

次世代光アクセスネットワーク技術の動向調査

～トランスポート技術およびネットワーク制御技術～

報告書

平成 24 年 3 月

財団法人テレコム先端技術研究支援センター

まえがき

フォトリックネットワークは 21 世紀の通信インフラを支えるコア技術である。光パス・クロスコネクタから端緒を開いたフォトリックネットワークは、コアネットワークからアクセスネットワークのインフラストラクチャへと浸透してきている。

ユーザに広帯域なマルチメディアサービスや高速インターネットサービスを提供できる Fiber To The Home (FTTH) は、全世界に広く普及してきており、なかでも Passive Optical Network (PON) は経済的な実現手段として数多くの導入が図られている。今では広帯域サービスの普及による更なる帯域需要が増加すると見込まれ、IEEE および ITU-T では次世代の光アクセスネットワークの基盤となるであろう Next Generation PON (NG-PON) の標準化が検討されている。

一方、波長パスや OTN と組み合わせて今後進展が期待される次世代トランスポート技術方式として国際標準化が進行中の Multi-Protocol Label Switching Transport Profile (MPLS-TP) は、トランスポート技術を効率的なパケットベースにより実現することにより、従来の保守・運用・管理機能を大きく変えるものとして期待されている。これは、次世代の光ネットワークの制御技術として、固定的な帯域でデータ伝送している既存の光波長多重に対してフレキシブルな帯域をもったトランスポートであり、両者と組み合わせることによりネットワーク帯域の利用効率を飛躍的に向上させられることが期待されている。

また、パケットトランスポートが時間軸を使ってフレキシビリティを向上させるのに対し、波長グリッドを可変にして波長の帯域をフレキシブルに使う光エラスティック技術がある。本報告でも基本的なメカニズムやフレームワークについて報告する。

フォトリックネットワーク分野は、我が国の技術力が先行している分野であり、光ブロードバンドアクセス環境が整った“ブロードバンド先進国”としても世界最先端の一翼を担っている。今後も日本が本分野において主導的立場を維持して行くためには、先進的な研究開発を継続的に行っていくとともに、国際標準化活動にも積極的に取り組んで行くことが重要である。このような背景のもと、本調査報告書は次世代光アクセスネットワークにおけるトランスポート技術およびネットワーク制御技術に関する最新の動向を調査した結果をまとめたものである。

調査委員会名簿

(順不同 敬称略)

委員長	北山 研一	大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 教授
委員	佐藤 健一	名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 教授
委員	山中 直明	慶應義塾大学 理工学研究科 開放環境科学専攻 教授
委員	岡本 聡	慶應義塾大学 理工学研究科 特任准教授
委員	大木 英司	電気通信大学 情報理工学部 情報・通信工学科 准教授
委員	竹下 秀俊	慶應義塾大学 理工学研究科 グローバル COE リサーチアシスタント
委員	徳橋 和将	慶應義塾大学 理工学研究科 グローバル COE リサーチアシスタント
委員	佐藤 丈博	慶應義塾大学 理工学研究科 グローバル COE リサーチアシスタント
事務局	伊藤 秀俊	財団法人テレコム先端技術研究支援センター 研究企画部 部長
事務局	中村 升一	財団法人テレコム先端技術研究支援センター 研究企画部 調査役

目 次

第 1 章 次世代光アクセスネットワーク	1
1.1 次世代光アクセスネットワークの概要	1
1.2 NG-PON の技術動向	2
1.3 NG-PON の導入の狙い	11
1.4 既存設備からのマイグレーション	14
1.5 ハイブリッド光ワイヤレス技術	20
1.6 アクセス系の低消費電力化	27
1.7 IPTV 配信サービスの実現と課題	36
1.8 光アクセスネットワークの高信頼化	41
1.9 次世代光アクセスネットワークの研究例	49
第 2 章 キャリア向けメトロトランスポート技術 (MPLS-TP) の動向	71
2.1 はじめに	71
2.2 MPLS と MPLS-TP	71
2.3 通信キャリアにおける MPLS-TP の導入状況	80
2.4 MPLS-TP のキャリアサービスへの導入シナリオ	93
2.5 MPLS-TP に関する相互接続デモ	100
2.6 Optical Internetworking Forum における Dynamic MPLS-TP 相互接続の状況	104
2.7 まとめ	113
第 3 章 光ネットワークの制御技術の動向	117
3.1 はじめに	117
3.2 エラスティック光パスネットワークアーキテクチャ	117
3.3 SLICE を利用した信頼化およびネットワーク実験	122
3.4 SLICE のリソース割当技術	126
3.5 SLICE における経路とスペクトル割当方法	132
3.6 マルチキャリア光源を用いた光ネットワーク	137
3.7 光ネットワークにおけるインタードメインピアリングとプロビジョニング	146
3.8 マルチレイヤトラヒックエンジニアリング	151
3.9 まとめ	156
あとがき	165

第1章 次世代光アクセスネットワーク

1.1 次世代光アクセスネットワークの概要

Fiber To The Home (FTTH) は、ユーザに高速インターネットアクセスや IPTV などの広帯域マルチメディアサービスを提供する手段として全世界で普及が進みつつある。なかでも Passive Optical Network (PON) は、複数のユーザで Optical Line Terminal (OLT) および Optical Distribution Network (ODN) の共有が可能であること、および ODN にスイッチ等のアクティブデバイスを含まないことから、FTTH の経済的な実現手段として数多く導入されている。

PON 方式の歴史的変遷を図 1.1-1 に示す。PON 方式の標準化は主に IEEE および ITU-T により行われている [1][2]。現在実用化されている代表的な PON 方式には、IEEE 802.3ah で標準化された Gigabit Ethernet-PON (GE-PON) および ITU-T G.984 で標準化された Gigabit-PON (G-PON) の2種類が存在する。GE-PON は日本をはじめとするアジア諸国で採用されている方式で、Ethernet フレームを OLT-ONU 間で伝送するため、インターネット等の Ethernet 系サービスとの親和性が高いことが特徴である。一方、G-PON は主に欧米諸国で採用されている方式で、G-PON Transmission Convergence (GTC) フレームと呼ばれる 125 μ s 周期の固定長フレームを OLT-ONU 間で伝送する。GTC フレームの構造を図 1.1-2 に示す。GTC フレームは G-PON Encapsulation Method (GEM) 領域と Asynchronous Transfer Mode (ATM) 領域に分けられており、Ethernet フレームは GEM 領域内にカプセル化され、ATM セルは ATM 領域にそのまま格納され伝送される。この構造により、G-PON は様々なサービスをサポート可能である。

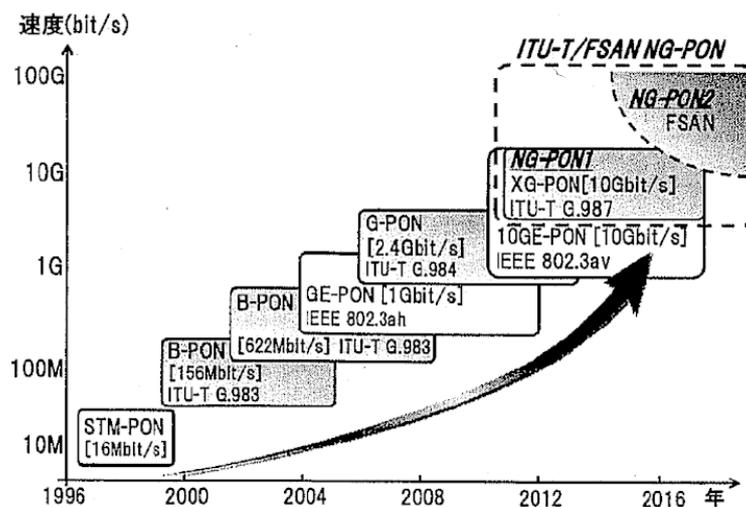


図 1.1-1 PON システムの変遷

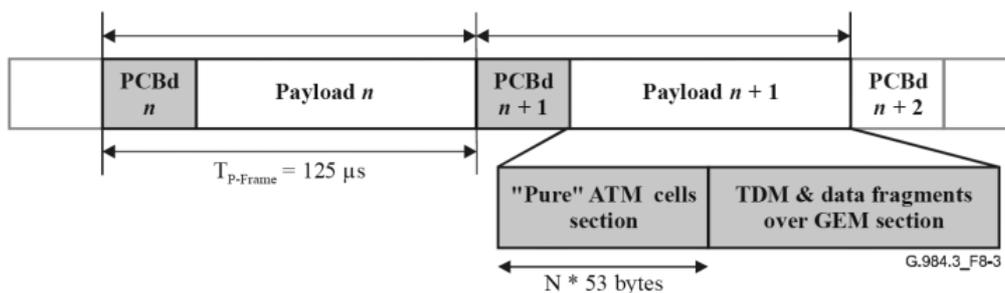


図 1.1-2 下り GTC フレーム構造

近年の広帯域サービス普及によるさらなる帯域需要増加に対応するため、IEEE および ITU-T はそれぞれ次世代 PON の標準化に取り組んでいる。IEEE では伝送速度が 10Gbps となる 10GE-PON の物理層・データリンク層を規定した IEEE 802.3av の標準化を 2009 年に完了している。現在は GE-PON/10GE-PON における異ベンダ間・異事業者間でのインターオペラビリティを可能にするため、IEEE P1904.1 Service Interoperability in EPON (SIEPON) において、上位レイヤの標準化が検討されている。一方、ITU-T は次世代 PON を、現在導入されている GE-PON、G-PON との共存を要求条件とした Next Generation-PON1 (NG-PON1)、及び共存を要求条件とせず新技术を利用した NG-PON2 の 2 段階に分けて技術検討を行っている。NG-PON1 は光スプリッタをベースとした既設の ODN (Optical Distribution Network) を用い、GE-PON や G-PON といった既存方式と 10Gbps 級の新方式の共存を目的とする。これにより、既存方式から新方式へのスムーズなマイグレーションを実現する。2010 年に ITU-T G.987 として標準化された XG-PON がこの NG-PON1 に相当する。一方、NG-PON2 では ODN の共用は必須条件ではなく、現在は目標とすべき要求仕様および各種候補技術の検討段階にあり、従来の Time Division Multiplex (TDM) のみならず、Wavelength Division Multiplex (WDM) や Code Division Multiplex (CDM)、Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) といった多重化方式、およびこれらの組み合わせの使用が検討されている。次節では、現在のトレンドである NG-PON の技術動向について報告する。

1. 2 NG-PON の技術動向

1. 2. 1 FSAN (Full Service Access Network) での標準化動向

2008 年 1 月に NG-PON (Next Generation PON) タスクグループが設立されて、NG-PON の標準化に向けた技術白書 (White Paper) が作成された。図 1.2-1 示すように、この技術白書では既に導入されている GE-PON、G-PON との共存を要求条件とした NG-PON1 と、共存を要求条件とせず新しい技術を用いる NG-PON2 とに分類されている。標準化の概略スケジュールとして、NG-PON1 は 2009 年～2012 年、NG-PON2 は 2013 年以降の標準化完了との目標が示されている。

NG-PON1 は 10GE-PON と同様に既存システムとの共存が要求条件となっており、下り／上りの速度によって XG-PON1 と XG-PON2 に分類される。XG-PON1 は下り 10Gbps、上り 2.5Gbps の非対称型、XG-PON2 は下り 10Gbps、下り 10Gbps の対称型である。

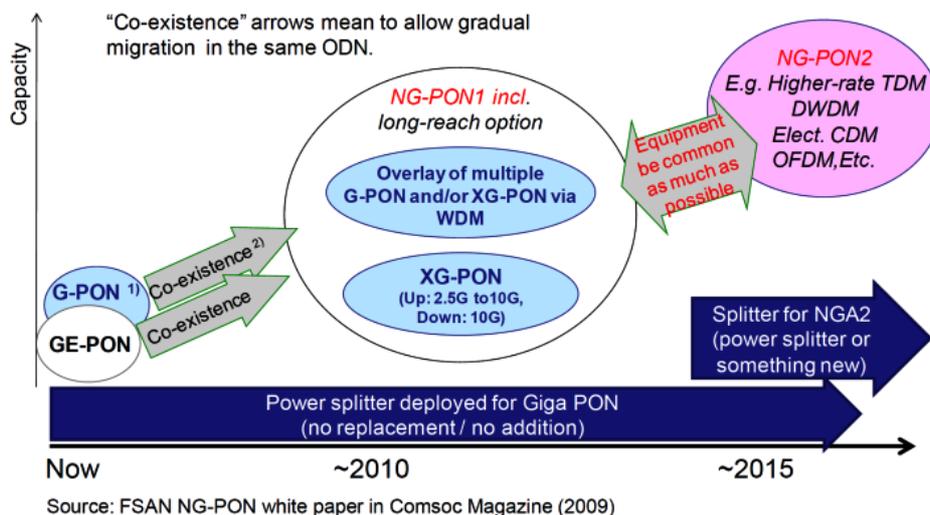


図 1.2-1 FSAN における NG-PON 検討シナリオ

NG-PON2 の要求条件としては、加入者収容光ファイバーラインの高延長化 (ロングリーチ化 : long reach)、OLT (Optical Line Terminal) の加入者収容数の拡大、加入者当たりの伝送容量の拡大が掲げられている。ラインの高延長化については 50km～100km、OLT の収容加入者数は 64 加入～1,000 加入、加入者当たりの伝送容量としては 500Mbps 以上を目標に掲げている。NG-PON2 の要求条件に応える候補として、以下の方式と以下の方式を組み合わせたハイブリッド方式が考えており、研究と実証実験が急速に進んでいる。

- (a) 高速 TDM-PON (High-rate Time Division Multiple access PON)
- (b) WDM-PON (Wavelength Division Multiple access PON)

(c) OFDM-PON (Optical Orthogonal Frequency Division Multiple access PON)

(d) OCDM-PON (Optical Code Division Multiple access PON)

(e) コヒーレント WDM-PON (Coherent WDM-PON)

以下、上記 NG-PON2 方式のメリット、デメリット、研究および実証実験状況について 2011 年 3 月 6 日～10 日 (米国) にて開催された OFC/NFOEC2011 (The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference 2011) における光アクセス関連技術を軸として調査した結果を報告する。

1. 2. 2 NG-PON2 候補方式の現状

光アクセスの下記 NG-PON2 候補方式、および下記方式を組み合わせたハイブリッド方式は、次世代 PON の国際標準仕様 (ITU-T/FSAN NG-PON2) に向け、これまでの中心であった高速 TDM-PON 技術 (10G-PON/EPON) に匹敵する勢いとなってきた [3]。特に近年急速に進展するデジタルコヒーレント技術を用いた OFDMA-PON システムの検討が加速してきている。

(1) 高速 TDM-PON (High-rate Time Division Multiple access PON)

10G-EPON に関する国際標準化が 2009 年 9 月に完了し、実用化が加速している。純粋な TDM-PON 方式のみで、加入者収容光ファイバーラインの延長要求及び加入者収容数の拡大要求に応じて、10 Gbps を超える高速化を実現することは、コスト効率の点では得策ではないため、他方式との組み合わせによる実現方式の検討が進んでいる。

(2) WDM-PON (Wavelength Division Multiple access PON)

WDM-PON の方式構成図を図 1.2-2 に示す。WDM-PON のメリットとしては、波長多重によるファバー削減、機器の削減、アップグレードの柔軟性、加入者当たりの十分な伝送帯域の提供、光ファイバーラインの延長、セキュリティと信頼性の確保、データとフォーマットの透過性が挙げられる。デメリットとしては、運用保守の複雑性、装置価格が高いこと、装置密度の低さが挙げられる。実現に向けた課題は、各 ONU のカラーレス化である。ONU のカラーレス化とは波長 (カラー) に依存しない ONU を意味する。WDM-PON ではその仕組みから、ユーザごとに波長の異なる ONU を用意しなければならない。しかしそれでは、設備導入時に波長設定に手間がかかり、保守運用性にも欠ける問題が発生する。そこで、これを回避するため、ONU の使用する波長を局側から設定できる機能が必要となる。

カラーレス光源の候補として、Widely tunable laser (DFB)、Injection-locked

Fabry-Perot Laser (FP-LD)、Wavelength-seeded reflective SOA (RSOA) 等が研究されている。WDM-PON の低コスト化に向けた ONU 側カラーレス送信光源として、広帯域 ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源と AWG (Arrayed Waveguide Grating) により、スペクトルスライス波長多重信号を生成する方式も提案され、FEC (Forward Error Collection) と AWG 帯域の最適化により、伝送速度 1.25Gbps、パワーバジェット 20dB を達成したことが報告されている [4]。カラーレス光源としてバタフライパッケージ型 RSOA を、負分散付加、受信電気段イコライザと組み合わせることで 25.78Gbps、20 km の高速直接変調に成功したシステムの実験結果も報告されている [5]。

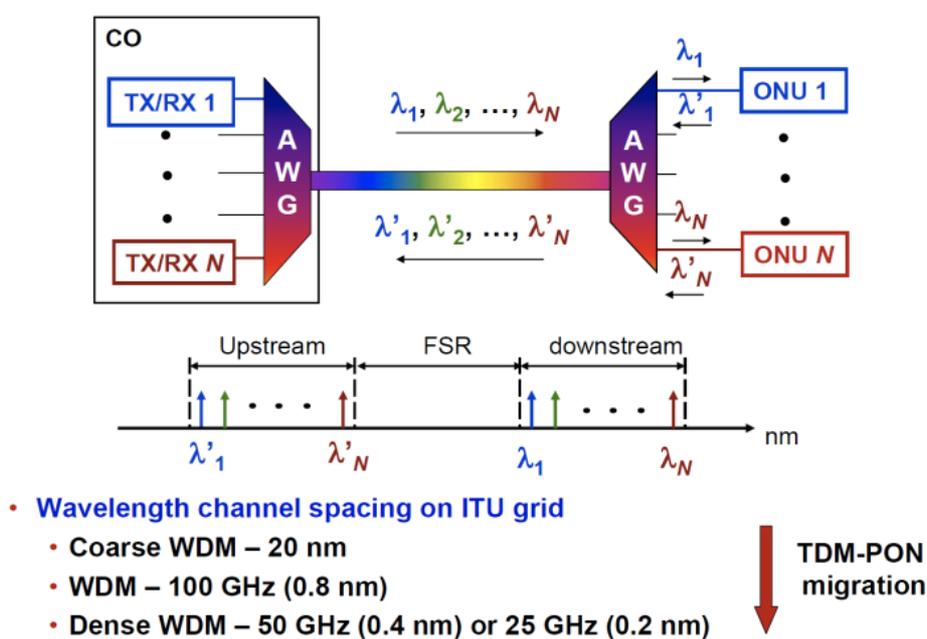


図 1.2-2 WDM-PON 方式構成図

(3) OFDM-PON (Optical Orthogonal Frequency Division Multiple access PON)

OFDM-PON は、無線分野で実用化されている OFDM 技術を光の分野に適用した方式であり、高速アナログデジタル変換 (ADC) / 高速デジタルアナログ変換 (DAC) 技術および高速 DSP (Digital Signal Processing) 技術と高速 DSP プロセッサの発達により、最近大きな注目を集めてきている。本方式は OFDM 信号の高い周波数利用効率の利点を活かして大容量化を狙ったものである。

OFDM-PON のメリットは、多くの狭帯域の直交するサブキャリアを用いており周波数効率の高い高速伝送ができること、線形拡散に対する高耐性をもつことからロングリーチ化が可能であること、サブキャリアを用いたダイナミックな帯域割り当てが可能で、直交するサブキャリアを用いることから変調フォーマットが柔軟性をもちベースバンド

(アナログ、デジタル) 信号のトランスペアレント伝送が可能であることが挙げられる。デメリットとしては、WDM-PON と同様に運用保守の複雑性、装置価格が高くなることである。図 1.2-3 に OFDM の生成例を示す。各サブキャリアは周波数 f_0 (図 1.2-3 に示す carrier 1) を基準としてその整数倍の連続した正弦波であり、周波数 $n \times f_0$ の正弦波はシンボル長 T 区間に n 周期分含まれること、つまり、これらの正弦波である各サブキャリアは直交している。従って、OFDM-PON は多くの狭帯域の直交するサブキャリアを用いた周波数効率の高い高速伝送を実現することができる [6]。

図 1.2-4 に OFDM-PON の接続構成例を示す。OFDM のサブキャリアは透過性のある伝送路のパイプを提供する。従って、T1/E1、イーサネット、モバイルバックホールの RF (Radio Frequency)、IPTV 等の透過伝送が可能であり、異なるタイムスロット内の異なるサービスに対しダイナミックな帯域割り当てができ、拡張性と柔軟性を持ったシステムを構成することができる。

加入者への帯域割り当て例を図 1.2-5 に示す。図 1.2-5 に示すように、 N 個のサブキャリアから構成される 1 つの OFDM 帯域内の異なるサブキャリアに対し、異なる加入者を割り当てることが可能である。

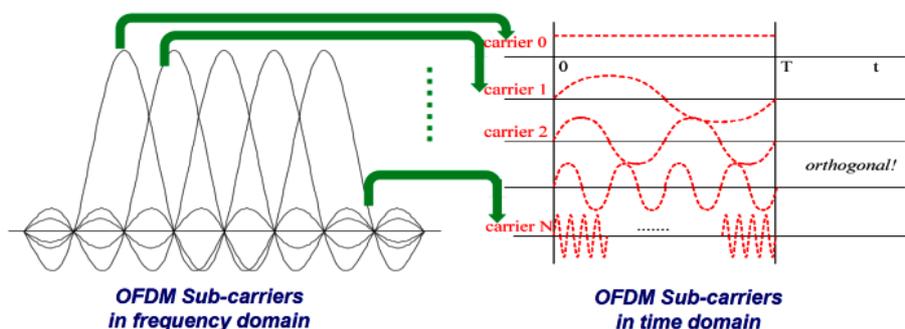


図 1.2-3 OFDM 信号の生成例

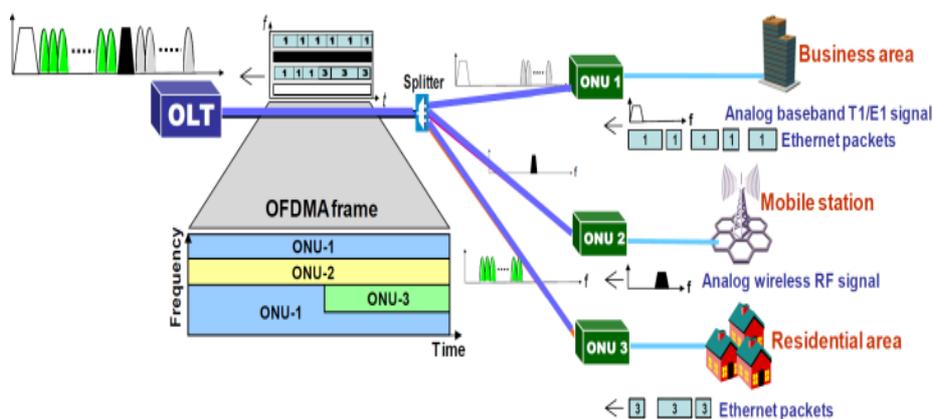


図 1.2-4 OFDM-PON の接続構成例

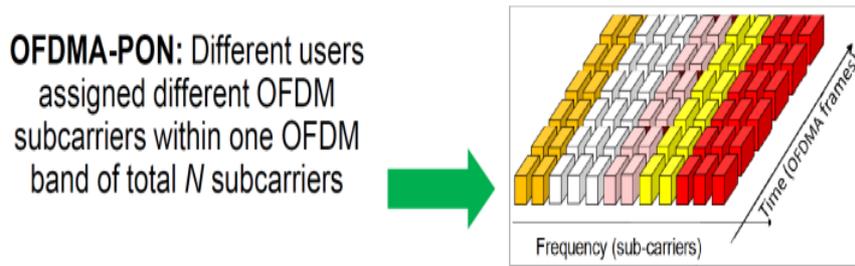


図 1.2-5 柔軟な帯域割り当て例

OFDMA-PON の高速伝送（目標：100Gbps） およびロングリーチ化（目標：100km）に向けた課題は、超高速 ADC (Analog Digital Converter) / DAC (Digital Analog Converter) の開発と超高性能な DSP プロセッサの開発である。リアルタイムの OFDM 送信器の実現には、高度な変調を補助する 2 チャンネル DAC と ADC、高性能 DSP プロセッサが必要である。DAC のサンプリングレートは OFDM 信号帯域幅の 1.5 倍以上が必要であり、ADC のサンプリングレートは OFDM 信号帯域幅の 2.5 倍以上が必要である。高性能 DSP プロセッサへの要求条件は、超高速並列処理の実現と設計の複雑さの低減であり、殆ど OFDM 機能に最適化された機能ブロックでの構成となる。

なお、現在、40Gbps（オーバーヘッドを含めると 44.8Gbps）、1 対 32 分岐、20km 伝送まで実験確認されたことが報告されている [7]。具体的には 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) マルチサブキャリア OFDM 信号を用いて、OLT からの下り OFDM 信号を複数の周波数サブバンドに分割し、各 ONU では所要の周波数バンド・サブキャリアのみ信号処理回路にて選択し受信する方式を採用している。

一方、送信レーザチャープの伝送後周波数特性を補償する手法として、OFDM 信号の各周波数サブキャリアにおける強度、多値変調の最適マッピングを行う適応変調方式 AMOOFDM (Adaptively Modulated Optical OFDM) により、直接変調レーザを用いた 12Gbps での 100km の長距離伝送の実験結果も報告されている [8]。なお、適応変調とは、伝送路の環境によってスループットを変更する方式であり、伝送路の環境が良い時は高スループットの変調を行い、環境が悪い時低スループットの変調を行うことである。他に OFDM 周波数サブバンド信号の多重化による 2.5G/10G の ONU 混在システム等も報告されている [9]。

(4) OCDM-PON (Optical Code Division Multiple access PON)

CDMA (Code Division Multiple Access) とは、信号に対し、チャンネルごとに異なる符

号をかけて符号化することで、同一波長帯、同一時間に複数の信号を送信し、受信側では送信側と同じ符号で復号化することで、各送信側の信号を取り出す方式であり、携帯電話の CDMA 方式を光伝送に応用したものと言える [10]。図 1.2-6 に OCDM の符号化・復号化のイメージを示す。

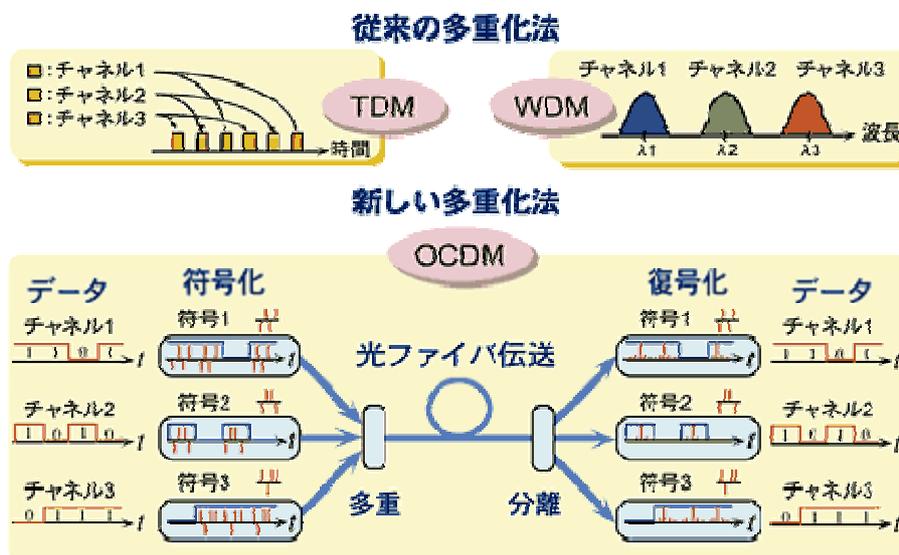


図 1.2-6 OCDM 符号化・復号化イメージ

図 1.2-7 に OCDM-PON システム構成例を示す。局舎側では、マルチポートの E/D (Encoder/Decoder) が多重化された波長上で、時間軸上に広がった多重化光コードを同時処理する。ONU 側では SSFBG (Single phase-shifted Super Structure Fiber Bragg Grating) が光コードワード (Optical code word) の分離と複合化を行う。加入者はユニークな光コードワードを専用に指定され、チップ (chips) と呼ばれる N 回周期のコードに分割される。各ビットはデータの流の増加に対応してユニークな光コードにより表現される。宛先の受信器で光 CDMA 信号を複合化するためには、正確な光コードワードが必要である。

OCDMA-PON のメリットは、簡易な光コードワード多重化により ONU 収容数の超多分岐化が可能なこと、ユニークな光コードワードに起因するデータの秘匿性とプライバシー、非同期伝送、低アクセスレイテンシー、ユニークコードごとの保証された伝送帯域であり、ギガビットクラスでの上り下り対称伝送の有力候補である。また、需要に応じて WDM-PON システムの上にオーバーレイ可能である。しかし、現在の OCDM-PON は複雑であり、新たな光デバイスと内部拡散補償が必要である。

現在、4 符号の OCDMA 信号を用いることで、既存の光アクセス網にて 10G-EPON システムの最大 4 多重化、または既存 G-EPON システムとの混在化を可能とし、ONU 収容数の超多分岐化 (64 分岐×4 システムで 256 分岐相当) の実験結果が報告されている [11]。

更に OCDM-PON のフィールドトライアルについては、伝送距離 100km 以上、全二重化 8 加入、10Gbps のデモが実施されている [12]。

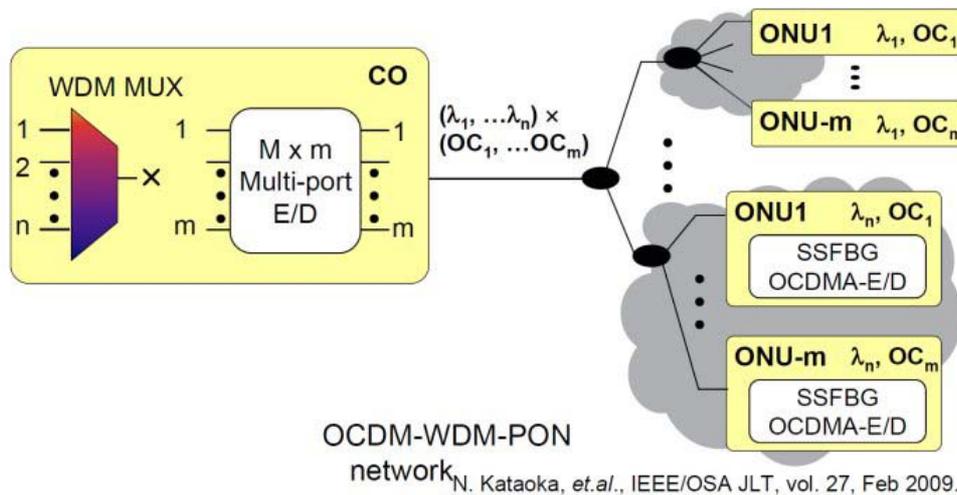


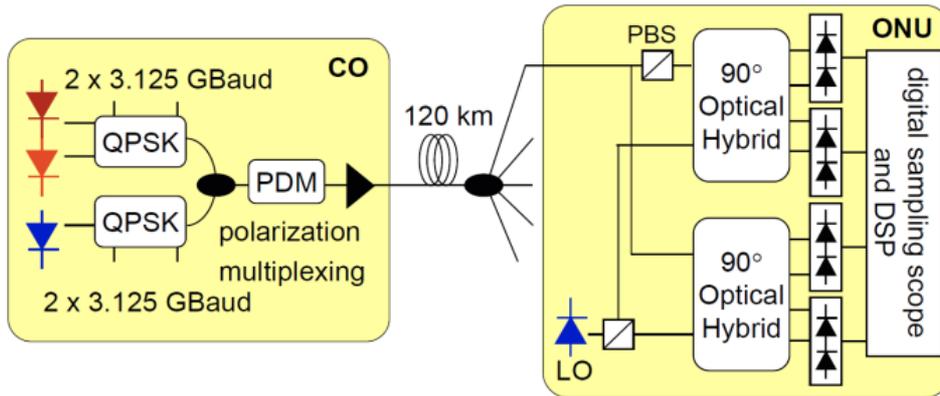
図 1.2-7 OCDM-PONシステム構成例

(5) コヒーレント WDM-PON (Coherent WDM-PON)

コヒーレント WDM-PON は、DSP 技術の進展によりその実用可能性が大幅に向上し、従来から期待されてきた高受信感度特性、狭波長選択特性といった利点を利用したシステムが提案されてきている。図 1.2-8 にコヒーレント WDM-PON の構成例を示す。

コヒーレント WDM-PON のメリットは、LO (Local Oscillator) のチューニングによる周波数選択性、受信感度の改善、加入者分岐数増大とロングリーチ化、高波長密度である。ロングリーチ化については、線形拡散に対する高耐性をもつことから光増幅器またはリピータの介在なしに、実現することができる。コヒーレント WDM-PON の主なデメリットは、高価な DSP プロセッサを使ったデジタルコヒーレント受信器の価格が高いことである。

なお、コヒーレント WDM-PON のフィールドトライアルは、68km コヒーレントリンクを使って 2.5Gbps の伝送スピードで実施されている [13]。また、狭波長選択性を利用した波長間隔 2.8GHz の UDWDM-PON (Ultra Dense WDM-PON) システムについて報告がされている [14]。このシステムでは、311Mbps DBPSK (Differential Binary PSK) 変調信号を 2.8GHz 間隔で 64 波長並べ、最小受光感度-53dBm、パワーバジェット 50dB をリアルタイムシステムにより実現し、各 ONU ユーザ辺りの伝送容量を現実的な~1Gbps 程度とし、1,000 分岐収容をシステムターゲットとしている。



3 channel DWDM-PDM-QPSK at 3.125 GBaud over 120km

D. Lavery, *et al.*, *Optics Express*, vol. 18, Dec 2010.

図 1.2-8 コヒーレント WDM-PON システム構成例

1. 3 NG-PON の導入の狙い

1. 3. 1 アクセス系の集約による消費電力・コスト削減

NG-PON2 の導入の狙いの一つにアクセス系の集約による消費電力・コスト削減がある。ここでは LongReach-PON などによるアクセス系の集約の効果について説明する [15]。図 1.3-1 左図は、集約ネットワークを概念的に描いた図であり、右図は Access site 数によるコストの変化を示している。図 1.3-1 において Customer 数は一定である。Access site は CO (Central Office) 等を想定している。PoP (Point of Presence) はユーザが最初に ISP に接続するアクセスポイント、Aggregation network は現在複雑化しているメトロアクセスおよびメトロエリアネットワークをシンプルに Aggregation links で集約することを想定したネットワークである。また First mile はスプリッタを用いる PON 等を想定しており、図 1.3-1 において Customer 数は一定であるため、集約度に関係なくコストは一定である。右図において Access site が少ない場合はすべての Customer を少数の Access site で集約することを意味するため集約度が高く、Site costs および Aggregation link cost は最も少ない。しかしながら、その場合、アクセスサイトから First mile まで伸びる link は必然的に長くなるためそのコストは極端に上昇する。従って、図 1.3-1 は、トータルコストが最も小さくなるように集約度を決定することが重要であることを示している。

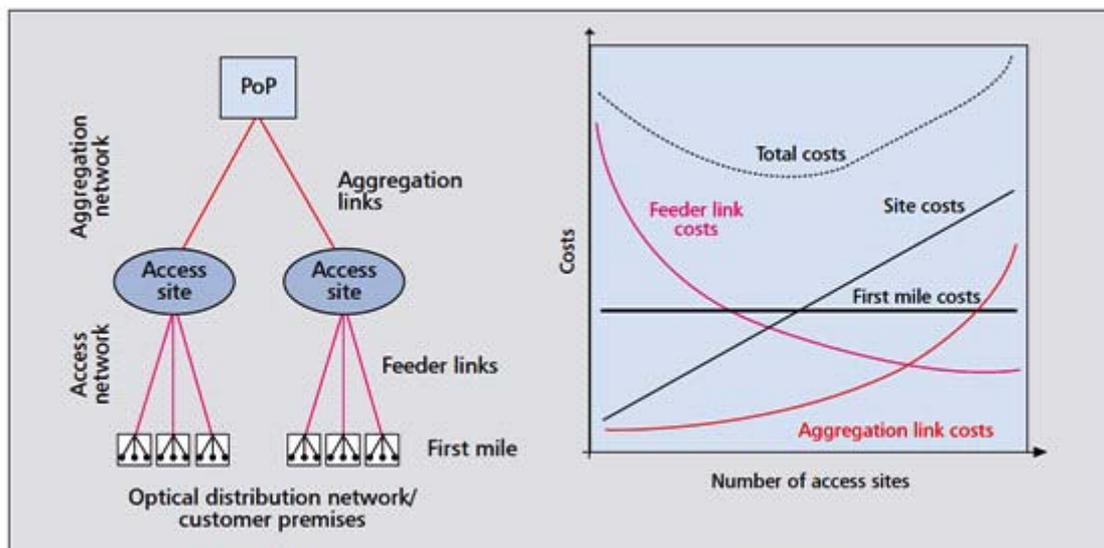


図 1.3-1 集約ネットワークの主な構成要素およびアクセスサイト数によるコスト

一方で消費電力の観点から考えると、Access site をできる限り集約することが望ましい。テレコムネットワークの消費電力調査によると、現在のアクセスネットワークの消費電力は、ネットワーク全体の 70% に及ぶ [16]。また、各ネットワーク機器の消費電力は許容可

能な伝送速度と共に増加するため、メトロエリアネットワークに多数存在するネットワーク機器は消費電力が大きく、ブロードバンドの伝送速度増加と共に今後更に増加する。故に、地球環境保全のため、ネットワークの消費電力問題の解決が急務である。

1. 3. 2 他のネットワークシステムとの連携によるネットワークサービスの向上

消費電力・コストの削減の他に、NG-PON 導入の狙いとして、他のネットワークシステムとの連携によるネットワークサービスの向上がある。

代表的なものとして、アクセス光ネットワークに無線通信技術を組み合わせたハイブリッド光ワイヤレス技術がある。この技術は、光技術を使用することによる広帯域化に加え、ワイヤレス技術を用いて有線ネットワークが利用不可能である地域への接続、移動体通信としてのメリットの両立を可能とする。

また、映像配信サービスとアクセス光ネットワークの連携に関する研究開発も行われている。アクセス系の発達により、光ファイバ経由で TV 放送を配信する IPTV サービスが開始されている。現在は、ダウンロード型サービスやオンデマンド型サービスが主流であるが、今後 IPTV サービスで地上波と同様に TV コンテンツを放送する放送型サービスが普及すると考えられており、放送型サービスを実現するためには、全視聴者に同一品質を提供するためのアクセス系の広帯域化、帯域制御、マルチキャスト配信技術が必要となる。このような次世代のネットワークアプリケーションが要求するサービス品質を提供できるアクセス系を提供するために NG-PON を導入する必要がある。

1. 3. 3 アクセス系の高信頼化

従来、光アクセスネットワークではコアネットワークやメトロエリアネットワークと比較して高信頼化に関する検討は少なかった。その理由は、光アクセスネットワークを介して提供されるサービスがベストエフォートのインターネット接続にほぼ限られていたことから、高信頼化よりもネットワークの冗長性を抑え低コストを実現することが優先されたためである。しかし、近年では光アクセスネットワークの発達・普及により、IPTV や VoIP といったリアルタイム性サービス、あるいはインターネットバンキングやオンライントレードなどといった接続断の許されないサービスが、光アクセスネットワークを介して提供されるようになってきている。このようなネットワークサービスの発展に対して、障害復旧技術は重要なファクターとなっており、高信頼化は NG-PON 導入の大きな目的となる。

1. 3. 4 現状の研究開発課題

上記、1.3.1～1.3.3 節を踏まえて、NG-PON へ向けた研究開発課題を図 1.3-2 に示す。

- (a) 既存設備からのマイグレーション技術
- (b) ハイブリッド光ワイヤレス技術
- (c) 低消費電力化技術
- (d) IPTV 配信サービス技術
- (e) 高信頼化技術

であり、1.4 節以降各課題について概説する。

既存設備からのマイグレーション技術として、1G ONU と 10G ONU の混在収容時の公平な帯域割当技術があるが、この研究は異なるサービスが同一のアクセス系に同時収容される際の制御技術の研究という側面を持つ。ハイブリッド光ワイヤレス技術や IPTV 配信サービス技術は、PON 以外のサービスをアクセス系で収容するための技術と捉えることができる。また、IPTV 配信サービスといった次世代のネットワークサービスが要求する帯域制御技術などを研究することは今後多様化が進むネットワークサービスのサービス品質 (QoS:Quality of Service) を満たすための技術開発へとつながる可能性を持つ。したがって、これら 3 つの課題の発展形として、アクセス系で様々なサービスを収容し、各サービスの要求する QoS を提供するマルチサービス・マルチ QoS 集約技術が考えられる。この集約技術と低消費電力化、高信頼化が結びついたものが次世代アクセス光ネットワークの一候補となりうる。1.9 節では、集約型次世代光アクセスネットワークの研究例を説明する。

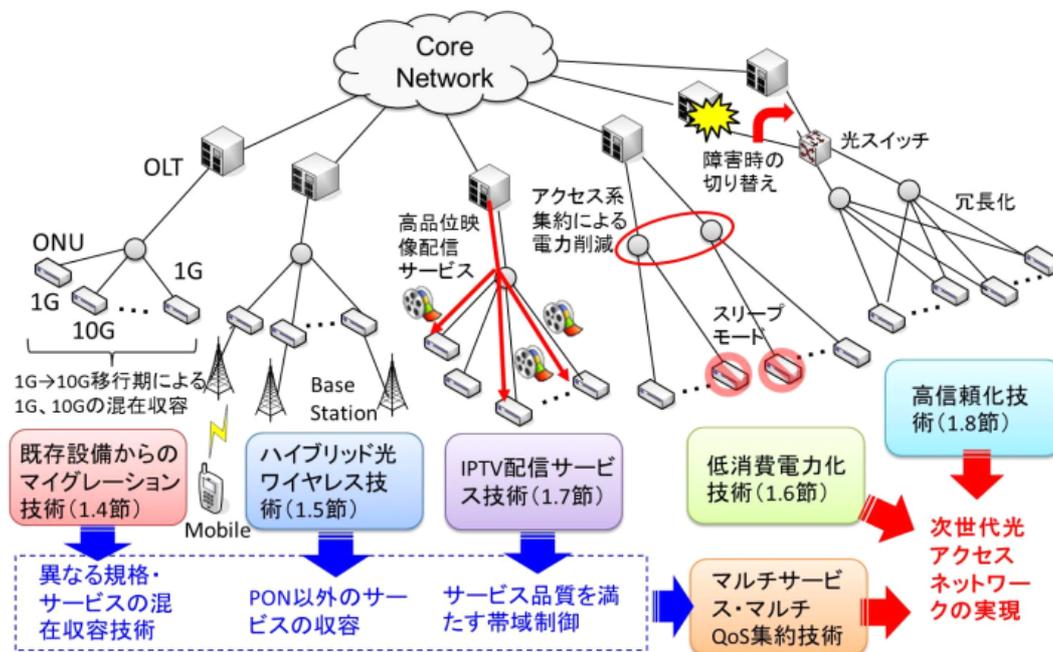


図 1.3-2 NG-PON に向けた研究開発課題

1. 4 既存設備からのマイグレーション技術

10Gbps 級 PON の標準化が進められたことを受け、10G アクセスの今後の普及が見込まれるが、長期的な視点から GE-PON から 10GE-PON へのマイグレーションを考えた場合、その移行期における課題の明確化とそれをクリアする手法が必要となる。

1. 4. 1 GE-PON/10GE-PON 混在下における検討

EPON システムでは、加入者宅の ONU から OLT との間の通信において TDMA を採用している [17]。しかし、OLT がそれぞれ異なる通信速度を持つ ONU からの上り信号を収容する場合、OLT は GE-PON/10G-EPON 間で上りトラヒックの動的帯域割当 (DBA : Dynamic Bandwidth Allocation) 制御を行う必要があり、既存の GE-PON ONU の数が多いと、GE-PON ONU に対し多くの時間を割り当てなければならず、広帯域化した 10G-EPON の恩恵を受けにくくなってしまう問題がある。

以下に、GE-PON/10G-EPON 混在環境下における課題の解決方法について述べる。

(1) 速度別レイヤ構造方式

まず、OLT は異なる通信速度を持つ ONU を直接収容せず、一旦 GE-PON ONU からの上り 1Gbps トラヒックをバッファリングし、OLT へは上り 10Gbps で出力する光集約通信装置 (Optical Concentration Unit:OCU) を採用する。図 1.4-1 に示すように、OCU を ONU と OLT の間に取り入れることで、OLT に対して OCU があたかも 10G-EPON ONU であるかのように見せ (図 1.4-2 の階層 A)、下位層 (図 1.4-2 の階層 B) からの上り 1Gbps 波長を中継し上り 10Gbps 波長に寄せ変えて OLT へ送信する。

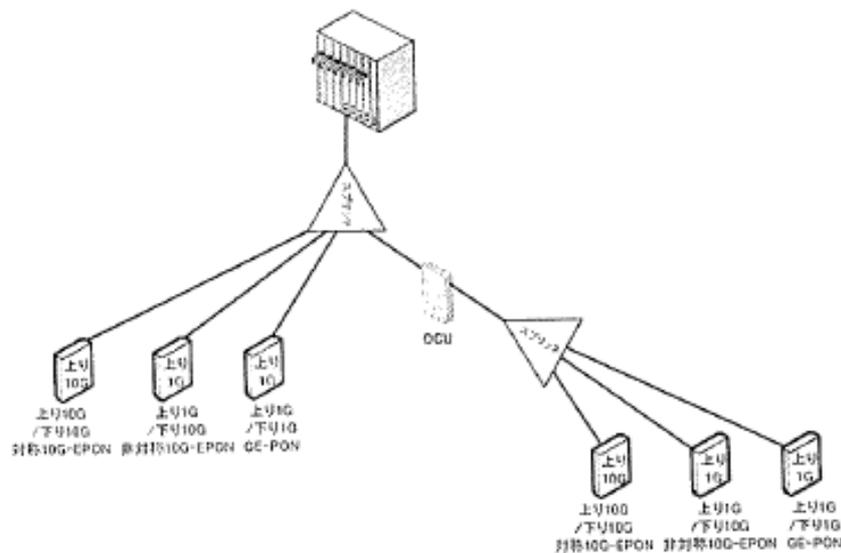


図 1.4-1 光集約通信装置の設置

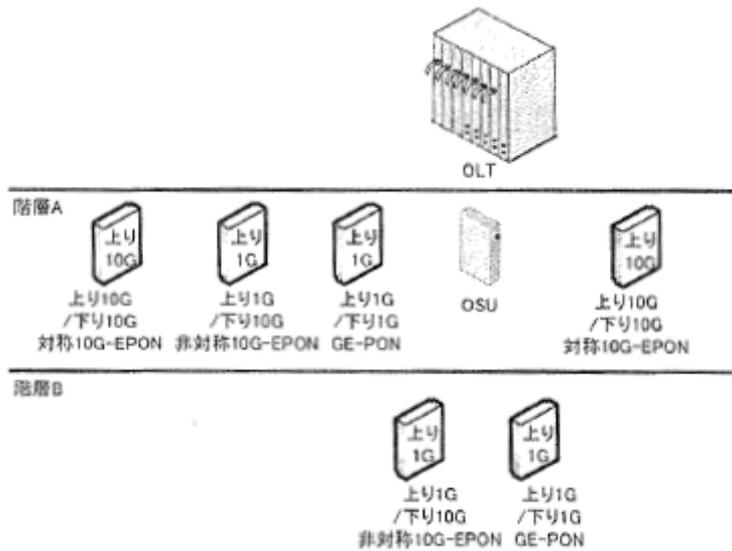


図 1.4-2 仮想的なレイヤ構成

また、OCUはOLTから見てONUのように振る舞うため、OCUが上り通信を行っていない時間帯は、OCU配下の上り通信と上位層とは独立に通信可能である。すなわち階層Aと階層Bは同じ時間帯で上り通信が可能となる。

(2) 装置構成

図 1.4-3 に OCU 装置構成を示す。OLT からの下り信号は OCU 配下にある ONU からの上り信号受信時の選択切替のためにスプリッタにて分岐し、一方は下り 10G 受信部にてゲートフレームをスヌープし、一方はそのまま ONU 側へ送信する。ONU からの上り信号は、スヌープしたゲートフレーム解析により上り 10Gbps の送信時間帯ではそのまま OLT 側へ透過するが、上り 1Gbps の送信時間帯では上り 1G 受信回路側で一旦バッファリングされ、OCU に対するグラント割り当て時間帯に、上り 10G 送信部より OLT へバースト送信される。

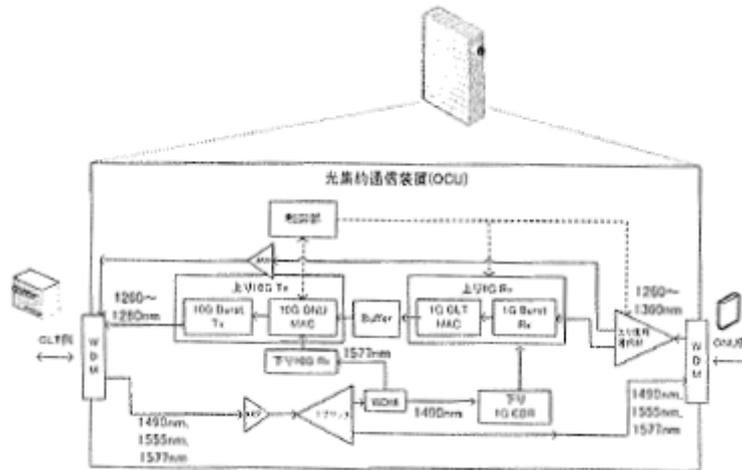


図 1.4-3 光集約通信装置の構成図

(3) 光集約 PON システムによる効果

従来のネットワークにおいては、図 1.4-4 の上図に示すように、上りの通信速度が遅い ONU に多くの時間を割り当てるため、システム全体で総帯域が小さくなるが、一旦 OCU に集約することにより (図 1.4-4 の下図)、総帯域を増加させる効果を期待できる。

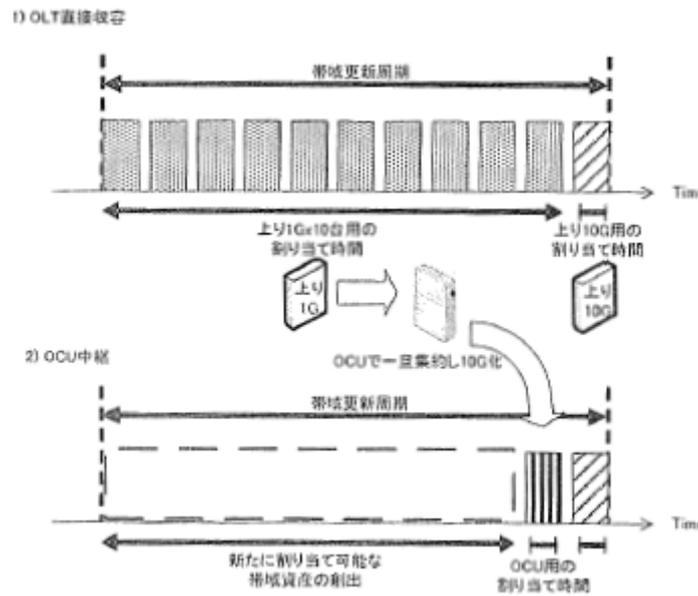


図 1.4-4 光集約装置導入の効果例

1. 4. 2 1G ONU、10G ONU 混在収容時の公平性を実現する適応型 DBA アルゴリズム

GE-PON から 10G-EPON への移行段階において、10G-EPON が 1G ONU と 10G ONU

とを混在収容する場合の、上り帯域割当の公平性を実現する適応型動的帯域割当 (DBA : Dyanamic Bandwidth Allocation) アルゴリズムが提案されている [18]。

