

# LTE/LTE-Advanced の目指すもの

Requirements for LTE/LTE-Advanced

安部田貞行

## Abstract

スマートフォン等の普及に伴うトラフィックの増大により、高速かつ大容量の移動通信システムが必要とされており、近年、世界的に導入が進められている LTE が注目を浴びている。LTE は従来の第 3 世代携帯電話 (3G) に比べて飛躍的な性能向上を実現しており、100 Mbit/s 以上の伝送速度、3~4 倍の周波数利用効率、遅延時間の大幅な削減といった特長を持つ。本稿では LTE、更には LTE の発展形である LTE-Advanced が標準化された経緯を紹介するとともに、その特長について概説する。

キーワード：携帯電話、移動通信、LTE、LTE-Advanced

## 1. はじめに

現在、スマートフォン等の普及に加えて、ソーシャルメディア、ビデオストリーミングなどのサービス拡大により、モバイルデータトラフィックが急増している。図 1 に ITU-R で取りまとめたトラフィックの需要予測を紹介する。2007 年から 2010 年までの実際のトラフィック (Actual Traffic) は、2005 年に予測したトラフィック

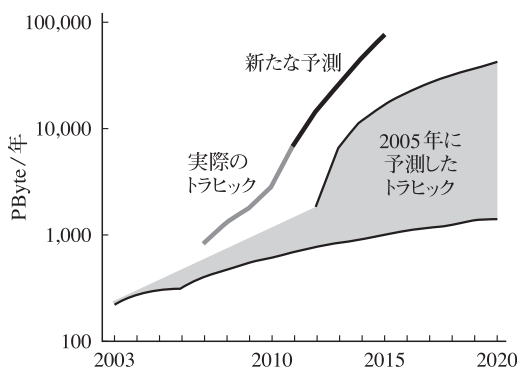


図 1 トラフィックの需要予測

(Range of forecasts in M. 2072) の最大値を大幅に上回り、新たな予測 (New Forecast) のグラフからも分かるように、今後も急激な増加が見込まれている<sup>(1)</sup>。

このようなトラフィックの増大に対応するためには、高速かつ大容量な移動通信システムが求められており、LTE (Long Term Evolution) が世界的に注目されている。LTE は従来の第 3 世代携帯電話システム (3G: 3<sup>rd</sup> generation) に比べて、飛躍的な性能向上を実現しており、伝送速度を高速化するとともに、周波数利用効率の大幅な向上、更に、接続遅延、転送遅延といった遅延時間を大幅に低減する特長を有している。

LTE が世界で最初に導入されたのは 2009 年末であるが、そこから僅か 2~3 年余りで、100 以上のオペレータが商用導入を行っており、350 以上のオペレータが商用導入に向けた準備をしている (2012 年 10 月現在)。これは、現在までに標準化された携帯電話システムよりも、非常に早い速度で世界的に展開されていることになる。

本稿では LTE が目指したものとして、LTE の技術的な要求条件を中心に解説するとともに、それらを実現するための技術についても概要を説明する。更に LTE の発展形である LTE-Advanced についてもその概要について説明する。

安部田貞行 正員 (株)NTT ドコモ無線アクセス開発部  
Sadayuki ABETA, Member (Radio Access Network Development Department,  
NTT Docomo, Inc., Yokosuka-shi, 239-8536 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.3 pp.144-149 2013 年 3 月  
©電子情報通信学会 2013

## 2. LTE の立ち上げ

移動通信システムの国際標準の技術仕様を作成している 3GPP (3<sup>rd</sup> generation partnership) において、LTE の議論が開始されたのは、今から約 8 年前の 2004 年である。当時は、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) が世界的に広がり始めた頃であり、日本ではフィーチャーフォンによる i-mode 等のインターネット接続サービスや、画像等を含むメールの送受信などのデータ通信によるトラフィックが増大し始めていた。3GPP においても、今後のデータ通信の高速化、大容量化に対応するために W-CDMA の発展形として、ダウンリンクの packets 伝送の高速化を実現する HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) の仕様が完成し、アップリンクの高速化として HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) の仕様の作成を行っていた。これらの HSDPA 及び HSUPA (総称して HSPA と呼ぶ) も、データ通信速度だけでなく、周波数利用効率も改善できる技術であるため、ビット当りのコストの低減が可能である。

