

# 移動通信最新動向

## ——情報通信に何が起きているか——

Recent Trend of Mobile Communications : What Is Going on in ICT World?

吉田 進 佐藤孝平 中村武宏



40年近い歴史を持つセルラ方式移動通信は10年ごとに大きな飛躍を遂げながら誰もが予想できなかった驚異的な発展を遂げてきた。2020年頃の商用化を目指す第5世代移動通信(5G)は、通信業界にとどまらず広範な異業種との連携・融合を目指しており、来るべき社会を先導するインフラを提供し、社会をこれまで以上に大きく変革する可能性を秘めている。本稿では、5Gとは一体どのようなネットワークなのか、その早期実現に向けた今後の課題は何か、最近の世界的な動向を踏まえつつ概説する。

キーワード：第5世代移動通信, 5G, IMT-2020, 5GMF, WRC-19

### 1. 移動通信の進展

1979年の自動車電話の商用化以来、高々40年にしかすぎないセルラ方式移動通信の驚異的な発展は世界を大きく変えてきた。固定通信では到底実現不可能であると長く信じられてきた“世界中に暮らすほとんど全ての人々に対する電話サービスの提供”を可能にしたほか、インターネットまで身近に提供することが現実のものとなりつつある。国際電気通信連合(ITU: International Telecommunication Union)によれば、今や携帯電話の加入者数は世界の総人口を超え、モバイルブロードバンド/インターネットのユーザ数もほぼ半数にまで達している。

歴史を振り返ってみると、移動通信はその商用化開始以来、ほぼ10年ごとに新たな無線通信方式を導入し、世代(generation, 略してG)交代を回りながら飛躍的

に進展してきた。すなわち、図1に示すとおり音声サービスからデータ通信サービスへの移行、更にデータ通信の高速・大容量化に対するマーケットニーズに応じてきた。1990年初頭に9.6 kbit/s程度であったデータ通信速度は、既にほぼ1 Gbit/sを達成している。現在は第4世代(4G)の時代であり、既に世界的にも2020年頃の商用化を目指した“第5世代移動通信(5G)”の研究開発が熱を帯びて進められている<sup>(1)~(3)</sup>。

本稿ではその5Gの概要並びに最近の研究開発や商用化に向けた動向などについて紹介する。

### 2. 5Gとは

2010年頃の4G導入後、スマートフォンの普及やIoT(Internet of Things)への期待の高まりなどから、移動通信に対する更なる大容量化、高機能化と、多様なユースケースへの対応に関する要求が高まった。LTE(Long Term Evolution)導入後程なくして、LTEを拡張したLTE-Advancedの標準化が進められたが、2020年代に向け、これらの要求にLTEベースのシステムのままでは対応できない危機感から、平行して次世代移動通信システム、5Gの検討の機運が高まった。我が国においても一般社団法人電波産業会内に2020 and Beyond Ad Hocが2013年9月に設立され、主として無線方式の検討が開始された<sup>(4)</sup>。その後、東京オリンピック・パ

吉田 進 名誉員：フェロー 第5世代モバイル推進フォーラム  
E-mail susumu.yoshida.t25@kyoto-u.jp  
佐藤孝平 正員 一般社団法人電波産業会  
E-mail satoh@arib.or.jp  
中村武宏 正員 (株)NTTドコモ先進技術研究所  
E-mail nakamura@nttdocomo.com  
Susumu YOSHIDA, Fellow, Honorary Member (The Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum, Tokyo, 100-0013 Japan), Kohei SATOH, Member (Association of Radio Industries and Businesses, Tokyo, 100-0013 Japan), and Takehiro NAKAMURA, Member (Research Laboratories, NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka-shi, 239-8536 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.11 pp.1046-1051 2018年11月  
©電子情報通信学会 2018