提案アルゴリズムでは、輻輳の有無に応じて、以下の 2 種類の方式を動的に使い分けることで有効な帯域利用を図る。

(a) Status Reporting 方式 (SR-DBA)

ONU が必要な帯域を OLT に通知することで、ONU のトラヒック状態を把握

(b) Traffic Monitoring 方式 (TM-DBA)

OLT が ONU の送信するデータ量をモニタし、ONU のトラヒック状態を把握

上りのデータ量の合計が多く、輻輳状態であれば SR-DBA を、一方、上りのデータ量の合計が少なく非輻輳状態であれば TM-DBA を用いる。

1G ONU と 10G ONU の上り帯域割当の公平性を実現するため、Forward Error Correction (FEC) パケットの有無及び上り伝送レートの差を考慮して、帯域要求量及び Service Level Agreement (SLA) の重み付けを行う。

最初に、帯域要求量の重み付けについて説明する。10G-EPON においては誤り訂正が必須であり、RS (255, 223) によるストリーミング FEC が規定されている。これは、MAC 層では、216 Byte ごとに 32 Byte のパリティを付加することになる。248 Byte の FEC codeword を形成するため、FEC 適用後のフレーム長は階段状に増加する。一方、GE-PON の場合は FEC がオプションであり、一般的には FEC パリティによる帯域ロス为了避免のため、未使用で運用されている。

従って、10G ONU の PON 区間の実データ量は、1G ONU の実データ量に比べて FEC パリティ劣化するため、10G ONU に対して 1G ONU と同じ SLA で同等の送信データ量を提供するためには、FEC パリティ分加算する必要がある。そこで、帯域更新周期# j にて 10G ONU# i から通知された帯域要求量 R_{req} を式 (1)、(2) により FEC パリティ増加分を考慮し、実際にデータ送信に必要な帯域要求量 T_{req} に換算する。

$$T_{req}[i][j] = R_{req}[i][j] \times FW \quad (1)$$

$$FW = \begin{cases} FEC_CW / FEC_PL & (\text{ONU}\#i \in 10\text{G ONU}) \\ 1 & (\text{ONU}\#i \in 1\text{G ONU}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 FW 、 FEC_CW 、 FEC_PL は FEC を考慮する際の重み、FEC の 1 codeword 長 248 Byte、FEC ペイロード長 216 Byte である。

次に、SLA の重み付けについて説明する。1G ONU と 10G ONU の上り伝送レートは 10 倍の差がある。従って、10Gbps の上り帯域を割り当てる場合、上り 1Gbps の ONU は 10

分の1の実行伝送ビットしか割り当てられず不公平が生じる。そこで、上り 1Gbps の ONU の SLA に対して 10 倍の重みを付加する。ONU# i に対して重み付けした最大帯域 T_{maxbw} 、最低保証帯域 T_{minbw} とすると以下の式(3)で算出する。

$$\begin{cases} T_{maxbw}[i] = R_{maxbw}[i] \times FW \times RW[i] \\ T_{minbw}[i] = R_{minbw}[i] \times FW \times RW[i] \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 R_{maxbw} 、 R_{minbw} は ONU# i に設定した最大帯域、最低保証帯域である。また、RW は ONU # i の伝送レートによる重みを表す。

$$RW = \begin{cases} 1 & (\text{ONU}\#i \in 10\text{G ONU}) \\ 10 & (\text{ONU}\#i \in 1\text{G ONU}) \end{cases} \quad (4)$$

このように SLA に FEC パリティと伝送レートを考慮することで、1G ONU と 10G ONU への公平な帯域割り当てを実現する。DBA のフローチャートは図 1.4-5 のようになる。

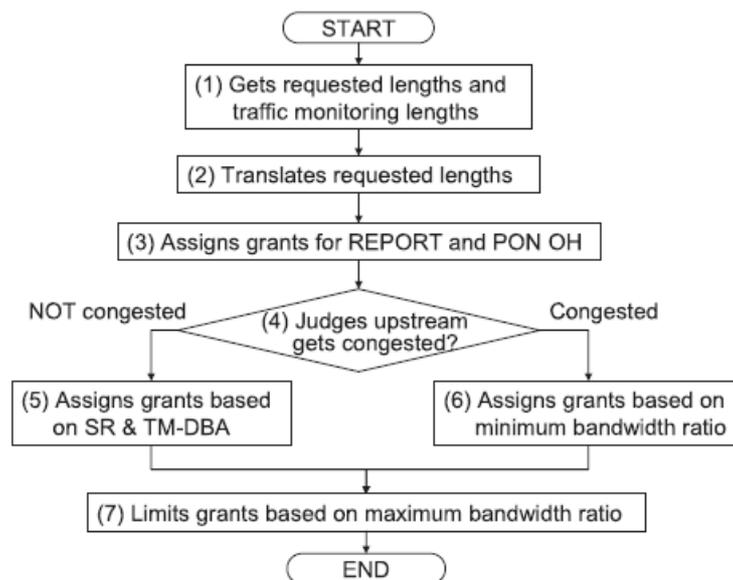


図 1.4-5 DBA アルゴリズムのフローチャート

図 1.4-6 に 10G-EPON 試作システムによる帯域利用効率の測定結果を示す。

図 1.4-6 (a) の FEC パリティによる重み付けを行わない DBA (NoFEC-DBA) の場合では、1G ONU の入力レートが 50%を超えると 1G ONU の帯域利用効率が 10G ONU の帯域利用効率を 5%程度上回ることがわかる。これは 10G ONU が FEC パリティによって帯域を浪費するためである。従って、ラインレートの異なる ONU に対して、公平に帯域を割り当てていないことがわかる。一方、図 1.4-6 (b) に示すように、提案アルゴリズムである適応型 DBA (ADP: Adaptive-DBA) では最低保証帯域に FEC パリティ分を考慮して

いるため、1G ONU と 10G ONU はともに帯域利用効率が 45% になり、公平に帯域を割り当てていることがわかる。

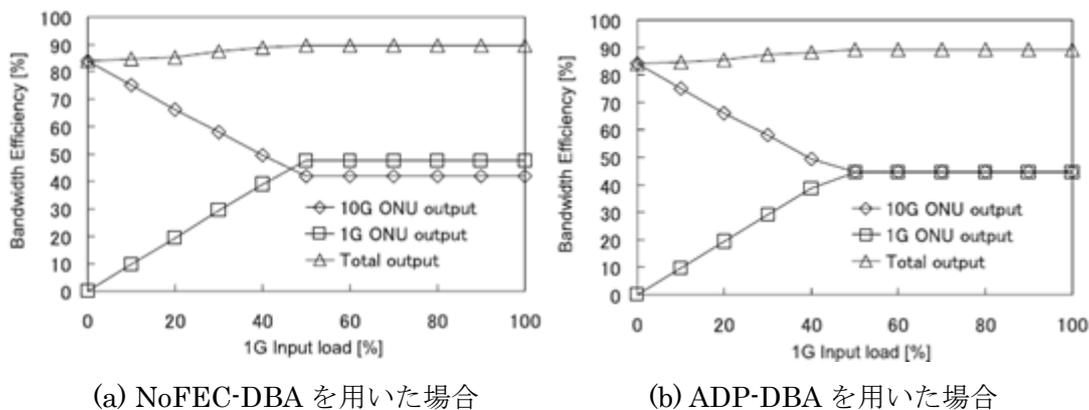


図 1.4-6 帯域利用効率

図 1.4-7 に出力ビットレートの測定結果を示す。図 1.4-7 (a) は各 ONU に同じ最低保証帯域を設定した場合の結果である。NoFEC-DBA では 10G ONU と 1G ONU の帯域割当量に 112Mbps の帯域割当差が生じているのに対し、提案アルゴリズムでは 10G ONU、1G ONU の出力はともに 860Mbps であり、各 ONU に対して公平に帯域を割り当てているのがわかる。図 1.4-7 (b) は各 ONU に同じ最大保証帯域を設定した場合の結果を示しており、図 1.4-7 (a) と同様に、NoFEC-DBA では 65Mbps 生じた不公平さを、提案アルゴリズムでは 10G ONU:481Mbps、ONU:482Mbps とほぼ公平にしていることを示している。

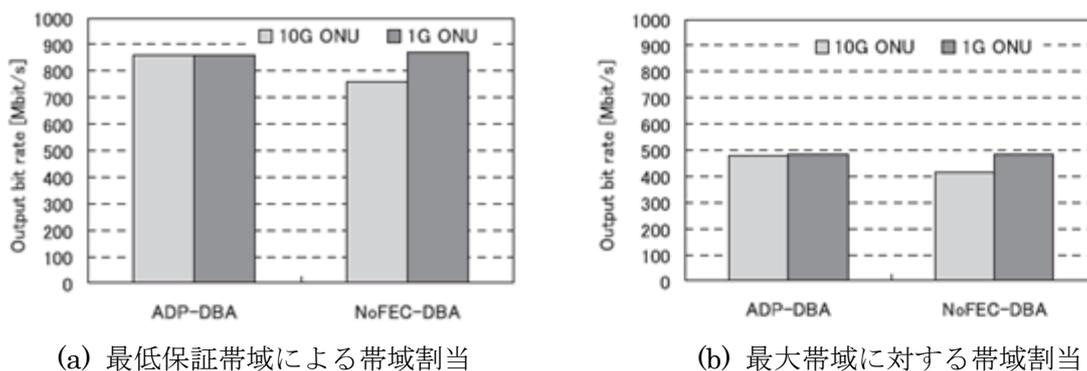


図 1.4-7 出力ビットレート

1. 5 ハイブリッド光ワイヤレス技術

近年、有線の光ネットワークに無線通信技術を組み合わせるハイブリッド光ワイヤレス技術の研究が進んでいる。本技術は、光技術を使用することによる広帯域化に加え、ワイヤレス技術を用いて有線ネットワークが利用困難な地域への接続や移動体通信としてのメリットの両立が可能となる。本節では、ハイブリッド光ワイヤレスに関する研究例を 2 例報告する。

1. 5. 1 WiMAX-EPON

光技術とワイヤレス技術との融合ネットワークを実現するためには、WiMAX-EPON 間の接続方法や DBA 手法が研究課題として残されている。そこで、WiMAX および EPON の融合ネットワークを WEN (WiMAX-EPON Network) と定義し、WiMAX-EPON 間の接続方法および DBA アルゴリズムが提案されている [19]。図 1.5-1 に WEN のネットワークモデルを示す。WEN では EPON の ONU と WiMAX の BS を接続することにより、2 つのネットワークを接続する。ONU および BS は以下の類似点より接続可能となる。

- (a) 帯域容量：EPON では、1Gbps の帯域を 16 個の ONU で共有するため、各 ONU は平均 $1\text{Gbps}/16 = 62.5\text{Mbps}$ の帯域を保持する。また、WiMAX の BS は、70Mbps の帯域を保持し、ONU の帯域容量と類似する。
- (b) インタフェース：BS および ONU は共にイーサネットインタフェースを保持。
- (c) 帯域割当：WiMAX および EPON は、共にポイントツーマルチポイント通信を行い、アップリンクにおける TDMA (Time Division Multiplexing) を用いた帯域要求・割当の手法が類似する。

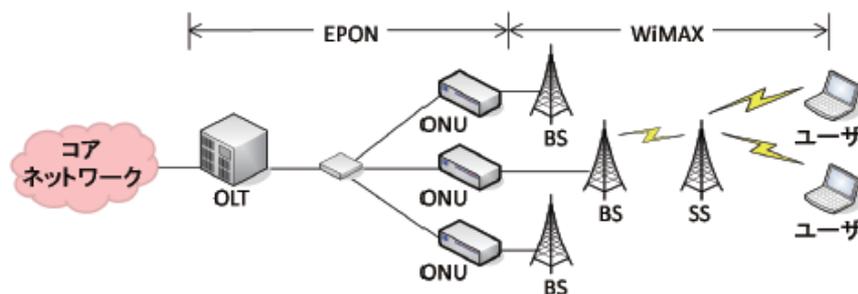


図 1.5-1 WEN のネットワークモデル

WEN では、WiMAX-EPON 間の接続に ONU および BS の接続を仮想化した VOB (Virtual ONU-BS) を利用する。図 1.5-2 (a) に VOB のハードウェア配置を、図 1.5-2 (b) に VOB の内部構造を示す。

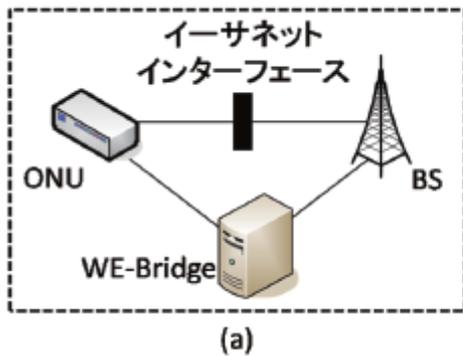


図 1.5-2 (a) VOB のハードウェア配置

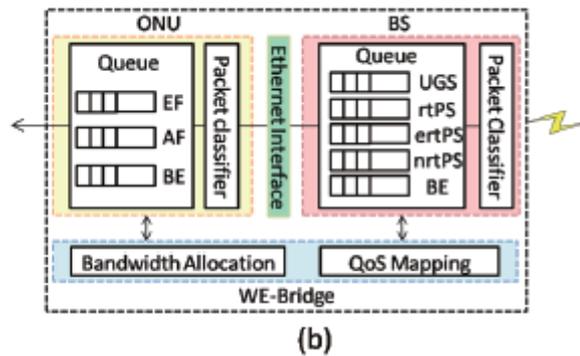


図 1.5-2 (b) VOB の内部構造

VOB では、ONU および BS がイーサネットインタフェースを介して接続され、両者にソフトウェアモジュール WE-Bridge (WiMAX-EPON Bridge) が接続されている。WE-Bridge では、WiMAX と EPON を連携させた帯域割当を行う。BS および ONU は保持するアプリケーションごとの優先キューが異なるため、WE-Bridge 内で優先キューの対応付けが必要となる。これを QoS マッピングという。ONU は EF、AF、BE の 3 つの優先クラスがあり、BS は UGS、rtPS、ertPS、nrtPS、および BE の 5 つの優先クラスがある。各クラスの特徴を図 1.5-3 に示す。本提案では、QoS 要求の類似性から、UGS を EF に、rtPS 及び ertPS を AF に、nrtPS 及び BE を BE に対応させる。以上のような QoS マッピングに従い、VOB はアップリンク伝送 (VOB → OLT) においては ONU の優先キューとして、ダウンリンク伝送 (VOB → SS) においては BS の優先キューとして仮想的に機能する。

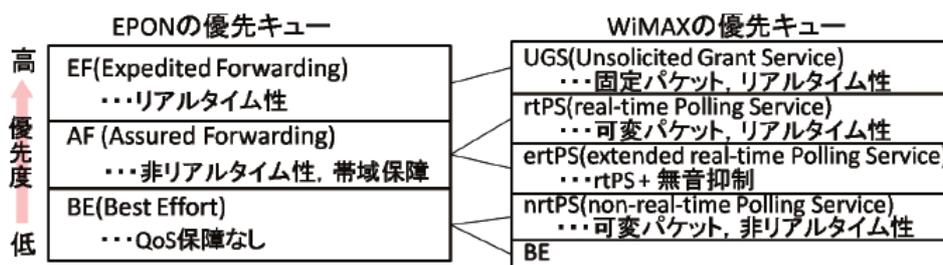


図 1.5-3 QoS マッピング

WEN では、OLT 及び VOB においてクラスごとの要求に応じて、QoS を考慮した DBA アルゴリズムが必要となる。これを WE-DBA (WiMAX-EPON Dynamic Bandwidth Allocation) と定義する。図 1.5-4 に WEN における帯域要求および割当の流れを示す。

(a) SS から VOB にクラスごとに帯域を要求する

- (b) VOB 内で QoS マッピングを行う
- (c) VOB から OLT に対して各クラスの合計帯域を要求する
- (d) OLT から VOB に対して VOB 内のクラスの合計帯域を割り当てる
- (e) VOB から SS に対してクラスごとに帯域を割り当てる

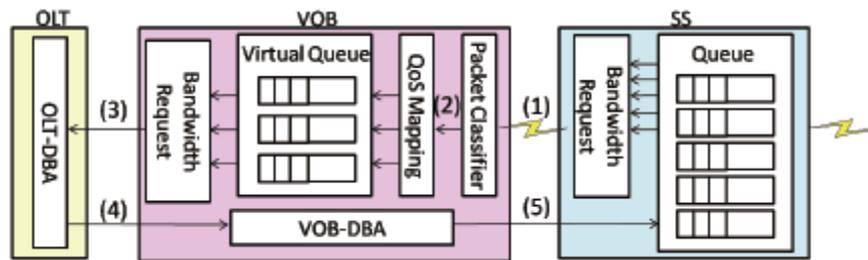


図 1.5-4 WEN における帯域要求および帯域割当の流れ

WE-DBA は、OLT において VOB に対して帯域割当を行う OLT-DBA と、VOB において SS の各クラスに対して帯域割当を行う VOB-DBA の 2 つの部分に分類する。

WE-DBA の特性を評価するにあたって、比較対象として OLT および VOB においてクラスに応じて固定的に帯域割当を行う DBA1 を定義する。本シミュレーションでは、次の 3 つのトラヒックのいずれかを送信する。

- (a) EF/UGS : 512kbps の固定ビットレートトラヒック
- (b) AF/rtPS/ertPS : 平均 1Mbps の可変ビットレートトラヒック
- (c) BE/nrtPS : 512kbps の自己相似性を持つ BE トラヒック

その他のシミュレーション諸元を表 1.5-1 に示す。WEN ネットワークにおいて、SS を 10 から 100 まで増加させたときの 3 種類のトラヒックにおける平均遅延を WE-DBA および DBA1 で比較した。遅延時間は、SS においてトラヒックが発生してから OLT が受け取るまでの時間とする。図 1.5-5 は DBA1 に対して WE-DBA を使用したときの遅延減少率を示す。WE-DBA では、ネットワーク内の SS 数が増加すると遅延が減少する。これは WE-DBA では要求に応じた動的な帯域割当を行うため、効率的な帯域割当が実現できるためである。また、3 つのトラヒックのうち、BE トラヒックの遅延減少率が最も大きかった理由としては、WE-DBA では BE トラヒックに対して最小帯域保証があるためであると考えられる。

表 1.5-1 シミュレーション諸元

EPON	OLT 数	16 個
	アップリンク帯域	1Gbps
	T_g	1 μ s
	OLT-スプリッタ間距離	20Km
	スプリッタ-ONU 間距離	5Km
	T_{cycle}^{EPON}	1ms
WiMAX	SS 数	10~100
	最小割当帯域	300kbps
その他	試行回数	20 回
	シミュレーション時間	60sec

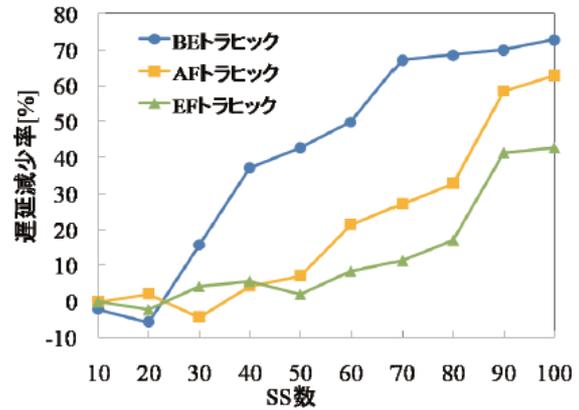


図 1.5-5 遅延減少率

1. 5. 2 省電力なハイブリッド光ワイヤレス技術の提案: WOBAN (Wireless-optical BroadbandAccess Network)

インターネットにおいて、ネットワークの広帯域化に伴い、消費電力の拡大が課題となっている。また、エネルギーの 15%は待機中のアクセスネットワーク機器によるものであると試算されており、省電力化が必要である。そこで、上記の課題であるアクセスネットワークにおける省電力化を実現するために、ONU のシャットダウン率の向上とエネルギーウェアなルーティングが提案されている [20]。

提案方式は以下の 3 つの要素から構成する。

(1) WOBAN アーキテクチャ

WOBAN のアーキテクチャを図 1.5-6 に示す。OLT は光パワーをスプリッタで分割し ONU に送信し、ONU はゲートウェイに接続している。そしてゲートウェイからワイヤレスルータ、ユーザまでをワイヤレスで接続する。ONU から OLT に送信を行う上り通信では、時分割を使用し、OLT から ONU に送信を行う下り通信では、OLT は全ての ONU に対してブロードキャストする。

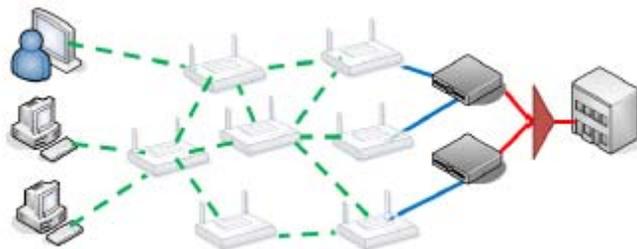


図 1.5-6 WOBAN アーキテクチャ

(2) エネルギーアウェアな WOBAN デザイン

一日を通して、時間帯によってトラフィック負荷は変動するため、負荷の少ない時間は選択的にいくつかのノードをスリープ状態にすることで、ネットワーク全体としてエネルギー消費を減少させることが可能である。特に負荷の低い ONU をスリープ状態にすることにより、WOBAN における ONU のエネルギー消費を減少させる。スリープ状態への切替方法は、アルゴリズム 1 に記載する。

アルゴリズム 1

負荷の下限を *Low Watermark(LW)*、上限を *High Watermark(HW)* と定義

初期化： *LW* と *HW* の初期値を設定

測定： 一日の異なる時間において *OLT* が対応する入力キューの長さを測定し、異なる *ONU* におけるトラフィック負荷を定量化

決定： 負荷 < *LW* *ONU* をシャットダウン

負荷 > *HW* *ONU* はアクティブ, 他の *ONU* を作動

その他 *ONU* はアクティブのまま

(3) エネルギーアウェアなルーティング

エネルギーアウェアなルーティングでは、既に確立されたパスを優先的に使用することで新たなパスの使用を回避する。そのため、リンク容量を超えない範囲で負荷の大きなリンクから使用することになり、負荷の小さい *ONU* はアルゴリズム 1 により、スリープさせることが可能である。これには、リンクの重み付けをする必要があり、リンクの残留容量を使用する。トラフィックフローがリンクに流れる際、元の容量からトラフィックフローを引いたものがリンクの重みとなる。送信元から宛先までをルーティングするために、最も容量が小さくなるようなパスを探索する。しかし、他のメトリック（ホップ数や遅延）を使用した場合、最短経路とはならず、パスの平均長が増加する可能性がある。本問題に対処するために、*hop offset* を使用する。使用目的はパスの平均長を減少させることである。*hop offset* を *m* と仮定し、*m* を各ホップのパスの重みに足す。*n* ホップの経路においてパスの重みは、パスの残留容量 + $n \times m$ となる。*hop offset* の選択は、ネットワークの接続がどの程度の遅延に耐えるかに依存する。平均パス長が極端に増加しないように *hop offset* を選択する必要がある。平均パス長が極端に長くなった場合、ワイヤレス伝送数が増加していると考えられる。本アルゴリズムをアルゴリズム 2 に示す。

アルゴリズム 2

初期化： 各リンクに初期容量を割り当て

Link State Advertisement(LSA): ノードから各リンクに定期的にリンクの重み等を広告

リンク重み付け： 各リンクに追加の *Hop Offset* を追加し更新

経路計算： 送信元から手先間の最短経路探索
選択されたパスの重みを更新

(4) 特性評価

シミュレーションにはカリフォルニア大学 Davis 校近辺にてオフィス街、学校、住宅地のエネルギー使用状況が異なる 3 シナリオを考慮する (図 1.5-7)。また、1 日を 3 時間ごとに分割し 8 回測定を行う。表 1.5-2 にシミュレーション諸元を示す。

表 1.5-2 シミュレーション諸元

場所	オフィス	学校	住宅地
WL(個)	41	37	62
GW(個)	8	6	10
ONU(個)	4	3	5
OLT(個)	1		
ワイヤレスルータ間平均距離	50m		
ルータ容量	54Mbps		
OLT	1Gbps		
ONU	1Gbps		
Low watermark	5%		

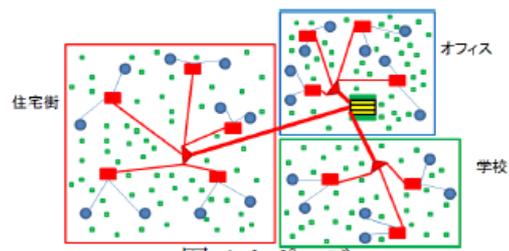


図 1.5-7 使用トポロジー

(5) ONU のシャットダウン率

図 1.5-8 に各アルゴリズムにおける ONU のシャットダウン率を比較した結果を示す。Regular mode と比較し、アルゴリズム 1 を使用した Power-save mode は 30~50% の ONU がシャットダウンされ、Energy-Efficient Routing では、最大で 60% の ONU がシャットダウンされた。これはアルゴリズム 1 に加え、アルゴリズム 2 によりパスが集約され、負荷が小さい ONU には追加の負荷がかかりにくいためである。

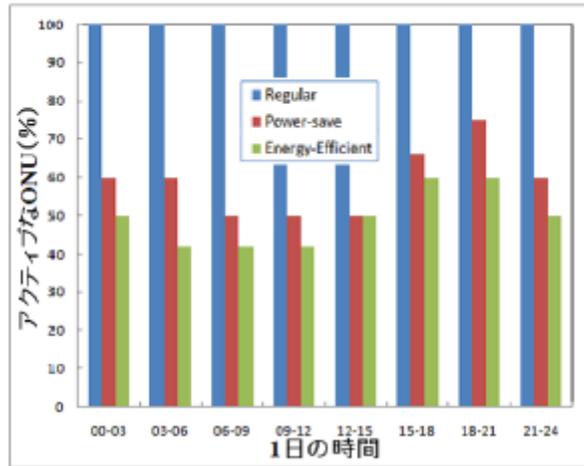


図 1.5-8 ONU の稼働率

1. 6 アクセス系の低消費電力化技術

現在、世界全体の二酸化炭素排出量の約 2%が ICT 関連の活動によるものであり、2020 年には 3%まで上昇すると推定されている [21]。さらに現在の ICT 分野において、エネルギー効率の優れた技術が導入されなかった場合、世界全体の固定ネットワークが消費する総電力は、2025 年までに 1.5TW (およそ原子力発電所 4 基分) に到達すると推定されている [22]。

現在の通信ネットワークでは、主にアクセス系が電力を消費している。この理由は単にアクセス系のネットワークを構成するデバイスの数が多いためである。例え PON (Passive Optical Network) のような光アクセス技術の導入が 1 ビットあたりの電力消費量を削減したとしても、今後 10 年間は固定光アクセスネットワークの消費電力量が、固定光ネットワークの消費電力量の大部分を占めるものと考えられている [21][22]。従って、アクセス系における低消費電力化は重要な問題の一つであると言える。以下に、プロトコルからのアプローチ、アーキテクチャからのアプローチ、その他のアプローチについて説明する。

1. 6. 1 プロトコルからのアプローチ - ONU のスリープモード

本節では ONU のスリープモードについて説明する。ONU についてはシステム集約の効果は当然のことながら現れない。しかしながら、ユーザの数だけ ONU は設置されるため、全体での消費電力量は多くなる。そのため ONU の消費電力を削減することはシステム全体の消費電力の削減に大きく寄与する。消費電力の削減手法として、ONU をスリープモードへ移行させる研究が行われている [23]。

現在の TDM-PON では、OLT は、宛先が異なる ONU を含めすべてのアクティブな ONU に対してダウンストリームトラフィックを送信する。図 1.6-1 に OLT および n 個の ONU の動作時間を示す。白色部分は非動作時間であるので、スリープモードにすることで消費電力の削減が期待できる時間帯である。

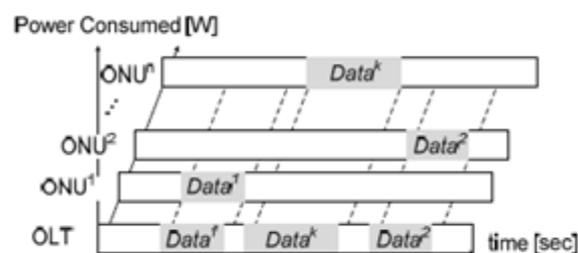


図 1.6-1 OLT および ONU の動作時間

現在の TDM-PON でスリープモードを実現するためには、ONU はスリープモードから

の復帰と共に OLT との同期を回復する必要がある。スリープモードから復帰する段階として、(1) OLT クロックの回復 ($T_{recovery}$)、(2) OLT クロックとの同期 (T_{sync}) がある。ONU が帯域割当やデータの送受信の前に必要とするオーバーヘッド ($T_{overhead}$) は、

$$T_{overhead} = T_{recovery} + T_{sync}$$

と表すことができる。図 1.6-2 にスリープモードからの復帰プロセスを示す。

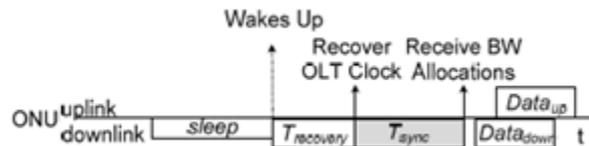


図 1.6-2 ONU における動作プロセス

OLT クロック同期時間 T_{sync} は、使用されるフレームおよび MAC プロトコルに依存する。図 1.6-3 (a) に GPON におけるコントロールフレームの一部を示す。GTC フレームの先頭に physical control block (PCB) が挿入されており、このビット列により物理的な同期を取得する。PCB は 32n 秒であるのに対し、GTC フレームのヘッダ長は 125 μ 秒となっているため、同期における最大遅延は 125 μ 秒程度ということになる。図 1.6-3 (b) に EPON におけるコントロールフレームの一部を示す。EPON フレームは GPON よりく、最大送信ユニット (MTU) は、マルチポイントコントロール (MPC) ヘッダより始まる 1,500 バイトである。MPC 内に同期をとるための start position delimiter (SPD) と呼ばれるプリアンブルが用意されている。従って、同期による遅延は GPON 以下と予想される。

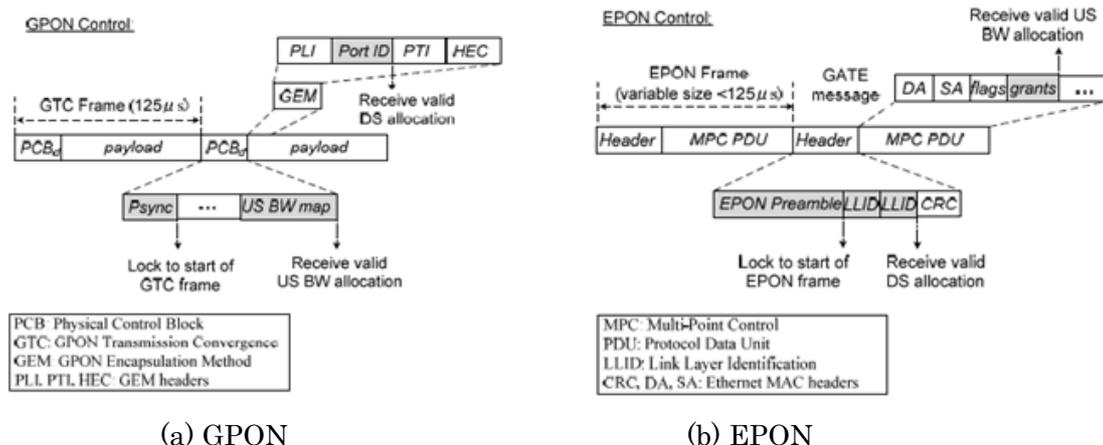


図 1.6-3 GPON および EPON におけるコントロールフレームの一部

図 1.6-4 に現在の GPON あるいは EPON の ONU の受信構造を示す。まず、光検出器 (PD)

において光信号を電気信号へ変換する。次に相互増幅器 (TIA)、制限増幅器 (LA) を通した電気信号をクロック・データ・リカバリー (CDR) 回路に入れる。CDR は回復したデータをデシリアライザー (DMUX) へ送り、DMUX は並列したデータをデジタル回路の後方へ渡す。

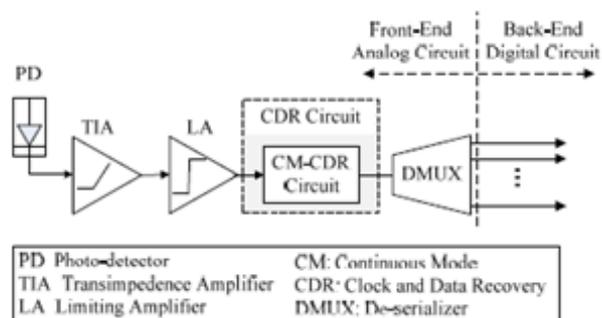


図 1.6-4 従来の ONU 受信構造

本構造におけるスリープモードの実現方法を手法 1 とする。手法 1 ではアナログ回路の前方およびデジタル回路の後方の各素子をオフにする。各素子の消費電力は表 1.6-1 となる。

表 1.6-1 ONU を構成する素子の消費電力

	Front-End Analog Circuit					Back-End Digital Circuit	Total Power Consumption
	APD	TIA	LA	BM/CM-CDR	DMUX		
Active	negligible*	100mW	100mW	330mW †	470mW*	2.85W	3.85W (P_{active})
Option 1	off	off	off	off	off	750mW	750mW ($P_{sleep,1}$)
Option 2	off	off	off	on	off	750mW	1.08W ($P_{sleep,2}$)
Option 3	on	on	on	on	off	750mW	1.28W ($P_{sleep,3}$)

手法 1 では、OLT クロック回復のために continuous mode CDR (CM-CDR) が使用され、2-5ms の時間が必要とされる。

そこでクロック回復時間を短縮するために、手法 2 として burst mode CDR (BM-CDR) を使用したタイプが提案されている (図 1.6-5)。手法 2 では、ローカル発振器 (LO) を用いてスリープモード中に OLT クロックに関連したクロック同期を維持する。通常時の BM-CDR の入力信号は LA から送られ、スリープモード時は LO から送られる。BM-CDR は常にオンである必要があり、電力を消費するが、スリープモードから抜け出すためのオーバーヘッドを小さくすることが可能である。オーバーヘッドを小さくすることにより、ONU が動作する時間を短縮することが可能となる。また、製造上の追加コストが大きくないことも利点として挙げられる。

手法2の欠点としては、正確なLOクロックが不可欠である点である。この欠点を克服するために、手法3として手法1にスリープモード管理をする回路を導入したタイプが考えられる（図1.6-6）。

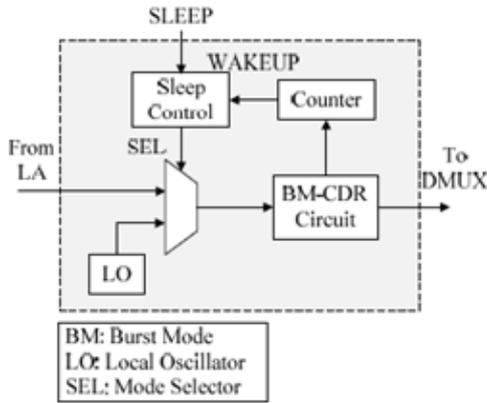


図 1.6-5 BM-CDR を用いたスリープモード手法

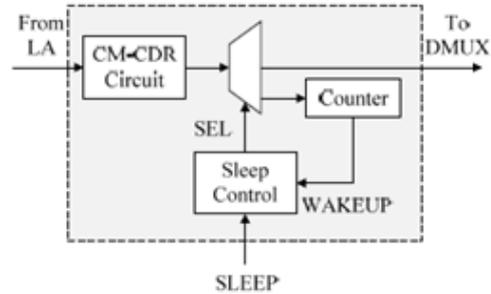


図 1.6-6 CM-CDR およびスリープコントロールを実装したスリープモード手法

図 1.6-7 および図 1.6-8 に手法 1~3 を用いてスリープ時間を可変にした場合の電力消費削減率および TDM タイムスロットを可変にした場合の電力消費削減率についての評価結果を示す。図 1.6-7 に示すように、スリープ時間が 30ms 以下の場合、手法 2 および手法 3 は手法 1 に比べて 10% 程度の消費電力の削減が見込まれる。一方、30ms 以上の場合、手法 1 が最も消費電力の削減が見込まれる。また、図 1.6-8 に示すように、TDM タイムスロットが一定以下の場合、手法 3 が手法 1 よりも消費電力の削減が見込まれる。一方、TDM タイムスロットが一定上の場合（つまりスリープ時間が増加する場合）には、手法 1 の方が大幅に消費電力を削減することが見込まれる。

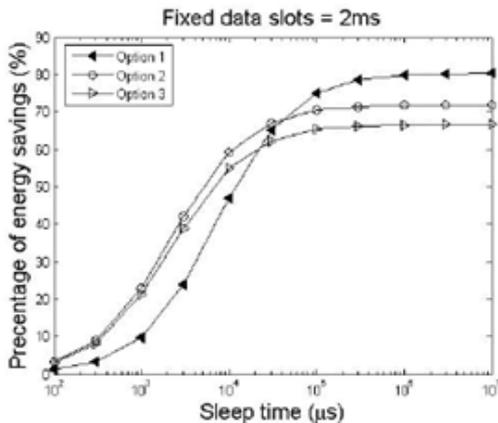


図 1.6-7 スリープ時間と電力削減率

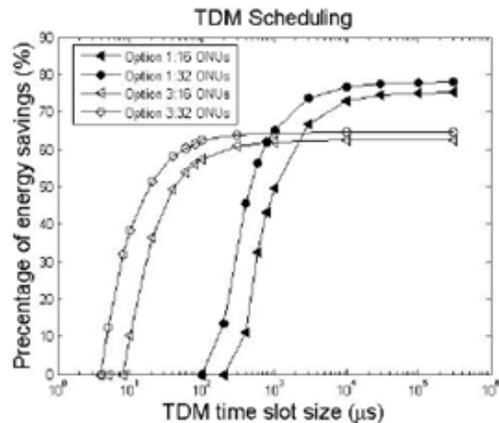


図 1.6-8 TDM タイムスロットと電力削減率

1. 6. 2 アーキテクチャからのアプローチ

(1) アクティブな ONU 数を考慮した OLT の設計

TDM-PON におけるアクティブな ONU 数を考慮した OLT (Optical Line Terminal) ラインカードの設計について説明する。現在、サービス継続性の観点からセントラルオフィスに存在する OLT は常に電源がオンになっている。OLT は多数の OLT ラインカードより構成されており、1 カードは 16 または 32 の ONU を管理する。OLT における電力消費量を低減すべく、アクティブな ONU の数に応じて OLT ラインカードも電源をオン/オフする提案がなされている [24]。

図 1.6-9 に提案方式の概念を示す。図 1.6-9 (a) のように、OLT ラインカード数に対応する数の光スイッチを設置する。ここでは簡単のため、OLT を構成するカード数を 4 とした。図 1.6-9 (b)~(e) は、トラフィックの割合に応じて OLT ラインカードをオンにする状況を示している (赤がオン、緑がオフ)。

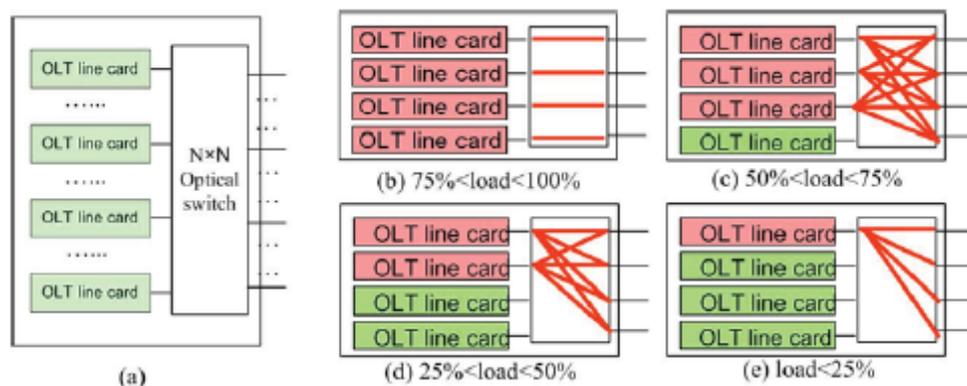


図 1.6-9 OLT と光スイッチ

ONU が所属する OLT ラインカードを変更させるために、OLT-ONU 間に光スイッチを設置しているが、スイッチコンフィギュレーションに必要なとされる遅延を考慮する必要がある。ここでは、EPON と GPON の場合についてそれぞれ検討していく。

EPON では、スイッチコンフィギュレーションが 50ms より小さければ問題ないと考えられる。IEEE802.3ah によると EPON において、送信すべきトラフィックのバッファの有無にかかわらず、ONU は 50ms ごとに GATE メッセージを送信する必要がある。従って、スイッチコンフィギュレーションが 50ms 以上かかる場合には、サービスの継続性に支障をきたすと考えられる。

GPON では、スイッチコンフィギュレーションは 125 μ s 以下である必要がある。ITU-T G.984.3 によると、GPON において ONU はデータの送受信を 125 μ s の GPON フレームご

とに行う。下がって、125μs 以下でスイッチコンフィギュレーションを行えば、サービスの持続性に支障は生じない。

本提案では、光スイッチを多数使用するが、光スイッチが非常に高価であるという問題を解決する必要がある。現在、光スイッチは大別すると 4 種類ある。

- (a) opto-mechanical switch
- (b) micro-electro-mecanical system (MEMS)
- (c) electro-optic switch
- (d) semiconductor optical amplifier switch

本提案では、そのうち最も低価格である opto-mechanical switch を使用する。

全ての Amsterdam Internet Exchange member ports の一日の平均的なトラフィックを参考に、削減可能な電力量を算出する。図 1.6-10 (a) に一日のトラフィックプロフィールを、(b) および (c) にそれぞれスイッチ数を変えた提案方式による OLT の使用割合を示す。

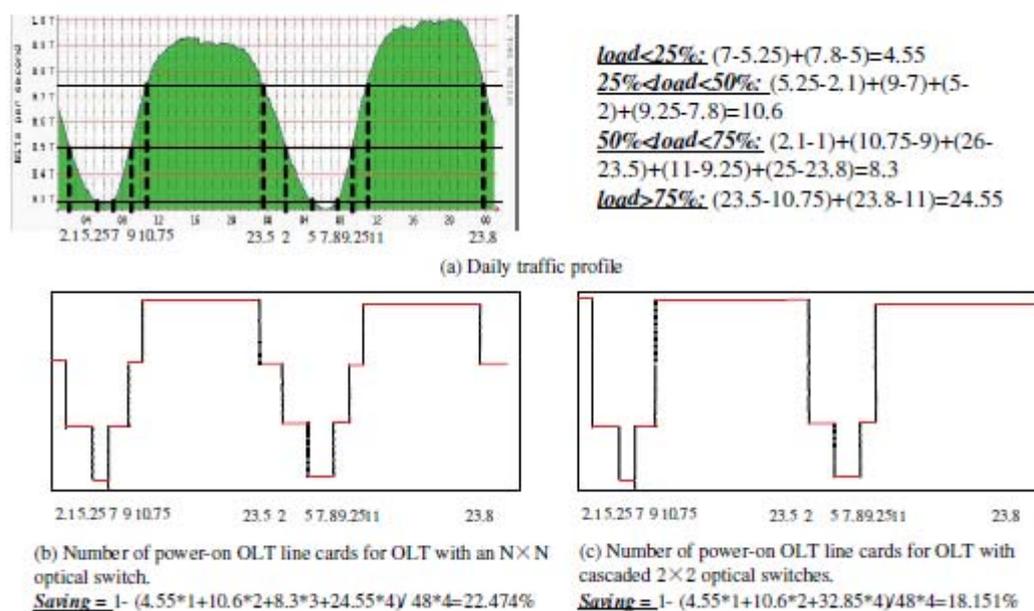


図 1.6-10 1 日のトラフィックプロフィール

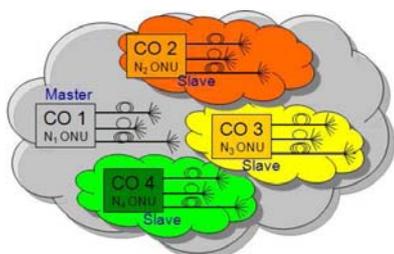
$N \times N$ の光スイッチを使用した場合 (今回は $N=4$)、22.474% の消費電力の削減が見込まれる。一方、低価格という点で現実的な手法である 2×2 スwitch の直列配置の場合、18.151% の消費電力の削減を見込むことができる。

(2) LR-PON による集約効果

LR-PON の集約における消費電力効果について説明する [25]。サンプルとして 14 の CO

(Central Office)、125,000 ユーザのある町をユーザ数の多い4つの CO に集約することを考える。各 ONU は多い順に選ばれる ($N_1 > N_2 > N_3 > N_4$)。また、図 1.6-11 のように最も多い CO は Master CO とする。Master CO はメトロネットワークに最も近く、3つの Slave CO と接続されている。表 1.6-2 は OLT における ONU の充填率 (filling ratio) による 1 ユーザあたりの消費電力を示す。

表 1.6-2 OLT port と充填率による消費電力



Power consumption (W/user)	Filling Ratio (%)			
	11	25	50	100
Number of OLT ports				
1	19	8.4	4.2	2.1
4	4.8	2.1	1.1	0.53
8	3.8	1.6	0.8	0.4
16	3.1	1.4	0.68	0.34
32	2.8	1.23	0.62	0.31
48	2.7	1.19	0.6	0.3
64	2.7	1.17	0.59	0.29

図 1.6-11 Master および Slave CO

1 OLT は最大 4,096 ユーザ容量を持つ (16card、4PON ports/card、64 ユーザ/PONports)。OLT が最大 4,096 ユーザを持つとき充填率は 100%で消費電力 W/user は最も低くなる。ここで、図 1.6-12 に示すように、6つのシナリオにおいて集約効果を検討する。(a) (b) はパッシブシナリオで、(a) は G-PON (64 ユーザ、20km、パワーバジェット:13~28dB)、(b) は (a) に+3dB パワーバジェットを持つシナリオで (1つの PON でユーザ 2倍を収容)、初期の値から充填率を 2倍にする。しかし、元々の 64 ユーザ以上にはならないようにすることで、充填率を 50%に抑えるシナリオである。送受信の消費電力は (a) と同じとする。(c) (d) (e) (f) は EB (Extender Boxes) を持つアクティブシナリオで、Master CO のみ OLT を持つ。Slave CO は EB を持ち、(c) は (a) を 60km に長距離化 (Master CO の OLT から Slave CO の EB を経由するアーキテクチャ) したもので、(d) は (b) を 60km に長距離化したものである。(e) は 1:4EB を Slave CO に置き、長距離化および 4倍の分岐数を可能にする。これは Slave におけるポート数を減らすためである。充填率は 4倍になる、(f) は (e) と (b) を合わせたもので、初期状態から Master OLT のポート数は半分に削減され充填率は 2倍になる、Slave CO では充填率は 4倍になる。本アーキテクチャを用いて消費電力比較を行う。

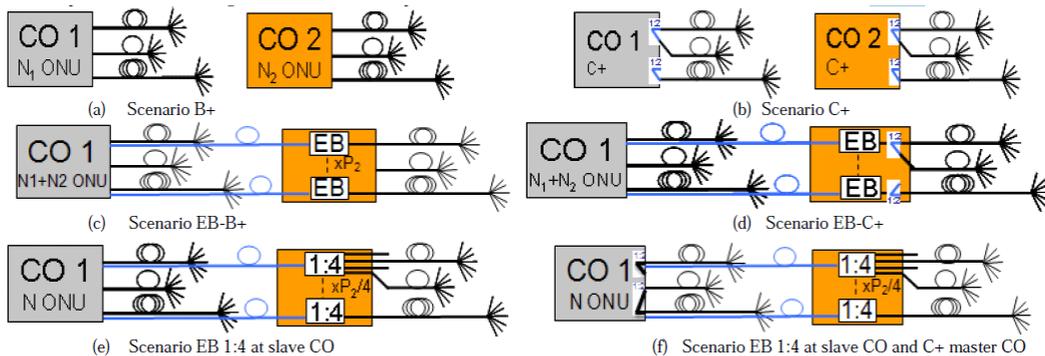


図 1.6-12 各 LR-PON 比較モデルのアーキテクチャ

EB (1:1) の消費電力は 11W、EB (1:4) は 23W とし、また、初期の充填率は 25% に設定する。この 25% は実際の OLT の使用状況から設定した。図 1.6-13 および図 1.6-14 は電力消費量と Master CO の平均充填率を示す。結果は必然的だが、消費電力と充填率はあることを示している。充填率が高い場合、消費電力は低い。(a) は 1.18W/user で、(b) は充填率が 2 倍であるので 0.59W/user である。しかし、OLT を持つ CO の数に変化はない。EB の使用により伝送距離が伸長することで、充填率が増加し消費電力を減らすことができる。そして、CO を一つに集約することができる。(c) において消費電力に改善はない。(d) (e) においては、Slave CO の OLT ポートの数が減少するため、充填率が改善し、電力消費を抑えることができる。(f) はベストな提案で、充填率に関して master CO は 2 倍、slave CO は 4 倍になる。結果として、(b) (f) は (a) と比較して、125,000 ユーザにて年間で消費電力を約 600,000kWh 抑えることができる。(f) に関しては、高い充填率を示すので、CO における機材コストを抑えることができる。

