

PREMIUM 4G特集 —LTE-Advancedの導入—

高度化C-RANアーキテクチャを活用したLTE-Advanced商用開発 —アドオンセルによる容量拡大と 高度なセル間連携による安定した通信の実現—

2015年3月、ドコモはLTEをさらに高度化した通信方式、LTE-Advancedを用いたサービスを「PREMIUM 4G™*1]として開始した。さらに、マクロセルとスモールセルをキャリアアグリゲーション技術により組み合わせる「高度化C-RANアーキテクチャ」を導入することで、通信の高速化のみならず、容量の拡大を実現し、より快適で安定した通信を提供する。本稿では高度化C-RANアーキテクチャの特長と効果および制御概要について解説する。

無線アクセス開発部

きよしま こうへい
清嶋 耕平たきぐち たかひろ
瀧口 貴啓かわべ やすひろ
河辺 泰宏ささき ゆうすけ
佐々木 優輔

1. まえがき

近年、スマートフォンの普及に伴い、画像データや動画などの大容量コンテンツ利用によるトラフィックが急増している。そのため通信のさらなる高速化や、無線ネットワークの大容量化が求められている。そこで3GPPでは、2008年よりLTEのさらなる高速・大容量化などの性能改善、機能拡張を図ったLTE-Advanced*2の仕様策定を行い、2011年に標準化が完了した[1]。

ドコモでは、LTE-Advancedを効果的に展開するために、高度化C-RAN (Centralized Radio Access Net-

work) アーキテクチャを提唱し、商用化にむけて本アーキテクチャに対応した無線基地局装置の開発を2013年2月に着手した[2]。そして、2015年3月に高度化C-RANアーキテクチャを用いたLTE-Advancedを導入し、下り最大225Mbpsの商用提供を「PREMIUM 4G」として開始した。高度化C-RANアーキテクチャとは、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) とヘテロジニアスネットワーク (HetNet: Heterogeneous Network)*3の組合せにより、高速・大容量化を実現するものである。また、本アーキテクチャ

は、現在世界的に注目されている次世代移動通信システムである5G*4においても、基礎となるアーキテクチャの1つとして検討が進められている[3]。本稿では、高度化C-RANアーキテクチャによるLTE-Advancedの特長とその効果および制御概要について解説する。

2. 高度化C-RANアーキテクチャ

LTE-Advancedの主要技術の1つであるCAは異なる周波数で運用される複数のLTEキャリア (コンポーネントキャリア) に同時に接続する技術であり、同時に使用できる周波

©2015 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

*1 PREMIUM 4G™: NTTドコモの商標。

*2 LTE-Advanced: 3GPPにおけるIMT-Advancedの名称。IMT-Advancedは第3世代移動通信システムであるIMT-2000の後継システム。

*3 ヘテロジニアスネットワーク (HetNet):

電力の違うノードがオーバーレイするネットワーク構成。従来の基地局に対し、より送信電力の小さい基地局などが混在、連携、統合化したネットワーク。

*4 5G: 第4世代移動通信システムの後継にあたる次世代移動通信システム。

数帯域幅の拡大により通信の高速化を実現する[4]。加えて、ドコモではCAを高速化の目的のみではなく、マクロセル*5とそのエリア内に追加設置したスモールセル*6（以下、アドオンセルと呼ぶ）をCAで同時接続することで、無線容量拡大と通信の安定性の向上を同時に実現する目的でも使用する。CAは同時に接続するセル間の連携が必要であり、仕様上、接続するセルを同一基地局で制御する必要がある。したがって、アドオンセルによる容量拡大と安定性の向上を実現するために、異なる地点に設置されるマクロセルとアドオンセルを同一eNB（eNodeB）*7で制御しなければならない。

ドコモでは、ベースバンド*8処理部と無線部で構成される基地局装置からベースバンド処理部を分離し、無線部のみをサイト*9に設置している。ベースバンド処理部を高密度ベースバンド処理装置に集約することで、基地局設備の省スペース化お

よび設備投資の削減を実現する、C-RANアーキテクチャの運用を2003年から開始している[5]。このC-RANアーキテクチャの特長を活かし、マクロセルと複数のアドオンセルをすべて同一のベースバンド処理部に収容する新たなアーキテクチャを採用し、CAによるマクロセルとアドオンセルとの柔軟な連携を可能とした。そして、本アーキテクチャを高度化C-RANアーキテクチャと呼び（図1）、LTE-Advancedのスムーズな展開と無線容量拡大を進めていく。

高度化C-RANアーキテクチャにより得られる効果としては以下の3点が挙げられ、それぞれ解説を後述する。

- ・ CAによる高速化と周波数利用率向上
- ・ アドオンセルによる大容量化
- ・ 通信の安定性向上

なお、マクロセルとアドオンセル間でのCAを前提として説明したが、

高度化C-RANアーキテクチャはマクロセルとマクロセルのCAもサポートしている。郊外地などのようにアドオンセル設置による無線容量拡大が必要でないエリアでは、マクロセル同士のCAを実施して高速化を狙うなど、エリアの状況に応じて柔軟に展開を行う。

