

© 2014 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

ドコモ **5G** ホワイトペーパー

2020 年以降の **5G** 無線アクセスにおける
要求条件と技術コンセプト

株式会社NTTドコモ

2014年9月

NTT
docomo

目次

1. あらまし.....	2
2. 需要のトレンドおよび 5G の要求条件.....	3
2.1. サービス動向およびトラフィック予測.....	3
2.2. 5G の要求条件.....	4
3. ドコモの 5G 技術コンセプト.....	5
3.1. 技術進化のアプローチ.....	5
3.2. LTE および LTE-Advanced の発展と 5G.....	6
3.3. ドコモの 5G 技術コンセプト.....	6
4. 5G 無線アクセスの要素技術.....	7
4.1. ファントムセル.....	7
4.2. フレキシブル・デュプレクス.....	9
4.3. 高周波数帯への無線パラメータや信号波形の最適化.....	9
4.4. 大規模 (Massive) MIMO.....	10
4.5. 非直交多元接続 (NOMA).....	11
5. ドコモの 5G 関連活動.....	12
5.1. 5G リアルタイムシミュレータおよび実証実験.....	12
5.2. 5G 標準化準備活動.....	13
6. まとめ.....	14
7. 参考文献.....	14

1. あらまし

ここ数十年間にわたって、移動通信は世界の経済と社会の発展に大きく寄与しており、今日では世界中の多くの人々にとって既に日常生活で必須なものとなっている。また、将来の情報社会においては、あらゆるヒトとモノが無線でインターネットに繋がり、移動通信がライフラインとしてより必要不可欠なものになっていくことが予想される。現在、世界の多くの移動通信オペレータにより、第三世代(3G)移動通信システムのサービスが広く展開されており、さらに、スマートフォンの普及に伴い、より高速な伝送速度を低遅延かつ高効率に提供することができる LTE (Long Term Evolution)のサービスが急速な普及を遂げている。また、近年急激に増加している無線アクセスの通信量(トラフィック)に対応するため、LTE をさらに発展させた真の第四世代(4G)ともいえる LTE-Advanced の世界的な展開が見込まれている。

このような状況の中、2020 年以降における将来の移動通信に要求される飛躍的に高いシステム性能を実現するため、第五世代(5G)と呼ばれる新しい次世代移動通信システムの検討の機運が昨今、非常に高まっている。NTT ドコモ(以下、ドコモ)においても、LTE のサービス提供を開始した 2010 年頃から将来の無線アクセス(Future Radio Access)のコンセプトについて検討を進めてきた。現在では、東京で夏季オリンピック/パラリンピックが開催される 2020 年をサービス提供開始のターゲットとし、提案する「5G」の技術コンセプトのもと、世界の移動通信の主要ベンダーとの実験協力を進めている[1]。本ホワイトペーパーは、ドコモがこれまでに検討を行ってきた 5G の無線アクセス技術について、要求条件、技術コンセプト、要素技術、および関連するドコモの研究活動などを概説するものである。

2. 需要のトレンドおよび5Gの要求条件

2.1. サービス動向およびトラフィック予測

スマートフォンが広く世の中に普及した現在、いつでも、どこでも、どのような端末からでも無線でインターネットを通じたサービスやアプリケーションが気軽に楽しめ、かつ、これまで以上の体感品質(QoE: Quality of Experience)が得られるように、ユーザからの期待は高まっている。例えば、画像伝送やビデオストリーミング、クラウドサービスを利用するモバイルユーザ数は増加し続けている。さらに、このようなサービスやアプリケーションの多様化に伴って、眼鏡や腕時計といったウェアラブルな端末等、新しいタイプの端末やデバイスも登場しており、将来的には広く普及していくことが予想される。このような状況のもと、将来の移動通信では図1に示すようなサービスのトレンドが予測される。

- (1) 全てが無線でつながる — モノのインターネット(IoT: Internet of Things)や機器間通信(M2M: Machine to Machine)というトレンドに代表されるように、車、住宅、家電、アクセサリ、ロボット、センサーなど、あらゆるモノが無線でネットワーク(クラウド)に接続し、自動的かつ知的に情報収集や管理・制御が行われる。
- (2) 無線で提供されるサービスの高度化および多様化 — 無線で提供されるサービスやアプリケーションはより豊富かつ高度になっていく。例えば、高精細動画ストリーミング(4K/8K 動画)、メディアリッチなソーシャルネットワークサービス(SNS: Social Network Service)、ネットワークを介した触覚通信(Tactile internet)、拡張現実感(AR: Augmented Reality)などのサービスが可能性として挙げられる。また、無線が人々にとってのライフラインとして安全で確実なサービスを提供するものになっていく。

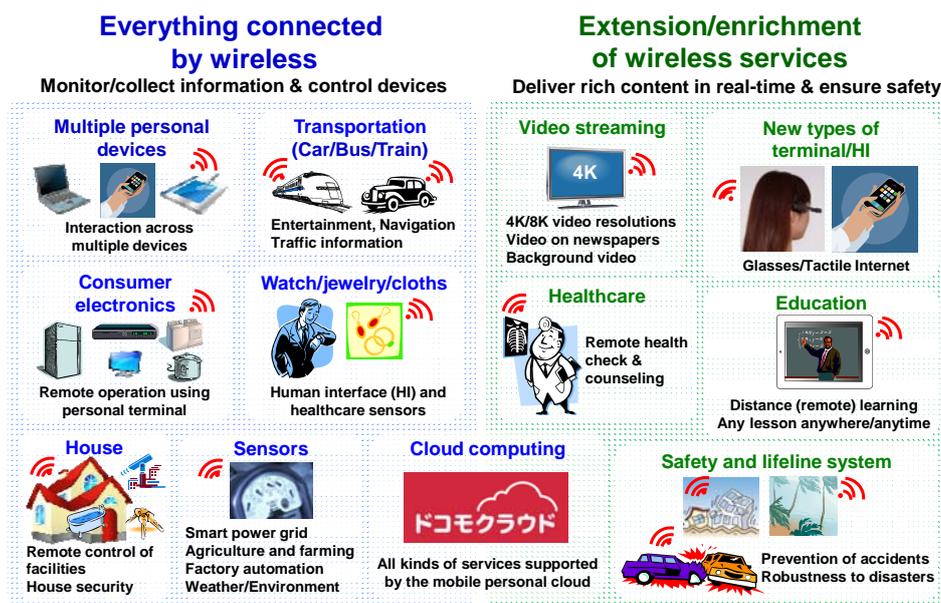


図1 - 将来における移動通信サービスの例

一方、このような市場動向をもとに、移動通信におけるトラフィックが飛躍的に増大していくことが予測されている。ドコモでは、2011年から2015年の4年間でトラフィックが12倍に増大すると予測しており[2]、これは年平均1.86倍の成長率に相当する。また、実際に2011年12月から2014年12月までの3年間で、国内の移動通信の総トラフィックが約6.4倍(年当り1.86倍程度の成長率)に増加したことが報告されている[3]。このようなトラフィックの増加が続くと仮定した場合、2020年代の移動通信のトラフィック量は2010年比で1000倍以上に達することになる。具体的には、年平均1.8倍の成長率の場合、2022年には2010年の1100倍を超えるトラフィックになる。また、トラフィックは場所や時間帯に大きく依存することが知られている。例えば、都市部の駅やショッピングモール、スタジアムなど高密度に多く