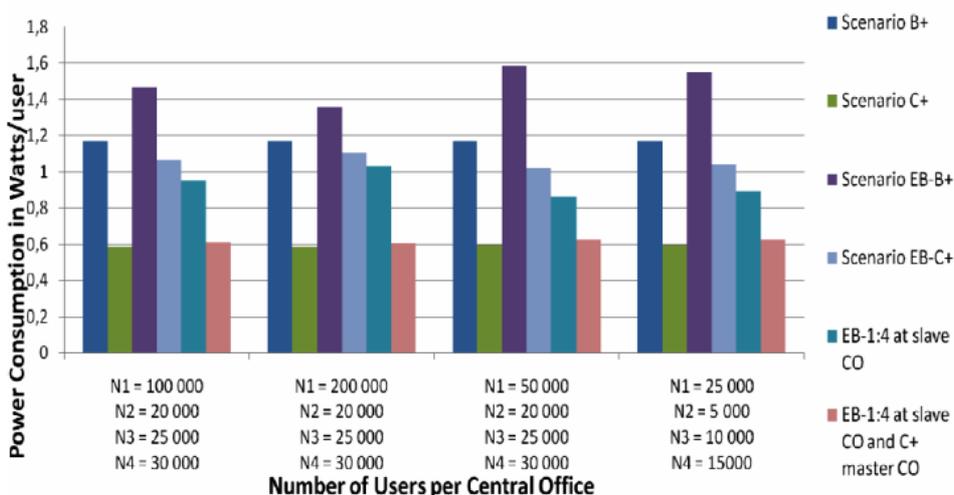


図 1.6-13 電力消費量

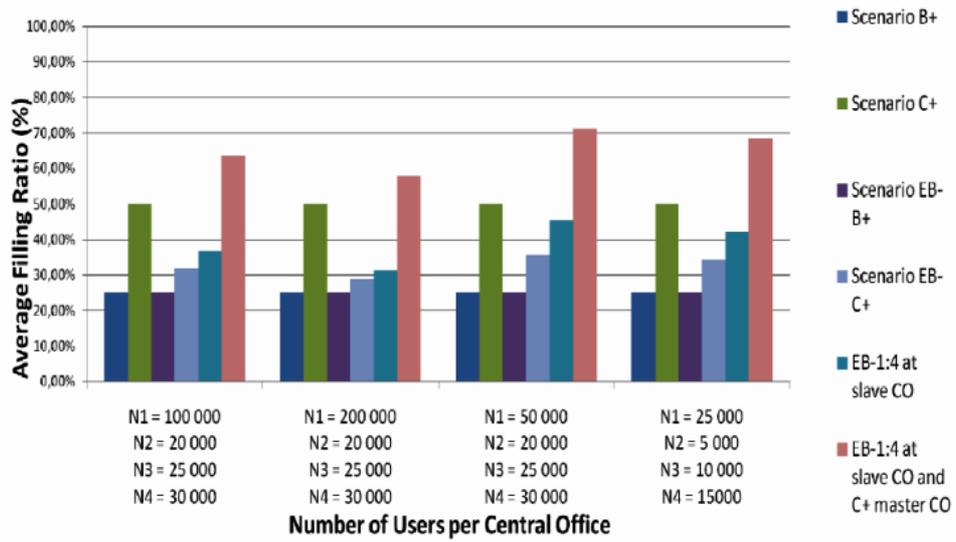


图 1.6-14 平均充填率

1. 7 IPTV 配信サービスの実現と課題

1. 7. 1 IPTV 配信サービスの種類と技術課題

GE-PON の普及に伴い、各家庭に光ファイバを用いて IPTV サービスを実現できる環境構築が進んでいる。日本では、2011 年の地上波 TV のデジタル化に伴い、付加価値の高い放送サービスの実現が求められている。映像の高精細 (HD) 化と薄型 TV の大画面化が進展し、通信の広帯域化により、放送と通信の融合に向けた技術が検討されており、IPTV 配信サービスは有力なサービスの 1 つとして期待されている。

表 1.7-1 に IPTV サービスの要求条件と技術課題を示す。IPTV サービスは、ダウンロード型、VOD (Video On Demand) 型、放送型の 3 種類に分類できる [26][27]。

表 1.7-1 IPTV の要求条件と技術課題

サービスの種類	要求条件	技術課題
ダウンロード型	高速ダウンロード 大容量映像の保存	広帯域化 HDD 大容量化
VOD 型	高品質な配信	広帯域化 帯域制御
放送型	高品質な配信 同一性の確保 匿名性の確保 地域限定性の確保	多チャンネル配信 広帯域化 帯域制御 マルチキャスト

ダウンロード型 IPTV サービスは、家庭のハードディスクに映像コンテンツをダウンロードし視聴するなど、インターネットを通してコンテンツをダウンロードするサービスである。ハードディスクの大容量低コスト化に伴い、サービスの普及が加速している。VOD 型 IPTV サービスは、視聴者からの要求により VOD サーバから映像データをストリーム配信し、IPTV 端末で受信しながら視聴するサービスである。VOD 型 IPTV の基本は、ユニキャスト配信である。映像帯域は数 100kbit/s から数 10Mbit/s になり、1 チャンネル程度の映像であれば快適に見ることができる。放送型 IPTV サービスは、地上波や CATV と同様に全チャンネルの放送番組や映像をあらかじめ配信しておき、視聴する時にチャンネルを選択切替して視聴するサービスである。放送型 IPTV は放送電波による TV では数 10 チャンネル、CATV では 100~400 チャンネルが配信されるため、広帯域のアクセスネットワークが必要となる。現在はダウンロード型や VOD 型 IPTV サービスが主流であるが、放送型 IPTV サービスの普及も期待されている。

これら 3 つのサービスの要求条件と技術課題は、以下のとおりである。ダウンロード型 IPTV サービスでは、大容量コンテンツをいかに高速にダウンロードするかが重要な課題である。VOD 型 IPTV サービスでは、高品質な映像配信の実現が課題である。映像帯域が大

きい高画質な番組を視聴する際に、通信ネットワーク帯域が十分でない場合には、パケット損、パケット転送遅延、ゆらぎが発生し、映像の画質が劣化する。ネットワークの広帯域化、帯域制御技術による映像帯域の保証が必要となる。放送型 IPTV サービスでは、地域限定性の確保、同一性の確保、匿名性の確保等の放送要求条件、高品質な配信が課題となる [27]。地域限定性の確保とは、放送事業者が放送免許エリアのみに映像を配信することである。同一性の確保とは、全視聴者が同じ放送品質の複数のチャンネルを同時視聴もしくは同時録画出来ることである。匿名性の確保とは、放送事業者が、視聴者が選択している番組を知ることは出来ないことである。この放送型 IPTV サービスの実現方法として、1チャンネル分の帯域で全 IPTV 端末に映像配信可能な IP マルチキャスト配信が利用されている。しかし、同一性、匿名性の確保の要求条件を満たすためには、複数のチャンネルを同時に配信する多チャンネル配信を実現しなければならず、現在のアクセスネットワークでは帯域不足である。現在の放送電波による TV では数 10 チャンネル、CATV では、250～350 チャンネル、HDTV では 100 チャンネル以上必要となる。また複数のチャンネルを同時に配信する場合、チャンネルの切替方法と切替時間の高速化が課題となる。さらに、地域限定性の確保を満たす放送サービスを実現するためには、マルチキャストで映像を配信するエリアを制限する必要がある。このように、アクセスネットワークにおける多チャンネル配信、広帯域化、帯域制御、マルチキャストが重要な課題となる。

このように、IPTV サービスの普及のためには、アクセスネットワークの技術、同一性の確保、匿名性の確保などの技術的要件の検討が必要となる。

1. 7. 2 PON 技術を用いた IPTV 配信サービスの実現

TDM-PON 技術を用いた放送型 IPTV アーキテクチャの具体例について示す[26][28]。地上波と同様に映像コンテンツを多数の IPTV 端末に配信し、同一性と匿名性を確保出来る多チャンネル配信の実現を目的としている。多チャンネル配信とは、複数のチャンネルをあらかじめ ONU まで配信しておくことである。ここでは、ONU までチャンネル配信することによって、CATV サービスと同様な匿名性の確保が実現できるものと想定している。

図 1.7-1 に PON を用いた放送型 IPTV アーキテクチャを示す。IPTV 端末、放送サーバ、IP 放送マルチキャスト管理サーバおよび PON から構成される。放送局内に設置された放送サーバは HD 映像をマルチキャストネットワークに IP マルチキャスト配信する。ONU は IGMP (Internet Group Management Protocol)や MLD (Multicast Listener Discover) を用いて、あらかじめマルチキャストグループに帰属することで、多チャンネル配信が実現可能となる。ONU はチャンネル機能が実装され、IPTV 端末と連携した HD 映像の選択切替機能を搭載する。OLT は下りの帯域制御機能が実装され、HD 映像とインターネットの帯

域を制御する。

最初に、IPTV 端末は IP 放送マルチキャスト管理サーバに問い合わせをし、IPTV チャンネル情報からマルチキャストアドレスを取得する、次に IPTV 端末は、ONU に IPTV チャンネル選択要求を行う。この結果、ONU で選択された HD 映像は、ホームネットワークを介して IPTV 端末に転送され再生される。

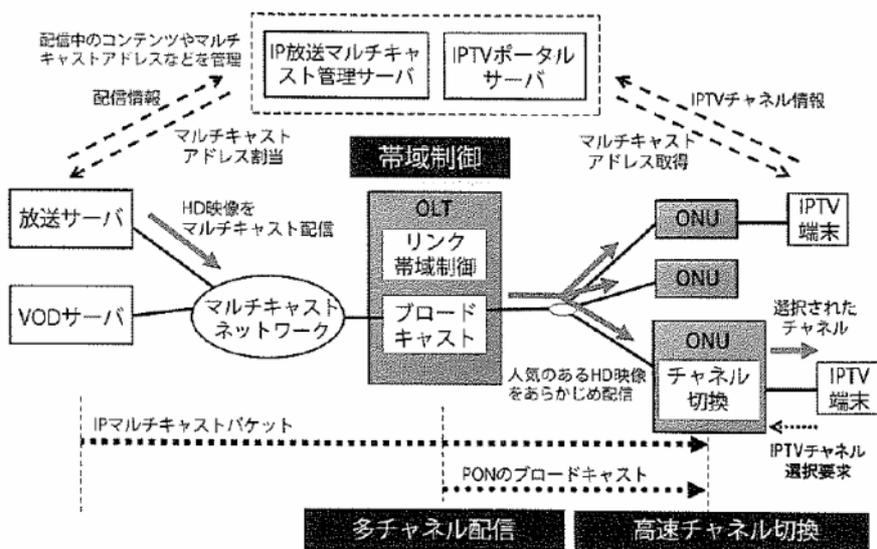


図 1.7-1 放送型 IPTV アーキテクチャ

PON を用いた放送型 IPTV アーキテクチャの実現に伴い、PON のブロードキャストを用いて、効率的に IPTV 映像を配信する方式を紹介する [27][29]。

PON のブロードキャストとは、光信号が光スプリッタでコピーされ、すべての ONU に配信されることで実現する。図 1.7-2 に PON のブロードキャストフレームを用いた配信システムを示す。IP マルチキャストパケットを ONU に配信する際に、ブロードキャストフレームを活用し、帯域利用効率の向上を図っている。OLT は IP マルチキャストパケットを受信すると、すべての ONU に転送するブロードキャストフレームにマッピングして配信する。図 1.7-3 に示すように、IP マルチキャストパケットは OLT の L2 スイッチレベルの電気レベルでコピーされることなく、光スプリッタでコピーされ、全 ONU に同じ IP マルチキャストパケットが同時配信される。

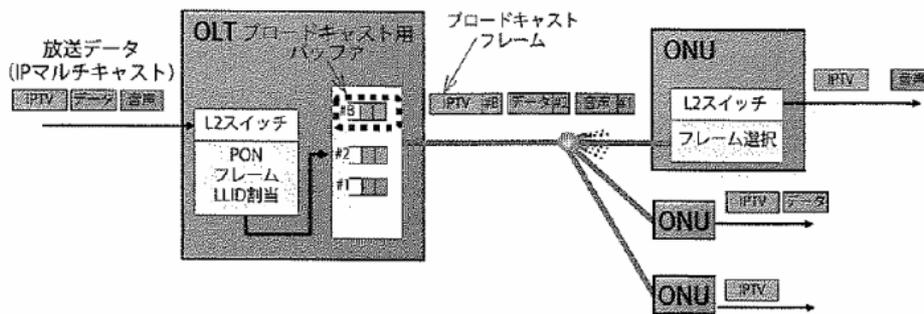


図 1.7-2 PON のブロードキャスト

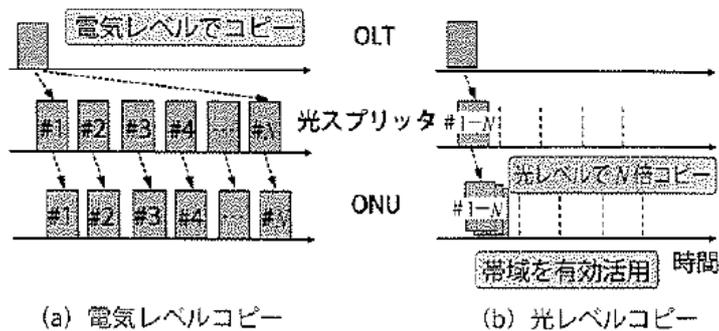


図 1.7-3 光スプリッタによるコピー

1. 7. 3 アクティブ型マルチキャスト

光スプリッタを使用した従来の PON と異なり、アクティブ型の PON である ActiON では、10nsec 以下での超高速方路切替を達成する PLZT (PlombLanthanum Zirconate Titanate) 光スイッチが使用される [30]。しかし、1 スロット内において通信可能な ONU が 1 台に限定されるため、マルチキャストおよびブロードキャストを行う際には送信先の ONU の数だけスロットを使用する必要があり、帯域の浪費が生じる。この問題を解決するため、PLZT 光スイッチを光スプリッタのように動作させることで、マルチキャストを実現する方法が提案されている [31]。図 1.7-4 に PLZT 光スイッチの内部構造および動作を示す。PLZT 光スイッチはマツハツェンダ構造を有し、(a) に示す最小単位の光スイッチをアレイ状に接続することで、大規模な光スイッチを構成する。導波路上に設置された 2 個の電極に電圧を印加することにより、(b) (c) に示すように、所望の方路へ光信号をスイッチングする。このとき、2 個の電極にそれぞれ中間的な電圧を印加することで、(d) に示すように、入力した光信号を光スプリッタのように分割し、2 つの方路に出力させることが可能である。この動作を PLZT 光スイッチの分配モードと呼ぶ。図 1.7-4 の入力ポート A から一定パワーの光を入力した場合の出力ポート X における光パワーの変化を図 1.7-5 に示す。分配モードを使用した場合、光スプリッタと同様に光パワーの損失が発生する。

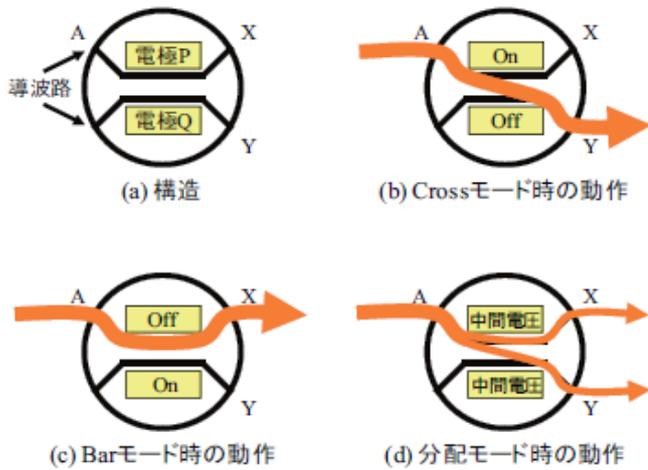


図 1.7-4 PLZT 光スイッチの動作

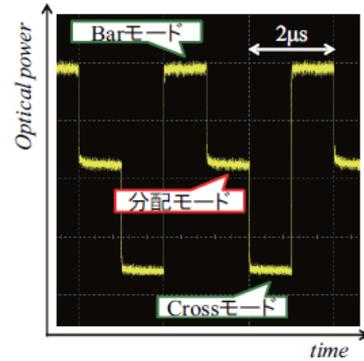


図 1.7-5 PLZT 光スイッチの出力パワーの変化

ActiON の系全体で、同時に分配モードとなる PLZT 光スイッチ数を制限することにより、ActiON の特徴である多ユーザ収容・長距離伝送を維持しながら、最小スロット数で ONU に対しマルチキャスト配信を行う方式について検討が行われている [31]。図 1.7-6 に分配モードを使用した場合の動作例を示す。図 1.7-6 に示すように、光スプリッタの代わりに光スイッチを使用した場合でもマルチキャスト配信が可能である。

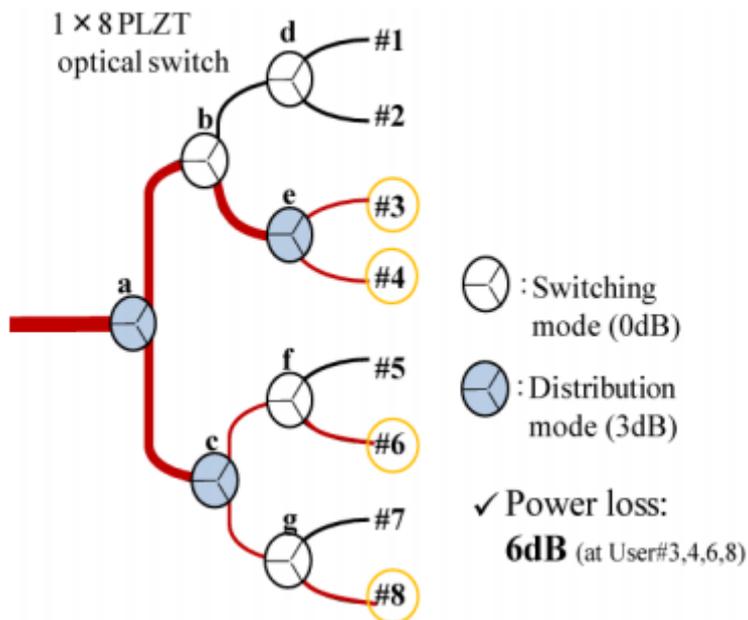


図 1.7-6 分配モードを使用した光スイッチのマルチキャスト配信

1. 8 光アクセスネットワークの高信頼化

1. 8. 1 概要

従来、光アクセスネットワークではコアネットワークやメトロエリアネットワークと比較して、高信頼化に関する検討は少なかった。その理由は、光アクセスネットワークを介して提供されるサービスがベストエフォートのインターネット接続にほぼ限られていたため、高信頼化よりもネットワークの冗長性を抑え低コストで実現することが優先されたためである。しかし、近年では光アクセスネットワークの発達・普及により、IPTV や VoIP といったリアルタイム性サービス、あるいはインターネットバンキングやオンライントレードなどといった接続断の許されないサービスが、光アクセスネットワークを介して提供されるようになってきている。また、1.1 節において述べた通り、次世代光アクセスネットワークでは伝送距離の延長、および収容加入者数の増加が要求条件として掲げられている。従って、次世代光アクセスネットワークでは従来と比較して、ネットワーク障害の発生時により多くの加入者に影響が及ぶことが考えられる。こうしたことから、高信頼化は次世代光アクセスネットワークにおいて必須要件であると言える。

ネットワークの高信頼化には、ネットワーク装置や伝送路を冗長化することで耐障害性を向上させる場合と、ネットワーク装置自体を改良し信頼性を向上させる場合とが存在する。以下では、主に前者による光アクセスネットワークの高信頼化手法について述べる。

1. 8. 2 PON プロテクション

ITU-T G.983 Broadband PON (B-PON)では、OLT や ONU、伝送路の冗長化によるプロテクション方式を規定している [32]。図 1.8-1 に本勧告において規定される 4 種類の冗長化構成 (Type A, B, C, D) を示す。Type A では幹線ファイバ、Type B では OLT と幹線ファイバ、Type C および Type D では PON 全体に対し、正常系とは別に予備系を設置する。正常系において障害が発生した場合、伝送路を予備系に切り替えることで通信を継続する。正常系から予備系への切り替え時間は 50ms 以内と規定されている。また、Type C および Type D では OLT-ONU 間を完全に二重化しているため、通常時に予備系を利用してエクストラトラヒックを伝送可能である。

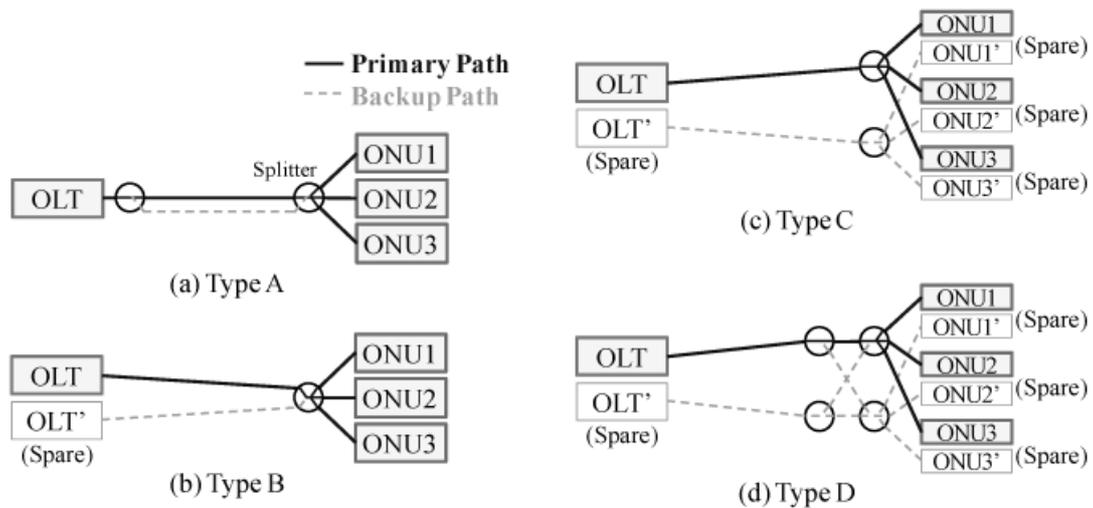


図 1.8-1 ITU-T G.983 による PON 冗長化構成

一方、IEEE により標準化されている GE-PON および 10GE-PON においては、現在に至るまでプロテクション方式の規格は存在しておらず、ITU-T の PON プロテクション方式を拡張により適用可能であることが付記されているのみである。しかし、現在、1.1 節において述べた IEEE P1904.1 SIEPON の Task Force 3 において、GE-PON および 10GE-PON における PON プロテクションに関する検討が行われている。

ITU-T G.983 で規定された PON プロテクション方式は正常系と予備系が 1:1 で対応するため、設置コストが著しく増大するという欠点が存在する。そこで、より低い設置コストで PON プロテクションを実現する標準化外手法として、予備系を複数系統の PON で共有する方式が多く提案されている。最も代表的な方式として、type H と名付けられた $N:1$ のプロテクション方式である [33]。図 1.8-2 に type H の構成を示す。type H では OLT-光スプリッタの区間を冗長化の対象とする。 N 系統の PON の内いずれか 1 系統の OLT-光スプリッタ間において障害が発生した場合、光スイッチを操作し予備系に切り替えることによって通信を継続する。

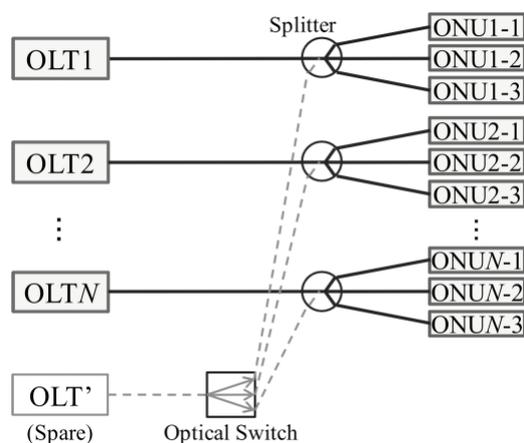


図 1.8-2 プロテクション type H

また、上記とは異なるアプローチとして、ツリー型ではなくリング型やメッシュ型のトポロジー上で PON を実現することにより、信頼性向上を図る方式も存在する。次節では光アクセスネットワークにおける具体的なプロテクション方式の研究例を示す。

1. 8. 3 高信頼化方式の研究例

(1) $N:M$ 負荷分散方式を適用した PON の高信頼化 (NTT アクセスサービスシステム研究所)

本研究では、正常系と予備系が $N:M$ ($N < M$) で対応するプロテクション方式を提案している [34]。図 1.8-3 に本プロテクション方式の構成を示す。本方式では、スプリッタを 2 段構成とした PON を使用する。第 1 スプリッタ (分岐比 k_1) と第 2 スプリッタ (分岐比 k_2) の間に、接続を自由に組み替え可能な光スイッチを複数の PON にまたがる形で設置し、支線ファイバ単位で接続を切り替え可能とする。光スイッチには第 1 スプリッタによって分割されたファイバ ($M \times k_1$) 本と、第 2 スプリッタからの支線ファイバ ($N \times k_1$) 本が入力されており、OLT 側の $\{(M-N) \times k_1\}$ 本の余剰ファイバを予備系として利用する。

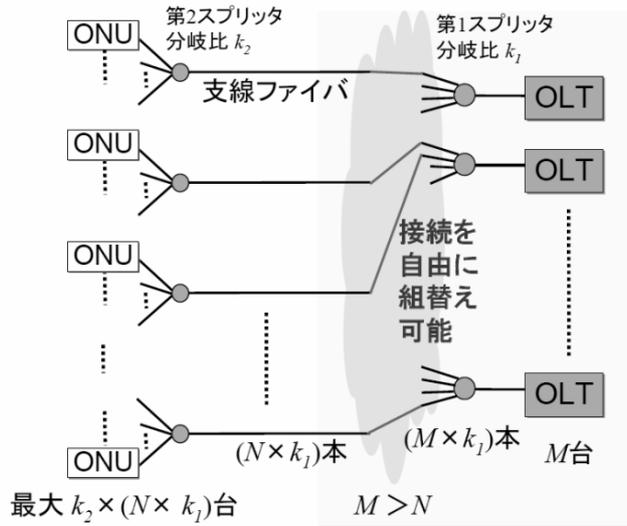


図 1.8-3 $N:M$ 負荷分散方式を適用した PON プロテクション方式

図 1.8-4 にプロテクション動作を示す。OLT 故障あるいは OLT-第 1 スプリッタ間断線時には、(a) のように支線ファイバの接続先を他の正常な OLT へ切り替える。また、第 2 スプリッタを $1:k_2$ から $2:k_2$ へ変更し予備支線ファイバを追加することにより、(b) のように支線ファイバ断線にも対応可能となる。

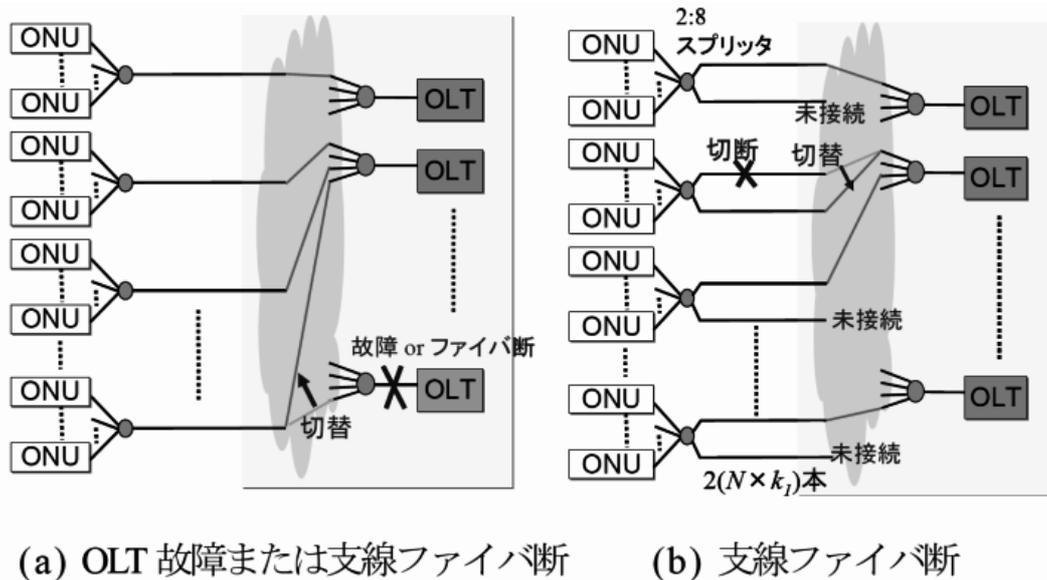


図 1.8-4 $N:M$ 負荷分散方式を適用した PON プロテクション方式の動作

本プロテクション方式では、正常時に冗長 OLT のエクストラトラヒックを複数の ONU で利用できる利点が存在する。さらに、正常時には各 OLT が収容する ONU の数を動的に

変化させることが可能であり、加入者の要求条件に応じた帯域割り当てや負荷分散が可能である。

(2) Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture (SARDANA) (欧州 FP7 プロジェクト)

SARDANA は、メトロアクセス融合型の大規模な WDM/TDM-PON の構築を目的としたプロジェクトである [35]。

図 1.8-5 に SARDANA のアーキテクチャを示す。SARDANA は WDM を用いたメトロリングと TDM を用いたアクセスツリーのハイブリッド構造を有する。Central Office (CO) および Remote Node (RN) を WDM リング上に配置し、各 RN の配下に従来の PON で使用されているアクセスツリーを 2 個ずつ配置する。

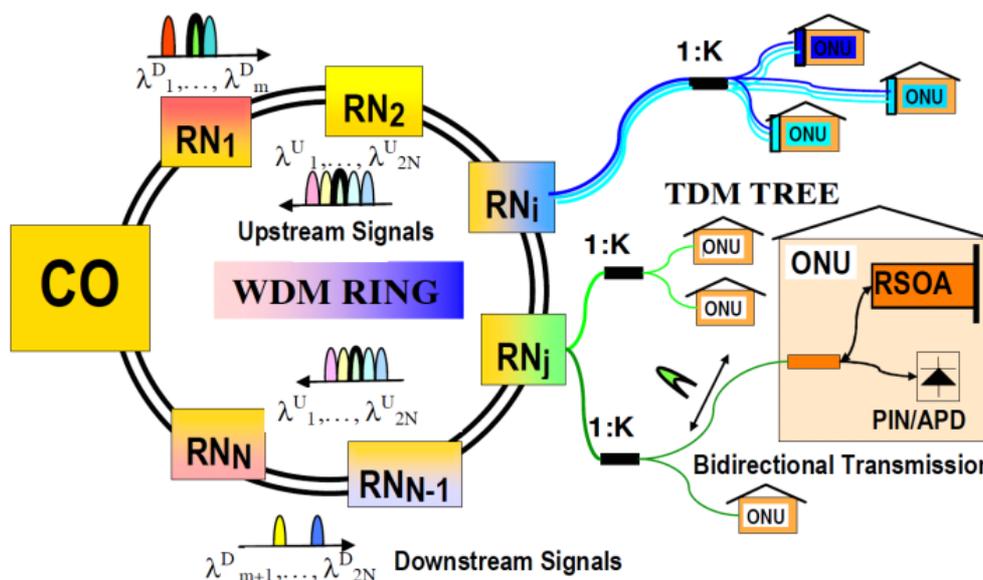


図 1.8-5 SARDANA アーキテクチャ

SARDANA では、WDM リング上、すなわち CO-各 RN 間の伝送路上において発生した障害に対し、プロテクションが可能である。CO-RN 間において障害が発生した場合、CO は伝送路を反対回りに切り替え ONU との通信を継続する。図 1.8-6 に 2009 年 5 月に行われたプロトタイプ実験の様子を示す。RN は左回り・右回りの両方向の信号を波長フィルタおよび光スプリッタを使用して Add/Drop 可能な構造となっている。本実験において、ファイバ切断時に 1dB 未満のペナルティで伝送路切り替えが可能であることが検証された。

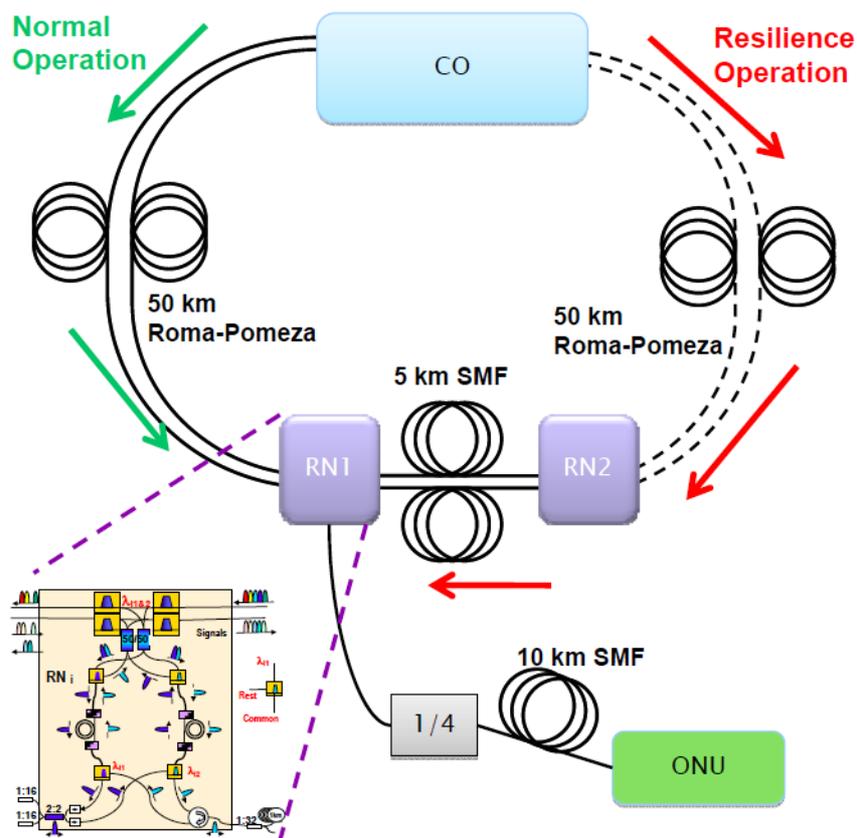


図 1.8-6 実験アーキテクチャ

(3) 2x2 光スイッチを用いた大規模光スイッチングネットワーク (慶應義塾大学)

本研究では、2x2 の導波路型光スイッチを用いて大規模な光スイッチングネットワークを設計する手法について初歩的検討を行っている [36]。大規模光スイッチングネットワークにおいては、1.8.1 節と同等の理由から高信頼性の確保が必須である。また、コストや消費電力の観点から光増幅器の使用を最小限にとどめるため、基地局—ユーザ間の光損失を低く抑える必要がある。

図 1.8-7 に典型的なトポロジーを用いて、大規模光スイッチングネットワークを構成した例を示す。単純なツリー型トポロジーの場合 (図 1.8-7 (a))、光ファイバや光スイッチにおいて障害が発生した場合、1 台以上のユーザが必ず通信不可能となるため信頼性が低い。ITU-T G.983 “type C”のように、ツリー全体を二重化した場合 (図 1.8-7 (b))、高信頼性は確保されるが使用光スイッチ数が 2 倍となり、設置コストの増大が懸念される。一方、リング型トポロジーの場合 (図 1.8-7 (c)) は、基地局—ユーザ間に左回りと右回りの 2 経路を確保するため信頼性は高い。しかし、基地局—ユーザ間で光信号が多数の光スイッチを経由するため、挿入損失の影響をカバーするために光増幅器が必要となってしまう。

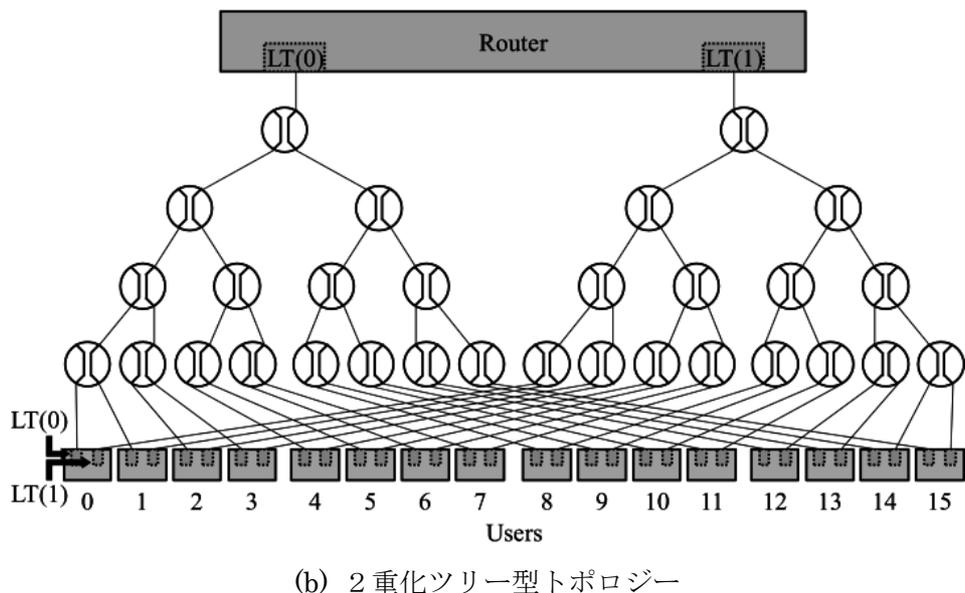
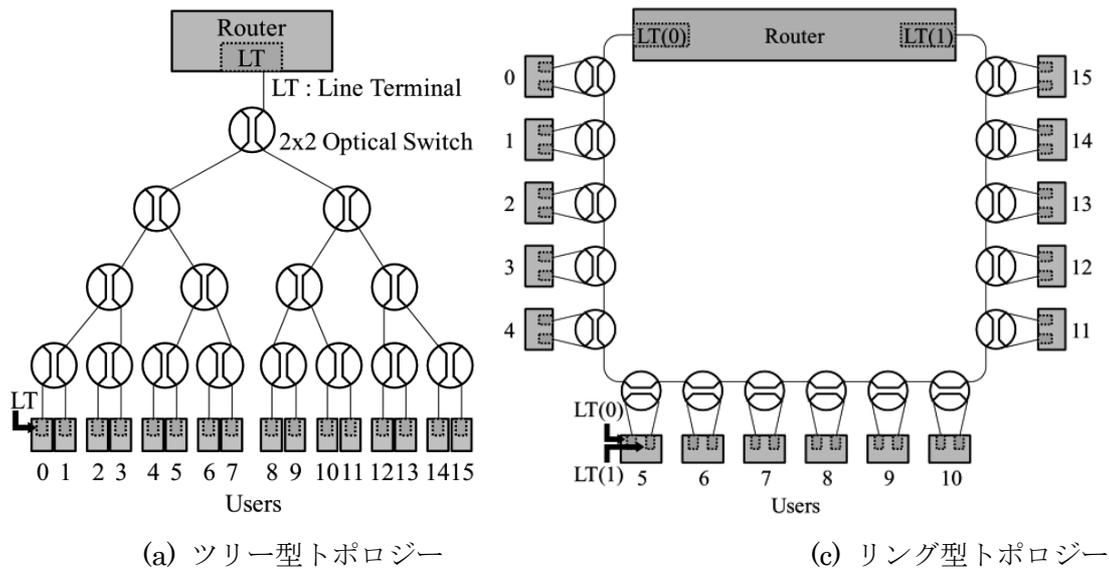


図 1.8-7 典型的なトポロジーによる大規模光スイッチングネットワーク

図 1.8-8 に本研究における提案アーキテクチャを示す。本アーキテクチャでは 2×2 光スイッチを用いて小規模なリング型トポロジーをツリー状に接続する。各 2×2 光スイッチでは光信号を 1 段下あるいは 1 段上のリングへスイッチング可能である。各リングにおける光信号の周回方向は、光信号をネットワークに入射した際の方向によって一意に定まる。

本アーキテクチャでは、ツリー構造の導入により単純なリング型トポロジーと比較して基地局-ユーザ間における経路光スイッチ数が減少し、光損失を抑制する。これにより、少数の光増幅器の使用で多数のユーザの収容を可能とする。また、基地局およびユーザに回線終端装置 (LT: Line Terminal) をそれぞれ 2 個ずつ設置し、各ユーザに対し同一の 2×2

光スイッチを共有しない独立した2経路を設置する。従って、ネットワーク上のいずれか1個の2x2光スイッチにおいて障害が発生した場合に、障害発生箇所を経由しない経路に切り替えることにより、基地局-ユーザ間の通信を継続可能となる。図 1.8-8 には、例として基地局-ユーザ2間の2経路を点線で示している。

また、本アーキテクチャは、リング段数および各リングの光スイッチ数を適切に選択することにより、所定数のユーザを二重化ツリーよりも少ない光スイッチ数で収容可能である。

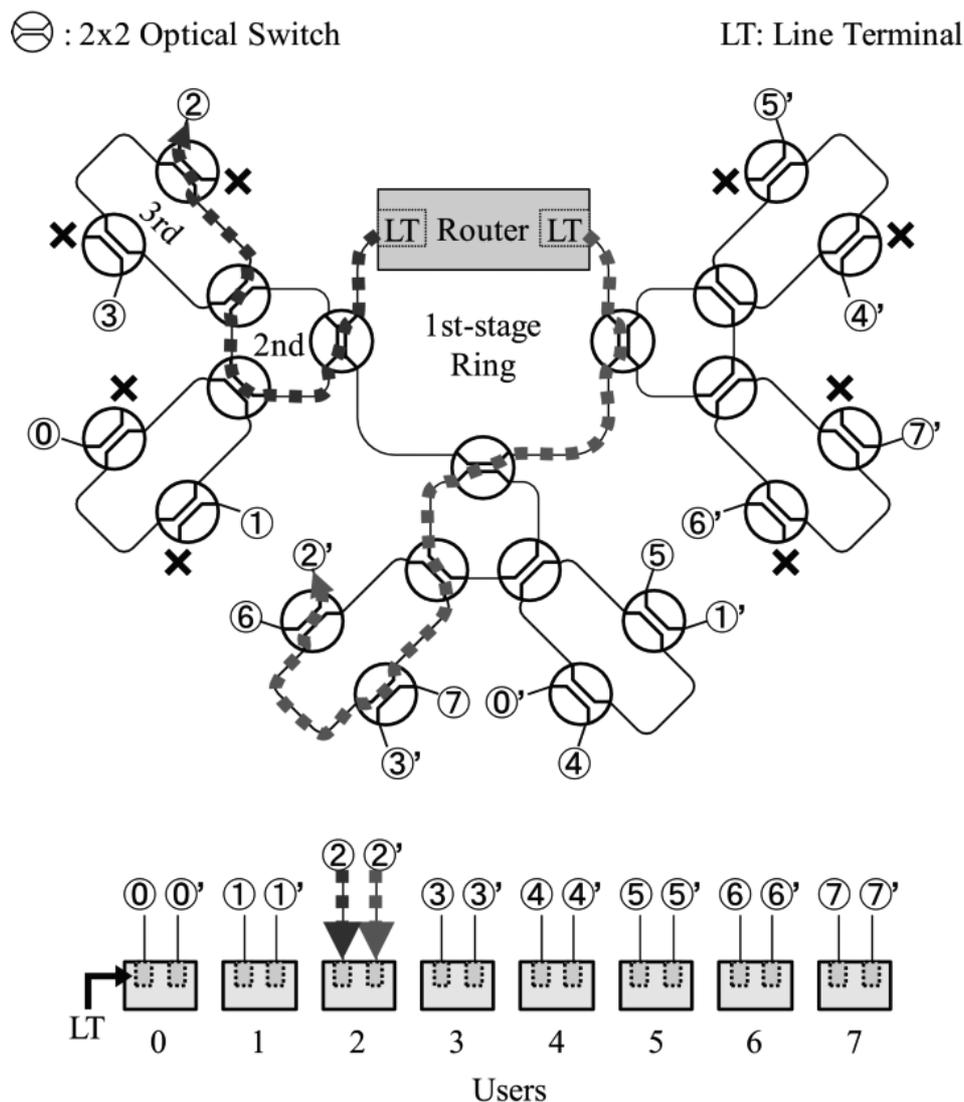


図 1.8-8 高信頼・低光損失を実現する大規模光スイッチングネットワーク

1. 9 次世代光アクセスネットワークの研究例

1. 9. 1 Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture (SARDANA)

SARDANA は、メトロアクセス融合型の大規模な WDM/TDM-PON の構築を目的としたプロジェクトである [37][38][39][40]。SARDANA という名称は、スペイン・カタルーニャ地方で行われる大勢が手をつなぎ輪になる伝統的な民族舞踊に由来する。本プロジェクトは FP7（欧州第 7 次研究・技術開発の枠組み計画）に採択され、2008 年 1 月から 2010 年 12 月までの 3 年計画で実施された。

図 1.9-1 に SARDANA のアーキテクチャを示す。SARDANA は、WDM を用いたメトロリングと TDM を用いたアクセスツリーのハイブリッド構造を有する。Central Office (CO) および Remote Node (RN) を WDM リング上に配置し、各 RN の配下に従来の PON で使用されているアクセスツリーを 2 個ずつ配置する。SARDANA は波長帯に変更はあるものの、チップセットについては XG-PON との互換性を有する。ただし、RN の構成上映像信号のオーバーレイは不可能である。伝送速度は下り 10Gbps 上り 2.5Gbps であり、ユーザあたり 100Mbps~10Gbps をフレキシブルに割り当てる。RN の最大配置数は 16 である。最大伝送距離は 100km、最大ユーザ数は $16RN \times 2 \text{ ツリー} \times 32 \text{ ユーザ} = 1,024 \text{ ユーザ}$ である。

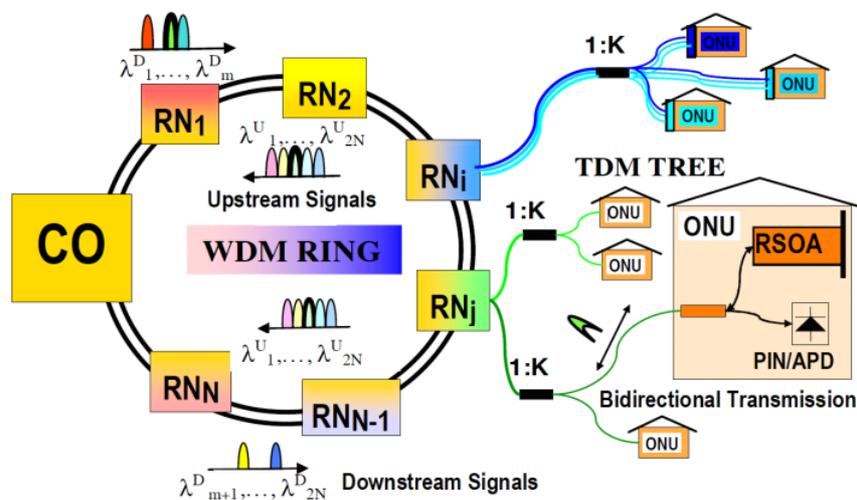


図 1.9-1 SARDANA アーキテクチャ

図 1.9-2 に RN のアーキテクチャを、表 1.9-1 に RN のスペックを示す。RN は電源不要な構造を有する。各 RN には波長フィルタと光スプリッタが備えられ、固定的に割り当てられた波長の Add/Drop を行う。Add/Drop による光信号の損失は Erbium Doped Fiber (EDF) により増幅される。ポンプ光は CO より供給されたものを用いる。

ONU は Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA) を使いカラーレス化されたものを利用する。下り光信号は受信時に再変調され上り光信号として再利用される。

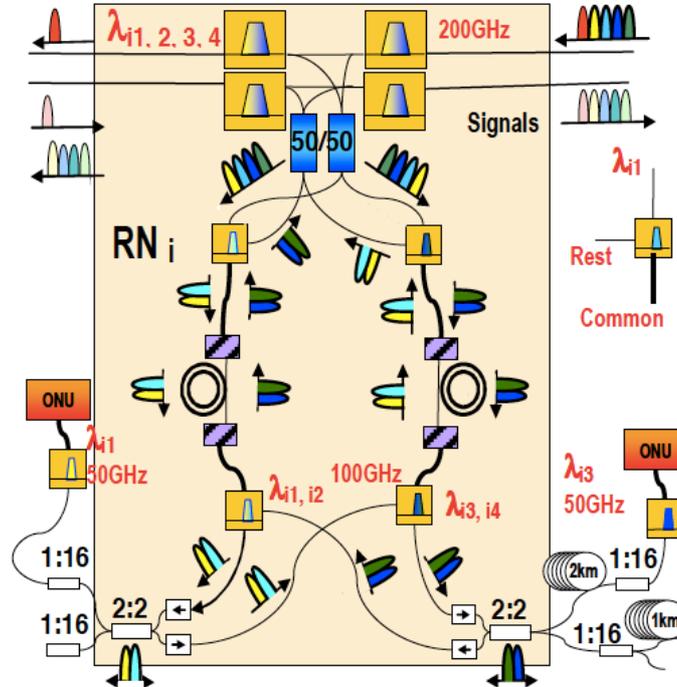


図 1.9-2 RN のアーキテクチャ

表 1.9-1 RN のスペック

Remote Node specs

REMOTE NODE (RN)	Units	Typ Value	Max Value	Comment
Wavelength of Signal Channels	nm	1530 - 1570	+ L-band in study	+ 50GHz ITU Grid
Rejection	dB	25		
Drop selectivity	dB	>25		
Wavelength drift	nm	< 0.1		
Wavelength of Pump	nm	1480	1470, 1480, 1490	
Pass Insertion loss	dB	0.53/1.0 1	0.83/1.49 1.3/2.0	With/out pump WDM RN designs in study
Drop Insertion loss	dB	6.05	7.28 9.5	
Gain	dB	14	22	Drop / In-line or combination
Noise Figure	dB	4	6	
Burst-mode penalty	dB	0.5	1	
Minimum pump	dBm	10	19	Depending on RN position

2009年5月には最初の実装実験がローマにおいて行われている。図1.9-3に実験アーキテクチャを示す。本実験では105kmのリングを構成し、RN2個、3波長を使用した。ポンプ光は1,480nmで1.2W未満とした。図1.9-4に下り方向(DN)および上り方向(UN)における受光感度を示す。BER=10⁻⁹を達成する受光感度は下り-33dBm、上り-36dBmであった。ファイバ断時のリルートによるペナルティは、両方向ともに1dB未満であった。また、2010年10月にはフランステレコム(Orange)の施設を用いたフィールドトライアルが実施されている。

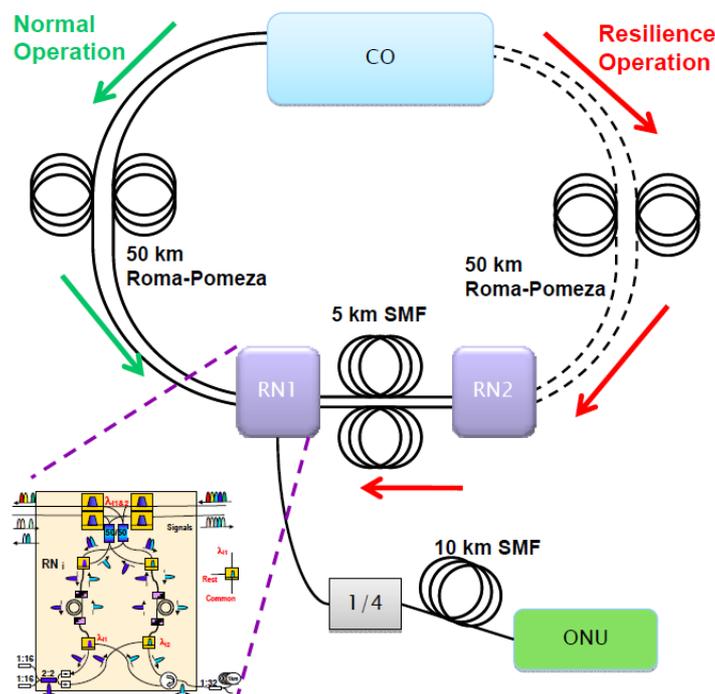


図 1.9-3 実験アーキテクチャ

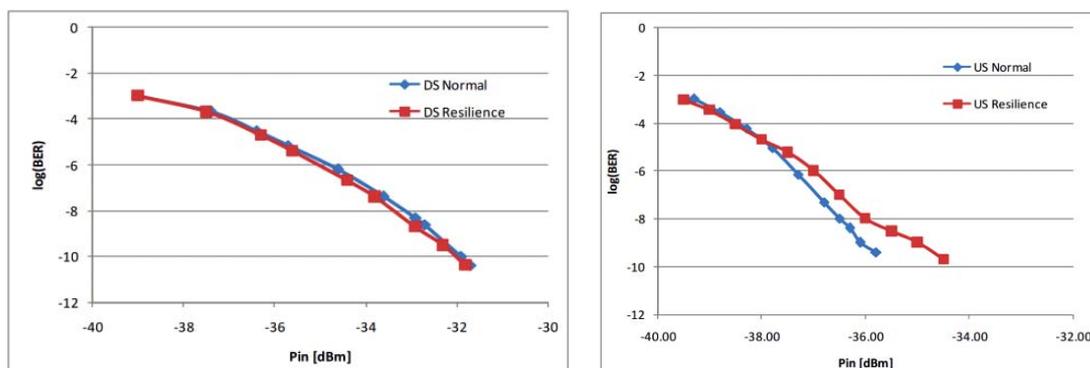


図 1.9-4 実験結果 (左:下り 右:上り)

また、表 1.9-2 は SARDANA を含めたアクセスネットワークにおける消費電力を示し、図 1.9-5 は想定するアクセスネットワークのトポロジーを示し、図 1.9-6 は消費電力の比較を示す。SARDANA (1) は現状のテストシステムで、SARDANA (2) は技術が成熟しマーケットに入る頃のコンポーネントの使用を想定した場合である。図 1.9-6 より SARDANA (2) の消費電力 [W/(Gbit/s)] が低いことがわかる。

表 1.9-2 各光アクセスネットワークモデルで使用されるパラメータ

Table 1. Main parameters used in the model of optical access networks

Long-reach network	GPON	EPON	WDM PON	10G-EPON	SARDANA (1)	SARDANA (2)	P-t-P 1GE	P-t-P 10GE
Reach extender option	DFA	DFA	DFA	DFA	ROPA	ROPA	OEO	SOA
Max. net data rate per port [Gbit/s]	DS	1	1	10	10	10	1	10
	US	1	1	10	2.3	2.3	1	10
CO-equip. Power* [W]	126.26	123.87	95.78	173.87	309.66	126.17	115.36	226.49
CPE power [W]	9.69	9.38	12.69	25.89	66.88	26.62	10.49	21.28

*The additional power consumption of reach extenders is included in the power consumption of CO equipment.

