LTEの標準化と開発

(株) NTT ドコモ ネットワークイノベーション研究所 中村武宏 Takehiro Nakamura

1. はじめに

国内含め、5Gの商用導入が世界的に進められているが、ほぼ全ての5Gの初期導入においては、LTE (Long-Term Evolution) システムをベースとし、そこに5Gの新たな機能を追加するNSA (Non-Standalone) と呼ばれる方式が採用されている。これはLTEが既に世界のほとんどの国、地域で導入されており、5Gをスムーズかつ安定的に導入する上で確実な方式と考えられていることによる。その意味でもLTEは国際的に広く普及し非常に成功した移動通信システムと言える。標準化の観点においても、LTE標準化におけるプロセスや経験がその後のLTE-Advanced及び5Gの標準化作業のベースとなっており、標準化関係者に与えた影響は極めて大きい。また、LTEの標準化及び世界的普及等の成功により、LTE-Advancedや5Gに関する世界的な技術開発及びサービス開発競争が激化し、その普及スピードも加速している。これらのことから、現在及び今後の移動通信システム開発を検討する上で、LTEの標準化と実証実験、システム開発は移動通信の歴史において非常に重要なステップであったと考えられる。それらの過程において、弊社は当初より積極的に活動し、世界をリードした。本稿では、LTEの標準化及び開発に当初から関わった者として過去の活動を振り返り、LTEのコンセプト作り、標準化準備、3GPPでの標準化作業、実用化に向けた取組みについて述べる。

2. LTEコンセプト

LTEは2010年頃から世界的に商用サービスが開始されたが、そのコンセプト作りは2004年から本格的に始まった。当時、3Gシステムが世界的に普及し始めた段階ではあったが、音声中心であった移動通信サービスからデータ通信需要の増大が予想さ

れ、3GPPにおいてもHSDPA/HSUPAの標準仕様開発が進められている状況であった。HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) /HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) 等の3Gの短期的な高度化技術を用いることにより、データ速度だけでなく、周波数利用効率も改善でき、ビット当りのコストの低減が可能であった。しかしながら、長期的には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の要求が当時から急速に進んでおり、その一方で低料金、更には定額性の要求も高まっていた。これに対応するには、より一層の飛躍的な性能向上とビットコストの削減が重要な課題であった。そこでNTTドコモでは、3Gの“長期的な進化”として、2004年5月に「Super 3G」コンセプトを提唱した⁽¹⁾。Super 3Gの基本コンセプトを図1に示す。主なポイントは以下のとおり。

- 3Gスペクトルを使用する、3Gの長期的進化
- 4Gへのスムーズなマイグレーションを狙いとする

技術的なコンセプトとしては以下のとおりである。

- データ速度、容量、カバレッジだけでなく低遅延を重要な要求条件とする
- 無線アクセスは直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 等の新技術要素を導入し、かつ周波数帯域幅を広帯域化して高速化
- ネットワークはパケット交換網のみのシンプルアーキテクチャ

結果的に本Super 3GコンセプトがLTEの原型となっており、「長期的な進化: Long-Term Evolution」という説明がLTEの名称の由来となっている。

図1 Super 3G 基本コンセプト

3. LTE標準化と技術仕様

NTTドコモはSuper 3Gコンセプトをベースとし、世界の主要企業とも意見交換を精力的に進めてコンセプトや標準化の方針の共通認識を作り上げた。多くの国内外のキープレーヤーや3GPPのリーダーたちへの説明と意識合わせをするために世界を飛び回り、認識の相違点をできる限り事前に調整すべく議論を重ねた。これら活動により、Super 3Gコンセプトに沿った3Gの長期的な進化の必要性の認識が高まり、3GPPでは、2004年11月にトロントにてFuture Evolution Workshopを開催するに至った。本Workshopでは多くの参加者とともに40件に及

ぶ主要各社からの提案を扱い、3GPPにてLTE標準化作業を進める上での大筋の方向性を見いだすことができた⁽²⁾。それを基に、2004年12月の3GPP TSG-RAN会合にてNTTドコモはLTEに関する基本検討開始のためのStudy Item提案を26社連名で提出し承認されるに至った⁽³⁾。図2に本Study Item提案文書の冒頭部分を示す。なおNTTドコモ(筆者)は本Study Itemのラポーターとして標準化議論をリードした。