2.1 CAによる高速化と周波数利用効率向上

(1)複数キャリア同時接続

ドコモにおける2015年3月のLTE-Advancedサービス開始時点のCAでは2つのLTEキャリアの同時接続を行う。実現できる最大の下り通信速度はCAにより同時接続を行うLTEキャリアの合計周波数帯域幅によって決まる（表1）。3GPP仕様上2つのLTEキャリアの同時接続では最大300Mbpsが実現できるが、これは合計周波数帯域幅が40MHzの場合である。ドコモではCAを行う周波数の組合せとして、2GHz帯（15MHz

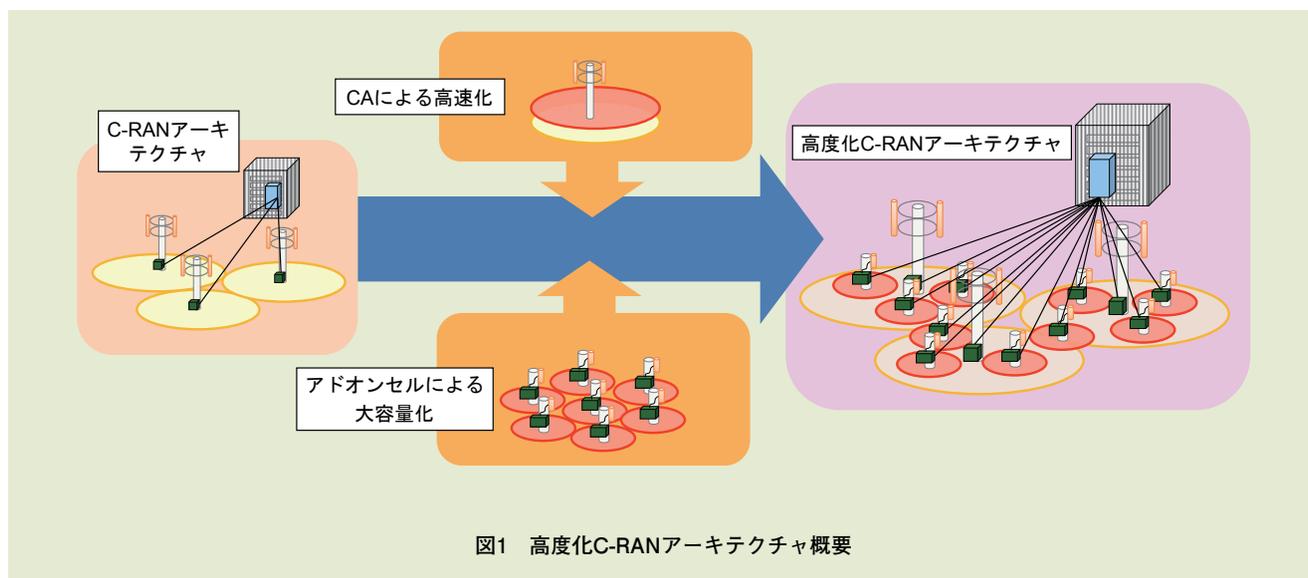


図1 高度化C-RANアーキテクチャ概要

*5 マクロセル：1つの基地局がカバーする半径数百メートルから数十キロメートルの通信可能エリア。
 *6 スモールセル：送信電力が小さく、マクロセルに比較して小さいエリアをカバーするセルの総称。

*7 eNB：LTEの無線基地局装置。
 *8 ベースバンド：デジタル信号処理を行う回路またはその機能ブロック。
 *9 サイト：基地局アンテナの設置場所。

幅) +1.5GHz帯 (15MHz幅) および800MHz帯 (10MHz幅) +1.7GHz帯 (20MHz幅) の合計30MHz幅の2つの組合せを使用し、規格上、下り最大通信速度225Mbpsを実現する。また、一部エリアにおいて800MHz帯 (15MHz幅) +1.7GHz帯 (20MHz幅) の組合せにより合計35MHz幅を使用した屋外商用環境における検証を実施しており、下り最大通信速度240Mbpsを達成することが確認できた (図2)。

なお、LTE-Advanced標準仕様で

は最大5つのLTEキャリアのCA (合計帯域幅100MHz) まで規定されており、今後さらなる高速化にむけた3つ以上のLTEキャリアのCAへの拡張も予定している。同一バンド処理装置で多くのセルを収容し制御する高度化C-RANアーキテクチャでは、前記CAの拡張についても実現しやすい構成となっている。