しかしながら、データトラフィック需要の増大、及びコンテンツの大容量化はとどまるところを知らず、更には定額制を含めた携帯電話料金の低廉化の要求もあった。これらの需要、要求に対応するには、より一層のビットコストの削減が重要な課題であり、更に、TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) などのデータ伝送を高速に行い、ユーザがストレスなく通信を行うためには、接続遅延、伝送遅延の低減も重要な課題であった。これらを効率良く実現するため、第 3 世代携帯電話の枠にとどまらず、第 4 世代携帯電話までを見据えた革新的な技術が必須であることが認識されていた。そこで、3GPP で 3G システムの長期的な発展を検討する必要性が高まり、「3G RAN LTE」と称するワークショップが 2004 年 11 月に開催された。その後、

NTT ドコモが中心となり、26 社の賛同を得て、2004 年 12 月に 3GPP 内での LTE 検討開始が提案され、合意された<sup>(2)</sup>。

図 2 に LTE の標準化スケジュールを示す。まず、LTE が目指すもの、すなわち、3. で紹介する要求条件について議論が行われ、2005 年 6 月には要求条件に関するテクニカルレポート (TR 25.913) が承認された<sup>(3)</sup>。続いて「RAN とコアネットワークの機能分担」、「無線インタフェースプロトコルアーキテクチャ」、「物理レイヤの基本検討」の検討を経て、詳細コンセプトを取りまとめたテクニカルレポート (TR. 25.912)<sup>(4)</sup> が 2006 年 6 月に完成し、実現性の確認を含めた基本検討 (Study Item) を完了した。その後、コーディングレベルまでを記載した詳細仕様 (Work Item) の作成を行い、2009 年 3 月に ASN.1 (Abstract Syntax Notation One, 抽象構文記法 1) が凍結 (Functional Freeze) され、最初の LTE Release8 (LTE Rel. 8) の仕様が完成した。

次章以降では、上記、要求条件、及びその要求条件を実現するための技術的な特長について紹介する。

## 3. LTE の要求条件

文献(2)には LTE の必要性について以下の記載がある “With enhancements such as HSDPA and Enhanced Uplink, the 3GPP radio-access technology will be highly competitive for several years. However, to ensure competitiveness in an even longer time frame, i.e. for the next 10 years and beyond, a long-term evolution of the 3GPP radio-access technology needs to be considered.” これは、LTE がその名のとおり、Long term での発展を意識したものであることを示しており、これに基づいて設定された要求条件もかなり挑戦的なものであった。具体的に議論された要求条件には、スループット、周波数利用効率、遅延、モビリティ性能などの性能

