

# ローカル 5G の概要と研究動向

山崎悟史\*

## Overview and Research Trends for Local 5G

Satoshi Yamazaki \*

**Abstract:** Fifth-generation mobile communications systems (5G) operated by telecommunications carriers have been used all over the world. In Japan, local 5G has been institutionalized since December 2019. The local 5G is the system that allows companies and local governments other than telecommunications carriers to establish 5G systems on a spot area. Many social demonstrations using local 5G have been reported by companies and local governments. However, there is little literature described technical specifications and research trends for local 5G. This paper provides local 5G research trends and their relevance to the state-of-the-art in wireless communications including an overview of local 5G and mobile edge computing to realize 5G system.

Key Words: 5G, Local 5G, Mobile edge computing, Technical specifications, Research trends

### 1. はじめに

1979 年以降, 移動通信システムは約 10 年毎に世代を進化させて発展し, 2020 年 3 月から国内では第 5 世代移動通信システム (5G) による商用サービスが開始されている. 5G では, 4G までの超高速大容量 (enhanced mobile broadband, eMBB) に加え, 超高信頼低遅延 (ultra-reliable and low latency communications, URLLC), 極多数同時接続 (massive machine type communication, mMTC) の 3 つを特徴としている[1]-[4]. これらの特徴を活かして, 5G はモノのインターネット (Internet of things, IoT), 人工知能 (Artificial intelligence, AI) と相まって各産業を支える技術基盤として期待されている. 表 1 に (主にコンピューティングと AI を中心とした) 情報技術と (主に無線アクセスを中心とした物理層) 通信技術の対応と変遷を示す. 4G までは無線区間のみが最適化対象であったが, 5G 以降は End to end のネットワーク区間がそれとなる. この変化における重要技術が, 後述するネットワークスライシングとエッジコンピューティングといえる.

2019 年 12 月の電波法関連法令の制度改正によって, (NTT ドコモ, KDDI 等の通信事業者以外の) 企業や自治体などが 5G をスポット的に自営で構築可能な, ローカル 5G が制度化された[5]. これまではローカル 5G を用いた実証実験が多かったが, 今後はその社会実装が期待されている. ローカル 5G の普及は, これまでなかった“通信の民主化”を進め, 新たな通信技術, システム, サービスの創出に繋がると考えられ

る. 現状, 対応端末が限定的ではあるが, 2023 年 6 月に Apple 社が iOS/iPad OS 17 にてローカル 5G 対応を発表したことから, 今後ローカル 5G 対応端末が増加していくと考えられる. 一方, 国内で通信事業者が特定の企業や自治体のために管理・運用する専用の 5G をプライベート 5G といい, 現在, 例えば Softbank 社がサービス開始している. ドイツ, 米国, 英国, 台湾など海外においても, ローカル 5G に該当する同様の制度は存在し, 世界的には「プライベート 5G」という呼称が定着している.

これまでローカル 5G の実証事例は数多く報告されているが[6]-[8], 5G との関連や相違を含めたローカル 5G の技術仕様や, その研究動向を把握できるものは少ない. さらに昨今, 5G 関連について様々な略語が多用されており, 5G システム技術を一貫して理解するには, それらを整理する必要がある.

以上を鑑み, 本稿では 5G/ローカル 5G とそれらの実現に必須のエッジコンピューティングの概要を述べた後, ローカル 5G の研究動向についてサーベイする. 以降, 通信事業者 (通信キャリア) が運営する 5G を CSG, ローカル 5G を L5G と称す. 最後に, 付録として略語一覧を示す.

### 2. 5G/ローカル5Gの概要

#### 2.1 5Gの特徴

CSG 同様, L5G は前述した三つの特徴をもつ. それらについて概説する. 超高速大容量 (eMBB) の実現には, 4G で実現している OFDMA (Orthogonal frequency-division multiplexing access, 直交周波数分割多重化方式), 送受信に複数アンテナを用いるマルチユーザ MIMO (Multi input multi output) をベースにしている. 表 1 に示すように, 5G では 4G までのマルチ

Table 1 Progress for information and communication technology

	1980～	1990～	2000～	2010～	2020～	2030～
情報技術	メインフレーム、ワークステーション	PC, 携帯電話器 クライアント/サーバ(C/S)	スマートフォン Web, 3階層C/S	クラウドコンピューティング ビッグデータ, Web 2.0	エッジコンピューティング (MEC) Web 3.0 (メタバース)	量子コンピューティング
				第3次AIブーム 機械学習, Deep Neural Network	生成AI	
通信技術	1G アナログ方式, 音声通信 FDMA 周波数軸で多重化	2G デジタル方式, 音声通信 TDMA 時間軸で多重化	3G データ通信, ネット利用 CDMA 符号軸で多重化	4G 大容量データ通信(eMBB), マイクロ波 上り:SC-FDMA/下り:OFDMA 時間, 周波数軸で多重化/直交化 SDN, NFVで仮想化	5G eMBB, URLLC, mMTC, ミリ波 上下リンク:OFDMA, (NOMA) 電力軸で多重化/非直交化 ネットワークスライシング, vRANで仮想化	6G テラヘルツ波