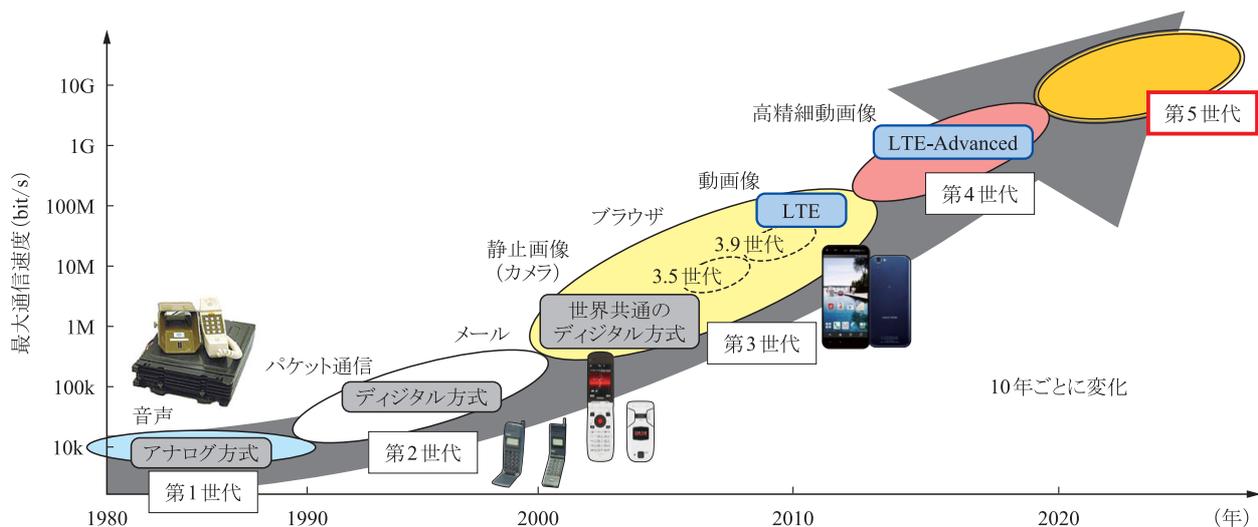


図1 移動通信システムの進化 自動車電話として1979年に商用化が始まった移動通信は10年ごとに大きな進化を遂げ、第1世代(1G)から第5世代(5G)へと発展を続けている。