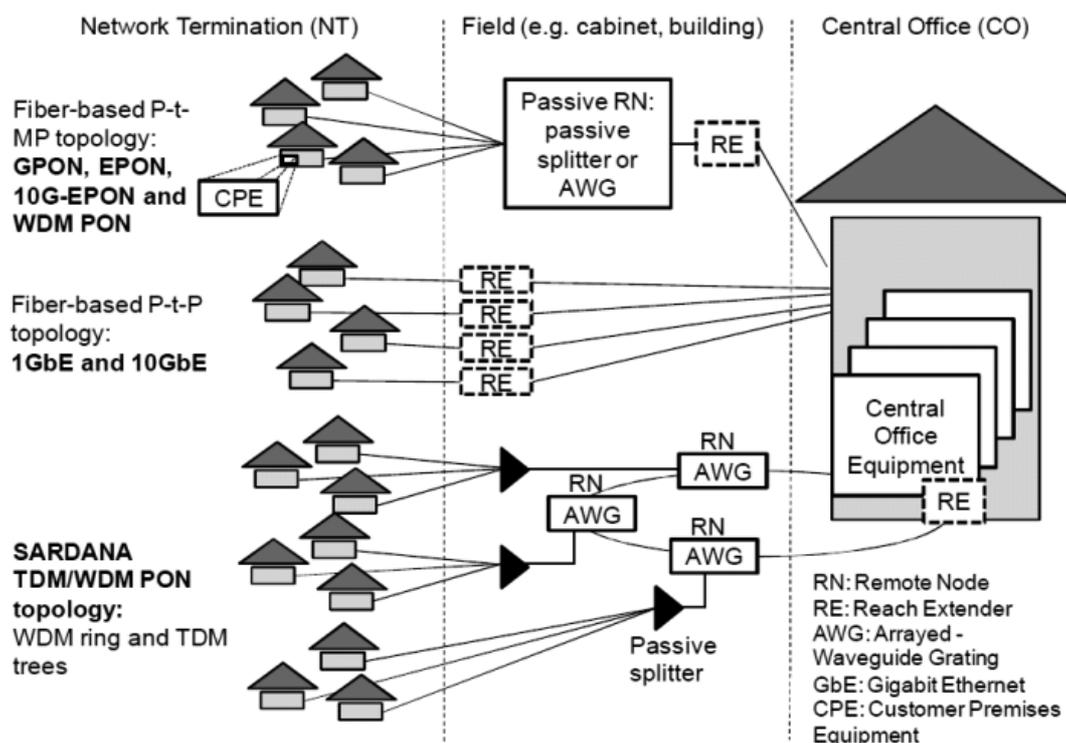


図 1.9-5 アクセスネットワークオプション

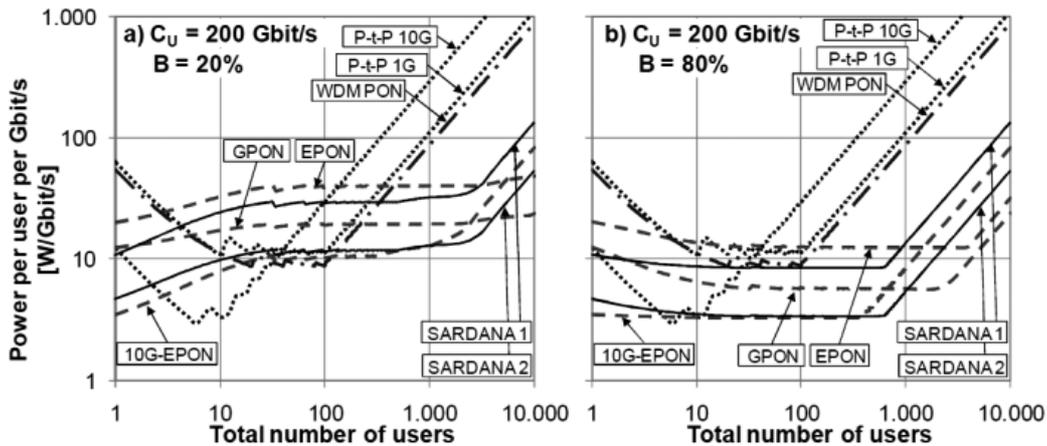


図 1.9-6 アクセスネットワークオプションにおける消費電力[W/(Gbit/s)]

1. 9. 2 Hybrid WDM/OCDM-PON (シャリフ工科大学)

インターネットを介して提供される様々なサービス（例：VoIP、IPTV、ビデオ会議）に柔軟に対応するために、WDM および OCDM を利用したマルチレート伝送・マルチ QoS を実現可能な次世代 PON システムの研究が行われている [41]。

WDM-PON は、現在主流の TDM ベースの PON（例：GE-PON, G-PON）の何倍もの帯域をユーザに提供する手段として注目を集めている。しかし、使用可能な波長数がユーザ数に対して少ない上、ユーザごとに個々の波長を割り当てるため帯域利用効率が低下するという問題が存在する。一方、OCDM-PON はユーザごとに異なる光直交符号を割り当てる方式であり、非同期ユーザ間で波長資源を共有することが可能である。しかし、複数のユーザが同じ波長を用いて信号を送信することにより Multiple Access Interference (MAI) と呼ばれる干渉ノイズが発生する。したがって、各ユーザに対して所望の QoS を保証するためには同時に伝送可能なユーザ数を制限する必要がある。

そこで、本研究では WDM-PON と OCDM-PON を組み合わせることで上記の問題を解決し、さらにマルチレート伝送やマルチ QoS を実現することで複数サービスの共存に対応する。さらに、マルチレベルシグナリング技術と光論理ゲートに基づく干渉除去装置を使用することで MAI の影響を軽減する。

図 1.9-7 に WDM/OCDM-PON における帯域割り当ての様子を示す。図 1.9-7 では OCDM の符号数は N_c 、WDM の波長数は N_w であり、合計で $N_c \times N_w$ 台の ONU を収容する。OCDM では図 1.9-8 の右下に示すような長さ・重みの異なる光直交符号 (Multi-Length Variable-Weight Optical Orthogonal Codes: MLVW-OOCs) を用いる。光直交符号では、符号長が長いほど伝送レートは減少するが、使用可能な符号数が増加する。また、符号の重み（符号中の‘1’の数）が多いほどユーザの QoS は向上するが、使用可能な符号数は減

少する。本提案では、サービスクラスに基づいて使用する MLVW-OOC の長さ・重みを設計する。例えば、高い QoS 保証が必要なユーザは重みの大きい符号を用いるクラスに、高い伝送レートが必要なユーザは短い符号を用いるクラスに分類する。

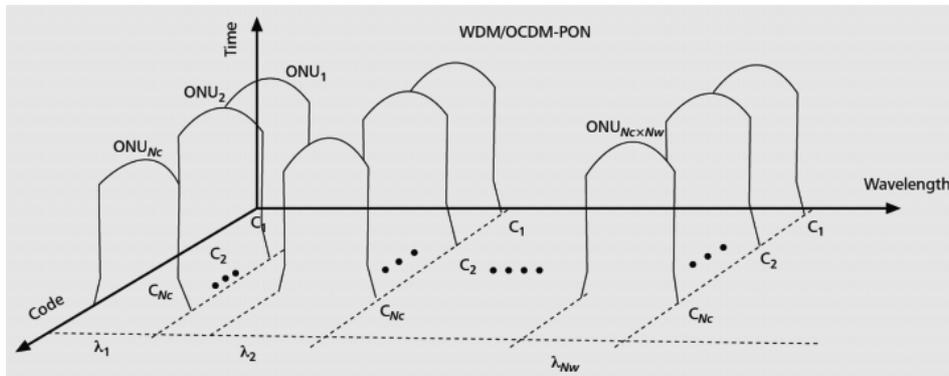


図 1.9-7 WDM/OCDM-PON における帯域割り当て

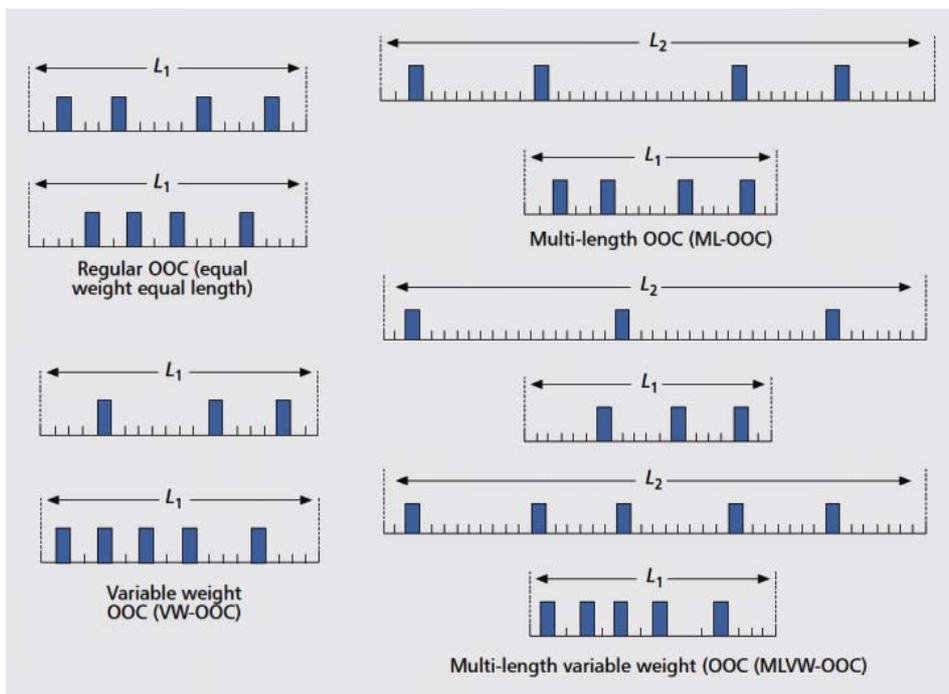


図 1.9-8 光直交符号の種類

WDM/OCDM-PON における最大伝送レートは、符号長が最も短いクラスの伝送レートに制限される。WDM/OCDM-PON では超高レート伝送を要求するユーザをサポートするために、OCDM-PON と波長および伝送路を共有することが可能である。図 1.9-9 に OCDM-PON と WDM/OCDM-PON の帯域共有の様子を示す。本方式では、全符号のうち一部を OCDM-PON に、残りの符号を WDM/OCDM-PON に割り当てる。図 1.9-9 では符

号 $C_1 \sim C_k$ が OCDM-PON に、 $C_{k+1} \sim C_{N_c}$ が WDM/OCDM-PON に割り当てられている。OCDM-PON ではすべての波長 $\lambda_1 \sim \lambda_{N_w}$ にわたる光信号に対し、同一符号により符号化を行う。従って、符号を割り当てたユーザに対して超高レート伝送を提供可能である。残るユーザに対しては、前述した WDM/OCDM-PON により、各ユーザの所望する QoS 保証や伝送レートに応じて柔軟に帯域割り当てを行う。

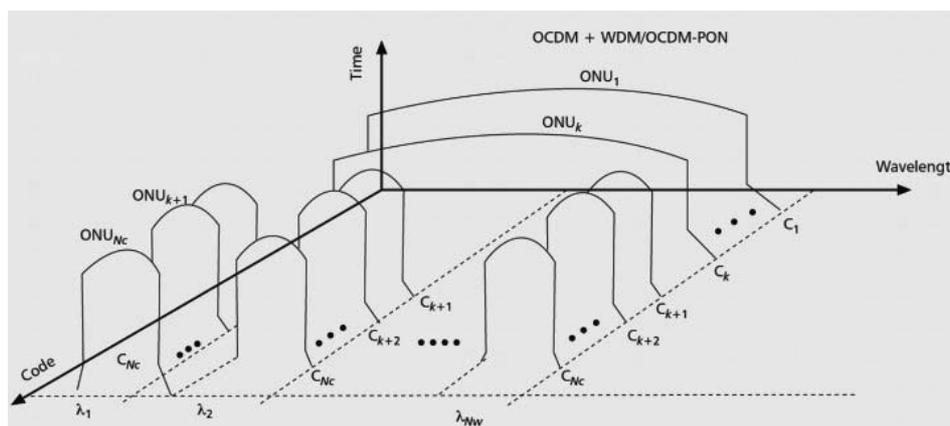


図 1.9-9 OCDM-PON と WDM/OCDM-PON の帯域共有

1. 9. 3 長距離 DWDM ハイブリッド PON (韓国電子通信研究院)

本研究では、既存の G-PON の長延化およびリンク容量の増大を可能にするために、DWDM-PON および Reach Extender (RE) を用いたハイブリッド PON を提案している [42]。

図 1.9-10 に (a) 既存の G-PON および (b) ハイブリッド PON の敷設方式を示す。(a) 既存の G-PON では、図の範囲をカバーするため最低 7 カ所に Central Office (CO) を配置する必要がある。一方、(b) ハイブリッド PON では、CO を 1 箇所に統合し、CO を排した地点には代わりに RE を配置する。図 1.9-11 にハイブリッド PON の詳細なアーキテクチャを示す。CO には G-PON および DWDM-PON の OLT が設置される。CO-RE 間では DWDM-PON が使用され、RE ごとに 1 波長が割り当てられる。RE は光信号の 3R 再生機能および DWDM-PON から G-PON への変換機能を有する。RE-ONU 間は G-PON が使用される。分岐数は RE あたり 128 である。

下り通信では、G-PON OLT から送信された 1,490nm の光信号が DWDM-PON OLT において C バンド (32 チャネル) の光信号に変換される。光信号は DWDM-PON のリンクを伝送され RE に到達し、AWG によりフィルタリングされた後、内蔵 ONT において G-PON の波長に変換されると同時に、G-PON Transmission Convergence (GTC) フレームの再生が行われる。再生された信号は、G-PON のリンクを伝送され、G-PON の ONT

へ到達する。一方、上り通信では、G-PON ONT から送信された 1,310nm のバースト光信号が逆の経路を通り RE に到達する。バースト光信号は、RE において下り通信と同じ波長の連続光信号に変換される。光信号は DWDM-PON のリンクを伝送され、DWDM-PON OLT に到達し、再び G-PON の 1,310nm の光信号に変換され、G-PON の OLT へ到達する。

本ハイブリッドPON では、COの削減により CAPEX/OPEXの削減が可能である。また、幹線光ファイバあたり最大で 40km 伝送、4,096 加入者を実現する。

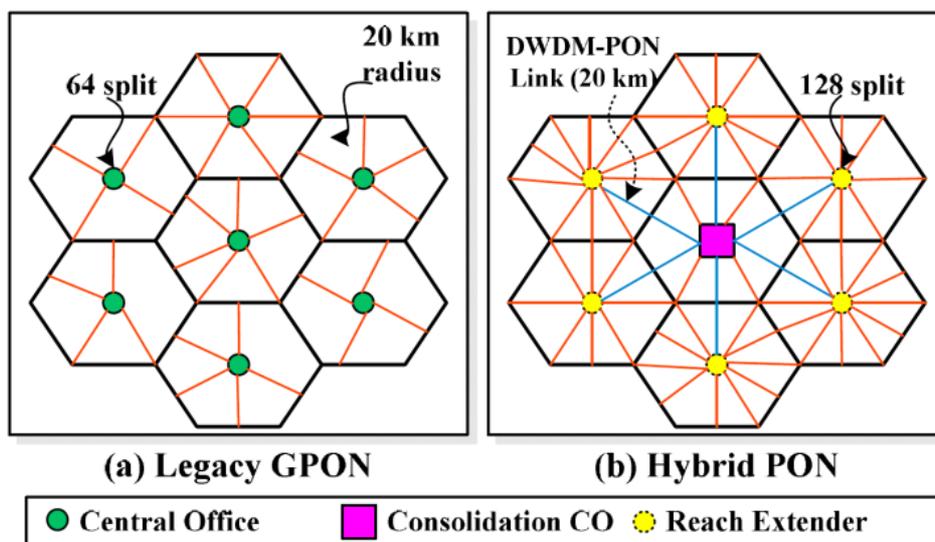


図 1.9-10 既存の G-PON およびハイブリッド PON の敷設方式

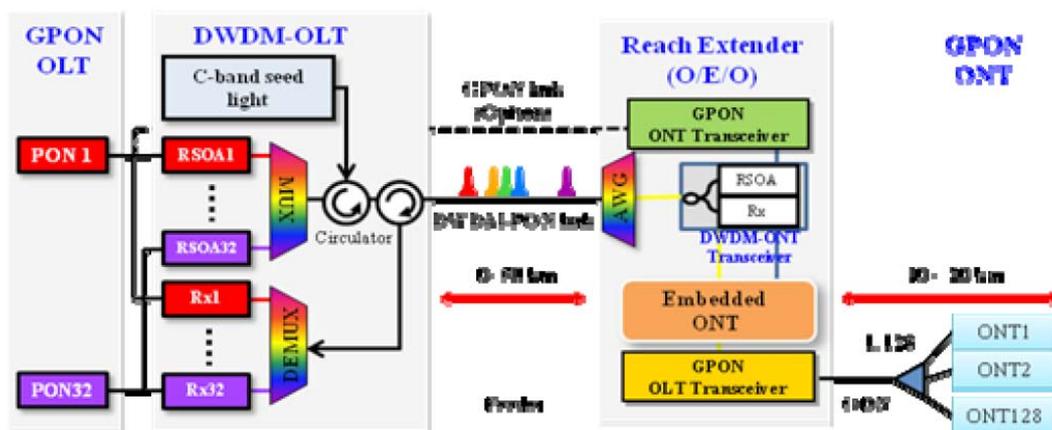


図 1.9-11 ハイブリッド PON のアーキテクチャ

1. 9. 4 WDM/TDM ハイブリッド型メトロアクセス融合型次世代アクセスネットワーク (三菱電機)

本研究では、現在のアクセスネットワークが抱える課題を解決するために、メトロ・コア

向け技術として注目されている Optical Transport Network (OTN) を用いた WDM/TDM ハイブリッド型メトロアクセス融合アクセスネットワークを提案している [43]。

図 1.9-12 に本ネットワークの OLT および RN の構成を示す。また、図 1.9-13 に上り通信帯域制御方法の概要を示す。本ネットワークでは現在のコアネットワークの配下に OLT を配置し、メトロネットワーク (ROADM リング) の配下に RN を配置する。RN あたり 64 トランスポンダを収容し、ODN を介してトランスポンダあたり最大 32 台を収容する。

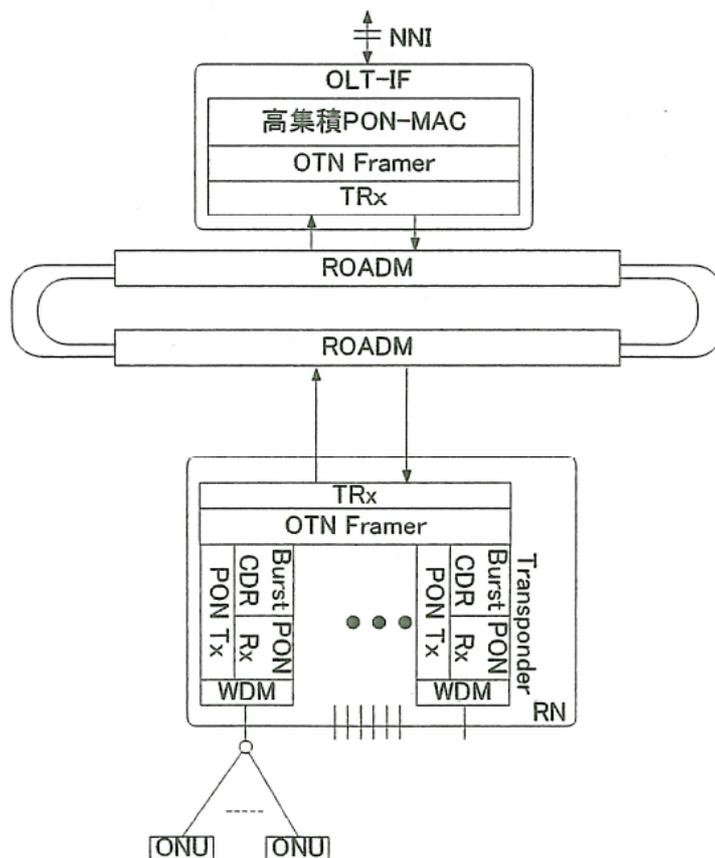


図 1.9-12 OLT および RN の構成

ONU-RN 間では現在使用されている 32 分岐の ODN を流用し、10GE-PON で規定されたフレームフォーマットおよび波長を用いて通信を行う。RN は上りバースト信号を終端し、GE-PON フレームと OTN フレームを相互変換する機能を有する。OTN は Ethernet フレームを直接収容できるよう標準化が進められており、10GE-PON との親和性が高い。OLT-RN 間では RN ごとに 1 波長を割り当て、連続光による OTN 通信を行う。OLT は RN 配下の ONU に対する上り TDM 制御を一括して行う。

PON の多分岐化はフレームのオーバーヘッド増加により帯域利用効率の低下を招くが、本方式では、ODN あたりの分岐数が既存方式と変わらないため、PON 区間の帯域利用効

率を 75%程度に維持することが可能である。また、RN が 3R 再生装置としての役割を果たすため、OLT-ONU 間伝送距離の延伸が可能になる。さらに、本方式ではアクセス系機器の機能を集約することにより、CAPEX/OPEX の低減および省電力化が期待される。

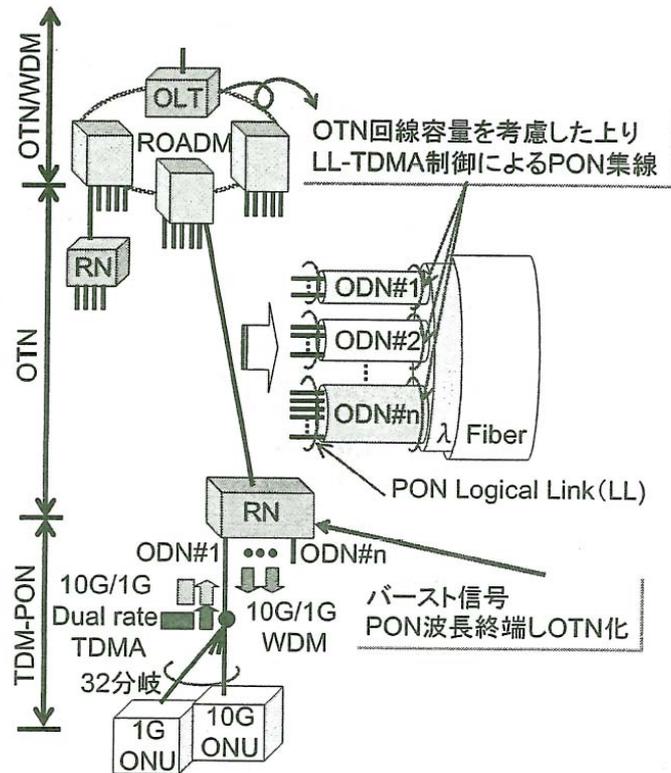


図 1.9-13 上り通信帯域方法の概要

1. 9. 5 アクティブ型光アクセスネットワーク（日立製作所）

本研究は、スプリッタの代わりに導波路光スイッチを用いたアクティブ型光アクセスネットワークを提案している [44]。導波路光スイッチは、Ethernet スイッチ等の電気処理を行うスイッチに比べ消費電力が低く、超高速なスイッチングが可能である。図 1.9-14 に PON とアクティブ光アクセスのアーキテクチャを示す。

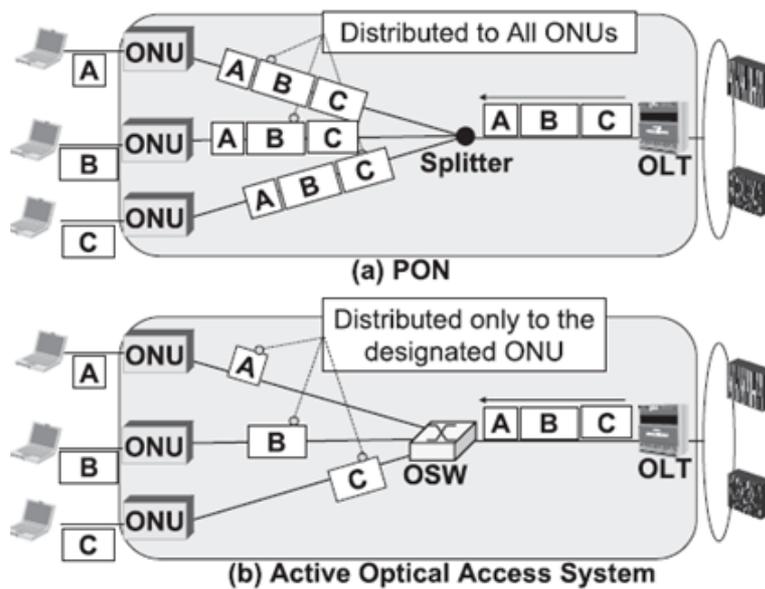


図 1.9-14 PON とアクティブ光アクセスとの比較

光スイッチは、スプリッタに比べ光パワーの挿入損失が小さいため、多ユーザ化および長距離伝送が可能となっている（128ONU、40km）。多ユーザ長距離により、システムの集約効果を得ることができる。また、PONにおいては、スプリッタを使用する構造上、悪意ある ONU が他の上り通信に干渉することが可能であったが、本システムでは、スイッチを用いることで物理的に 1 対 1 通信が確立するため悪意ある ONU の干渉を防ぐことができる。

アクティブシステムでは、PON と違いデータ送信前にスイッチを制御する必要がある。図 1.9-15 は制御フレーム、図 1.9-16 は Downstream、および図 1.9-17 は Upstream データ送信を示す。

各パラメータは以下のとおりである。

- tr : OSW が制御フレームを受け取る時間
- Ts : 切替え遅延
- Tc : 制御フレーム処理遅
- Tf : データ送信時間
- Tr : シグナル搬遅延
- tg : Grant start time

Opcode: Switch Control
Timestamp
Direction (0: Up/1: Down)
Num of Schedule
#1 (t, Port#)
#2 (t, Port#)
⋮
#n (t, Port#)

図 1.9-15 制御フレーム

本システムでは OLT、OSW および ONU で同期を取り、OSW は OLT から送られるスイッチコントロールフレームに記述されるスイッチングスケジュール通りにスイッチングを行う。これにより、スイッチにおいてデータ解析を行うことなくオール光通信が可能となる。

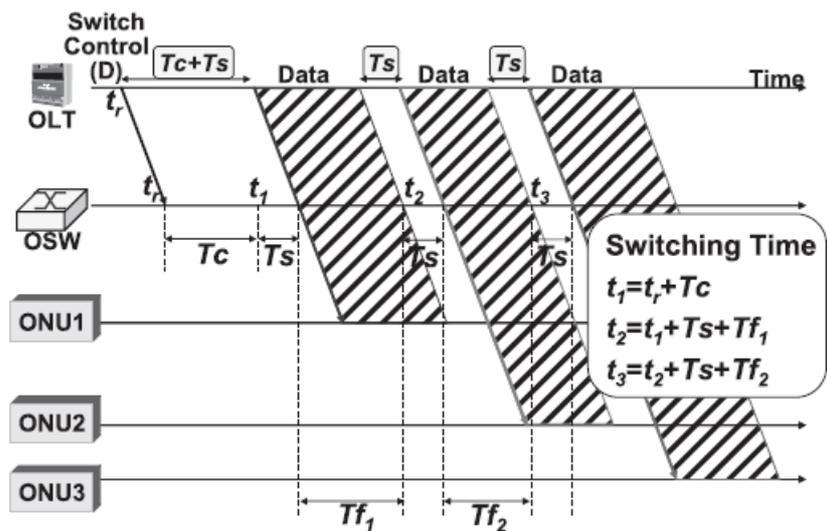


図 1.9-16 Downstream データ送信

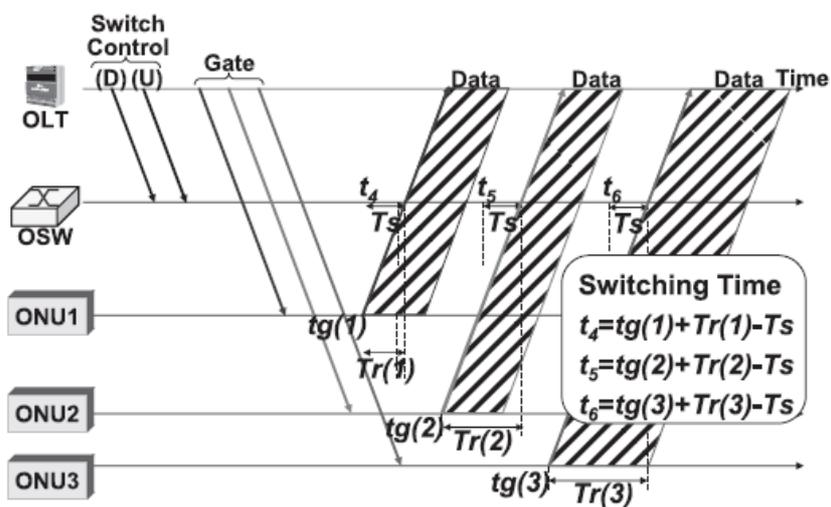


図 1.9-17 Upstream データ送信

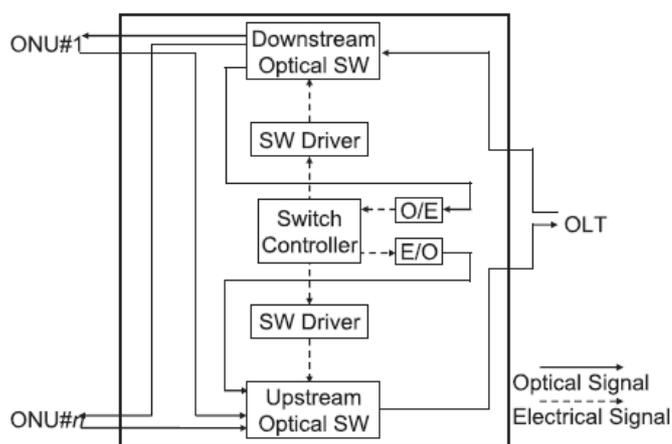


図 1.9-18 OSW の構造
システム

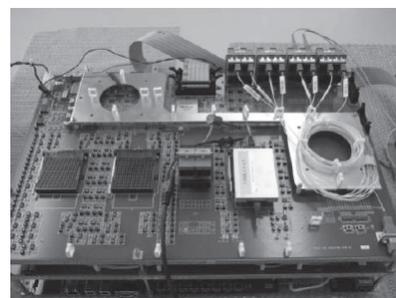


図 1.9-19 OSW プロトタイプ

また、図 1.9-18 に OSW 構造、および図 1.9-19 に OSW プロトタイプシステムを示す。本研究では、プロトタイプシステムでの試験を成功させている。

1. 9. 6 リモートリピータを用いた長距離・多分岐 EPON (メルボルン大学)

本研究では、Remote Repeater Node (RN) を利用した EPON の長距離・多分岐化方式を提案している [45]。RN において OLT-ONU 間を伝送されるフレームの監視・制御を行うことにより、収容 ONU 数が増加した場合でも帯域利用効率および隣接 ONU 間の伝送遅延を改善する。

図 1.9-20 に本ネットワークのアーキテクチャを示す。本ネットワークでは既存の EPON の 2 倍となる 64ONU を 1OLT により収容する。OLT-ONU 間のフレーム処理効率を高めるため、ONU を 2 つのサブネットに分割し、各サブネットに RN を配置する。RN は受信したすべてのフレームのヘッダ情報を監視し、すべての ONU の Logical Link ID (LLID) および MAC アドレスを自身のフォワーディングテーブルに格納しておく。OLT から受信したフレームの宛先 MAC アドレスが配下のサブネット内に存在しない場合はフレームを破棄する。これにより、OLT-ONU 間の帯域利用効率の向上を図る。また、ONU が同一サブネット内の ONU へフレームを送信する場合は、OLT を中継せずに RN より ONU へ送信する。これにより、隣接 ONU 間の伝送遅延および OLT の処理負荷を抑制する。

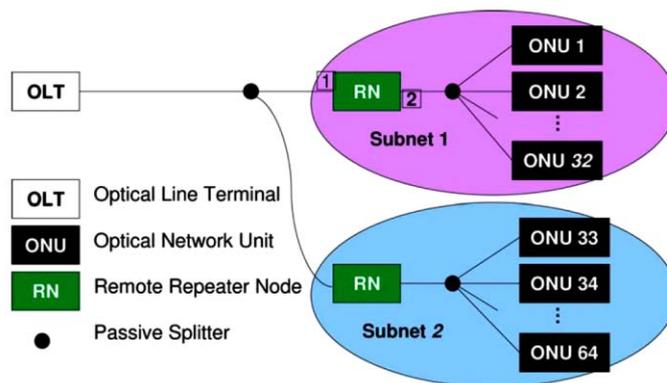


図 1.9-20 リモートリピータを用いた長距離・多分岐 EPON アーキテクチャ

図 1.9-21 に RN の機能ブロック図を示す。RN は ONU から受信した上りフレームをバッファ B1 へ格納する。その後、同一サブネット内の ONU あてのフレームはバッファ B4 へ格納し、それ以外のフレームは OLT へ送信する。一方、OLT から受信した下り方向のフレームはバッファ B2 に格納する。宛先がサブネット内に存在しない場合はフレームを破棄する。Multi-Point Control Protocol (MPCP) メッセージを含むフレームは優先度が高いため、スケジューリング間隔の短いバッファ B5 へ格納し、それ以外のフレームはバッファ B3 へ格納する。B5 に格納した MPCP メッセージを含むフレームは、12.24 μ s (最大フレームサイズ 1518Byte のフレーム伝送時間とフレーム間ギャップの合計値) 待機した後 ONU に送信する。B3、B4 に格納したフレームは、B5 内フレームの送信処理の空き時間に送信する。

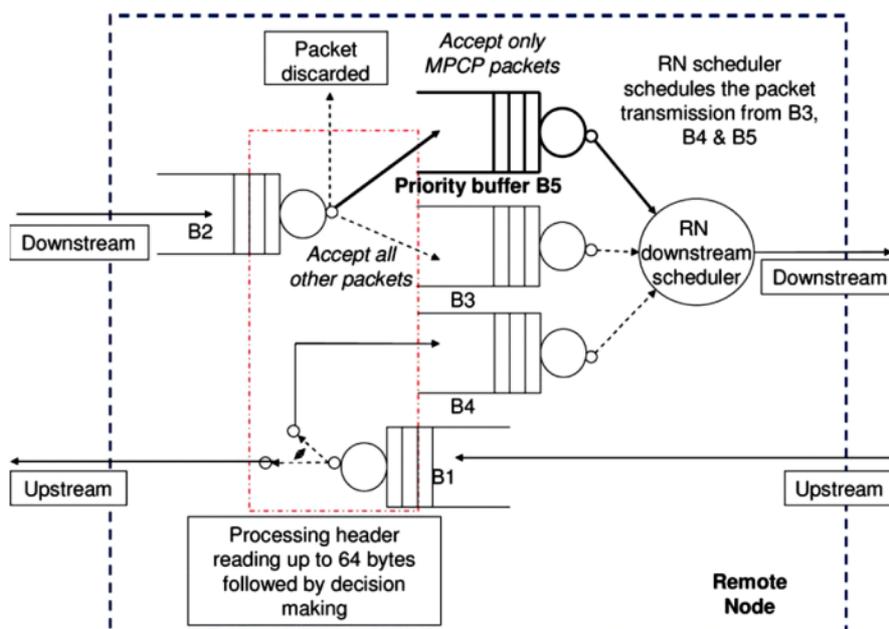


図 1.9-21 RN の機能ブロック図

図 1.9-22 にトラフィック増加に対する ONU あたり帯域幅のシミュレーション結果を示す。RN が存在するネットワークでは、RN のフレーム破棄処理およびフレーム転送処理により、高トラフィック時に ONU が使用可能な帯域幅が増加する。

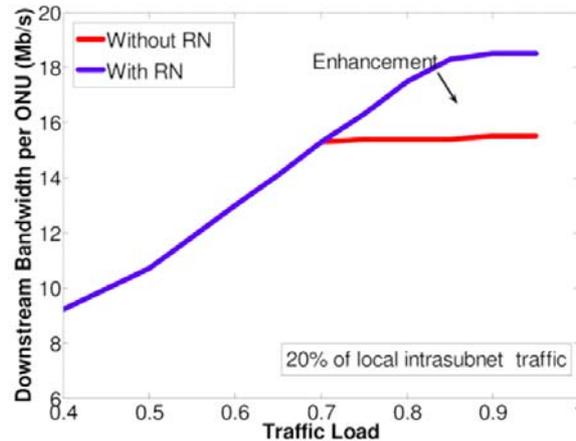


図 1.9-22 トラフィック増加に対する ONU ごとの帯域幅

1. 9. 7 OFDM-PON (NEC Laboratory America)

本研究では、光サブキャリアを水平偏波成分と垂直偏波成分に分け、携帯電話での MIMO (Multi Input Multi Output) 方式の考え方を取り入れ、偏光多重方式 (POLMUX : Polarization Multiplexing) と DSP 技術を活用した等価なしの直接検出方式により、16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式を用いた 40Gbps の OFDM-PON の実験確認結果について報告している [46]。1:32 分岐、SSMF (standard single mode fiber) による伝送距離 20km の条件下で、ZF (Zero Force ※1) と ML (Maximum Likelihood ※2) を用いた DSP ベース処理により OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) の利得 21dB を確保している。

※1: 推定した伝達係数行列 H の逆行列 (H^{-1}) を各受信信号に乗ずるこ

とで各送信信号を検出する方法

※2: 与えられたデータの確率分布の母数について推測し、データを確率的に

最も良く説明する推定値を見つけるために用いられる方法

周波数ドメインでの POLMUX-OFDM 信号の周波数スペクトルを図 1.9-23 に示す。直交偏光面 Pol-X の C_x と直交偏光面 Pol-Y の C_y は互いに直交する光キャリア信号、 f_c は中間 Radio Frequency キャリア、 $S_{x,i}$ は i 番目のサブキャリアの Pol-X 面での変調された OFDM シンボルの複素数、FFT (Fast Fourier Transform) のサイズが N である時、 $S_{x,N+i+1}$ は $N-i+1$ 番目のサブキャリアの Pol-X 面での変調された OFDM シンボルの複素数を示しアナログ値

を持つ。 S_{Yi} 、 $S_{Y,N+i}$ は同様に、Pol-X面に変調されたシンボルの値を示す。図 1.9-24 に示すように、Pol-X面およびPol-Y面から出た変調信号は、光ファイバの中で偏光波の回転が発生し、相互の信号の雑音源となる。

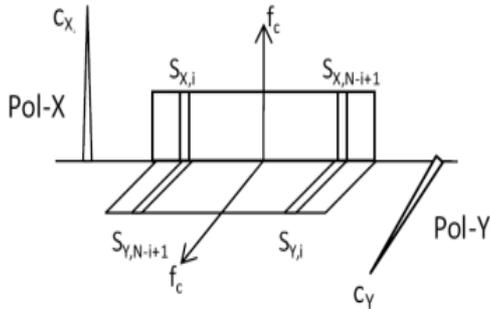


図 1.9-23 POLMUX-OFDM 信号の周波数スペクトル

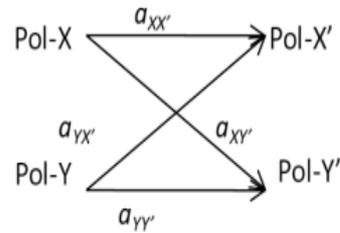
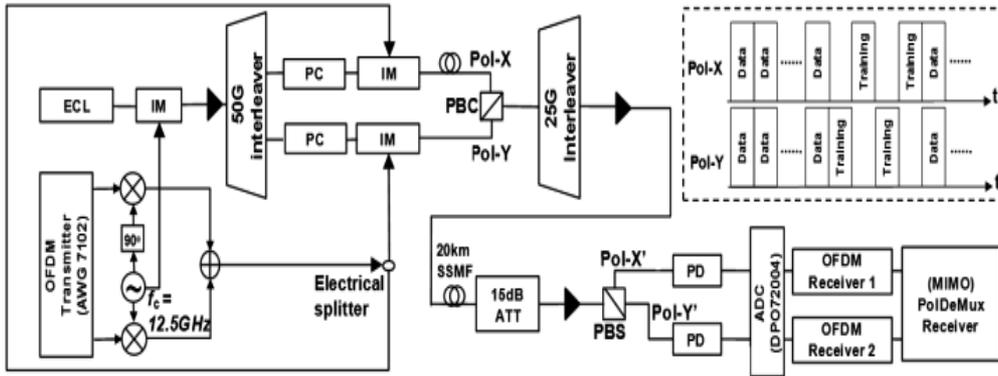


図 1.9-24 POLMUX-OFDM 伝送のチャネルモデル

図 1.9-25 に POLMUX-OFDMA-PON 実験システムの構成を示す。その特徴は、図 1.9-25 の右下に示す ONU 内の PolDemux Receiver (MIMO) 内に、block-diagonal equalization 機能を持たせ、従来 OFDM-ONU で必要であったコヒーレント受信器を取り除いていることにある。FFT のサイズは 256 で、1/32 の繰り返しプレフィックスが適用される。トレーニングシーケンスは 128 OFDM データフレーム、 f_c は 12.5GHz、以前の評価結果と比較するため 4x4 の ZF を使用した。



Experimental setup for POLMUX-OFDMA-PON with direct detection over 20km SSMF plus 15dB attenuator. (PC = polarization controller; IM = intensity modulator; ECL = external cavity laser; ATT = attenuator; PBC/PBS = polarization beam combiner/splitter)

図 1.9-25 POLMUX-OFDMA-PON 実験システムの構成

1. 9. 8 時分割サービスアグリゲーションネットワーク（慶應義塾大学）

本研究では、1.9.5 節において述べたアクティブ型光アクセスネットワークをベースに、プロトコルの異なる複数の通信サービスを時分割多重により統合的に収容する大規模な全光ネットワークの構築を目指している [47]。

図 1.9-26 に本ネットワークのアーキテクチャを示す。本ネットワークでは、超高速導波路光スイッチにより構成されたツリー型の伝送網により、OLT-ONU 間を光トランスパレント接続する。OLT は Field Programmable Gate Array (FPGA) 等の書き換え可能な集積回路を用いて構成し、通信サービスごとの仮想 OLT をソフトウェア的に実現する。通信サービスとしては、インターネット接続、IPTV、専用線サービス、モバイルバックホール、遠隔データセンタ間通信などを想定している。各仮想 OLT は個々の通信プロトコルに従い、データフレームの生成および符号化・復号化を実行する。同様に、ONU はユーザの所望する通信サービスに応じて仮想 ONU を生成し、仮想 OLT からのデータフレームを受信する。

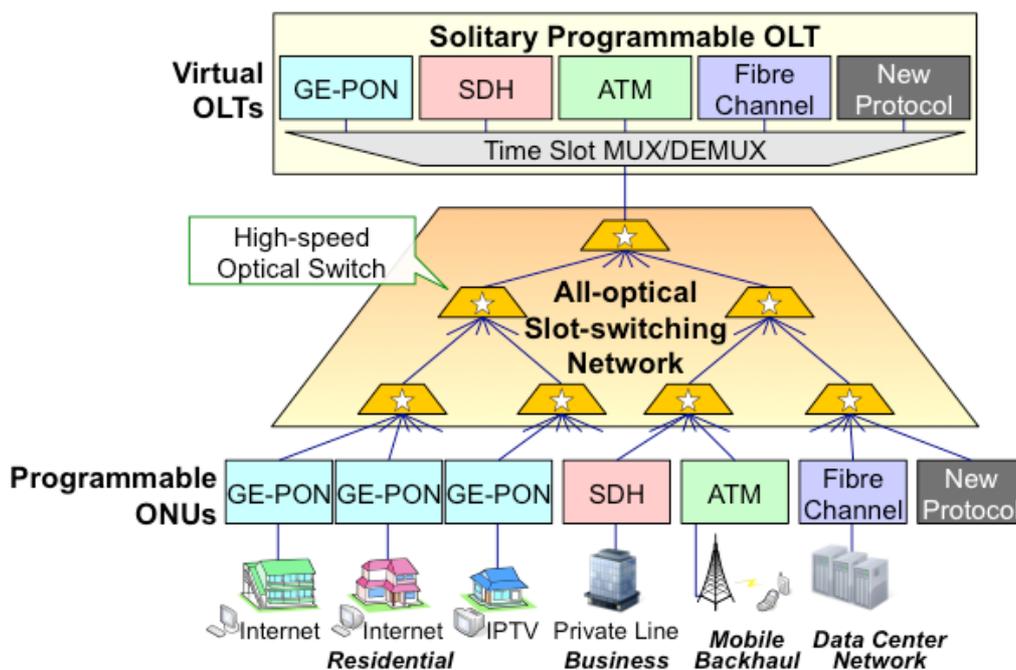


図 1.9-26 時分割サービスアグリゲーションネットワークのアーキテクチャ

図 1.9-27 に本ネットワークにおける帯域割り当ての例を示す。本ネットワークでは、各仮想 ONU に対しタイムスロットを論理リンクとしてアダプティブに割り当てる。タイムスロットの割り当て量および割り当て周期は、各通信サービスにおいて保証すべき QoS（最小帯域幅、最大遅延量、ジッタ等）および通信プロトコル上の制約（接続維持や輻輳制御におけるタイムアウト値等）を考慮して動的に計算する。

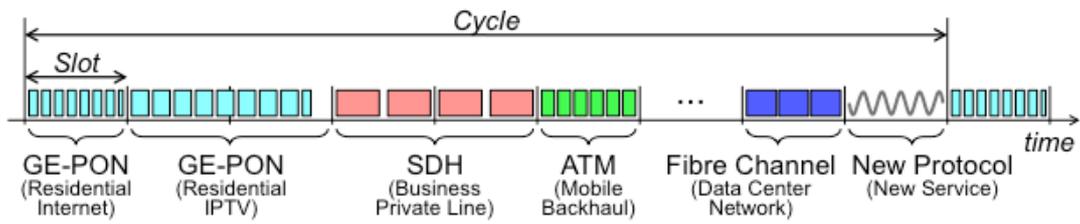


図 1.9-27 帯域割り当ての例

本ネットワークの実現により、通信インフラの統合および電気処理を行うノードの削減による消費電力の大幅な削減が見込まれる。また、独自の通信プロトコルを使用する新規サービスを低コストで参入させることが可能となり、ネットワークサービス市場の活性化をもたらす。今後は光スイッチ制御方式やデータ転送手順、WDM との併用等について研究を行う予定である。

【参考文献】

- [1] 矢島祐輔, 栖川淳, “ITU-T/FSAN における光アクセス標準化 —NG-PON—,” 電子情報通信学会技術報告, CS2011-3, pp. 11-16, 2011 年 4 月.
- [2] 滝澤基行, 吉田浩章, “IEEE における光アクセス標準化動向 —IEEE P1904.1 (SIEPON)の概要—,” 電子情報通信学会技術報告, CS2011-1, pp. 1-6, 2011 年 4 月.
- [3] E. Wong, "Current and Next-Generation Broadband Access Technologies," OFC/NFOEC 2011, NMD1, Los Angeles, USA, March 2011.
- [4] T. Mitsui, K. Hara, M. Fujiwara, J. Kani, M. Tadokoro, N. Yoshimoto, H. Hadama, “Simple and Scalable WDM/TDMA-PON using Spectral Slicing and Forward Error Correction”, OFC/NFOEC 2011, OTuB5, Los Angeles, USA, March 2011.
- [5] K. Y. Cho, J. H. Chang, B. S. Choi, Y. Takushima, and Y. C. Chung, “ Demonstration of 25.78-Gb/s, 20-km Reach WDM PON Using Directly-Modulated Bandwidth-Limited RSOA”, OFC/NFOEC 2011, OMP2, Los Angeles, USA, March 2011.
- [6] 伊丹誠, “OFDM の基礎と応用技術” Fundamentals Review, Vol.1, No.2 p 35-43, 2007. 10 月 1 日
- [7] N. Cvijetic, N. Prasad, D. Quan, J. Howard, T. Wang, “Computationally Efficient DSP-based MIMO Equalization for OSNR gains in 40Gb/s OFDM-PON,” OFC/NFOEC 2011, OTuK6, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [8] L.A Neto, P. Chanclou, B. Charbonnier, A. Gharba, N. Genay, R. Xia, M. Ouzzif, C. A Berthelemot, J.L Masson, D. Erasme, E. Grard, V. Rodrigues, “On the Interest of Chirped Lasers for AMOOFDM Transmissions in Long Distance PON Networks”, OFC/NFOEC 2011, OWK4, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [9] D. Qian, J. Hu, T. Wang, “Hybrid 2.5G/10G Co-existing OFDMA-PON Employing Single Receiver at the OLT”, OFC/NFOEC 2011, OWB4, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [10] 郵政省通信総合研究所 光技術部光通信技術研究室,
http://www.nict.go.jp/publication/CRL_News/0001/hikari.html
- [11] Y. Tanaka, S. Yoshima, N. Kataoka, J. Nakagawa, N. Wada, K. Kitayama, "100-km uplink transmission of 10G- and 1G-ONU co-existing TDM-OCDMA-PON system using dual-rate burst-mode receiver”, OFC/NFOEC 2011, OThT5, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [12] N. Kataoka, N. Wada, X. Wang, G. Cincotti, A. Sakamoto, Y. Terada, T. Miyazaki, K. Kitayama, “Field Trial of Duplex, 10 Gbps×8-User DPSK-OCDMA System Using a Single 16×16 multi-Port Encoder/Decoder and 16-Level Phase-Shifted SSFBG Encoder/ Decoders”, Journal of Light wave technology, Vol. 27, No. 3, Feb. 2009.
- [13] K. Y. Cho, K. Tanaka, T. Sano, S. P. Jung, J. H. Chang, Y. Takushima, A. Agata, Y. Horiuchi, M. Suzuki, Y. C. Chung, “Long-Reach Coherent WDM PON Employing Self-Polarization-Stabilization Technique”, Journal of Light wave Technology, Vol.29, No.4, Feb. 2011.
- [14] D. Jacklyn, L. António, “Architectural Optimization of Coherent Ultra-Dense WDM based Optical Access Networks”, OFC/NFOEC 2011, OTuB7, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [15] D. Breuer, F. Geilhardt, R. Hulsermann, M. Kind, C. Lange, T. Monath, and E. Weis, Opportunities for Next-Generation Optical Access, IEEE Commun. Mag., pp. S16-S24, Feb. 2011.
- [16] Yi Zhang, Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee, Energy Efficiency in Telecom Optical Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 12, No. 4, Fourth Quarter 2010.
- [17] 水口 潤, 堀田善文, 杉村浩史, 名倉健一, 小崎成治, 光集約 PON システムにおける検討, 電子情報通信学会 信学技報 CS2010-90.