(2)セル間ロードバランシング

CAは高速化だけでなく、セル間のロードバランシング*10にも有効である。商用環境ではユーザの分布

や移動端末の対応周波数の偏りや周波数ごとの無線伝搬特性の違いなどにより、そのままでは周波数キャリア間の混雑度に偏りが生じる。そのため、複数の周波数に対応している移動端末の場合、なるべく混雑度の小さいLTEキャリアに接続させるように制御する。しかしながら、従来のLTEでは接続するセルを切り替えるためにハンドオーバー*11が必要であり、混雑度が短時間で変動する場合には、それに追従した切替えができない。一方、CAを適用している場合は、すでに複数のキャリアに同時接続しているため、短時間で混雑度が変動したとしても、それに応じたLTEキャリアを瞬時に選択でき、周波数利用効率の向上が期待できる (図3)。

2.2 アドオンセルによる大容量化

マクロセルのエリア内でトラフィックが集中するスポットに送信

表1 CAによるスループットの高速化

| 合計周波数帯域幅 (MHz) | 下り最大通信速度 (Mbps) |
|----------------|-----------------|
| 5 | 37.5 |
| 10 | 75 |
| 15 | 112.5 |
| 20 | 150 |
| 25 | 187.5 |
| 30 | 225 |
| 35 | 262.5 |
| 40 | 300 |

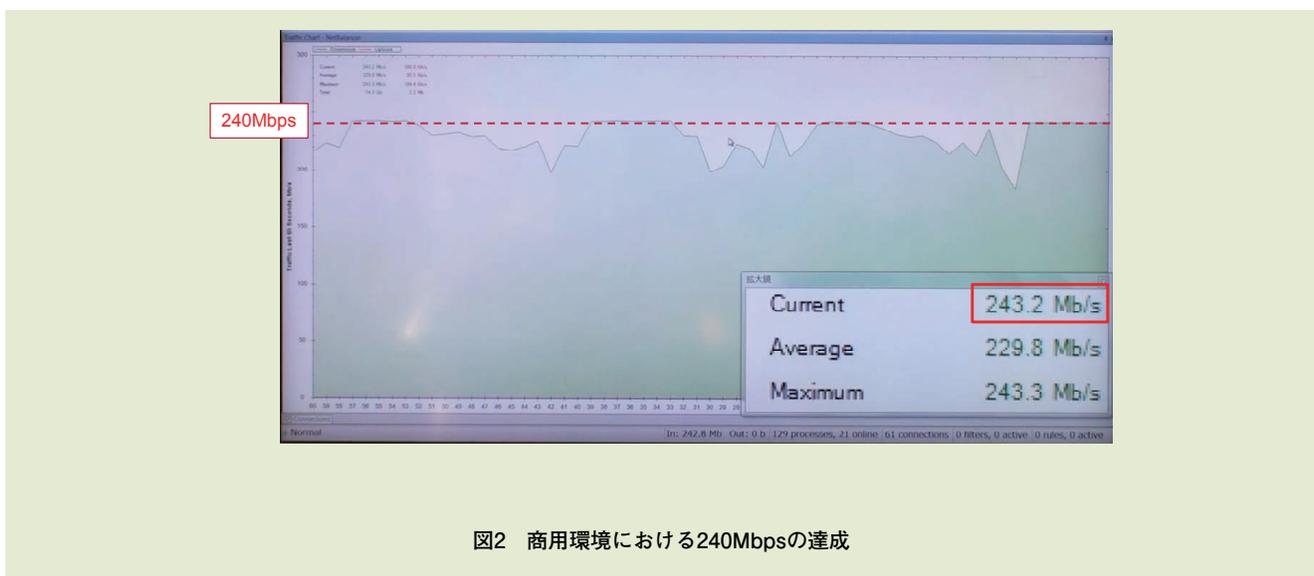


図2 商用環境における240Mbpsの達成

*10 ロードバランシング：セル間のトラフィック負荷分散。

*11 ハンドオーバー：移動端末が接続する基地局を切り替えること。

電力の小さいアドオンセルを配置し、マクロセル内のトラフィックをオフロードすることでシステムの無線容量拡大を実現するHetNetは世界的にも注目されている技術である[6]。ドコモでは、これを利用してマクロセルとアドオンセルをCAによって連携するため、マクロセルをエリアをカバーするカバレッジバンドとして、またアドオンセルを無線容量拡大のための容量バンドとしてそれぞれ別の周波数バンドを使用する。たとえ

ばカバレッジバンドとして2GHz/800MHz帯などを使用し、容量バンドとして1.5GHz/1.7GHz帯などを使用する。

(1)シミュレーションによる評価
アドオンセルによる容量拡大効果についての計算機シミュレーション評価結果を解説する。本評価においては、カバレッジバンドはマクロセルのみの配置とし、容量バンドはカバレッジバンドと同様にマクロセルとして設置した場合（図4のCase 1）

と、アドオンセルとして設置した場合（図4のCase 2）を想定し、両ケースの比較を行う。Case 1, Case 2ともにマクロセルは1つのマクロ基地局がカバーするエリアを3つに分割する3セクタ構成とし、カバレッジバンド、容量バンドの周波数帯域幅は共に10MHzで評価を実施した。Case 2においてはマクロセル内に複数のアドオンセルを配置し、ユーザは設置したアドオンセルの周辺に配置させている。つまり、ユーザ密集