のユーザが存在するエリア(ホットスポット)では、発生するトラフィックも極端に多く、日中や深夜のピーク時とそれ以外の時間帯とではトラフィック量が大きく異なる。さらにサービスの多様化を考慮すると、移動通信ネットワーク上で提供されるサービスは情報量の少ないもの(例えば、自動販売機等の M2M 通信やリアルタイムでの遠隔操作など)から情報量の多いリッチコンテンツ(高精細動画ストリーミングなど)まで、トラフィックパターンは非常に幅広くなっていくことが想定される。従って、オペレータがネットワークに收容する必要があるトラフィックの総量も飛躍的に増大する一方で、時間、場所、アプリケーション、デバイスの種類によって大きく異なるトラフィックを効率的にサポートすることも 5G では非常に重要となってくる。

2.2. 5G の要求条件

以上に述べた将来必要となるサービスの高度化および多様化や、予測されるトラフィックの飛躍的な増大を考慮し、2020 年以降の無線アクセス、すなわち「5G」において実現すべき要求条件(目標性能)を、図 2 に示す。

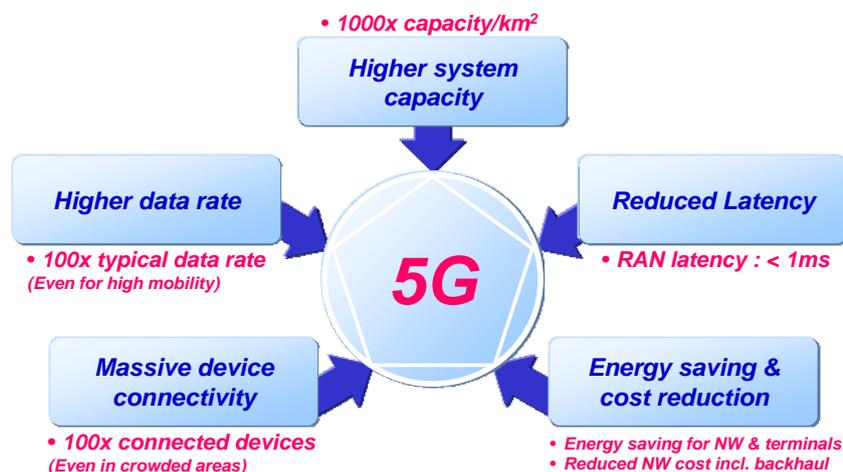


図 2 – 5G の要求条件

- **大容量化:** 5G の無線アクセスネットワークにおいては、2020 年以降に向けて 2010 年比で 1000 倍以上とも予測される爆発的なトラフィックの増加をサポートする必要がある。従って、LTE のマクロセル環境と比較して、単位面積当たりで 1000 倍以上のシステム容量の大容量化を実現することが 5G における基本的な要求条件となる。
- **データ伝送速度の高速化:** リッチコンテンツやクラウドサービス等の普及を考慮すると、データ伝送速度の観点からも 5G は LTE と比較して飛躍的な高速化を実現する必要がある。さらに、時間帯や場所によらず、ユーザにご満足頂ける QoE を常に提供することが非常に重要である。従って、LTE と比較して 100 倍程度のユーザ体感データ伝送速度を実現すること、すなわち、1 Gbps 以上のデータ伝送速度を移動環境も含めたあらゆる環境で提供することが目標性能として挙げられる。また、屋内などの良好な無線環境でのデータ伝送速度としては 10 Gbps 以上の実現がターゲットとして挙げられる。このような高いデータ伝送速度は、5G において無線バックホールのようなシナリオを柔軟にサポートする場合においても、重要になると考えられる。

- **低遅延化:** 触覚通信や AR, M2M 用のリアルタイム制御等, 今までにない低遅延化が要求される新サービスの提供が 5G において求められている. 従って, 無線区間の遅延については, ほぼゼロともいえる 1 ms 以下の実現が, 要求条件として挙げられる.
- **超多数の端末の同時接続:** 5G では, 常時接続のクラウドサービスや IoT に代表される端末数の急激な増加, スタジアムやイベント会場のように多くのユーザが密集した環境や, 災害時など多数の同時アクセスが想定される状況まで, 様々なシナリオで超多数の端末の同時接続をサポートする必要がある. これらに対応するため, LTE と比較して 100 倍以上の同時接続数を効率的かつロバストにネットワークでサポートすることが目標として挙げられる.
- **低コスト・省電力化:** ユーザにより良いサービスを提供するため, 5G では上記のように飛躍的に高い性能目標を掲げている一方で, ユーザに対して適切な費用でサービス提供し, また環境に優しいサービスを提供するために, これらの高い性能を可能な限り低コストかつ省電力のネットワークで提供していくことが必要とされる. また, センサーのような M2M 端末の普及を考慮すると, 端末の観点からも低コスト化およびバッテリーの長寿命化は, 非常に重要な要求条件となる.