アクセス方式を変更せず、周波数拡張（後述する高周波数帯の利用、周波数帯域幅の拡大）で容量増加を実現する。さらに、基地局（Base station, BS）側に多素子のアンテナを二次元に配置する Massive MIMO 伝送[9]がダウンリンク（基地局→端末）で実現される。これにより、アンテナ素子を増加させる程、ビーム幅を狭めることができ伝送距離の延長化や複数端末存在下における干渉低減が可能となる。さらに、高周波（Radio frequency, RF）回路が一系統で高速レートな MIMO 伝送を可能とする空間変調[10]は、RF 系と同期に関するコストの観点から送信アンテナ数に対する拡張性が高いため、大規模 MIMO システムへの親和性が高く、将来無線通信方式への適用が期待されている[11]。さらに、アップリンク（端末→基地局）を想定して、近似的メッセージ伝播法（Approximate message-passing : AMP）に基づく高性能かつ低計算量な復調法が提案されている[12]。

一般に移動体通信では、端末（User equipment, UE）が上り通信を開始する前に BS に対して Grant（Grant, 通信許可）を要求し、BS はリソースブロック（Resource block, RB）と呼ばれる無線リソースを UE に排他的に割り当てることによって通信を実現している。極多数同時接続（mMTC）を実現するために、無線リソースの割り当て無しで UE がデータを送信可能とする仕組み（Grant free access, GFA）や再送信の仕組みが検討されている。これらは、IoT 向けのセルラー LPWAN（Low power wide area network）規格である LTE-M（Long term evolution machine）等の拡張技術とみなせる。

超高信頼低遅延（URLLC）を実現するためには、複信方式として 4G で用いられていた FDD（Frequency division duplex）ではなく TDD（Time division duplex）を採用し、10 msec の無線フレームは 10 個の 1 msec のサブフレームで構成され、各サブフレームは 14 シンボルからなるスロットから成り、無線の最小送信単位（Transmission time interval, TTI）を短くすることで遅延の短縮を実現している。また、5G の RB の構成は 4G のそれに対し、送受信する 1RB あたりの周波数領域が  $N$  倍に拡大される一方、時間長が  $1/N$  に短縮され、低遅延化を可能としている。さらに、受信したデータと同じサブフレーム内で受信完了の ACK/NACK（Acknowledgement/ Negative ACK）を送信する仕組みも検討されている。さらに、エッジ

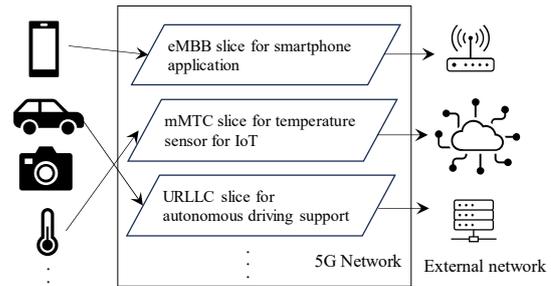


Figure 1 Concept of Network slicing in 5G

コンピューティングを用いて低遅延化を実現している。詳細は三章にて述べる。5G に割り当てられている周波数帯は 4G のそれより高く、日本では 3.7, 4.5, 28GHz 帯が割り当てられている。5G で高周波数帯を導入する主な理由は、第一に低周波数帯では無線システムとその無線局が多数存在するため、5G 向けに広い周波数帯域の確保が困難なためである。第二に高速・大容量通信を実現する上で、無線回路の設計・実現する上で重要となる比帯域（帯域幅/中心周波数）の適切な設定のために、高周波数化が必要となる。

## 2.2 ネットワーク仮想化

従来、ネットワークはデータ転送や制御を担う専用のルータやスイッチなどの通信機器で構成されていた。しかし近年、半導体などの各種デバイスの性能向上に伴い、大規模なネットワークを設計、構築、運用する際、ネットワークを構成する機器を、単一のソフトウェアによってサーバ側で集中的に制御し、ネットワークの構成や設定などを柔軟に、利用者に隠蔽された形で動的に変更可能とするソフトウェア定義ネットワーク（Software defined networking, SDN）なる概念が生まれた。さらに、SDN の発展として、仮想化技術を活用して通信機器のソフトウェア処理を汎用製品上で実現する概念（Network function virtualization, NFV）が生まれた。これら SDN や NFV は 4G 以降のネットワーク仮想化技術である。

先述したように 5G ネットワークでは、eMBB, URLLC, mMTC といった異なる要求条件を実現する必要がある。そのため、図 1 に示すように各要求条件に特化した論理的なネットワークをネットワークスライスとして独立に用意し、要求条件に応じてそれらを切り替えることによって、各々のサー

ビスを効率的に実現可能となる。この概念をネットワークスライシングという。ところで、移動通信システムは無線アクセスネットワーク (Open radio access network, RAN) とコアネットワーク (Core network, CN) の2つによって、UE/BS間で信号の送受信が行われている。5Gのネットワーク仮想化技術として、ネットワークスライシングはCN側に該当する。