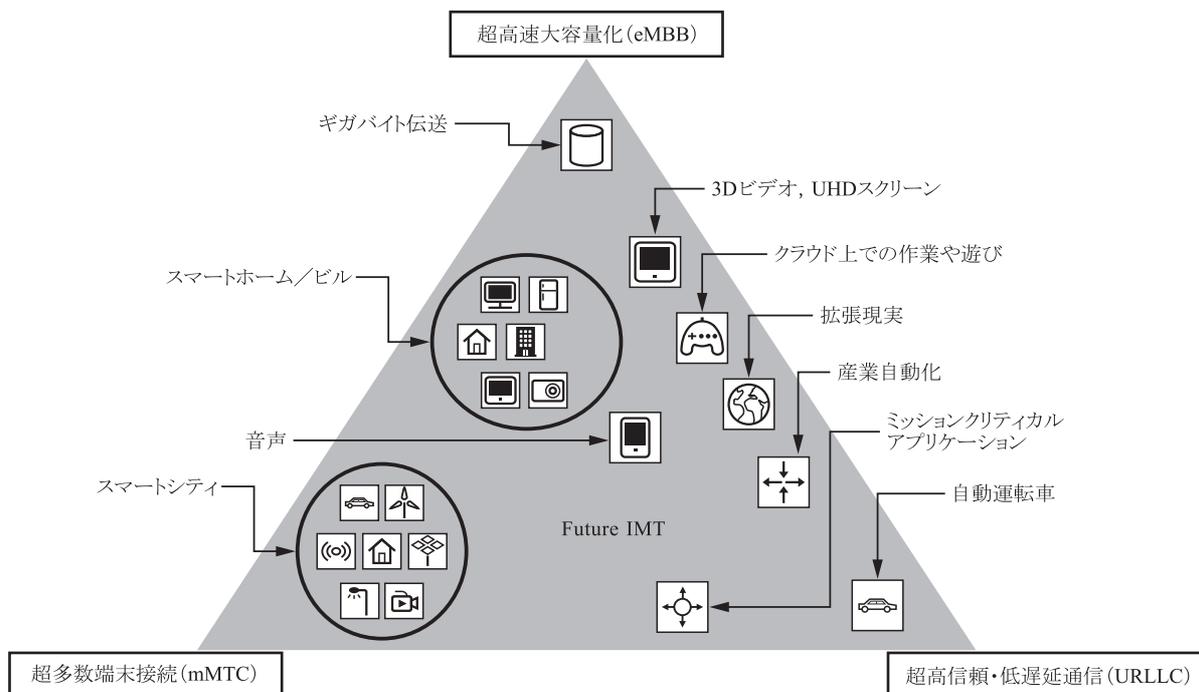


図2 2020年以降のIMTのユースシナリオ<sup>(6)</sup> IMT-2020のビジョン勧告で規定された5Gの利用シナリオを示す。三角形の頂点が「超高速大容量化(eMBB)」「超多数端末接続(mMTC)」「超高信頼・低遅延通信(URLLC)」に対応している。

ラリンピックが開催される2020年をターゲットに、5Gの早期実用化に向けて、産官学の連携と5Gの研究開発の加速、諸外国5G関連組織との連携強化等を狙って、総務省の主導の下、第5世代モバイル推進フォーラム(5<sup>th</sup> Generation Mobile communications promotion Forum, 略して5GMF)が2014年9月に創設され、2020 and Beyond Ad Hocの活動を引き継いだ<sup>(5)</sup>。

一方、諸外国でも同様の5G推進組織が立ち上がり、

5Gとは何か、そのビジョンに関する議論が始まり、2015年9月にITU無線通信部門(ITU-R:ITU-Radio-communication Sector)において、5G(ITU-Rでの専門用語は、IMT(International Mobile Telecommunications)-2020)の利用シナリオや技術要求条件など5Gの研究開発の方向性を示す「IMTビジョン勧告(Rec. ITU-R M.2083)」が承認された<sup>(6)</sup>。詳細は、5.1で述べるが、そこでは図2に示すとおり、以下の三つの代表的

- ・ 超高速大容量化 (eMBB: enhanced Mobile Broadband)
- ・ 超多数端末接続 (mMTC: massive Machine Type Communications)
- ・ 超高信頼・低遅延通信 (URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications)

に加え、それらを組み合わせた利用イメージが示されている。すなわち、超高速大容量化については、スマートフォン及びタブレットでの動画視聴の普及、AR/VR/MR (Augmented Reality/Virtual Reality/Mixed Reality) の普及、4K、8K 映像の導入・普及等に伴うトラヒックの増加に対応するため、10 Gbit/s 以上の高速伝送と、4G と比較して 1,000 倍の大容量化 (単位面積当たりのシステム容量) を目標としている。超高信頼・低遅延については、スマートファクトリーや遠隔医療などのユースケースを想定し、低遅延については 1 ms 秒以下の遅延を目指している。超多数端末接続については、IoT のマーケット拡大やスマートシティ実現等を想定し、極めて多くの端末 (100 万台/km<sup>2</sup>) の存在を想定している。

2020 年代に向けたこれらの性能改善を目指す移动通信システムが 5G である。性能改善の対象としては、無線アクセスネットワークだけでなく、コアネットワークに対しても検討が進められている。更に、サービス・アプリケーションまで含めたエンドツーエンド (end-to-end) での性能改善まで考慮されている。また 3GPP (Third Generation Partnership Project) では、技術発展アプローチとして LTE の継続的な進化と、革新的な新しい無線アクセス方式 (NR: New Radio) の双方を 5G として仕様開発している。