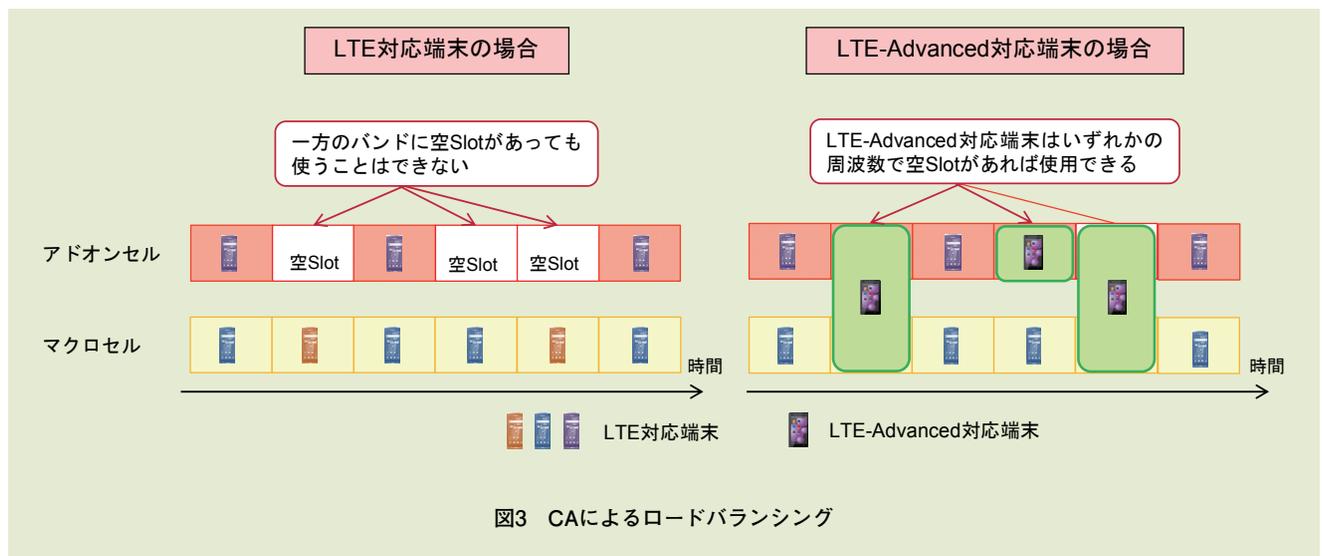


図3 CAによるロードバランシング

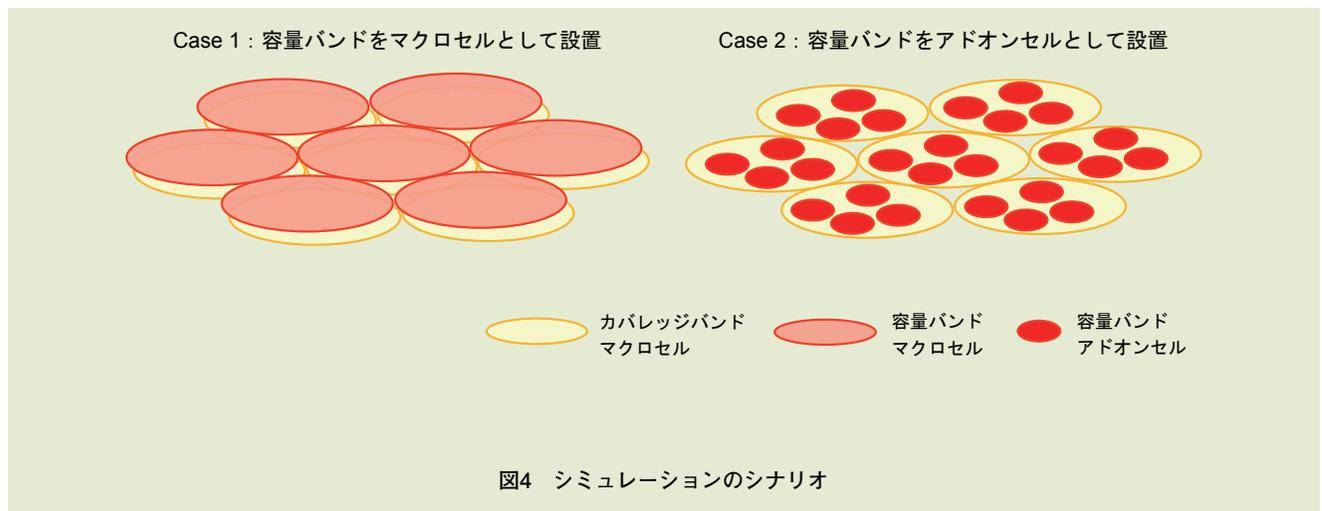


図4 シミュレーションのシナリオ

エリアに的確にアドオンセルを設置できた場合の評価となる。

(2)評価結果

図5、6に評価結果を示す。図5は各Caseにおけるセクタ容量（セクタ内のカバレッジバンドのセルおよび全容量バンドのセルの容量の合計値）を示す。なお、セクタ容量については、アドオンセルの容量効果を示すため、Case 1のセクタ容量に正規化したものを示している。Case 2においてセクタ当たり4つのアドオンセルを設置した場合で、約2.5倍の容量効果が得られており、アドオンセル数の増加に伴い容量が増加していることが確認できる。また、図6はCase 2における1つのアドオンセル当りの容量を示す。容量はアドオンセル数の増加に伴い低下しているが、これはアドオンセルが増加したことでアドオンセル間の干渉が大きくなるためである。したがって、ア

