NMN OPS WDM-PON

Technology Reports

Optical Mobile Network —光モバイルネットワーク—

近年のスマートフォンの普及やLTEの導入に伴い，移動網に流入するデータトラフィックが増大している．今後においても，サービスの高度化や，より高速・広帯域な無線アクセス技術の導入などが想定され，さらに移動網にかかる負荷が増大していくことが容易に予想できる．本稿では，ドコモ欧州研究所で研究を進めている光パケット交換を用いた次期移動網である光モバイルネットワークについて解説する．

ドコモ欧州研究所 Changsoon Choi†
Qing Wei
Thorsten Biermann
神津 和志（こうづ かずゆき）

1. まえがき

近年，モバイルデータのトラフィックはスマートフォンの急速な普及とLTEサービスの商用化により激増している．今後は，多様なイネーブラ[*1]が構築するネットワーク付加価値サービス（NVAS：Network Value-Added Services）などの新しい高度なサービスが継続的に生み出され[1]，より高速な無線アクセス技術の導入がさらに促進されると考えられる．今後展開されていく無線アクセス技術として，2015年前後の開発完了が見込まれているLTE-Advanced[*2]の下り通信速度は，最大1Gbit/s，および上り通信速度は最大500Mbit/sである[2]．さらにその先のBeyond LTE-Aにおいては，下り通信速度最大10Gbit/sをめざして広範に研究されている．

このように，モバイルデータのトラフィック量が予想よりもはるかに早く増加していくことを考慮すれば，次期モバイルネットワーク（NMN：Next Mobile Network）[3][4]は，将来のトラフィック需要をにらみ，強化していかなければならない．ネットワークがこれらの無線アクセス技術をサポートするためには，ゲートウェイ装置などのモバイルネットワーク機器や基地局を結ぶ伝送網の進化のみならず，モバイルネットワーク機器そのもののアップグレードも必要となってくる．

一方，1ユーザ当りの平均収益（ARPU：Average Revenue Per User）の伸びは，トラフィック需要の増加に比べはるかに低い増加率であるか，またはトラフィック需要のみが増加する一方でARPUは減少していくことが予想される．そのため，次期モバイルネットワークの開発においてはコスト効率も重要になる．これはすなわち，将来のモバイルネットワークでは運用の容易性とネットワーク管理の容易性に加え，高いエネルギー効率と環境負荷の低いネットワーキングにより，運用コスト（OPEX：Operation Expenditure）を削減できる見込みがなければならないことを意味する．いうまでもなく，資本支出（CAPEX：Capital Exependiture）の低減は次期モバイルネットワークの開発において確実に重要な要素である．

このような状況を鑑みると，将来のモバイルネットワークが，より速く，より広く，より環境負荷の低いものへと進化する過程で，急速に成

© 2012 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます．

＊1 **イネーブラ**：複数のサービスシナリオ制御部から利用されるサービス構成部品，または機能．
＊2 **LTE-Advanced**：LTEの発展形無線インタフェースであり，3GPP Release 10として標準化が進められている．

長している光ネットワーク技術が重要な役割を果たすと考えられる．モバイルネットワークではユーザモビリティと無線アクセス技術をサポートするために，固定ネットワークに比べ高レベルの柔軟性とネットワーク制御が要求される．このため，現在の光ネットワーク技術の制限を取り除き，モバイルネットワークに適合していくことが課題となってくる．本稿では，ユーザモビリティと無線アクセス技術のサポートを，光ネットワーク技術により実現する，光モバイルネットワーク（OMN：Optical Mobile Network）のアーキテクチャおよびソリューションについて解説する．

2. 光伝送技術

2.1 コアネットワーク

光伝送には，伝送媒体での損失を低く抑え広い帯域幅を提供するという特長がある．波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplex）[*3]通信を用いることで，数百の波長が1本の光ファイバに多重化される．現時点で，1つの波長で10，40，100Gbit/sを搬送可能であり，光ファイバ一対当り数十Tbit/sの伝送能力を容易に達成できる[5]．現在，光スイッチング技術としては，光回線スイッチング（OCS：Optical Circuit Switching）および光パケットスイッチング（OPS：Optical Packet Switching）と，これらの折衷である光バーストスイッチング（OBS：Optical Burst Switching）の3種類がある．OCSは，サブ波長から，波長，波長帯レベル，ファイバレベルまでの粒度でデータストリームをスイッチングできる．OPSは，IPパケットスイッチングと同一の交換原理を用いており，このため多重化においては最も高い柔軟性を実現する．OPSは光領域でのバッファリングとパケット処理を必要とするため，光ネットワークとしては高コストとなる課題があるが，これらの課題を克服するための研究が活発に進められている．また，OCSとOPSの折衷案であるOBSは，単一のパケットではなく，複数のパケットをデータバーストという形式で交換／伝送する方式で，バーストパケット単位でスイッチングを行う．OBSの課題としては，データを送信する前にデータ送信元と送信先のノード間の伝送パスを一時的に確保し占有するため，中継するネットワークノードにおいて伝送パス確保の衝突を回避する方法が複雑になってしまう点がある．このため，現状ではまだ大規模なネットワークに適用されていない．

光スイッチング技術が研究段階のため，現状のネットワークではユーザデータは高速の光リンク上で伝送されるが，ルーティングおよびスイッチングは電気的に行われている．つまり，ルーティングおよびスイッチングのため受信した光信号を電気信号に変換し，その後光ファイバで転送するために再度，光信号へ変換することになる．ネットワークにおけるエンド・ツー・エンドのデータ伝送において，この光・電気・光変換（OEO：Optical to electrical, Electrical to Optical）と電気的処理は，ネットワーク容量，遅延といった要求に対する大きな制約となる．現状のLTE/EPC（Evolved Packet Core）[*4]モバイルネットワーク・アーキテクチャは，このように電気ルータが光ファイバによって相互に接続される伝送ネットワーク上に構築されているため，光ネットワークの利点を最大限に活かすことができていない．したがって，OMNの重要な設計上の課題は，現状のモバイルネットワーク・アーキテクチャを光伝送の特性に適合させ，現状の光伝送装置を強化することである．

