W-CDMA方式の研究から 商用システム開発まで

尾上誠蔵 Seizo Onoe 株式会社NTTドコモ

1 はじめに

移动通信システムはこれまで、おおよそ10年ごとに新しい世代に進化してきており、現在第4世代方式のシステムの普及が急速に進んでいる。第1世代のアナログセルラ方式、第2世代のデジタルセルラ方式までは各国、地域で異なる方式が導入され互換性のない複数の方式が運用された。第3世代方式では単にデジタル化するだけでなくデータサービスの飛躍的な向上を図るとともに世界統一標準が大きな目標となった。自動車電話から始まったセルラ方式であったが、携帯電話が普及すると世界中に持ち歩ける利便性のためにも世界統一標準は大きな意味を持つことになった。本稿では、第3世代システムであるW-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 方式に焦点を当て、その研究からシステム実験、商用化に至る経緯について述べる。

2 研究段階

前の世代の方式が商用開始した頃には次の世代の技術の研究、方式検討が開始され、おおよそ10年弱で商用化に至るとというのがこれまでの移动通信の歴史である。

1990年代初頭に第2世代方式が各国で商用開始されており、日本では1993年に第2世代方式である無線アクセスにTDMA (Time Division Multiple Access) を採用したPDC (Personal Digital Cellular) 方式による移动通信サービスがNTTドコモ (以下、ドコモ) により開始された。その頃、ドコモでは既に第3世代の研究に着手しており、1994年には無線アクセスとしてCDMA (Code Division Multiple Access) を採用して設計・開発した研究試作装置によるデータ伝送実験を開始した。1996年にはITU-Rで第3世代方式として標準化が進められていたIMT-2000 (当時はFPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication Systems) と呼ばれた) が目標とした2 Mbit/sのデータ伝送に成功している^{(1)~(5)}。

第3世代方式の研究段階では様々な無線アクセス方式が検討され、TDMAも含め提案・議論されたが、標

準化が進むのに従って伝送レート的高速化、多様な伝送レートによるサービスの柔軟な提供等に適したCDMAが次第に有力となっていった。更に、CDMAには、同一周波数を隣接セルで利用可能なため周波数配置設計の煩雑さがなく、基地局・移動機間のマルチパス (多重伝搬路) によって生じるフェージング変動を積極的に利用できる、連続送信でピーク電力を小さくできる、ソフトハンドオーバーと呼ばれる複数の基地局と移動機が通信を継続しながら基地局を切り換えることができる、等の特長があった。

後に第3世代方式として標準化されるW-CDMA方式の無線アクセスは、ドコモが提案したコヒーレントマルチコードDS-SS-SS (Direct Sequence CDMA) ^{(1), (2)} が原型となっているが、その重要な特徴として無線伝送帯域幅すなわち拡散帯域幅の広帯域化がある (W-CDMA方式が「Wideband」を冠するゆえである)。DS-SS-SSは、一次変調した狭帯域データ信号を更に速度の速い ± 1 の値をランダムに取る符号系列で二次変調 (拡散変調とも呼ぶ) を行うことで広帯域に拡散してから送信するが、提案方式ではこのDS-SS-SSを前提により速いチップレート (ランダム符号系列の値の変化速度で単位は「cps」 (チップ/秒)) を用いて、拡散帯域幅を当時米国で先行導入されていたcdmaOne方式 (標準規格名称はIS-95, 第2.5世代方式に相当) の1.25 MHzに対して4倍以上の5~20 MHzへ広帯域化している。広帯域化することにより、マルチパスフェージングチャネルを伝搬した受信信号をより多くのマルチパス成分に分離できるため、RAKE受信機を用いてマルチパス合成した後の受信品質向上を図ることができるとともに、より多くの通信ユーザを同時収容できるため、統計多重効果の増大による大容量化のメリットが得られる。また、拡散変調に用いるランダム符号系列として拡散率 (データ伝送速度に対するチップレートの比) が可変の階層化直交符号を採用するとともに動的な可変レートデータ伝送技術⁽⁶⁾の適用により、音声などの低速レートサービスと高速データ伝送サービスが混在するマルチメディアサービスを柔軟かつ効率良く収容可能なシステムを実現した。更に、3段階セルサーチ方式の採用⁽⁷⁾により、