3. ドコモの 5G 技術コンセプト

3.1. 技術進化のアプローチ

5G の要求条件として挙げた 1000 倍の大容量化や 100 倍の高速化といった飛躍的な性能改善を実現するためには, 複数の技術アプローチによる高度化が必要になると考えられる. 具体的には, 図 3 に示すように, 周波数の利用効率を改善する無線技術, 幅広い周波数帯を有効活用する技術, 高密度なスモールセルを効率的に運用するための技術, および無線 LAN 等への高効率なオフロードなどを相互補完的に導入していく必要がある. 例えば, セル当たりの周波数利用効率(bps/Hz/cell), 周波数帯域幅(Hz), 単位面積当たりのセル数(cell/km²)をそれぞれ 10 倍に向上することができれば, 単位面積当たりの無線通信容量(bps/km²)は 1000 倍となる(図 3 の“キューブ”の体積に相当). この中で, 特に周波数帯域幅を大きく拡大するためには, 3G や LTE で用いられている既存の周波数帯に加えて, より高い周波数帯をセルラーシステムで用いるために開拓していく必要がある. また, セル数の増大はネットワークのコストや消費電力の増大を抑えつつ実現していく必要がある. 5G では創意工夫によって, このような問題を解決していく必要がある.

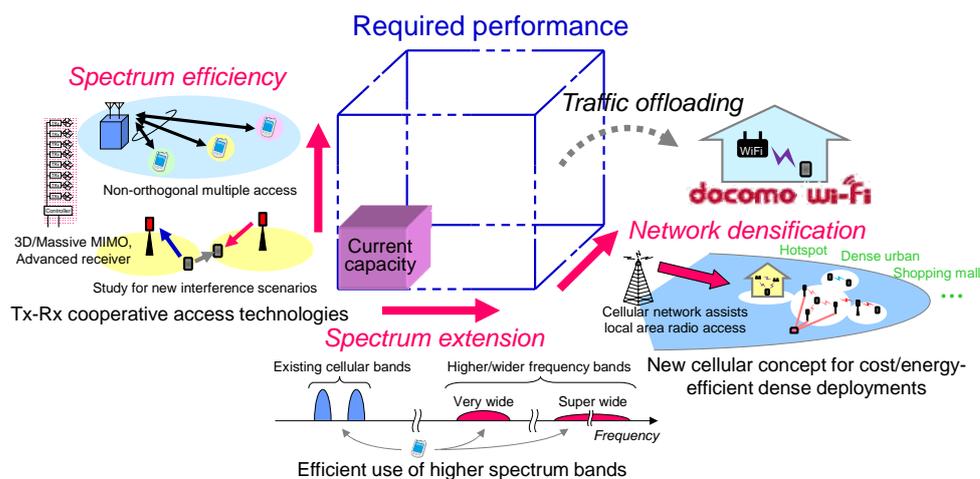


図 3 - 技術進化のアプローチ

3.2. LTE および LTE-Advanced の発展と 5G

2020 年以降に向けて移動通信システムが進化していく際に取り得るアプローチとして、図 4 に示すように、大きく二つの方向性が考えられる。一つは LTE および LTE-Advanced をさらに進化させていくアプローチであり、もう一つは全く新しい RAT (Radio Access Technology) を導入するという大きな変化を伴うアプローチである。前者は基本的に、既存 LTE システムとの後方互換性を保持し続ける継続的な進化であり、今後も長期に渡って持続していくことが必要である。一方、後者において導入される“New RAT”は、LTE との後方互換性を維持するよりも、100 倍の高速化や 1000 倍の大容量化といった飛躍的な性能改善を優先して実現することを目指した全く新しい無線インターフェースである。特に、飛躍的な性能改善の実現には、これまでよりも高い周波数帯を用いた広帯域化が必要と考えられ、New RAT の無線パラメータや信号波形に大きく影響するものと考えられる。

以上より、2020 年以降の 5G 無線アクセスは、このような LTE および LTE-Advanced の継続的発展と、New RAT の導入による革新的発展のいずれか、またはそれらの組み合わせによって実現されるものと考えられる。

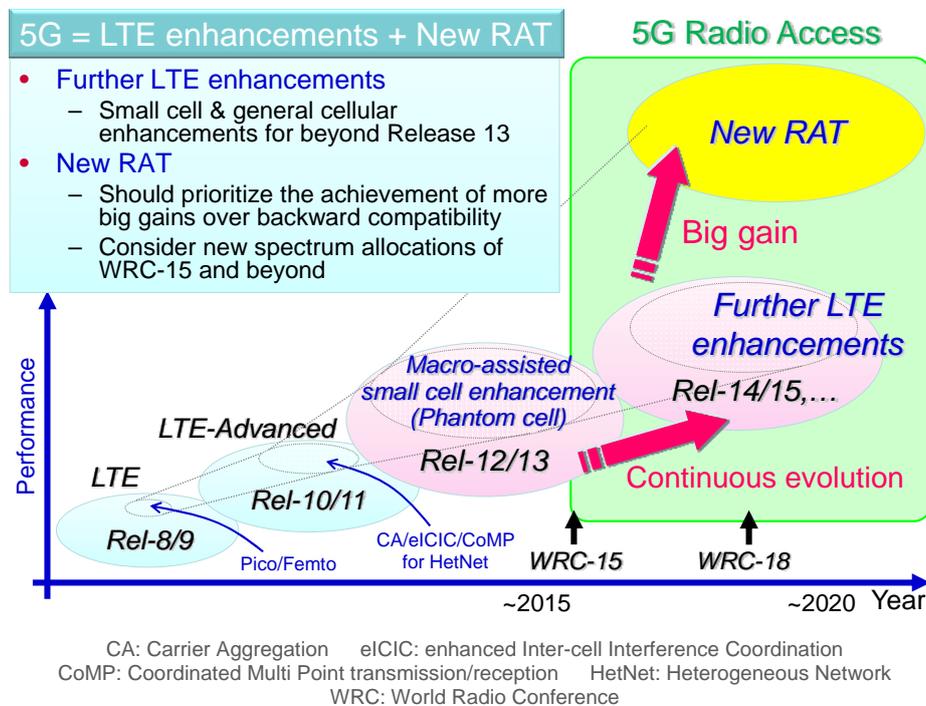


図 4 – LTE/LTE-Advanced の発展と“New RAT”

3.3. ドコモの 5G 技術コンセプト

図 5 に、ドコモの 5G 技術コンセプトの概念を示す。前節で述べたように飛躍的な性能改善を実現するためには、既存の周波数帯に加えて、3.5 GHz 帯およびミリ波を含む 10 GHz 以上の周波数帯といった、従来よりも高い周波数帯を用いた広帯域化が必要だと考えられる。しかしながら、周波数帯が高くなるに従って電波の波長は短くなり遠くまで伝搬しなくなる特性を有するため、高い周波数帯は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、通信の安定性確保の観点からは移動通信に適さないものとされてきた。上記特性を考慮し、ドコモの考える“5G 技術コンセプト”は、このような高い周波数帯を従来の低い周波数帯と組み合わせることで、低い周波数帯で通信の安定性を確保しつつ、高い周波数帯を用いた広帯域化によって飛躍的な高速・大容量化を実現していくコンセプトである。