一方、2015 年 10 月に日本、中国、韓国、欧州、米国の五つの 5G 推進団体間で覚書 (MoU: Memorandum of Understanding) が締結されて以降、研究開発や実証試験等に関する情報交換が加速され 3GPP においても 5G のマーケットニーズの高まりから標準化スケジュールを前倒しするなど、世界的に 5G の商用化が早まる傾向にある。我が国においても、総務省の主導の下、昨年 5 月から総合実証試験が開始された。具体的には、首都圏のみならず地方都市も含めて eMBB, mMTC, URLLC といった 5G を特徴付ける基本性能を確認するための実証試験が、様々な利用シナリオの下行われている。これら実証試験では通信事業者以外にも、自動車業界、鉄道業界、建機業界、警備保障会社等々、多くの異業種に協力を得て一体となって社会全体の ICT 化を加速すべく実証試験が行われている点が 4G までと大きく異なる。

### 3. 5G 技術動向

前述のとおり 5G では eMBB, mMTC, URLLC といった多様な利用シナリオ、要求条件のサポートが求められており、これらをサポートするための技術発展アプローチとして LTE の継続的な進化と、革新的な新しい無線アクセス方式 (NR) の導入が検討されている。前者は既存システムとの後方互換性を優先した進化であるのに対し、後者は後方互換性による制約を解放することによる大きな性能改善を優先するアプローチになる。5G はこれら 2 種類のアプローチを組み合わせることで期待されており、それぞれの特徴に合わせた技術発展が求められる。

周波数観点では、LTE を含めた従来の移动通信で使用されている数百 MHz から数 GHz 帯の周波数帯のみならず、ミリ波を含む 100 GHz までの非常に高い周波数帯が対象となっている。高周波数帯を含めた広範囲に広がる周波数帯や多様な利用シナリオをサポートするため、NR ではサブキャリア間隔などの基本無線パラメータを複数種類規定することとなり、LTE の基本無線パラメータを基準としたスケラブルな可変パラメータが仕様化されている<sup>(7)</sup>。

高周波数帯は一般的に連続した広い周波数帯域幅の確保には適しているものの、距離減衰による伝搬損の影響を考慮する必要がある。そのため、低周波数帯では広域エリアをカバーするマクロセルを活用しつつ、高周波数帯では送信電力の小さい基地局を有するスモールセルをマクロセルのエリア内に追加配置するヘテロジニアス (heterogeneous) 網構成が有効になると考えられる。ヘテロジニアス網では、低周波数帯を用いるマクロセルによって通信の安定性や移動性を担保しつつ、高周波数帯を用いるスモールセルでは広帯域化による飛躍的な高速大容量化を期待することができる。

無線インタフェースの観点からは、主に既存周波数帯をターゲットとした LTE の継続的な発展と、高周波数帯をサポート可能な NR との組み合わせが考えられる。低周波数を用いるマクロセルから主に制御信号 (C-plane: Control plane) を提供し、高周波数を用いるスモールセルからデータ信号 (U-plane: User plane) を提供する C/U 分離技術コンセプトが提案されているが<sup>(8)</sup>、5G においても C/U 分離技術を活用した LTE と NR 間の密な連携が求められることが想定される。

無線アクセスの要素技術の観点では、高周波数帯におけるビームフォーミング (beamforming) 利得により伝搬損を補償しつつ、空間多重によって周波数利用効率を向上可能なマッシブ (Massive) MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 送受信技術や、広帯域化技術などが高速・大容量化を実現するためのキー技術として挙げられる。マッシブ MIMO 送受信技術では、多数の