Study Itemの合意により、LTEの標準化作業が3GPPにて正式に開始された。図3に3GPPでのLTE標準化経緯を示す。3GPP内でのLTEに対する大きな関心と期待により、議論が精力的に進められ、

TSG-RAN Meeting #26 Athens, Greece, 8-10, December, 2004 Agenda Item:8.12 Source: NTT DoCoMo, Alcatel, Cingular Wireless, CMCC, Ericsson, Fujitsu, Huawei, LG Electronics, Lucent Technologies, Mitsubishi Electric, Motorola, NEC, Nokia, Nortel Networks, Orange, Panasonic, Philips, Qualcomm Europe, Samsung, Sharp, Siemens, Telecom Italia, Telefonica, TeliaSonera, T-Mobile, Vodafone Title: Proposed Study Item on Evolved UTRA and UTRAN Document for: Discussion and approval	RP-040461
In the RAN Future Evolution Workshop, many of the presentations pointed out the need of 3G long-term evolution to meet the future demand and to maintain its competitive position for coming decades. Several interesting new technology components such as OFDM with a flexible and broader RF bandwidth were presented as potential candidates for the evolution. It was pointed out such a technology enhancement should be applied to UTRAN architecture as well as the UTRA radio interface. It is proposed that 3GPP should initiate the feasibility study of the long-term evolution accounting for the above situation. In this paper, a Study Item Description is presented for this study. Concerning the time plan, we propose to complete the feasibility study by June 2006 and envisage all relevant core specifications by June 2007.	

図2 Study Item 提案文書

図3 3GPPでのLTE標準化経緯

2005年6月には要求条件が合意された⁽⁴⁾。表1に合意された主なLTEの要求条件を示す。最大データ通信速度は、HSDPAの14 Mbit/sに対し100 Mbit/sとかなりの高速化を目指した。遅延条件は3GやHSDPA/HSUPAでは考慮されなかったが、LTEでは制御遅延として、アイドル状態（着信／発信待ち状態に相当する何ら無線資源が割り当てられていない状態）からアクティブ状態（無線回線を割り当てて通信可能となる状態）までの制御遅延として100 ms以下、ドーマント状態（必要最小限の無線資源を割り当てている状態）からアクティブ状態までの制御遅延として50 ms以下としている。伝送遅延は無線アクセスネットワーク内の片道で5 ms以下と高い目標が掲げられた。ユーザスループットや周波数利用効率についてもHSDPA/HSUPAの2～4倍と、当時としては挑戦的な目標値であった。使用周波数帯域幅は、3Gでは5 MHzを基本としていたのに対し、高速化を考慮して最大20 MHzまで拡張した。5 MHzよりも小さな周波数帯域幅は、2GシステムであるGSM（Global System for Mobile Communications）に使用している周波数

帯域への適用も考慮して加えられたものである。

一般に要求条件議論に関しては、通信事業者はより良いサービス提供を目指して高めの要求条件を、NW装置や端末を製造するベンダは製造の困難性を避けるために低めの要求条件を提案する傾向にあり、熱い議論となった。ラポーターとしてその間に入り、リアリスティックな高めの要求条件を落としどころとして双方に対して提案し、終結を図る等尽力した。

2006年6月にはStudy Item作業がほぼ終了し文書⁽⁵⁾としてまとめられたことにより、次のフェーズとして詳細仕様開発開始のためのWork Item提案を弊社がラポーターとして提出し承認された⁽⁶⁾。その後2007年中に主要仕様が完成し、2008年末までにテスト仕様含む全てのLTE標準仕様が3GPPのRelease 8仕様として完成した。表2にLTEの主要緒元を示す。アクセス方式として、下りリンクにはマルチパス干渉に対する耐性が高く、サブキャリア数を変更することで広範囲な周波数帯域幅に柔軟に対応ができる直交周波数分割多重アクセス（OFDMA：Orthogonal Frequency Division