2.2 アクセスネットワーク

光伝送ネットワークの最後の1マイル，つまり光アクセスネットワークでは，パッシブ光ネットワーク（PON：Passive Optical Network）[*5]が広く用いられている．中でもTDM-PON（Time Division Multiplexing-PON）[*6]は，そのコスト効率の高さからFTTH（Fiber To The Home）サービスの主要な技術となっている．IEEEとITU-Tにおいても，固定ネットワークのトラフィック増大をサポートするためにTDM-PONの進化が推進されている．

(1)10G EPON

IEEEでは，10G EPON（Ethernet PON）がIEEE 802.3avとして2009年9月に標準化および公開された．10G EPONは，IEEE 802.3ah標準の

＊3 **波長分割多重（WDM）**：1本の光ファイバケーブルに複数の異なる光波長の信号を多重する技術．同時に複数の信号を伝送可能なため，高速・大容量化に適している．

＊4 **EPC**：LTEおよび他のアクセス技術向けに3GPPで規定された，IPベースのコアネットワーク．

＊5 **パッシブ光ネットワーク（PON）**：光終端装置（OLT）から複数のONU（＊7参照）への，パッシブルーティングユニットを用いた双方向のポイントツーマルチポイントのリンク．

＊6 **TDM-PON**：ONU（＊7参照）にそれぞれ異なるタイムスロットを割り当てることで信号の衝突を防ぐPONシステム．商用FTTHサービスに使用されるTDM-PONは，下り1Gbit/s上り622Mbit/sをサポートできる．

下りリンクおよび上りリンクの帯域幅を10Gbit/sに拡張し，10G EPON光ネットワーク装置（ONU：Optical Network Unit）[*7]と1G EPON ONUが同一PON上に共存できるよう互換性をもたせている．

⑵NG-PON

並行して，ITU-Tにおいても次世代PON（NG-PON：Next Generation-PON）がITU-T G.987に定義され，新たなサービスにより増加する帯域幅の要件をサポートしている．このNG-PONへのアプローチは，2つのフェーズに分割される．

・フェーズ1：NG-PON1

NG-PON1ではGPON（Gigabit PON）システムの中期的なアップグレードとして，下り10G上り1Gをサポートする．

・フェーズ2：NG-PON2

NG-PON2は，例えばWDM-PON[*8]などの，まったく新しい光ネットワークタイプを用いる長期的なソリューションである．NG-PON2では下り上りともに10Gbit/s以上をサポートする．

ここまで述べてきたように，10G EPONとNG-PON1はTDM技術を適用しており，リンク容量[*9]はすべてのONUで共有されるため，将来のモバイルバックホール[*10]トラフィックをサポートするには，10G PONにおいてさえも容量の制約の問題がある．前述のとおり，LTE-Advancedは最大1Gbit/sの下り通信速度をサポートするが，これは1つのLTE-Advanced基地局のバックホールアクセストラフィックが1Gbit/s以上になり得るということである．通常，1つの基地局は複数のセクタを収容するため，1台の基地局を収容するバックホールネットワークの容量はさらに増大し，1つの10G PONで1台の基地局しかサポートできないことにもなりえる．このため10G EPONやNG-PON1といった技術は，将来のモバイルバックホールアクセスネットワークとしては現実的ではない．

この理由からドコモ欧州研究所では，WDM-PONを将来のモバイルバックホールアクセスネットワークにおける有望な光アクセス技術とみなして研究を進めている．WDM-PONの各ONUには専用の波長が1つ割り当てられ，大容量（TDM-PONの下り10G／上り1Gに対し，WDM-PONは下り40G／上り10G），長い到達距離（TDM-PONの30kmに対し，WDM-PONは50～100km），ONU間の高いセキュリティとアップグレードの容易性を実現する．

3. OMNアーキテクチャ

最新の光ネットワーク技術に基づく将来のOMNアーキテクチャに関するドコモ欧州研究所のビジョンを**図1**に示す．超高速スイッチングおよびトンネリングが不可欠なコアネットワーク[*11]には，OCSであるラムダスイッチング[*12]を用いる．また，トラフィックを集約するためにはOPSを用いる．これにより，従来型のモバイルネットワークノード（MME（Mobility Management Entity）[*13]，PGW（Packet Data Network Gateway）[*14]，SGW（Serving Gateway）[*15]など）が，光伝送装置と統合される（すなわち，MME_O，PGW_O，SGW_O）．これによりネットワーク容量が増加し，互換性を確保しつつエネルギー消費が抑えられる．具体的には，光トランスポート層はデータの転送／スイッチング機能に加え，ユーザデータフローの管理を行う．ユーザデータフロー管理は，PGW_OとSGW_Oに連動したMME_Oにより実施される．

アクセスネットワークではコアネットワークに比べ，よりコスト効率の高い光ソリューションが必要とされる．ここでは，PON技術とメトロリング[*16]ネットワークと組み合わせることで効果が期待できる．

また，アクセスネットワークの設計においては，将来の無線アクセス技術をサポートする機能も考慮しなければならない．そのサポートすべき技術として，代表的なものではセル間協調（CoMP：Coordinated MultiPoint）[*17]技術が挙げられる．

4. OMNソリューションの提案

4.1 光モビリティ管理

固定ネットワークの一般的な要件（OAM（Operation Administration and Maintenance）[*18]，ネットワークの弾力性，QoS保証など）に加え，モバ

＊7 **光ネットワーク装置（ONU）**：PONシステムにおいてエンドユーザ側に位置するコンポーネント．

＊8 **WDM-PON**：ONUにそれぞれ1つ，または複数の専用波長を割り当てるPONシステム．

＊9 **リンク容量**：リンク容量とは，単一のリンクの帯域幅のこと．

＊10 **バックホール**：コアネットワーク（＊11参照）から無線基地局への接続経路を指す．

＊11 **コアネットワーク**：交換機，加入者情報管理装置などで構成されるネットワーク．移動端末は無線アクセスネットワークを経由してコアネットワークとの通信を行う．

＊12 **ラムダスイッチング**：光ネットワークにおいて光の個々の波長を異なる経路へとスイッチングして情報のルーティングを行う技術．フォトニックスイッチングまたは波長スイッチングとも呼ばれる．