無線インタフェースの観点からも、主に既存周波数帯あるいは 6 GHz 以下の周波数帯をターゲットとした LTE および LTE-Advanced の継続的発展と、ミリ波を含むような高い周波数帯をサポートすることが可能な New RAT との組み合わせによって、5G 無線アクセスが構成されるものと考えている。特に既存の低い周波数帯においては、New RATを導入する可能性も残しつつ、可能な限りLTEとの後方互換性を保持し続けることが望ましい。従って、技術的な観点からも、低い周波数帯向けの改善技術、高い周波数帯向けの最適設計や要素技術、および周波数帯や無線インタフェースによらず適用可能な要素技術が、それぞれに適した無線インタフェースおよび双方に導入されていくものとする。さらに、端末は LTE/LTE-Advanced と New RAT、すなわち低い周波数帯と高い周波数帯の双方に接続(CA もしくは Dual connectivity)するため、それら無線インタフェース間の密な連携(Tight interworking)のサポートも必要である。

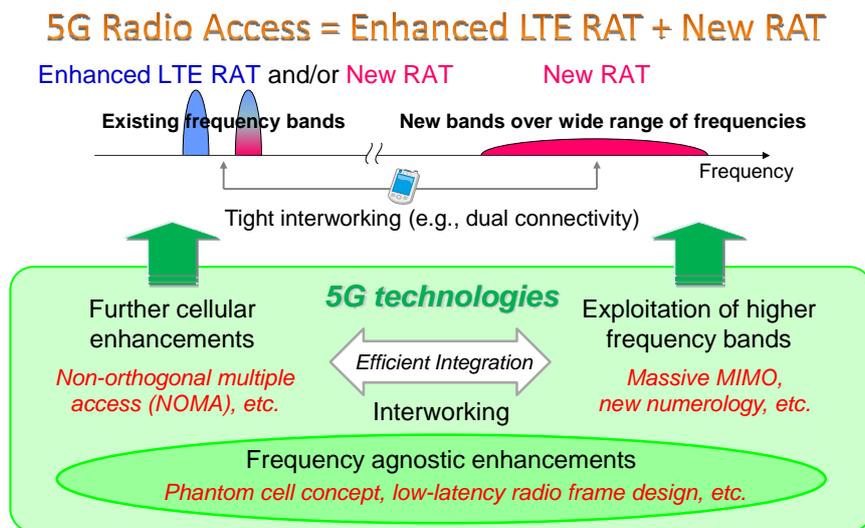


図 5 – ドコモの 5G 無線アクセス技術コンセプト

以上に述べた、5G 無線アクセスの技術コンセプトを実現するために有力な無線アクセス技術の候補を以下に示す。

- 低い周波数帯と高い周波数帯との間の連携技術
 - ファントムセル(制御信号/ユーザデータ(C/U)分離)
 - フレキシブル・デュープレクス
- 高い周波数帯を有効利用するための技術
 - 高い周波数帯への無線パラメータや信号波形の最適化
 - 大規模(Massive) MIMO
- 低い周波数帯における容量改善技術
 - 非直交多元接続(NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access)

4. 5G 無線アクセスの要素技術

4.1. ファントムセル

送信電力の小さい基地局を有するスモールセルによるネットワークの高密度化は特にトラフィックの高いホットスポットのようなエリアにおけるトラフィックの爆発的増加を効率よくサポートするソリューションとして有望である。このためドコモでは、高度化 C-RAN (Centralized Radio Access Network)アーキテクチャを開発しており、2015 年頃の商用化を目指している[4]。この高度化 C-RAN は、リモート設置型基地局 (RRE: Remote Radio Equipment)と集中制御を行う基地局 (eNodeB)によって構成され、広域エリアをカバ

一するマクロセルのエリア内に局所的なエリアをカバーするスモールセルを追加配置し(Add-on セル), マクロセルとスモールセル間において異なる周波数を使用し、LTE-Advanced の主要技術であるキャリア・アグリゲーション(CA: Carrier Aggregation)を適用する新たなネットワークアーキテクチャである。これにより、マクロセルの周波数において端末が移動する際の接続性を維持しつつ、追加されるスモールセル(アドオンセル)によって、スループットの向上と大容量化を実現する。高度化 C-RAN アーキテクチャでは、eNodeB のベースバンド装置(BBU: Baseband Unit)において CA や移動に伴うスモールセルの切り替え処理を行い、それらの処理に必要な制御信号を BBU で終端することにより、多数の端末をサポートする際のコアネットワーク側へのシグナリング負荷を低減する効果も期待できる。

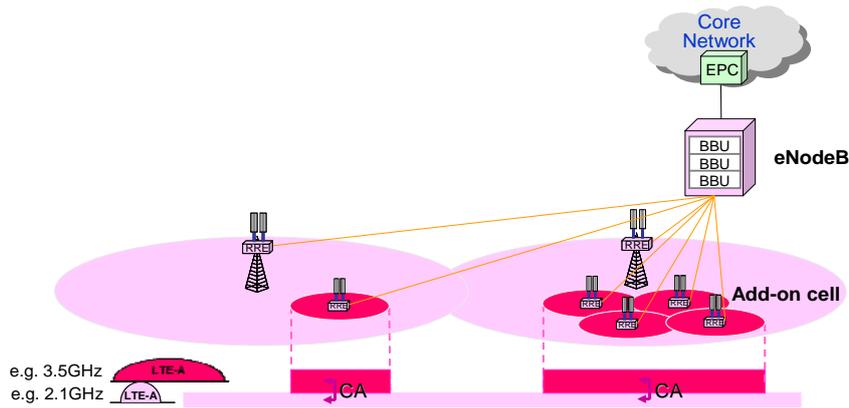


図 6 - ドコモの高度化 C-RAN アーキテクチャ

さらに、2012 年に LTE Release 12 以降に向けた 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ワークショップにおいて、ドコモはファントムセルのコンセプトを提案した[5]。これは、図 7 に示すように、異なる周波数帯を適用したマクロセルとスモールセルとの間において、制御信号(C-plane: Control plane)とデータ信号(U-plane: User plane)を分離する C/U 分離を用いるネットワーク構成のコンセプトである。このファントムセルの目的と利点は、先に述べた高度化 C-RAN と同様にハンドオーバー等によるモビリティ管理制御を複雑化することなく、比較的高い周波数帯へも容易にスモールセルを展開可能であることなどが挙げられるが、さらに、高度化 C-RAN とは異なる分散型の基地局構成も含めて C/U 分離を実現する技術、すなわち異なる基地局間での CA (Dual connectivity) 技術への拡張を含むコンセプトである。また、ファントムセルには、高い周波数帯のスモールセルにおいて物理的なセル ID を仮想化するバーチャルセル技術や、端末が高周波数帯のスモールセルを高効率に発見(ディスカバリ)する技術など、より高度な機能拡張が考慮されている[6][7]。

