することで、アレーアンテナの面積を増やすことなく、またアレーゲインを減少させることなく、1枚のアンテナパネルからVH偏波以外の多重信号を送信することができる[2]。今後、高速DAC/ADCの低消費電力化が図れば、ミリ波でもデジタルビームフォーミングやハイブリッドビームフォーミングを適用することで、多重数を増大することが可能になる。

4.2 MIMO技術

本節では、ミリ波の直進性や遮蔽ロスなどの電波伝搬の課題を解決するとともに、空間多重を活用したMIMO関連の将来技術について紹介する。

4.2.1 LoS-MIMO

MIMOの空間多重は、信号処理により伝搬チャネル上に独立経路を形成することで実現している。マルチパスフェージング環境では、マルチパスが多いほど独立経路を形成しやすい伝搬チャネルとなる確率が高くなる。電波の直進性が高く、反射や回折がしにくいミリ波などの高周波数帯の場合、MIMOの送受信アンテナが見通し内（LoS）環境の時に伝搬チャネルの相関が高くなり、独立経路を形成することが難しい。見通し内MIMO（LoS-MIMO）では、MIMOのアンテナ素子を送受信距離に対して適切に配置することで、伝搬チャネルの相関を下げ、複数の独立経路を形成可能となる。特に最適な素子間隔となる場合、MIMOの固有モード伝送での通信が可能となる[3]。しかしながら、最適な素子間隔は送受信距離に対して決まるため、従来固定通信での利用が検討されてきた。近年では、移動通信への利用が期待されており、送受信距離の変動にロバストなLoS-MIMOの検討が行われている[4]。これらのLoS-MIMO技術によって、ミリ波でも空間多重が利用しやすくなり、ミリ波の周波数利用効率向上が可能になる。

4.2.2 Massive-MIMO／分散MIMO

ミリ波は、その高い直進性により、電波が障害物に遮蔽されると通信が途切れてしまうリスクがある。その対策として、多数のアクセスポイント（AP）を分散配置してAPからユーザ端末への見通し通信を確保する分散MIMO（Distributed-MIMO）が有効となる[5, 6]。特に、集約基地局に接続されたAPを、屋外では電柱、信号機、街路灯などに、屋内では壁や天井などに多数設置し、それら複数のAPが互いに連携して通信する広域分散MIMOの導入が期待されている[7]。広域分散MIMOにより、ユーザ端末は複数のAPとの間で見通しパスを冗長に確保できるので、ミリ波の通信安定性を高められる。分散MIMOは、アレーアンテナの各アンテナ素子を搬送波波長に比べて大きく離隔配置することで、予め独立な伝搬パスを確保して空間の自由度を最大限に活かす技術であり、Massive-MIMO¹の一実施形態である。Massive-MIMOには各アンテナ素子配置方法に関して、既にsub6帯で実用化されている素子間隔を1/2波長程度と近接配置した集中型MIMO（Collocated-MIMO）と、アンテナ素子を離隔配置したDistributed-MIMOがある。前者は方向操舵可能な平面波ビーム生成が可能であるが空間多重度においては反射や回折等による独立なパス数に依存し、後者は方向操舵可能な平面波ビームは生成できないが予め独立なパスを有し空間多重度を最大化できる特徴がある。3GPPにおいてもRel-16/17にて1つのUEに対し2つの基地局側の送受

¹ Massive-MIMO

MIMOを高度化した一技術であり、多数の独立したトランシーバの自由度を活かし、空間多重と無線伝搬路の品質安定性を同時に向上する技術。5Gにおいては4Gの直交周波数多重・時分割多重に加え、空間多重による更なる周波数利用効率向上を目指して開発・導入された。

信点 (Multi-TRP: Transmission and Reception Point) を用いた分散MIMOが仕様化されている[8]。

4.3 トポロジー改善技術

ミリ波は電波の直進性が強く、遮蔽物の陰への回り込みが小さいため、基地局から見通し外となる場所のエリア化が課題となる。そのため、基地局と端末の間に中継局や反射板を設置することで、基地局から見通し外となるエリアの受信品質を向上させるトポロジー改善技術が有効となる。中継局は、IAB (Integrated Access and Backhaul) と呼ばれる再生型の中継局と、レピータなどの非再生型の中継局に分類される。レピータは、電源のみの接続で動作するため設置が容易であり、GPS信号などは不要で屋外・屋内どちらでも使用することができ、遅延が大きいデジタル信号処理がないため5Gで要求されている低遅延特性を有している。ミリ波帯のレピータは、ビームフォーミング対応 (アンテナ一体型) しているため、基地局に対向するドナー側と端末に対向するサービス側のユニットを分離し、ユニット間を同軸ケーブル一本で接続することで、柔軟なエリア形成を可能にしている[9]。

また、最近では、これまで固定と考えられていた電波環境を動的に制御する研究が進んでいる。中継局の位置や向きを可変にして制御したり、メタサーフェス反射板を用いて入射波を任意の方向に反射させたりして制御するRIS (Reconfigurable Intelligent Surface) などの検討が行われている[9, 10]。さらに同軸ケーブルと比較し低損失伝送が可能な誘電体導波路により遮蔽物を迂回する技術や、誘電体導波路の一部から電波を放射させ、さらに電波の放射位置を自在に変更、移動させることで、工場などのレイアウト変更など電波環境の変化にも柔軟に対応可能なエリア化技術が検討されている[11]。

4.4 ミリ波デバイス技術

ミリ波において増幅器の出力や効率が低くなる課題を解決するデバイス関連技術について考察する。Fig. 4-1は、各種デバイス材料における周波数と増幅器出力の関係を示している。図から分かるように、周波数が高くなるほど増幅器の出力は低下する傾向にあり、28GHz帯以上の高周波になると、CMOSやSiGeを材料とした増幅器の出力が大きく低下する。デバイス材料にGaNを使うことでミリ波でも高出力化を図ることができるが、CMOSと比べるとGaNはコストが高いため、現状のミリ波基地局では、多素子アレーアンテナとCMOSまたはSiGeを材料とした増幅器の組み合わせが用いられている。したがって、将来GaNのコストが下がれば、高出力の増幅器を用いることで、多素子アレーアンテナ以外の様々な構成のミリ波基地局を実現することが可能になる。

次に、周波数が高くなるほど増幅器の効率が低下する課題について考察する。sub6ではDohertyアンプにDPD (Digital Pre-Distortion) を適用することで増幅器の効率を大幅に改善しているが、ミリ波ではACLR (隣接チャネル漏洩電力) の規定が緩いこともあり、DPDは一般的に使われていない。但し、信号の歪を補償することで、EMV (Error Vector

Magnitude) を減少させ256QAMの伝送を可能にしたり、バックオフを小さくして増幅器の効率を改善したりするなど、ミリ波にもDPDを適用する利点は十分にある。多素子アンテナを用いるミリ波基地局では、多数の増幅器からの広帯域信号を多数の高速ADCを用いてフィードバックする必要があるため、DPDの回路規模および消費電力が増大してしまう。そこで、ミリ波のACLR規定が緩いことを利用して、フィードバックに使用する高速ADCの数を減らすことでDPDの回路規模を大幅に削減する技術が検討されている[12]。

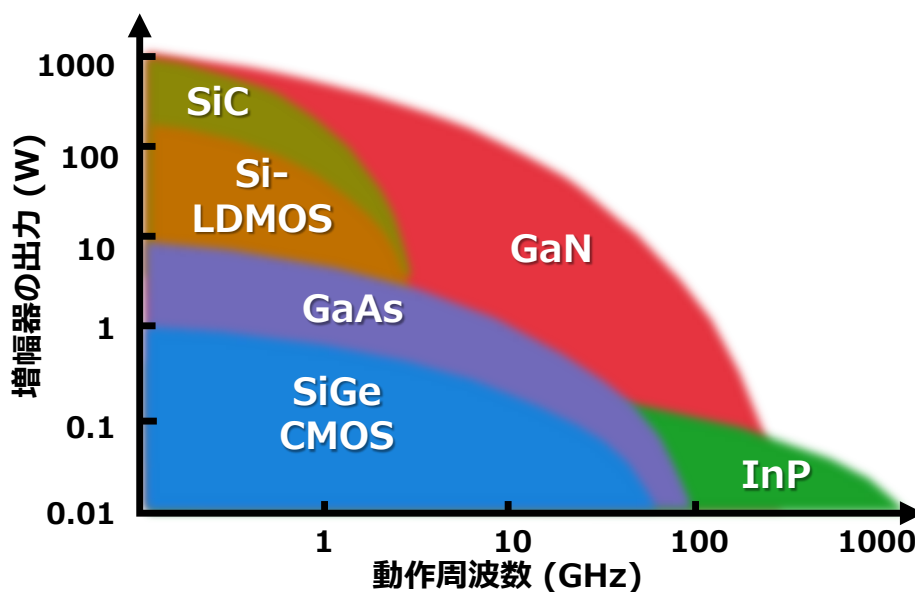


Fig. 4-1 周波数と増幅器出力の関係

4.5 インフラシェアリング

ミリ波はカバレッジが狭いため、面的にエリアを構築するためには、非常に多くの基地局を設置する必要がある。そのため、基地局の装置コストや設置コストを低く抑えることが重要な課題となる。インフラシェアリングはこれらの課題を解決する有効な手段の一つと考えられる[13]。鉄塔などの設置場所やアンテナ設備を共用する形態や、ローミングやMVNO (Mobile Virtual Network Operator) と言った他の通信事業者の基地局およびネットワーク設備を利用する形態のインフラシェアリングは既に行われている。sub6などの低い周波数では、基地局無線部 (増幅器) とアンテナをRFポート経由で分離したタイプの基地局が多いため、アンテナ共用の実現は比較的容易である。一方、ミリ波は伝送路損失が大きいいため、増幅器とアンテナ間の伝送距離が長くなるアンテナ共用のシェアリングは適さない。特にカバレッジ確保を必要とする屋外などでは、基地局あるいは基地局無線部を共用する形態のシェアリングがミリ波には適しており、その実用化が検討されている[14]。また、広い帯域幅を確保できるミリ波などの高周波数帯において、アナログRoF (Radio-over-Fiber) を用いて無線基地局の信号処理機能を集約局に集約し、アンテナおよび増幅器からなる張

出局を複数の無線システムで共用する基地局構成の検討が行われている[15]。これにより、張出局の小型化・低消費電力化による設置性や経済性の向上が可能になる。

4.6 ミリ波キャリアアグリゲーション (CA)

一般にミリ波ではsub6と比較して広い帯域幅を利用して通信することができる。例えば日本で利用可能な28GHz帯では、5G事業者当たり400MHzが割り当てられており、ローカル5Gでは最大900MHzの連続周波数を利用可能である。多くの場合、このような広帯域を1キャリアとして扱うのではなく、帯域幅100MHz等のキャリアを複数束ねて通信するキャリアアグリゲーション (CA) の形態を適用する[8]。CAでは通信に利用するキャリア数を柔軟かつ適応的に変えることができる。なお、CAでは下りリンクと上りリンクで異なるキャリア数を利用することも可能である。例えば、所要スループット等に基づいてキャリア数を制御することで、移動局の電力消費を抑えることができる。ミリ波CAは28GHz帯を含むすべての5Gミリ波周波数帯で3GPPで標準化されており、ミリ波の運用では必須技術となっている。

4.7 sub6+ミリ波デュアルコネクティビティ (DC)