cdmaOne 方式では必須であった基地局間同期を不要とすることが大きな特徴となっており、屋内外の幅広いエリアへのシステム導入を容易とした。

ドコモはコヒーレントマルチコード DS-CDMA の要素技術の検証を目的に、1994 年頃から拡散帯域幅が 1.25/5/10/20 MHz、チップレートが 0.96/3.84/7.68/15.36 Mcps の研究試作装置を開発し、2 GHz 帯で屋内外における実験を行った^{(3)~(5)}。その結果、32 kbit/s の拡散コードチャネルを最大 24 チャネル多重して 32 kbit/s から 768 kbit/s までのマルチレート伝送に成功し^{(3), (4)}、更に、60 チャネル多重により 2 Mbit/s の無線伝送にも成功した⁽⁵⁾。ここで、拡散帯域幅については、標準化の最終段階で 5 MHz 帯域幅の規定を優先し、20 MHz 帯域幅の仕様は削除されることとなったが、結果として後の LTE (Long Term Evolution) へ進化の余地を残すこととなった。

二次研究試作ではチップレートを 4.096 Mcps に変更し、その後の W-CDMA 方式の国内での標準化を提案、推進していく過程や、次の実証実験や商用開発の開始時にもこの値を採用した^{(8)~(11)}。欧州等の他の W-CDMA ベースの提案も日本案と整合したチップレートとなっていたが、第 3 世代方式の国際標準化では、後述のように、CDMA2000 方式とのハーモナイズの過程でチップレートを 3.84 Mcps に再度変更されることになった。なお、W-CDMA 方式及び CDMA2000 方式のハーモナイズの議論の過程で、その議論を反映することにより W-CDMA 方式提案自身もブラッシュアップされた。先述のマルチメディアサービス対応や基地局間非同期の実現方法などがその例である。

3 実証実験

研究試作によるデータ伝送実験の成功に加えて、システムとしての実証実験も 1998 年から進められた^{(8)~(11)}。研究段階での実験では無線区間の信号伝送に主眼を置いていたのに対して、システム実証実験では制御系も加えシステム動作の検証も行い、次の商用システム開発の前段として実施された。

第 3 世代方式の目標の一つは世界統一標準であった^{(12), (13)}。標準化の場での議論だけでなく、W-CDMA 方式の推進のためにもシステム実証実験の装置開発は意味のあるものであった。つまり、商用システム開発の前段の技術確立の目的だけでなく、W-CDMA 方式の普及促進も大きな目的とした。これは標準化に並行して開発を進める状況において実施した特別な開発のステップともいえる。

ドコモは実証実験装置の調達を国内外に広く提案を求めるプロセスによって実行した。結果、日本ベンダだけでなく海外ベンダも W-CDMA 方式の装置開発に巻き込んで実証実験を進めることとなり、技術確立とともにグローバルな仲間作りも狙うことができた。実証実験実

図 1 実証実験の基地局装置

行のポリシーは、国際標準のトレンドに従って仕様を必要に応じ柔軟に変更すること、暫定インタフェース仕様を開示すること、各社の実験装置を相互接続試験する実験環境を提供すること、であった。1998 年後半から国内のフィールド実験を横須賀地区の 3 基地局及び東京都心の 4 基地局でそれぞれ実施した。一方、1996~1998 年にかけて、欧州、アジア、オセアニアの合計 10 の通信事業者や研究機関と次世代移動通信方式開発の協力の覚書を締結し、フィールド実験については、シンガポール等との海外での共同実験にも成功した⁽⁹⁾。

実証実験の基地局装置⁽¹⁰⁾とその主要諸元を図 1 と表 1 に、システム構成を図 2 にそれぞれ示す。主要要素技術である RAKE 受信や高速送信電力制御、3 段階セルサーチ及びソフトハンドオーバー等の機能を実装し、それら機能の高い性能を屋外で実証した。また、大形の機能試験用移動機に加えて小形携帯機の試作⁽¹¹⁾も行っており、走行中の安定した音声通話、データ伝送とともに、TV 電話、TV 会議などのアプリケーションのデモも行った。