＊13 **MME**：eNodeBを収容し，モビリティ制御などを提供する論理ノード．

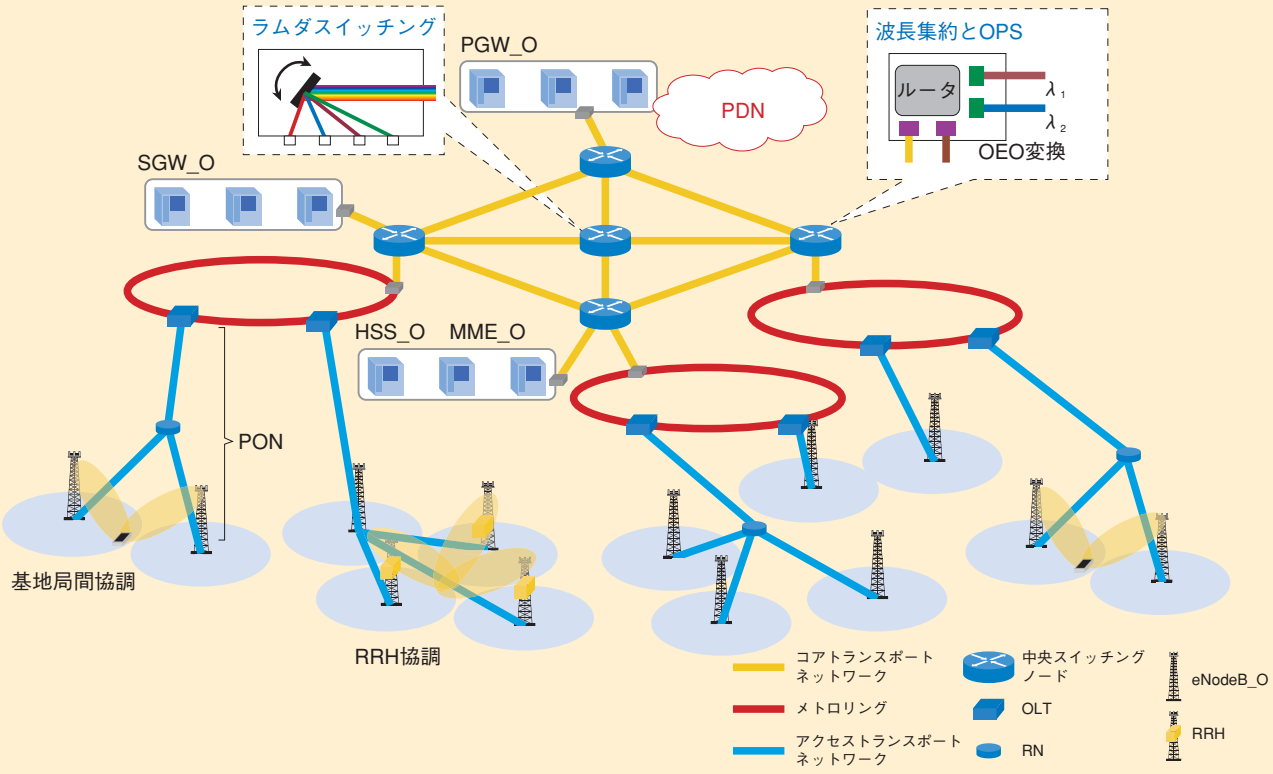


図1　OMNアーキテクチャ

イルネットワークではユーザモビリティをサポートすることが必要である．この要件はモバイルネットワークのモビリティ管理機能，すなわち位置登録，ハンドオーバ，ページング[*19]により実現される．従来型のネットワークでは，これらの処理は常に電気領域にて実行されるが，将来の光モバイルネットワークにおいては，非効率になる可能性がある．特にハンドオーバについては，トンネル管理とデータ転送に多くのOEO変換と電気領域での処理を伴い，エネルギーの消費と遅延が生じる．前述のとおり，OMNにおけるOEO変換と電気的処理の削減はドコモ欧州研究所の重要な研究課題である．

OMNにおけるユーザデータフロー制御の設計を**図2**に示す．OMNアーキテクチャでは，トンネルを下位レイヤ（L1/L2など）のプロトコルで実現する．このため，光スイッチング技術でのトンネルの設計が検討課題となる．

(1)トンネリングプロトコル

LTE/EPC標準では，ユーザデータを伝送するトンネルはGPRS (General Packet Radio Service)[*20]トンネリングプロトコル（GTP：GPRS Tunneling Protocol）[*21]を用いて識別される．外部（インターネットなど）からのデータパケットはPGWでそれぞれのGTPトンネルに送出され，その後GTPトンネルにより，ユーザが在圏している無線基地局（eNodeB[*22]）へと伝送される．ユーザがあるeNodeBエリアから別のeNodeBエリアに移動すると，対応するGTPトンネルがネットワーク内のSGW（図2①）／PGW（図2②）で新たに設定され，ユーザデータフローが切り替わる．図2のLTE/EPCモデルに示すとおり，GTPプロトコルはUDP（User Data-

＊14 **PGW**：PDNとの接続点であり，IPアドレスの割当てや，SGWへのパケット転送などを行うゲートウェイ．
＊15 **SGW**：3GPPアクセスシステムを収容する在圏パケットゲートウェイ．
＊16 **メトロリング**：アクセスネットワークからのトラフィックを集約するメトロネットワークにおいて，メトロリングは，リング型の網構成によるメトロネットワークを指す．
＊17 **セル間協調（CoMP）**：あるUEに対して，複数のセクタあるいはセルと信号の送受信を行う技術．複数のセルが協調して送受信を行うことにより，他セル干渉低減および所望信号電力の増大を実現する．
＊18 **OAM**：ネットワークにおける保守運用管理機能．
＊19 **ページング**：着信時に移動端末を一斉に呼び出す処理．