5Gでは、ミリ波の通信を行う際にsub6のキャリアをアンカーキャリアとして利用し、sub6とミリ波の同時通信で5Gサービスを提供するsub6 +ミリ波デュアルコネクティビティ (DC) を利用できる[8, 16]。sub6+ミリ波DCでは、sub6とミリ波の両方の通信を同時に利用することができるため、ミリ波単一で利用する場合と比べて高いスループットを達成できる。また、ミリ波では連続するカバレッジがないエリアやミリ波通信が安定しない場合であってもsub6の周波数で接続を維持することができるため、ミリ波による無線リンク障害 (Radio link failure) の発生を防止できる。sub6+ミリ波DCにおいて、sub6を5GキャリアではなくLTEキャリアとした無線アクセス形態は、NSA (Non-Standalone) と呼ばれ、特に5Gの初期展開で・早期運用のため必須技術となった。sub6+ミリ波DC (NSA含む) は各国・事業者の様々な周波数の組み合わせで実施できるよう3GPPで標準化が行われており[17]、現在広く利用されている技術である。

4.8 High-Power UE (HPUE)

ミリ波およびsub6では、人体防護や無線共用など様々な観点に基づいて定義された移動局の最大出力が存在する。一般に移動局の最大出力は基地局の最大出力よりも小さいことが多く、下りリンクと上りリンクのカバレッジ・アンバランスが課題となる。これを解決するため、HPUE (High-Power User Equipment) と呼ばれる高出力の移動局が標準化されている[18]。HPUEは基地局による制御の下、人体防護等で問題が生じない範囲で高出力化を行い、上りリンクのカバレッジを改善することができる。ミリ波では複数種類のHPUEが標準化されているが、例えばPower Class 1 と呼ばれるHPUEは固定無線用の移動局の仕様

であり、最大EIRPとして55dBmを出力可能である。Power Class 1のミリ波HPUEは、米国向けには製品化もされている。

参考文献

- [1] NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.23, No.4, PP.30-39, Jan. 2016.
https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol23_4/vol23_4_005jp.pdf
- [2] Fujitsu, “RU Technologies,” PP.4, 2023.
<https://www.fujitsu.com/global/images/gig5/RU-Technologies.pdf>
- [3] K. Nishimori, et. al., “On the Transmission Method for Short-Range MIMO Communication,” IEEE Trans. Vehicular Tech., 2011.
- [4] M. Palaiologos, M. H. C. Garcia, R. A. Stirling-Gallacher and G. Caire, "Design of Robust LoS MIMO Systems with UCAs," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, OK, USA, 2021, pp. 1-5..
- [5] NEC, “ミリ波周波数帯に分散 MIMO を適用し、実際のオフィス環境下で 3 倍の同時接続数・伝送容量を実現,” , Jan. 2021.
https://jpn.nec.com/press/202101/20210125_01.html
- [6] KDDI 総合研究所, “世界初 お客さま一人ひとりのニーズに応える Beyond 5G に向けた無線ネットワーク展開技術の実証に成功,” , Oct. 2021.
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/100701.html>
- [7] NTT/ドコモ/NEC, “世界初、28GHz 帯で遮蔽を気にせず繋がり続ける分散 MIMO の実証実験に成功,” , Oct. 2022.
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/10/31/221031a.html>
- [8] 3GPP TS 38.300, v17.3.0
- [9] 電気興業, “レピータ、メタマテリアル反射板 (28GHz 帯) ,”
<https://denkikogyo.co.jp/elec/product/mobile/15g/>
- [10] NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.29, No.2, PP.15-39, July. 2021.
https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol29_2/vol29_2_004jp.pdf
- [11] NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.29, No.2, PP.7-12, July. 2021.
https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol29_3/vol29_3_003jp.pdf
- [12] T. Ota, et.al., “An Experimental Study on Multibeam Digital Predistorter with Intercarrier Interference Suppression,” in Proc. IEEE VTC2022-Fall, 2022.
- [13] 東京電力パワーグリッド, “将来の 5G 基地局の在り方に向けた意見交換会公開用最終

取り纏め資料,” Feb. 2022.

<https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/information/2022/pdf/220204a.pdf>

[14] JTOWER, “JTOWER と Foxconn、5G ミリ波対応 共用無線機の開発に関する契約を締結,” Apr. 2022.

<https://www.jtower.co.jp/2022/14516/>

[15] NTT, “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,” , Mar. 2020.

https://www.rd.ntt/research/JN20200315_h.html

[16] NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.28, No.2, PP.24-38, July 2020.

https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol28_2/vol28_2_005jp.pdf

[17] 3GPP TS 38.101-3, v17.8.0

[18] 3GPP TS 38.101-2, v17.8.0

5 性能評価

本章では、5Gミリ波を用いた実験・測定結果として、ミリ波が屋外で非常に高いスループット及び遅延性能を達成でき、屋内では見通し外であっても十分活用できることが示されている。各節本のサマリは下記のとおりである。

- 5.1節：5Gミリ波のスループットと遅延性能の測定（一対一通信・理想環境）
 - 見通しかつ遮蔽・反射がない電波案箱環境で受信電力を変化させ、一対一通信のスループットと遅延を測定した。その結果、低次の変調方式を使わざるを得ないような低い受信電力の環境であっても1Gbps以上のスループットを得ることができ、かつ7ms以下のPing RTTを維持できることが分かった。この結果は、5Gミリ波が幅広い高速通信・低遅延サービスに適することを示している。
- 5.2節：5Gミリ波の屋内環境測定
 - 実際の屋内施設に5Gミリ波の基地局を設置し、移動局の場所を様々に変えてそのスループットを測定した。その結果、基地局近傍で高いスループットを得られるのはもちろん、柱による遮蔽が存在する場所であっても基地局近傍と大きく変わらないスループットを達成できることが分かった。この結果は、5Gミリ波がある程度の遮蔽や基地局と端末間の距離が避けられない現実の屋内環境においても広い範囲で高いスループットが得られることを示している。
- 5.3節：5Gミリ波の屋外環境測定
 - 本節は[33]で報告されている屋外測定の紹介となる。屋外基地局が実際に設置されている東京のある場所でスループットの定点および移動測定を行った。その結果、屋外に設置された基地局は100m程度の範囲でミリ波通信可能なエリアを形成できていること、そして5Gミリ波のエリアが連続しておらず、5Gミリ波に常時接続できない場合であっても、移動中に変動するスループットの平均値はsub6を利用する場合と比べて大幅に改善できることが分かった。この結果は、ある程度エリアカバーが不完全な状況であっても5Gミリ波は高いユーザメリットを提供できるということを示している。
- 5.4節：5Gミリ波の課題とその解決策
 - 本節では、見通し外環境のサポートという5Gミリ波の課題に関する取り組みを紹介する[35-39]。中継器、RIS、そして誘電体導波路の応用といった研究開発の取り組みが行われていることを述べる。

5.1 5Gミリ波のスループットと遅延性能測定（一対一通信・理想環境）

実際に市販されているミリ波対応の端末と5Gミリ波対応の疑似基地局を使用して、1対1通信の理想的な環境でのパフォーマンスを測定した。ミリ波対応の疑似基地局はKeysight E7515B、ミリ波対応端末はSHARP AQUOS R7 (Qualcomm Snapdragon 8 Gen 1 搭載)を使用した。疑似基地局と端末は、バンド1 (2.1GHz帯) のLTEアンカーと、バンドn257

(28GHz帯) のミリ波NRキャリア(100 MHz x 4ccの合計400 MHz)を用いて通信を行うものとした。端末と疑似基地局のミリ波送受信アンテナは電波暗箱の中に収容されており、ミリ波の伝搬距離は1.5 m程度である。経路損失や端末の受信電力などの各種条件は、疑似基地局のダウンリンクパワーを変更することで変更可能である。また、伝搬環境は、遮蔽物や反射波がほとんど存在しないクリーンな見通し環境(LOS環境)である。

<下りリンクスループット評価>

ミリ波キャリアの変調符号化方式(MCS : Modulation and coding scheme) をそれぞれ256QAM, 64QAM, 16QAM, QPSKに固定した状態で、疑似基地局のダウンリンクパワーを変更した際のNR物理層スループットをFig. 5-1に示す。NSA構成であるが、スループット測定値にLTEアンカー側のスループットは含まれない。受信パワー(RSRP)が十分に大きい状態においては、256QAMで3 Gbpsを超えるスループットが測定された。また、RSRPが-80 dBm程度以上であれば、256QAMであってもほぼエラーフリーの伝送が実現できている。RSRPを-110 dBm程度まで下げても16QAMではエラーフリー伝送が出来ており、1 Gbps以上のスループットを安定して得ることが出来る。ミリ波では使用可能な周波数帯域が400 MHzと広いと、低次の変調であっても高速な通信環境を提供できることがわかる。

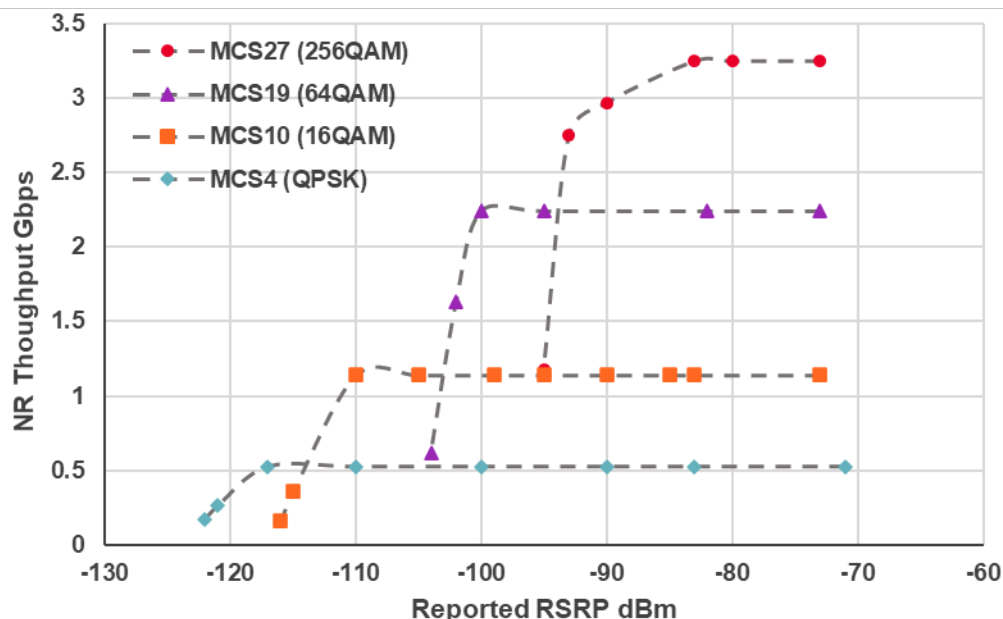


Fig. 5-1 5Gミリ波の端末受信スループット

<5Gミリ波の遅延性能>

ミリ波疑似基地局の変調方式(MCS)をダウンリンクのブロック誤り率が約10%になるような適応制御(リンクアダプテーション)を実施した際のNR物理層スループットと、Pingパケットによる往復遅延量(Round Trip Time: RTT)をFig. 5-2に示す。ダウンリンクパワーを下げると、適応制御により変調方式が自動で変化するため、平均スループットがピークから次第に減少する。前節での結果と同じく、RSRPが-110 dBm程度までは1 Gbps以上のスル