表1 主なLTE要求条件

ピークデータ速度		下り：100 Mbit/s, 上り：50 Mbit/s
遅延	制御遅延	100 ms 以下（アイドル状態→アクティブ状態） 50 ms 以下（ドーマント状態→アクティブ状態）
	伝送遅延	5 ms（RAN内の片道遅延）
ユーザスループット （Rel. 6 HSDPA/HSUPAと比較）	セル端でのスループット	2～3 倍（下り），2～3 倍（上り）
	平均スループット	3～4 倍（下り），2～3 倍（上り）
周波数利用効率（Rel. 6 HSDPA, HSUPAと比較）		3～4 倍（下り），2～3 倍（上り）
周波数帯域		1.25 M, 2.5 M, 5 M, 10 M, 15 M, 20 MHz

表 2 LTE 主要緒元

Access Scheme	UL	SC-FDMA
	DL	OFDMA
Bandwidth		1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Subframe length		1 ms
Sub-carrier spacing		15 kHz
Cyclic prefix length	Short	4.7 μ s
	Long	16.7 μ s
Modulation		QPSK, 16 QAM, 64 QAM* *UL では optional
Channel coding		Turbo coding
Multi-antenna		1x2, 2x2 (4x2) MIMO, 4x4 MIMO

Multiple Access), 上りリンクには移動端末 (UE:User Equipment) の無線増幅器の動作効率を向上して低消費電力化が実現でき、ユーザ間の干渉を除去できるシングルキャリア周波数分割多重アクセス (SC-FDMA: Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) を用いている。周波数帯域幅は要求条件に沿って 1.4 GHz から 20 MHz まで対応しており、各オペレータの様々な周波数割当状況に柔軟に対応可能としている。信号処理単位であるサブフレームの長さは低遅延化を考慮し、3G の 10 ms に対し 1 ms と非常に短いフレーム長を採用している。OFDM では、前シンボルの遅延波が次の OFDM シンボルに及ぼすシンボル間干渉及びサブキャリア間の直交性の崩れに起因するサブキャリア間干渉が発生するが、それら干渉を除去するために、各 OFDM シンボルの後半部分のコピーを先頭に付加した Cyclic Prefix と呼ばれるガード区間を設けている。LTE の OFDM サブキャリア間隔としては、Cyclic Prefix によるオーバーヘッド量と実環境における遅延波やドップラー周波数の性能への影響のトレードオフを考慮し、15 kHz としている。その Cyclic Prefix 長は、通常使われるセル半径での遅延波を考慮した 4.7 μ s とともに、大セルでの遅延波を考慮した 16.7 μ s をサポートしている。変調方式としては高速化を考慮し、最大 64 QAM までをサポートしている。ただし、移動機の複雑化回避を考慮し、上りリンクでは 64 QAM はオプションとなっている。誤り訂正符号としては、高速データ伝送において、3G の畳込み符号より符号化利得の大きいターボ符号が採用された。複数の送受信アンテナを用い

て伝送速度を向上できる技術である MIMO (Multiple Input Multiple Output) のアンテナ数としては、実環境での効果と装置の複雑性のバランスを考慮し、最大 4×4 (4 送信アンテナ, 4 受信アンテナ) までサポートしている。

仕様開発議論では、参加メンバーから多岐にわたるトピックで極めて多くの提案が出されたが、各社のビジネス面や IPR 確保等の目的から議論は紛糾した。基本的にはピュアな技術議論であるべきであるが、政治的な面も背後にあるのが常である。技術的にできる限り良いものを標準化することを前提にしつつ、政治的な面も考慮し、適切なバランス感覚で主要企業と折衝し、自社提案の合意を図るのが肝要であった。

4. LTE実証実験と商用化

NTT ドコモでは、LTE の基本性能の把握と運用スキルの取得、その潜在能力の社内外への訴求を目的とし、3GPP にて LTE の Study Item がほぼ完了し基本機能が明確になったことを契機に、2006 年 7 月に商用装置の調達プロセスを開始するとともに実証実験装置の開発を開始した。開発した実験装置の外観と屋外での実験結果を図 4 に示す。下りリンクでは、実際の屋外環境で、帯域幅 20 MHz, 4×4 MIMO 使用時に要求条件を超える 250 Mbit/s を達成した。