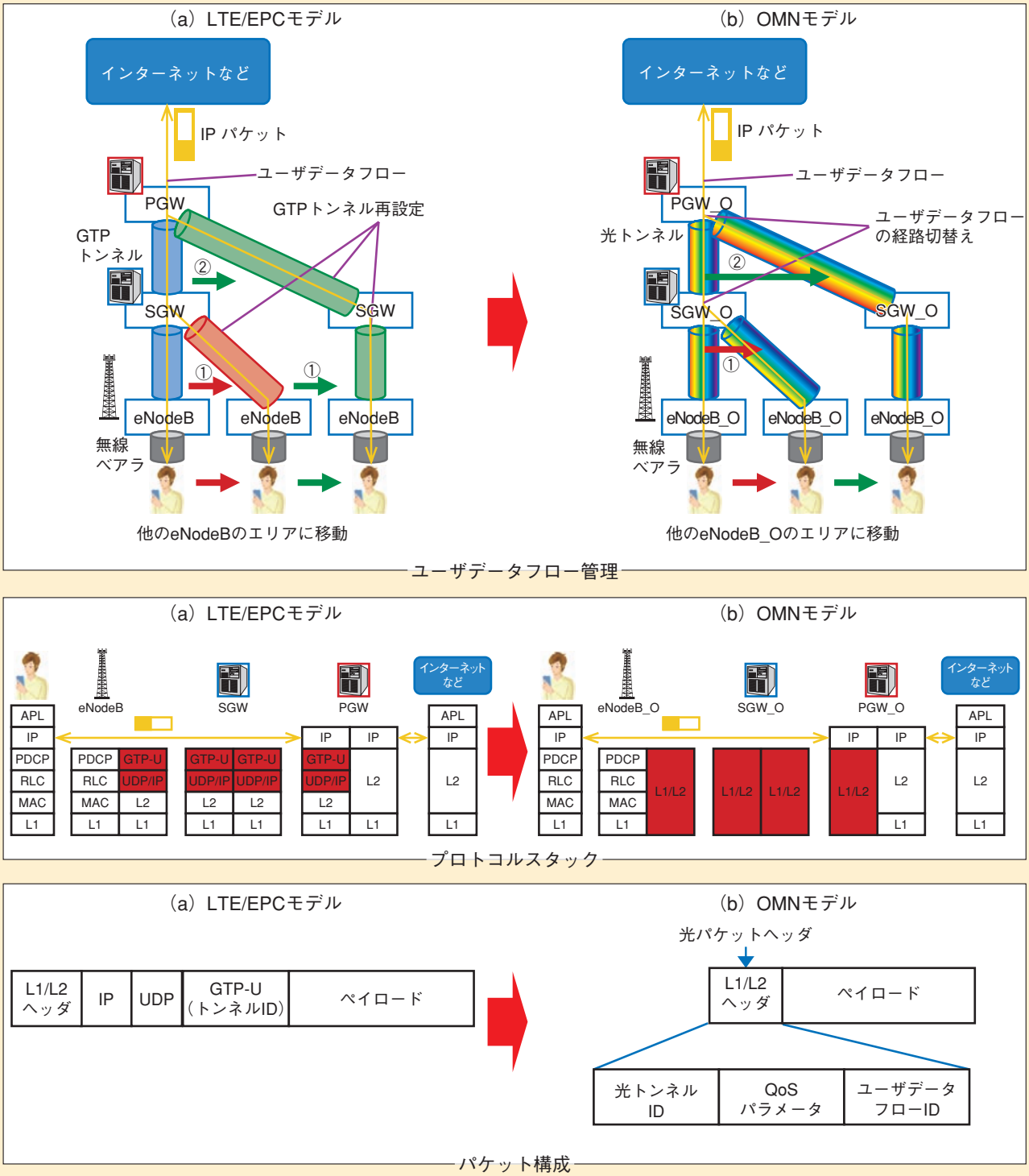


図2　OMNにおけるユーザデータフロー制御の設計

＊20 **GPRS**：GSM，UMTSで採用されているパケット通信システム．

＊21 **GPRSトンネリングプロトコル（GTP）**：ユーザデータの伝送を行うために利用される，コアネットワーク内での通信経路設定およびデータ転送などの機能を提供する通信プロトコル．

＊22 **eNodeB**：無線制御装置RNCと基地局装置BTSを機能統合・高密度化した，LTE以降における基地局装置．

gram Protocol）[*23]/IPの上位に位置する．SGWは通過する各パケットのGTP，UDPおよびIPプロトコルを処理し，これらを正しくルーティングする必要がある．OMNアーキテクチャでは，ユーザデータを伝送するトンネルは下位レイヤプロトコルで識別する．つまり，SGW_Oが行うユーザデータの転送処理では下位レイヤプロトコルの処理のみとなる．これは，GTPトンネルにおける処理と比べてSGW_OでのIP/UDP/GTPレイヤOEO変換と電気領域での処理を削減することと，ユーザパケットのオーバーヘッド情報の削減することを意味する．

(2)光スイッチング技術とユーザデータフロー制御

光レイヤで移動するユーザの追跡を実現するためには，光ネットワークルータ／スイッチ装置が，異なるユーザからのデータフローを識別し，光レイヤにおいてユーザデータフローを個別にスイッチングできなければならない．光クロスコネクタ（OXC：Optical Cross Connector）[*24]，光分岐挿入（OADM：Optical Add/Drop Multiplex）[*25]，再構成可能光分岐挿入（ROADM：Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplex）[*26]などのOCS技術は，波長またはサブ波長レベル（光チャネル当り1.25～100Gbit/s）の切替えを行う．これにより光伝送ネットワーク（OTN：Optical Transport Network）[*27]では，異なる光チャネルからの光パケットを多重化／逆多重化することができる．ただし，OTNのそれぞれの光チャネルの最小帯域幅は，1.25Gbit/s（ODU（Optical-channel Data Unit）[*28]0）である．このように，OCS技術による切替えの単位の粒度は大きいため，ユーザの個別のデータフロー（例えば音声通話の場合21～320kbit/s[6]）のスイッチングに対応できない．

これに対し，OPS技術[7][8]を用いたネットワークでは，データフローはユーザパケット単位で切り替えることが可能となり，これによりスイッチングの粒度に高い柔軟性をもたせることができる．これはモバイルトラフィックの動的な特性によく適合する．

上記の分析に基づき，光レイヤでのユーザデータフロー制御を実現するために，ドコモ欧州研究所はOPS技術によるユーザデータフロー制御メカニズムを設計している．図2に示すように光パケットの制御ヘッダには次の情報を含む．