これらのファントムセルに関連する要素技術は、LTE におけるスモールセルの拡張(SCE: Small Cell Enhancement)技術として、すでに 3GPP で標準化が進められている。しかしながら、ファントムセルは低い周波数帯に LTE/LTE-Advanced の継続的発展による無線インタフェースを適用し、高い周波数帯に“New RAT”を適用する 5G 無線アクセスのコンセプトにおいても基本となる考えである。

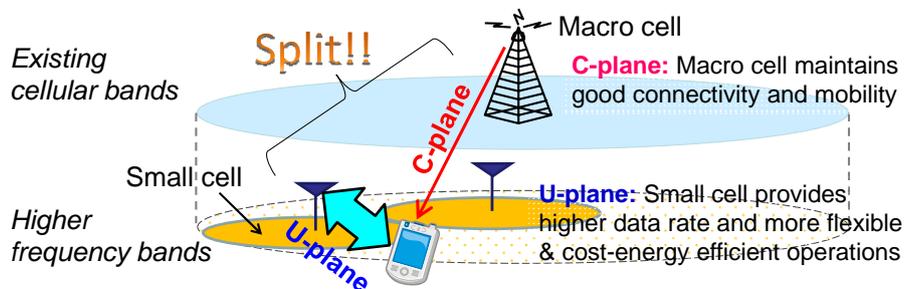


図 7 - ファントムセルコンセプト

4.2. フレキシブル・デュプレクス

4G までの移動通信方式は、基本的に上下リンクを周波数領域で分割する FDD (Frequency Division Duplex)方式か、時間領域で分割する TDD (Time Division Duplex)方式かのどちらかが適用されるシステムであった。しかしながら、5G で想定される幅広い周波数帯を用いる移動通信では、異なる複信(デュプレクス)方式が各周波数帯に適用される可能性があり、より柔軟に異なる方式をサポートする“フレキシブル・デュプレクス”の実現が要求されるものと考えられる。特に、既存のセルラーの周波数帯では、(特に日本では)FDD が主に用いられてきたのに対し、将来の高い周波数帯では TDD が適用される可能性も高い。このため、異なる周波数帯で C/U 分離を行うファントムセルのコンセプトを複信方式の差異によらず柔軟にサポートできることが望ましい。従って、図 8 のような FDD, TDD, もしくは片方向(下りまたは上り)リンクのみといった通信リンクの柔軟なサポートに加え、電波免許が不要な周波数帯(Unlicensed band)を含む適応的な周波数選択や CA/Dual connectivityを実現していく技術、および、それらに伴って課題となる上下リンク間の干渉対策技術などが、5G における“フレキシブル・デュプレクス”の要素技術として考えられる。

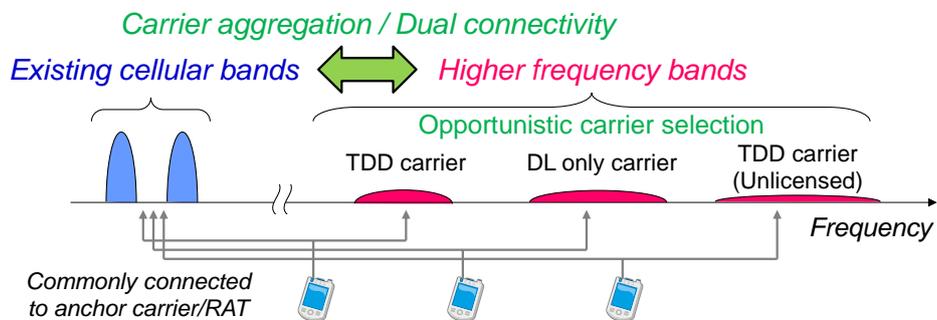


図 8 - フレキシブル・デュプレクスの例

4.3. 高周波数帯への無線パラメータや信号波形の最適化

5G では新たな無線インターフェース(New RAT)を導入し、LTE との非互換性を許容して飛躍的な性能の改善を実現する必要がある。特に、10 Gbps 以上の伝送レートを提供するため、数 100 MHz から 1 GHz 程度以上の広帯域化に加えて高い周波数帯のサポートが必要となる。特に、高い周波数帯では位相雑音の影響が顕著になるため、無線パラメータの最適化などにより位相雑音に対する耐性を高める必要がある。例えば、LTE ではサブキャリア間隔が 15 kHz の OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)を信号波形として適用しているが、図 9 のように高周波数帯ではサブキャリア間隔をさらに広げる(OFDM シンボル長を短くする)ことで、位相雑音への耐性を高めることができる。このような高周波数帯向けの無線パラメータの実現方法として、LTE の無線パラメータをスケラブルに変えたものを用いるような設計も有力である。スケラブルな LTE パラメータで New RAT を実現することによるメリットとして、LTE と New RAT の双方に対応する(Dual mode)端末や、双方へ同時接続(Dual connectivity)する端末の実装をより容易にすることなどが挙げられる。また、シンボル長の短縮によりパケット伝送の送信区間(TTI: Transmission Time Interval)も同時に短縮でき、無線アクセス区間の遅延を大きく低減することが可能である。