RAN側の仮想化も進んでいる。汎用的なハードウェアや無線処理にカスタマイズしたハードウェアアクセラレータをベースに仮想化技術を無線BSに適用する取り組み、すなわちRANの仮想化 (virtualized RAN, vRAN) の取り組みが始まっている。さらに、多様なユースケースごとに求められる通信要件に合わせて、柔軟なネットワークを構築可能とするために、BS設備を含むRANをオープン仕様に基いて要素ごとに分離し、異なるベンダーの製品を組み合わせる利用できるO-RAN (Open RAN) が普及し始めている。O-RANの目的は異なるベンダー間での相互運用性の向上やベンダーロックインの軽減であり、日本の通信事業者が世界に先駆けて本格的な運用を開始したことから注目を集めている。

### 2.3 ローカル5Gの特徴

L5Gの主な特徴として以下が挙げられる。

- (1) 要求するシステム機能やネットワーク性能に応じて必要な通信性能を柔軟に設定可能となる。
- (2) 他の通信ネットワークにおける通信障害や災害などの影響を受けにくい
- (3) Wi-Fiなどの無線局免許不要な無線アクセスネットワークと比べて、無線局免許に基づいた安定かつ高セキュアな通信の提供が可能となる。

このようなL5Gは、地域における課題解決を始めとし、農業、製造業、建設業など幅広い分野における活用が考えられる。

C5Gとは別にL5G専用の周波数帯が割り当てられている。日本では、4.6~4.8GHz帯の200MHz幅、および4.8~4.9GHz帯の100MHz幅が割り当てられている。これらの帯域は6GHz未満の周波数帯であり、Sub6 (サブシックス) 帯と呼ばれる。さらに、ミリ波帯である20GHz (28.2~29.1GHz) の900MHz幅が割り当てられている。

### 2.4 準同期TDD

L5Gは2.1で述べたC5Gの技術仕様をベースとしている。技術面でC5GとL5Gの唯一の相違点は、L5Gは準同期TDDの運用が可能である点である。C5Gでは各BSに同一のTDDフレームパターンが用意され、また各BSの無線フレームの開始タイミングを同期させることによって、BS間の干渉低減を実現している。準同期TDDでは図2に示すように、C5Gの同期TDDとスロットタイミングを一致させたままで、上り/下りのスロットパターンだけを一部変更可能としている[5]。TDDではアップリンクとダウンリンクに割り当てるスロ

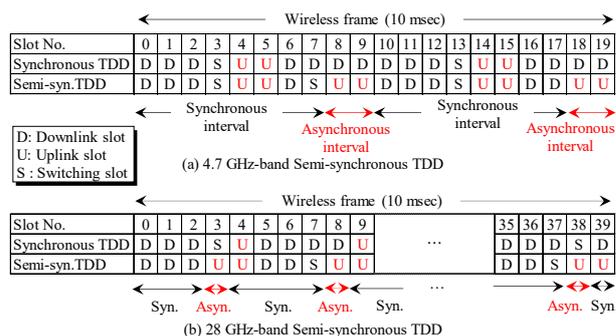


Figure 2 Semi-synchronous TDD frame

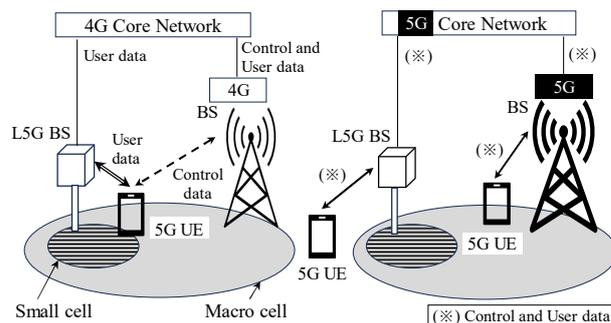


Figure 3 SA and NSA structures

ット数の比率を可変にできる特徴を活用した運用法といえる。L5Gでは準同期TDDの運用によって、ユースケースに応じて周波数利用効率の改善や他システムとの干渉調整の簡素化が可能となる。

### 2.5 高精度な時刻同期

5GではTDDによる多重化が行われるため、基地局間で高精度な時刻同期が必須である。L5Gでは仕様上、マイクロ秒オーダーでの高精度な時刻同期が求められる。従来から知られているネットワーク上で時刻同期を行う仕組みであるNTP (Network time protocol) の同期精度はミリ秒オーダーである。L5Gの要件を満たすために、IEEEで標準化されたPTP (Precision Time Protocol) が用いられており、特に5Gの通信用途向けにPTPプロファイルが定められている。

### 2.6 SAとNSA

C5Gの早期展開のために、CNに従来の4Gインフラを使い、RANは5G対応設備を用いるNSA (Non standalone) 方式に基づいてサービス開始された。図3に示すようにNSA方式では制御信号はより低い周波数帯を用いて4Gで送受され、ユーザデータを高速・大容量で送信すべくより高い周波数帯を用いて5Gで送受する方式である。しかし、将来的にはCNもRANも5G対応したSA (Standalone) 方式に置き変わっていく予定である。図3に示すようにSA方式では、ユーザデータおよび制御信号ともに、5G設備で送受信される。ちなみに、eMBBはNSA方式でも実現可能だが、URLLCとmMTC