①光トンネルID
②QoSパラメータ
③ユーザデータフローID

光トンネルIDおよびQoSパラメータは光ルータ／スイッチでの光パケット送出に使用される．ユーザデータフローIDはSGW_Oで対応する次の転送先（eNodeB_O，PGW_O）の光トンネルを導出する際に使用される．ユーザが移動した場合は，SGW_Oのユーザデータフローと光トンネルIDへのマッピングテーブルのみが書き換えられる．これらの主要パラメータは光パケットヘッダに含まれるため，ペイロード部[*29]は光スイッチ／ルータにより，電気的処理とOEO変換なしでスイッチングされる．

このメカニズムの設計においては，U-Plane[*30]の設計に加え，光ネットワークノード（SGW_O，PGW_O, eNodeB_O）におけるC-Plane[*31]の設計も必要である．C-Planeの課題としては，**図3**に示すとおり，モビリティ制御ノード（MME_O）と光ネットワークノード（SGW_O, PGW_O, eNodeB_O）間のインタフェースおよび，光ネットワークノード内のOPS光伝送装置と制御機能間の内部インタフェー

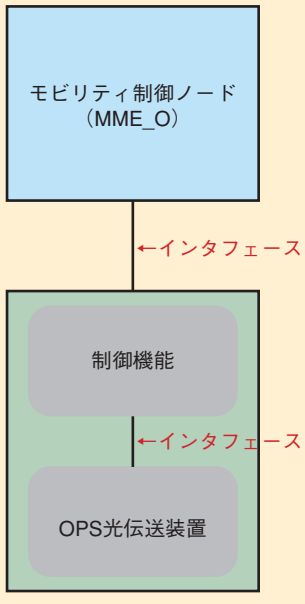


図3　ユーザデータフロー制御メカニズムにおけるインタフェースの設計

＊23 **UDP**：インターネットで標準的に利用されるIPの上位プロトコル．TCPとは異なり，サーバと端末との間で通信が確立しているかを確認する機能あるいは送信先に届かなかったデータを再送信する機能などが省かれている．
＊24 **光クロスコネクタ（OXC）**：光メッシュネットワークなどの光ファイバネットワークにおいて，電気通信事業者が高速光信号の交換に用いる装置．
＊25 **光分岐挿入（OADM）**：WDMで多重された複数波長のうち，任意波長の光を任意地点にて分岐挿入する方式．
＊26 **再構成可能光分岐挿入（ROADM）**：WDMシステムにおいてトラフィックの遠隔スイッチングを波長レイヤで行える光分岐挿入の方式．
＊27 **光伝送ネットワーク（OTN）**：ペイロードバイトの情報信号のみならず，オーバヘッドバイトに含まれる制御信号もそのまま伝達することが可能な方式．
＊28 **ODU**：ITU-Tで標準化されたOTNで定義されたODU光トランスポートデータ・ユニット．ODU0のビットレートは1.25Gbit/s．

ス設計があり，今後，U-planeと共に設計を進めていく予定である．

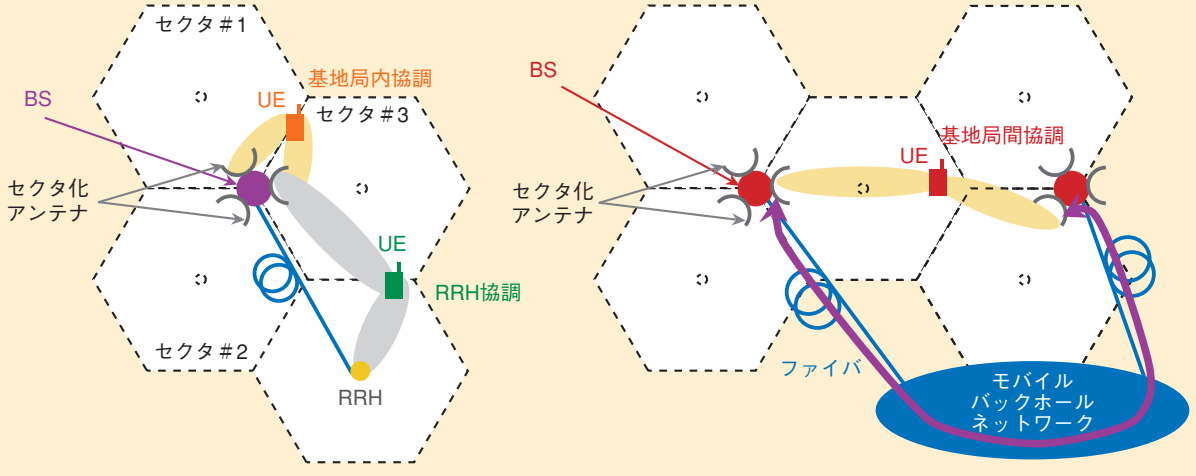
4.2 光による将来の無線アクセス技術のサポート

(1)モバイルバックホールネットワークの課題

LTE-Advancedおよび将来の無線アクセス技術において，CoMP送受信システムが，移動端末（UE）のスループットの向上を可能とする主要な技術の1つとして検討されている．CoMPでは複数の基地局（BS）が協調し多くのUEのうちの1つにサービスを提供するが，仮想的にBS側のアンテナ数を増加することで，チャネル干渉のより効率的な処理と，より高いMIMO（Multi-Input-Multiple-Output）[*32]多重化の利得を得られる[9]．1つの周波数を再利用するセルラネットワークにおいてこれらの技術は，特に隣接セルの干渉により性能が厳しく制約されるセル境界のUEのスループット向上に役立つ．ただし，CoMPを行うBS間では，チャネル状態情報（CSI：Channel State Information）などのセル情報やユーザデータを，バックホールネットワークを通じて共有するため，モバイルバックホールのトラフィックの大幅な増大を誘引する．したがってモバイルバックホールネットワークを経由する情報やデータ量は，用いられるCoMP技術の種類とCoMPに参加するBSの数に依存して変化する[10]．さらに，UEにデータ通信サービスを提供するために，モバイルバックホールネットワークにおいて，すべての情報交換が所定の時間的制約のうちに完了しなければならないという新たな遅延要件も課される．この遅延要件は，ユーザ移動性に依存するが，1～5msの範囲である．