4 商用システム開発

IMT-2000 は先述したように最大データレート 2 Mbit/s すなわち「2,000 kbit/s」の実現を目標としたが、「2000」には「2,000 MHz」帯に「2000 年頃」のサービス開始という意味もあった。ドコモにおける W-CDMA 方式の商用システム開発は 2001 年のサービス開始を目指して進められた。3GPP における第 3 世代方式の標準仕様の最初のバージョンはリリース 99 というように 1999 年 12 月に承認されたが、その後も仕様変更が繰り返されその安定化には時間を要した。その要因の一つが、世界統一標準を目指したがゆえに異なる提案間での対立があり、基本パラメータであるチップレートでさえ最後まで調整が続けられたことにあった。具体的には CDMA2000 方式が採用する現行 cdmaOne 方式のちょうど 3 倍の 3.6864 Mcps に合わせるべきという議論であった。最終的に 1999 年 5 月に基本パラメータの合意がなされ、3GPP 標準仕様におけるチップレー

表 1 実証実験用基地局の主要諸元

チップレート（拡散帯域幅）		4.096 Mcps（5 MHz ／キャリア）
キャリア周波数（上り／下り）		1.92～1.94 GHz ／ 2.11～2.13 GHz
セクタ数		6 セクタ
最大平均送信電力		20 W／セクタ
シンボルレート		16～1,024 ksps
拡散	ショートコード	256～4 チップ長 階層化直交符号、直交ゴールド符号
	ロングコード長	下り：10 ms（ 2^{18} -1 チップ長 Gold 符号を 10 ms 長で打ち切り使用） 上り： $2^{16} \times 10$ ms（ 2^{41} -1 チップ長 Gold 符号を $2^{16} \times 10$ ms 長で打ち切り使用）
変調	データ	4 相位相変調（QPSK：Quadrature Phase Shift Keying）
	拡散	同上
復調方式		パイロットシンボル同期検波
チャンネル符号化／復号		畳込み符号（ $r = 1/3$, $K = 7$ ）／軟判定ビタビ復号
ダイバーシチ受信		2 ブランチスペースダイバーシチ＋RAKE（受信可能 Finger 数＝8）

図 2 実証実験のシステム構成

トが当初の 4.096 Mcps から 3.84 Mcps へと変更が承認された。ドコモの商用装置開発は 1999 年初頭に当初のチップレートを想定して既に設計を開始していたが、標準仕様の変更に伴って設計変更を行った。チップレートはハードウェア設計に関わる基本パラメータであり、開発進捗へのインパクトは大きいものであった。その後も標準仕様の部分的な変更が続いたがソフトウェアの変更で対応できる範囲内のものであり、サービス開始当初の装置仕様としては 3GPP のリリース 99 の 2000 年 3 月版に仕様凍結して進めることにより、2001 年 5 月の試験サービス開始、同年 10 月の本格サービス開始に至った。

標準仕様の確定までに時間を要したもう一つの要因は、3GPP での多くの参加者の合意が必要で細部までの技術仕様の作成に時間が掛かったことである。各国で異

なる第 2 世代の方式を持つという背景もあり、細かな点で様々な要求条件を盛り込む必要もあった。結果として、技術仕様はできていても運用するパラメータの選択肢が多過ぎて、実際に運用する際の装置間（特に移動機－基地局間）の相互接続性確保の困難性が危惧された。（当時、これを too much flexibility 問題と称した。）特に世界で最初に運用する計画で進めていたドコモでは、運用パラメータが孤立してその後に導入される装置と接続不可となる危険を避ける必要があったため、本問題を重要課題として 2000 年に典型的なパラメータセットを選定する働き掛けを行った。当時は GSMA (GSM Association) に ISG (IMT-2000 Steering Group) が設置されており、この問題をそこに提起し、Radio Parameter Ad-Hoc を立ち上げてそこでの議論によりパラメータセットを決めた。最終的には ISG で選定されたパラメータセットを

3GPP のテスト仕様に反映することにより実効的な意味を持たせることに成功した。

5 あとがき

W-CDMA の研究、方式提案、実証実験及び商用システム開発の経緯を述べた。次世代方式の研究から商用化までは相当の時間を要し、前の世代の商用開始の直後にはその検討が開始されるのが常であり、第3世代方式である W-CDMA もその一つであった。第3世代方式は世界統一標準を目指したものであり、その実現のためには標準化の場だけでなく、システム開発の点でも仲間作りが重要であった。実証実験の目的も単に技術確立だけでなく、その仲間作りの場としても活用された。商用システム開発には多くの課題があり、地道な活動の積み重ねで W-CDMA の商用サービス開始が実現された⁽¹⁴⁾。