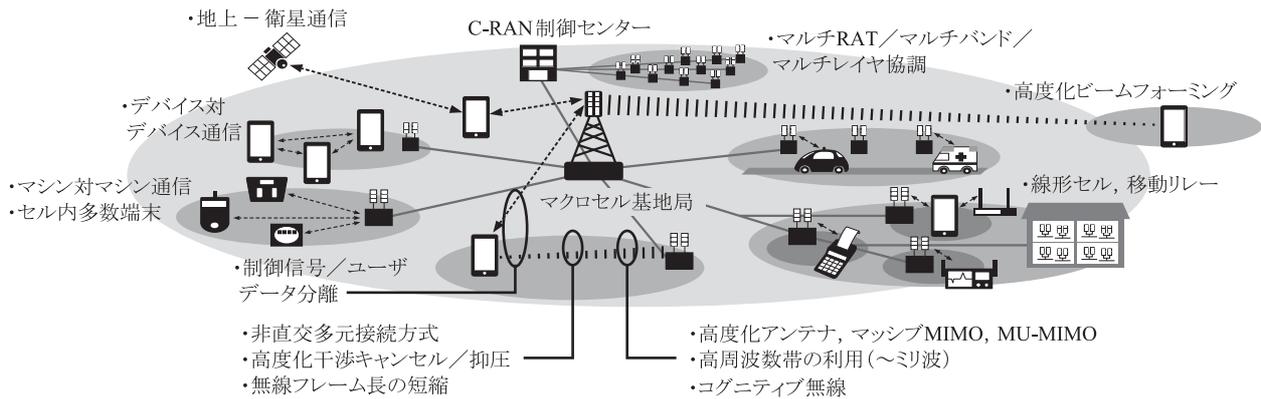


図3 5G無線ネットワーク全体構成と各種要素技術<sup>(4)</sup>

アンテナ素子によるビームサーチ、ビーム追従及び空間多重／ダイバーシチといった制御を限られた参照信号及び制御信号のオーバーヘッドで高効率にサポートすることが求められるため、効率的な参照信号構成やアナログ／デジタルを含めたビームフォーミング制御法が検討されている。また、多元接続方式としてOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) による直交アクセスをベースとしつつ、更に容量を改善するアプローチとして非直交の多元接続方式 (Non-orthogonal Multiple Access) の適用も検討されている。非直交の多元接続方式は mMTC のユースケースにおける超多数接続性の改善技術の一つと考えられる。

一例として、今後 5G において技術検討が予想される要素技術の全体像を図 3 に示す<sup>(4)</sup>。図に示すとおり、5G ネットワークにおいては、マッシュ MIMO や高周波数帯の利用といった高速大容量化技術のみならず、マシン対マシン (M2M: Machine-to-Machine) 通信、デバイス対デバイス (D2D: Device-to-Device) 通信などの IoT 関連技術を組み合わせることによって多数接続、高信頼、低遅延化を目指していることが見て取れる。

一方、5G ではいわゆる IoT により車や交通機関、家電、センサ等々ネットワークにつながる機器の数が飛躍的に増大するため、サイバーセキュリティが格段に重要となる。したがって、その備えなくしては健全な 5G の発展はあり得ない。研究に加えて国民へのセキュリティに関する周知啓発も不可欠である。

#### 4. 5G 周波数動向

ITU の世界無線通信会議 (WRC: World Radio-communication Conference) では、周波数の割当や特定を含めた無線通信に関する国際的な規定である無線通信規則 (RR: Radio Regulations) の策定・改定を主な目的としている。2015 年 11 月にジュネーブで開催された WRC-15 では、IMT への追加周波数の特定とともに、

2019 年の WRC-19 において、IMT-2020 及びそれ以降の IMT 開発のための追加特定の審議を行う新議題 (WRC-19 議題 1.13) が合意された。WRC-15 までは 6 GHz 以下を対象としてきたが、5G では 6 GHz 以上の周波数の活用も視野に各国で技術開発が行われており、実用化されつつあることから、下記周波数を対象とした高周波数帯 (24.25~86 GHz) での IMT への追加特定の審議を行うことで合意した<sup>(9)</sup>。

- 24.25~27.5 GHz, 37~40.5 GHz, 42.5~43.5 GHz, 45.5~47 GHz, 47.2~50.2 GHz, 50.4~52.6 GHz, 66~76 GHz 及び 81~86 GHz (移動業務に一次分配されている周波数帯)
- 31.8~33.4 GHz, 40.5~42.5 GHz 及び 47~47.2 GHz (移動業務に一次分配されていない周波数帯)

WRC-19 の議題 1.13 の設定に関しては、各国・地域の状況を反映して、世界の全ての地域団体から共同提案が出されている<sup>(10)</sup>。6~20 GHz 及び 27.5~29.5 GHz 帯については、前者は各国で幅広く利用されていること、後者は衛星通信に利用されていることで、IMT 周波数として確保できる可能性は低いとの理由で、検討対象の周波数としては合意されなかった。