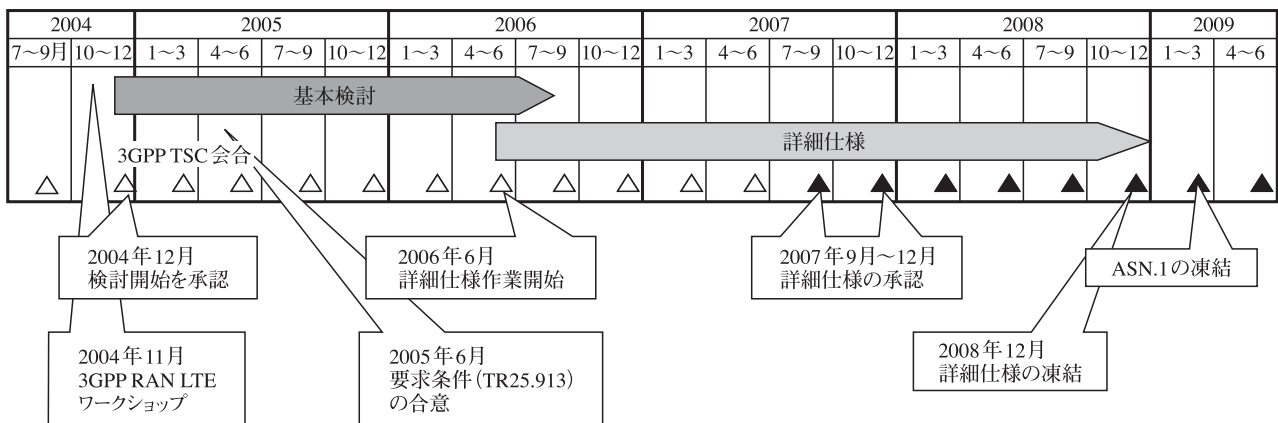


図 2 LTE の標準化スケジュール

表1 主な性能面での要求条件

最大データ速度 (bit/s)	下り	100 M 以上
	上り	50 M 以上
接続遅延 (待ち受け→接続状態)		100 ms 以下
転送遅延 (RAN 内)		5 ms 以下
平均ユーザスループット (Rel. 6 HSPA と比較)	下り	3~4 倍
	上り	2~3 倍
セル端ユーザスループット (Rel. 6 HSPA と比較)	下り	2~3 倍
	上り	2-3 倍
周波数利用効率 (Rel. 6 HSPA と比較)	下り	3~4 倍
	上り	2~3 倍
チャンネル帯域幅 (Hz)		1.4 M, 3 M, 5 M, 10 M, 15 M, 20 M

向上に関する要求条件に加えて、導入シナリオ、リソースマネジメントと多岐にわたっている。以下に、主な要求条件とその目的について解説する。また、表1に性能面での主な要求条件を示す。

#### (1) 周波数利用効率の向上

周波数利用効率は、周波数をいかに有効に利用できるかを示しており、ビット当りのコストの低減を示す指標でもある。LTEの要求条件として、Rel. 6のHSPAに比べてダウンリンクで3~4倍、アップリンクで2~3倍の効率改善を設定した。詳細仕様の作成段階でシミュレーションによる性能評価を行い、ダウンリンク約3倍強、アップリンク約2倍強の性能を実現する見通しが得られていた。

周波数利用効率の向上により、同じ環境において、ユーザの数が同じであれば一人当りのスループットが向上する、あるいは同時に通信できるユーザ数を増やすことができる(つながりやすくなる)ということの意味し、高速スループットを享受できるユーザの数が増えるということになる。更に、コンテンツ事業者にとってはリッチなコンテンツがストレスなく提供できることとなり、オペレータにとっては、ビット当りのコストが低減できるというメリットがある。

#### (2) 最大データ速度の飛躍的な向上

要求条件が議論されたときの最大データ速度は、ダウンリンクで100 Mbit/s、アップリンクで50 Mbit/sであった。しかしながら、最終的に規定された仕様においては、最大チャンネル帯域幅である20 MHz、4×4 MIMOを適用することにより、ダウンリンクで300 Mbit/s、アップリンクで75 Mbit/sの最大データ速度が規定された。これらは仕様上の実現可能な最大値であり、受信環境の非常に良いところで通信中のユーザが1ユーザである場合に実現されるスループットである。実際には使用する無線帯域幅や、電波環境及び通信中のユーザ数に依

存する。しかしながら、同じ条件下であれば、既存のシステムよりも数倍の高速通信を実現し、他の競合方式に対しても高速であることが様々な文献で報告されている。

#### (3) 遅延の低減

LTEとこれまでのシステムとの性能に関する要求条件の大きな違いの一つが、遅延に対する要求である。遅延は大別すると通信を開始する際にネットワークとのコネクションを設定するのに要する接続遅延と、通信中にデータを転送するのに要する転送遅延がある。LTEでは接続遅延を100 ms、無線ネットワーク内の遅延を5 msという、チャレンジングな目標値を設定し、無線フレームの最適化、信号の簡略化を行うことにより大幅な遅延の削減が求められた。これは他の競合方式よりも大幅に小さい値である。