3GPPではまず，**図4**（a）に示すようにモバイルバックホールネットワークの問題が比較的少ない，BS内協調とRRH（Remote Radio Head）[*33]協調を検討している．この場合は，CoMPにて発生する，すべての信号情報（CSI等）とユーザデータの交換を1つのBS内で容易に行えるため，モバイルバックホールネットワークにおける容量と遅延の問題を回避できる．

一方,ドコモ欧州研究所ではCoMPの適用シナリオを拡大するために，モバイルバックホールの課題に取り組んでいる．具体的には図4（b）に示すように，異なるBSに属するセクタの境界に位置するUEにも，モバイルバックホールネットワークを通じて情報やデータを共有することを可能とし，複数BS間におけるCoMPを実現することをめざしている．



（a）基地局内およびRRH協調　　（b）基地局間協調

図4　CoMP技術の概要

＊29 **ペイロード部**：通信データのうち，ヘッダなどを除いた本来通信したいデータ本体．
＊30 **U-Plane**：制御信号の伝送路であるC-Plane（＊31参照）に対して，ユーザデータの伝送路．
＊31 **C-Plane**：通信の確立や切断などをするための制御信号の伝送路．
＊32 **MIMO**：複数の送受信アンテナを用いて信号の空間多重を行い，通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術．
＊33 **RRH**：光ファイバなどを使って基地局から離れた場所に設置した基地局アンテナ装置．

BS間協調では，CoMPに参加するBSがモバイルバックホールネットワークを通じて大量にユーザデータや信号（CSI等）の交換を行うため，CoMPの性能はモバイルバックホールの能力（容量と遅延）に大きく依存することになる．よって，CoMPをサポートするにはモバイルバックホールの能力を強化する必要がある．

⑵WDM-PONでの物理X2リンクの実現手法

モバイルバックホールの能力を強化する最も効率の良い方法の1つが，効果的なBS間の物理接続構成（以下，物理X2[*34]リンク）を実現することである．ユーザが受信する信号強度と干渉のレベルに最も重大な影響を与えるのは隣接するBSからの干渉なので，CoMPにおけるユーザデータと信号の交換は，ほとんどの場合隣接するBS間で発生する．多くの場合，X2インタフェースは**図5**に示すとおり，ハードウェアのコストを最小化するためにBSはスイッチングノードに収容され，コアネットワークと接続するインタフェースと共有する構成で実現される．CoMPをサポートしないLTEシステムでは，3GPP仕様によりX2インタフェースの遅延は最大20ms，平均10msでなければならない[11]とされており，図5に示される従来のX2実装方法で問題はない．これは，LTEシステムではX2インタフェースのユースケースが限定的であり，例えばハンドオーバのための制御信号の交換やデータ転送などでは，CoMPに求められるような数msのわずかな遅延を要求していないためである．

この従来型のX2インタフェース実装で基地局間CoMPを行った場合，X2インタフェースの遅延と伝送容量がCoMPの遅延要件に合致せず，制約となることは明白である．このことから，モバイルバックホールアクセスネットワークの設計は物理X2リンクの構築，すなわちBS間で直接通信を行うリンクへと立ち戻らなければならない．さらに，将来のモバイルネットワークで用いられる，より小さなセルサイズは，より高頻度でハンドオーバを発生させる要因となり，X2インタフェースを用いて，より大量で高速な情報交換を行うことが要求される．これも将来のモバイルバックホールアクセスネットワークに物理X2リンクを構築していく主要な要求条件となっている．

現在，商用的に利用可能な物理X2リンクソリューションの1つに，マイクロ波による2地点間のリンクで2つのBSを結ぶ方式がある．容易に推測されるように，これはネットワーク内のすべての基地局を結ぶ，多数のマイクロ波2地点間リンク用ハードウェアとマイクロ波帯の周波数免許が新たに必要になり，BSの建造コストは大幅に増加する．さらに，マイクロ波帯の限定的な帯域幅では，LTE-Advanced以降のネットワークに必要とされる1Gbit/s以上を達成するのは難しい．代替のソリューションとしては，ミリ波などの高周波数が考えられるが，これはマイクロ波よりもはるかに高価である．2地点間ワイヤレスリンクにどのような無線技術を用いるとしても，外部環境の影響を受けやすいた

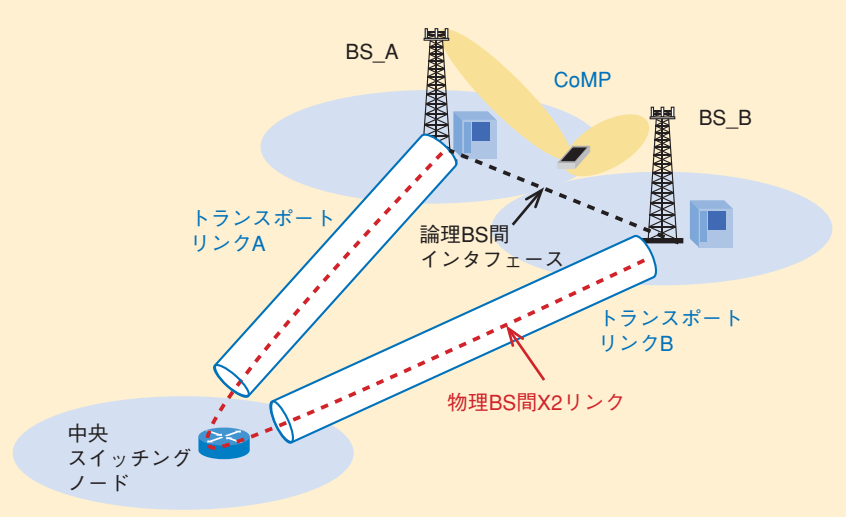


図5　モバイルバックホールアクセスネットワークの論理および物理X2インタフェース

＊34 **X2**：3GPPで定義されたeNodeB間のリファレンスポイント．

め光ファイバリンクほどのリンク品質は確保できないのが現状である．性能の観点からは光ファイバリンクにX2インタフェースをもたせることが望ましいが，コストを考慮するとX2リンク専用のファイバリンクを新たに配備するのは現実的でない．また，近年TDM-PONによるBS間物理リンクの実現も提案されている[12]．このアプローチでは，光カプラ*35を遠隔ノード（RN：Remote Node）*36に使用して光領域でX2インタフェースの信号を分配する．この場合，信号がRN内を直接バイパスし，中央スイッチング部（または光終端装置（OLT：Optical Line Terminal））を経由しないためX2インタフェースの遅延を低減することができる．しかしながら，このアプローチはあらかじめ定義されたBSグループ（隣接する4つまたは6つのBS）へのブロードキャスティングを行うため，BS間信号を必要としないBSに対しても信号を送信することになり，分配によるシグナルノイズ比（SNR：Signal-to-Noize Ratio）*37の損失とX2リンクのデータレートが制約を受ける．