日本では、5GMF において、技術委員会の下に設置した周波数 WG での検討を踏まえて「5G に望ましい周波数帯」として以下の結果を公表した<sup>(11), (12)</sup>。

- 6 GHz 帯以下の周波数帯：引き続きこの周波数帯は重要であるとし、3.6~4.2 GHz 帯と 4.4~4.9 GHz 帯が 5G に望ましい候補周波数帯である。
- 6 GHz 帯以上の周波数帯：国際的なハーモナイゼーションの観点から、「24.25~27.5 GHz, 27.5~29.5 GHz, 31.8~33.4 GHz, 37.0~40.5 GHz 及び 40.5~42.5 GHz」の周波数帯域の全部または一部が初期の利用に好ましい。

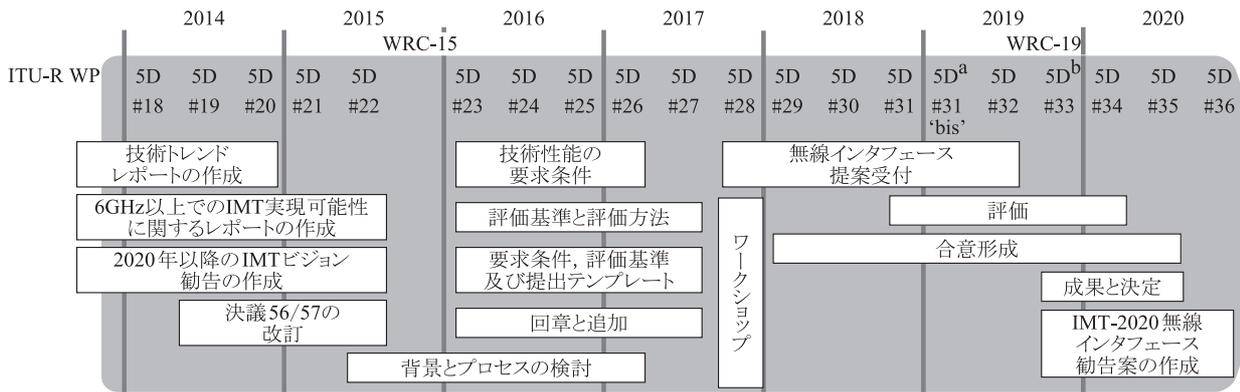


図4 IMT-2020の開発スケジュール<sup>(2)</sup> ITU-RにおけるIMT-2020無線インタフェースの勧告案作成に至る詳細なタイムラインとプロセス。

総務省は、5GMFでの検討結果等を踏まえて、以下の中間報告案を公表した<sup>(13)</sup>。

- ・ 2020年の5G実現に向けて、3.7GHz帯、4.5GHz帯及び28GHz帯の2018年度末頃までの周波数割当を目指し、2018年夏頃までに技術的条件を策定する。
- ・ 他の無線システムとの共用に留意しつつ、28GHz帯で最大2GHz幅、3.7GHz帯及び4.5GHz帯で最大500MHz幅を確保することを目指す。

なお、24.5~27.5GHzは、欧州では「5G Pioneer Band」と呼ばれ、WRC-19でのIMTのための追加特定に向けた検討やプロモーションが進められている。一方、韓国の標準化団体主導の下に、28GHz帯における5G実現促進のためのワークショップが開催されており、そこでは28GHz帯を「5G Frontier band」と呼んでいる。

## 5. 5G標準化動向

### 5.1 ITU-Rでの標準化動向

ITU-Rでは、第5研究委員会(SG5:Study Group 5)の中でIMTの研究を行っているWP5D(Working Party 5D)の第18回会合(2014年2月)において、5Gに関する標準化活動がキックオフされた。その成果は、5G標準化への道筋を付けるための「5Gの将来ビジョンに関する新勧告(Rec. ITU-R M.2083)」の作成を完了したことに集約される<sup>(6)</sup>。IMT-Advanced(いわゆる4G)と同じように、①新しいシステムの開発には使用する周波数帯を想定する必要があること、②周波数確保に非常に長い時間がかかること、③世界的な周波数ハーモナイゼーションが必要であることから、2014年2月