通信速度が同一のシステムを比較した場合でも、データ転送遅延が大きい場合には、通信における反応が悪いということを感じる場合がある。これまでのシステムでは、無線伝送に要する処理遅延が比較的大きかったため、LTEでは低遅延化を実現することにより、移動通信であることを意識することなく、有線で接続したときと同じ感覚で通信を行うことを目標とした。これによりリアルタイム性が要求されるゲームや機器の遠隔操作など、これまで遅延が問題となっていたアプリケーションの提供にも有効となった。

#### (4) 可変チャンネル帯域幅のサポート

1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHzという複数のチャンネル帯域幅がサポートされている。これによりオペレータは周波数状況、トラフィック状況などを考慮して、LTEに割り当てる周波数展開を柔軟に考えることができる。また、チャンネル帯域幅によらず共通チャンネルの構成の共通化が図られているため、可変チャンネル帯域幅をサポートするLTE端末の実装負荷も、最小限に抑えられている。

#### (5) FDDとTDDの共通化

3GPPで規定されている3Gの仕様ではFDDとTDDで大きく異なる部分があるため、TDDの開発が困難という問題があった。そこで、LTEの検討を開始する際にはFDDとTDDの仕様を共通化することがハイレベルな要求条件として掲げられた。実際、MAC以上の仕様は共通であり、物理レイヤの仕様もTDDに特化した上下の切換に関係するところ以外は共通化が図られている。

#### (6) PS(Packet Switched)ドメインのみのサポート

3Gシステムは音声などのCS(Circuit Switched)ドメインとPSドメインの両方をサポートすることが求め

られているが、システムをシンプルにし、コストの大幅な削減を実現するために、LTE では PS ドメインのみをサポートしている。ただし、PS ドメインにおいても音声をサポートできるように、VoIP を考慮した効率の良い割当て方法などが採用されている。

(7) シンプルな RAN アーキテクチャ

合意された要求条件として、無線アクセスネットワーク (RAN: Radio Access Network) のインタフェースを簡易化し、ノード数をできるだけ減らすことが求められた。これはコスト低減や遅延の低減を実現することにも関連する。図 3 に LTE のネットワークアーキテクチャを示す。LTE で合意された RAN ノードは eNB のみであり、これにより RAN ノード間の通信による遅延の増加や、インタフェースの増加に伴うコスト増を抑えることが期待できる。結果として、コアネットワークノードである MME (Mobility Management Entity)/S-GW (Serving-Gateway) へのインタフェース S1 と eNB 間のインタフェースである X2 の二つが RAN のインタフェースとして規定されている。

(8) 3GPP RAT (Radio access technology) との共存

LTE は既存システムとの inter working, すなわちハンドオーバーなどをサポートすることが前提とされている。既存システムとしては、GSM, W-CDMA, HSPA など 3GPP で規定されている RAT に加えて、cdma2000, 1xEv/DO などの 3GPP 2 系の RAT 等のハンドオーバーも規定されている。これにより、世界各国のオペレータは、自社の運用するシステムによらず、LTE へのマイグレーションパスを確保できることとなり、LTE への移行を選択するオペレータが多いことの一因となっている。