- [18] 田中正基、西谷隆志、向井宏明、小崎成治、山中秀昭、10G-EPON における異速度 ONU 混在収容時の公平性を実現する適応型 DBA アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J93-B, No.12, pp. 1593-1601, 2010.
- [19] Kun Yang, Shumao Ou, Guild, K., Hsiao-Hwa Chen, Convergence of Ethernet PON and IEEE 802.16 Broadband Access Networks and its QoS-Aware Dynamic Bandwidth Allocation Scheme, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 27, Issue 2, pp. 101 – 116, 2009.
- [20] Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore, Suman Sarkar, and Biswanath Mukherjee, Building a Green Wireless-Optical Broadband Access Network(WOBAN), JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 28, NO. 16, AUGUST, 2010.
- [21] R. Bolla et al.: Energy efficiency in the Future Internet: A survey of existing approaches and trend in energy-aware fixed network infrastructures, to appear in IEEE Communications Surveys and Tutorials.
- [22] R. S. Tucker: Green Optical communications—Part II: Energy limitations in networks, IEEE JSTQE, vol. 17, no. 2, pp. 261-264, Mar.-Apr. 2011.
- [23] Shing-Wa Wong, L. Valcarenghi, She-Hwa Yen, D.R. Campelo, S. Yamashita, L. Kazovsky: Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks, GreenComm2, IEEE GLOBECOM Workshops, 2009.
- [24] Jingjing Zhang, Ting Wang, Nirwan Ansari: Designing energy-efficient optical line terminal for TDM passive optical networks, to appear in: Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE.
- [25] F. Saliou, P. Chanclou, N.Genay, F. Laurent Energy efficiency scenarios for long reach PON Central Offices, OFC/NFOEC 2011, OThB2, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [26] 池田博樹、栖川淳、PON 技術を用いた IPTV サービスの実現と課題、通信ソサイエティマガジン No.14[秋号] 2010
- [27] IPTV Forum Japan, <http://www.itu.int/ITU-T/gsi/iptv>
- [28] H.Ikeda, J.Sugawa, Y.Ashi, and K.Sakamoto, High-definition IPTV broadcasting architecture over gigabit capable passive optical network, Global Telecommun.Conf.2007, pp.2242-2246, Nov.2007.
- [29] 堀田善文、武元理矢、小崎成治、高橋章、本島邦明、GE-PON 方式における IP マルチキャスト放送の安全性向上に関する一検討、信学技報、CS2006-78、pp49-52、Jan.2007.
- [30] K. Nashimoto, “PLZT Waveguide Devices for High Speed Switching and Filtering,” The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008), OThE4, April 2008.
- [31] K. Ashizawa, K. Tokuhashi, D. Ishii, S. Okamoto, N. Yamanaka, E. Oki, “Efficient Singlecast / Multicast Method For Active Optical Access Network Using PLZT High-speed Optical Switches,” 11th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR 2010), pp. 14-19, June 2010.
- [32] ITU-T recommendation G.983.1, “Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON),” 1998.
- [33] Dexiang John Xu, Wei Yen and Elton Ho, “Proposal of a New Protection Mechanism for ATM PON Interface,” IEEE International Conference on Communications, vol.7, pp.2160-2165, 2001.
- [34] 光井隆、坂本健、可児淳一、鈴木謙一、吉本直人, “N:M 負荷分散方式を適用した PON の高信頼化の検討,” 電子情報通信学会 信学技報, vol. 109, no. 190, CS2009-39, pp. 35-40, 2009.
- [35] J. Prat, J. Lazaro, P. Chanclou, R. Soila, A. M. Gallardo, A. Teixeira, G. M. TosiBeleffi, and I. Tomkos, “Results from EU Project SARDANA on 10G Extended Reach WDM PONs,” in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper OThG5.

- [36] Takehiro Sato, Kunitaka Ashizawa, Kazumasa Tokuhashi, Daisuke Ishii, Satoru Okamoto, Eiji Oki, Naoaki Yamanaka, "A Design Method of High-availability and Low-optical-loss Optical Aggregation Network Architecture," 1st International Symposium on Access Spaces (IEEE-ISAS 2011), No. GS1-A-2, pp. 7-12, June 2011.
- [37] Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture (SARDANA), <http://www.ict-sardana.eu/>
- [38] J. Segarra, J. Prat, P. Chanclou, R. Soila, S. Spirou, A. Teixeira, G. T. Belevfi, I. Tomkos, "SARDANA: an all-optical access-metro WDM/TDM-PON," 49th Federation of Telecommunications Engineers of the European Union (FITCE) Congress, Santiago de Compostela, Spain, September 2010.
http://www.fitce2010.org/ponencias/1_VIERNES_SESION6_Josep_Segarra.pdf
- [39] J. Prat, J. Lazaro, P. Chanclou, R. Soila, A. M. Gallardo, A. Teixeira, G. M. TosiBelevfi, and I. Tomkos, "Results from EU Project SARDANA on 10G Extended Reach WDM PONs," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper OThG5.
- [40] Ana Lovric, Slaviša Aleksić, José Lázaro, Giorgio M. Tosi Belevfi, Francesc Bonada, Josep Prat, and António L. Teixeira., "Influence of Broadcast Traffic on Energy Efficiency of Long-Reach SARDANA Access Network," OFC/NFOEC 2011, OThB5, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [41] H. Beyranvand, J. A. Salehi, "Multirate and multi-quality-of-service passive optical network based on hybrid WDM/OCDM system," IEEE Communications Magazine, Vol. 49, Issue 2, pp. 39-44, February 2011.
- [42] Kwang-OK Kim, Kyeong-Hwan Doo and Sang-Soo Lee, "Design of a hybrid PON system for GPON Reach Extension on the basis of colorless DWDM-PON and 3R Regenerator," IEEE Communications Society, IEEE Globecom, 8 December 2010.
- [43] 堀田善文, 名倉健一, 小崎成治, 山中秀昭, "メトロアクセス融合型次世代アクセスネットワークに関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.110, no.117, CS2010-9, pp.1-5, July 2010.
- [44] K. Wakayama, M. Okuno, J. Sugawa, D. Mashimo, H. Ikeda and K. Sakamoto, "Design and Evaluation of 10Gbps Optical Access System Using Optical Switches," IEICE Trans. Commun., Vol. E93-B, No.2, Feb. 2010.
- [45] C. A. Chan, M. Attygalle, and A. Nirmalathas, "Remote Repeater-Based EPON With MAC Forwarding for Long-Reach and High-Split-Ratio Passive Optical Networks," J. Opt. Commun. Netw. , Vol. 2, No. 1, pp. 28-37, January 2010.
- [46] N. Cvijetic, "OFDM for Next Generation Optical Access Networks," OFC/NFOEC 2011, OMG3, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [47] Takehiro Sato, Kunitaka Ashizawa, Kazumasa Tokuhashi, Daisuke Ishii, Satoru Okamoto, Eiji Oki, Naoaki Yamanaka, "A Study of Slot Switching-based All-optical Service Aggregation Network," 7th International Conference on IP + Optical Network (iPOP 2011), No. PS-1, June 2011.

第2章 キャリア向けメトロトランスポート技術 (MPLS-TP) の動向

2.1 はじめに

本調査検討は、高信頼かつ効率的なパケットベースの次世代トランスポート技術方式として、国際標準化が進行中の「MPLS-TP (Multi-Protocol Label Switching - Transport Profile) 技術」について、メトロおよびコア領域への適用可能性を探ることを目的として行ったものである。MPLS-TPは、1997年 IETF (Internet Engineering Task Force; インターネット技術の標準化を推進する任意団体) にて標準化された MPLS (Multi-Protocol Label Switching) を基に、従来の伝送システム同等の保守・運用・管理機能をパケット交換網上で実現するトランスポートシステム・アーキテクチャを持つプロトコルである。2006年から ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) で国際標準化作業が始まった MPLS-TP は、当初 T-MPLS (Transport MPLS) としてデータプレーンフォーマットのみを MPLS から流用し、保守・運用・管理に関しては既存の MPLS と無関係に規格制定を行う方向であったが、既存 MPLS とのバックワードコンパチビリティを懸念する声の高まりから、2008年3月、IETF へ標準化の場を移し、現在、その中の MPLS-TP ワーキンググループにて検討が進められている。

2.2 MPLS と MPLS-TP

2.2.1 MPLS

2009年に開催された第74回 IETF 会合の MPLS ワーキンググループ [1] において、MPLS[2] の生誕12周年が祝われた。10年以上にわたって、MPLSはVPN、BGP 不要な IP コアネットワークの構築、トラフィックエンジニアリング (TE) 等の ISP にとって一般的なサービスを提供している。IETF において 2008年に制定されたプロトコルに関する成功・不成功の解析を行った RFC 5218 [3] においても、MPLSは公式に成功したプロトコルとして認定されている。ここでいう成功とは、①広く実用化されること、②当初の設計目標を達成していることの2点を言う。RFC 5218 では、MPLSは当初の設計目標を超越してプロトコル設計がなされたこと、MPLSが設計された時期には想定されなかった領域においても利用されていることの2点より、“wild success”なプロトコルと認定されている。

MPLS成功の源泉は単純さと柔軟性にある。MPLSは20bitのラベル情報と、TTL領域、3bitのサービスクラス指示領域、スタック最下層指示ビット (Sビット) の合計32bitの情報をパケットに付加するのみである。

ラベルは IP アドレスと同様に、パケットの転送 (フォワーディング) に利用される。IP

アドレスと異なり、ラベルは構造や構成を持たない純粋な数値である。また、IP アドレスと異なり、ラベルはリンクローカルあるいはノードローカルで意味を持ち、ネットワーク内を転送されるホップごとに書き換えられる。このラベル書き換えは、ラベルの“スワッピング”と呼ばれ、ラベルを付与することを“プッシュ”、ラベルを除去することを“ポップ”と呼ぶ。これらの呼称は、スタックの操作で使われており、ラベルもまたスタックすることが可能であることを意図している。このスタックは、MPLS において階層化を実現するために利用されている。スタック操作は、MPLS のデータプレーンにおいて必須の動作である。

ラベルに基づいたパケット転送は、IP アドレスによるパケット転送を超える利便性を有する。その威力と IP との大きな違いは、トラヒック転送の仕組みに起因する。IP は、宛先に基づいた転送の枠組に属しており、パケット転送時には IP ヘッダ中の宛先アドレスを解釈することが必須となる。MPLS では、IP パケットを MPLS ドメインに入力される際に FEC と呼ばれるグループに所属させる。同一 FEC に所属する IP パケットは同一の転送取り扱いを受ける。つまり、LSP に沿って IP パケットは転送されていく。MPLS の設計コンセプトとしては、FEC は IP パケットのヘッダ情報のみならず、アプリケーション単位に設定することが可能となっている。

コントロールプレーンにおいては、MPLS は単一の制御プロトコルを必須とはしていない。これが MPLS のもう一つの強みであり、柔軟性につながる。コントロールプレーンで動作させるプロトコルは、LDP [4] と RSVP-TE [5] から選択することができる。選択の基準は、ネットワークサイズ、ネットワーク中での MPLS の果たす役割、サポートされているアプリケーション等となる。

以上が MPLS の成功した簡潔なまとめであり、MPLS が当初想定されたアプリケーションを超越して利用された理由でもある。もう一つ MPLS の成功例を挙げると、IP とは異なる他の領域への適用がある。GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) [6] が良い例である。GMPLS では、MPLS の設計当時には想定されていなかったタイムスロットや波長といった転送方式に対して MPLS のコントロールプレーンが適用されている。また、MPLS に対しては、MPLS 自身を頑強にするための仕組みとして FRR [7] が追加されている。もう一つの成功例は、疑似回線 (Pseudowire [8]) 提供技術である。疑似回線により、レイヤ2フレーム (Ethernet) を MPLS 網で転送することでネットワークのコンバージェンスやマイグレーションが実現されている。また、疑似回線の対象技術も日々追加されている。

このような広く利用されているプロトコルに対しては、多くの人は標準化においては改変期・収束期を過ぎて維持期に至っていると考えるかもしれない。しかしながら、MPLS は現在もなお拡張が議論されている。現在では、MPLS-TP [9] をパケット伝達網 (PTN) に

適用させる拡張が進められている。

2. 2. 2 MPLS-TP

MPLS-TPは、IETFにおいてはかなり特別な進め方がなされている。MPLS-TPは、ITU-TのT-MPLSが開始点となっている。T-MPLSは、伝達網向けのコネクションオリエンテッドなパケット交換技術と位置付けられていた。T-MPLSは、IETFに移管されて後、MPLS-TPと名称変更がなされ、位置付けの再定義が行われた。再定義を行う理由としては、T-MPLSには、既存のIP/MPLSと整合性が取れていない部分が存在していたためである。IETFとITU-Tとで議論した結果、2つのオプションが提示された。

- (a) オプション1：ITU-Tで非MPLSなものとして開発を進める。
- (b) オプション2：MPLSの設計管理者であるIETFに移管して、拡張版MPLSを開発する。

最終的にオプション2が選択され、IETFで作成されたRFCに従って、ITU-Tの既存T-MPLS用標準化文書(Recommendation)を改訂していくこととなった。

ITU-TとIETFは、まったく異なった世界観を持っていた。回線交換主体 vs パケット交換主体、QoS主体 vs ベストエフォート主体である。しかしながら、MPLS-TPにおいては、両標準化機関からの参加者が協力して仕様制定を進めた。この転換は容易ではなく、しばしば両者は激しく衝突した。そのため、両者の技術用語の変換用辞書を作成することから作業が開始された。幾つかの未だに引きずっている課題は残っているものの、仕様制定は進行している。技術的に深い部分の議論はまだ行われているが、要求条件 [10]、アーキテクチャ [11]、フレームワーク [9] といった文書が既にRFC化されている。

MPLS-TPがどのように定義されたについて以下に示す。広義には、MPLS-TPはMPLS技術をITU-Tが定義するPTNを構築できるように改良したものである。これは従来からあるSDH/SONETといった伝達網技術を、高可用性、QoSサポート、運用性といった特徴を保持したまま、よりパケットとの親和性を高めたものである。

これはMPLSと疑似回線技術をできる限り流用し、ITU-TのPTN要求条件に合致するように新たな機能拡張を最小限追加することで達成された。PTN要求条件は、一般、OAM(Operation Administration and Maintenance)、マネージメントの3本のRFC(RFC 5654 [10]、RFC 5860 [12]、RFC 5951 [13])としてまとめられている。この取組はすべてのMPLSツールキットの機能をPTN様に新規に定義するのではなく、既存のMPLSツールキットから不要な機能を削除し、必要な機能を追加する形で実装が進められた。図 2.2-1に示すように、MPLS-TPはMPLSの機能すべてを利用するのではなく、MPLSの必要十分なサブセットを定義し、MPLSが果たし切れていない機能を追加したものである。

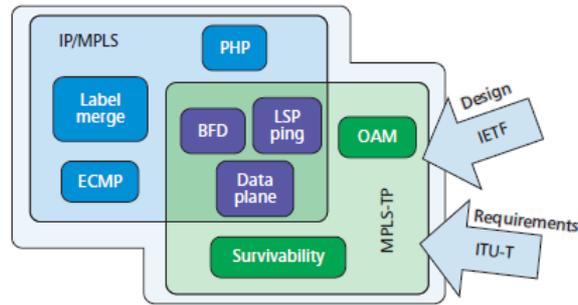


図 2.2-1 MPLS-TP に向けた新たな MPLS の定義

2. 2. 3 IP/MPLS では使われるが、MPLS-TP では使われない機能

前節で述べたように、MPLS-TP は IP/MPLS のサブセットである。排除された機能に対しては、利用されないしかるべき理由が存在する。例えば、PHP 機能は制定された OAM ツールに対する不都合が発生するため、MPLS-TP からは排除されている。最終ホップの 1 ホップ前のルータでラベルを除去する PHP は、OAM の仕組みが機能するための重要な情報をも除去してしまうからである。同様な理由で ECMP (Equal-cost multi-path routing) も排除されている。ECMP では、マルチパスを 1 本の LSP として管理運用し、フロー単位でどのパスに收容するかを決定している。OAM パケットも一つのフローになってしまうため、特定のパスに OAM パケットが收容され、他のパスには OAM パケットが流れないという状態が発生する。ちなみに、これは Ethernet における Ling Aggregation (LAG) [14] でも発生する。OAM パケットは、データパケットと運命を共有する (故障発生時に同じ振舞をする) という OAM 的な強力な要求条件があるが、ECMP あるいは LAG 利用時にこの要求が満たされないため、キャリアからの強力な要請により ECMP は排除された。しかしながら、ECMP が使えるように拡張を行うべきであるという提案も Huawei 等から IETF に対して行われてきており、具体的な拡張として OAM 用の BFD を LAG にて利用可能とする提案が出てきている [15]。

IP/MPLS と MPLS-TP の一番の違いは、MPLS-TP において IP は必須要件でなく、オプションであることである。言い換えれば、IP が利用不可な環境においても MPLS-TP は機能することが要求されている。IP/MPLS は、機器管理は SNMP で行う、警報の外部転送は syslog や SMTP で行う、管理インタフェースは ssh や http を利用する等、様々な場面で IP に依存しているため、この条件は大きなインパクトを装置設計に与えている。しかしながら、現在の伝達網の運用環境においては IP の存在には依存していないため、自然な要求であるといえる。

IP/MPLS では当たり前でも、MPLS-TP ではオプションになっていることはダイナミックコントロールプレーンにも当てはまる。既存伝達網は長時間継続されるコネクシオンに

より構成され、OSS がパスの設定や運用に使用されている。運用のルックアンドフィールを継続するために、MPLS-TP においては OSS により運用できることが必須とされている。このため、IP/MPLS で当たり前前に利用されている、より進歩した運用方式であるダイナミックコントロールプレーンの利用は、純粹に MPLS-TP ではオプションとなっている。

2. 2. 4 IP/MPLS と MPLS-TP で共通の機能拡張

IP/MPLS と MPLS-TP において、最も重要な共通要素はデータプレーン (D-Plane) の整合性要求である。MPLS-TP は、IP/MPLS のデータプレーンに対して、一切の変更を行うことはできない。前節で PHP 機能が MPLS-TP において排除されたことを述べたが、これは IP/MPLS のデータプレーンとの非整合を引き起こしたりはしない。MPLS-TP は、MPLS の完全なるサブセットとして制定されている。

MPLS-TP を制定するにあたって、IETF は出来る限り IP/MPLS および既存技術の再利用を行うことを試みた。例えば、IP ルータ間でルータの生死判別を行うためのプロトコルである BFD (RFC 5884 [16] で MPLS 用 BFD を定義) が良い例である。BFD (Bi-directional Forwarding Detection) は一般的に数 10 秒を要するルーティングメカニズムによる生死判別よりも、極めて高速に障害発生を検知できるように設計されている。伝達網においては、接続検証 (CC)、接続性確認 (CV)、遠隔障害通知 (RDI) といったノードの生死確認、経路の正常性確認、終端点間の故障通知を行う機能を有することが求められている。

BFD は、簡単に言えば Hello Protocol である。数 10 ms といった周期にて定期的に装置間でパケットを交換することで、装置やプロトコルソフトウェアの生死を確認することができる。パケットを交換する装置は必ずしも隣接する必要はなく、任意の装置間やプロトコルソフトウェア間で BFD を稼働させることで、様々なレベルの生死判別が行えることが特長となっている。

BFD は少々の修正が必要であったり、MPLS-TP では使用されないオプションがあったりするが、元々これらの機能を実現することが可能であった。そのため、IETF は MPLS-TP の伝達網としての要求を完全に満たすソリューションとして BFD を採用することを決定した。ITU-T 由来の技術に関しては、次節で記述する。同様に、パス経路のトレースに関しては、LSP-Ping (RFC4379 [17] で MPLS 用を定義) を採用した。

RFC4379 で定義されている LSP-Ping は、IP パケットを用いて LSP の FEC を確認して LSP の egress までのデータプレーンでの到達性を確認する”ping”モードと、データプレーンの故障点を発見するためにコントロールプレーンを経由して IP パケットを送出して経路上の LSR の転送設定を確認する”traceroute”モードが存在する。

BFD および LSP-Ping は、MPLS-TP においては IP を利用しないように、後述する一般連携チャンネル (G-Ach [18]) を利用して非 IP のパケットを転送するように変更が加えられている。BFD はコンフィグに従って能動的に動作する OAM 機能であるのに対して、LSP-Ping はオンデマンドに動作する OAM 機能である。これらの OAM 機能は IETF で制定され、ITU-T では受け入れが拒否されている部分であったが、ITU-T においても G.8113.2 [19] として IETF で作成された RFC をそのまま受け入れる予定であるが、2011 年 12 月の SG15 会合で不承認となったため動向が注目される。

もう一つの MPLS-TP に対する要求は、OAM パケットが通常のデータパケットと生死を共有することである。つまり、OAM パケットはデータプレーンのパス上を in-band で転送される必要がある。OAM 機能は、IP およびダイナミックコントロールプレーン (C-Plane) が存在しない環境においても動作可能である必要がある。この要求に対しては、疑似回線提供技術における連携チャンネルが適合する。不幸なことに、連携チャンネルは疑似回線提供技術に対してのみ仕様制定されていたため、IETF はこの機構を LSP にも適用できるように一般化を行った。MPLS-TP に対しては、一般連携チャンネル (G-Ach) が伝達網環境での OAM や他の制御機構を利用可能にするための中心的な機構となっている。パケットが G-Ach に属しているのか、データプレーンに属しているのかをノードにおいて判別するために、RFC 5586 [18] において特殊ラベル (GAL) が制定された。最終スタックのラベル (S=1)、かつ GAL にマッチしたパケットは制御チャンネル (G-Ach) に属するものとして処理される。End-to-End の LSP と連携する G-Ach を利用する場合、G-Ach には LSP と同一ラベルがスタックされている。そのため、ノードにおいて G-Ach を認識するために TTL の期限切れ処理が利用される。ラベルの TTL が期限切れになった際に、ノードは最終スタックラベルをチェックする。そのラベルが GAL であった場合、連携チャンネルのヘッダを見てどのような OAM 動作が要求されているのかを判別するのである。この処理の概要を図 2.2-2 に示す。図中の 4 つのノード A、B、C、D が LSP の一部であり、A と D が LER である。LSP には TTL 値 2 のラベルが付与されたパケットが入力された場合、これは LSP の 2 ホップ先のノードである C 宛を意味する。ノード C では、TTL が期限切れになるため GAL が取り出され、パケットに記述された OAM メッセージが解釈されて機能が実行される。

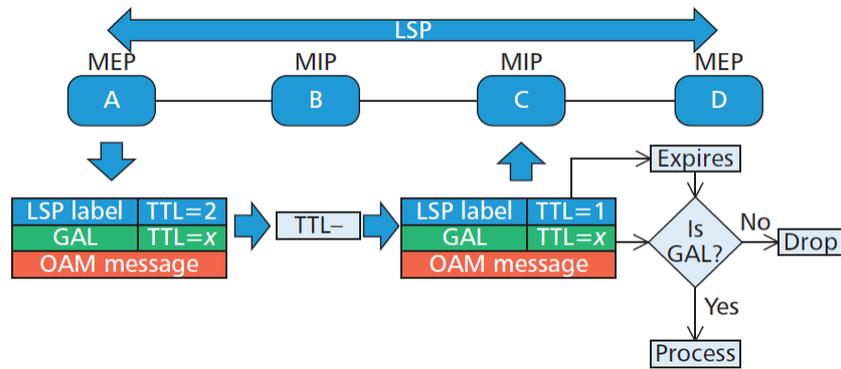


図 2.2-2 一般連携ラベル(GAL)を用いた OAM 運用例

2. 2. 5 MPLS-TP には存在するが IP/MPLS には無い機能

ITU-T の PTN に対する要求条件を完全に満たすために、IP/MPLS にとって欠けている特徴はネットワーク管理と可用性向上に対する OAM である。

ITU-T は IETF に対して、ITU-T で定義された OAM モデルを持ち込んだ。このモデルは新たな使用用語、OAM 構成、制限を MPLS-TP の OAM に対して要求していた。このモデルにおける最も基本的な OAM 構成要素は管理構成要素 (ME) と呼ばれ、伝達パス上の二点間の関係を表している。OAM に関する操作はすべて ME に対して行われる。ME の端点集合は管理構成要素群 (MEG)、終端点 (MEP) として参照される。また、MEP 間に存在する要素は MIP として参照される。MEP 間に MIP が存在しないことも有り得る。

上記の OAM 枠組のまとめは完全なものではない。モデルはより一般化されているため、上記は単なる機能名称定義として認識される場合もある。しかしながら、この枠組は OAM をどのように実装することができるかという課題に対して大きな制限を与えている。例えば、MIP は外部からのトリガーなしに自らの OAM パケットを生成することは許可されない。この機能は MEP に割り当てられており、MIP は MIP 宛の OAM メッセージに反応するか、単純に OAM メッセージを転送することが許容されている。これはアーキテクチャ的な制限であり、幾つかの伝達網 (ATM、Ethernet) に対して適用されてきたものである。そのため、MPLS-TP の OAM 運用もこの枠組で制定される必要がある。そのため、MPLS-TP の OAM 運用もこの枠組で制定される必要がある。

パケットロスと遅延測定は、IP/MPLS が保有していなかった OAM 機能例である。制定された RFC 6374 [20][21] では、G-Ach 上で転送されるシンプルなプロトコルによって測定を行うこととなった。前述のように、可用性向上機能の組込も要求されている。可用性向上とは、ネットワークの障害や転送能力の重大な劣化の発生時に、パケットを正常に転送させる能力を回復させる機能のことである。光伝達網装置は、信頼性および可用性において高い性能を示してきた。MPLS-TP も同様の性能を示すことが要求されている。そのため、例えば、MPLS-TP におけるリニアプロテクション [22] やリングプロテクション

[23][24][25] の実装が進められている。しかしながら、現在複数のドラフトで異なった仕組の可用性向上提案がばらばらに進められており、整理統合が必要である。

MPLS-TP の一部として MPLS に新たに追加されたのは、MPLS を伝達網として適用させるためのものであり、IP/MPLS 環境に利用することを妨げるものは一つとして存在していない。MPLS-TP に追加されたものは MPLS の一部であり、MPLS と並列する技術ではないということを忘れてはいけない。IP/MPLS と MPLS-TP として分類されて標準化されたものとを併せて、図 2.2-1 のように新たな MPLS とするのである。

2. 2. 6 MPLS-TP に含まれなかった機能

これまで説明した MPLS-TP は、IETF において制定されたものである。MPLS-TP を標準化する際に ITU-T から MPLS-TP に標準化の場を移し、OAM 等においては ITU-T の定義した要求条件や ITU-T の OAM の考え方を取り入れて IETF 内で RFC 化を進めた。しかしながら、具体的な OAM の実現ツールに関しては IETF が主張する BFD 由来の OAM ツール（これは RFC 化されている [16][17][20][21][26]）と、ITU-T が主張する Ethernet OAM 由来の OAM ツール（これは RFC 化されていない）の両方が議論され、決着がつかないまま機器ベンダが OAM ツールの実装を進めた結果、IETF の OAM ツールのみを具備する機器、ITU-T の OAM ツールの具備する機器、両者を具備する機器の両方が存在することになってしまっている。ITU-T では MPLS-TP の OAM ツールとして G.8113 シリーズを制定しているが、G.8113.1 [27] として ITU-T 由来の OAM ツールを、G.8113.2 [19] として IETF 由来の OAM ツールを記述する模様である。また、G.8113.1 に関しては、その題名が "Alternative mechanisms for Operations, Administration and Maintenance of MPLS-TP networks using the tools defined in G.8013/Y.1731." と ITU-T 由来の OAM ツールは "Alternative" と位置付けることになっていたが、G.8113.2 の状況により元の題名に戻る可能性もある。

2. 2. 7 何故 MPLS-TP なのか

前節までに MPLS-TP の概略を紹介し、伝達網の要求条件に対していかに適合性が高いかを説明した。ここでは、何故 MPLS-TP なのかを説明する。

パケット転送に基づいた技術を伝達網に導入することは、今日のネットワークがパケットである IP トラフィックで占められているという事実により、要求が高まってきている。MPLS-TP は、従来の回線交換に基づいた伝達網技術よりも、効率的にパケットに基づいたサービスを取り扱えることが十分に期待できる。MPLS が既に多くの IP コア網に導入されており、MPLS はパケット交換ベースでコネクションオリエンテッドな技術であることがか

ら、PTN 実現のための候補技術として最適であった。MPLS を基本とすることは、既存の大規模サービス提供事業者の IP コア網との相互運用を容易にする。幾つかの大規模サービス提供事業者は、MPLS をコア網だけでなく、集約網やアクセス網にも適用していくことを宣言しており、MPLS-TP を利用することが期待されている。

波長レイヤから IP ルーティングのレイヤに至るまで、どこかのレイヤに必要と思われる機能を追加することは技術的に可能であれば十分に実現することができる。しかしながら、機能を追加することはコストを追加することである。IP/MPLS は歴史的に極めて多くの機能が追加されてきたため、必要以上に高コストになってしまっていると言える。MPLS-TP を導入することで、IP/MPLS から高コストとしている主要機能を削除することができる。例えば、IP で信頼性を向上させること、その信頼性を向上させた IP を使って IP ルーティングプロトコルを稼働させることは IP に依存しない伝達網の世界では不要であるため、MPLS-TP では削除可能な機能である。そのため、MPLS-TP は MPLS の利点のみを低価格で提供できる。オプション的な機能が必要であればそれを導入することは禁止されているわけではなく、GMPLS をコントロールプレーンに利用することもまったく問題無い。問題はコストがメリットに見合うかどうかである。

2. 3 通信キャリアにおける MPLS-TP の導入状況

本節では、具体的な導入状況および導入に向けた取り組みとして、NTT Communications および Verizon の例を紹介する。

2. 3. 1 キャリアグレード伝達網 OAM

2.2 節において、MPLS-TP では伝達網の OAM の考え方が取り入れられたことを紹介したが、OAM の実装に関しても一般的な IP ルータの OAM 実装方式とは異なるキャリアグレード伝達網 OAM の実装が必要となることが考えられる。IP ルータの実装方式で実装するか、伝達網の実装方式を要求するかは、各キャリアの運用方針で決定されることであるが、装置製造においては根本的なアーキテクチャに関する重要事項である。図 2.3-1 に一般的な IP/MPLS ルータで採用されている OAM 実装方式を示す。

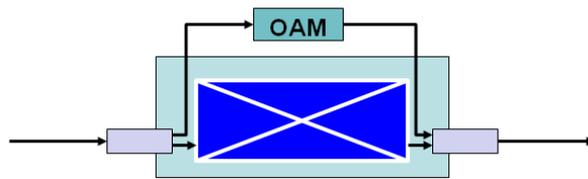


図 2.3-1 IP/MPLS ルータにおける OAM 実装

図 2.3-1 においては、左から右へのパケット転送の例を示している。入力されたパケットはラインインタフェース部において、OAM パケットと通常のパケットが判断され、OAM パケットは OAM 処理部へ、通常のパケットはスイッチ部へと送られる。OAM 処理部では、自ノードで終端されるパケットはデータ部に対応した処理を行い、自ノードを通過するパケットは TTL の減算処理を行って該当する出力ラインインタフェース部へ、自ノードから挿入されるパケットについても該当する出力ラインインタフェース部へと送られる。出力ラインインタフェース部では、OAM 処理部から送られてきたパケットとスイッチ部から転送されてきたパケットが多重されて隣接装置へと伝送されていく。図 2.3-1 では、ラインインタフェース部と OAM 処理部とが直接パケットの送受を行うイメージが記述されているが、装置実装の観点からは、ラインインタフェース部では OAM パケットには OAM 処理部行きの内部ヘッダを付与し、スイッチ部を経由して OAM 処理部へパケットを振り分ける形態を、OAM 処理部から出力されるパケットは、該当出力ラインインタフェース部宛の内部ヘッダが付与されてスイッチ部に入力される形態を採用することも十分あり得る。この場合、スイッチ部の故障に対しては、

- (a) 図 2.3-1 の実装イメージのままでは通常パケットは転送されないのに対して、

OAM パケットは転送されるため故障検知が行えなくなる。

- (b) スイッチを経由する実装では、OAM パケットが受信されないため、入出力伝送路に故障が発生しているものと誤認する。

といった運用上の不都合が生じる可能性が高くなる。

この (a) (b) の不都合を解消できる OAM 実装アーキテクチャを図 2.3-2 に示す。

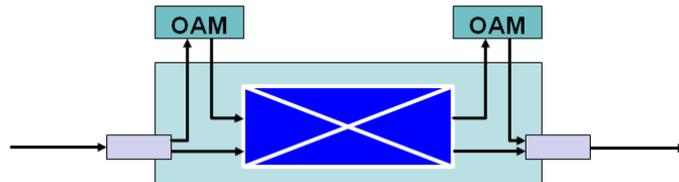


図 2.3-2 キャリアグレード伝達網 OAM 実装

OAM 処理部を入力部と出力部の両方に設置し、スイッチ部を OAM 区間として両側の OAM 処理部において監視を行うことで、スイッチ故障発生時における故障検知不能問題を解決するのである。(a) に対しては、スイッチが故障すると OAM パケットの転送も行われなくなる。(b) に対しては図 2.3-3 に示すように、OAM パケットを振り分けるスイッチと、通常パケットを転送するスイッチとを分離することで、単一のスイッチ故障において切り分けが可能な装置構成となる。

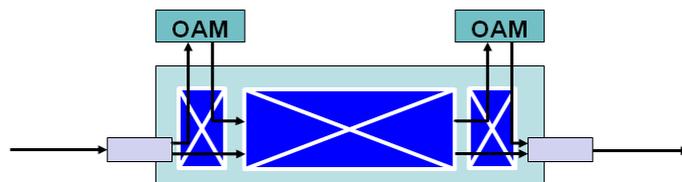


図 2.3-3 キャリアグレード伝達網 OAM 実装 (スイッチによる OAM パケット振り分け実装構成例)

2. 3. 2 MPLS-TP のキャリアサービスでの適用のされ方

国際会議等で公表されている MPLS-TP の適用をまとめると次の 3 点となる。

- (a) 各種サービスを収容するプラットフォーム (MPLS-TP と各種サービスは、サーバ・クライアントの関係)

サービスとしては、Ethernet、ATM、SDH/SONET、IP/MPLS 等を想定

- (b) MPLS-TP と IP/MPLS の相互接続運用 (MPLS-TP と IP/MPLS はピアな関係)

- (c) MPLS-TP を IP/MPLS のクライアントとして運用 (MPLS-TP ドメイン間を IP/MPLS

のコア網が LSP を提供して接続。MPLS-TP と IP/MPLS はオーバーレイの関係) メトロサービスとして MPLS-TP を考えた場合、(a) (b) (c)いずれにおいても、MPLS-TP は多用なサービスを収容する役割を担っている。また、(a) (b)においては長距離伝達網 (コア) 網の役割を MPLS-TP が担っている。

MPLS-TP 自体は、レイヤ 2.5 としてレイヤ 3 サービスを収容したり、レイヤ 1.5 としてレイヤ 1 サービスを収容したり、レイヤ 0.5 としてレイヤ 1 サービスを収容するのに利用される。装置間を伝送するためには、あらためて MPLS-TP パケットを Ethernet フレームや、GMP を介して OTN/ODU に収容する必要がある。

2. 3. 3 Ethernet over XXX 技術の動向

Ethernet サービスをターゲットする場合、図 2.3-4 に示すように

- (a) Ethernet を SDH/SONET の VC に GFP を利用して収容
- (b) Ethernet を OTN の ODU に GMP を利用して収容
- (c) Ethernet を Pseudo Wire (PW)を介して MPLS/MPLS-TP に収容
- (d) Ethernet を PBB [28] に収容

の 4 方式が主体である。

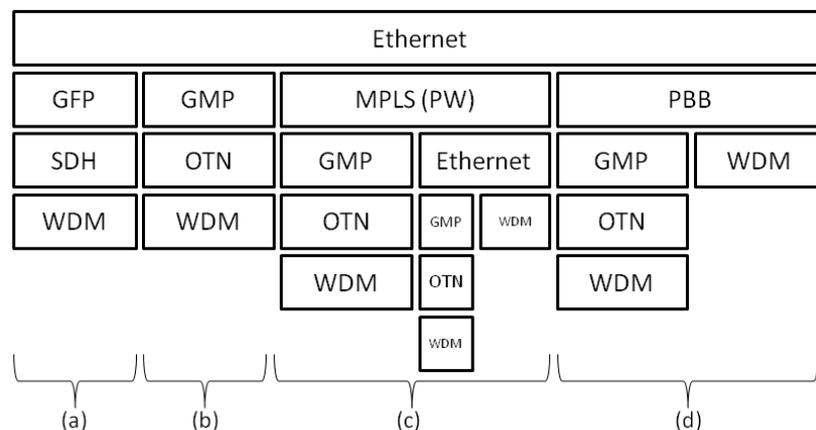


図 2.3-4 Ethernet 収容方式例

(a) は既存の SDH 網への収容がターゲットであり、10Base-X、100Base-X、1000Base-X といった主に低速系の Ethernet の収容に適している。(b) は 1000Base-X、10GBase-X、40GBase-X、100GBase-X といった高速系の Ethernet 収容に適している。(c) は低速から高速まですべての Ethernet に対して、統計多重効果を利用してより多くのインタフェースを収容するのに適している。(d) は Native な Ethernet であるため、運用の一貫性という

面で優れている。(c) と(d) に関しては、收容するサービスを Ethernet に限定した場合には、MPLS-TP 自体が下位レイヤに Ethernet を利用することが多いため、キャリアは MPLS-TP OAM と Ethernet OAM の両方で管理運用する必要がある点で、Ethernet OAM だけで管理運用が可能な PBB が優れていると言える。

近年では、Ethernet サービスの増大に加えて、レガシーサービスとなりつつある ATM サービスの巻き取りも期待されている。ATM を PBB に收容する技術は市場には出回っていないと思われるが、今すぐにサービス提供の要求があれば実現可能なレベルのものであると考える。一方、ATM over MPLS [29] は PW (Pseudo Wire) において既に実用化されている技術であり、また、低速な TDM 回線を PW で收容する TDM over MPLS [30] も実用化されている。このように、やればできる技術 (PBB : Provider Backbone Bridge) に対して、既存技術がデファクト化されて運用にコストがかかる決定を凌駕して、(c) の導入がメトロエリアにおいては今後進んでいくものと推測される。

一方、データセンタ内部においては、単一技術での網構築がコストの観点から最優先とされ、Native Ethernet での利用が進んでいる。しかしながら、データセンタ間の Ethernet 接続に対しては、Native Ethernet の利用は基本的に専用線サービスとなるため、IP/MPLS を利用した低コストな VPN サービスが好まれる傾向にある。そのため、データセンタ内の管理運用者からは、Ethernet として取り扱うことが可能な PBB over IP/MPLS/MPLS-TP をサポートした装置に対する要望が高まっている。

OTN と MPLS-TP との比較では、どちらも多様なクライアント信号の收容が可能であり、一概にどちらが優れているとは言えないが、多数の低速な信号を多重化して收容し統計多重効果を利用して低コストなサービス提供を行いたい場合は MPLS-TP が優れており、高速な信号を收容する、あるいは QoS に厳しいサービスを收容する場合には OTN が優れている。図 2.3-5 に定性的な比較を示す。

トランスポート技術	クライアント信号						速度
	PDH	SDH	ATM	OTN	IP	Ethernet	
OTN	○	○	○	○	○	○	~112Gbps
MPLS-TP	○	○	○		○	○	~100Gbps

図 2.3-5 OTN と MPLS-TP へのサービス收容比較

簡単な定量的な比較として、以下の例を提示する。GbE を OTN の ODU4 に收容する場合、最大 96 本收容可能である。一方、MPLS-TP を介する場合は、ラベル (32bit) 分のオーバーヘッドが必要となる分收容効率が低下する。帯域 1 Gbps を要求するフル GbE では、

96 本未満となることは明らか（具体的な本数は、MTU やフレームサイズ依存）であるが、UNI が GbE で、LSP としての帯域要求が 100Mbps 程度であれば、数 100 本以上の UNI を収容可能となる。

QoS に大きく影響を与えるスイッチング時間に関しては、OTN はフレームサイズに依存せず固定（TDM）となるが、MPLS-TP はサイズ依存で場合によっては、OTN よりも小さくなることもある。

2. 3. 4 NTT Communications の MPLS-TP への取組

(1) サービスアグリゲーション網への MPLS-TP の導入

NTT Communications は、2008 年に MPLS-TP をサービス網への導入を行っている。当時は、T-MPLS に基づいた装置が利用されていたが、2010 年には MPLS-TP に準拠した装置に更新されている。

MPLS-TP 導入の大きな目的は、これまで ATM を利用して構築していたサービスアグリゲーション網の維持管理のための更改である。現在のサービスアグリゲーション網の概要を図 2.3-6 に示す。

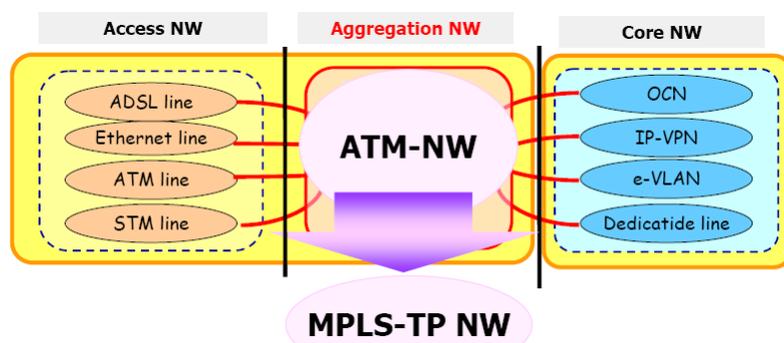


図 2.3-6 NTT Communications のサービスアグリゲーション網の概要

サービスアグリゲーション網は、アクセス網とコア網の間を接続する位置に存在しており、ADSL、Ethernet、ATM、STM といった加入者へ提供されている様々なアクセスラインにより提供されている様々なサービスを、アクセスラインを終端することでサービスのデータを一度 ATM に収容し直す役割を担っている。それぞれのサービスデータは、コア網内に位置する OCN、IP-VPN、e-VLAN、専用線といった様々なサービスごとの伝達網に ATM 網を用いて転送されている。

このアグリゲーション網を MPLS-TP 網に置換し、アクセス網から入力される STM、ATM、

Ethernet、IP 等の様々なデータを MPLS-TP に收容することが必要となる。2.3.3 節で述べたように、比較的低速な様々なデータを効率良くサービス收容するのに MPLS-TP が Ethernet より適しているため、MPLS-TP が採用されていると推測される。

図 2.3-6 では、アクセス網、アグリゲーション網、コア網と並んでいて、アグリゲーション網がメトロ網的な位置に存在するように見ることもできるが、実際にはアグリゲーション網と MPLS-TP で提供するコア網とを一体化した、日本国内をカバーするような網が構築されている。MPLS-TP 網の全体概要を図 2.3-7 に示す。

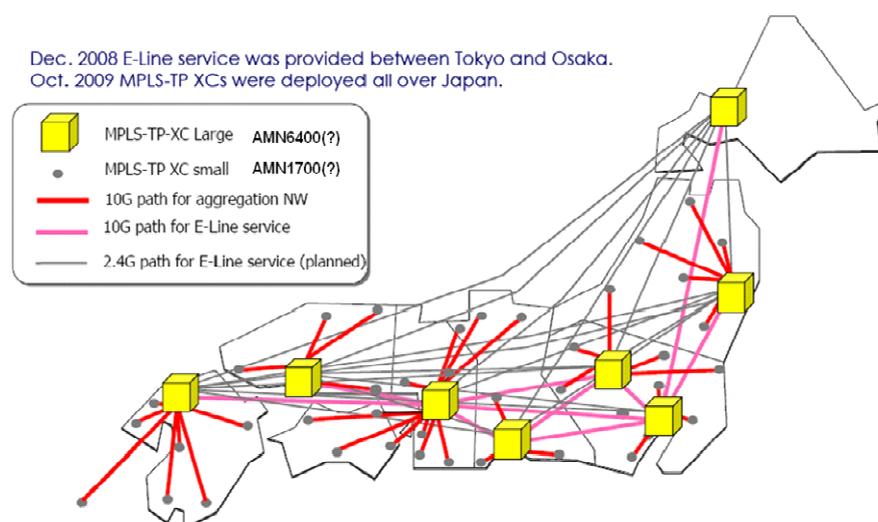


図 2.3-7 2010 年の MPLS-TP 網構成概要

MPLS-TP 網は、2008 年 12 月に東京－大阪で E-Line (Ethernet 専用線) サービスを提供するために導入されたのを皮切りに装置導入が進められた。

図 2.3-7 では、アグリゲーション網用の 10 Gbps パスが MPLS-TP XC small (日立製 AMN1700 シリーズ等) と MPLS-TP XC Large (日立製 AMN6400 シリーズ等) の間に設定されており、北海道、東北、北関東、南関東、東海、北陸・関西・四国、中国、九州の 8 拠点にてアグリゲーション網がコア網に接続されていることが分かる。また、E-Line サービス用の 10Gbps パスと 2.4Gbps パスがメッシュ状に MPLS-TP XC Large ノード間に設定されており、E-Line サービスのコア網が MPLS-TP で提供されていることがわかる。つまり、E-Line サービスに関しては、アグリゲーション網からコア網までが MPLS-TP で構成されているのである。

(2) Ethernet サービスへの MPLS-TP の導入の特徴

NTT Communications は、Premium Ethernet サービスを提供しているが、MPLS-TP

は Premium Ethernet サービス提供に大きく貢献している。

MPLS-TP の特長として、コントロールプレーン (C-Plane) とデータプレーン (D-Plane) を分離することで高信頼性を実現している。これは、コントロールプレーンの故障がデータプレーンに影響を与えずに、データプレーンではユーザデータの転送が継続されることを意味している。

Premium Ethernet サービスは、UNI は Ethernet であり、ユーザビル間の End-to-End 区間は、Ethernet OAM を適用することで監視が行われている。一方、NTT Communications ビル間は、MPLS-TP で転送されており、MPLS-TP 区間には LSP レベルのプロテクションが組み込まれている。このため、MPLS-TP におけるデータプレーンの故障は MPLS-TP プロテクションで救済され、Ethernet OAM では検知されないようにパラメータが設定されている。図 2.3-8 に Premium Ethernet サービスにおける MPLS-TP の役割の概要を示す。

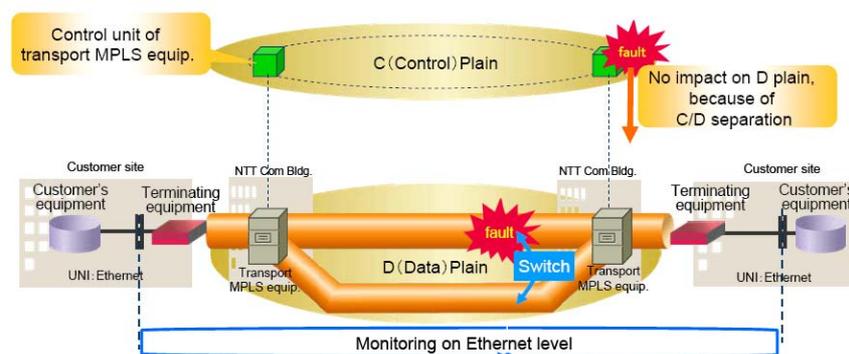


図 2.3-8 Premium Ethernet サービスにおける MPLS-TP の役割

MPLS-TP における故障は、プロテクションによって救済されることを述べたが、保守監視としては、MPLS-TP の故障状態は、End-to-End の Ethernet OAM で検出されている必要がある。故障状態の継続時間が、プロテクションが発動して短時間で終了した場合には Ethernet サービスとしては正常状態を継続し、長時間となる場合には、サービス終端装置においてアラームを発生させる。

このような機能は、エスカレーションと呼ばれ、MPLS-TP レイヤの保守監視と Ethernet レイヤの保守監視が連携することで Ethernet サービスの保守性を向上させている。図 2.3-9 にエスカレーションによる保守性向上の概要を示す。

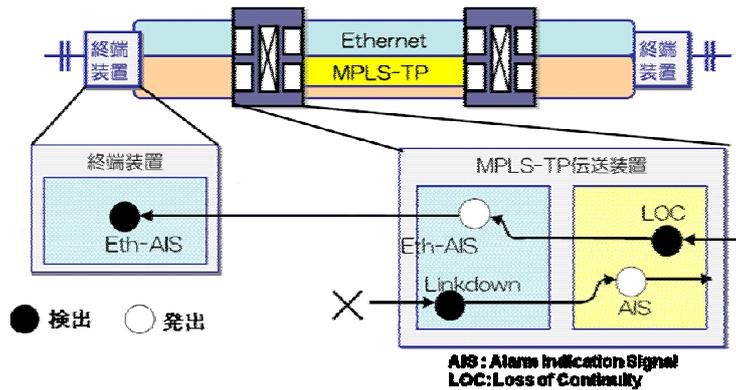


図 2.3-9 OAM エスカレーションによる保守性の向上

(3) パケットトランスポート技術への期待

NTT Communications の現在のサービス提供網構成の概要を図 2.3-10 に示す。サービスごとにサービスを終端するサービスノード SNE が存在し、サービスごとに存在するコア網へ SNC を介して接続される。SNE と SNC の間はアグリゲーション網を介在させることで統一されているが、コア網はサービスごとに存在している。コア網自体は、伝達レイヤとして SDH/SONET を利用することで統一化されている。