ーputを維持することが可能であった。強電界時はPing RTT値は5.0～5.5 msであったが、RSRPが低下してもRTT値の増加は15%以下にとどまっております、今回実験したRSRP範囲では一貫して6.5 ms以下のRTT値となった。ミリ波システムはサブキャリア間隔が広く1スロットあたりの時間が短いこと、ミリ波ではTDDパターンの上下リンク切り替え周期が極めて短いことなどの恩恵により、通信環境によらず本質的に低遅延通信を実現することが出来る。

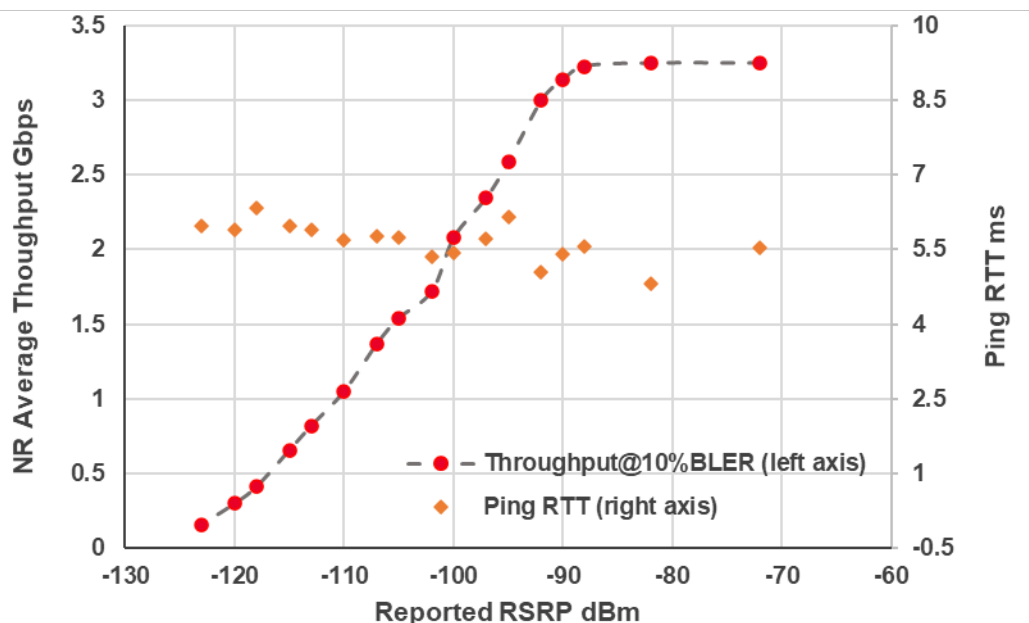


Fig. 5-2 5Gミリ波の端末受信スループットとラウンドトリップ遅延

上記の結果から、ミリ波システムは様々なユースケースに対応できる低遅延・高スループット環境提供することが可能で、既に市販されているミリ波対応端末が十分なパフォーマンスを有していることがわかる。また、実測データは高いピークスループットを提供できるというミリ波システムの利点に加えて、低遅延環境を安定して提供することが出来ることも示している。これは、安定した低遅延環境が必要であるが、ピークスループットを必ずしも必要としないアプリケーション（中程度のスループットで、かつ応答性が要求されるオンラインゲームなど）にもミリ波ネットワークを活用できることを示唆している。

5.2 5Gミリ波の屋内環境測定

本節では屋内環境で測定された5Gミリ波の性能評価結果を示す。Fig. 5-3にある10m x 20mの室内の一角に5Gミリ波基地局を設置し、室内の様々な場所（ポイントA～F）で下りリンクのスループットを測定した。バンドn257（28GHz帯）のミリ波NRキャリア（100 MHz x 4ccの合計400 MHz）において2レイヤMIMOかつ64QAM変調を利用するものとし、TDD運用はDL:UL比率 = 4:1、基地局の送信電力は32dBmとした。各ポイントにおいて測定された5秒間の平均スループットは次のようになった。

ポイントA : 1666.54Mbps

ポイントB : 1586.91Mbps

ポイントC : 1851.24Mbps

ポイントD : 1842.28Mbps

ポイントE : 1602.87Mbps

ポイントF : 1643.85Mbps

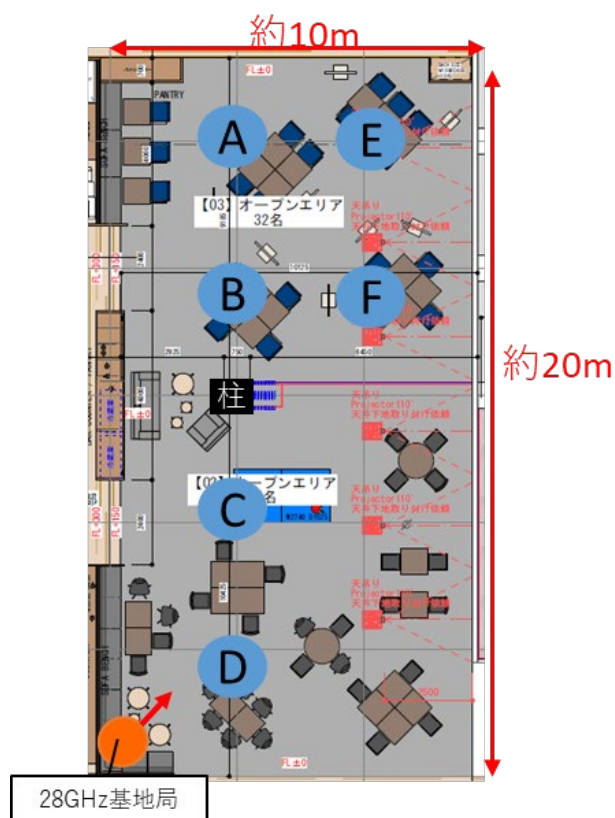


Fig. 5-3 5Gミリ波スループットの屋内測定

基地局近傍（ポイントC/D）では遮蔽や減衰がないため、高いスループット（本測定条件・環境においては1.8Gbps超）が得られる。ポイントA/B/E/Fは基地局から距離があり、さらに部屋の中央付近に柱が存在するため、ポイントC/Dと比べると一定の遮蔽・減衰の影響を受ける。しかしそれでも、1.5Gbpsを超えるスループットをすべてのポイントにおいて達成できることが確認できる。本測定結果は、ある程度の遮蔽や基地局と端末間の距離が避けられない現実の屋内環境においても、見通し外を含む広い範囲で高いスループットが得られることを示している。

屋外の基地局から電波が浸透しにくく、比較的規模の大きい空港やオフィスビル、商業施設においては、現在DAS（Distributed Antenna System）と呼ばれるLTE・5G基地局や屋

内無線LANアクセスポイントを屋内に設置し通信サービスを提供することが多い。[1]では、このようなDAS基地局や無線LANアクセスポイントに併設する5Gミリ波基地局を設置することで、その屋内施設を広くカバーできることを示す測定結果を提供している。

一例として、空港コンコースの屋内基地局または無線LANアクセスポイントに5Gミリ波基地局を併設した場合の5Gミリ波の基地局からの伝搬損（MPL：Maximum path-loss）を可視化した図を掲載する[1]。各5Gミリ波局は偏波ごとに128アンテナ素子を備え、16の水平ビームを形成できるものとしている。ほぼ全域（99.7%のエリア）においてMPLが115dB以下となることが確認できる。[1]における条件では、この場合99.7%のエリアで数Gbpsのスループットが得られるとしている。さらに[1]では、空港コンコースの他コンベンションセンター、地下鉄プラットフォーム、オフィス、そしてショッピングストアにおける同様の測定結果も示している。

施設内にDASや無線LANが整備されている場合、新たに5Gミリ波の屋内基地局を別途整備するのは困難な場合があるものの、[1]の報告は、5Gミリ波の屋内基地局を既存の屋内ネットワークに併設することができれば、大規模施設であっても広く5Gミリ波サービスを提供できることを示している。

Deploying Indoor mmWave for an Airport Concourse

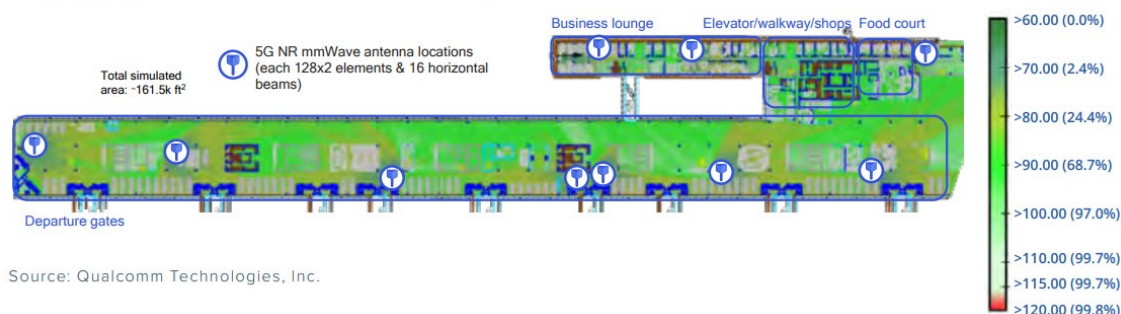


Fig. 5-4 空港における5Gミリ波基地局の設置例

5.3 5Gミリ波の屋外環境測定

本節では屋外環境で測定された5Gミリ波の性能を示すため、2022年4月にシグナルズ・リサーチ・グループによって東京で実施された5Gミリ波の通信性能ベンチマーク調査結果[2]を紹介する。当該ベンチマーク調査においては、5Gミリ波をサポートする商用スマートフォンを用い、実際に事業者が設置した5Gミリ波基地局との間で通信を行って、そのスループットやRSRP・SINRを測定している。帯域幅は下りリンクは400MHz、上りリンクは200MHzを実施しており、この条件における5Gミリ波の最大スループットは下りリンクが約2.4Gbps超、上りリンクが400Mbps超となる（それぞれ2レイヤMIMOかつ64QAM変調）。

< 定点測定 >

新橋駅すぐそばにおいてスループットの定点測定を行った結果、下りリンクで2Gbps、上りリンクで300Mbpsを超えるスループット測定を記録した。このとき端末と5Gミリ波基地

局の距離は115m程度であることを確認しており、ミリ波では100m程度の距離がある場合でも高いスループットを達成できることがわかった。

実際にはスループットは場所により大きく変わってくる。上りリンクに着目し、新橋駅周辺（新橋駅銀座口から最大400mほどの範囲）において5Gミリ波のスループットを定点測定した結果は下記の通りとなった。このエリアでは4つのミリ波基地局が設置されているが、それぞれが異なるエリアをカバーすることにより、広い範囲で150Mbpsを超えるスループットを達成できていることが確認できる。一部通信環境の良好な地点においては、上りリンクスループットが250Mbpsを超えるケースもあった。

図9. アップリンク方向における5Gミリ波スループット結果



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

Fig. 5-5 屋外における5Gミリ波上りリンクスループット定点測定

<移動測定>

シグナルズ・リサーチ・グループ社では、東京駅周辺において徒歩で移動した場合の平均の上りリンクスループットも測定している。Fig. 5-6において一番右のグラフは移動局の5Gミリ波をオフにした場合、中央は移動局の5Gミリ波をオンにした場合の平均スループットである。移動局の5Gミリ波をオンにした場合であっても常時ミリ波で通信が可能なのではなく、移動中には見通し環境や基地局からの距離などが変化することから、ミリ波による通信が行われる区間と行われない区間が存在する。中央のグラフは、このように5Gミリ波が常時使われない中での平均スループットを示す。一番左のグラフは、移動局の5Gミリ波がオンであり、かつ5Gミリ波による通信が行われた区間のみを平均化した値である。なお、5Gミリ波をオフにした場合や5Gミリ波による通信が行われない区間では、代わりに5G sub6周波数（周波数バンドn78）を用いて通信を行っている。