に基本的なシステムの枠組みとコンセプトを明確にするための「ビジョン勧告案」作成に着手し、約1年半の作業を経て完成し、2015年9月に承認された。

ビジョン勧告では、5Gのためのユーザ・アプリケーション動向、技術動向、周波数関連事項、ユースシナリオのほかに、5Gの能力、5Gの枠組み並びに開発スケジュールの概要・要点等が記載されており、別の勧告やレポートを参照している<sup>(14)~(16)</sup>。また、2020年以降のIMTのユースシナリオとして、既に2.で述べた三つの典型的なケース(eMBB, mMTC, URLLC)を示している。

2014年10月にジュネーブで開催されたWP5D第20回会合において、5Gも3G/4Gと同じプロセスを継承する「IMT-2020無線インタフェースの新勧告案開発に関するタイムラインとプロセス案」(図4)を合意した。

3G及び4Gと同様に、IMT-2020無線インタフェース技術開発は提案募集により行われ、勧告案の作成は選定された技術仕様を参照する形で行われる。

提案募集において最も基本的な文書と位置付けとなるIMT-2020の技術性能要求に関する仕様は、2017年2月のWP5D第26回会合で文書案が完成した。ビジョン勧告で定めた最大伝送速度等の数値と整合性を図りつつ、提案募集の条件としてIMT-2020が最低限満たすべき技術性能要求に関してより詳細に規定されている<sup>(17)</sup>。

既に2017年10月から提案募集が開始されており、今後は提案の受付、提案内容及び評価、選定作業を進め、最終的に2020年10月までに勧告案を完成させるスケジュールとなっている。

### 5.2 3GPPでの標準化動向

3GPPではReleaseと呼ばれる機能セットに数字を付記して技術仕様を管理している。例えば、LTEはRelease 8から仕様化され、LTE-AdvancedはRelease 10

から仕様化された。5Gでは、2016年から2017年初めに掛けて検討が行われたRelease 14においてLTE-Advanced 無線アクセス技術との後方互換性のない新しい無線アクセス技術の基礎検討(Study Item)が行われ、候補となる要素技術の技術検討、妥当性の評価が行われた。その後、2018年中頃まで計画されているRelease 15において詳細仕様検討(Work Item)が予定されており、Phase 1と呼ばれる初期段階の5G標準仕様を策定し、2019年末まで計画されているRelease 16において引き続き詳細仕様検討を行いPhase 2と呼ばれる2段階目の5G標準仕様検討を行うことが計画されているなど複数のReleaseにわたる仕様化が見込まれている。

## 6. おわりに

5GMFでは昨年5月の第3回グローバル5Gイベント(2.で述べた五つの5G推進団体間の覚書に基づく会合)において、5Gの早期実現には異業種間のクロスオーバーコラボレーション(crossover collaboration)が必須であり、早期実現の鍵であると提唱した<sup>(18)</sup>。すなわち、5Gは本稿でも述べたとおり、その拡張された優れた能力により、様々な異業種間における連携障壁を低くし、社会全体にわたって障壁のないシームレスな連携を実現し、来るべきエコ社会を実現する近道となる。

実際、5GはビッグデータやAIなどにより新しい価値を創造する来るべき社会全体のインフラ(神経網)となり、あらゆる産業の競争力をも左右すると想定されることから、世界のほとんどの国が喫緊の課題と捉え、実証試験を行いつつ、その早期実現に向けて最大限の力を注ぎつつある。我が国においても昨年からは総務省主導の下に5GMFが協力して多くの業界と連携して総合実証試験が進められている<sup>(19)</sup>。国際社会とも協調・連携を図りつつ、5Gにより、安全・安心かつ誰もが生きがいを感じられる持続可能社会の早期構築につながることを期待したい。