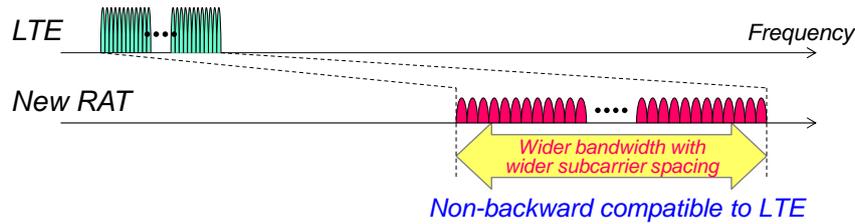


図 9 – New RAT を実現するスケーラブルLTE無線パラメータ

なお、将来的に New RAT を用いて多様なシナリオ (端末間通信 (D2D: Device-to-Device)、無線バックホール、マルチホップ等) をサポートすることを考慮すると、上下リンク間で対称性の高い無線インタフェース設計が望ましいと考えられる。さらに、信号波形の観点からは MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術との親和性が高く、広帯域伝送におけるマルチパス環境で高い周波数利用効率を実現できる OFDM が LTE と同様有力である。その一方で、将来的に非常に高い/広い周波数帯で周波数利用効率よりもカバレッジ拡大が優先されるシナリオや、セル内で非同期なアクセスが多数混在するなどの新たなシナリオへの最適化を考慮すると、シングルキャリアや FBMC (Filter Bank based Multicarrier) 等の信号波形の適用も検討する必要がある。特に、シングルキャリアは超広帯域化 (例えば数 GHz 程度の帯域幅) をサポートする場合には、OFDM よりもカバレッジの観点で優れるため有力候補になる。従って、図 10 のように、5G では周波数帯や適用環境に応じて異なる無線パラメータや信号波形を適用するアプローチも有力であると考えられる。

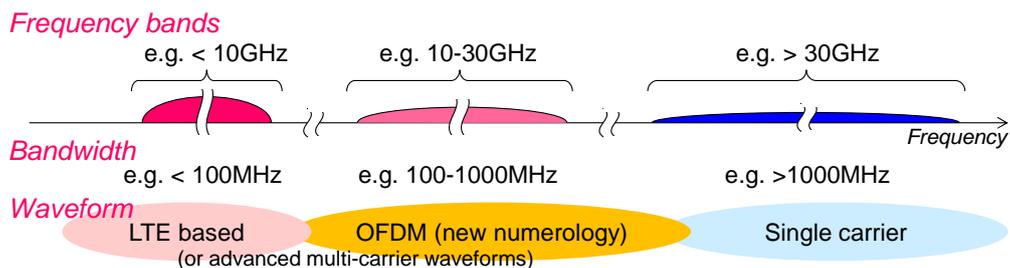


図 10 – New RAT における周波数帯に応じた信号波形の適用例

4.4. 大規模 (Massive) MIMO

多数のアンテナ素子を用いる Massive MIMO 技術は高周波数帯を有効利用するための 5G のキー技術として昨今非常に注目されている。図 11 に示すように、多数のアンテナ素子を用いるビーム形成によって、電波の飛ばない高周波数帯におけるカバレッジを確保したり、複数のユーザへ同時にビーム送信を行って周波数利用効率を向上することなどが可能である。高周波数帯では伝搬損失が増大する反面、アンテナ素子の大きさが波長に比例して小さくなるため、非常に多数のアンテナ素子を用いる高度なマルチアンテナ技術が現実的な大きさのアンテナで実現できるメリットがある。例えば、20 cm 四方程度の平面アンテナにおいて、アンテナ素子を垂直・水平の二次元に半波長間隔で配置した場合、3.5 GHz 帯では 16 個、10 GHz 帯では 169 個、20 GHz 帯では 650 個以上ものアンテナ素子を配置できる計算となる。この場合、ビームの利得によって、周波数が 10 倍高くなる毎に 20 dB 増大する伝搬損失を理想的には完全に補償することができる。

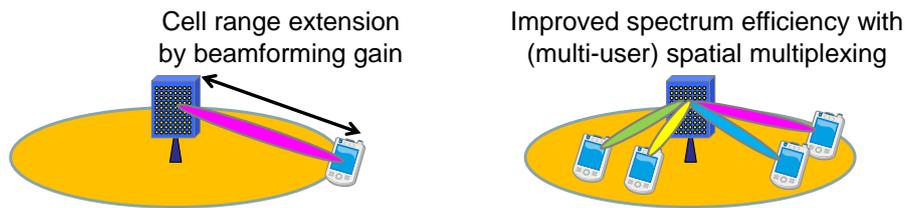


図 11 – Massive MIMO 技術の適用効果

Massive MIMO 技術には、高精度なビームフォーミングや RF 回路の実現法、鋭い指向性ビームを用いて通信する際のモビリティや接続性確保といった技術課題がある。特に、Massive MIMO を適用した場合に、報知情報やページング、および災害情報など、セル全体にブロードキャストする信号やユーザの方向を特定する前に基地局が送信する必要がある信号については、特定ユーザに向けてのビームフォーミングの適用が困難である。従って、ドコモでは図 12 のようにファントムセルコンセプトをベースとして、Massive MIMO 技術を低い周波数帯のマクロセルとオーバーレイした高い周波数帯のセルに適用する“マクロアシスト構成”を提案している。このようなマクロアシスト構成を適用することで、報知情報やページング、および災害情報などを低い周波数帯で運用するマクロセルから広いカバレッジで送信することができる。その他にも、マクロアシスト構成は高周波数帯におけるセルサーチやビームフォーミングを高速に行うための補助情報をマクロセルから通知できるなどのメリットがある。

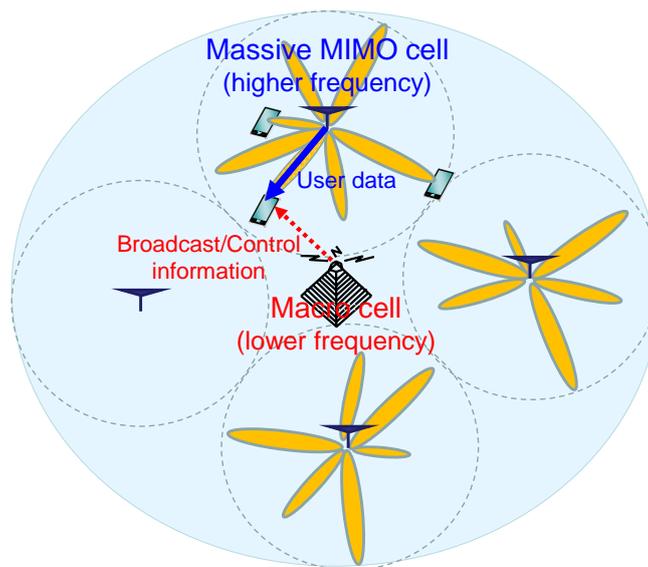


図 12 – Massive MIMO とファントムセルの組み合わせ

4.5. 非直交多元接続 (NOMA)