実証実験とともに商用装置開発も進め、NTT ドコモは 2010 年 12 月 24 日に、Xi (クロッシィ) のブランド名で LTE の商用サービスを世界の先頭集団の

図4 LTE 実証実験装置外観と結果

■ サービスブランド名・ブランドロゴ

「X」は「人、物、情報のつながり」「無限の可能性」、
「i」は「イノベーション」「私」を意味しています。

■ 端末（データ通信専用）

- ▶ 受信最大75 Mbit/s
- ▶ LTEエリア外でも
HSPA(受信最大7.2 Mbit/s)で通信可能

USB型

ExpressCard型

図5 LTE サービス開始時のブランドロゴと端末

1社として開始した。2004年初頭にSuper 3Gコンセプトを立ち上げてから6年弱で標準化を経て商用開始に至ったことになる。図5は当時のブランドロゴと販売開始したLTE端末である。市場の高いデータ通信ニーズに早期に応えつつスムーズにLTEサービスを導入するために、端末は携帯電話タイプではなく、データ通信専用端末としてUSB型とExpressカード型の2種でサービスを開始した。端末能力としては、LTEの下り伝送速度は75 Mbit/sであり、標準化上の要求条件である100 Mbit/sには届いていないものの、当時のHSDPAの能力である7.2 Mbit/sを大きく上回っていた。当初はLTEサービスエリアが限定的であることを考慮し、3G/HSDPA/HSUPAもサポートして、LTEエリア外でも通信可能となっている。このような過去の世代のシステムを当初よりサポートすることは、新たな世代の端末の普及促進には必須の条件である。

5. おわりに

現在、世界中でサービス提供されているLTEシステム開発の経緯として、コンセプトづくり、3GPPでの標準化、実証実験と商用化に関して述べた。これらの過程は、その後のLTE-Advancedや5Gシステムの開発においても基本的に同様に適用されており、かつ、そのスピードは速まり、国際的な開発競争は激化している。また、移動通信業界とほかの様々な業界との連携による新たなサービス創出に、現在産学官で大きな関心を持たれており、その重要性は増している。5Gは商用開始されたものの、そのサービスエリアはいまだ限定的であり、数年かけて面的に広がっていくと考えられるため、当面はLTEシステムを活用した他業界との連携が重要である。これらの状況から、今後の移動通信システムの高度化とサービス創出に向け、LTEの開発経緯やその内容は多くの関係者にとって有益な情報になると

考えられる。読者の皆様に、本稿を今後の活動や業務の参考にして頂ければ嬉しい限りである。とともに、世界で活躍できる日本の人材育成と創出が進むことを切に祈る。

文献

- (1) K. Kinoshita, "Current status of "FOMA" 3G service and DoCoMo's B3G activities," ICB3G-2004, pp.13-21, May 2004.
- (2) 3GPP, REV-WS044, "Summary of requirements identified during 3GPP RAN long term evolution workshop," www.3gpp.org, Nov. 2004.
- (3) 3GPP, RP-040461, "Proposed study item on evolved UTRA and UTRAN," www.3gpp.org, Dec. 2004.
- (4) 3GPP, TR 25.913, "Requirements for evolved UTRA and evolved UTRAN," www.3gpp.org, June 2005.
- (5) 3GPP, TR 25.912, "Feasibility study for evolved UTRA and UTRAN," www.3gpp.org, June 2006.
- (6) 3GPP, RP-060426, "Agreed feature WID for 3G Long-Term Evolution," Warsaw, Poland, May – June 2006.

中村武宏

(株) NTT ドコモ執行役員ネットワークイノベーション研究所長。1992 から NTT ドコモにて移動通信システムの研究開発及び標準化に従事。1997 から移動通信システム標準化に従事。現在、5G モバイル推進フォーラム企画委員会委員長代理。2005～2013 3GPP TSG-RAN 副議長及び議長を歴任。