図20.アップリンク方向における移動測定の結果

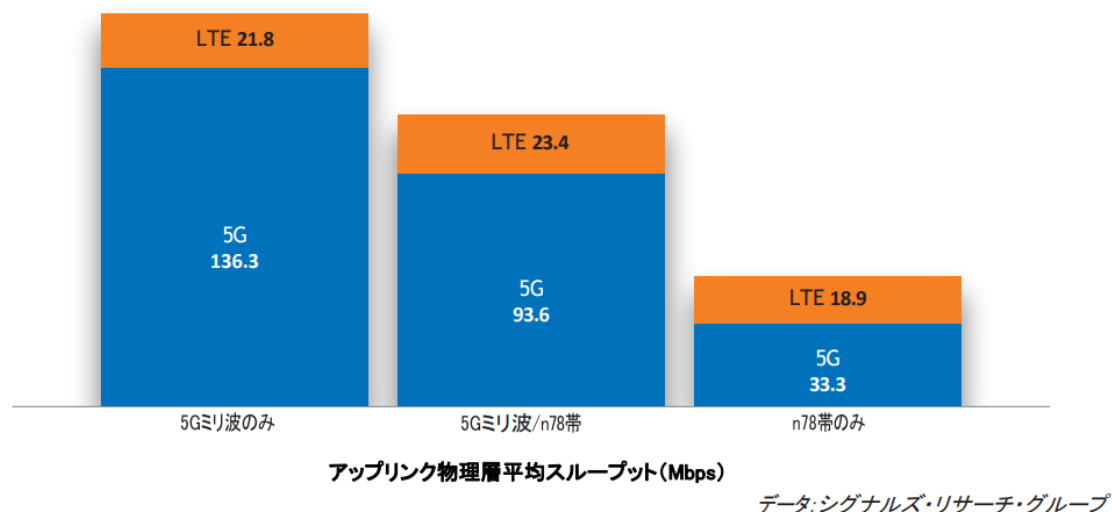


Fig. 5-6 屋外における5Gミリ波上りリンクスループット移動測定

これらの結果より、5Gミリ波は上りリンクの移動平均スループットを大きく改善できることが分かる。前述のように中央のグラフの測定では、5Gミリ波を常時利用できているわけではない。それでも5G sub6周波数帯のみを用いた場合に比べ、平均で3倍もの上りリンクスループットを達成できることが分かる。5Gミリ波は直進性や減衰の特徴からエリア展開が難しいと言われることがあるが、今回の測定結果はある程度エリアカバーが不完全な状況であっても高いユーザメリットが得られるということを示している。今後さらに5Gミリ波の展開が進み、ほぼ常時5Gミリ波での通信が可能な状況になれば、さらにスループットを改善可能であることが一番左のグラフから確認できる。

一方で、ほぼ常時5Gミリ波での通信を可能とするためには、基地局からの見通し外となる場所のエリア化を行っていかねばならない。次節では、このような技術をいくつか紹介する。

5.4 5Gミリ波の課題とその解決策

ミリ波は電波の直進性が強く、その振る舞いが光に近くなり、遮蔽物の陰への回り込みが小さくなる。したがって前節で述べたように、基地局から見通し外となる場所のエリア化が課題となる。このようなエリアに対して、基地局を多数設置することも考えられるが、経済的でなく、より効率的なエリア化技術が求められる。そこで、中継局や反射板、さらにはメタサーフェスにより環境に応じて電波の伝搬経路を新たに構築する技術や遮蔽物を高周波数用伝送路で回避するなどの技術を組み合わせることで見通し外となる場所のエリア化を行う新たな無線ネットワークトポロジーが検討されている[3]。

<中継器>

中継局は電波の中継を行う無線装置で、遮蔽物の影響により弱くなった基地局からの電波を増幅して再放射することで、エリアを拡張する。例えば、基地局と接続するドナーユニットと端末と接続するサービスユニットで構成され、これらは同軸ケーブルで接続される。ドナーユニットを基地局方向、サービスユニットをエリア構築したい方向に設置することで、エリアを構築できる。また、アンテナはビームフォーミングアンテナを採用し、設置後も水平面・垂直面のビーム幅およびビーム方向を変更できるため、必要に応じて柔軟なエリア構築が可能となる。信号帯域幅100 MHzの4波(400 MHz帯域幅)で+37dBm (5W) の出力が得られている。また、64 素子のアレーアンテナを搭載し、水平面・垂直面内指向性ともに、3dB ビーム幅は 15~80°、ビームステアリング範囲は±30°となることが報告されている[4-5]。

<メタマテリアル／メタサーフェス応用>

ミリ波帯における見通し外エリア化に対して、電波伝搬を周辺環境などに応じて適用的または動的に制御することが検討されている。電波伝搬を制御する具体的な技術の一つにRIS(Reconfigurable Intelligent Surface)がある。RISではメタマテリアル、メタサーフェスといった要素技術が利用される。これらは、電磁波を散乱する多数の素子で構成され、散乱特性分布を設計および制御ができる。また、メタサーフェスはシート形状で製作できるため、構造物の形状に合わせて設置できる。RISにより反射位相分布を制御すれば、反射波の伝搬を制御し、例えば受信電力を最大化できる。透明動的メタサーフェスではメタサーフェス基板を透明化したものに透明なガラス基板を重ね、ガラス基板を微動させることで、入射電波を通過するモード、電波の一部を透過し、一部を反射するモード、全ての電波を反射するモードの3パターンを動的に制御できる。実証実験では、透過モードで透過率約-1.4 dB以上、反射モードで透過率-10 dB以下の性能を達成している[6]。また、透明メタサーフェスレンズは窓ガラスに貼付け可能なフィルム形状で、窓ガラスを通る電波を屋内の特定の場所(以下、焦点)に集めることができる。そのため、焦点にレピータや反射板を置くことで、建物内のエリア化が可能となる。実証実験では、焦点における受信電力が通常の透過ガラスを用いた場合に対して24 dB以上向上することが確認されている[6]。

<誘電体導波路応用>

電波遮蔽物が移動する場合の想定も必要となる。例えば生産ライン変更に伴う製造機器のレイアウト変更などが該当する。これらによる伝搬環境の変動に対して、迅速にかつ経済的に見通し通信環境を提供する方法として誘電体導波路の応用が検討されている。誘電体導波路は高周波数帯用の伝送線路として使用され、これを伝搬させることで、遮蔽物を迂回し、電波放射を行うことで見通し外のエリア化する。また、誘電体導波路の一部から電波を

放射させ、放射電波により周囲に放射された電波により周囲を通信エリア化する。これまで導波路からの電波の放射原理、すなわち導波路のアンテナ応用に関しては導波路を屈曲させ、屈曲部より電波を放射させる方法と、導波路を別の誘電体を接触させることで別の誘電体部より電波を放射させる方法が検討されている[7]。

参考文献

- [1] ‘Mobile mmWave Is Here – and Indoor Deployment Opportunities Abound,’
Published by Fierce Wireless, presented by Qualcomm
https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/fierce_ebrief_-_mobile_mmwave_is_here_-_and_indoor_deployment_opportunities_abound_smaller.pdf‘
- [2] 5G ミリ波は東京において良好に動作していた,’ SIGNALS Research Group, June 2022.
<https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/SRG-Japan-5G-mmWave-Whitepaper.pdf>□
- [3] “5G の高度化と 6G,” NTT ドコモ ホワイトペーパー, 5.0 版,
https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20221116.pdf
- [4] 5G 対応 RF レピータの開発, 電興技報, No. 53, 2021
- [5] <https://denkikogyo.co.jp/elec/product/mobile/15g/>
- [6] “5G evolution & 6G に向けた透明 RIS 技術の研究,” NTT DCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol. 29, No.3, Oct 2021.
- [7] “つまむアンテナ –誘電体導波路のアンテナ応用,” NTT DCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol. 29, No.3, Oct 2021.

6 ミリ波導入シナリオ

移動通信では現在様々な周波数が世界的に使われている。日本においても700MHzから28GHzまで広い範囲の周波数が使われている。周波数帯に応じて電波伝搬特性や周波数帯域幅が大きく異なるため、通信事業者は周波数帯を適材適所に使用している。具体的には、低い周波数は伝搬ロスが小さいものの周波数帯域幅は小さいため、サービスエリアを面的にカバーすることを主目的に使われている（カバレッジバンド）。高い周波数帯は伝搬ロスが大きいものの周波数帯域幅は広いため、トラヒックの多い場所での高速大容量なサービス提供を主目的に使われている（キャパシティバンド）。

ミリ波については、特に高い周波数帯であるため、その特徴を生かした使い方をすることが重要である。大きな伝搬ロスによりセル半径は比較的小さくなるが、逆にこの特徴を生かして使用エリア外にはできる限り電波を漏らしたくない場合などの狭域・閉域での用途が有効である。周波数帯域幅が大きいことによる高速大容量性は、トラヒックの多い場所や高速サービスの提供が求められる場所でも有効である。これらの特徴を踏まえ、具体的には以下のようなミリ波導入シナリオが考えられる。

1) ホットスポット、スタジアム、イベント会場

人の多く集まる特定のエリアであり、大きな通信容量を必要とする。その場所特有の高速サービスも提供される。これらの導入シナリオでは、ミリ波基地局のテンポラリな設置含め、周辺トラヒック・環境・行動に適応したミリ波のフレキシブルな運用が期待される。

2) オフィス、屋内

閉域であり、特定の比較的狭いエリアをカバーする。電波反射により、見通し外でも良好な通信環境を構築できる。通信需要も多く、高速大容量が期待される。

3) プライベートNW／ローカル5G

閉域であり、利用エリア外への電波の漏れをできる限り少なくする必要がある。利用エリア内では高速大容量な通信環境が期待される。

4) 都市部の歩道、道路や交差点

多くの人やクルマによる通信需要により、大きな通信容量が必要となる。

5) FWA

光のアクセス回線の代わりに、極短時間で簡単に安価で宅内の高速な通信環境を作り出せるFWAのニーズは世界的に高く、光が普及している日本においても多くのソリューションが提供されている。

上記の他にもミリ波の導入シナリオは考えられ、今後のミリ波対応端末の普及やミリ波特有のサービスの提供に応じて、より広い範囲でのミリ波の導入が求められと考えられる。

7 ローカル5Gとの親和性

7.1 ローカル5Gとは

7.1.1 制度概要

ローカル5Gは、携帯電話事業者による全国向けの5Gサービスとは別に、地域の企業や自治体等の様々な主体が、自らの建物や敷地内でスポット的に柔軟にネットワークを構築し利用可能な無線システムとして、2019年度に制度化が行なわれた。ローカル5Gは、全国5Gと同様に、超高速・超低遅延・多数同時接続の特徴を持ち、技術的な仕様も基本的に全国5Gと共通である。

2020年度には周波数の拡充も行なわれ、当初のミリ波（28GHz帯）に加えて、sub6（4.7GHz帯）も利用可能となった。また、映像伝送など上り通信を重視した利用ニーズにあわせて、「上り1：下り1」比率の『準同期TDD^{※1}』運用も可能となっている。

このような特徴を活かして、医療、建設業、農業、製造業、物流、娯楽などの産業利用に加え、安心安全や健康、福祉、観光、教育等の地域のまちづくりに関わる利活用など、地域の課題解決を始めとして多様なニーズに用いられることが期待されている。