非直交多元接続(NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access)は、セル内の複数のユーザの信号を同一の無線リソース上に多重し、同時に送信する多元接続法である。2G では TDMA (Time Division Multiple Access), 3G では CDMA (Code Division Multiple Access), そして 4G では OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)と各世代の移動通信システムにおいてユーザ多重に使用されてきた無線リソース領域に対して、NOMA はさらに新しい領域(電力領域)をユーザの多重に活用する。図 13 のように、時間、周波数、または符号領域のユーザ多重に対して非直交性を意図的に導入し、多重されたユーザの信号の分離は、ペアとなるユーザ間の電力配分と受信機におけるシリアル干渉キャンセラ(SIC:

Successive Interference Cancellation)の適用によって実現される。複数のユーザの送信信号を多重する際に、ペアとなるユーザ間におけるチャンネル利得(パスロスやシャドウイングなどの伝搬損失)の差が大きい場合、OFDMAのような直交多重に比較して NOMA を適用することによる容量の改善効果大きいことが知られている[8]。さらに、NOMA は OFDMA における周波数スケジューリング技術とは異なり、各ユーザからフィードバックされる瞬時のチャンネル品質情報(CSI: Channel State Information)への依存性の少ない無線リソース割り当て技術である。従って、高速移動するユーザが多い環境や、電車やバスなど複数の高速移動端末に対して無線でのバックホールを適用するシナリオなど、直交多重に比較して NOMA の性能改善が期待できるシナリオは数多くあるものと考えられる。さらに、5G が重視している超多数の端末が同時接続するようなシナリオでは、端末からの CSI フィードバック量も膨大になる可能性があり、フィードバックへの依存性の少ない NOMA は非常に有効であると考えられる。

NOMA の実現のためには受信機におけるデバイスの処理能力の向上が必須である。信号処理能力の向上がムーアの法則に従うとすれば、将来 SIC のような高度な信号処理が、一部の高性能端末だけでなく一般的な端末にも広く実装されるものと考えられる。なお、SIC を含むネットワークアシスト型の干渉キャンセラ(NAICS: Network-Assisted Interference Cancellation and Suppression)は、すでに 3GPP において導入が議論されているが、これはセル間干渉の抑制を主目的としている。将来、NOMA は LTE/LTE-Advanced における NAICS の拡張技術として導入されていく可能性もある。

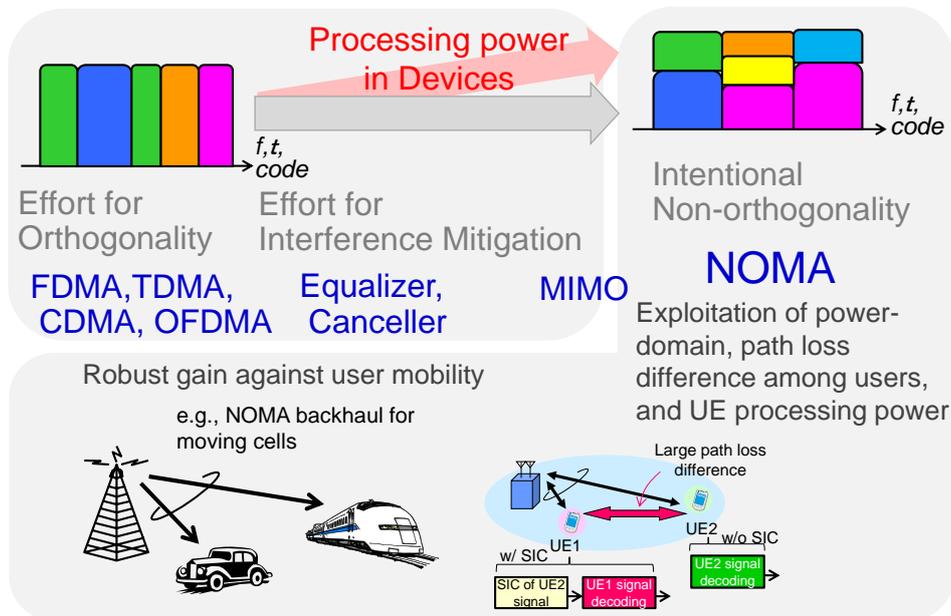


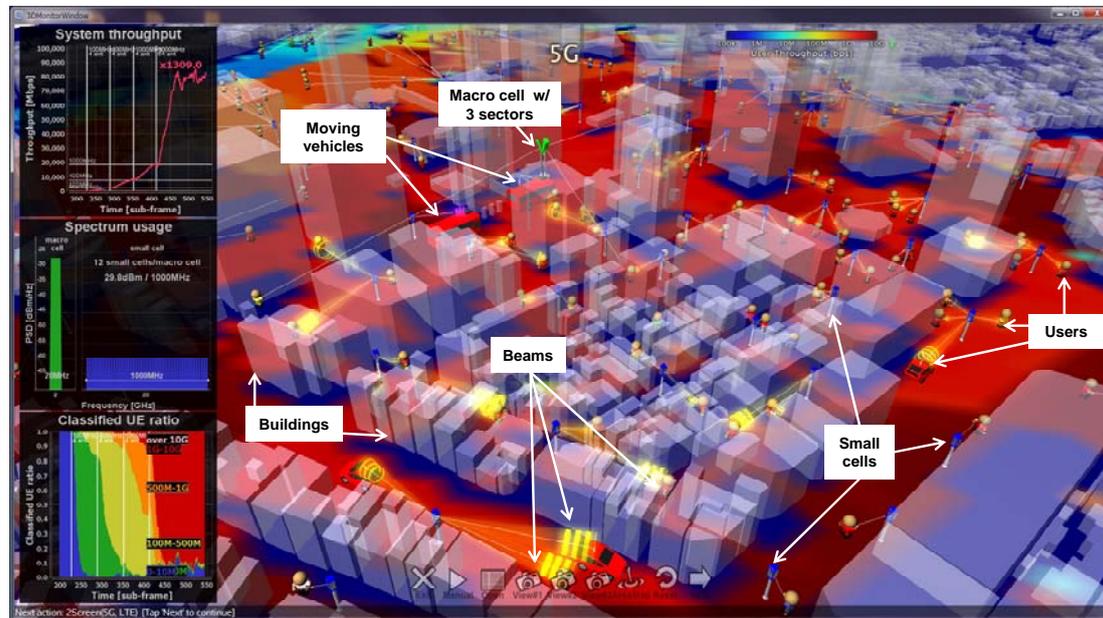
図 13 – セル内における意図的な非直交性を利用する NOMA

5. ドコモの 5G 関連活動

5.1. 5G リアルタイムシミュレータおよび実証実験

ドコモは 2020 年の 5G システムの導入を目標とし、5G の要求条件、技術コンセプト及び候補技術に関する検討を 2010 年から開始している。ドコモの 5G の技術コンセプトを可視化しつつ、5G システムにおける候補技術のゲインを評価する目的で、2012 年よりリアルタイムシミュレータの開発を進めてきた。図 14 に示すように、実際の東京の都市環境を模擬したモデルにおいて、1 セル 3 セクタ構成のマクロセル (2 GHz 帯/20 MHz 帯域幅) のセクタ内に、スモールセル (20 GHz 帯/1 GHz 帯域幅) を 12 個配置し、各スモールセルには 64 アンテナ素子の Massive MIMO を用いることで、マクロセルのみの場合と比較して約 1300 倍の通信容量を達成できることを示した。なお、このとき 90% 以上のユーザで 1 Gbps 以上