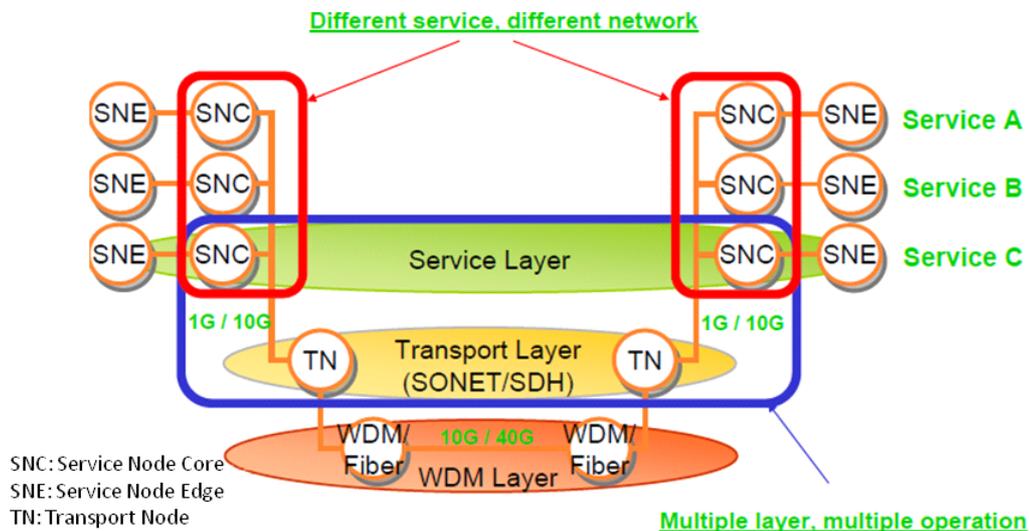


図 2.3-10 サービス提供網構成概要

現在のサービス提供網が抱える課題は2点存在する

- (a) サービスごとにコア網を構築する必要があること
- (b) サービスレイヤと伝達レイヤのマルチレイヤ構成であり、レイヤごとに異なる運用が必要となること

これらの課題に対して MPLS-TP を利用して構成の単純化を実現することが期待されている。具体的には、コア網を MPLS-TP で構成し、サービスに対して共通のプラットフォームを利用することで、アグリゲーションからコアまで統一した技術を利用することである。これにより、サービスに共通なコア網を構築することで網構成のシンプル化が、サービスレイヤと伝達レイヤが MPLS-TP で共通化されることで運用のシンプル化が図れる。

NTT Communications が考えている次世代伝達網のコンセプトを図 2.3-11 に示す。

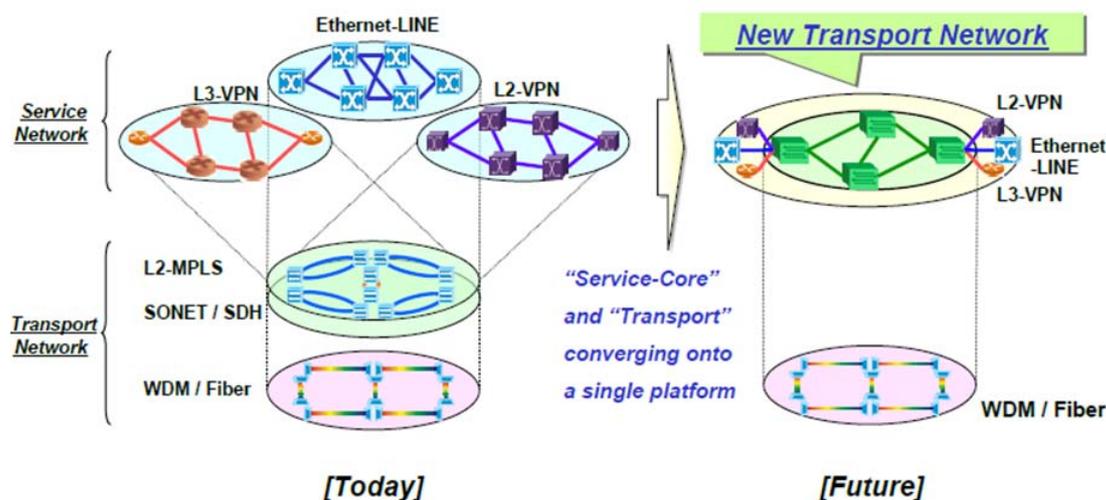


図 2.3-11 NTT Communications の次世代伝達網のコンセプト

2. 3. 5 Verizon の MPLS-TP への取組 [31][32]

(1) MPLS-TP に期待すること

Verizon は、多数の地域・長距離通信キャリアの買収により全米一位、二位を争う規模に成長してきた企業であり。最新の統合技術を導入して、網のマイグレーションを推進することで運用コストを低減させていこうという意気込みが大変に高い。そのため、Verizon が抱える多数のサービスインフラを集約するためのキーワードとして、①Packet Transport、②Ethernet、③OTN の 3 技術が多用されている。

サービスとしては、データ、モバイル、音声の三大サービスが存在し、データ系は、IP、Frame Relay (FR)/ATM が、モバイル系は FR/ATM と TDM が、音声系は TDM と PSTN が利用され、Ethernet、POS、ATM、SONET/SDH といった多様な技術を介して SONET/SDH のコア網に収容されている。このように、サービスごとに網が存在し、網ごとに OSS/BSS が存在するために、運用コストを削減することが困難な状態になっている。

この困難な状態を解消する統合インフラストラクチャとして、ネットワークレイヤの L2、IP、MPLS をサービス提供に、Packet Transport を統合伝達網に、Ethernet と OTN をレ

イヤ1として利用することで、シンプルなレイヤ構成と複数サービスの集約を実現しようとしている。図 2.3-12 に Verizon が期待する統合インフラストラクチャの概念を示す。

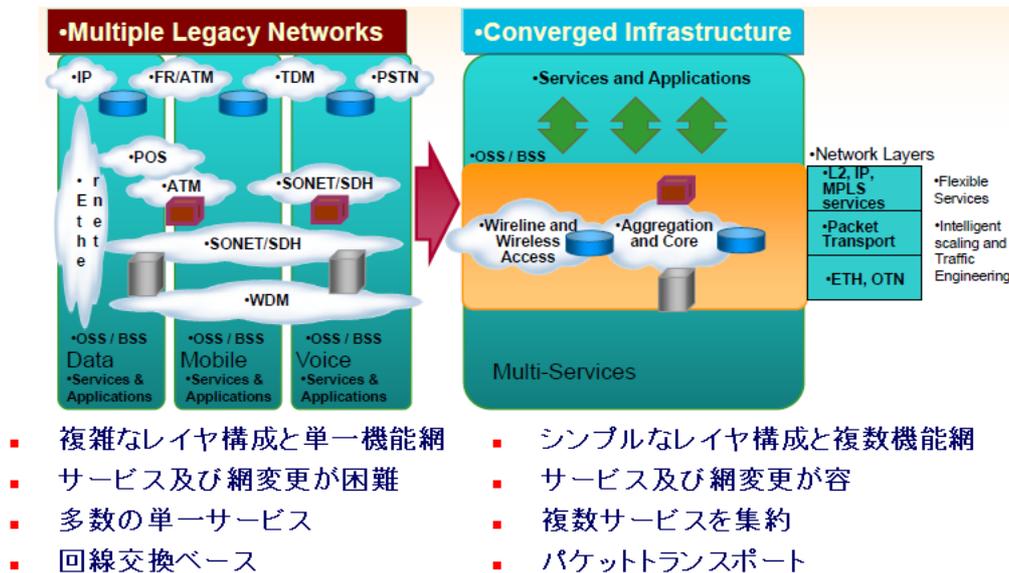


図 2.3-12 Verizon の次世代統合インフラストラクチャの概念

MPLS-TP に対しては、Packet Transport として、インテリジェント性、スケーラビリティ、TE の機能を期待しており、MPLS-TP レイヤと OTN レイヤを統合運用する Packet Optical Transport (POT) の実現を目指している。POT プラットホーム (P-OTP) が提供すべき機能として、以下の3機能を定義している

- (a) サブ IP レイヤの転送機能を共通プラットフォーム化
 - (ア) サービスに直結しないトランスポンダの削減が期待できる。
 - (イ) 下位レイヤでのトラフィックバイパスによる低消費電力化が期待できる。
 - (ウ) 共通部と装置間接続の高速光モジュールの削減が期待できる。
 - (エ) 自動化の推進や占有床面積の低減により運用の効率化が期待できる。
- (b) IP とトランスポートのルーティングドメインの分離
 - (ア) ルーティングテーブルのスケーラビリティ向上が期待できる。
 - (イ) 経路の安定化が期待できる。
 - (ウ) 経路計算時間の低減が期待できる。
- (c) ルーティング、シグナリングの簡素化
 - (ア) GMPLS を拡張することで伝達網制御の統一化が期待できる。
 - (イ) 伝達網内では BGP を使用しないことで運用の簡素化が期待できる。

(ウ) レイヤ境界に統一された UNI を配備することで運用の簡素化が期待できる。

このような機能を満たす伝達プラットフォームとして、図 2.3-13 に示すように従来は NG-ADM + DWDM + Packet Switching という形で複数の装置により構成されていたが、次世代の P-OTP では単一の装置としてプラットフォームを提供することが期待されている。

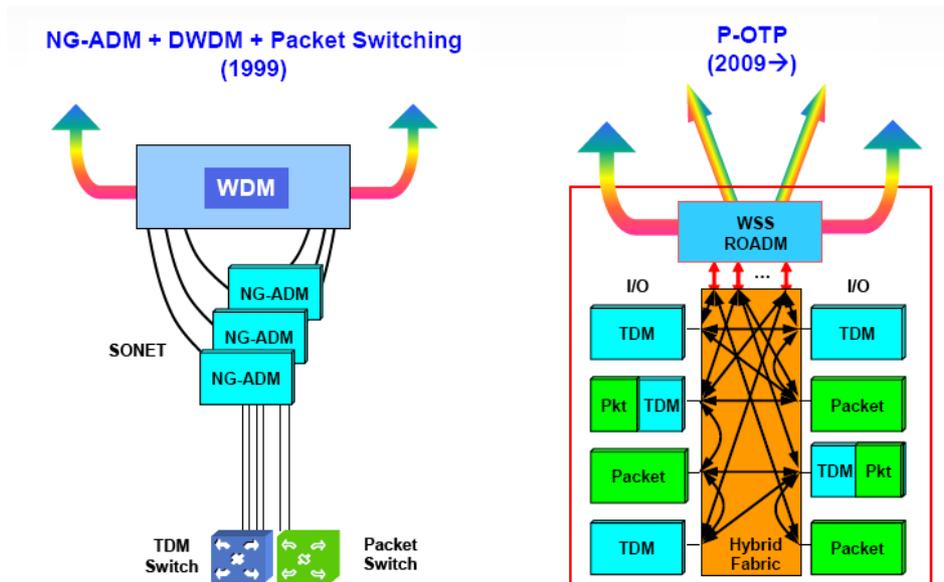


図 2.3-13 伝達網プラットフォームの変遷

(2) MPLS-TP による伝達バックボーン網の構成

NTT Communications は、MPLS-TP をサービスアグリゲーション網として導入し、コア網へ展開領域を拡張していったが、Verizon も、MPLS-TP によるバックボーン網の構築を計画している。図 2.3-14 にバックボーンへの MPLS-TP 適用形態を示す。

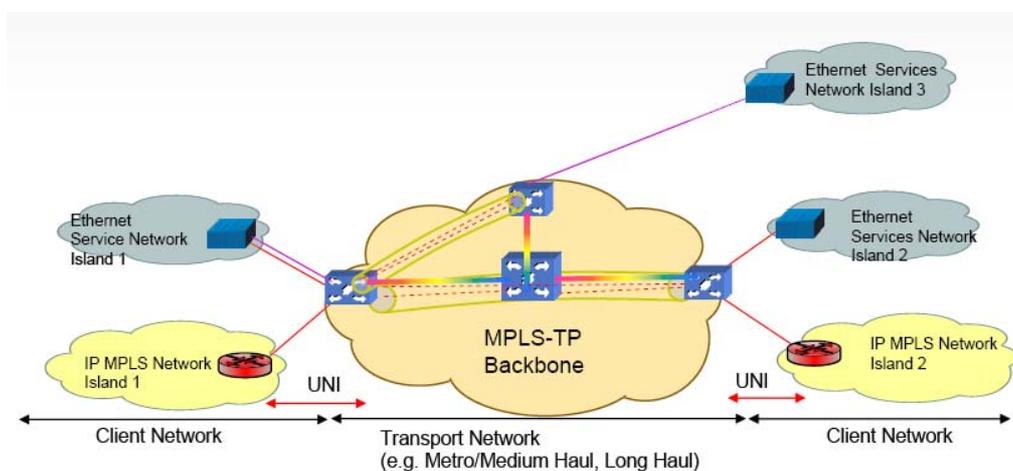


図 2.3-14 MPLS-TP バックボーン網概要

MPLS-TP は、複数のサービスに対する共通伝達網基盤となり、図 2.3-14 では、クライアント網として Ethernet サービス網および IP/MPLS ネットワークがアイランドとして記述されている。MPLS-TP の伝達網は、メトロ網、中距離網、長距離網が想定されており、アイランドと伝達網の間のインタフェースとしては Ethernet が想定され、Ethernet スイッチや IP/MPLS ルータ間のリンクを提供する役割を担っている。

バックボーン網とクライアント網の関係は、MPLS-TP の LSP がアイランド間のリンクを提供するオーバーレイモデルであり、共通の UNI によりリンクが設定される。ルーティングに関しては、MPLS-TP 内部のルーティングと、クライアントのルーティングは完全に分離されており、アイランド間を接続してルーティングネイバーを構成することで、アイランド間での単一のルーティングドメインが構築される。

現在の MPLS-TP は NMS から静的な LSP を設定する Permanent Connection (PC) サービスが主流であるが、Verizon は早期から NMS からユーザ要求に対応して LSP を設定する Soft Permanent Connection (SPC) サービスや、ユーザ主導によるシグナリングで LSP を設定する Switched Connection (SC) サービスの展開に力を入れており、MPLS-TP バックボーン網を複数ドメインで構成し、ドメイン間に跨った LSP を SPC サービスあるいは SC サービス向けに提供するダイナミック LSP の運用を目指している。

(3) MPLS-TP の実用化に向けて、Verizon が注目している項目

2011 年現在、Verizon において MPLS-TP を導入したという報告は入手されていない。実用化に向けて、次の様な項目が重要であると Verizon は装置ベンダや通信キャリアに対してアピールを続けている。

- (a) 拡張可能な MPLS-TP UNI の策定
 - (ア) データプレーンは Ethernet
 - (イ) コントロールプレーンでサービスに対応した拡張を期待
- (b) プロビジョニング手法
 - (ア) NMS から設定するスタティック LSP 設定
 - (イ) GMPLS によるダイナミック LSP 設定
- (c) OAM の簡単化
 - (ア) コスト削減およびキャリア間接続の実現が必要
 - (イ) ITU-T 版の Y.1731 ⇒ G.8113.1 は、proactive 型の OAM ツールとして利用
 - (ウ) IETF 版の BFD ⇒ G.8113.2 は、on demand 型の OAM ツールとして利用
- (d) OTN の ODUflex vs. MPLS-TP のコスト比較

(ア) MPLS-TP の統計多重効果はコスト的に魅力的である。

(イ) 両方の技術を適材適所で使い分ける必要がある。

(e) キャリア間の相互接続性

IP/MPLS においては、キャリア間のアライアンスによってグローバルなサービス展開が進められている。

2. 4 MPLS-TP のキャリアサービスへの導入シナリオ

2. 4. 1 MPLS-TP を利用するサービス例

前節では、NTT Communications および Verizon の導入状況および導入に向けた取り組みを紹介したが、本節では、それ以外のキャリアで検討されている導入シナリオを紹介する。紹介するのは以下の3項目である。

(a) TDM サービスの置換

(ア) MPLS-TP Access/Aggregation

(イ) End-to-End MPLS (Aggregation MPLS-TP over IP/MPLS)

(b) Mobile RAN

(c) Dynamic MPLS-TP over OTN/DWDM for ULH

(ア) Overlay Model

(イ) Peer Model (Unified MPLS)

2. 4. 2 TDM サービスの置換 [33]

(1) MPLS-TP Access/Aggregation

現在、SDH/SONET を用いてサービスに対して確定的な帯域割当が行われている。これは QoS 保証を求める所謂プレミアムサービスには適した転送方式であるが、統計多重を多用してできるだけ低コストで提供することが求められて非プレミアムサービスにとっては過剰スペックとなる。

次世代の MPLS-TP を利用したパケット伝達システム (PTS) では、MPLS-TP によりメトロ・コアのサービスアグリゲーション機能を提供することが期待でき、TDM を排除することにより一層の統計多重効果を期待することが可能になる。

プレミアムサービスに対しては、OTN を用いて TDM 収容を行い DWDM 網に MPLS-TP とは別波長で収容し、TDM 用のサービスコア網へ転送することでサービス品質の低下なしに PTS との共存が可能となる。

図 2.4-1 に示した例では、非プレミアムサービスとして、家庭用のトリプルプレイサービス、Ethernet サービス、携帯電話基地局収容が提示されている。この内、携帯電話基地局収容に関しては、MPLS-TP アグリゲーション網を抜けた後では、TDM 収容を行うことに注意が必要である。プレミアムサービスとしては、ビジネス用の TDM や専用線サービスが提示されており、これらはコア網においては TDM 収容されている。

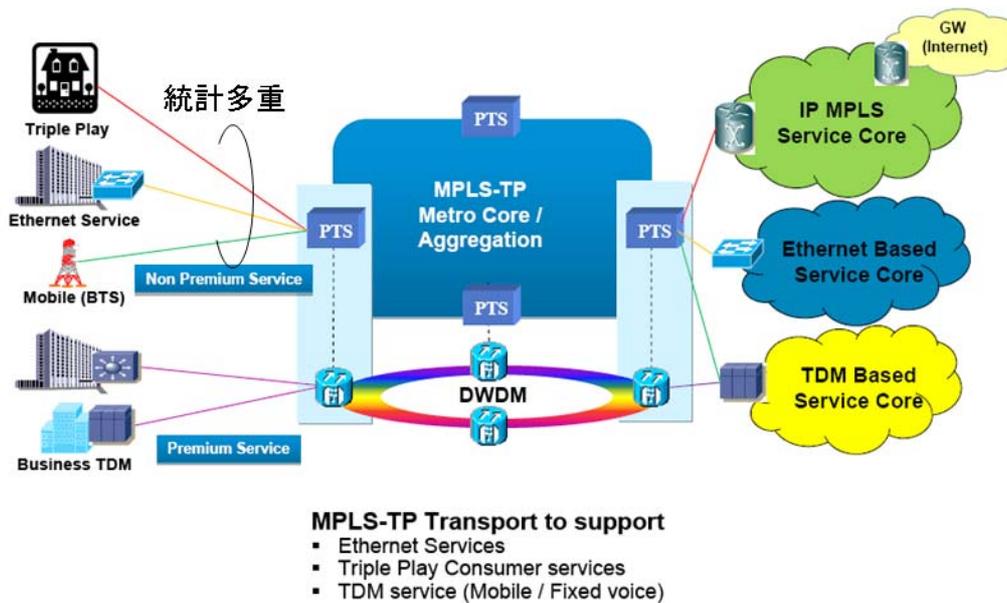


図 2.4-1 MPLS-TP によるサービスアグリゲーション機能の提供

このように、MPLS-TP のサービスアグリゲーション網においては、Ethernet、トリプルプレイ、TDM の各種サービスが收容され、IP/MPLS サービスコア網、Ethernet サービスコア網、TDM サービスコア網へ收容されていく。

(2) End-to-End MPLS (Aggregation MPLS-TP over IP/MPLS) [33]

MPLS のコア網を構築済のキャリアにとっては、MPLS-TP でアクセス網/アグリゲーション網を構築した際に、MPLS-TP のコア網を別に構築するのではなく、MPLS のコア網をそのまま利用することが網構築コストの観点から望ましい。図 2.4-2 に MPLS-TP aggregation over MPLS core の構成例を示す。

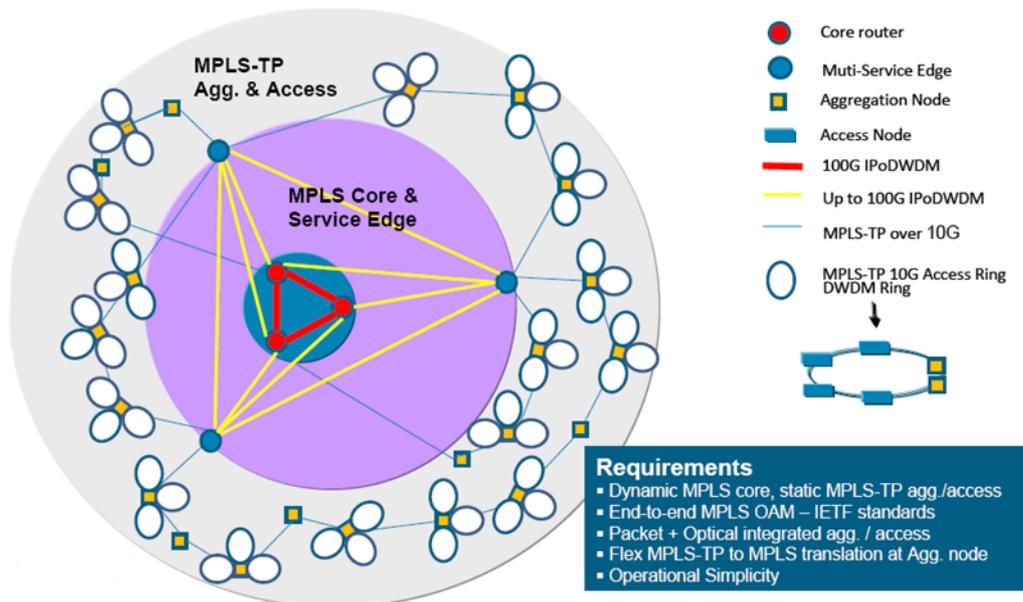


図 2.4-2 MPLS-TP aggregation over MPLS core

IP/MPLS がコア網とサービスエッジ機能を提供し、MPLS-TP がアクセス網とサービスアグリゲーション機能を提供する。この場合、MPLS コア網はダイナミックな LSP 運用 (LDP、RSVP、OSPF 等のプロトコルが稼働) であるのに対して、MPLS-TP アクセス/アグリゲーション網は静的な LSP 運用である。OAM に関しては、コア網の OAM が IETF 標準の MPLS OAM であるため、End-to-End では IETF 標準の MPLS OAM が利用できることが運用のシンプル化の面で好ましい。また、アグリゲーションノードでは MPLS-TP の双方向 LSP と MPLS の片方向 LSP の変換等の機能を実現することが必要となる。

2. 4. 3 Mobile RAN [33]

Radio Access Network (RAN) は、携帯電話の基地局(BTS)と基地局制御局 (BSC) 間の転送網であり、サービスの制御とデータ転送の両方の機能を担っている。現在は、図 2.4-3 に示すように、SDH/SONET の ATM リング網にフロントエンド (FE) の BTS が E1/T1 レベルで接続されて、BSC/PCF からの制御とデータ転送が行われている。

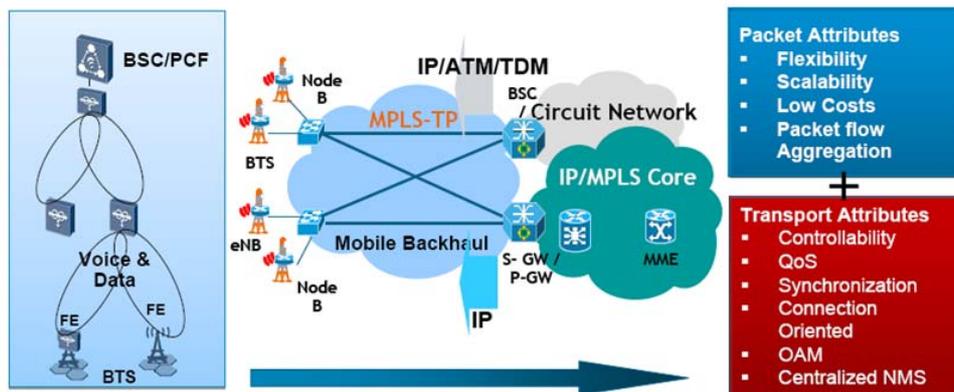


図 2.4-3 MPLS-TP による RAN の提供

MPLS-TP に対しては、以下の 5 項目の機能を提供することが期待されている。

- (a) サービス制御と転送における柔軟な網の管理
- (b) SDH や MSTP が提供していたのと同等の耐障害性の維持
- (c) 2G から 4G で要求される 20~100 Mbps の帯域を有するパスと Ethernet インタフェースの提供
- (d) マルチメディア/音声/制御トラフィックの統計多重伝送
- (e) インバンドでの時刻と周波数同期

また、MPLS-TP にはパケット転送の特性として、柔軟性、スケーラビリティ、低コスト、パケットフローの多重機能が期待され、伝達網の特性として、制御性、QoS 保証、同期、コネクションオリエンテッド、OAM、NMS での管理運用が期待されている。

2. 4. 4 Dynamic MPLS-TP over OTN/DWDM for ULH [33]

(1) Overlay Model

2.3.5 節において Verizon でのバックボーン網への MPLS-TP 適用を紹介した。現在、ASON のフレームワークとして UNI を有してダイナミックに制御可能な SDH/SONET が AT&T、China Telecom (CT)、Deutsche Telekom (DT)、France Telecom (FT)、Telecom Italia (TI)、Verizon といったキャリアで導入されている。クライアント網としては、SDH/SONET インタフェースや Ethernet インタフェースを持った、企業網が想定され、MSPP/MSSP/MSTP 装置、Ethernet スイッチ、IP ルータ等の機器が接続される。

この SDH/SONET の VC パス接続を MPLS-TP の LSP に置換するのが、Dynamic MPLS-TP over OTN/DWDM for ULH である。一般的に MPLS-TP 装置のインタフェースは安価な Ethernet が利用される、伝送装置を介して Ethernet を OTN/DWDM に收容する形態と、MPLS-TP 装置が OTN インタフェースを具備する、あるいは DWDM まで具備す

る形態が想定されるが、Dynamic に制御されるのは基本的には MPLS-TP レイヤとなる。
 図 2.4-4 に、Dynamic MPLS-TP over OTN/DWDM for ULH の概要を示す。

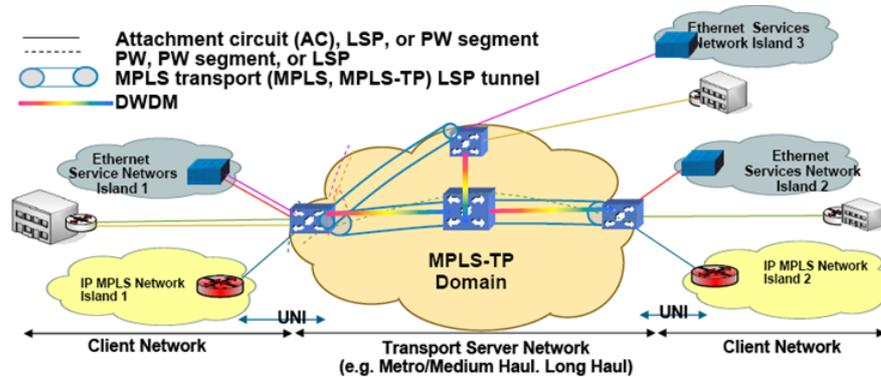


図 2.4-4 Dynamic MPLS-TP over OTN/DWDM for ULH 概要

(2) Peer Model (Unified MPLS)

本節(1)で示した Overlay Model での利用では、MPLS-TP ドメインがコア網を構成し、Ethernet 網や IP/MPLS 網がクライアント網として收容されるため MPLS-TP 網がサーバ網と位置付けられている。2.4.2 節(2)項で示した End-to-End MPLS では、アグリゲーション用の MPLS-TP 網がコア IP/MPLS 網に接続されている。図 2.4-5 に示すように End-to-End には MPLS LSP が設定され、階層化 LSP としてアグリゲーション部では MPLS-TP LSP が、コア部では MPLS LSP が設定される。このような網アーキテクチャを最近では Unified MPLS と呼ぶことが多い。Unified MPLS においては、MPLS-TP 網と IP/MPLS 網とは Peer の関係にある。

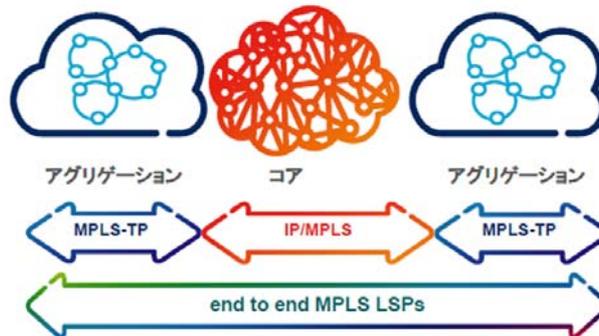


図 2.4-5 Unified MPLS 概念図

Unified MPLS は、図 2.4-6 に示すように、MPLS が提供可能なサービスを完全にカバーしている。図 2.4-6 のコントロールに注目すると、多くのサービスがダイナミック制御を

要求しているため、End-to-Endにおいてもダイナミック性が有することが望まれることがあると言える。そのため、スタティック指向な MPLS-TP とダイナミック指向な IP/MPLS との接続が課題となる。

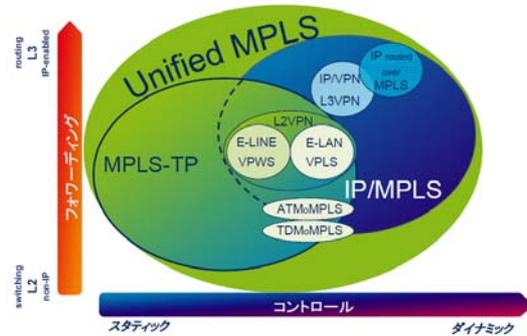


図 2.4-6 MPLS サービスマップ

Unified MPLS では、MPLS におけるコントロールプレーン (CP) とデータプレーン (DP) の 1:1 のマッチングという 1 台の装置に対して内蔵された CP モジュールを搭載するという制約を排除し、MPLS-TP の集中制御に合わせて中央集約型のコントローラを MPLS-TP ドメインに設置し、MPLS-TP ドメインが IP/MPLS からは単一の IP/MPLS ノードとして見え、一つのネットワーク機器として仮想的に振舞うことで IP/MPLS と MPLS-TP の CP 接続を実現する。図 2.4-7 に Unified MPLS での CP の統合概念を示す。

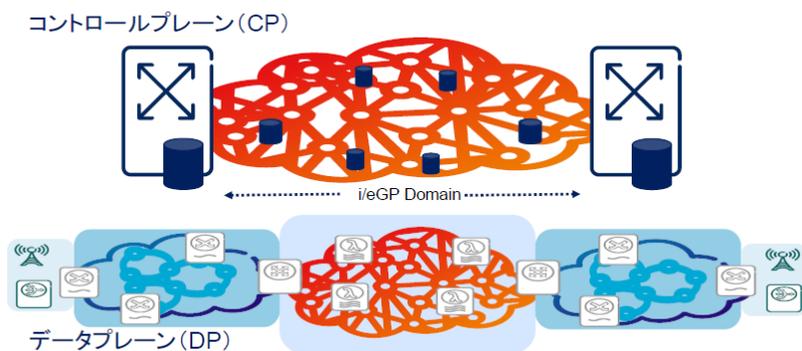


図 2.4-7 Unified MPLS でのコントロールプレーン統合概念

中央集約型のコントローラを導入する理由を以下に示す。

- (a) P-OTS 等の統合ノード上でレイヤの異なる複数のサービスを提供している
 - (ア) 全サービスでダイナミック制御機能を不要としているわけではない
 - 波長貸、専用線サービス等はスタティックで十分
 - (イ) 1 ノード内における各サービス収容の需要が読みにくいいためコントロ

ールプレーンの需要も読みにくい

OTN による専用線、L2VPN や L3VPN、MPLS による TDM 収容や ATM 収容が存在

- (b) シングルポイントで様々なネットワーク機能のオートメーション化が必要
 - (ア) サービスおよび接続プロビジョニング
 - (イ) リストレーション
 - (ウ) 既存 IP/MPLS 網との接続
 - (エ) VPLS、VPWS、VRF、VSI、VPN などのバーチャル化
- (c) ダイナミック性が求められるネットワークアーキテクチャが登場している
 - (ア) クラウド間トラヒックへの柔軟なオンデマンド接続
 - (イ) 3GPP R10 Heterogeneous Networks の登場と Self Organized Network (SON) との連携
 - (ウ) クラウド RAN 向けバックホール帯域のダイナミック制御
 - (エ) 固定とモバイルのポリシー・サーバー同士の連携とダイナミック帯域制御

2. 5 MPLS-TP に関する相互接続デモ

国際会議 MPLS2010 [34]、国際会議 iPOP2011 [35]、国際会議 MPLS2011 [36] における相互接続デモンストレーションを紹介する。

2. 5. 1 国際会議 MPLS2010

MPLS2010 は、2010 年 10 月 24 日～27 日に米国ワシントン D.C.にて開催された。

MPLS-TP の相互接続に関しては IETF の BFD による OAM の動作確認が行われた。参加ベンダは、Cisco、Ericsson、日立製作所、Ixia、NEC の 5 社である。検証された項目は以下の通りである。

- (a) MPLS-TP static LSP の確立
- (b) MPLS-TP のデータプレーンの疎通確認
- (c) BFD による CC メッセージの交換確認
- (d) BFD CC による故障同定
- (e) BFD CC による故障検出とプロテクション動作

図 2.5-1 に MPLS-TP 検証試験のトポロジーを示す。

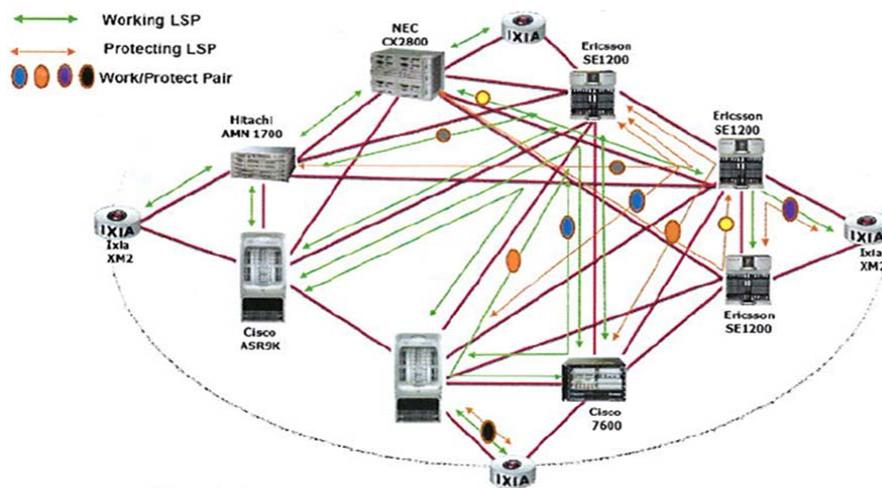


図 2.5-1 MPLS-TP 相互接続試験トポロジー

以下に示す LSP ペアがプロテクション用に設定された。

- (a) W: Ixia XM2 – Ericsson SE1200
P: Ixia MX2 – Ericsson SE1200 – Ericsson SE1200
- (b) W: Cisco 7600 – Cisco ASR9K – Ericsson SE1200
P: Cisco 7600 – Ericsson SE1200 – Ericsson SE1200
- (c) W: NEC CX2800 – Ericsson SE1200

P: NEC CX2800 – Ericsson SE1200 – Ericsson SE1200

(d) W: Cisco ASR9K – Cisco 7600 – Ericsson SE1200

P: Cisco ASR9K – Ericsson SE1200 – Ericsson SE1200

(e) W: 日立 AMN1700 – Ericsson SE1200

P: 日立 AMN1700- Ericsson SE1200 – Ericsson SE1200

この結果からは、

- ① プロテクション側のトランジットには、Ericsson SE1200 しかなれていない
- ② ワーキング側のトランジットには、Cisco ASR9K と Cisco 7600 がなれている
- ③ 通常 LSP のトランジットには、Cisco ASR9K と Cisco 7600 と Ericsson SE1200 がなれている
- ④ NEC CX2800 と Cisco ASR9K を結ぶ LSR は張られていない
- ⑤ 日立 AMN1700 と Cisco 7600 を結ぶ LSR は張られていない

といったことが読み取れる。

2. 5. 2 国際会議 iPOP2011

iPOP2011 は、2011 年 6 月 2 日～3 日に川崎市 NEC 玉川事業所にて開催された。

MPLS-TP の相互接続に関しては ITU-T の Y.1731 ベースの OAM (G.8113.1) と IETF の BFD による OAM の相互接続がデモされた。参加ベンダは、Hitachi、NEC の 2 社である。デモされた項目は以下の通りである。

- (a) インタフェースごとに異なる OAM を適用して、ドメイン内とドメイン間で異なる OAM を適用する。
- (b) LSP プロテクション

図 2.5-2 に MPLS-TP 相互接続デモのトポロジーを示す。

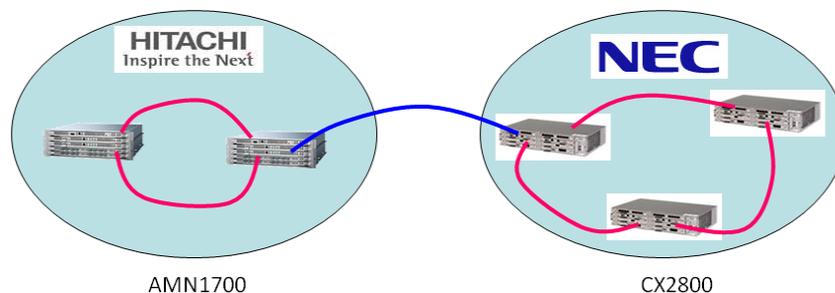


図 2.5-2 MPLS-TP 相互接続デモンストラショントポロジー

Hitachi、NEC 共にインタフェースごとに異なる OAM を動作させることが可能であるこ

とが示されていた。

2. 5. 3 国際会議 MPLS2011

MPLS2011 は、2011 年 10 月 16 日～19 日に米国ワシントン D.C.にて開催された。

MPLS-TP の相互接続に関しては IETF の BFD による OAM および LSP Ping の動作確認が行われた。参加ベンダは、Cisco、Ixia、NEC、Spirent の 4 社である。検証された項目は以下の通りである。

- (a) MPLS-TP static LSP の確立
- (b) MPLS-TP のデータプレーンの疎通確認
- (c) BFD による CC メッセージ、CV メッセージ、RDI メッセージの交換確認
- (d) BFD 故障検出と 1:1 プロテクション動作
- (e) G-Ach を用いた LSP Ping
- (f) MPLS OAM ドメインと Y.1731 OAM ドメインに跨った Multi-segment PW サービス

図 2.5-3 に MPLS-TP 検証試験のトポロジーを示す。

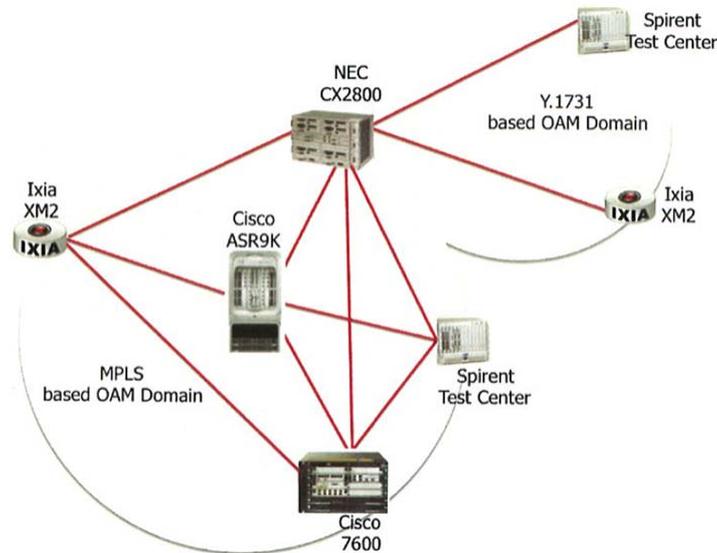


図 2.5-3 MPLS-TP 相互接続検証試験トポロジー

表 2.5-1 に示す LSP が設定され、OAM 試験が行われた。

表 2.5-1 検証された LSP リスト

LER	LSR	LER
Cisco ASR9K		NEC CX2800
Cisco 7600		NEC CX2800
Cisco 7600		Ixia
Cisco ASR9K		Spirent
NEC CX2800		Spirent
NEC CX2800		Ixia
Cisco ASR9K	NEC CX2800	Cisco 7600
Cisco ASR9K	NEC CX2800	Spirent
NEC CX2800	Cisco 7600	Ixia
Cisco ASR9K	NEC CX2800	Ixia

図 2.5-3 と表 2.5-1 からは、

- ① トランジットには、Cisco 7600 と NEC CX2800 しかなれていない
- ② Y.1731 をサポートするのは、NEC CX2800 と Ixia XM2 と Spirent Test Center である
- ③ NEC CX2800 は、Y.1731 ドメインと MPLS OADM ドメインのインターワークを行うことができる

といったことが読み取れる。

2. 6 Optical Internetworking Forum (OIF) における Dynamic MPLS-TP 相互接続の状況

2. 6. 1 はじめに

Optical Internetworking Forum (OIF) [37] は、主に IP ルータや Ethernet スイッチをクライアント装置と位置付け、Next Generation SDH/SONET (NG-SDH/SONET) 装置、OXC 装置、ROADM 装置等で構成される伝達網との間の制御インタフェースである UNI と伝達網間の制御インタフェース E-NNI に関する標準実装仕様 (IA: Implementation Agreement) の作成と、IA に基づいて実装されたプロトコルの相互接続性検証をターゲットとしている。2008 年より、OIF においても伝達網としての MPLS-TP がパケットトランスポート技術として注目されてきており、ITU-T や IETF の動向を睨みながら、UNI と E-NNI の制定に向けて活動を行ってきている。

ここでは、OIF における MPLS-TP に関する技術的な動向として以下の 3 点に注目して調査を行った結果を紹介する。

- (a) 国際的なキャリアのパケットトランスポートに関する関心の方向
- (b) 伝送装置ベンダのパケットトランスポートに関する関心の方向
- (c) OIF 2009 world-wide interoperability demonstration における MPLS-TP デモンストレーション概要

2. 6. 2 OIF における UNI/E-NNI に関する取組概要

OIF (<http://www.oiforum.com>) は、1998 年に設立され、アジア・米・欧 100 弱のキャリア、システムベンダ、コンポーネントベンダが参加している。主要な活動テーマは、パケットネットワーク (ユーザ網) と伝達網 (プロバイダ網) との間のインタフェースにおける物理仕様および制御プロトコル仕様である。具体的な成果物としては、実装合意書である IA および相互接続性検証デモンストレーションによるマーケットの創出となる。

制御プロトコル仕様に関しては、ITU-T で制定された ASON アーキテクチャ [38] を基本アーキテクチャとし、IETF で制定されている GMPLS プロトコル群を UNI/E-NNI に適用する。OIF では、ASON アーキテクチャに対応するための拡張 GMPLS プロトコルの作成や、GMPLS プロトコル群に対するオプションやパラメータの選択、各種アドレスの体系整理、制御用ネットワークの構成等をまとめて IA [39] としている。

これまで、伝達網装置の進化に合わせて UNI および E-NNI の改版が進められてきている。IP ルータ用 POS インタフェースをターゲットして第一世代の UNI1.0 が作成され、SDH/SONET インタフェースをターゲットとして第一世代の E-NNI1.0 が作成された。第

一世代においては、ユーザ網とプロバイダ網の間のインタフェースはSDH/SONETであり、プロバイダ網がユーザ網に提供するサービスはSDH/SONET専用線やL1VPNである。Ethernet技術の進展に伴い、ユーザ網とプロバイダ網の間のインタフェースがEthernet化され、プロバイダ網がユーザ網に提供するサービスは、イーサネット専用線(EPL、E-LINE)やイーサネット仮想専用線(EVPL)に変化した。この第二世代では、ユーザ網とプロバイダ網間のEthernetインタフェースをターゲットとしてUNI2.0が作成された。プロバイダ網では、EthernetをSDH/SONETにマッピングして転送されるため、プロバイダ網間の接続インタフェースはSDH/SONETである。そのため、E-NNI1.0がそのまま利用可能である。E-NNIに関しては、UNI2.0で拡張された機能をサポートするためにE-NNI2.0が作成された。ここ数年のパケットトランスポート技術の進展に合わせて、第三世代のUNI/E-NNIの検討が開始された。第三世代においては、プロバイダ網の構成が純粋Ethernet(PBB)やMPLS-TPとなることが想定されており、プロバイダ網間の接続インタフェースとしてEthernet(厳密にはEthernet over OTNを想定)を適用する。

- (a) 第一世代 : Packet over SDH/SONET
 - UNI1.0 (SDH/SONET)、E-NNI1.0 (SDH/SONET)
- (b) 第二世代 : Packet over Ethernet over SDH/SONET
 - UNI2.0 (Ethernet)、E-NNI1.0 (SDH/SONET)、E-NNI2.0 (SDH/SONET/OTN)
- (c) 第三世代 : Packet over Ethernet over packet-transport
 - プロバイダ網の構成候補
 - ◇ PBB-TE (Traffic Engineering)
 - ◇ PBB-TE over OTN
 - ◇ MPLS-TP over Ethernet
 - ◇ MPLS-TP over Ethernet over OTN
 - ◇ MPLS-TP over SDH/OTN

2. 6. 3 第三世代に対する主要キャリアの取組

OIFにおける主要なキャリアメンバは、アジア(CT、KDDI、NTT)、北米(AT&T、Verizon(VZ))、ヨーロッパ(DT、FT、TI)の8キャリアである。各社のパケットトランスポートに対する基本スタンスは以下のように推測される。

- (a) AT&T : Packet over SONET/OTN over wavelength 指向
 - 第二世代 + All Optical Network
- (b) CT : Packet over SDH 指向

- 第一世代、第二世代のより一層の機能高度化

(c) FT : PBB-TE 指向

(d) DT、KDDI、NTT、TI、VZ : PBB-TE と MPLS-TP の両方に高い関心

- PBB-TE と MPLS-TP は適材適所で使い分けを行う
- ATM のマイグレーションに関しては、MPLS-TP が圧倒的に有利

MPLS-TP に関しては、各社ごとにはある程度異なった要求を持っているが、一般的事項として次のような要求が存在することを OIF キャリアメンバー間で合意している。

(a) MPLS-TP は On-demand EVPL サービス実現のためのプラットフォーム

- UNI : Ethernet
- E-NNI : Ethernet or Ethernet/OTN or OTN

(b) MPLS-TP は SC、SPC、PC のサービスを提供

- SC : CE - CE にシグナリングで、EVC を設定
 - ◇ UNI シグナリングを利用
 - ◇ MPLS-TP LSP は PE - PE に動的に設定され、EVC をマッピング
- SPC : CE-PE 間は固定的な接続で設定
 - ユーザ要求に対応して、PE-PE をシグナリングして EVC を設定
 - ◇ MPLS-TP LSP は、PE-PE に動的に設定され、EVC をマッピング
- PC : CE-PE 間、PE-PE 間は固定的な接続で設定
 - ◇ MPLS-TP LSP は、PE-PE に静的に設定され、EVC をマッピング

(c) PC サービスは基本機能であるため、OIF 的には興味の対象外

- D-Plane の相互接続を確認する際には PC サービスとして静的な MPLS-TP LSP を設定する試験も実施

(d) MPLS-TP LSP の設定は Internal NNI (I-NNI)を適用

- I-NNI は GMPLS プロトコルには拘らず、NMS からの設定も可
- ベンダ独自のプロトコル仕様を I-NNI として容認
 - I-NNI はベンダの差別化要因であり、標準とする必要無

(e) ベンダアイランド間の相互接続は E-NNI で実施

- E-NNI のサポートは必須事項
- PE-PE 間のインタフェースは Ethernet
 - Ethernet ベースの E-NNI は、Metro Ethernet Forum (MEF)が仕様制定するため、OIF としては MEF E-NNI を流用

2. 6. 4 OIF ベンダメンバの MPLS-TP サポート状況

MPLS-TP を謳う場合でも、2009 年時点では中身は ITU-T T-MPLS であることが多々あった。各ベンダとも、T-MPLS 向けに開発した機器からの MPLS-TP への改修を随時実行し、MPLS-TP 化が完了したベンダが MPLS や iPOP での相互接続を行っている状況である。2009 年のデモに向けた DP、CP、MP に対してベンダの対応状況を以下に示す。

(a) DP に関して MPLS-TP/T-MPLS Ready

- 3 社

(b) MP に関して MPLS-TP/T-MPLS Ready

- 3 社

(c) CP に関して MPLS-TP/T-MPLS Ready

- 4 社 (I-NNI)
- 2 社 (UNI-N)
- 1 社 (UNI-C)

2009 年に実施された OIF World-wide Interoperability Demonstration には、4 社が参加した。

2. 6. 5 OIF 2009 World-wide Interoperability Demonstration [40]

(1) デモンストレーション概要

UNI2.0 (Ethernet Signaling IA、SDH/SONET Signaling IA)、E-NNI 2.0 (SDH/SONET/OTN Signaling IA)、E-NNI2.0 (SDH/SONET/OTN Routing pre-IA)、E-NNI 2.0 restoration signaling demo implementation を利用して、EVPL service over MPLS-TP、EVPL service over PBB、Multi-domain restoration in SDH/SONET のマルチベンダ、マルチドメイン環境でのサービスデモンストレーションを、CT、DT、FT、KDDI、NTT、TI、VZ の 7 キャリアサイトを接続して行われた。各キャリアサイトは E-NNI で接続 (DP は仮想リンク接続) され、サイト内ではベンダ間を E-NNI 接続 (DP は実リンク接続) した。OIF の定義する E-NNI は、Intra Carrier E-NNI と位置付けられており、デモ全体として構築したのは単一キャリアのネットワークであり、インターキャリアのサービスデモではないことに注意が必要である。図 2.6-1 に 2009 World-wide Interoperability Demonstration におけるトポロジーと各キャリアサイトに参加したベンダを示す。

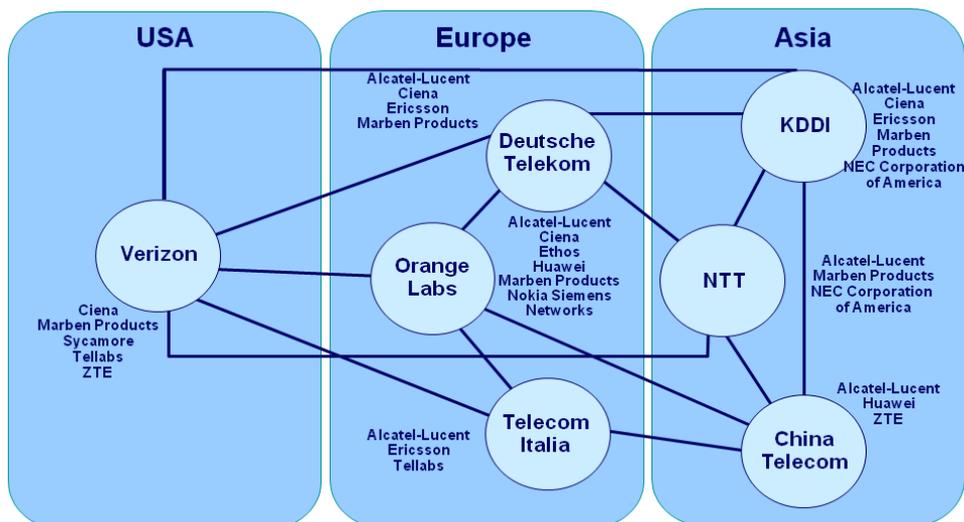
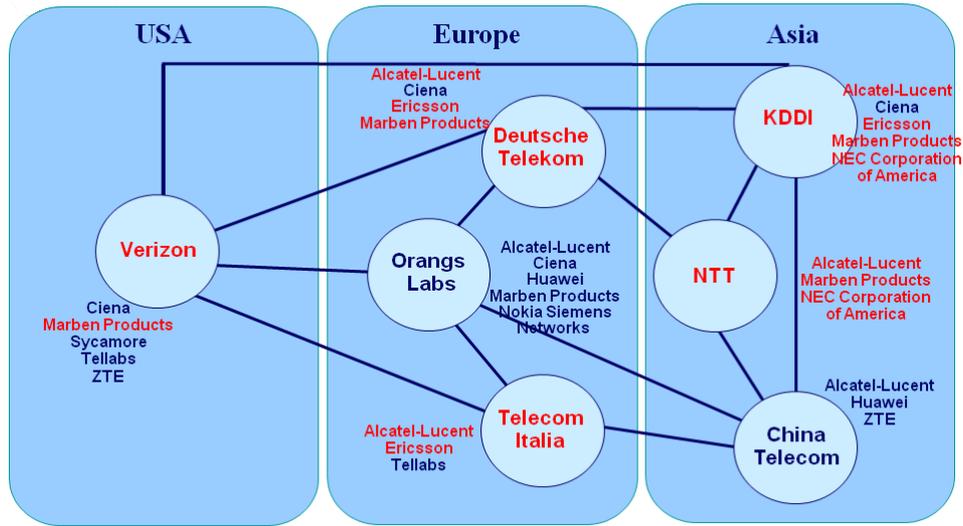


図 2.6-1 OIF 2009 Demonstration Global Topology

(2) MPLS-TP デモンストレーション

MPLS-TP に関する DP および MP の相互接続性検証が、DT、KDDI、NTT、TI の 4 キャリアサイトで実施された。具体的には、Alcatel-Lucent と Ericsson (DT、TI)、Alcatel-Lucent と NEC (NTT)、Alcatel-Lucent と Ericsson と NEC (KDDI)である。

CP に関しては、DP サポートかつ UNI-N をサポートするベンダが 1 社のみであり、E-NNI をサポートしているベンダが存在しなかったことから、KDDI、NTT の 2 キャリアサイトでのみの相互接続試験が実施された。相互接続試験は、UNI-C – UNI-N の組合せのみであるため、相互接続試験後にデモンストレーションに向けて DT および VZ サイトの UNI-C から、NTT および KDDI サイトの UNI-N を経由した SC サービスの確認試験が実施されている。図 2.6-2 に MPLS-TP 相互接続試験に参加したサイトとベンダを示す。



赤字：MPLS-TP 試験サイト及びベンダ

図 2.6-2 MPLS-TP 試験サイトおよび参加ベンダ

MPLS-TP (T-MPLS) に関する相互接続性検証試験項目を表 2.6-1 に示す。

表 2.6-1 MPLS-TP 相互接続性検証試験項目

Service Type	Data Plane Test Case Category	Description
EPL	MPLS-TP unidirectional forwarding TMP	Forwarding plane functionality for uni-directional p2p Ethernet services
EVPL type 2	MPLS-TP unidirectional multiplexing TMC	MPLS-TP multiplexing for multiple uni-directional p2p Ethernet services over the same TMP
EVPL type 3	MPLS-TP unidirectional multiplexing/2 TMC	MPLS-TP multiplexing for multiple uni-directional p2p Ethernet services over the same TMP
EVPL type 3	MPLS-TP unidirectional forwarding and switching TMC	MPLS-TP forwarding for uni-directional p2p Ethernet services with TMP between the edge T-MPLS/MPLS-TP switches of each of 2 domains and TMC setup e2e and switched at the domain edges.
EPL	MPLS-TP bidirectional TMP forwarding	Forwarding plane functionality for bi-directional p2p Ethernet services over a single- or multi-vendor network
EVPL type 2	MPLS-TP bidirectional TMC multiplexing	MPLS-TP multiplexing for multiple bi-directional p2p Ethernet services over the same TMP
EVPL type 3	MPLS-TP bidirectional TMC multiplexing/2	MPLS-TP multiplexing for multiple bi-directional p2p Ethernet services over the same TMP

Service Type	Data Plane Test Case Category	Description
EVPL type 3	MPLS-TP bidirectional TMC forwarding and switching	MPLS-TP forwarding for bi-directional p2p Ethernet services with TMP between the edge T-MPLS/MPLS-TP switches of each of 2 domains and TMC setup e2e and switched at the domain edges.
EVPL type 3	MPLS-TP TMC Forwarding MS-PW at domain boundary	Bi-directional p2p service with TMP is setup between the MPLS-TP switches of each domain and TMC is setup inside each domain and stitched together (MS-PW) at the edge switch.
EVPL type 3	MPLS-TP TMC Forwarding with MAC/L2tag switching	Bi-directional p2p service with TMP setup between edge MPLS-TP switches of each domain and TMC is setup inside each domain and forwarded at the edge switch based MAC/L2tag values.
EPL	QoS functionality at TMP level	Forward Ethernet frames over multiple TMC and TMP between nodes, discard low priority traffic if congested, leaving high priority traffic unaffected.
EVPL type 3	QoS functionality at TMC level	Forward Ethernet frames over multiple TMC between nodes, discard low priority traffic if congested, leaving high priority traffic unaffected.
EVPL type 3	QoS functionality both at TMP and TMC levels (hierarchical QoS)	Forward Ethernet frames over multiple TMC and TMP between nodes, discard low priority traffic if congested, leaving the high priority traffic unaffected.
EPL	MPLS-TP TMP OAM Continuity Verification	Show ability of CV in detecting loss of continuity at each endpoint in bi-directional failure.
EVPL type 3	MPLS-TP TMP OAM Continuity Verification/2	Show ability of CV in detecting loss of continuity at each endpoint in bi-directional failure.
EPL	MPLS-TP TMP OAM Connectivity Verification	Show ability of CV in detecting configuration errors in MEG, MEP and PHB settings and to block egress traffic.
EPL	MPLS-TP TMP OAM Remote Defect Indication	Show ability to send RDI upstream after detecting loss of continuity due to uni-directional failure.
EVPL type 3	MPLS-TP TMP OAM Remote Defect Indication/2	Show ability to send RDI upstream after detecting loss of continuity due to uni-directional failure.