なおローカル5Gは、基本的に自営目的での利用を想定しているが、地域に密着した多様なニーズに対応する視点で、地域の事業者等にネットワーク構築や運用等を依頼し、電気通信役務として提供を受けることも可能である。

※1) 準同期TDD：非同期運用する場合の電波干渉調整を簡素化するため、全国5Gとローカル5Gの同期TDDとスロットのタイミングを一致させたまま、上り・下りスロットのパターンのみを一部変更する方式。ローカル5Gでは、利用ニーズが多い「上りスロットの比率が高いTDDパターン」として、『上り1：下り1』の比率のパターンについて、2020年12月に制度整備が行なわれている。

7.1.2 割当周波数帯（sub6・ミリ波）

ローカル5Gは、2019年12月に電波法関連法令の制度整備により、28GHz帯の一部の帯域（28.2-28.3GHz）で利用が可能となり、加えて2020年12月に周波数帯域（4.6-4.9GHz及び28.3-29.1GHz）を拡張する制度改正が行なわれた。

sub6帯（4.6-4.9GHz）では、4.6-4.8GHz（200MHz幅）が公共業務無線と共用する帯域であるため、屋内利用に限られ、一部の地域では利用も制限されている。

ミリ波帯（28.2-29.1GHz）は、Ka帯衛星通信システムと共用する帯域であるため、特に28.45-29.1GHz（650MHz幅）については屋内利用が推奨されている。（衛星の影響を受ける可能性があるため屋内を基本としているが、屋外利用も任意で可能である）

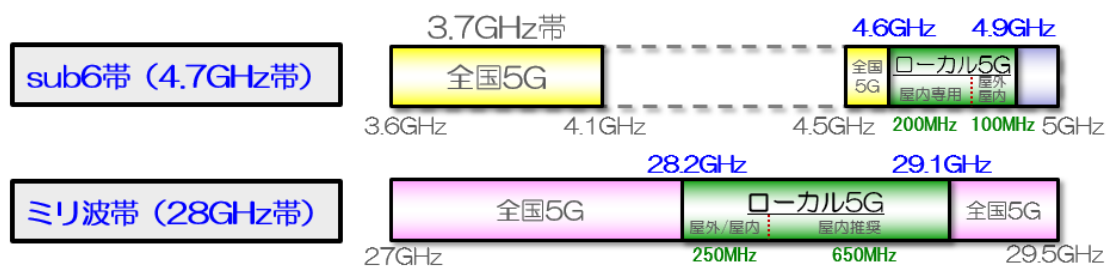


Fig.7.1-1 ローカル5Gの割当周波数帯

7.2 ローカル5Gの現状

7.2.1 概況（これまでの経緯～普及状況）

ローカル5Gは、最初の制度整備が2019年12月に行なわれたことから、携帯電話事業者の全国5Gサービスが開始された2020年3月とほぼ同時期に最初の商用ローカル5G免許が付与され、その第1歩を踏み出した。

まず、ミリ波帯の100MHz幅とNSA方式という組合せで、アンカーバンドに自営等BWA※2)等を利用する形で屋内屋外の導入が進み、その後1年ほど遅れて2020年12月から、拡充されたsub6帯とミリ波帯が使えるようになった。以降、屋外で利用可能な4.8-4.9GHzの100MHz幅で、アンカーバンドを必要としないSA方式を中心に導入が進んでいる。

Fig.7.2-1にローカル5Gの免許数の推移を示すが、2020年12月以降はsub6の基地局導入が急速に進んでいるものの、ミリ波の基地局数は横ばいとなっている。

一方で総務省は、制度化まもないローカル5Gの普及促進を目的に、より柔軟な運用の実現及び低廉かつ安心安全なローカル5Gの利活用の実現に向けて、多様な利用環境下における電波伝搬等の技術的検討や、ユースケースを含めた活用ソリューションを創出する「課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」を2020年度～2022年度の3カ年で実施してきた。Fig.7.2-2にローカル5G開発実証の推移を示す。この3カ年においても、sub6を利用する実証実験が多数を占めていることが分かる。

また総務省では、ローカル5Gに対する投資を促進するための5G投資促進税制を2020年8月に創設し、ローカル5Gの更なる普及に向けて取組んできた。

こうした様々な施策や企業等の活動により、2022年8月末現在でsub6が102者、ミリ波で30者がローカル5Gの免許を取得しているものの、約3年を経過した進捗としては一定程度の普及に留まっているのが現状である。

※2) 自営等BWA：地域BWAと同一の周波数帯（2575-2595MHz）で、ローカル5Gと同様に、自らの敷地や建物内で4G/LTE方式による整備・運用ができる無線システムの制度。ローカル5Gに合わせて2019年12月に制度化された。なお、2020年夏には5G-BWA（NR化）の制度整備も行なわれている。

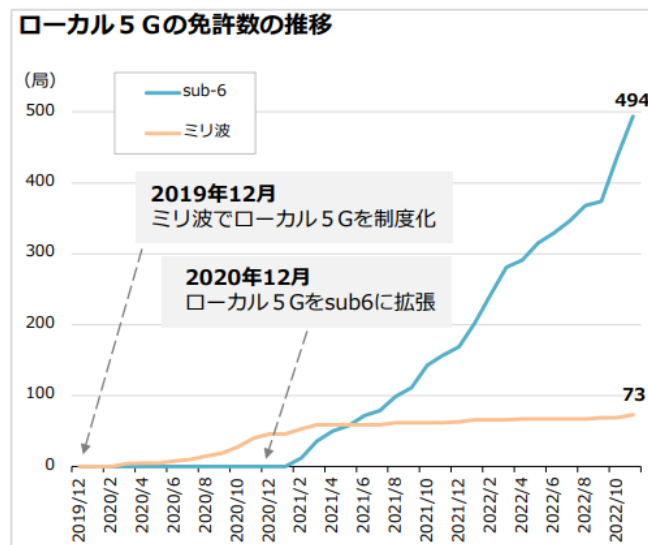


Fig.7.2-1 ローカル5Gの免許数の推移 [1]

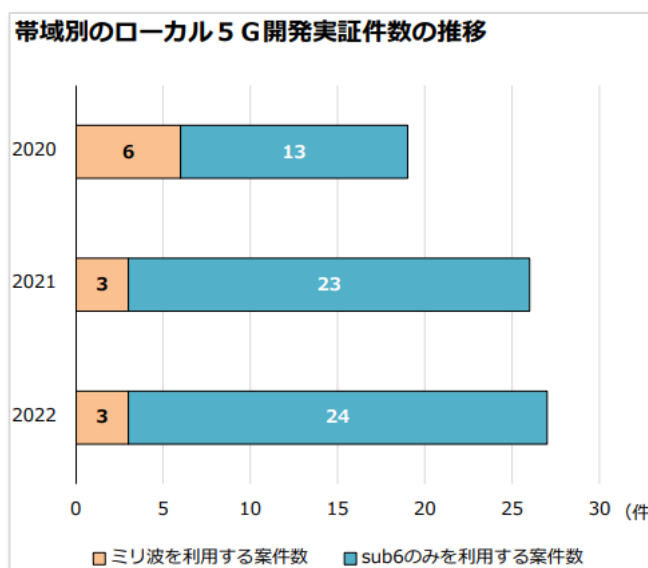


Fig.7.2-2 ローカル5G開発実証件数の推移 [1]

7.2.2 ミリ波における状況（実態）

これまで触れてきたように、最初の制度整備から3年を経過したローカル5Gは、一定程度の普及は進んでいるものの、その数はまだ十分とはいええず、大半はsub6に集中しておりミリ波については伸び悩んでいるのが現状である。

世界各国における5Gのインフラ整備がローバンド、ミッドバンド、sub6を中心に進んでいることや、国内の携帯電話事業者のミリ波整備がまだ十分でないこと等、影響を受ける要因は数多く考えられる。以降、ローカル5G固有で考えられる「ミリ波の普及が進まない要

困」を整理した。

【エリア構築が難しい】

直進性が強く、遮蔽物等の影響を受けて遠くに伝わりにくいため、建物内や敷地内でのエリア構築（置局設計）が難しい。例えば屋外置局であれば、建物間の通路方向（見通し）に沿ってカバーエリアは広げられるものの、建物の陰に入ると基地局から数10メートル程度の距離でもエリア化が難しくなる。また屋内置局では、1基地局で複数フロアのエリア化は難しく、1フロアであっても廊下に沿ってエリア化する場合、基地局近傍の部屋を除き、複数室のエリア化には難がある。

【NSA方式が主流で複雑、高コストであった】

sub6の無線設備ではSA方式が主流であるのに対し、ミリ波はNSA方式が主流であったため、システム構成が複雑となり、比較的高価なローカル5G設備に加えて、4G設備のコストもかかっていた。（今後は携帯電話事業者が実装し始めているNRDCがローカル5Gにも適用されることが期待される）NSA方式でアンカーバンドとして利用する4Gには、1.9GHz帯TD-LTE（sXGP）、自営等BWA、地域BWA、全国BWA、全国4Gがあるが、自営等BWAは同一の周波数帯を利用する地域BWAとの電波干渉の問題により、特に都市部では屋外の利用が難しい。

【対応端末が少なく、高コストである】

ミリ波対応の5G端末（産業用ルータ等）が少なく、価格も高い。そのため、Wi-Fiに変換する中継器としての活用が大半となり、結果としてローカル5Gの必要性が薄れるケースがある。表7.2-1にローカル5G対応端末の状況を示す。

Table 7.2-1 ローカル5G対応端末の状況（2023年3月の調査による）

メーカー名	型番	端末タイプ	対応周波数	
			ミリ波	sub6
Compal	Raku Plus	モバイルルータ	○	○
	5G Dongle	USB Dongle	—	○
京セラ	K5G-C-100A	モバイルルータ	○	○
FCNT	FMP181L	スマートフォン	○	○
	SD01	スマートフォン	—	○
	BZ03	スマートフォン	—	○
NECマグナス コミュニケーションズ	FG900CS	モバイルルータ	—	○
Nokia	FastMile 5G Gateway 3.2	モバイルルータ	—	○

富士ソフト	+F FS050W	モバイルルータ	—	○
-------	-----------	---------	---	---

【sub6制度化以降、ミリ波は後回しの感がある】

sub6帯の制度整備が行なわれた2020年12月以降、開発メーカ・ベンダは、ミリ波よりもエリア設計がしやすく、SA方式のシンプルな構成で開発も比較的容易なsub6の製品化にシフトしているため、ミリ波対応の優先順位が下がっている。

【ミリ波の超広帯域を活かすユースケースにたどり着かず、ビジネスにも結びつきにくい】

sub6の利活用に傾倒している状況もあり、ミリ波を活かす発想にまで至らず、sub6の仕様の範囲で設計等の検討が行なわれているのが実態である。

以上のようにローカル5Gのミリ波の普及が進まない要因が考えられる一方で、例えば、屋外でも利用可能なsub6は最大100MHz幅であるため、4Kカメラのような映像を扱うIoT機器を多数導入するケースであれば、400MHz幅を確保できるミリ波の方が、1基地局の収容力や運用面では確実に有利となるが、見落とししやすい点でもある。

こうした視点も踏まえ、我が国の5G普及の一翼を担うローカル5Gとしては、sub6に対するミリ波の特徴や活かし方を全ての関係者が正しく理解できるよう、今後も継続した情報提供や発信が必要と考えられる。