の実現には SA 方式が必須となる。その意味で、通信インフラが SA 方式に置き変わった後が、真の 5G といえる。

### 3. エッジコンピューティングの概要

5G の URLLC 性能を最大限に引き出すためには、ネットワーク全体のアーキテクチャを改善する必要がある。一般に、UE がインターネット(クラウドサーバ)へアクセスする際の問題点として、一般に物理的な通信距離が長くなるため、通信の応答遅延が大きく、リアルタイム性の担保が困難なことが挙げられる。さらに、クラウドにおける通信負荷の集中緩和やクラウドに上げたデータのプライバシー保護などの考慮も必要である。これらの課題は、IoT の進展に伴いより深刻化している。そこで、ネットワークの末端のデバイスに近いエリアに設置したサーバ (Edge server) でデータ処理する分散型アーキテクチャをエッジコンピューティングなる概念がうまれた。特に移動通信に注視したエッジコンピューティングの概念を MEC (Multi-access edge computing または Mobile edge computing) という。MEC の導入効果は、リアルタイム性/応答性の改善 (低遅延化)、通信負荷の分散化、プライバシー保護などが挙げられる。図 4 にクラウドコンピューティングとエッジコンピューティングの概念の対比を示す。エッジサーバにおける AI 処理エンジンを UE 側に配置することも可能である。このような UE をエッジデバイスと呼ぶ。故に、“エッジ”の解釈がネットワークの構成により様々である[13]。クラウドコンピューティングでは AI 処理はクラウドサーバのみに集約されていたが、エッジコンピューティングでは、それがエッジサーバやエッジデバイスなども担うことになる。よって、エッジコンピューティングでは遅延の分散化に加えて知能の分散化も実現される。

### 4. ローカル 5G の研究動向

#### 4.1 全体動向

文献[14]では海外におけるプライベート 5G の概念と機能アーキテクチャを示し、主な利点と主要な産業用ユースケース、標準化動向について述べた後、設計面における課題を明らかにしている。文献[15]-[19]では主にインダストリ 4.0 の実現を念頭に、プライベート 5G の概念やアーキテクチャ、展開シナリオ等について議論している。

#### 4.2 ユースケース

文献[5]で示されたもののうち、次の二点について述べる。

##### (a) 映像伝送

5G の主要なユースケースとして 4K/8K 高品質映像伝送が挙げられ、L5G を利用して高速かつ低遅延な映像伝送の実現が注目されている[18-23]。文献[19]では、スタジアムのような場所において L5G 基地局を設置し、L5G を利用した低遅延か

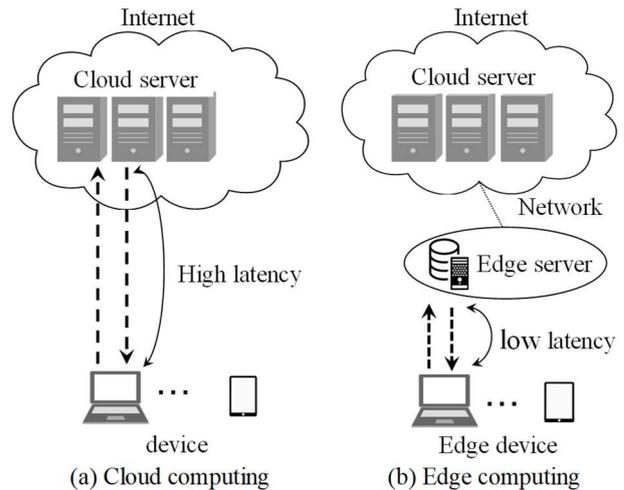


Figure 4 Comparison of cloud computing and edge computing

つ安定的な映像配信の実現可能性が述べられている。さらに、映像伝送の品質評価[20]、映像伝送の最適化[21]、無線リソースの最適化[22]、トラフィック削減[23]などが検討されている。特に、映像を放送で配信する場合、フレームの欠損や画質に対する要求が高いため[24]、L5G の導入効果が期待される。

文献[25]では、新幹線回送線沿いに L5G システムを構築し、指令からの監視等、走行中の回送車両上から地上への映像伝送や、車両センターにおける保守作業において、伝送品質等の動的変化、映像伝送特性等を評価することによって、屋外 L5G 性能を明らかにしている。文献[26]では、大学建物の屋上にて L5G 基地局を設置した環境において 4×4 シングルユーザ MIMO における受信電力や伝送スループット特性などの伝送性能を明らかにしている。文献[27]では、屋内にて構築した L5G システムを用いた小型無人搬送車の遠隔操縦を行う小規模デモシステムにおいて、画像伝送のスループットや遅延性能を明らかにしている。