W-CDMA のサービス開始当初のユーザ数の伸びやグローバルな展開ペースは必ずしも順調とは言えなかったが、今や W-CDMA は世界中に広がっている。日本では W-CDMA 単一モード端末が中心だったためサービスエリアが十分に拡大され、かつ端末の電池の持ち時間等の性能改善が進んで初めてユーザ数が伸びたというのが導入当初の状況であった。また、導入のタイミングも結果として突出した時期になってしまった。W-CDMA の発展として開発された LTE は真の意味での世界標準として広がりつつある。LTE は 4G と呼ばれており、その開発の経緯は 3G の経験を踏まえて、新技術のスムーズな導入シナリオを十分に考慮し、かつ、技術の成熟性を見極めながら世界の先頭集団の一員としてのタイミングで導入された。今後更に 5G の時代を迎えるに当たり、3G、4G の経験を生かして、早い段階で世界中のプレーヤーと議論を開始することにより移動通信の更なる発展が実現することを期待したい。

■ 文献

- (1) K. Ohno, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Wideband coherent DS-CDMA," Proc. IEEE VTC, pp.779-783, Chicago, USA, July 1995.
- (2) F. Adachi, K. Ohno, A. Higashi, T. Dohi, and Y. Okumura, "Coherent multicode DS-CDMA mobile radio access," IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.9, pp.1316-1325, Sept. 1996.
- (3) 奥村幸彦, 東 明洋, 土肥智弘, 大野公士, 安達文幸, "コヒーレント・マルチコード DS-CDMA を用い

る移動無線アクセスの伝送実験," 信学技報, RCS95-80, Oct. 1995.

- (4) T. Dohi, Y. Okumura, A. Higashi, K. Ohno, and F. Adachi, "Experiments on coherent multicode DS-CDMA," IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.9, pp.1326-1332, Sept. 1996.
- (5) K. Okawa, Y. Okumura, M. Sawahashi, and F. Adachi, "1.92 Mbps data transmission experiments over a coherent W-CDMA radio link," IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.7, pp.1330-1336, July 1998.
- (6) Y. Okumura and F. Adachi, "Variable-rate data transmission with blind rate detection for coherent DS-CDMA mobile radio," IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.7, pp.1365-1373, July 1998.
- (7) K. Higuchi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Fast cell search algorithm in inter-cell asynchronous DS-CDMA mobile radio," IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.7, pp.1527-1534, July 1998.
- (8) 尾上誠蔵, 武内良男, "W-CDMA の無線実験," 信学誌, vol.82, no.2, pp.131-137, Feb. 1999.
- (9) 尾上誠蔵, 永田清人, 原 博信, "W-CDMA システム実験の概要," NTT DoCoMo ジャーナル, vol.6, no.3, pp.7-10, Oct. 2001.
- (10) 中村武宏, 萩原淳一郎, 中野悦宏, 佐藤隆明, 渡辺靖之, "基地局装置概要," NTT DoCoMo ジャーナル, vol.6, no.3, pp.17-23, Oct. 2001.
- (11) 東 明洋, 高木広文, 柚木一文, 鷹見忠雄, "移動局装置概要," NTT DoCoMo ジャーナル, vol.6, no.3, pp.24-29, Oct. 2001.
- (12) 秦 正治, 佐藤孝平, "第3世代移動通信システムの国際標準化への取り組み," 信学通誌, no.30, pp.91-94, Sept. 2014.
- (13) "移動通信の国際標準化よもやま話～インタビュー記事～," 信学通誌, no.30, pp.95-105, Sept. 2014.
- (14) 安田 豊, "KDDI/au における商品・サービス開発への取り組み," 信学通誌, no.30, pp.114-118, Sept. 2014.

尾上誠蔵 (正員：フェロー)

1982 京大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。1992 から NTT 移動通信網(株)。第1世代のアナログ移動通信方式、第2世代のPDC、第3世代のW-CDMA、その発展技術であるHSPA、LTE、第4世代、第5世代方式の研究開発に従事。2002(株)NTTドコモ無線ネットワーク開発部長、2008執行役員研究開発推進部長、2012取締役常務執行役員(CTO)、現在に至る。