7.3 ミリ波とローカル5Gの親和性

ローカル5G活用の基本は、自らの建物や敷地内でスポット的にエリアを構築し、多様なニーズに応じて個別に柔軟に運用できることである。比較的狭いエリアで、多数の端末が同時に密に使われることも想定されることから、超広帯域が扱えるミリ波は、電波の特徴も含めて、ローカル5Gとの親和性がとても高いといえる。

以降、3つのポイントで示す。

7.3.1 エリア規模と電波特性（ミリ波のカバーエリアと相性がよい）

限られたエリアで活用するローカル5Gは、ミリ波のカバーエリアで相性がよいといえる。

一般的な解釈では、ミリ波は直進性が強いいため遮蔽物等に弱く、降雨や降雪等の影響も受けやすい。また伝搬距離においては、街なか等の見通しの悪い環境であれば100～200m程度が現実的な距離となり、確かによく飛ぶとはいえない。

一方、ローカル5Gの実際の活用を目を向けると、Fig.7.3-1に示すように比較的狭いエリアでの利用が多くなる。例えば、建物内（屋内）の利用であれば、外への電波の漏れを抑えたいので、遮蔽に弱いミリ波には好都合である。工場等の事業所敷地内でローカル5Gを利用する場合も、屋外における敷地外への電波の漏れを抑えるのに、ミリ波はsub6よりもコ

ントロールがしやすいといえる。また、スーパーシティやスマートシティなど“まちづくり”の取組みでは、例えばスマートポール等を用いて街なか(まちなか)に安心安全な通信拠点をスポット的にエリア限定で設けたい場合にも、やはりミリ波が適している。

ローカル5Gでは、誰もが自分の場所で自分専用の5Gを整備できるが、お隣同士で漏れた電波がお互いに問題を起こさないよう配慮する必要がある。sub6はミリ波よりも伝搬距離が長くなるが、その代わり、外に漏れる電波も大きくなる。sub6に比べて伝搬距離の短いミリ波は、特に密集した場所で扱うには好都合であるといえる。



Fig.7.3-1 “街なか”等の様々な場所で多様な活用が期待されるローカル5Gのイメージ [2]

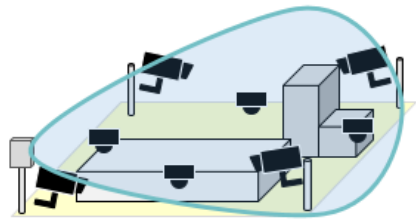
7.3.2 通信容量と通信需要 (高速大容量で相性がよい)

限られたエリアで活用するローカル5Gは、比較的狭い空間で数多くの端末が利用される可能性があることから、大容量を確保しやすいミリ波との相性がよいといえる。

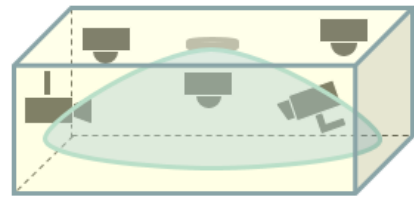
ローカル5Gのミリ波帯は、900MHz幅の帯域が割当て用に確保されており、全国5Gと同様に400MHz幅の運用が可能であるが、400MHz幅を2波まとめることで、合計800MHz幅の超広帯域の運用も技術的に可能となっている。

例えば、Fig.7.3-2に示すような、4Kカメラによる映像監視をリアルタイムで行なう場合、カメラ1台でアップリンク(上り)に20~25Mbps程度の伝送レートを想定すれば、10台の運用では200Mbpsを超えることになるが、sub6の100MHz幅(64QAM、2×2MIMO、同期運用)では、ほぼ上りの通信容量を使い切ってしまう、それ以外の5G機器の利用が難しくなる。

一方、ミリ波の400MHz幅(64QAM、2×2MIMO、同期運用)であれば、アップリンクで800Mbps程度の通信容量が確保できることから、さらに4Kカメラを追加する、あるいは別の5G機器を多数混在させて利用する余裕がある。5Gといえばスマートフォン等のダウンロード速度に注目されがちであるが、施設等の状態の監視やデータ収集などデータを常時リアルタイムに送信するアップリンク重視の運用も想定されるローカル5Gでは、下りだけでなく上りの通信容量も重要なポイントとなる。



工場/事業所等の施設内(敷地内)



建物内(商業施設、ビルの1フロア等)

Fig.7.3-2 ローカル5Gで4Kカメラによる映像監視をする場合のイメージ

実際のカメラ運用では、sub6の5G基地局設備で確保できる伝送容量に対して、カメラの画質や画角、フレームレート、伝送レート、あるいは圧縮方式等を調整することで必要な運用台数を確保する事前の検討や設計が想定されるが、ミリ波であれば、そのような工夫にも余裕を持って柔軟に対応することが可能となるだろう。

なおローカル5Gでは、こうした上り通信を重視した運用向けに「準同期TDD運用」が制度化されており、ミリ波においては、同期運用（上り1：下り3の比率）に対してアップリンク容量が2倍の準同期運用（上り1：下り1の比率）が可能となっている。^{※3)}

またローカル5Gでは、ミリ波の周波数帯（28.2～29.1GHz）における利用条件を正しく理解しておくことも必要である。前述のとおり、ミリ波帯はKa帯衛星通信システムと共用する点から、ローカル5G基地局のアンテナについては、水平よりも上空に向けて設置することが制限されている。また、28.2～28.45GHzの250MHz幅については、屋内屋外を問わず利用が可能であるが、28.45～29.1GHzの650MHz幅では屋内での利用が推奨される。これは、通信衛星と通信する地球局（地上の無線基地局）からの影響をローカル5G基地局が受ける可能性があるため、ローカル5Gが衛星システムに障害を与えるというわけではない。ただし、地球局の運用状況（場所、高さ、アンテナ方向等）によって影響の有無や程度も変わることから、屋外での利用は任意であるものの、理解と注意が必要である。^{※4)}

このように、超広帯域の運用が可能なミリ波のローカル5Gは、単に通信速度が速いということではなく、高い伝送レートを要求する5G端末が扱いやすいこと、また、そうした5G端末も含めて多種多様で多数の同時接続にも対応しやすいことから、利用するローカル5Gエリアで、必要な通信容量に応じて、ミリ波とsub6の使い分けや組合せを効果的に取り入れていくことが、今後のミリ波の利活用促進のポイントになると考えられる。

※3) 準同期TDD運用では、アップリンク容量が増える代わりにダウンリンク容量が同期運用よりも少なくなるので、ダウンリンク重視の利用には向かない場合がある。また、同一の周波数を利用した同期運用のローカル5G免許人が隣接など近隣に存在する場合は、電波の干渉による通信障害が生じる可能性がある。準同期TDD運用は同期運用に通信障害を与えてはならない“保護する立場”にあるため、特に準同期TDD運用を屋外で利用する場合

には、周囲への影響に気を配る必要がある。

※4) 地球局とローカル5Gの共用検討については、最も送信電力の大きな地球局タイプについて、最も条件の厳しいケースでローカル5G基地局への影響を検討した結果に基づいている。また、総務省が実施している電波の利用状況調査（2020年6月時点）によれば、周波数割当計画で分配されている隣接周波数帯（28.5-29.1GHz）の一部を使用する当該“地球局”の無線局は38局（固定設置型20局、可搬型18局）となっており、常時運用しているものは固定設置型の2局のみであり、それ以外は災害時やイベント時等での不定期の運用となっている。なお、特に干渉の影響を受けやすい、アンテナ高が50mの条件で当該“地球局”が設置されるケースは現状、東京都の国内1か所に限られ、干渉影響の範囲も限定的であるが、将来的な置局の可能性を考慮する必要がある。[3]

7.3.3 システム規模がコンパクト（システム規模と超低遅延で相性がよい）

限られたエリアで活用するローカル5Gでは、システム全体を比較的コンパクトにまとめやすいことから、5Gの特徴である超低遅延が実現しやすく、ミリ波との相性がよいといえる。

ローカル5Gのシステムは全国5Gのシステムと同様に、5Gコア設備と基地局設備（RAN）で構成される。ミリ波においてはNSA方式を主体に構成されることから、アンカーバンドの4G設備も合わせて整備することになるが、Fig.7.3-3に示すように、コア設備も含めて自前の構築を想定すれば、その設備はローカル5G整備エリア内に設置されと考えられる。このような構成であれば、5G基地局と端末の間の無線区間だけでなく、RAN設備と5Gコア設備の間も物理的に近くなることで、データ処理がローカル5Gエリア内で可能となり超低遅延が実現しやすくなる。

また、近い将来ではアンカーバンドの5G化も考えられることから、ローカル5Gではsub6がその役目を担う期待が想定される。5Gコアについては、自前で構築する場合とクラウドコアを利用する2つの形態が想定され、いずれにおいてもローカル5Gエリア内でデータ処理が行なえれば、超低遅延が期待できる。

一方で、システム全体の規模感がローカル5Gエリア内ということであれば、セキュリティ対策も容易になる。例えば、インターネットなど外部ネットワークへの接続がなければ安全な運用は容易に実現できるが、インターネット接続と併用したい場合には、特定のネットワーク（一部の端末のグループ）のみ外部との接続を遮断する『閉域網』を設定することで、必要に応じて柔軟に安全な環境を得ることも可能である。

システム規模がコンパクトであることは、Open RANの採用や導入についても有利に働きやすい。一般的な想定としては、Open RAN仕様に準拠した複数ベンダのRAN機器を効率よく組み合わせる運用が考えられるが、その分、設備の運用管理面ではベンダ毎の機器管

理も必要となる。小規模なシステム構成が想定されるローカル5Gであれば、全体を単一ベンダのOpen RAN機器で構成することも考えられ、選定時の導入コスト削減や設備の運用管理面等でメリットが期待できる。

こうしたシステム規模に関わるメリットや親和性は、ミリ波に限ったことではなくsub6も同様に当てはまる。加えていえば、Fig.7.3-3に示したミリ波におけるNSA方式は、さらに将来に目を向ければSA方式への移行も考えられる。ミリ波とsub6を組み合わせるミリ波接続時の安定性や更なる大容量化等を実現するDC（デュアル・コネクティビティ）も可能である。ローカル5GのDCでは、sub6エリアを主体に一部をミリ波で増強・補強するといった活用が考えられるが、見方を変えれば、超広帯域のミリ波を主体に、その隙間をsub6でつないでいくことで、ミリ波エリアの接続の利便性と安定性を確保する、という考え方もできるだろう。

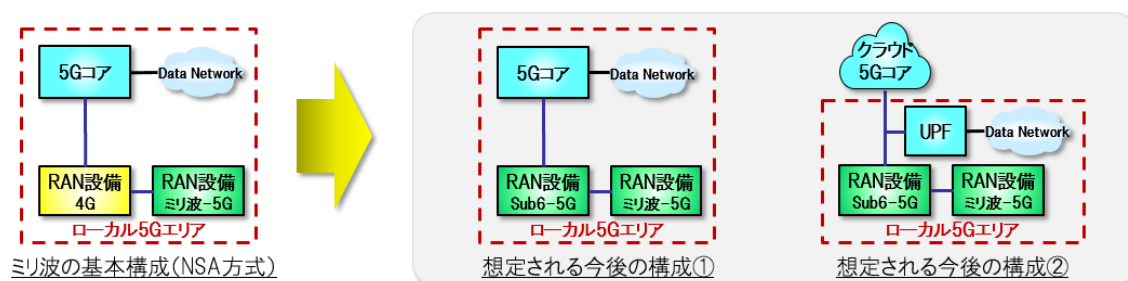


Fig. 7.3-3 ローカル5Gのミリ波におけるシステム構成例

ローカル5Gは、制度が開始されて3年を経過し、これまでに一定程度の導入は進んでいるといえるものの、まだ普及には至っていないのが実態である。5G-SDC（5G利活用型社会デザイン推進コンソーシアム）の調査『ローカル5Gの市場調査レポート（2023年1月17日）』によれば、本格的な普及期は2025年以降と予測している。[4]