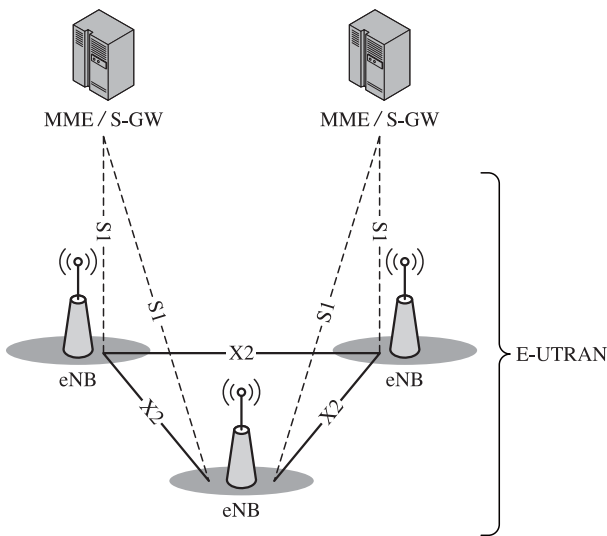


図 3 ネットワークアーキテクチャ

4. LTE の概要, 特長

LTE では上述の要求条件を満たすために示すように、各種技術が採用されている。詳細は本小特集の他の記事に任せたいが、高速・大容量化を支えるための技術として

- ダウンリンク OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), アップリンク SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 無線アクセス方式
- 周波数スケジューリング
- 複数アンテナによる送受信を行う MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
- 送信電力制御 (Fractional TPC: Fractional Transmission Power Control)

などが採用されている。

また、低遅延を実現するための技術として、

- サブフレーム長及び HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) RTT (Round Trip Time) の短縮
- 分散制御無線ネットワークアーキテクチャ
- RRC 手順の簡素化

などが採用されている。これらの関係を図 4 に示す。

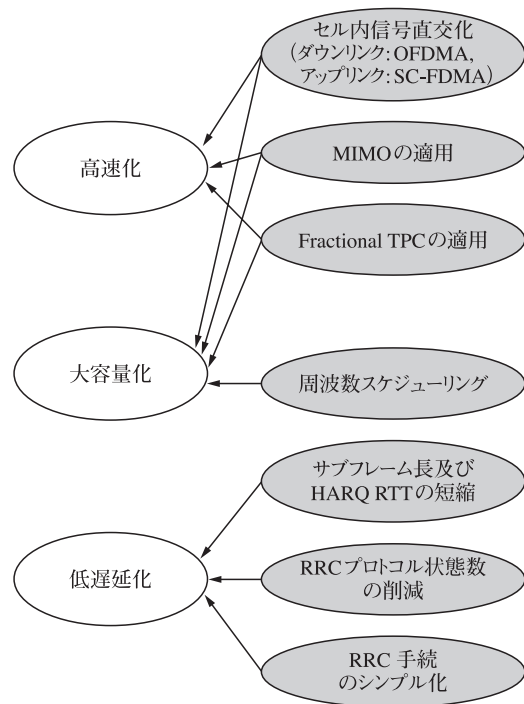


図 4 主要技術と効果の関係



## 5. LTE-Advanced の標準化、要求条件

3GPP において LTE-Advanced 検討の議論が開始されたころ、国際電気通信連合無線通信部門 ITU-R (International Telecommunication Union-Radiocommunication sector) においても、IMT (International Mobile Telecommunications)-2000 の後継システムとして IMT-Advanced の標準化が進められていた。図 5 に LTE-Advanced と IMT-Advanced の標準化スケジュールの関係を示す。LTE-Advanced は IMT-Advanced の無線インタフェースの候補でもあった (2012 年 1 月に正式に IMT-Advanced として承認) ため、ITU-R が定めた IMT-Advanced の最小要求条件を ITU-R 標準化のタイムプラン内に実現することが要求された<sup>5)</sup>。

LTE-Advanced は、IMT-Advanced をターゲットとしたシステムとして IMT-Advanced の要求条件を最低条件としつつ、LTE の検討が開始されたときと同様に、LTE-Advanced の要求条件の議論がなされ、その合意事項がテクニカルレポート (TR36.913) にまとめられている。以下に主な要求条件を紹介し、表 2 に主な性能面での要求条件をまとめたものを示す。なお、表 2 における  $N \times M$  は MIMO の送受信アンテナ数の組合せを示している。