Service Type	Data Plane Test Case Category	Description
Protected EPL	MPLS-TP TMP 1:1 Protection with APS (Link Failure)	Show functioning of T-MPLS 1:1 Trail Protection using APS protocol to align the protection ends on unidirectional failure condition
Protected EPL	MPLS-TP TMP 1:1 Protection with APS (Operator commands)	Show functioning of MPLS-TP 1:1 Trail Protection using APS protocol to align the protection ends on operator commands
E-Tree	MPLS-TP E-Tree	Show E-TREE (p2mp) service on the MPLS-TP network
EPL	MPLS-TP Tunnel OAM Continuity Verification	Show ability of BFD in detecting loss of continuity at each endpoint in bi-directional failure.
Protected EPL	MPLS-TP Tunnel 1:1 Protection with APS (Link Failure)	Show functioning of MPLS-TP 1:1 Trail Protection using APS protocol to align the protection ends on unidirectional failure condition
Protected EPL	MPLS-TP Tunnel 1:1 Protection with APS (Operator commands)	Show functioning of MPLS-TP 1:1 Trail Protection using APS protocol to align the protection ends on operator commands

※TMC: T-MPLS Channel、TMP: T-MPLS Path (MPLS-TP では未定義)

(4) EVPL over MPLS-TP CP デモンストレーション

図 2.6-3 に UNI-C を利用して EVPL サービスを MPLS-TP 上に実現したデモンストレーション例を示す。図 2.6-3 では、VZ の UNI-C から NTT の UNI-C までの EVPL と、NTT の UNI-C から DT の UNI-C、DT の UNI-C から KDDI の UNI-C までの 3 本の EVPL が設定されていることを示している。

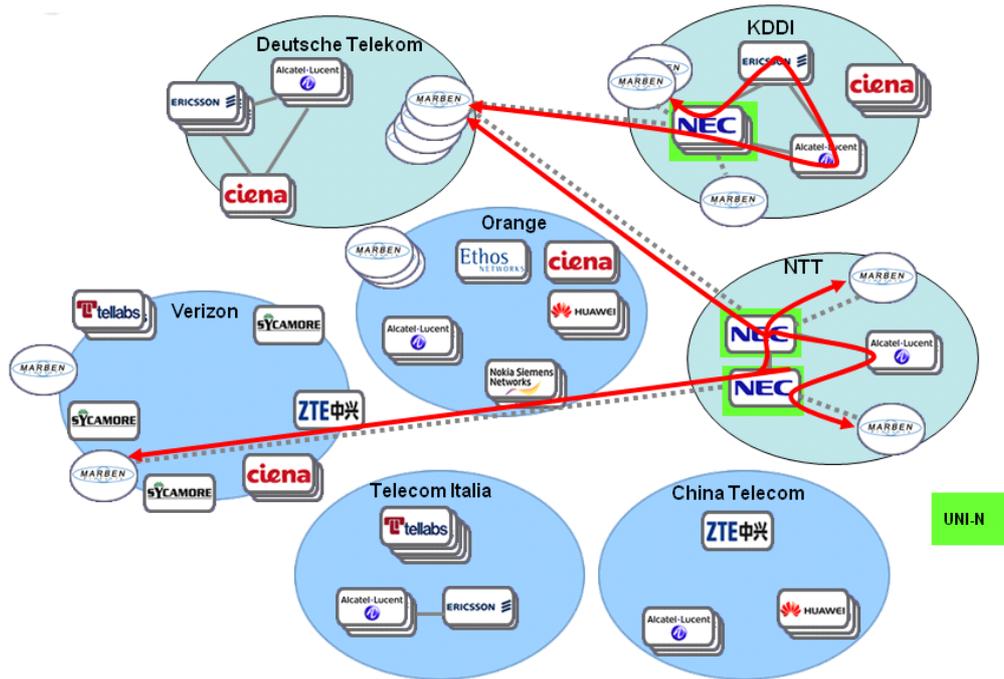


図 2.6-3 EVPL over MPLS-TP デモンストレーション例

デモンストレーションのシナリオ例を以下に示す。

(a) EVPLs are established by intra-lab and inter-lab UNI signaling.

- MPLS-based LSPs are statically configured.
- Clients initiate service request using UNI 2.0 signaling
- UNI-N devices create Ethernet pseudo wires over the existing MPLS LSPs
- Single connection setup with single VLAN ID
- 1) Marben1 (NTT) - NEC1 (KDDI) - NEC3 (KDDI) - Marben2 (KDDI)
 - ◇ VLAN ID = 3, Tunnel ID = 1
- 2) Marben1 (KDDI) - NEC1 (NTT) - NEC2 (NTT) - Marben2 (NTT)
 - ◇ VLAN ID=3, Tunnel ID = 1

(b) Multiple connection setup with different VLAN ID to different destination

- 3-1) Marben1 (NTT) - NEC1 (NTT) - NEC3 (NTT) - Marben2 (VZ)
 - ◇ VLAN ID=30, Tunnel ID = 2
- 3-2) Marben1 (NTT) - NEC1 (NTT) - NEC3 (NTT) - Marben1 (DT)
 - ◇ VLAN ID =40, Tunnel ID = 3

(c) Connection set up from Overseas UNI site

- 4-1) Marben2 (DT) - NEC1 (NTT) - NEC2 (NTT) - Marben2 (NTT)
 - ◇ VLAN ID =4, Tunnel ID = 1
- 4-2) Marben1 (DT) - NEC1 (KDDI) - NEC2 (KDDI) - Marben2 (KDDI)

◇ VLAN ID =2, Tunnel ID =1

(d) Connection Tear down

2.7 まとめ

高信頼かつ効率的なパケットベースのトランスポート技術として MPLS-TP の標準化が進められており、NTT Communications ではサービスアグリゲーション網への適用が進められている。また、Verizon では、アグリゲーション網に加えて、コア網への適用も視野に入れた検討が進められている。特に、Verizon や AT&T といった大規模網を保有しているキャリアは、リストレーションに代表されるダイナミック制御への関心が高く、ユーザ主導の SC および SPC サービスの導入も進んでいる。

現在 NMS によるスタティック運用が現実的とされている MPLS-TP に対しても、IP/MPLS コア網との接続や RAN 等への適用によるダイナミック運用が期待されはじめており、Unified MPLS による集中管理コントローラや OIF の UNI 等ダイナミック運用に対するキャリア、ベンダ、および標準化団体の動向にますます注意が必要となる。

【参考文献】

- [1] MPLS Working Group, <http://dataracker.ietf.org/wg/mpls/>
- [2] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture," IETF RFC 3031, Jan. 2001.
- [3] D. Thaler and B. Aboba, "What Makes for a Successful Protocol?," IETF RFC 5218, July 2008.
- [4] L. Andersson, I. Maineni, and B. Thomas, "LDP Specification," IETF RFC 5036, Oct. 2007.
- [5] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, and G. Swallow, "RSVE-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels," IETF RFC 3209, Dec. 2001.
- [6] E. Mannie (Editor), "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF RFC 3945, Oct. 2004.
- [7] P. Pan, G. Swallow, and A. Atlas (Editors), "Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels," IETF RFC 4090, May 2005.
- [8] S. Bryant and P. Pate (Editors), "Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Architecture," IETF RFC 3985, March 2005.
- [9] M. Bocci, S. Bryant, D. Frost, L. Levrau, and L. Berger (Editors), "A Framework for MPLS in Transport Networks," IETF RFC 5921, July 2010.
- [10] B. Niven-Jenkins (Editor), D. Brungard (Editor), M. Betts, (Editor), N. Sprecher, and S. Ueno, "Requirements of an MPLS Transport Profile," IETF RFC 5654, Sept. 2009.
- [11] D. Frost, S. Bryant, and M. Bocci (Editors), "MPLS Transport Profile Data Plane Architecture," IETF RFC 5960, Aug. 2010.
- [12] M. Vigoureux, D. Ward, and M. Betts (Editors), "Requirements for Operations, Administration, and Maintenance (OAM) in MPLS Transport Networks," IETF RFC 5860, May 2010.
- [13] K. Lam, S. Mansfield, and E. Gray, "Network Management Requirements for MPLS-based Transport Networks," IETF RFC 5951, Sept. 2010.
- [14] IEEE 802.1AX-2008, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Link Aggregation," Nov. 2008.
- [15] M. Bhatia, M. Chen, Z. Wang, L. Guo, and M. Binderberger, "Bidirectional Forwarding Detectin (BFD) on Link Aggregation Group (LAG) Interfaces," Internet Draft, draft-mmm-bfd-on-lags-02.txt, work in progress, Jan. 2012.
- [16] R. Aggarwal, K. Kompella, T. Nadeau, and G. Swallow, "Bidirectional Forwarding Detection (BFD) for MPLS Label Switched Paths (LSPs)," IETF RFC 5884, June 2010.
- [17] K. Kompella and G. Swallow, "Detecting Multi-Protocol Label Switched (MPLS) Data Plane Failures," IETF RFC 4379, Feb. 2006.
- [18] M. Bocci, M. Vigoureux, S. Bryant (Editors), "MPLS Generic Associated Channel," IETF RFC 5586, June 2009.
- [19] ITU-T Draft Recommendation G.8113.2/Y.1372.2, "Operations, administration and maintenance mechanisms for MPLS-TP networks using the tools defined for MPLS," not approved.
- [20] D. Frost and S. Bryant, "Packet Loss and Delay Measurement for MPLS Networks," IETF RFC 6374, Sept. 2011.
- [21] D. Frost and S. Bryant, "A Packet Loss and Delay Measurement Profile for MPLS-Based Transport Networks," IETF RFC 6375, Sept. 2011.
- [22] Y. Weingarten (Editor), S. Bryant, E. Osborne, N. Sprecher, and A. Fulignoli (Editor), "MPLS Transport Profile (MPLS-TP) Linear Protection," IETF RFC 6378, Oct. 2011.
- [23] Huub van Helvoort (Editor), "MPLS-TP Ring Protection Switching (MRPS)," Internet Draft draft-helvoort-mpls-tp-ring-protection-switching-01.txt, work in

- progress, Aug. 2011.
- [24] Y. Weingarten, S. Bryant, N. Sprecher, D. Ceccarelli, D. Caviglia, F. Fondelli, M. Corsi, B. Wu, and X. Dai, "Applicability of MPLS-TP Linear Protection for Ring Topologies," Internet Draft draft-ietf-mpls-tp-ring-protection-00.txt, work in progress, Nov. 2011.
 - [25] G. Liu and Y. Weingarten, "MPLS-TP protection for interconnected rings," Internet Draft draft-liu-mpls-tp-interconnected-ring-protection-00, work in progress, Oct. 2011.
 - [26] I. Busi and D. Allan (Editors), "Operations, Administration, and Maintenance Framework for MPLS-Based Transport Networks," IETF RFC 6371, Sept. 2011.
 - [27] ITU-T Draft Recommendation G.8113.1/Y.1372.1, "Operations, Administration and Maintenance mechanism for MPLS-TP in Packet Transport Network (PTN)," Feb. 2011.
 - [28] IEEE 802.1ah-2008, "IEEE Standard for Local and metropolitan area network – Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 7: Provider Backbone Bridges," Aug. 2008.
 - [29] A. Malis, L. Martini, J. Brayley, and T. Walsh, "Pseudowire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Asynchronous Transfer Mode (ATM) Transparent Cell Transport Service," IETF RFC 4816, Feb. 2007.
 - [30] A. Malis, P. Pate, R. Cohen (Editor), and D. Zelig, "Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy (SONET/SDH) Circuit Emulation over Packet (CEP)," IETF RFC 4842, Apr. 2007.
 - [31] A. Malis, "MPLS-TP Overview," iPOP 2011, K-2, June 2011.
 - [32] S. Elby, "MPLS-TP: The next wave of MPLS deployment," MPLS 2010, Mon1-3, Oct. 2010.
 - [33] L. Fang, N. Bitar, and R. Zhang, "MPLS-TP Deployment Scenarios and Design Considerations," MPLS 2010, Mon2-4, Oct. 2010.
 - [34] 13th Annual Conference MPLS 2010, <http://www.isocore.com/mpls2010/>
 - [35] 7th International Conference on IP + Optical Network (iPOP 2011), <http://www.pilab.jp/ipop2011>
 - [36] 14th Annual Conference MPLS 2011, <http://www.isocore.com/mpls2011/>
 - [37] The Optical Internetworking Forum, <http://www.oiforum.com/>
 - [38] ITU-T Recommendation G.8080/Y.1304, "Architecture for the automatically switched optical network (ASON)," June 2006.
 - [39] OIF Implementation Agreements and Guideline Documents, <http://www.oiforum.com/public/impagreements.html>
 - [40] 2009 OIF Worldwide Interoperability Demonstration - Enabling Broadband On-Demand Services, http://www.oiforum.com/public/OIF_Networking_Demo_2009.html

第3章 光ネットワークの制御技術の動向

3.1 はじめに

現在の光パスは、固定的な帯域でデータを伝送している。波長多重技術（WDM: Wavelength Division Multiplexing）を用いた光ネットワークでは、最も伝送速度が大きい光パスを想定して使用する波長間隔を設計している。複数の光パスの内、最大の伝送速度が大きくなればなるほど、使用する波長間隔は狭くなる。伝送速度が小さい光パスに対しては、波長領域を十分に活用していないことになる。つまり、固定的で一律な帯域のパスしか実現できない。これを解決するために、ノードにおいて光パス単位でスイッチングする方式からパケット単位ですべてスイッチングする方式へと、光パケットスイッチングネットワークの研究が行われている [1]。

3.2 エラスティック光パスネットワークアーキテクチャ

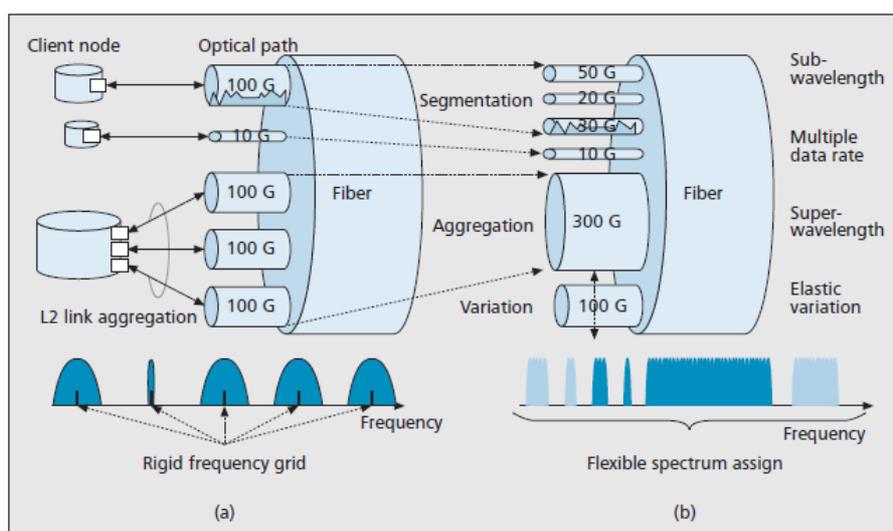
電気におけるサーキットやとパケットと同様、光でも自由な帯域を実現できる。しかし、パケット単位ですべて光スイッチングすることは、光バッファの実現や高速光スイッチングの実現が必要となり、現状では技術的な課題が残されている。ここでは、光パケットおよび光バースト技術については省略し、最先端技術であるエラスティック光パスにフォーカスすることとする。

光スペクトルで自由にグリッドを変更することにより、フレキシブルな帯域を持った光パスネットワーク（エラスティック光パスネットワーク）が Jinno らにより Spectrum-sliced elastic optical path network (SLICE) として提案されている [2]。ここでは、SLICE 技術および制御法について取り上げることとする。また、例えば高品位動画像やデジタルシネマ、データセンターミラーリンク等のハイエンドのアプリケーションに対して、現状の標準インタフェース速度より極めて大きいエンドツーエンドパスの容量（super-wavelength と呼ばれる）を提供するために optical virtual concatenation (OVC) が提案されている [3]。OVC は synchronous optical network/synchronous digital hierarchy (SONET/SDH) における virtual concatenation (VCAT) の光領域のアナロジーである。OVC では、広帯域低遅延アプリケーションの要求に対して複数の波長がグループ化され、エンドツーエンドに割り当てられる。OVC は、もし元のデータトラヒックが小さい帯域の波長に分割して転送できるのであれば、グループ化された sub-wavelength を用いてデータを転送することもできる。波長群スイッチングは、クロスコネクタにおいて1ポートを用いて、グループ化された波長群をある一定の波長帯域に対して一度にスイッチングするものであり、管理の容易化とともにポート数を削減することができる。また、広い範囲のト

ラヒックを収容するために、非均一な波長群を考慮した波長群スイッチングネットワークも提案されている [4]。しかし、波長群スイッチングのアプローチでは、波長を分割するために波長スペクトル領域でバッファにより分割される必要がある。つまり、ある量子化された単位を複数個グループ化させて使うという発想であるため、波長スペクトルの使用効率を低下させるという問題がある。

SLICE はこれらの従来の問題を解決する。SLICE は、光スペクトル領域において柔軟な粒度のグルーミングを導入することにより、スペクトル使用効率を向上させ拡張性のある伝送サービスを提供する。SLICE は、SONET/SDH contiguous concatenation (CCAT) と同様のアナロジーの技術であると言える。SONET/SDH CATT と異なるのは、カスタマイズ可能な帯域を提供できる光スペクトルの arbitrary contiguous concatenation である点である。SLICE のコンセプトは、エンドツーエンドの光パスに対して、固定的でないカスタマイズ可能な帯域を割り当てることである。光パスの帯域は、光スペクトルの使用効率が高くなるように、トラヒック量やユーザの要求に応じてフレキシブルな帯域の割当が行われる。

図 3.2-1 に (a) 従来の固定的な波長パスと (b) エラスティック光パス (SLICE) の違いを示す。SLICE は、光スペクトル資源の分離と結合が可能であり、複数のデータ転送速度に対して効率的に光スペクトルを割り当てることができる。従来の技術では波長グリッドが均一であるため、100Gbps と 10Gbps の光パスがネットワークに混在している場合、100Gbps の伝送が可能なように波長グリッドを設計していた。そのため、10Gbps の光パスは波長スペクトルの一部の帯域しか使用していないので、波長使用効率が低下していた。

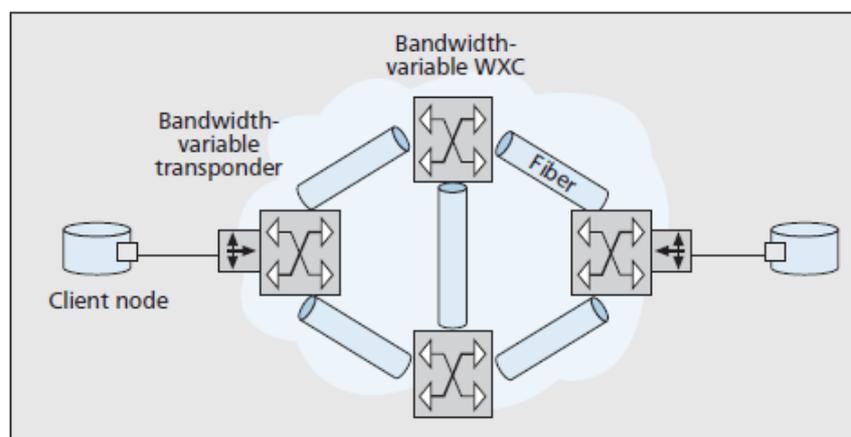


Spectrum assignment in SLICE: a) conventional optical path network; b) SLICE.

図 3.2-1 SLICE と従来の固定波長パスの違い [2]

SLICE では、100Gbps の光パスを 50Gbps、20Gbps、30Gbps 等の光パスに分離することができる。また、100Gbps の 3 本の光パスを結合して、300Gbps の光パスとすることもできる。

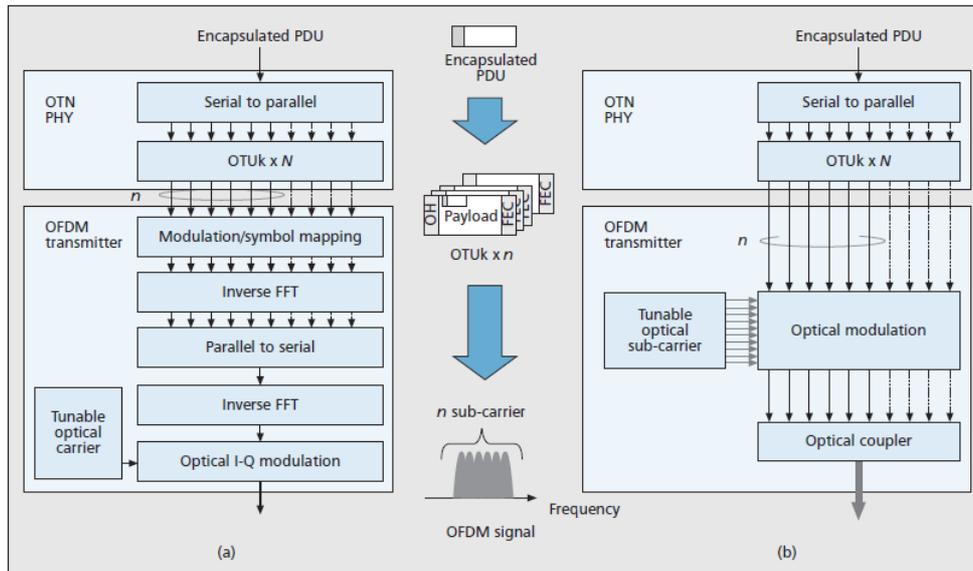
図 3.2-2 に SLICE のネットワークモデルを示す。SLICE のネットワークは、可変帯域トランスポンダと可変帯域 wavelength cross-connect (WXC) から構成される。光スペクトル使用効率を上げるために、可変帯域トランスポンダは、隣接した光パス間のスペクトル分離間隔を最小限にしながら、十分な光スペクトルリソースを生成する。同時に、光パス上の全ての WXC は、トランスポンダで生成した光スペクトルに対応するように光パススイッチングを設定する。光パスの帯域の使用帯域が増加すると、トランスミッターはパス容量を増加させ、当該光パスが WXC を通過できるように光パス上の WXC はスイッチングウィンドウを拡張する。Optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)、可変帯域変調フォーマット、および連続可変波長選択スイッチ (WSS: wavelength selective switch) を使用することにより、従来の固定帯域 WDM ネットワークと比較して光スペクトル利用効率を飛躍的に向上させる。



SLICE network model.

図 3.2-2 SLICE のネットワークモデル [2]

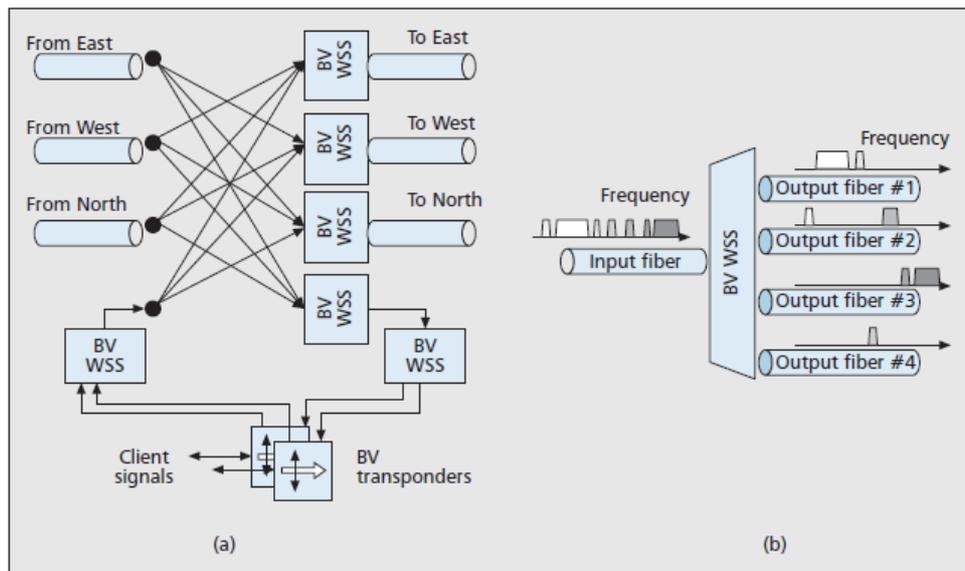
Ethernet over SONET/SDH や optical transport network (OTN) の場合と同様に、SLICE のトランスポンダは 3 つの動作モード (framed-mapped, transparent-mapped, direct-mapped) で動作する。図 3.2-3 は OTN PHY と OFDM optics の実装例を示している。図 (a) が電氣的なアプローチであり、図 (b) が光のアプローチである。図からわかるように、光でのアプローチはシンプルで経済的であると言える。



Implementation examples of OTN PHY and OFDM optics: a) electrical approach; b) optical approach.

図 3.2-3 OTN の PHY および OFDM のトランスミッターの構造 [2]

図 3.2-4 は SLICE のノードモデルを示している。SLICE ノードでは、信号波長に応じて入力ファイバから出力ファイバまで、自己ルーティングスイッチを実現する。従来の WXC と比較して、SLICE ノードの特徴は、入力光信号に応じてセルフルーティングウィンドウの光の帯域が連続的に設定されることである。



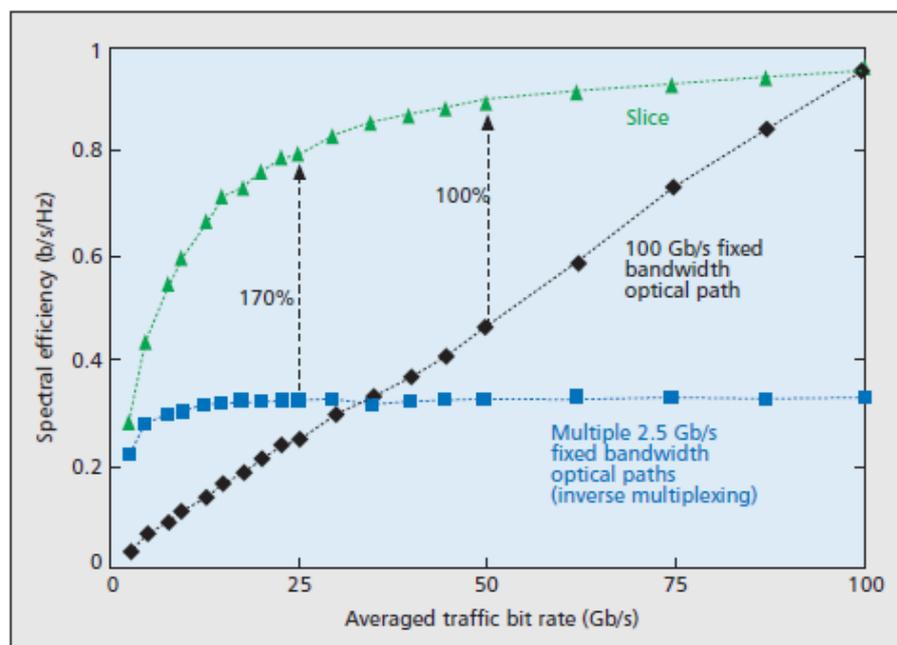
SLICE node model: a) bandwidth variable WXC; b) bandwidth variable WSS.

図 3.2-4 SLICE のノードモデル [2]

可変帯域 WXC の実装例は図 3.2-4 (a) に示しており、可変帯域 WSS が中継のためのグ

ルーミング機能、ルーティング機能、およびローカル信号のための add-and-drop 機能を提供するために、broadcast-and-select コンフィグレーションにおいて利用されている。一般に、WSS (Wavelength Selective Switch) は、波長分離・多重機能と光スイッチング機能を実現する。図 3.2-4 (b) に示すように、可変帯域 WSS では、様々な光帯域および中心周波数を有する入力された光信号は、出力ファイバに出力される。帯域可変 WSS は、高分解・高 fill factor MEMS-based WSS により実現される。

エラスティック技術によってスペクトルの利用効率が向上し、その結果を SLISE ネットワークの性能評価結果として図 3.2-5 に示す。横軸に平均トラフィック転送速度を示す。縦軸に3つのトラフィック割当技術を考慮したリンク使用効率を示す。SLICE の性能は、トラフィックを固定帯域 2.5Gbit/s に分割して割り当てた場合と固定帯域 100Gbps に割り当てた場合とで比較する。全体の使用可能な光スペクトルが占有されていると仮定すれば、SLICE のトラフィック収容方式は、特に低ビットレートの場合には光スペクトル利用効率を劇的に増加させている。トラフィックの速度が高ビットレートに近づくと、SLICE の光スペクトル利用効率は、固定帯域 100Gbps に割り当てた場合の光スペクトル利用効率に近づく。ただし、トラフィックの速度が高ビットレートになっても、固定帯域 2.5Gbps に分割して割り当てた場合は、光スペクトル利用効率は低いままである。



Spectrum efficiency evaluation.

図 3.2-5 スペクトルの利用効率 [2]

3. 3 SLICE を利用した信頼化およびネットワーク実験

SLICE を利用して、新しいネットワークの高信頼化技術 ”bandwidth squeezed restoration” が提案されている [5]。従来の光ネットワークでは、リンク故障が発生すると、故障した光パスは迂回経路上に当該光パスの帯域以上の空き帯域が存在しなければ復旧できなかつた。SLICE では、迂回経路上に十分な空き帯域が存在しなくても、現用の光パスの帯域を squeeze (小さく) して復旧させることが可能である。これは SLICE における帯域をエラスティックに変更できる特徴を利用している。bandwidth squeezed restoration のコンセプトを図 3.3-1 に示す。

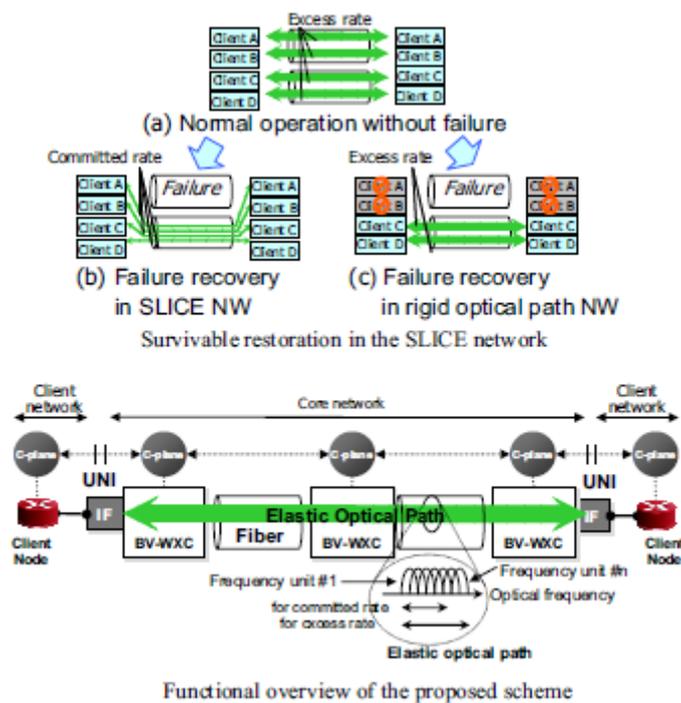


図 3.3-1 Bandwidth squeezed restoration の原理図 [5]

GMPLS ネットワークに bandwidth squeezed restoration を実装して実験を行った結果、復旧時間 100msec で bandwidth squeezed restoration が実現されることが確かめられている。その実験結果を図 3.3-2 に示す[5]。

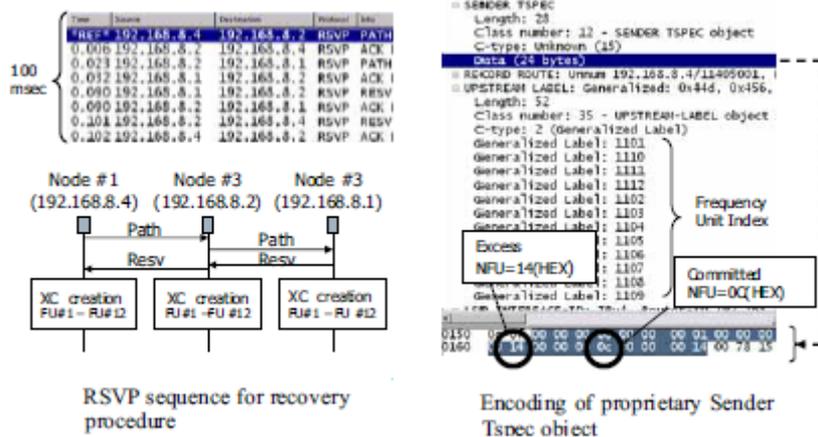
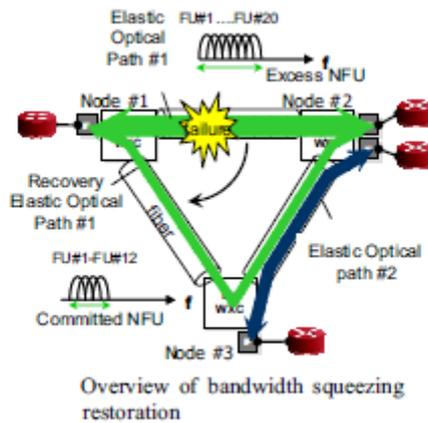
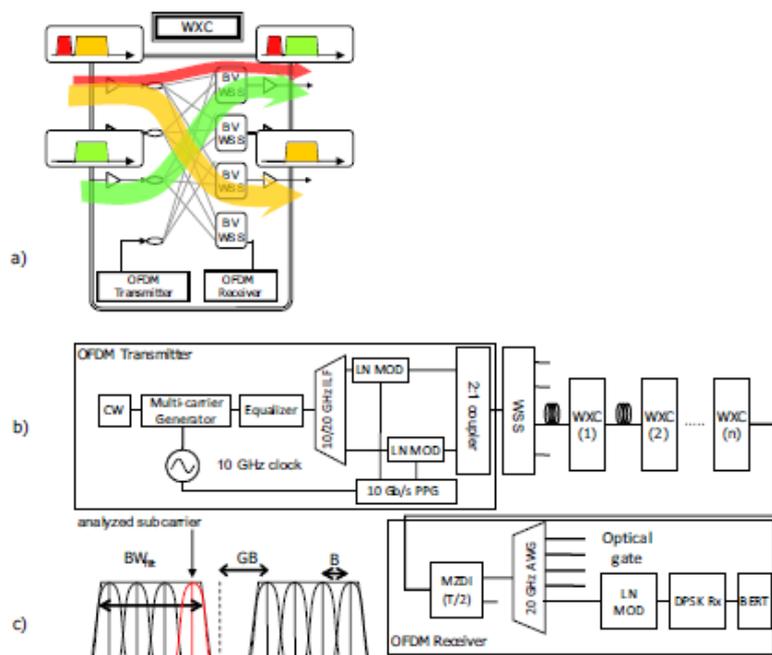


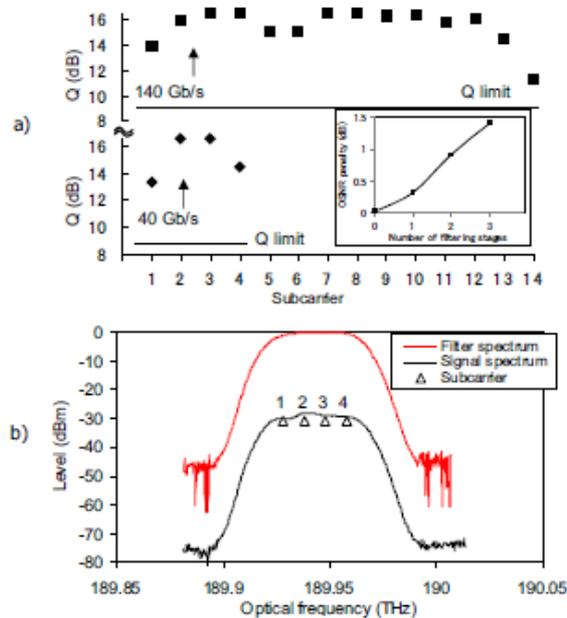
図 3.3-2 復旧の実験結果 [5]

SLICE ネットワークにおいて、各チャネルの変調に OFDM 変調を利用した場合のエラスティック光パスの信号特性について調査した [6]。フィルタリング特性とマルチモード転送におけるガード帯域について解析した。100Gbps 以上のイーサネットサービスするネットワークにおいて、OFDM 変調を利用したエラスティック光パスから構成される SLICE アーキテクチャは、従来のネットワークアーキテクチャと比べて光スペクトル利用効率を 2 倍に増加させることが示された。SLICE ネットワークの構成と各チャネルの状態を図 3.3-3 と図 3.3-4 に示す。



a) Architecture and allocation of elastic optical paths in a wavelength cross-connect (WXC);
 b) Experimental setup; c) Definition of optical path and guard band (GB).

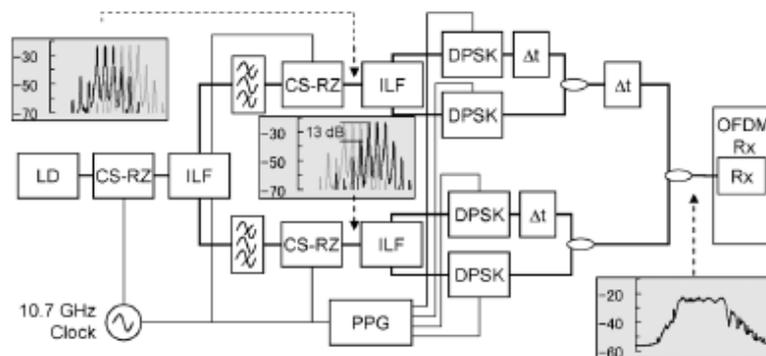
図 3.3-3 OFDM を用いた SLICE ネットワークの構成 [6]



a) Q factor performance of subcarriers in 40 and 140 Gb/s paths;
 inset plots the OSNR penalty as a function of filtering stages;
 b) WSS filter shape and the resulting spectrum of 40 Gb/s signal,
 triangles indicate center frequencies of subcarriers.

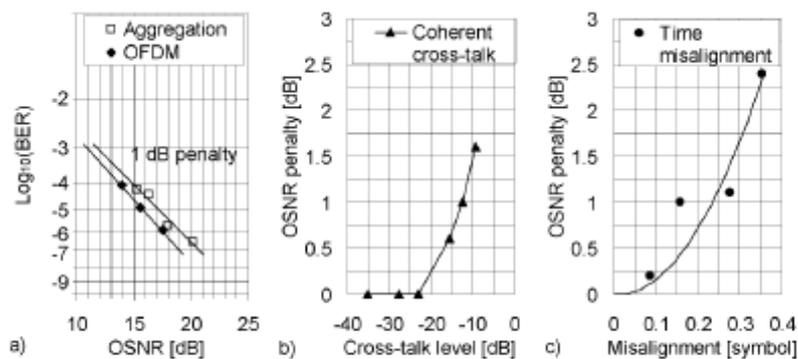
図 3.3-4 OFDM を用いた SLICE の各チャネルの状態 [6]

SLICE における光パス結合を提案し、実験的に実証することに成功している。複数の OFDM 100Gbps の光パスをスペクトル的に連続した 1 Tbps の super-wavelength 光パスを形成するために、光領域で結合し、可変帯域波長光クロスコネクネットワークにおいて伝送している [7]。SLICE の特徴の一つは、量子化のグラニュアリティのフレキシブル化と併せて複数のチャネルを自由に結合できることで、よりフレキシブルなネットワークとなることである。実装的な課題を評価した結果、OFDM 光パスが 1 dB 以下の signal-to-noise ratio (SNR) 比にて光領域で結合されることが確かめられた。1 Tbps 伝送における光パス結合の実験構成と実験結果を図 3.3-5 と図 3.3-6 に示す。



Individual OFDM optical path generation setup. Two optical combs are generated using carrier-suppressed return-to-zero (CS-RZ) modulation. Differential phase-shift-keyed (DPSK) OFDM optical paths are aggregated and received. Optical spectra at respective stages are shown in the insets.

図 3.3-5 光パス結合実験の構成 [7]



Results of optical aggregation of two optical paths: (a) BER curves for nonaggregated (OFDM) and aggregated path (Aggregation); (b) OSNR penalty due to coherent cross-talk; (c) OSNR penalty due to bit misalignment.

図 3.3-6 光パス結合実験の結果 [7]

3. 4 SLICE のリソース割当技術

SLICE ネットワークにおける距離適応型光スペクトルリソース割当方式について研究されている [8][9][10][11]。距離適応型光スペクトルリソース割当方式では、距離に応じて変調フォーマットを変更する。従来の伝送方式では、最悪の伝送性能を考慮して、採用すべき変調方式が決定されていた。

最悪の伝送性能を見積もる際に、光リピータの経由段数、reconfigurable optical add/drop multiplexer (ROADM) の経由段数、および WXC の経由段数について最大値を想定して最悪値設計をしているため、例えば、40Gbps のデータを転送するためには、differential quadrature phase shift keying (DQPSK) を用いるように設計され、すべての 40Gbps の光パスに適用されていた。その場合、すべての光パスが占有する光スペクトルは、同じ幅を有している。この光スペクトルの幅は、光パスの距離、光リピータ、ROADM、および WXC の経由段数に関係なく設計されていた。その結果、距離が最大でない光パスの光スペクトル幅は、必要以上のマージンをもっていることになる。もし、多様な光インペアメントに適応できるメカニズムが光ネットワークに導入されれば、光スペクトル利用効率を向上させることができる。

リンクアダプテーションは、広帯域ワイヤレスデータネットワークやデジタル加入者回線において、スペクトル使用効率を増加させるために用いられている。リンクアダプテーションの考え方は、回線の条件（距離や通過段数、ノイズ等）に応じて、変調フォーマットや符号化レベルの伝送パラメータを調整することである。リンクアダプテーションシステムにおいて、データ速度の最大化や消費電力の最小化等の評価指標を考慮して、最も効率の良い伝送パラメータが決定される。例えば、良い回線条件の場合は、スループットを増加させるためにスペクトル効率を最適化する伝送パラメータが選択される。一方、悪い回線条件の場合は、回線の接続性を確保するためにビットレートを小さくし、冗長ビットを加えてロバスト性を最適化する。変調フォーマットアダプテーションの場合は、16-ary quadrature-amplitude modulation (QAM) が quadrature phase shift keying (QPSK) より受信感度が悪いにも関わらず、より良いスペクトル使用効率を提供し、良い回線条件下で2倍の転送レートを実現できる。

光ネットワークにおいて、いくつかのリンクアダプテーション技術を導入する試みがなされている [12][13]。OFDM サブキャリアのビット・パワーローディングを用いることにより、回線品質に応じたデータレート動的適応制御が実験でデモンストレーションされた [12]。Opaque 光ネットワークにおいて、non-return-to-zero (NRZ) 変調フォーマットにおけるシンボルレートチューニングのネットワーク性能について研究されている [13]。Reach-dependent リンク容量制御の効果は、短距離トラヒック需要による追加された可用

容量や低レート長距離トラヒック需要による削減された光電気インタフェースから取得している。このような研究は、固定波長グリッドで定められた光ネットワークにおいて、短距離リンクが大きい **signal-to-noise ratio (SNR)** マージンと **nonlinear effect (NLE)** マージンを得ることから、データ速度を向上させることに基づいている。

チャンネルデータ速度を最大化する従来のリンクアダプテーション技術は、次の要素を考慮している。データレートを一定に保ちながら、**SNR** マージンと **NLE** マージンを短いコネクショに適用してスペクトル資源を削減する。同じデータレートに対しては、**16QAM** は **QPSK** と比べてシンボルあたり 2 倍のビットを伝送する。つまり、**16QAM** は半分のシンボルレートを要求し、結果的に半分のスペクトル幅を要求する。同様に、**64QAM** は **QPSK** と比べてシンボルあたり 3 倍のビットを伝送する。つまり、**16QAM** は $1/3$ のシンボルレートを要求し、 $1/3$ のスペクトル幅を要求する。このように、同じデータレートを実現するのに必要なシンボルレートを削減し、シンボル当たりのビット数を増加させることにより、スペクトル幅が削減される。以上を説明する図を図 3.4-1 (a) に示す。

(a)			
Modulation level	QPSK	16-QAM	64-QAM
Symbol rate (Hz)	$B/2$	$B/4$	$B/6$
Number of carriers	1 (const.)	1 (const.)	1 (const.)
Bits per symbol	2	4	6
Data rate per polarization (b/s)	B (const.)	B (const.)	B (const.)
(b)			
Modulation level	ODFM-QPSK	ODFM-16 QAM	ODFM-64 QAM
Symbol rate (Hz)	$B/2n$ (const.)	$B/2n$ (const.)	$B/2n$ (const.)
Number of carriers	n	$n/2$	$n/3$
Bits per symbol	2	4	6
Data rate per polarization (b/s)	B (const.)	B (const.)	B (const.)