のユーザスループットを達成できている。これにより、5G に向けたシステムの大容量化とデータレートの高速化には、5G のキー技術候補であるスモールセルによるネットワークの高密度化、高周波数帯／広帯域幅の有効活用、Massive MIMO による周波数利用効率の改善といった複数のアプローチの組み合わせが 5G の要求条件を満たす上で有効であることを示すことができた。



新宿エリアの伝搬環境をレイトリーシング法より模擬した。マクロセルの送信アンテナ数は 2 とした。スモールセルにおける Massive MIMO (64 アンテナ素子) のプリコードとしてエルミートプリコーディングを用いており、チャネル情報は既知とした。なお、Massive MIMO 送信時はシングルユーザ MIMO とマルチユーザ MIMO の動的な切り替えやランクアダプテーションを行い、周波数利用効率を向上させている。2 GHz 及び 20 GHz の端末側の受信アンテナ数は 4 とした。

図 14 – ドコモ 5G リアルタイムシミュレータ

その他にもドコモの 5G 技術コンセプトの実証に向けた様々な活動を行っている。移動通信のフィールド実験では 2012 年 12 月に世界初の屋外環境での 10 Gbps 伝送に成功している。本実験は東京工業大学との共同研究で、10 GHz 以上の周波数帯を移動通信に用いた世界初のフィールド実験である[9]。そして 5G の要素技術の実証実験を進めるため、2013 年より世界の主要ベンダーとの実験協力実施に向けた調整を進め、現在、Alcatel-Lucent, Ericsson, 富士通, 日本電気, Nokia, Samsung の 6 社との個別実験協力を実施するに至っている[1]。実証実験の目的は、5G で要求される性能を実現すること、および現在利用されている周波数よりも高い 6 GHz を超える周波数を有効活用するための技術、単位面積当たりのシステム容量を増大させる技術、M2M や様々なアプリケーションに適した無線伝送方法など、幅広い周波数帯における様々な無線アクセス技術をフィールド実験にて検証することである。

5.2. 5G 標準化準備活動

5G に関連する議論は、ITU-R の Study Group 5 Working Party 5D (WP5D)において、“IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”として進められている。また、各国の標準化団体や、大学や企業等の様々な研究機関において世界的に 5G に関する検討が活発に行われており、国際会議においても 5G トピックの特別セッションが数多く開催されている。ドコモは、欧州の METIS プロジェクトや日本の ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc (20B AH)グループ、NGMN アライアンス等の様々なプレ標準化活動を通じて 5G 検討に積極的に貢献している。

6. まとめ

本ホワイトペーパーでは、ドコモがこれまでに検討を行ってきた 5G の無線アクセス方式に関する要求条件、技術コンセプト、要素技術、および関連するドコモの研究活動などを概説した。5G では 2020 年以降に向けて、2010 年と比較して、100 倍の高速化、1000 倍の大容量化、体感ゼロの低遅延といった飛躍的に高い要求性能を実現しつつ、様々なシナリオやサービス・アプリケーションを、可能な限り低コスト・省エネルギーのネットワークでサポートしていく必要がある。ドコモが提案する 5G の技術コンセプトでは、既存の低い周波数帯からミリ波と呼ばれる高い周波数帯までの幅広い周波数帯を効果的に組み合わせ用い、周波数帯域幅を拡大するとともに周波数帯に応じてシステム性能を改善する技術、および周波数帯によらず適用可能な技術の双方を考慮している。今後も、さらなる無線アクセス技術の検討や、屋外実験を通じた実証、および標準化に向けたコンセンサスの確立が必要である。さらに、無線のみならずネットワーク全体が 5G への進化をサポートする必要がある。特に、コアネットワークにおけるさらなるスケーラビリティと柔軟性の確立は、5G で要求される幅広いサービスの要求品質や多数の端末をサポートしていくためにも非常に重要である。5G の無線インターフェースの標準化は 2020 年のサービス開始を考慮すると、3GPP における Release 14 頃から開始されるものと予想される。ドコモは、お客様に未来のスマートライフを届けるため、今後も精力的な 5G の研究開発を継続していく。

7. 参考文献

- [1] 報道発表資料, "世界主要ベンダーと 5G 実験で協力," 2014 年 5 月.
https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2014/0508_00.html
- [2] ドコモアニュアルレポート 2012, "「中期ビジョン 2015」の展開について".
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/library/annual/fy2011/html/feature02/index.html>
- [3] 総務省, "我が国の移動通信トラフィックの現状," 2014 年 3 月.
- [4] 報道発表資料, "「高度化 C-RAN アーキテクチャ」を実現する基地局装置の開発を開始," 2013 年 2 月.
https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2013/0221_00.html
- [5] 3GPP RWS-120010, "Requirements, candidate solutions & technology roadmap for LTE Rel-12 onward," DOCOMO, June 2012.
- [6] Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, and H. Ishii, "Future steps of LTE-A: Evolution toward integration of local area and wide area systems," IEEE Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 12-18, Feb. 2013.
- [7] H. Ishii, Y. Kishiyama, and H. Takahashi, "A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and Phantom cell concept," IEEE Globecom, Dec. 2012.
- [8] A. Benjebbour, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada, and T. Nakamura, "System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements," IEEE Globecom, Dec. 2013.
- [9] 須山 聡, 沈 紀輝, 小田 恭弘, "超高速移動通信の実現に向けた 10Gbps 屋外無線伝送実験," ドコモテクニカルジャーナル, vol. 21, no. 4, pp. 22-27, Jan. 2014.