### (1) LTE との共存

LTE-Advanced の議論は、LTE Rel. 8 の詳細仕様が承認された次の会合 (2008 年) から開始された。更に高いシステム性能を実現するだけでなく、既存の LTE からのスムーズなシステム展開を可能にすることが求められる。そこで、LTE とのバックワードコンパチビリティを保つことが重要な要求条件とされている。ここで、定義されたバックワードコンパチビリティとは LTE の端末が LTE-Advanced のネットワークに接続で

きることは当然のこと、LTE-Advanced の端末が LTE のネットワークにも接続することも可能であり、なおかつ、LTE-Advanced のネットワークに接続した場合には、大きな改善が実現されることを意味する。

### (2) 最大データ速度、周波数利用効率、ユーザスループット

表 2 にまとめられているように、LTE-Advanced では、LTE Rel. 8 に対するシステムの性能向上が要求されている。最大データ速度はダウンリンクで 1 Gbit/s、アップリンクで 500 Mbit/s と飛躍的な向上の実現を目指している。

一方、周波数利用効率においても、LTE Rel. 8 に比べて、約 1.5 倍程度の改善が要求されている。LTE Rel. 8 が承認されたばかりであることを考慮すると、かなり

表 2 3GPP における LTE-Advanced (LTE-A) の要求条件

		LTE	LTE-A	
最大データ速度 (bit/s)	下り	300 M	1 G	
	上り	75 M	500 M	
最大周波数利用効率 (bit/(s · Hz))	下り	15	30	
	上り	3.75	15	
容量* (bit/(s · Hz · cell))	下り	2×2	1.69	2.4
		4×2	1.87	2.6
		4×4	2.67	3.7
	上り	1×2	0.74	1.2
		2×4	—	2.0
		4×4	—	—
セル端ユーザスループット* (bit/(s · Hz · cell · user))	下り	2×2	0.05	0.07
		4×2	0.06	0.09
		4×4	0.08	0.12
	上り	1×2	0.02	0.04
		2×4	—	0.07
		4×4	—	—