ドオンセルを過度に多く設置する場合、1アドオンセル当りの効果が減少し、費用対効果が低下してしまう。本評価条件ではセクタ当りのアドオンセル数は4または6程度が最適であると考えられるが、アドオンセルのアンテナ構成（ビーム幅や設置高など）やマクロセルのセル半径などの条件によって最適値は異なる。

2.3 通信の安定性向上

前述のとおりアドオンセルを追加しただけでは、セル容量は増加するが、複数のアドオンセルをエリア内に設置するとセルの境界となるエリアが増加してしまう。CAを用いずアドオンセルを設置した場合、移動中のユーザはアドオンセルのセル境界を高頻度でまたぐことになり、アドオンセル間の干渉やハンドオーバーの処理により通信品質が劣化するという課題がある。一方、高度化C-RAN

アーキテクチャでは、CAによりアドオンセルとマクロセルに同時に接続しているため、通信の安定性をマクロセルで確保することが可能となり、移動時の品質の著しい劣化を抑えることが可能となる。

前述の通信の安定性の効果について、図7を用いて具体的に説明する。ポイント①ではLTE対応端末はアドオンセルAに接続しLTEが提供するスループットを実現する。一方、LTE-Advanced対応端末はマクロセルとアドオンセルAの両方のエリア内となるため、CAによる同時接続でLTE対応端末よりも高スループットが実現できる。その後ユーザがポイント②に移動した場合、アドオンセルのセル境界となりLTE対応端末はアドオンセル間の干渉およびハンドオーバー処理によりスループットは劣化する。一方LTE-Advanced対応端末についてもアドオンセルAとア

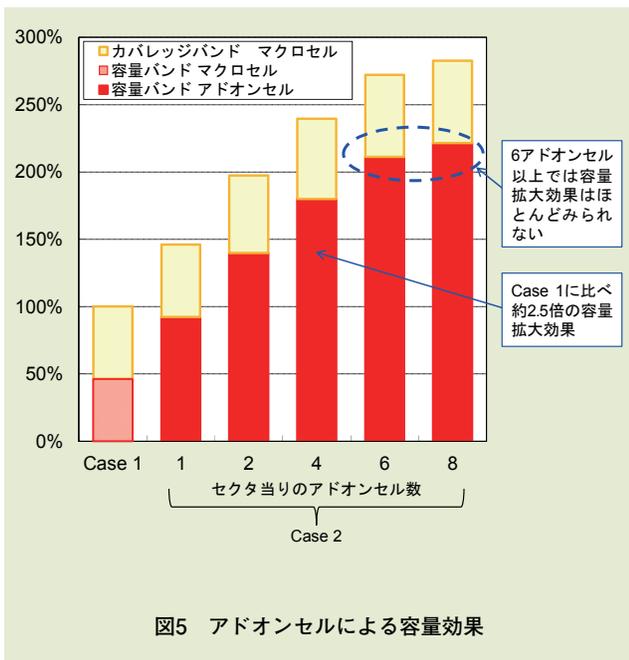


図5 アドオンセルによる容量効果

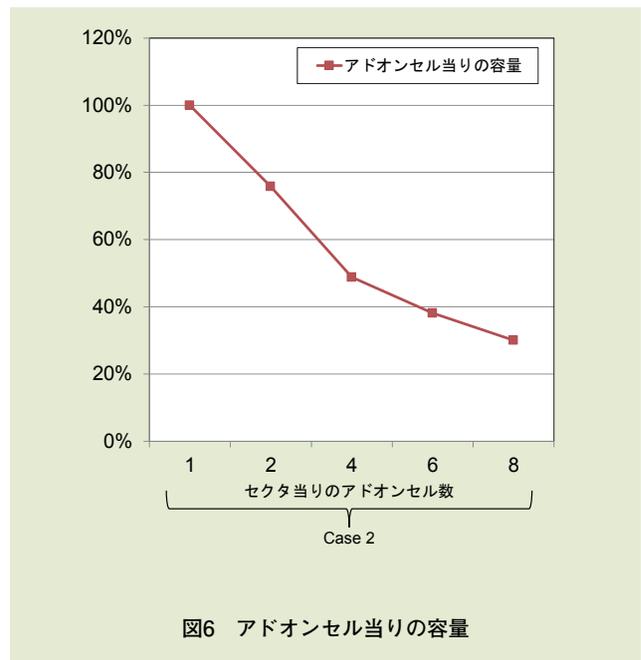


図6 アドオンセル当りの容量

ドオンセルBの切替えが行われるが、同時にマクロセルにも接続しているため、スループットが極端に劣化することはなく一定の通信品質が維持できる。このように、高度化C-RANアーキテクチャでは、LTE-Advanced対応端末をマクロセルに接続しつつアドオンセルを柔軟に切り替えて使用することができるため、高速かつ安定した通信が実現できる。この効果は屋外商用環境における検証でも