今後も、当面はsub6を中心に導入が進むものと想定されるが、屋外で利用可能な帯域幅は100MHzと限られており、普及とともに基地局当たりの端末数が増加すれば、通信容量の不足が生じることは容易に想像できる。

ローカル5Gの本格的な普及期に向けて、ミリ波に割り当てられた900MHzの帯域幅が各々の社会活動で有効に活用される未来を目指し、引き続き、ミリ波が導入しやすくなるよう業界全体で早期に備えていくことが必要である。

参考文献

- [1] 総務省, デジタル変革時代の電波政策懇談会 5G ビジネスデザインワーキンググループ (第1回) 配布資料より (2023年1月24日)

https://www.soumu.go.jp/main_content/000857640.pdf

- [2] 総務省,情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会(第12回)委員会報告(案)
資料(ローカル5G関係)より一部を利用(2019年4月12日)

https://www.soumu.go.jp/main_content/000614449.pdf

- [3] 総務省,情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会(第18回)委員会報告(案)
資料(ローカル5G関係)より(2020年7月6日)

https://www.soumu.go.jp/main_content/000697370.pdf

- [4] 5G利活用型社会デザイン推進コンソーシアム(略称:5G-SDC),ローカル5G関連市場調査レポートより(2023年1月17日)

<https://5g-sdc.jp/>

8 ミリ波ユースケース

GSMAのレポートでは、ミリ波の主なユースケースとして「人の集まるスタジアムなどの施設での大容量高速化（eMBB）」、「FWAによるFTTH代替」、「法人専用ネットワーク」の3つのカテゴリを挙げている。本章では、3つのカテゴリに分け、ユースケースを記載する。

なお、「3章 ミリ波普及の課題」に記載のとおり、現状の多くのユースケースはsub6の性能でも満足できる状況であるが、今後のユースケースの高品質化等により、ミリ波の高速・大容量、低遅延の高い性能を求めるユースケースになり得ると考える。

8.1 eMBB

スポーツスタジアムやコンサート会場、空港などの人の集まるエリアでミリ波を活用することで、高速大容量通信を必要とするアプリケーションによる新たな価値提供の実現や、ローバンド、ミッドバンドの容量補完が期待される。eMBBに係るミリ波のユースケースの例について以下に記載する。

8.1.1 エンターテイメント

● NFL決勝戦での限定体験[1][2]

スタジアムとその周辺のエリアに169のsmallセル、4つのmacroセル、24の屋内システムを展開し、Cバンド、ミリ波を活用したエンターテイメント体験を提供。最大7つのカメラアングルに対応したライブ映像やリプレイ映像、ARを用いた選手の統計情報、SNSアプリを用いた現地のファン間の同時体験型ARゲーム等を提供。

● サッカーにおける新たな観戦体験[3]

「豊田スタジアム」のメインスタンドに「5G体感シート」を設置し、各座席に備え付けられたスマートグラスや5G対応スマートフォンを通じて、AR空間上に各選手のシュート数やパス数などのサポート情報を表示することで観客へ新たな体験価値を提供。

● 劇場での限定体験[4]

台湾のNTCH（国立コンサートホール）の敷地内に32のミリ波smallセルを設置し、1.4万平方メートルのカバレッジのプライベート5Gを構築。複数のアングルと場所から撮影された高画質ライブストリーミング配信や、屋外に設置された大型4Kディスプレイへのライブ映像中継、公演の演出を再現したメタバース、現地とオンラインの観客が交流できる没入型/インタラクティブ/多視点の演劇体験を提供。

● ARグラス向け個別最適サイネージ[5]

ARグラスを装着するユーザが街を歩くと、画像認識やマーカー認識によってグラス上に

個別最適された広告を表示。クラウドに登録された利用者の趣味嗜好情報と、店舗がプロモーションしたい内容をマッチングして該当する映像を表示。利用者の求めるプロダクト、グルメなどをタイムリーにプロモーションすることで店舗誘導を促す。

8.2 FWA

FTTHの整備が限定的なエリアなどにおいて、FTTHの代替手段として5G FWAを活用することで経済的かつ迅速な展開が期待される。FWAに係るミリ波のユースケースの例について以下に記載する。

● 都市部等におけるFWAの提供[6]

都市部等でモバイル向けに整備された3.7GHz、28GHz、39GHzの5Gネットワークを活用し、FTTHの代替としてFWAサービスを提供。モバイル向けに既に整備されたネットワークを活用することで、効率的にサービスを提供する。

● ルーラル地域におけるFWAの提供[7]

ルーラル地域におけるデジタルデバイド解消に向け28GHz、39GHzを用いたFWAを提供。300Mbpsの通信速度で提供（最大1Gbpsは可能だが、樹木や天候影響を考慮）しており、FTTHと比べて40%のコスト低減が可能と試算されている。

8.3 Enterprise Networks

企業社屋や製造工場などでは、同時アクセス数やULトラフィックが多いユースケースが想定される。このような場所でミリ波を利用することで、多数の機器の同時接続およびULの大容量化が期待される。また、ミリ波の特徴である遮蔽物による減衰を逆手に取り、ミリ波を用いることで、機密性の高い閉域NWの運用も期待される。Enterprise Networksに係るミリ波のユースケースの例について以下に記載する。

8.3.1 製造業

● 遠隔地から機械の故障箇所を共有[8]

機械の保守作業に際し、経験が浅い保守要員はマニュアルだけでは正しい判断が出来ず、電話で指示を仰ぐ必要があり、ユーザの機械の復旧が遅れていた。遠隔地からスマートグラスを通してリアルタイムに故障箇所の情報共有をすることで、保守作業の品質向上やユーザ企業の生産復旧の早期化など、大きな効果が得られた。

● フラッシュメモリ製造工場での品質管理[9]

半導体製造工場にローカルエッジコアを備えた5Gミリ波ソリューションを展開。最大2Gbpsの広帯域と超低遅延により、高解像度で没入型のAR/VRグラスを用いた運用・保守やチップの自動ビジュアル検査などの画像ベースの品質管理に関するアプリケーションの実

証が行われた。

- **4K映像を活用した安定操業・スマートファクトリー化[10]**

工場内に生産ラインを監視する高精細ITVカメラと5G基地局を設置し、カメラにより撮影された4K映像を5Gで伝送することで、蓄積される映像と各種トレンドを同期化して分析できる仕組みを構築。映像は管制室の4K対応モニターからリアルタイムでも確認することができるようになる。将来的には、映像と各種トレンドを踏まえたAIによる各種品質判定などを旨とする。

8.3.2 自動車

- **自動運転への活用[11]**

自動運転などの研究開発を行うテスト路において、5G環境を整備し、高精細車載カメラや路側センサーなどから取得する映像や周辺情報を利用することで、車両とその周辺状況をより効率良く把握するシステムの検証を実施した。将来的には、自動運転など多種多様なデータを優先度に応じて通信する必要がある分野において活用が期待される。

8.3.3 医療

- **医療研究施設への導入[12]**

ミリ波とMECを導入し、リアルタイムのデータ分析による意思決定支援や、専用帯域幅の確保による3D腫瘍画像などの巨大なデータファイル転送、多数のIoT機器、センサーの安定的な通信を実現。

- **病院間で高精細映像を伝送[13]**

MECによる高セキュリティな閉域網を利用し、医療機器のデータやカメラの高精細映像を高速・大容量の5G通信で、遠隔地にある県立病院の間を伝送することが可能。5G遠隔医療支援システムの活用により、例えば診療のため遠隔地へ出向いていた専門医と患者双方の移動時間が軽減され、各地域で都市部と同等の医療を受けられるようになる。

- **除菌作業をロボットが代替[14]**

人的リソースが圧迫していた感染症対策のための除菌作業の一次対応を、殺菌灯を搭載したロボットが代替することで、医療従事者の身体的・精神的負担を軽減。

また、ロボットの導入により、より適切なタイミングで院内の殺菌を実施することができ、効率よく、よりリスクの少ない医療環境を提供できる。

8.3.4 メディア

- 可搬型高品質映像伝送装置による報道・スポーツ中継[15]

リュックの中に映像伝送装置とバッテリーを入れ、カメラを肩に担いで撮影。映像伝送装置は、マルチキャリアの複数SIM挿入し最適なミリ波をキャッチしバルク伝送することで高品質な映像伝送を可能。

参考文献

- [1] Verizon returns to Super Bowl to spotlight new 5G Internet expansion
<https://www.verizon.com/about/news/verizon-super-bowl-new-5g-internet-expansion>
- [2] At Super Bowl LV, 5G Will Change the Game
<https://www.pcmag.com/news/at-the-super-bowl-5g-gives-you-7-ways-to-view-the-action>
- [3] 名古屋グランパスのホーム開幕戦から豊田スタジアムを「au 5G」化
<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2020/02/20/4281.html>
- [4] How 5G is transforming live theatre
<https://www.gsma.com/5GHub/images/5G-Case-Study-Smart-Theatre-digital.pdf>
- [5] ZEPPELIN が電通デジタル、KDDI と業務提携。AR プラットフォーム「ARaddin」提供開始
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000010.000036631.html>
- [6] Verizon expands 5G Home Internet and mobility to more customers | About Verizon
<https://www.verizon.com/about/news/verizon-expands-5g-home-internet>
- [7] UScellular Fixed Wireless Access
<https://newsroom.uscellular.com/download/1133910/uscellular5gfixedwirelessaccess.pdf>
- [8] 製造業向けソリューション | docomo 5G | ドコモビジネス | NTT コミュニケーションズ 法人のお客さま
<https://www.ntt.com/business/lp/5g/solution/production.html>
<https://news.gm.com/newsroom.detail.html/Pages/news/us/en/2020/nov/1120-factory0>
- [9] Singtel partners Micron to deploy commercial 5G millimetre wave solution at its largest facility – a first in Singapore and for the semiconductor manufacturing sector
<https://www.singtel.com/about-us/media-centre/news-releases/singtel-partners-micron-to-deploy-commercial-5g-millimetre-wave>
- [10] JFE スチールと KDDI、4 月から製鉄所に 5G を導入
<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2020/03/17/4319.html>
- [11] デンソーと KDDI、安心・安全なモビリティ社会の実現に向け自動運転に 5G を活用する共同検証を開始
<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/03/03/4990.html>
- [12] Private 5G Network from AT&T Now Connecting Researchers and Patients at Lawrence J. Ellison Institute for Transformative Medicine of USC

https://about.att.com/story/2021/5g_ellison_institute.html

- [13] 医療向けソリューション | docomo 5G | ドコモビジネス | NTT コミュニケーションズ 法人のお客さま

<https://www.ntt.com/business/lp/5g/solution/medical.html>

- [14] ロボティクスソリューション | docomo 5G | ドコモビジネス | NTT コミュニケーションズ 法人のお客さま

<https://www.ntt.com/business/lp/5g/solution/robot.html>

- [15] LU800 – LiveU

<https://www.liveu.tv/ja/products/create/lu800>

9 ミリ波普及に向けた既存のソリューション

ミリ波の普及を推進する上では、ネットワークを構成する機器、その機器を開発・製造するにあたってデバイス、測定器が十分調達可能な状況であることが重要である。本章では、端末、基地局、アンテナ、測定器等のソリューションについて実例をもとに紹介する。