ドコモ欧州研究所では，CoMPサポートの要件を満たす物理X2リンクを実現するため，WDMベースのモバイルバックホールアクセスネットワークの設計と最適化を検討した．**図6**に従来型のWDM-PONを，**図7**に物理X2リンクを用いたWDMベースのモバイルバックホールアクセスネットワークの提案を示す[13]．この設計で使用されるすべてのコンポーネントは従来型WDM-PONと互換性があり，ONU内のカラーレス光源*38として波長可変レーザーを利用する．主な提案は，

①X2信号伝送に，別の波長可変レーザー光源を用いること

②N×Nのアレイ導波路回折格子（AWG：Arrayed Waveguide Grating）*39にパッシブ光カプラを取り付け，光領域でのX2信号の再ルーティングを行うこと

の2点である．物理X2ポイント・ツー・ポイント通信については，送信元ONUが波長可変レーザーを用いて送信先ONUの割当て波長を生成し，X2信号を変調して同一光ファイバを介して送信する．AWGの上りリンク出力は合成されパッシブ光カプラを装備したメインの下りリンクポートに投入されるため，X2信号は光領域のまま波長に従って自動

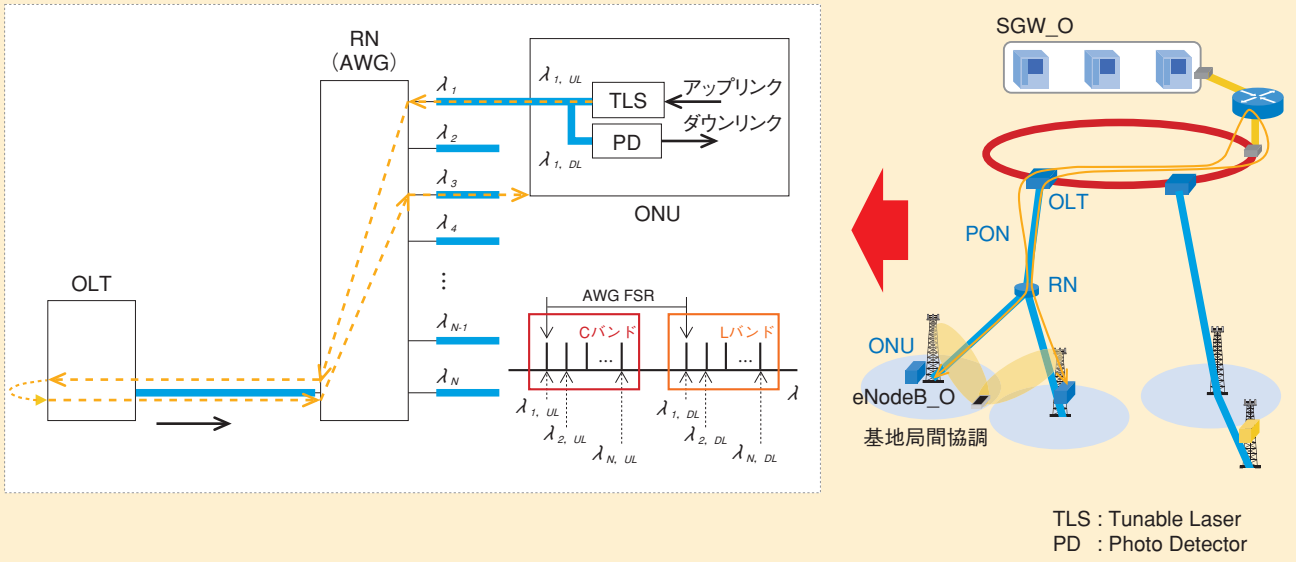


図6　従来型WDM-PON

＊35 **光カプラ**：複数のファイバの光信号を単一のファイバへ結合するパッシブ光学デバイス．

＊36 **遠隔ノード（RN）**：PONシステム内で光信号が物理的に分割されるノード．

＊37 **シグナルノイズ比（SNR）**：無線通信における雑音の電力に対する所望波の電力の比．

＊38 **カラーレス光源**：PONシステム内で使用するどの波長でも必要に応じて生成できる光源．

＊39 **アレイ導波路回折格子（AWG）**：平面光回路を用いて，複数波長の光を合分波するためのデバイス．

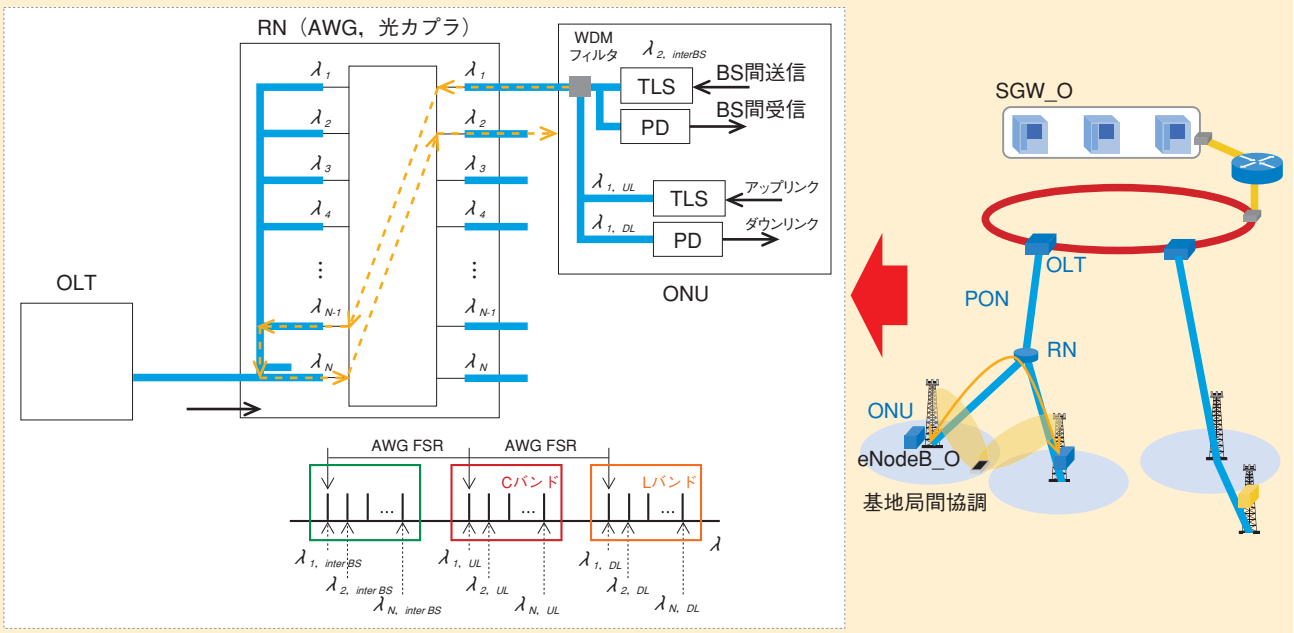


図7　物理X2リンクを用いたWDMベースのモバイルバックホールアクセスネットワークの提案

的に送信先ONUへと再ルーティングされる．このルーティングは光合成器とAWGなどのパッシブデバイスによって行われ，このためRN内にアクティブなコンポーネントを必要としない．また，IP処理を行わないことと，図7に示すとおり従来型のリンクよりもファイバ送信距離が短いため，X2インタフェースにおいて極めて少ない遅延を実現できる．さらに，ファイバ送信距離が短いことで，ファイバ送信の損失が抑えられ，高データレートの伝送が可能になる．この特長により，図6，7に示すとおり，X2インタフェース用に使用する波長帯はCバンド[*40]またはLバンド[*41]以外のバンドを適用することが可能となる．このバンドでは低ノイズ光増幅器を使用できないが，ファイバ内でX2リンクの伝送損失が低いため問題ない．これらの特長より，提案する物理X2リンクは大容量で遅延の少ない2地点間リンクを提供すると期待される．2地点間伝送については，設計に波長可変レーザーの代わりに高輝度発光ダイオード（SLED：Super-luminescent Light Emitting Diode）などの広帯域光源を用いれば，1つのPONに所属するすべてのONUへの光領域でのX2インタフェース信号のブロードキャスティングが実現可能である．広帯域光源は1つの帯域にすべての波長を含むため，図7の光スプリッタを装備したAWGを介して光X2信号がすべてのONUに分配される．通常，SLEDは波長可変レーザーよりも大幅に安価であり，2つの光送信器を同時に配置することは経済的に実現可能である．

5. あとがき

本稿では，将来の光モバイルネットワーク・アーキテクチャに関するビジョンを提示した．このソリューションを光モビリティ管理および強化された光アクセス技術に適用することで，NMNは低エネルギー消費のブロードバンドアクセスをユーザに提供できる．ドコモ欧州研究所は今後も引き続き，モバイルネットワークにおける光技術の進化に尽力する予定である．ドコモ欧州研究所では，提案した光モバイルネットワーク・アーキテクチャを2020年までに商用化することをめざして研究を進めている．

＊40 **Cバンド**：1,530～1,565nmの範囲の光スペクトル．
＊41 **Lバンド**：1,565～1,625nmの範囲の光スペクトル．

文　献