確認できている (図8)。

3. 高度化C-RANにおけるSCell制御

CAでは複数のLTEキャリアに同時接続するが、移動端末が接続するLTEキャリアのうち、主キャリアをPCC (Primary Component Carrier) と呼び副キャリアをSCC (Secondary Component Carrier) と呼ぶ。またPCCで接続するセルをPCellと呼び、

SCCで接続するセルをSCellと呼ぶ[7]。

高度化C-RANアーキテクチャにおいてはマクロセル内に複数のアドオンセルが存在するため、マクロセルに接続している移動端末の位置に応じて、どのアドオンセルをSCellとして設定するかを選択する制御を実施する。また、移動端末の移動に伴い、最適なアドオンセルは変わっていくため、それに応じてSCellとして設定するアドオンセルを切り替

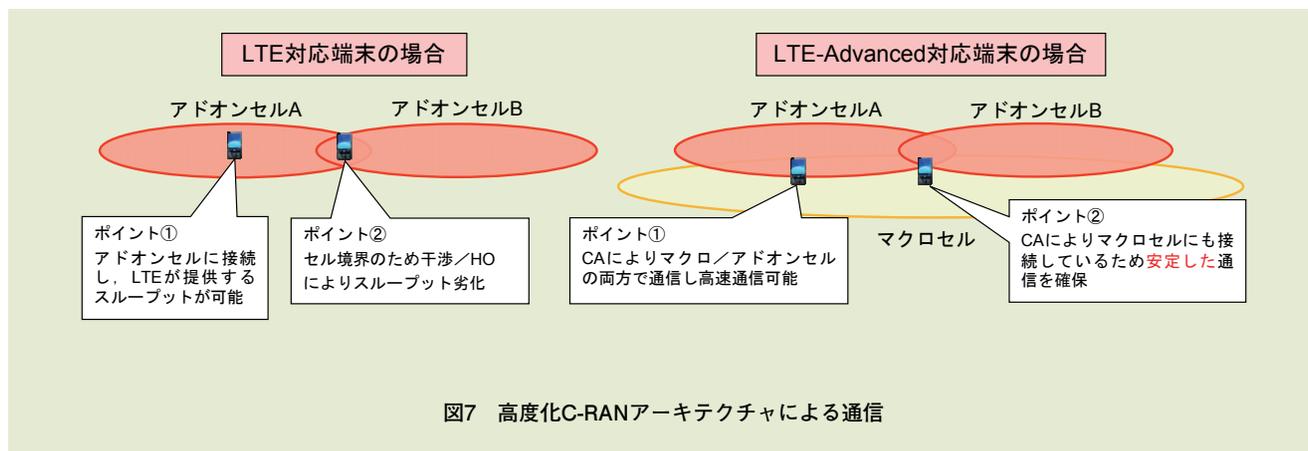