##### (b) XR/メタバース

XR (Cross reality) とは現実世界と仮想空間を融合し新しい体験を創造する技術の総称を意味し、映像全てが仮想的である VR (Virtual reality)、現実と仮想を重畳させる AR (Augmented reality)、現実と仮想を融合させる MR (Mixed reality)などを包括する概念である。それらに関連して、インターネットで繋がった 3D 仮想世界上で、アバターと呼ばれる自分の分身を操作し活動させることができる“メタバース”の概念がうまれている。L5G の性能を活かして XR、メタバースの実現が検討されている[28]-[30]。文献[28]は、VR を用いた際のユーザインタラクションにおけるミリ波や MEC 導入による低遅延の影響について論じている。XR の最適化には低遅延と高信頼性のトレードオフが存在し[29]、VR システムの究極的な目標は如何に現実と仮想の乖離を埋めるかという点であることが指摘されている[30]。

### 4.3 諸技術との関連

#### (a) ミリ波

eMBB を活用したリモートワークの促進や耐災害性への向上(感覚の拡張), XR を用いた没入感の獲得(リアルの拡張), URLLC に基づく機器の精密な遠隔自動化(制御の拡張)を L5G で実現するためには, 通信容量の増大化, すなわち 2.1 および 2.2 で述べたミリ波通信が必須となる. さらに, 6G では通信とセンシングの融合(Integrated sensing and communications, ISAC)が議論されており[31], より広帯域化が進んでいくと思われる. 加えて THz 帯の開拓[32]に向けた足掛かりとしてもミリ波 5G 通信の実現が重要といえる.

ところで, 現状 L5G の利用の大半は Sub6 帯に集中しており, ミリ波帯の普及が進んでいない. その理由として, エリア構築が困難, NSA 方式が主流で複雑かつ高コスト, 対応端末が少なく高コストなどが挙げられる[33]. ミリ波普及に向けた対策として, “ミリ波エリア拡大→ミリ波対応端末の普及→ミリ波のユースケースの増加”といった好循環をつくることが重要であると指摘されている[34].

#### (b) ネットワーク仮想化

文献[35]では, ネットワークスライシングに関する技術をレビューし, 総合的に議論するためのフレームワークを提案している. それを使用して現在の習熟度を評価し, 今後の課題を提示している. 文献[36]では, 3GPP で定義されているさまざまなネットワークスライシング管理機能を連携して, 通信事業者の様々な導入シナリオに合わせてネットワークスライシングを作成, 調整, 管理できる手法を提案している. 文献[37]では, 5G を自動車業界へ適用した際に生じる様々な課題を特定し, エッジサービスに導入するネットワークスライシングのメカニズムについて述べている.

文献[38]では, O-RAN アライアンスによって規定されているオープン RAN の概念や要件などについて述べた後, トラフィック輻輳に対処するための無線リソース管理の概念を提案し, 大規模通信事業者から取得した現実世界のデータセットを用いてその有効性を実証している. 文献[39]では, ネットワークスライシングのサポートするサービスベースアーキテクチャの機能について, これまでの考え方を効率的な方法で統合可能か, またどのように統合できるかについて議論している. 文献[40]では, O-RAN ベースのブロックチェーン対応アーキテクチャを提案し, 計算機シミュレーション評価によってその有効性を示している.

#### (c) MEC

文献[41]では, MEC の概念と主要なアプリケーションへの導入シナリオ, 標準化動向等を示し, MEC のビジネスおよび技術的利点を明らかにしている. 文献[42]では, MEC オーケストレーション, 協調的なキャッシュ処理, 複層干渉キャン

セルの三つのユースケースを考察し, MEC の技術的課題を明らかにしている. 文献[43]では, セルラーや Wi-Fi などを統合したファイバーワイヤレス (FiWi) における MEC 利用を提案し, システムの遅延, 応答時間, デバイスの電力消費を評価し, 提案手法の有効性を示している. 文献[44]では, MEC が導入された 5G のユースケースにおけるセキュリティ脆弱性について論じている. 各々のケースで考えられるセキュリティフローを明らかにし, 脆弱性に対する対策を提案している. 文献[45]では, 無線と有線, SDN 技術を活用した MEC ベースの IoT アーキテクチャが提案されている. 計算機シミュレーションによって, IoT デバイス間のエンドツーエンド遅延とクラウドの総エネルギー消費の最小化について検証している. 文献[46]では, 完全に仮想化された MEC 5G セルラーネットワークとローカルなユースケース(スタジアムやキャンパスなど)のアーキテクチャを設計し, 効率的なリソース選択のための MEC/クラウド編成が提案されている. 大学構内にテストベッドを構築し, 提案手法が従来のクラウドサービスよりも遅延を低減し, 安定したスループットを維持可能なことを実証している. 文献[47]では, 遅延とデータ負荷を考慮しつつ一定のエンドツーエンド遅延を担保する最小限の MEC サーバの配置のアルゴリズムを提案している. 実データを用いて提案手法の有効性を明らかにしている.