\* 3GPP Case 1 における性能

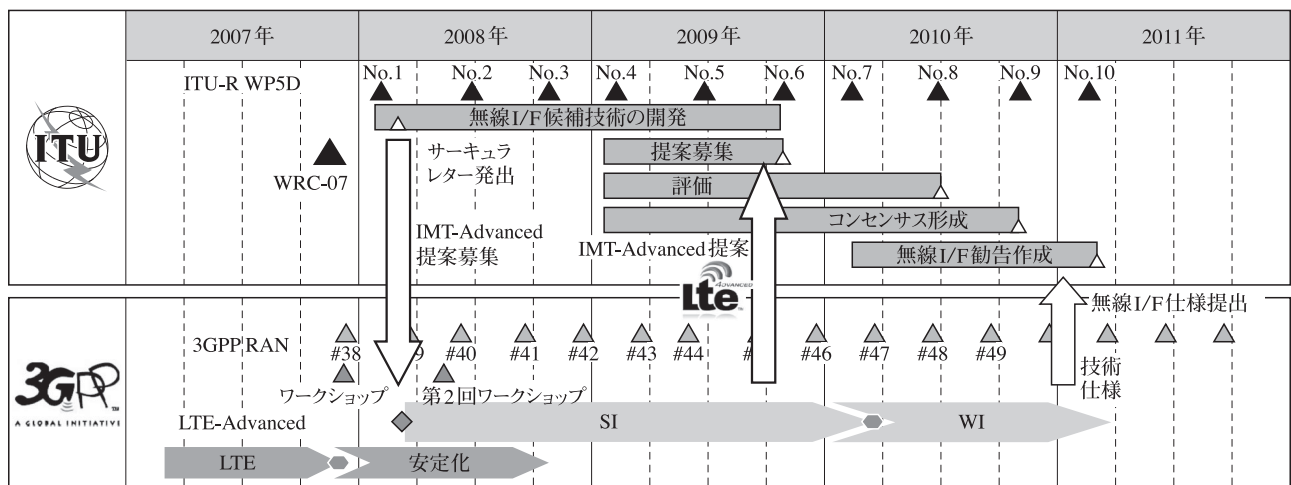


図 5 LTE-Advanced/IMT-Advanced の標準化スケジュール

挑戦的な目標であった。

またLTE Rel. 8でも重要な指標としてセル端のユーザスループットが考慮されたが、これは、電波が弱くなり、他のセルから干渉によって受信品質が劣化するセル端のユーザに対して、十分に満足できるサービスを提供できるかを示す重要なファクタである。LTE-Advancedでは、特にこのようなセル端環境でのスループット改善に向けた技術が検討されている。

## 6. LTE-Advancedの主な技術

LTE-Advancedでは、上記要求条件を満たすために、LTE Rel. 8をベースとして、以下に示すような無線インタフェース技術の更なる高度化が検討されている。

### (1) キャリヤアグリゲーション

LTE Rel. 8では最大20 MHzまでの帯域幅をサポートすることによりダウンリンクで最大300 Mbit/sを実現しているが、LTE-Advancedでは、表2のピークデータレートが要求条件であり、更なる広帯域化が必要である。一方でLTE-Advancedは、LTE Rel. 8とのバックワードコンパチビリティも確保する必要がある。そこで、LTE Rel. 8がサポートする帯域幅のコンポーネントキャリアと呼ばれる周波数ブロックを複数組み合わせることにより、広帯域化を実現する。

### (2) マルチアンテナの高度化

LTE Rel. 8では、ダウンリンクで最大4レイヤまでのシングルユーザMIMO多重がサポートされており、アップリンクではMIMO多重はサポートされていない。これに対して、LTE-Advancedでは、表2のピーク周波数利用率(Peak Spectral Efficiency)の要求条件を満たすため、ダウンリンク最大8レイヤ、アップリンク最大4レイヤのシングルユーザMIMO多重をサポートする。また、システム容量を向上させるため、マルチユーザMIMOが高度化される。更に、特にセル端ユーザスループットを改善するため、複数のセル間で協調して送受信を行うセル間協調送受信(CoMP: Coordinated Multiple Point transmission and reception)の導入に向けた検討も行われている。

### (3) ヘテロジニアスネットワークの高度化

LTE-Advancedでは、無線アクセスネットワークの低コスト化も重要な要求条件の一つであり、従来のマクロセル中心の構成に加え、ピコ、フェムト基地局などの送信電力の異なる様々な形態の基地局を用いた、ヘテロジニアスネットワーク(Het Net: Heterogeneous Network)と呼ばれる構成が注目されており、これらを高効率にサポートする無線インタフェースの検討が行われている。

### (4) リレー

LTE-Advancedでは、有線伝送路が高価な環境や無線伝送路の敷設が困難な環境において、低コストにカバレッジを拡大する方法として、バックホールをLTE-Advanced無線インタフェースで構成するリレー方式が検討されている。

## 7. おわりに

近年、世界的に導入が進められているLTE、及びその発展形であるLTE-Advancedの要求条件がいかに作られたかの背景について解説した。

## 文 献

- (1) ITU-R Report M. 2243, "Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications," Nov. 2011.
- (2) 総務省情報通信統計データベース, "我が国の移動通信トラヒックの現状," March 2012.
- (3) 3GPP RP-040461, "Proposed study item on evolved UTRA and UTRAN," Dec. 2004.
- (4) 3GPP TR25.913v7.0.0, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)," June 2005.
- (5) 3GPP TR25.912v7.0.0, "Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)," June 2006.
- (6) 3GPP TR36.913v8.0.0, "Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)," June 2008.

(平成24年10月11日受付 平成24年11月6日最終受付)



あべた さだゆき  
安部田 貞行 (正員)

平5 阪大・工・通信卒。平9 同大学院博士課程了。同年 NTT ドコモ入社。以来、W-CDMA/HSPA/LTEの研究開発、標準化に従事。現在、同社無線アクセス開発部担当部長。工博。