図7 高度化C-RANアーキテクチャによる通信

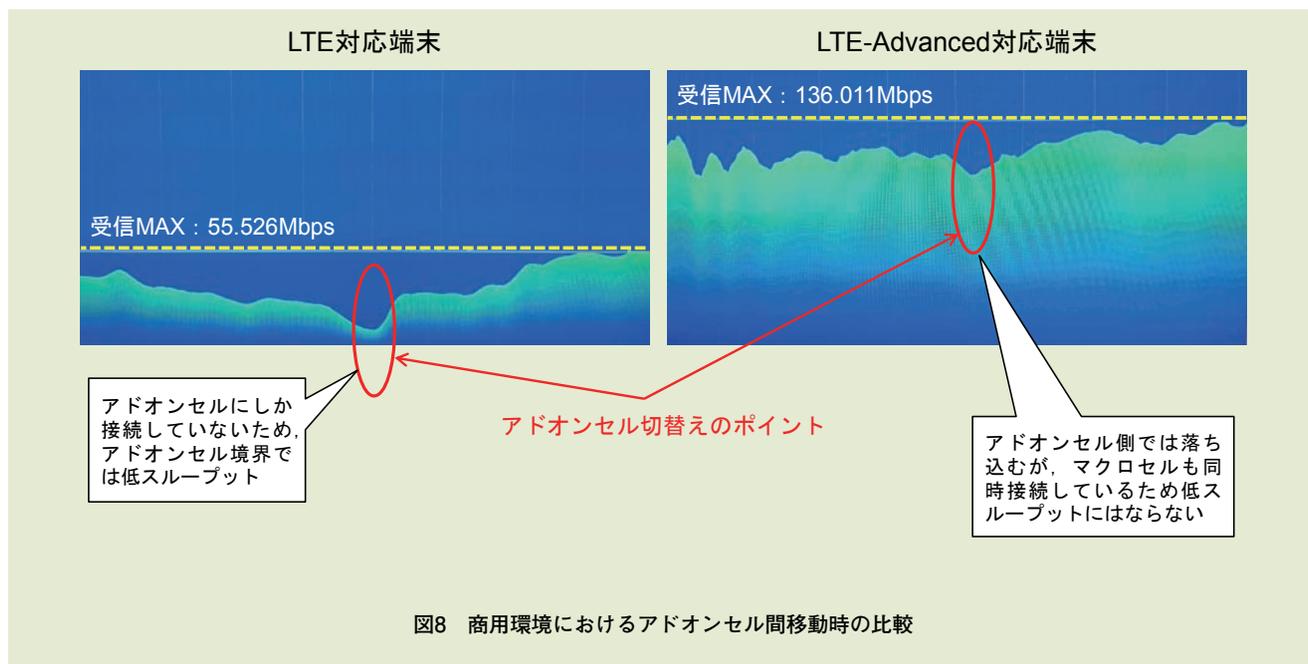


図8 商用環境におけるアドオンセル間移動時の比較

える。さらに、どのアドオンセルも品質が悪く接続する価値がない場合には、移動端末のバッテリー節約のためにSCellの設定を解除する。ドコモでは、これらの制御を3GPP標準仕様[8]において規定されている移動端末の無線品質測定とeNBへの測定情報の報告を用いた「SCellの追加」「SCellの変更」「SCellの削除」で実現している。

3.1 SCellの追加

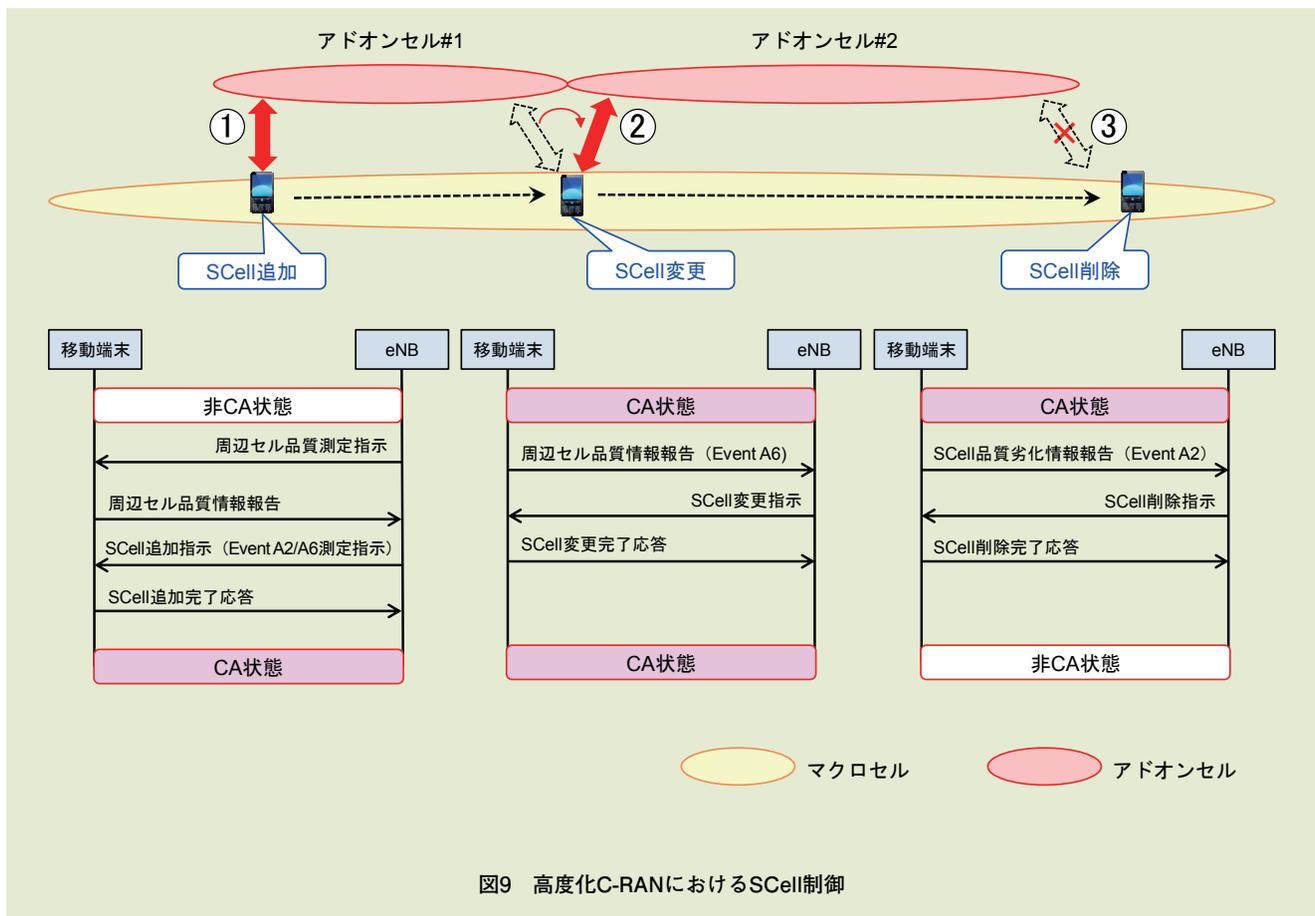
マクロセルのみに接続している状態でSCellを追加する制御について図9①に示す。まず、eNBは移動端末に対して周辺にアドオンセルがあ