[1] M. Fahrmair, ほか：“次世代移動体通信ネットワーク（NMN）にて実現されるネットワーク付加価値サービス（NVAS）―サービスプロトタイプとイネーブラのユースケース―,” 本誌, Vol.19, No.4, pp.79-83, Jan. 2012.

[2] 3GPP TR36.913 V8.0.1：“Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-ADVANCED),” Mar. 2009.

[3] M. Yabusaki, H. Berndt and J. Widmer：“Next Mobile Network Based on Optical Switching,” OSA/IPR/PS 2010, Jul. 2010.

[4] H. Berndt, ほか：“「スマートイノベーションへの挑戦―HEART―」の実現に向けたネットワークの要求条件とアーキテクチャ,” 本誌, Vol.19, No.3, pp.30-36, Oct. 2011.

[5] M. Kakemizu and A. Chugo：“Approaches to Green Networks,” FUJITSU Sci. Tech. Journal., Vol.45, No.4, pp.398-403, Oct. 2009.

[6] T. Szigeti and C. Hattingh：“Quality of Service Design Overview,” Cisco Press, Dec. 2004. http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=357102

[7] D. Chiaroni, G.B. Santamaria, C. Simonneau, S. Etienne, J.C. Antona, S. Bigo and J. Simsarian：“Packet OADMs for the next generation of ring networks,” Bell Labs. Tech. Journal, Vol.14, No.4, pp.265-283, Feb. 2010.

[8] H. Takenouchi, R. Urata, T. Nakahara, T. Segawa, H. Ishikawa and R. Takahashi：“First Demonstration of a Prototype Hybrid Optoelectronic Router,” ECOC, 09. Vol.2009-Supplement, pp.1-2, Sep. 2009.

[9] M. Sawahashi, Y. Kishiyama, A. Morimoto, D. Nishkawa and M. Tanno：“Coordinated Multipoint Transmission/Reception Technoques for LTE-Advanced,” IEEE Wireless Comm., Vol.17 No.3, pp.26-34, Jun. 2010.

[10] C. Choi, L. Scalia, T. Biermann and S. Mizuta：“Coordinated Multipoint Multi-user MIMO Transmission Over Backhaul-Constrained Mobile Backhaul Access Networks,” IEEE PIMRC., Toronto, Sep. 2011.

[11] 3GPP RAN WG1 document：R1-071804.

[12] T. Pfeiffer：“Converted Heterogeneous Optical-Metro Access Networks,” ECOC 2010., Torino, Sep. 2010.

[13] C. Choi, Q. Wei, T. Biermann and L. Scalia：“Mobile WDM Backhaul Access Networks with Physical Inter-Base-Station Links for Coordinated Multipoint Transmission/Reception Systems,” IEEE GLOBECOM., Houston, Dec. 2011.