6G においては, AI や機械学習を用いて飛躍的な性能向上の実現が期待されている[48]-[50]. 一方, 例えば深層ニューラルネットワークの十分な学習にはクラウド上に大量のデータを集め, 高性能な計算処理が必要となる. しかし, 有益なデータの中には医療データなどプライバシー情報を含むものも多く, 機密情報保護の観点から従来のようにクラウドに集約し大規模学習を行うことが難しい. 一方, 各々のエッジデバイスにて学習, 推論を行い, エッジサーバにてそれらのモデルパラメータを集約, 再配布する連合学習 (Federated learning, FL)[51]が注目されている. 文献[52]では, FL を無線ネットワークへ導入し, チャネル容量に基づくユーザ選択法を提案し, 無線チャネル特性が学習に与える影響を明らかにしている.

#### (d) 帯域内全二重通信

複信方式として帯域内全二重通信 (In-band full-duplex, IBFD) 方式を導入することで, 原理的には従来の半二重通信方式に対して最大 2 倍の周波数利用効率が可能となる[53]. IBFD では, 無線機が送信する送信信号が自身の受信回路に回り込む自己干渉 (Self interference, SI) によって受信信号の品質が著しく劣化する問題が生じる. 近年, BS に適用可能で大幅に SI を低減可能な様々な技術が報告されており, IBFD を BS に適用した全二重セルラシステム (FD cellular system, FDC) の実現可能性が高まっている. 文献[54]では段階的な FDC の実現に向けて, TDD 方式の 4G/5G システムを対象に, 各サブフレーム/スロツ

ト単位に対して干渉が小さい場合にのみ適応的に IBFD を適用する手法を提案している。複数の他セルからの干渉が大きい場合に特性劣化が懸念されるが、L5G のように他システムからの干渉が予め十分に検討されている場合は本手法が有効に動作すると考えられる。このように L5G と IBFD の親和性は高いと考えられ、L5G システム環境下では全二重復信を活用したマルチホップ化[55]の実現も期待される。

#### (e) 分散アンテナシステム

BS からの電波を光ケーブルによって分配し、子機として小出力アンテナを分散配置させる形態を分散アンテナシステム (Distributed antenna system, DAS) [56]という。DAS を用いれば、無線端末近傍のチャネル状態の良いアンテナを選択することでシャドウイングの影響を軽減できることから、集中型システムと比べて全体として通信品質の向上が期待できる。L5G においてはすでに DAS が導入されたシステムが実用化されている[57]。DAS では各アンテナの同期制御によって、各アンテナのカバーエリアをまたいでも、無線局の切り替え処理 (ハンドオーバー) が発生せず、通信断が発生しない。DAS にみられるように、6G においては分散化の流れが進んでおり、5G で導入された大規模集中 MIMO システムの分散化、セルフリー大規模 MIMO が議論されている[58], [59]。

## 5. むすび

本稿では、これまでの情報通信技術の変遷に着目して 5G とローカル 5G の技術概要と研究動向についてサーベイした。誌面の都合上、Wi-Fi と L5G の性能比較など取り上げられなかったトピックもある。今後の課題は更なる文献のサーベイに基づいた、具体的な研究課題の設定等が挙げられる。

すでに 2030 年頃のサービスインを目指して世界各地で 6G の活発な議論、熾烈な研究開発が展開されている。5G を振り返って、6G はローカル 6G から始まるかもしれない。

### ■謝辞

本研究の一部は令和 5 年度 公益財団法人高橋産業経済研究財団研究助成によって実施された。特にエッジコンピューティング一般については、(株)UH 製作所ソフトウェア事業部各位と議論させて頂いた。

### ■文献

[1] S. Chen and J. Zhao, "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 36-43, May 2014.  
 [2] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.

[3] T. Nakamura, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, S. Suyama, T. Imai, "5G radio access: Requirements, concept and experimental trials," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E98-B, no.8, pp.1397-1406, Aug. 2015.  
 [4] M. Shafi et al., "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017.  
 [5] 総務省, "ローカル 5G 検討作業班報告書 概要 (案)", 2020.5. [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000688562.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000688562.pdf)  
 [6] 総務省, 令和 3 年度ローカル 5G 開発実証報告書, <https://go5g.go.jp/carrier/>  
 [7] 総務省, 令和 4 年度ローカル 5G 開発実証報告書, <https://go5g.go.jp/carrier/>  
 [8] 5GMF, 5G / ローカル 5G 事例マップの公開, <https://5gmf.jp/5gmap/>  
 [9] J. Hoydis, S. ten Brink and M. Debbah, "Massive MIMO: How many antennas do we need?," 2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, IL, USA, 2011, pp. 545-550.  
 [10] R.Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C.W. Ahn, and S. Yun: "Spatial Modulation", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, Vol.57, No.4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.  
 [11] 森岡和行, 平野拓一, 山崎悟史, 武田茂樹, "進展するデジタル無線通信技術 -マルチアンテナシステムの概要と動向-, " 電学論 C, 141 巻 2 号, pp.111-122, Feb. 2021.  
 [12] 桑原悠太, 竹内啓悟, 山崎悟史, "大規模な空間変調 MIMO 上り回線における近似的メッセージ伝播法", 信学技報, vol. 120, no. 268, IT2020-53, pp. 154-158, 2020 年 12 月.  
 [13] S. Kekki, et. al., MEC in 5G networks, ETSI White Paper No. 28, Jun. 2018.  
 [14] A. Aijaz, "Private 5G: The Future of Industrial Wireless," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 136-145, Dec. 2020.  
 [15] J. Ordonez-Lucena, J. F. Chavarria, L. M. Contreras and A. Pastor, "The use of 5G Non-Public Networks to support Industry 4.0 scenarios," *2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 1-7, 2019.  
 [16] R. Bajracharya, R. Shrestha and H. Jung, "Future Is Unlicensed: Private 5G Unlicensed Network for Connecting Industries of Future," *Sensors* 2020, 20, 2774; doi:10.3390/s20102774.  
 [17] E. O'Connell, D. Moore, T. Newe, "Challenges associated with implementing 5G in manufacturing," *Telecom* 2020, 1(1), 48-67; <https://doi.org/10.3390/telecom1010005>.  
 [18] M. Wen et al., "Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal*

- Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 7-25, Jan. 2022.
- [19] J. Prados-Garzon, P. Ameigeiras, J. Ordonez-Lucena, P. Muñoz, O. Adamuz-Hinojosa and D. Camps-Mur, "5G Non-Public Networks: Standardization, Architectures and Challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 153893-153908, 2021.
- [20] N.-S. Vo, T.Q. Duong, H.D. Tuan, and A. Kortun, "Optimal video streaming in dense 5G networks with D2D communications," *IEEE Access*, vol.6, pp.209–223, 2017.
- [21] F. Pervez, A. Adinoyi and H. Yanikomeroglu, "Efficient resource allocation for video streaming for 5G network-to-vehicle communications," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, pp. 1-6.
- [22] P. Salva-Garcia, J. M. Alcaraz-Calero, Q. Wang, M. Arevalillo-Herráz and J. Bernal Bernabe, "Scalable Virtual Network Video-Optimizer for Adaptive Real-Time Video Transmission in 5G Networks," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 17, no. 2, pp. 1068-1081, June 2020.
- [23] Y. Chen, T. Farley, and N. Ye, "Qos requirements of network applications on the internet," *Information Knowledge Systems Management*, vol.4, no.1, pp.55–76, 2004.
- [24] Y. Chen, T. Farley, and N. Ye, "Qos requirements of network applications on the internet," *Information Knowledge Systems Management*, vol.4, no.1, pp.55–76, 2004.
- [25] Y. Dohi, S. Ryoki, M. Yamashita, Y. Nagasaka, K. Senda, and Y. Sakamoto, "Local 5G Verification Test on Shinkansen Deadhead Line and Rolling Stock Center," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.J106–B, no.8, pp.582-593, 2023. (In Japanese)
- [26] H. Urasawa, H. Soya, K. Yamaguchi, H. Matsue, "Transmission Performance Evaluation of Local 5G Downlink Data Channel in SU-MIMO System under Outdoor Environments," *IEICE Trans. on Commun.*, DOI:10.1587/transcom.2023WWP0002
- [27] I. Makino, J. Terai, N. Miki, "Small-Scale Demonstration of Remote Control of Patrol and Work Robot with Arms Employing Local 5G System," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E106-B, no.2, pp.101-108, Feb. 2023.
- [28] M. S. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis and K. Doppler, "Toward Low-Latency and Ultra-Reliable Virtual Reality," *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 78-84, Mar. 2018.
- [29] B. Soret, P. Mogensen, K. I. Pedersen and M. C. Aguayo-Torres, "Fundamental tradeoffs among reliability, latency and throughput in cellular networks," *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, TX, USA, 2014, pp. 1391-1396.
- [30] E. Bastug, M. Bennis, M. Medard and M. Debbah, "Toward Interconnected Virtual Reality: Opportunities, Challenges, and Enablers," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 110-117, Jun. 2017.
- [31] F. Liu et al., "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, Jun. 2022.
- [32] M. Polese, J. M. Jornet, T. Melodia and M. Zorzi, "Toward End-to-End, Full-Stack 6G Terahertz Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 11, pp. 48-54, Nov. 2020.
- [33] 5GMF, 5GMF ミリ波普及推進アドホック白書, <https://5gmf.jp/news/5949/>
- [34] 中村武宏, "5G evolution and 6G", セッション「ローカル5G, 5Gの国際動向」招待講演資料, CEATEC2023.
- [35] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi and M. K. Marina, "Network Slicing in 5G: Survey and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94-100, May 2017.
- [36] I. Badmus, M. Matinmikko-Blue and J. S. Walia, "Network Slicing Management Technique for Local 5G Micro-Operator Deployments," *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019, pp. 697-702.
- [37] M. -A. Kourtis et al., "5G Network Slicing Enabling Edge Services," *2020 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, Leganes, Spain, 2020, pp. 155-160.
- [38] S. Niknam et al., "Intelligent O-RAN for Beyond 5G and 6G Wireless Networks," *2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 215-220.
- [39] C. -L. I, S. Kuklinski and T. Chen, "A Perspective of O-RAN Integration with MEC, SON, and Network Slicing in the 5G Era," *IEEE Network*, vol. 34, no. 6, pp. 3-4, November/December 2020.
- [40] L. Giupponi and F. Wilhelmli, "Blockchain-Enabled Network Sharing for O-RAN in 5G and Beyond," *IEEE Network*, vol. 36, no. 4, pp. 218-225, July/August 2022.
- [41] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher and V. Young, "Mobile Edge Computing A key technology towards 5G," *ETSI White Paper*, No. 11, Sep. 2015.
- [42] T. X. Tran, A. Hajisami, P. Pandey and D. Pompili, "Collaborative Mobile Edge Computing in 5G Networks: New Paradigms, Scenarios, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 54-61, Apr. 2017.
- [43] B. P. Rimal, D. P. Van and M. Maier, "Mobile Edge Computing Empowered Fiber-Wireless Access Networks in the 5G Era," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 192-200, Feb. 2017.
- [44] P. Ranaweera, A. Jurcut, Ma. Liyanage, "MEC-enabled 5G Use Cases: A Survey on Security Vulnerabilities and Countermeasures,"