るか否かの測定を指示する。移動端末は周辺にアドオンセルがある場合、アドオンセルの無線品質情報をeNBへ報告する。eNBは報告された無線品質情報が一定の条件を満たす場合には、アドオンセルをSCellとして追加するように移動端末に対して指示を行う。これにより移動端末はCA状態となり、マクロセルとアドオンセルに同時に接続できるようになる。これにより移動端末の位置に応じて最適なアドオンセルをSCellに設定することができる。

3.2 SCellの変更

マクロセルとアドオンセルに接続

中(CA状態)において、移動端末が異なるアドオンセルのエリアに移動する場合にSCellを変更する制御を図9②に示す。eNBは3.1節で示したSCell追加の際、SCellと同一周波数で現在のSCellより良い無線品質のセルが存在した場合に、eNBに報告を上げるための測定(Event A6測定)を移動端末に指示する。マクロセルとアドオンセル#1に接続中の移動端末が、アドオンセル#1とアドオンセル#2のエリア境界に移動した際、SCell(アドオンセル#1)の無線品質は劣化する一方で周辺に存在するアドオンセル#2の無線品質が良くなる。これにより



前述のEvent A6測定に基づき、移動端末はアドオンセル#2の無線品質をeNBに報告する。その報告に従いeNBはSCellをより無線品質の良いアドオンセル#2に変更するように移動端末に指示を行う。これにより移動端末の移動に追従して最適なアドオンセルをSCellとして設定することができる。

3.3 SCellの削除

CA状態において、移動端末がアドオンセルのエリア外に移動する場合にSCellを削除する制御を図9③に示す。eNBは3.1節で示したSCell追加の際、現在のSCellの無線品質が所定のしきい値以下に劣化した際に報告を上げるための測定（Event A2測定）を移動端末に指示する。なお、SCellを変更する場合でも、前述のEvent A2測定は継続される。マクロセルとアドオンセル#2に接続中の移動端末がアドオンセル#2のエリア外に移動すると無線品質が劣化するため、前述のEvent A2測定に基づき、移動端末はアドオンセル#2の無線品質劣化をeNBに報告する。その報告に基づきeNBは、当該

SCellを削除するように移動端末に指示を行う。これによりCA状態が解除され従来のLTE（非CA状態）での通信状態となる。適切なタイミングでCA状態を解除することで、eNBのリソースの消費や移動端末のバッテリー消費を抑えることが可能である。

4. あとがき

本稿では、高度化C-RANアーキテクチャによるLTE-Advancedの特長、シミュレーションによる容量拡大効果および制御概要について解説した。

高度化C-RANアーキテクチャにより、LTE-Advancedにおける通信速度の高速化および通信の安定性を維持しつつアドオンセルによる無線容量拡大が実現でき、ユーザの使用感を向上させることができる。今後はさらなる高速化の実現や無線周波数利用効率の向上のための検討を進めていく予定である。

文 献

[1] 中村, ほか: “LTE/LTE-Advanced高度化技術概要,” 本誌, Vol.21, No.2, pp.6-9, Jul. 2013.

[2] 吉原, ほか: “高度化C-RANアーキテクチャを実現する無線装置およびアンテナの開発,” 本誌, Vol.23, No.2, pp.19-24, Jul. 2015.

[3] NGMN: “5G WHITE PAPER,” Feb. 2015.
https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf

[4] 三木, ほか: “LTE-Advancedにおける広帯域化を実現するCarrier Aggregation,” 本誌, Vol.18, No.2, pp.12-21, Jul. 2010.

[5] 大矢根, ほか: “IP化対応無線基地局装置の開発,” 本誌, Vol.15, No.1 pp.8-13, Apr. 2007.

[6] T. Takiguchi, K. Kiyoshima, Y. Sagae, K. Yagyu, H. Atarashi and S. Abeta: “Performance Evaluation of LTE-Advanced Heterogeneous Network Deployment Using Carrier Aggregation between Macro and Small Cells,” IEICE Trans. Commun., Vol.E96-B, No.6, Jun. 2013.

[7] 3GPP TS36.300 V10.12.0: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2,” Dec. 2014.

[8] 3GPP TS36.331 V10.15.0: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification,” Dec. 2014.