謝辞 執筆にあたり種々御助言を頂いたNTTドコモ永田聡氏に深謝する。

## 文 献

- (1) 布施田英生, “2020年代の移動通信—5Gのビジョン—,” 信学誌, vol. 98, no. 5, pp. 342-346, May 2015.
- (2) 佐藤孝平, “ITU-Rにおける2020年及びそれ以降の移動通信システムに関する標準化動向,” 信学誌, vol. 98, no. 5, pp. 388-394, May 2015.
- (3) 中村武宏, 岩村幹生, 蔣 惠玲, “5G検討に関する世界動向,” 信学誌, vol. 98, no. 5, pp. 381-387, May 2015.
- (4) ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group, “White paper: Mobile communications systems for 2020 and beyond,” Version 1.0, Oct. 2014.
- (5) <https://5gmf.jp/>
- (6) Recommendation ITU-R M.2083, “IMT Vision-Framework and overall

objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” Sept. 2015.

- (7) 永田 聡, 柿島佑一, 武田一樹, 原田浩樹, 武田和晃, “5G標準化動向,” 信学誌, vol. 101, no. 11, pp. 1052-1057, Nov. 2018.
- (8) NTTドコモ, “ドコモ5Gホワイトペーパー,” Sept. 2014, [https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper\\_5g/](https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_5g/)
- (9) Resolution 238 (WRC-15), “Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion (s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond,” Final Acts WRC-15, 2015.
- (10) 新 博行, “WRC-19における高周波数帯(24.25-86GHz)での携帯電話周波数の確保に向けて,” ITUジャーナル, vol. 46, no. 6, pp. 21-25, June 2016.
- (11) 5GMF, “White paper: 5G mobile communications systems for 2020 and beyond,” Version 1.1, Sept. 2017.
- (12) Y. Honda, “Spectrum studies in 5GMF,” The 3rd Global 5G Event, Tokyo, May 2017.
- (13) 総務省新世代モバイル通信システム委員会技術検討作業班, “情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(案),” May 2018.
- (14) Report ITU-R M.2370, “IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030,” July 2015.
- (15) Report ITU-R M.2320, “Future technology trends of terrestrial IMT systems,” Nov. 2014.
- (16) Report ITU-R M.2376-0, “Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz,” July 2015.
- (17) Report ITU-R M.2410, “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface (s),” Nov. 2017.
- (18) S. Yoshida, “Keynote speech,” The 3rd Global 5G Event, Tokyo, May 2017.
- (19) 5GMF, “5Gシステム総合実証試験報告書—5G活用プロジェクト企画編—,” 第1.0版, March 2017.

(平成30年6月8日受付 平成30年6月21日最終受付)



よしだ すすむ  
吉田 進 (名誉員:フェロー)

昭46京大・工・電子卒, 昭48同大学院修士課程了。同年京大・工・助手。助教を経て平4京大教授。平25定年退職, 名誉教授。主として移動通信など通信工学の教育・研究に従事。現在, 第5世代モバイル推進フォーラム(5GMF)会長。工博。本会業績賞, 本会功績賞, 大川賞など各受賞。



さとう たかよし  
佐藤 孝平 (正員)

昭50山形大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現, NTT)入社。平4NTT移動通信網(現, NTTドコモ)に転籍。平14(社)電波産業会。衛星通信の電波伝搬の研究, 移動体衛星通信方式の研究開発及び次世代移動通信方式の国際標準化に従事。現在, (一社)電波産業会・標準化統括担当参与, 5GMF事務局長及びAPT無線グループ議長, 工博。平11日本ITU協会賞受賞。



なかむら たけひろ  
中村 武宏 (正員)

平2横浜国大大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社(NTT)入社。平4NTT移動通信網(現, NTTドコモ)に転籍。W-CDMA, LTE, 5G, Connected Carなどの研究開発及び標準化に従事。現在, (株)NTTドコモ執行役員, 5Gイノベーション推進室室長, ARIB, 3GPP及び5GMFでの標準化/フォーラム活動に従事し, 3GPP TSG-RAN議長などを歴任。現在, 5GMF企画委員会委員長代理。