*ACM Computing Surveys*, vo 54, no. 186, pp 1–37, Oct. 2021.

[45] N. Ansari and X. Sun, "Mobile Edge Computing Empowers Internet of Things," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E101-B, no.3, pp.604-619, Mar. 2018.

[46] J. Nakazato et. al., "MEC/Cloud Orchestrator to Facilitate Private/Local Beyond 5G with MEC and Proof-of-Concept Implementation," *Sensors* 2022, 22(14), 5145; <https://doi.org/10.3390/s22145145>

[47] S. Lee, S. Lee and M. -K. Shin, "Low Cost MEC Server Placement and Association in 5G Networks," *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea (South), 2019, pp. 879-882.

[48] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, "Communications in the 6G Era," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57063–57074, 2020.

[49] J. Du, C. Jiang, J. Wang, Y. Ren, and M. Debbah, "Machine learning for 6G wireless networks: Carrying forward enhanced bandwidth, massive access, and ultrareliable/low-latency service," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 122–134, Dec. 2020.

[50] T. Ohtsuki, "Machine learning in 6G wireless communications," *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E106-B, No. 2, pp. 75–83, Feb. 2023.

[51] H. B. McMahan, et. al., *proc. of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 2017.

[52] S. Yamazaki, T. Furuki, "Client Selection Based on Channel Capacity for Federated Learning under Wireless Channels," *28th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2023)*, pp. 225-230, Nov. 2023.

[53] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," *Proc. 16th ACM Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw. (MobiCom)*, pp. 1–12, Chicago, USA, 2010.

[54] H. Harada, K. Mizutani, T. Matsumura, T. Kato, and K. Shioiri, "Development of Full-Duplex Cellular System for Beyond 5G and 6G Systems," *Proc. IEEE PIMRC 2022*, pp. 1–5, Sep. 2022.

[55] S. Yamazaki, J. Uchiyama, Y. Abiko, K. Ohuchi, "On an Effect of a Simple and Energy-Efficient Flooding Scheme for Multi-hop Full-Duplex Communications," *IEEJ Trans on Elec., Inf. and Sys.*, 143(8), pp.774-775, Aug. 2023.

[56] A. A. M. Saleh, A. Rustako and R. Roman, "Distributed Antennas for Indoor Radio Communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 35, no. 12, pp. 1245-1251, Dec. 1987.

[57] (株)東芝, ローカル 5G 対応分散型アンテナシステム <https://www.global.toshiba/jp/news/infrastructure/2023/08/news-20230817-01.html>

[58] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," *IEEE*

*Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.

[59] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai and L. Hanzo, "Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, 2019.

#### ■付録 (略語一覧)

5G	Fifth-generation mobile communications systems
L5G	Local 5G
C5G	Carrier 5G
eMBB	Enhanced mobile broadband
URLLC	Ultra-reliable and low latency communications
mMTC	Massive machine type communication
IoT	Internet of things
AI	Artificial intelligence
FDMA	Frequency division multiple access
TDMA	Trequencey division multiple access
CDMA	Code division multiple access
SC-FDMA	Single Carrier frequency division multiple access
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
NOMA	Non-orthogonal multiple access
SDN	Software defined network
NFV	Network function virtualization
RAN	Radio access network
CN	Core network
vRAN	virtualized RAN
O-RAN	Open RAN
MIMO	Multi input multi output
RF	Radio frequency
BS	Base station
AMP	Approximate message passing
TTI	Transmission time interval
ACK	Acknowledgement
NACK	Negative ACK
UE	User equipment
RB	Resource block
GFA	Grant free access
LPWAN	Low power wide area network
LTE-M	Long term evolution machine
FDD	Frequency division duplex
TDD	Time division duplex
NTP	Network time protocol
PTP	Precision Time Protocol
SA	Standalone
NSA	Non standalone
MEC	Multi-access (Mobile) edge computing
XR	Cross reality
VR	Virtual reality
AR	Augmented reality
MR	Mixed reality
ISAC	Integrated sensing and communications
FiWi	Fiber Wireless
FL	Federated learning
IBFD	In-band full-duplex
SI	Self interference
FDC	Full-duplex cellular system
DAS	Distributed antenna system