9.1 端末

ミリ波をサポートしている端末は、2022年12月の時点で65を超すメーカーから、170以上の製品が発売されている。端末の種類としてはスマートフォン、PC、IPカメラ等のIoTデバイス、モバイル無線LANルーター、モジュール、CPE (Customer Premises Equipment)、FWA等がすでに利用可能である。ミリ波をサポートするスマートフォンは、現在のところ上位機種が主流であるが、徐々にサポートする端末の種類は多くなってきており、今後中位機種にも広がるのが期待されている。ミリ波は一般ユーザだけでなく、プロユースケースで利用することも重要となる。そのため、プロ向けのインターフェースとしてHDMI端子を搭載し、高画質の映像伝送に対応するスマートフォンもある。

ミリ波は指向性が非常に強いため、端末を向ける方向によって電波強度が大きく異なることがある。端末の受信では、どの方向からのミリ波の信号も受信が可能なように360°にわたる電波環境を把握・記録することにより変化する受信環境に動的に対応する機器や、AIを活用したBeam Managementを行う機器もあり、変化する環境や障害物に対応することが可能になっている。また、どの向きに端末を向けるとミリ波を受信しやすいかアシストするアプリを搭載するスマートフォンもある。

9.2 基地局

ミリ波はその電波伝搬特性の関係から、伝搬距離を稼ぐためには高い実効輻射電力(EIRP)が必要となる。既に60dBm以上の基地局も市場に出ており、商用ネットワークでCPE端末との間で10km離れても下りスピード10Gbpsが達成されている。基地局の高EIRP化とともに小型軽量化低消費電力化も同時に進んでいる。広い周波数割当てにも対応できるように広帯域幅化も進んでおり市場では既に連続800MHz幅、非連続1.4GHz幅(Frequency separation class III対応)の基地局も調達可能となっている。また、一定のカバレッジを確保するためには多くの基地局の設置を必要とする。このため、小型化された基地局は場所を問わず必要な場所へのフレキシブルな設置が可能となり、ミリ波展開における重要な役割を担う。街灯に簡単に設置することに特化した小型基地局も存在する。また、ミリ波は遮蔽損が大きく、屋外に設置した基地局から屋内のカバレッジをサポートすることは一般的に困難であるため、屋内に特化した基地局も準備されている。

端末向けモデムRFの設計資産を流用し、SoC化、モジュール化により小型化、低コスト化、低消費電力を実現した基地局向けモデムプロセッサが登場してきている。

ORANに対応したミリ波のRU(Radio Unit)は小型・軽量・低消費電力を実現し、内蔵し

たアンテナ装置によりビームフォーミングをサポート、製品によってはSub 6とミリ波のデュアルバンド構成のものもある。また、無線部(RU)、制御部(CU/DU)の一体化により小型化を実現した製品も実現され迅速なネットワーク構築が可能になっている。

9.3 アンテナ・デバイス

日本で割り当てが行われているミリ波は28 GHz帯であるが、世界的には26 GHz、39 GHz、41 GHzが利用可能な地域も存在する。これらの周波数帯を一つのアンテナモジュールで対応できる製品も存在し共通のデバイスが利用できるようになっている。また、樹脂多層基板をL字型に形成し、別方向を向く2面の基板にそれぞれアンテナを配置することで、1個のRFICで2方向への電波放射を可能にしたアンテナモジュールも製品化されており、安定したミリ波無線通信を実現し、通信部品の点数減による端末の薄型化、製造コスト削減に貢献することが期待される。

安価で量産可能なシリコンCMOS集積回路チップにより実現したミリ波帯フェーズドアレイ無線機が開発され、高周波信号の位相・振幅ばらつき・補償機構により、高精度に電波の指向性を制御することが可能となっている。

9.4 測定評価機器

測定評価機器やシミュレーターが必要となるのはRFICの開発時、それを組み込んで作り上げた機器の評価時、および運用しているシステムの実性能確認、検証時である。

FR2の評価では端末からRU(gNB)間の物理層に対応できるマイクロ波送受信機能をもった機器が必要となるが、様々なメーカーからすでにそれぞれの測定分野に向けて用意されている。

9.4.1 FR2 端末の性能試験

FR2での端末のRF試験は通常ケーブル、コネクタ接続が困難なためOTAで行われる。

3GPPのOTA試験はTS38.521-2で規定されている。この測定には、疑似的に基地局からの無線信号を端末に向け発生させるgNBエミュレータ、必要に応じて伝送空間特性を疑似的に作成させるチャネル・モデル・エミュレータ、数GHzからFR2の周波数へ変換するラジオ・ヘッドおよび電波暗箱などが必要となる。なお、5章の測定評価ではこの機材を使った端末の特性評価が記述されている。

9.4.2 FR2 エリアテスト

RFICや機器の開発と違い、実使用条件で期待通りストレスなく端末が動作するか検証する必要のあるオペレータ、システムインテグレータにとっては、実運用動作時の基地局との通信のやりとりのログを記録、解析できる機器が求められる。各社からそれぞれ特徴のある製品がリリースされている。これは携帯電話や通信機器に専用のソフトウェアを入れ、動作

状況でのログを記録、解析するツールである。評価に使う端末がFR2をサポートしていれば、接続状況に応じて例えばアンカーLTE, FR1およびFR2の端末、基地局間での通信ログの同時記録、解析が可能である。

9.4.3 電波環境のモニタ

Local 5Gなどの置局、サービスを行うシステムインテグレータ、サービスプロバイダーにとって信頼性を担保するためには現地での電波環境調査が事前、および運用時重要である。しかし5Gの展開と運用では、干渉信号の分析がより複雑になる。これは、信号がバーストやパルスで現れる傾向があり、トラフィックに依存するためである。掃引速度が遅く、デッドタイムの予想が難しいため、従来のスペクトラム・アナライザでは抜けなく捉えることができないこともある。また、キャリア信号が干渉信号をマスクするため、検出が困難な場合もある。これらの問題を解決するには、リアルタイム スペクトラム アナライザ (RTSA) を備えたシグナル アナライザが有効である。リアルタイムスペクトラムアナライザは、スナップショット高速フーリエ変換 (FFT) 技術を使用して、データのサンプリング、計算、および処理を同時に行う。現場でのトラブルシューティングに適した電池駆動可能な可搬型の製品においても、100MHz以上のリアルタイム帯域をもつ製品がすでに市場にリリースされている。基地局設置や保守運用点検では、3GPPに準拠したRF分析ツールが利用されている。ミリ波に対応するUEシミュレーターも準備されており、基地局、ネットワーク試験が可能となっている。

おわりに

将来の継続的な社会発展や持続可能な社会の実現に向け、5Gのニーズはより多様化し、高性能化の要望が高まることは明白である。それを実現する上で、5Gから新たに導入された周波数帯であるミリ波の普及は4Gからの明確な性能差をもたらすキーであり、喫緊の課題である。5Gモバイル推進フォーラム（5GMF）内に設立されたミリ波普及推進アドホックにて作成された本白書では、ミリ波普及に必要な検討や情報を網羅的に盛り込んだ。そもそもなぜミリ波が必要なのか、ミリ波はなぜ普及していないのか、その現状と課題をとらえた上で、課題を解決可能な技術やユースケース、導入シナリオ、利用可能なソリューションに関する情報を盛り込んだ。さらに国内で工場・施設内における利用が期待されるローカル5Gとミリ波との親和性にも着目し、その相乗効果による普及推進にも言及した。

ミリ波普及推進アドホックとしてはこの白書を元に、ミリ波の普及に向けた活動を精力的に進める所存である。5Gやローカル5Gに関わる企業、団体の方々にはもちろん、5Gの導入による業務の効率化や事業拡大を検討されているあらゆる業界の方々にも本白書を参考として頂きたい。本白書でミリ波普及に利する技術やソリューションの情報も盛り込んでいるが、それらを着実に社会実装するには訴求活動だけでなく、積極的・戦略的なミリ波エリア構築、さらなるコスト削減、機器の性能向上、新たなユースケース開拓に向けた技術開発が必要である。6Gに向けてもミリ波は重要な周波数資源であり、サブテラヘルツにおよぶ周波数開拓上もミリ波のソリューション、実装・運用から得られるフィードバックは重要なベースラインとなる。そのために、企業やアカデミアの将来の通信技術の研究開発に携わるの方々にも着目頂きたい。

ミリ波普及推進アドホックでは今後も引き続き検討を進め、白書の内容をアップデートする予定である。本白書を読まれた方々からご意見、ご感想、ご要望、情報提供を頂ければ幸いである。

付録（ミリ波普及に向けた既存のソリューション 参考情報リンク一覧）

端末ソリューション例

<https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x65-5g-modem-rf-system>

<https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x70-modem-rf-system>

<https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x75-5g-modem-rf-system>

<https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/smartphones/snapdragon-8-series-mobile-platforms/snapdragon-855-mobile-platform>

<https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/smartphones/snapdragon-8-series-mobile-platforms/snapdragon-870-5g-mobile-platform>

<https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/pcs-and-tablets/snapdragon-8-series-mobile-compute-platforms/snapdragon-8cx-gen-2-5g-compute-platform>

<https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/pcs-and-tablets/snapdragon-8-series-mobile-compute-platforms/snapdragon-8cx-gen-3-compute-platform>

<https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x62-5g-modem-rf-system>

<https://www.nokia.com/networks/technologies/mmwave-fwa/>

<https://xperia.sony.jp/xperia/xperiapro/>

基地局ソリューション例

<https://www.fujitsu.com/global/products/network/solutions/5gran/>

https://jpn.nec.com/nsp/5g_vision/o-ran.html

<https://jpn.nec.com/nsp/5g/local5g/product.html>

<https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/mmwave-radio/>

<https://www.nokia.com/blog/nokia-fixes-mmwave-wireless-access/>

<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2021/06/08/nokia-qualcomm-and-uscellular-hit-extended-range-5g-world-record-over-mmwave/>

<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2021/10/12/nokia-gives-fixed-wireless-access-a-boost-by-enabling-5g-mmwave-indoor-installations/>

<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/06/21/nokia-and-elisa-achieve->

[over-2-gbps-5g-uplink-speeds-on-mmwave-with-qualcomm-solutions/
https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/10/18/nokia-5g-mmwave-fwa-technology-selected-for-nbn-fixed-wireless-broadband/](https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/10/18/nokia-5g-mmwave-fwa-technology-selected-for-nbn-fixed-wireless-broadband/)
<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/10/12/nokia-demonstrates-immersive-stadium-experience-with-5g-private-wireless-at-2022-tissot-uci-track-world-championships/>
<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/11/15/nokia-and-tpg-telecom-set-new-5g-uplink-speed-record-in-australia/>
<https://www.ericsson.com/en/small-cells/outdoor-coverage>
<https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/radio/small-cells/indoor/indoor-air-1279>

アンテナ・デバイスソリューション例

https://jpn.nec.com/press/201906/20190603_01.html
<https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/rf/qtm545>

測定器ソリューション例

<https://www.viavisolutions.com/ja-jp/products/oneadvisor-800-wireless-platform>
<https://www.viavisolutions.com/ja-jp/node/60033>
<https://www.viavisolutions.com/ja-jp/products/tmlite-network-tester#overview>
<https://www.keysight.com/jp/ja/product/S8711A/s8711a-uxm-5g-test-application.html>
<https://www.keysight.com/jp/ja/product/NTH00000B/nemo-handy-handheld-measurement-solution.html>
<https://www.keysight.com/us/en/cmp/use-case/5g-field-interference-hunting.html>