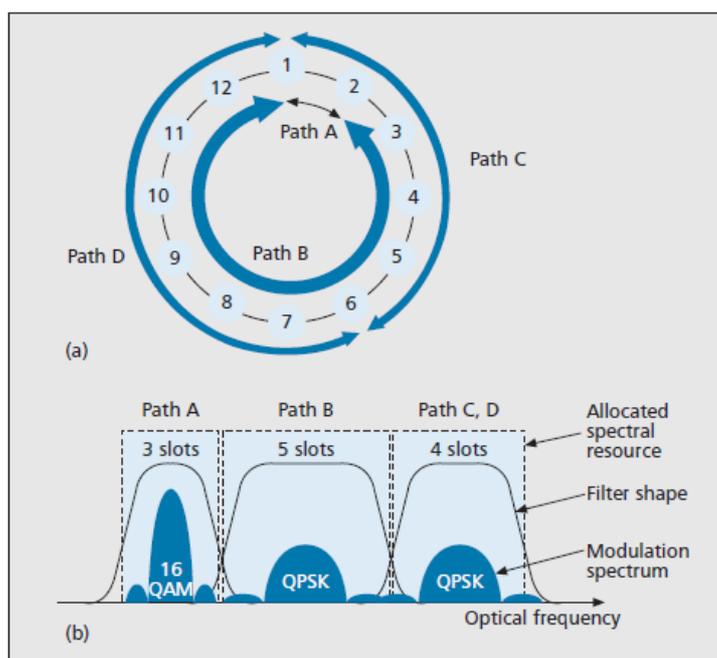
Parameters in tunable spectral width modulation format: a) single-carrier modulation with variable bit and symbol rate; b) multicarrier modulation with variable bit and subcarrier.

図 3.4-1 シンボルとその特徴 [8]

同じデータレートでスペクトル幅可変変調を実装するために、シングルキャリアもしくはマルチキャリアのアプローチがある。**QPSK**、**16QAM**、**64QAM** の様々な変調レベルに

対して、スペクトル幅を調整するパラメータのセットの比較を図 3.4-1 (a) (b) に示す。シングルキャリアのアプローチでは、データレートを一定に保ちつつシンボルあたりのビット数を増加させながら、狭いスペクトル幅にするためにシンボルレートが削減させる。一方、マルチキャリアのアプローチでは、スペクトル帯域を変更するために、シンボルレートとシンボルあたりのビット数を一定に保ちつつサブキャリアの数が変更される。

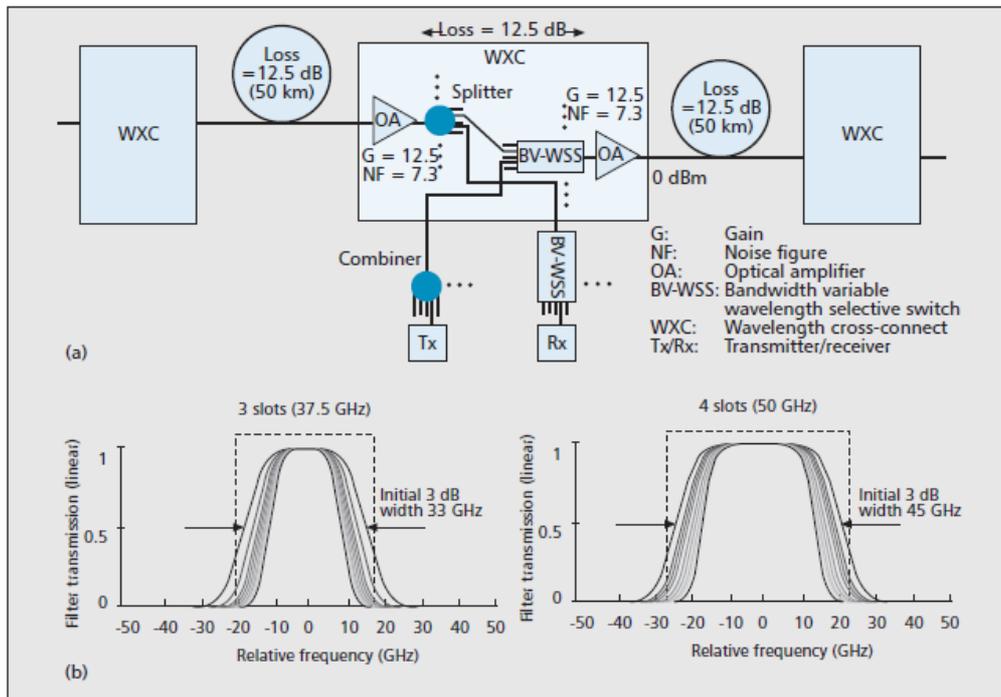
SLICE では、シンボルあたりのビット数とスペクトル幅を調整する考え方を利用する。これを距離適応型光スペクトルリソース割当方式と呼ぶ。距離適応型光スペクトルリソース割当方式では、ある光パスに対して必要最低限の光スペクトル資源を割り当てる。割り当てる光スペクトル資源は、データレートを一定に保ちながら、エンドツーエンドの物理条件に適合するように調整される。図 3.4-2 にリング状の SLICE ネットワークにおける距離適応型光スペクトルリソース割当方式の概念を示す。それぞれの光パスは、距離に応じて最適な変調フォーマットを選択する。Path A は 16QAM の変調フォーマットで 3 スロット割り当てられている。Path B は QPSK の変調フォーマットで 5 スロット割り当てられている。Path C、D は QPSK の変調フォーマットで 4 スロット割り当てられている。



Spectrum resource allocation in distance-adaptive SLICE: a) allocated spectrum resources for various optical paths; b) signal and filter passband arrangement.

図 3.4-2 リング状の SLICE ネットワーク [8]

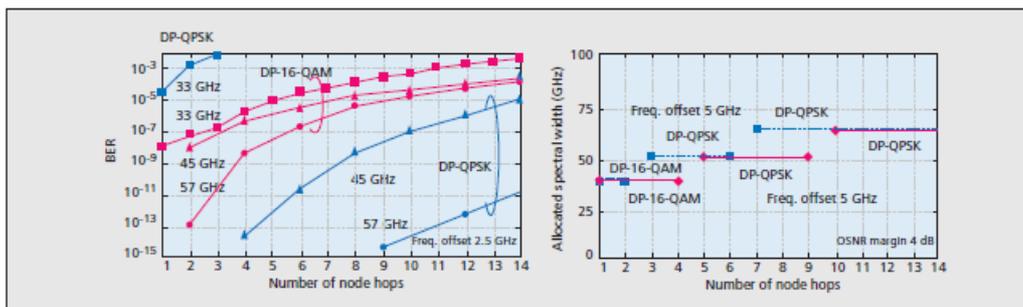
図 3.4-3 に伝送評価に用いられた物理モデルを示す。(a) はノードとリンクモデルを、(b) は光フィルタモデルを示す。



Physical models used for transmission performance (numerical simulation): a) node and link model; b) optical filter model.

図 3.4-3 伝送評価用物理モデル [8]

図 3.4-4 に ONSR degradation と filter narrowing effect を考慮した光スペクトル資源割当モデルを示す。(a) はマルチホップ伝送におけるビット誤り率を示し、(b) はノードホップ数に対する割当される光スペクトル幅を示す。

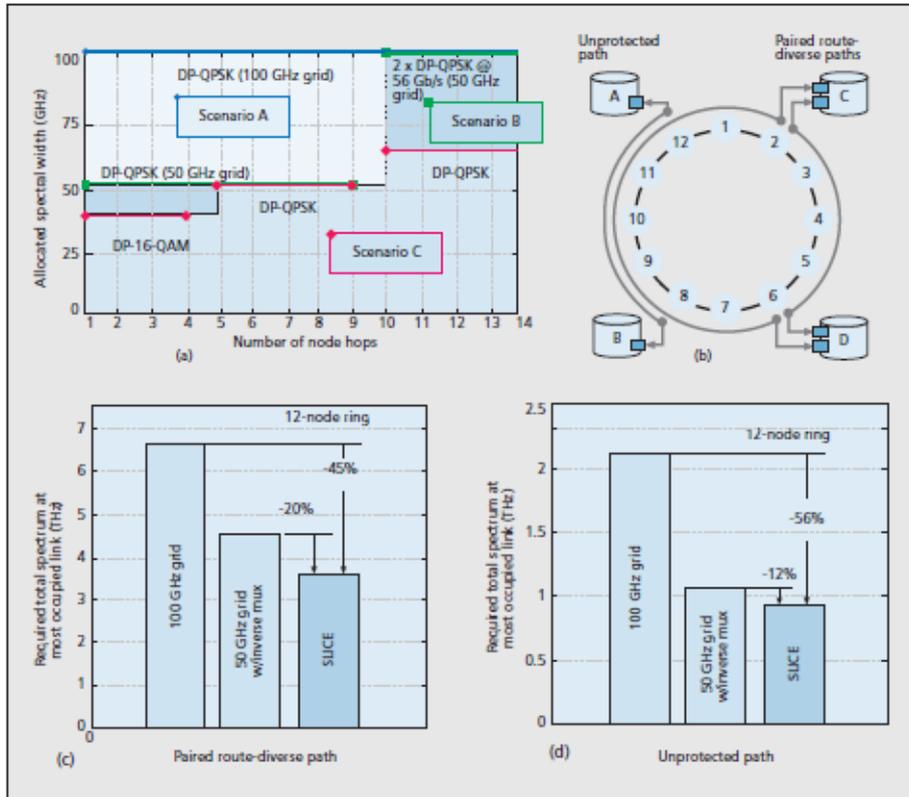


Spectrum resource allocation model considering ONSR degradation and filter narrowing effects: a) results of multihop transmission performance (numerical simulation); b) spectrum resource allocation as a function of node hops.

図 3.3-4 マルチホップ伝送におけるビット誤り率と、光スペクトル幅 [8]

図 3.4-5 は光パス収容の効率の評価を示している。(a) は様々なシナリオに対する光スペクトル割当を、(b) はネットワークとトラフィック需要モデルを示している。(c) は従来方式と SLICE 方式により必要な全光スペクトルを比較している。図より SLICE の効果がわか

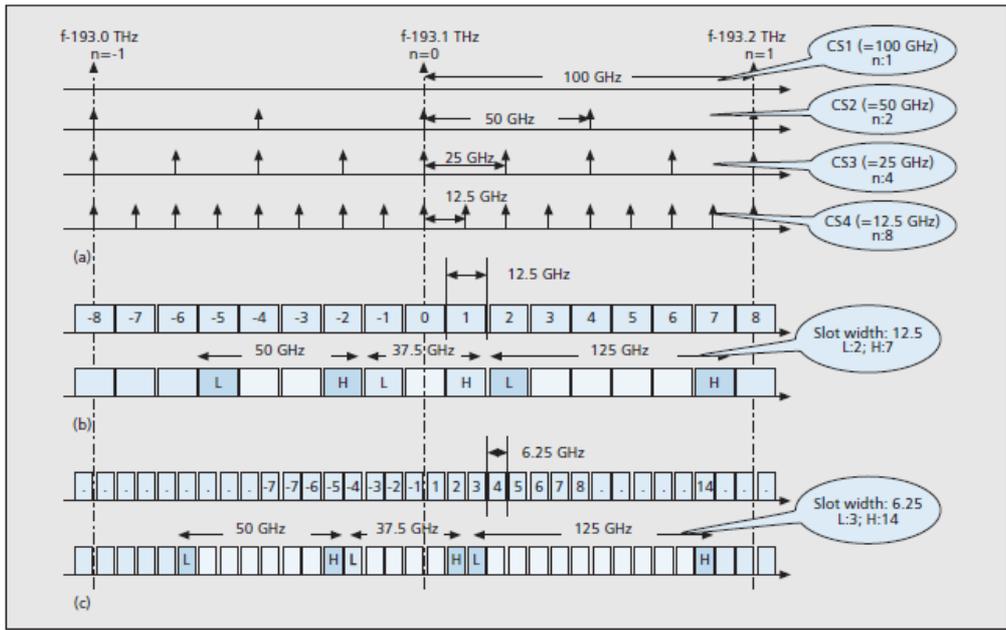
る。



Evaluation of optical path accommodation efficiency: a) spectrum resource allocation in various scenarios; b) network and traffic model; c) comparison of required total spectrum.

図 3.4-5 光パス収容効率の評価例 [8]

図 3.4-6 にスペクトル資源設計方式を示す。(a) は現在の ITU-T DWDM 周波数グリッド、(b)はグリッドアプローチにおけるシングルスロット、(c) は double-sided half slot アプローチを示している。



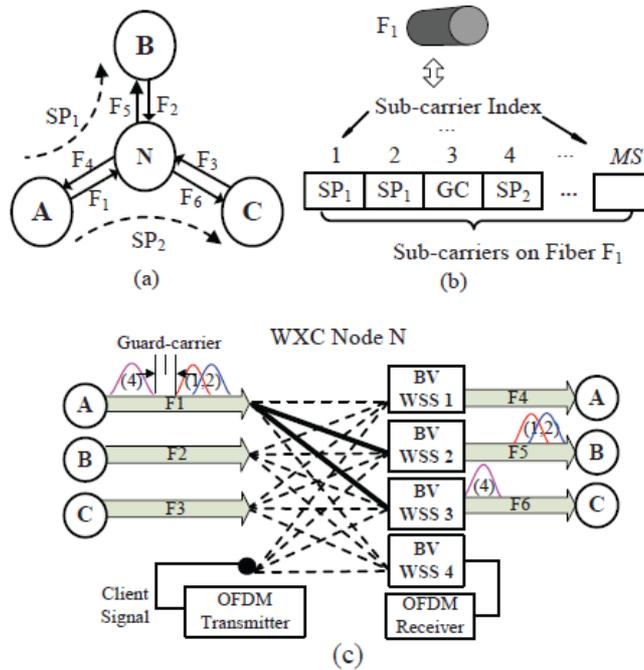
Spectral resources designation schemes: a) current ITU-T DWDM frequency grid; b) single slot on the grid approach; c) double-sided half slot approach.

図 3.4-6 スペクトルの資源設計方法 [8]

3. 5 SLICE における経路とスペクトル割当方法

SLICE ネットワークにおいて、経路とスペクトル割当を決定する問題に関して研究されている [14][15][16][17]。経路とスペクトル割当を決定する問題は **routing and spectrum allocation (RSA)** 問題と呼ばれる [14][16]。RSA 問題では、光ファイバで利用するスペクトルスロット数の最大値（目的関数）を最小化する問題が主として考えられる。また、別の目的関数として、全ての光ファイバで利用するスペクトルスロット数の光景値を最小化する問題がある。RSA 問題のネットワークモデルを図 3.5-1 に示す。

このような RSA 問題は線形整数計画問題（ILP: Integer Linear Programming）として定式化された [14][16]。光ファイバで利用するスペクトルスロット数の最大値（目的関数）を最小化する ILP は、次のように定式化されている [16]。



An example with Bandwidth Selective WXC

図 3.5-1 RSA ネットワークモデル [14]

ILP Routing and Spectrum Allocation (RSA) formulation:minimize c

subject to the following constraints:

- Cost function

$$c \geq f_{sd} + T_{sd}, \text{ for all } (s,d) \text{ pairs} \quad (1)$$

- Single path routing constraints

$$\sum_{p \in P_{sd}} x_p = 1, \text{ for all } (s,d) \text{ pairs} \quad (2)$$

- Starting frequencies ordering constraints

For all commodities (s,d) and (s',d') that have $p_i \in P_{sd}$ and $p_j \in P_{s'd'}$, with p_i and p_j sharing at least one common link l ($\forall (s,d), (s',d') : \exists p_i \in P_{sd} \cap \exists p_j \in P_{s'd'} \cap (l \in p_i \cap l \in p_j)$),

the following constraints are employed:

$$\delta_{sd,s'd'} + \delta_{s'd',sd} = 1, \quad (3)$$

$$f_{s'd'} - f_{sd} < T_{total} \cdot \delta_{sd,s'd'}, \quad (4)$$

$$f_{sd} - f_{s'd'} < T_{total} \cdot \delta_{s'd',sd}, \quad (5)$$

ルート、スペクトルアロケーションの ILP モデル

目的関数の c は、光ファイバで利用するスペクトルスロット数の最大値であり、これを最小化する。式(1) は、各発着ノードペアに対して、利用スペクトル数が c を超えないという制約条件である。式(2) は、各発着ノードペアに対して、1つのパスは1つのスペクトルスロットを用いるという制約条件である。

しかし、この ILP 問題は NP-hardness であることが証明された。まず、ILP 問題の upper/lower bound を解析的に求めている。次に、発見的な手法として経路の決定の際には効率的な発見的アルゴリズムを適用し、maximum reuse spectrum allocation (MRSA) を適用することが提案されている。経路の決定のアルゴリズムの一つは balanced load spectrum allocation (BLSA) であり、もう一つは shortest path with maximum spectrum reuse (SPSR) である。

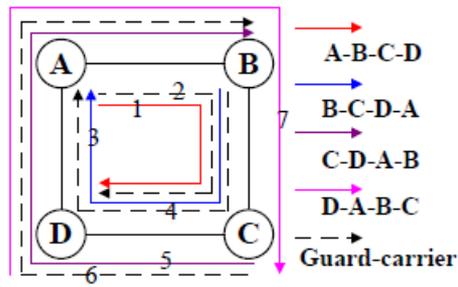
MRSA では、発着ノードペアに対するトラヒック需要の大きい順に並べ替える。スペクトルスロットの割当において、トラヒック需要の大きいと連続したスペクトルスロットを割り当てるのが困難になるので、トラヒック需要の大きい発着ノードペアが高い優先順位とする。MRSA のもとで BLSA では、割り当てられるスペクトルスロットができるだけ均等になるように光パスの経路を選択する。SPSR アルゴリズムでは、最短経路で光パスの経路を選択する。MRSA の疑似コードを以下に示す。

Algorithm 1 Maximum Reuse Spectrum Allocation (MRSA)

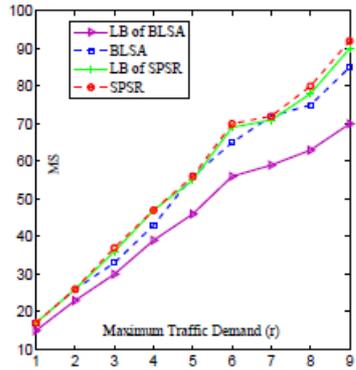
```
1: Sort the spectrum path requests in the descending order
   of the traffic demands;
2: while There exists non-zero traffic demands do
3:    $J \leftarrow \emptyset$ 
4:   Take the request with the maximum demands (say  $t_j$ );
5:   Accommodate  $t_j$  using the first available consecutive
   sub-carriers;
6:    $J \leftarrow J \cup p_j$ 
7:   for all the remaining requests having non-zero traffic
   demands do
8:     if  $p_i$  is disjoint with all the paths in  $J$  then
9:       Accommodate  $\langle p_i, t_i \rangle$  using the first available
       consecutive sub-carriers;
10:       $J \leftarrow J \cup p_i$ ;
11:     end if
12:   end for
13: end while
```

MRSA アルゴリズム [14]

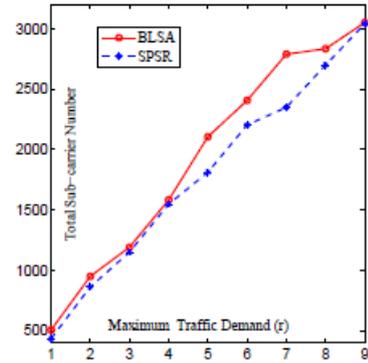
ネットワークモデルと最適値の計算結果を図 3.5-2 に示す [15]。ここでは、リングネットワークに限定されていたものをより一般化することで、メッシュネットワークも扱えるようになっている。また、最適解の上限値・下限値を一般的に求めている。評価結果より、BLSAの方がSPSRと比較して、光ファイバで利用するスペクトルスロット数の最大値を数パーセントの範囲で低減することがわかる。



An example for the case of predetermined routing



Lower bound and sub-carrier number



Total sub-carrier number

図 3.5-2 メッシュネットワークモデルと最適値の計算結果 [15]

SLICE ネットワークにおける光スペクトルリソース割当において、距離を考慮して、RSA 問題に対して静的に経路とスペクトルのスロットを割り当てるアルゴリズムが開発された [18]。これを距離適応型光スペクトルリソース割当方式と呼ぶ。従来の光スペクトルリソース割当方式では、距離に無関係に転送速度のみに依存したスペクトルスロット数が決められていた。しかし、距離が長いほど信号が劣化しやすくなるため、距離が長い光パスに対しては多くのスペクトルスロット数を割り当てる必要があり、距離が短い光パスに対しては少ないスペクトルスロット数を割り当てればよい。これにより、距離が短いにも関わらず、過剰のスペクトルスロットを割り当てないようにすることができる。この距離適応型光スペクトルリソース割当方式を採用することにより、必要な光スペクトルスロットを削減できることが確かめられた。その結果を図 3.5-3 に示す。

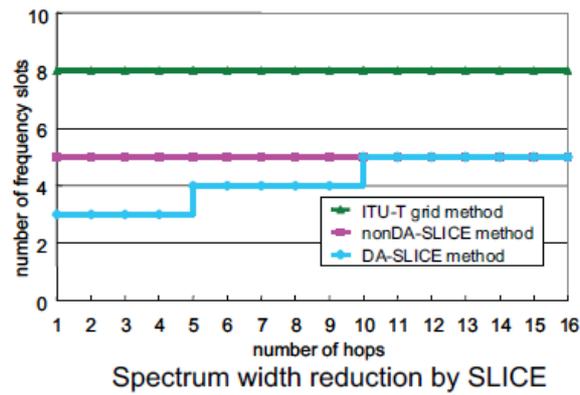


図 3.5-3 距離適応型光スペクトルリソース割当方式の効果例 [18]

SLICE ネットワークにおける距離適応型光スペクトルリソース割当方式を考慮して、RSA 問題に対して動的に経路とスペクトルのスロットを割り当てるアルゴリズムが開発された [19]。この方式にて、スロットフラグメンテーションの効果を無視して得られる光スペクトル使用効率とほぼ同一の結果が得られることが確かめられた。研究結果を図 3.5-4 に示す。

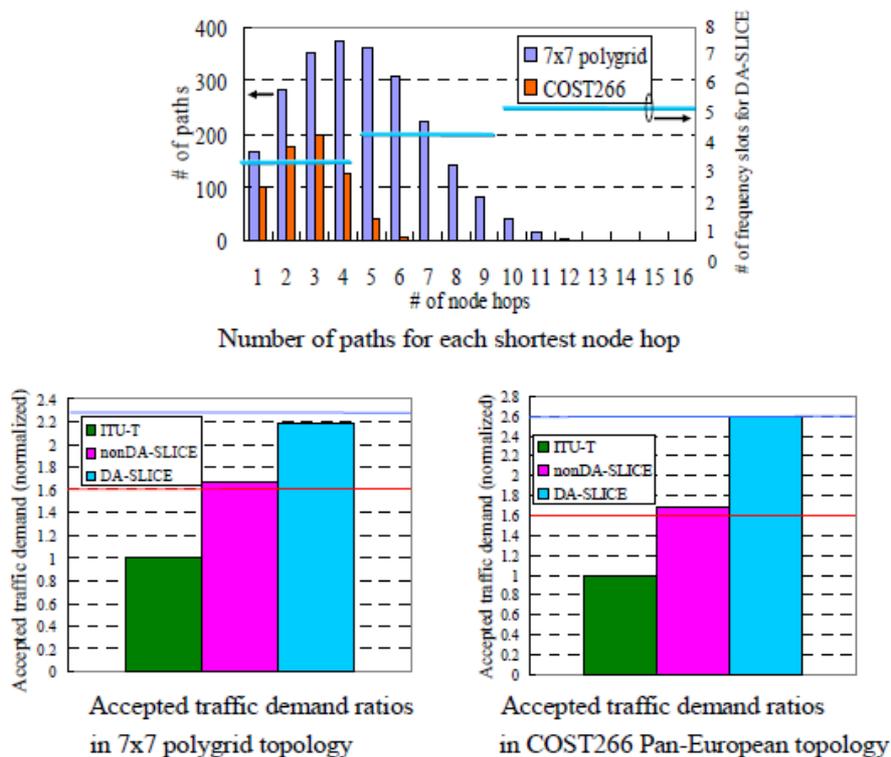


図 3.5-4 動的に経路とスペクトルのスロット割当アルゴリズムの効果 [19]

3. 6 マルチキャリア光源を用いた光ネットワーク

トラヒック需要の急激な増加に対応するために、光ネットワークにおいて、大容量のトラヒックの伝送を可能にする WDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重) 伝送システムの開発・導入が進められている。一方、経済的な WDM 伝送システムを実現するために、多くの波長光源を生成する超多波長光源の研究が盛んに行われている。10,000 波の超波長多重数を生成する超多波長光源が報告され、WDM 伝送実証実験が実施されている。しかし、超多波長光源は、特定の地点から特定の地点までのポイントツーポイント伝送のみ適用されている。

将来の光ネットワークの高度化に向けて、マルチキャリア光源を利用するという新しいコンセプトに基づいた光ネットワークの構成法に関する研究がされている [20][21][22][23][24]。マルチキャリア光源技術を活用して生成されたマルチキャリアを各ノードに分配し、ノードに配備する多数のレーザ光源を不要とすることで、ネットワーク全体の革新的な低コスト化・省電力化を可能にするネットワーク技術である。光キャリアを各ノードに分配するネットワーク構成では、ネットワーク内での光キャリアの再利用が困難であるため、波長資源の利用効率が大きく低下してしまう。これに対してマルチキャリア光源を分配するネットワークでは、データ信号から光キャリア抽出が可能な独自の光ノード技術を用いることで、光キャリアの再利用が可能なネットワークを実現する。さらに、トラヒック変動に応じて使用する光キャリアを動的制御することで、従来方式と比較して抜本的な波長資源の利用効率が期待できる。

図 3.6-1 にマルチキャリア光源分配型ネットワークにおける光ノードシステムの構成を示す。基本構成は、WDM 方式とパス管理の技術を組み合わせ、超高速・大容量ネットワークの運用が容易な ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer : 再構成可能な光信号挿入・分岐回路) ネットワークで構成されている。この技術は広域エリアをカバーするネットワーク網を柔軟に効率よく運用出来るため、実用性および将来性の高い WDM 伝送技術である。

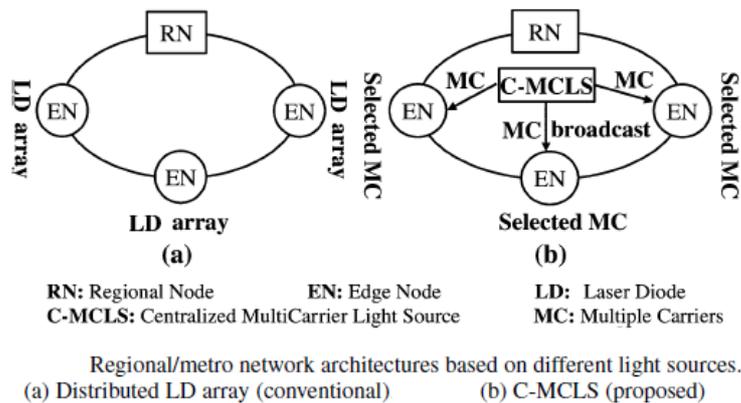


図 3.6-1 マルチキャリア光源を用いる光ネットワークの構成図 [21]

具体的なマルチキャリア光源の実験法を図 3.6-2、図 3.6-3 に示す。また、図 3.6-4 に示すように、各ノードに組み込まれた ROADM において、必要な受信信号波長を Drop（分岐）、送信信号波長を Add（挿入）することで、ノード間通信を行うことが可能である [24]。同じ WDM でも提案方式と従来方式の大きな違いは、光キャリアを分配するためのキャリア Drop 機能を有し、ネットワークでの光キャリア再利用を行うための光キャリア抽出回路を兼ね備えていることである。これにより、マルチキャリアを分配し、光キャリアの再利用も可能なネットワークを構築できる。

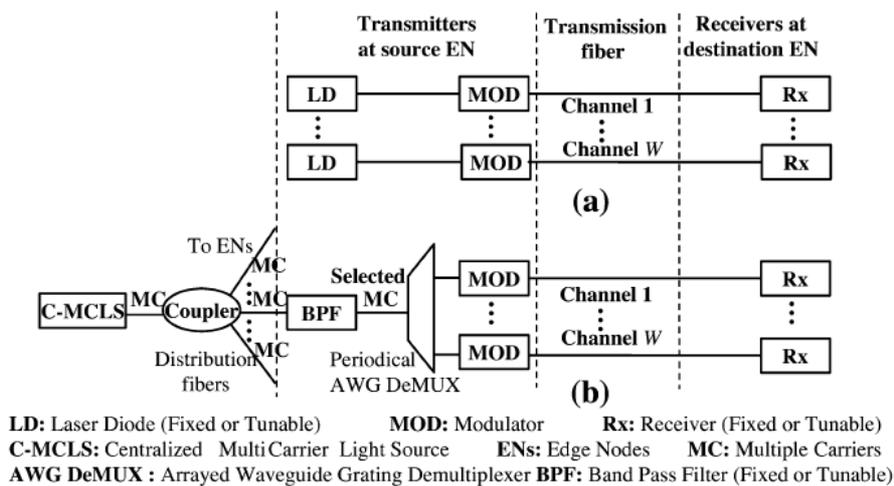
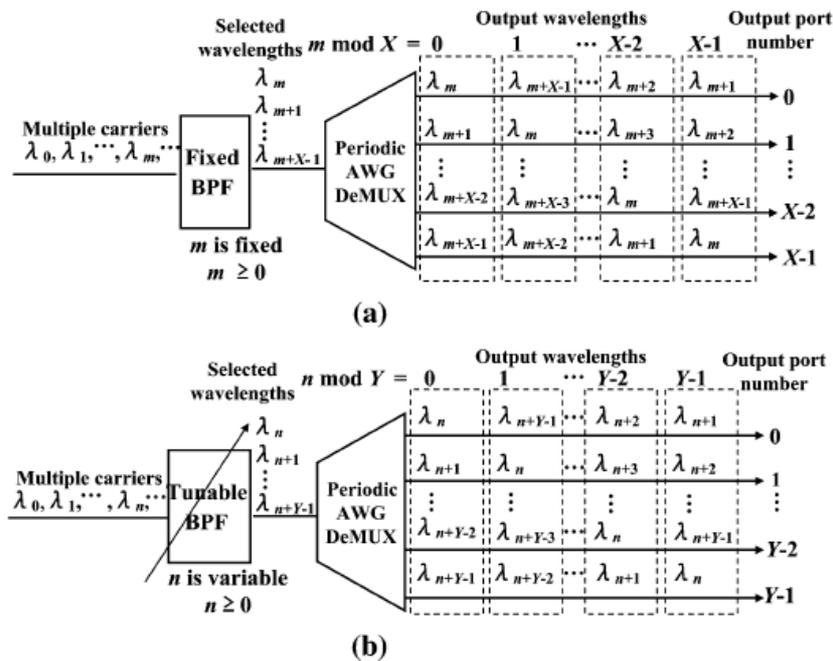
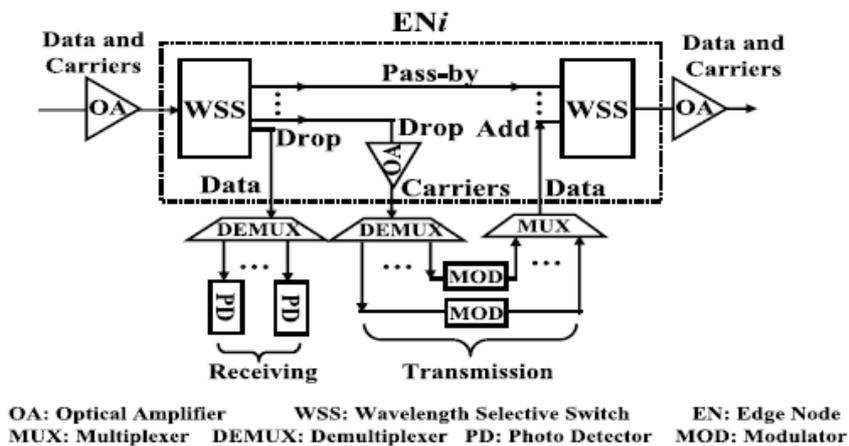


図 3.6-2 マルチキャリア光源の実験法(1) [21]



Implementations of wavelength selection at EN for (a) Static scheme. (b) Dynamic scheme.

図 3.6-3 マルチキャリア光源の実験法(2) [21]

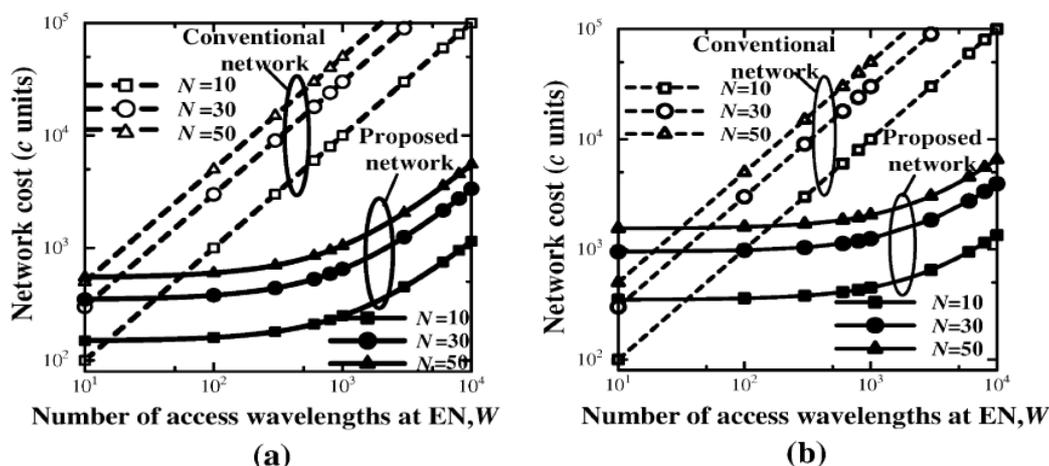


An example of EN implementation in the proposed network architecture.

図 3.6-4 ROADM でのマルチ光源の利用法 [24]

多波長 LD 光源を用いた従来型ネットワークと集中型マルチキャリア光源を用いた光キャリア分型ネットワークのネットワークコストの比較を図 3.6-5 に示す。図に示したように、光キャリア分配型ネットワークでは、多数の LD 光源が不要な反面、高価なマルチキャリア光源、分配用光ファイバ伝送路、さらには可変 BPF や Cyclic AWG が必要になってくる。

従来型ネットワークと光キャリア分配型ネットワークのコストに関する比較結果を示す。ネットワークでの使用波長数、ならびに EN 数の増加に伴い、双方のネットワークコストは増大するが、従来型ネットワークと比較して光キャリア分配型ネットワークでは、使用波長数の増大に伴い対コストが大きく抑えられている。また、図 3.5-5 より使用波長数が 30 波以上においては、ネットワーク内の EN の数によらず、光キャリア分配型ネットワークの方がコスト的に優位であることがわかる。



Network cost comparisons between the conventional network and the proposed one (a) without (b) with considering EN amplifier cost and distribution fiber cost.

図 3.6-5 多波長 LD 光源および集中型マルチキャリア光源を用いたネットワークコスト比較[24]

各コストパラメータの値を変化させた際の境界線を図 3.6-6 に示す。これは、図に示したような比較結果から従来型と光キャリア分配型とのクロスポイントを抽出し、対コスト効果の境界線を示したものである。境界線を挟んで左側は従来型が、右側は光キャリア分配型ネットワークがコスト的に優位であることを示しており、EN 数については、10、20、30、40、50 の 5 ケースにおいて解析を行っている。(a) では、マルチキャリア光源(K_1)と可変 BPF (K_2) のコストを変化させている。ネットワークに 1 台のマルチキャリア光源のコストに対するすべての EN に必要な可変 BPF のコストは、ネットワークコストに大きな影響を与え、境界線が大きく右側にシフトしているのがわかる。(b) では、光増幅器のコスト (K_3) と分配用光ファイバの伝送距離 (L) を変化させたときの境界線を示している。EN 数と分配用ファイバの伝送距離に依存する損失補償用の光増幅器の有無により、境界線が大きくシフトする箇所が見受けられるが、いずれの場合においても、使用波長数が 50 波を超えるような WDM ネットワークでは、コストパラメータの値によらず、光キャリア分

配型の方がコスト的に優位であることがわかる。

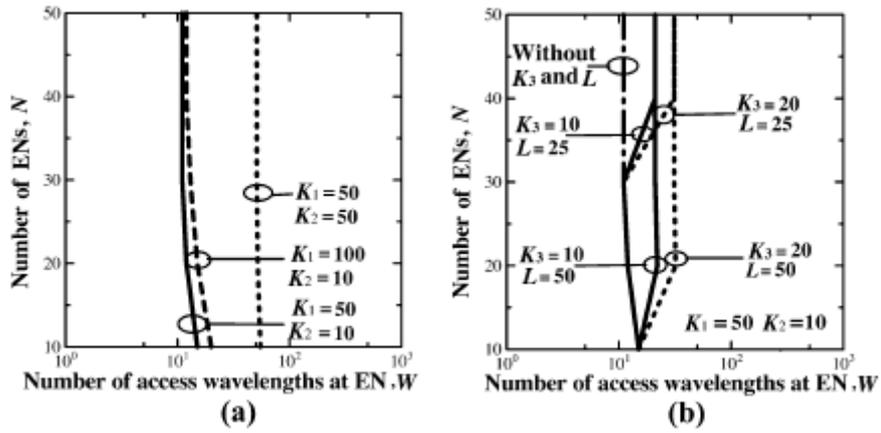
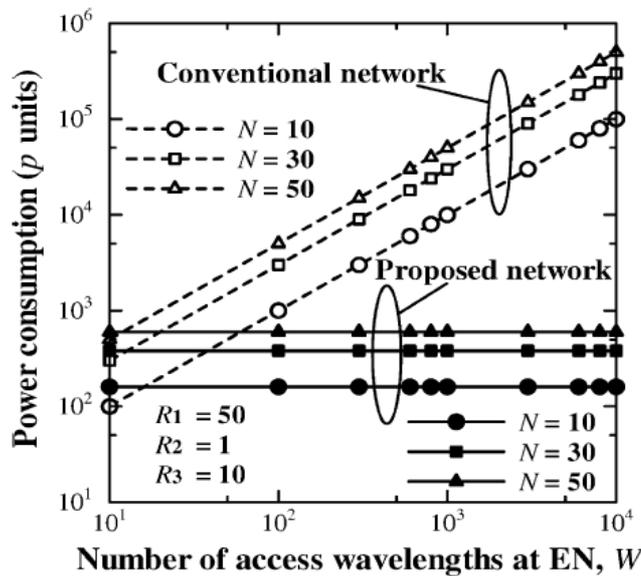


図 3.6-6 コストパラメータの値を変化させた際の境界線 [21]

コストのみではなく消費電力においても、集中型が有利であることがわかる。その評価結果を図 3.6-7 に示す。



Power consumption comparisons between the conventional network and the proposed one considering EN amplifier.

図 3.6-7 消費電力と波長数の関係 [24]

図 3.6-8 に示すような、マルチキャリア光源を用いたスター・リング型光ネットワークのネットワーク障害回復に関する構成法と評価の検討が行われている [25][26]。スター型ネットワーク構成で光キャリアとデータ信号の光ファイバ切断による障害回復を実現するた

めに、それぞれのネットワークでのファイバ型自動障害回復スイッチが提案されている。

このスイッチを用いてネットワークでの障害回復のための構成法を検討し、独自の障害回復構成において、単一および複数の光ファイバ切断障害に対して回復時間を大幅に低減出来ることを明らかにしている。その評価結果を図 3.6-9 に示す。

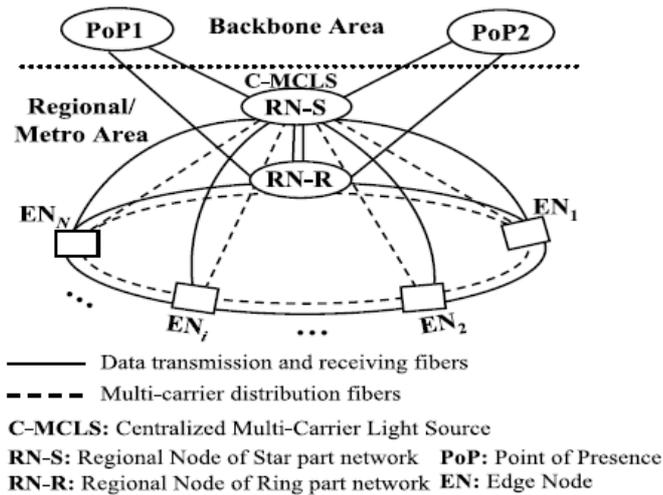
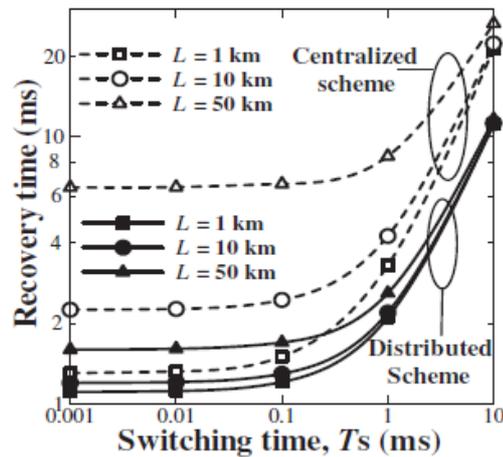


図 3.6-8 スター・リング型光ネットワークのトポロジー [26]



Recovery time vs. switching time and fiber span length for recovery of single fiber failure

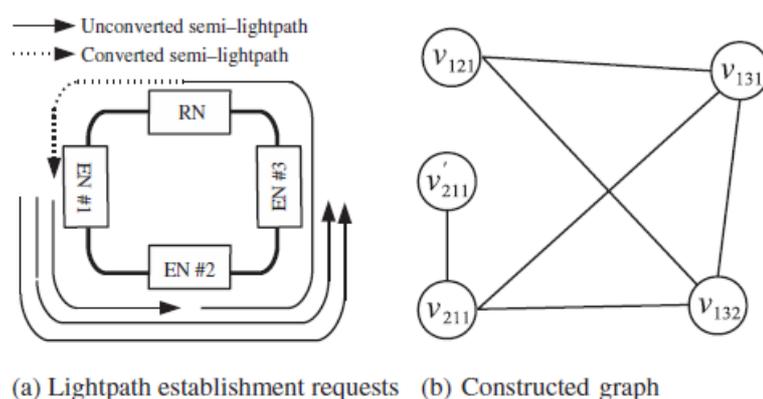
図 3.6-9 傷害回復時間の特性 [26]

このスイッチを用いてネットワークでの障害回復のための構成法を検討し、独自の障害

回復構成において、単一および複数の光ファイバ切断障害に対して回復時間を大幅に低減出来ることを明らかにしている。その評価結果を図 3.6-9 に示す。

光キャリア再生可能なネットワークにおいて、波長数を最小化する最適波長割当方式が提案されている [27][28]。ネットワーク構成を図 3.6-10 に示す。

通信トラフィックの急激な増加に対処するため、WDM (wave-length division multiplexing) 信号の波長間隔幅を狭めて、利用可能な波長数すなわち利用可能なチャンネルの数を増やす方向で研究開発が進んでいる。一方、従来の帯域幅に余裕のある波長帯域では、無視できる僅かな波長の振動が波長間隔の狭い伝送システムにおいては光フィルタによって光信号が狭窄化されてしまうため、通信用光源に厳しい安定化制御を施す必要がある。このように、光源の安定化の需要が高まる状況下において、光ネットワークのすべてのノードに通信用光源を配置することは、光源の管理・制御の煩雑さを増加させる。



Graph construction example.

図 3.6-10 光キャリア再生可能ネットワークの構成図 [27]

光キャリア再生可能なネットワークにおいて、波長数を最小化する最適波長割当問題は、光キャリア再生を考慮して整数線形計画問題として次式のように定式化される。定式化の際には、波長割当問題をグラフ彩色化問題に変えて定式化している。

光キャリア再生可能なネットワークでは、光キャリア再生技術により光キャリアの再利用が可能となり、波長の利用効率が改善される。一方で再生後の光キャリアの信号品質は、再生前のそれと比較して僅かに悪化するため、1波長あたりの光キャリア再生回数を有限回に制限する必要がある。性能評価の結果、1波長あたり2回の光キャリア再生は、それを用いない場合と比較して、最大で60%以上の波長数を削減することを示している。

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{\lambda \in W} y_{\lambda} & (2a) \\
& \text{s.t} \\
& \sum_{\lambda \in W} x_v^{\lambda} = 1 \quad \forall v \in V & (2b) \\
& \sum_{v \in V} x_v^{\lambda} \leq N_r + 1 \quad \forall \lambda \in W & (2c) \\
& x_v^{\lambda} + x_{v'}^{\lambda} \leq y_{\lambda} \quad \forall (v, v') \in E, \forall \lambda \in W & (2d) \\
& y_{\lambda_i} \geq y_{\lambda_{i+1}} \quad (i = 1, 2, \dots, |W| - 1) & (2e) \\
& y_{\lambda} \in \{0, 1\} \quad \forall \lambda \in W & (2f) \\
& x_v^{\lambda} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, \forall \lambda \in W. & (2g)
\end{aligned}$$

波長数を最小化する最適波長割当問題の定式化

ネットワーク規模が大きくなると、定式化された ILP 問題を現実的な時間で解くことは困難になる。そこで、発見的なアルゴリズムを導入する。ある光パスが P 本の光パスとリンクを共有する時、リンクの競合度は P であると呼ばれ、競合度が大きい光パスほどネットワークで利用される波長数に与える影響が大きい。そこで、本研究では、各々の波長の再生回数を考慮しつつ 競合度の大きい光パスから順に波長を割り当てる、次式のような波長割当アルゴリズム Extended Largest Degree First (ELDF) が開発されている。

```

Algorithm Extended Largest Degree First
V' ← V;
while V' ≠ ∅ do
  for all v ∈ V' such that deg(v) = max_deg(V') do
    check_busy;
    repeat
      i = 1;
      if busy[λi.v] = 0 and wave_status[λi] ≤ Nr + 1
        then
          assign color λi to vertex v;
          V' ← V' \ {v};
          V'' ← V'' ∪ {v};
          wave_status[λi] ← wave_status[λi] + 1;
        else
          i ← i + 1;
        end if
      until The selected vertex receives a color
    end for
  end while

```

波長割当アルゴリズム

計算機上の性能実験では、ネットワークの EN_n = 5、10、15 の場合に対して、すべての EN 間に 0 から 9 個の間で光パス確立要求をランダムに生成させ、すべての光パスを確立す

るのに必要な波長数を算出した。表 3.6-1 および表 3.6-2 は、各波長あたりの最大光キャリア再生回数と LDF によって得られた必要波長数の関係を示している。 N_r 、 $W_{\{ELDF\}}$ 、 $W_{\{low\}}$ は、それぞれ波長あたりの再生可能数、LDF による波長数と理論的下界値である。この結果から、波長数を削減するのは各々の波長再生数が 2 回までの場合であり、それ以上の再生回数は波長数を削減しないことが分かる。

表 3.6-1 最大の光キャリア再生回数 [27]

AVERAGE VALUES OF THE RATIO $\frac{W_{ELDF}}{W_{low}}$						
N_r	$n = 5$		$n = 10$		$n = 15$	
	W_{ELDF}/W_{low}	CI	W_{ELDF}/W_{low}	CI	W_{ELDF}/W_{low}	CI
0	1.000	1.000–1.000	1.000	1.000–1.000	1.000	1.000–1.000
1	1.037	1.035–1.039	1.008	1.006–1.010	1.005	1.004–1.007
2	1.092	1.086–1.098	1.077	1.070–1.084	1.087	1.082–1.092
3	1.077	1.069–1.085	1.033	1.026–1.040	1.020	1.016–1.025
4	1.076	1.068–1.084	1.030	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020
5	1.076	1.068–1.083	1.029	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020
6	1.076	1.068–1.083	1.029	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020
7	1.076	1.068–1.083	1.029	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020
8	1.076	1.068–1.083	1.029	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020
9	1.076	1.068–1.083	1.029	1.022–1.037	1.016	1.012–1.020

表 3.6-2 波長削減効果 [27]

WAVELENGTH REDUCTION RATIO						
N_r	$n = 5$		$n = 10$		$n = 15$	
	$W_{ELDF}^{N_r}/W_{ELDF}^0$	CI	$W_{ELDF}^{N_r}/W_{ELDF}^0$	CI	$W_{ELDF}^{N_r}/W_{ELDF}^0$	CI
0	1.000	1.000–1.000	1.000	1.000–1.000	1.000	1.000–1.000
1	0.520	0.519–0.521	0.504	0.503–0.505	0.503	0.502–0.504
2	0.396	0.395–0.398	0.370	0.369–0.371	0.371	0.370–0.372
3	0.385	0.383–0.387	0.352	0.350–0.354	0.346	0.345–0.348
4	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347
5	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347
6	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347
7	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347
8	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347
9	0.385	0.383–0.387	0.351	0.349–0.354	0.345	0.343–0.347

3.7 光ネットワークにおけるインタードメインピアリングとプロビジョニング

キャリアグレードなトランスポート技術が進展するにつれて、スケーラブルで光伝送や光スイッチングをベースにしたトランスポートレイヤをサポートするインタードメインルーティングの重要性が増している [29][30]。

グリッドコンピューティングのような高性能コンピューティングの研究チームは、インタードメインプロビジョニングのためのアプリケーションの要求条件を考慮して、インタードメイン制御と管理の課題を研究している [31][32][33][34]。Global Lambda Integrated Facility は、波長リソースを制御する制御プレーンのインタフェースおよびプロトコルの使用を決定するワーキンググループである [31]。カナダの実験ネットワークにおいて、ユーザが制御可能な光パス User Controlled LightPaths (UCLP) の制御のデモンストレーションが実証されている [32]。次世代ネットワークの技術開発プロジェクトである Internet2 では、インタードメイン間の光パスの設定制御のアーキテクチャについて検討が進められている [33]。

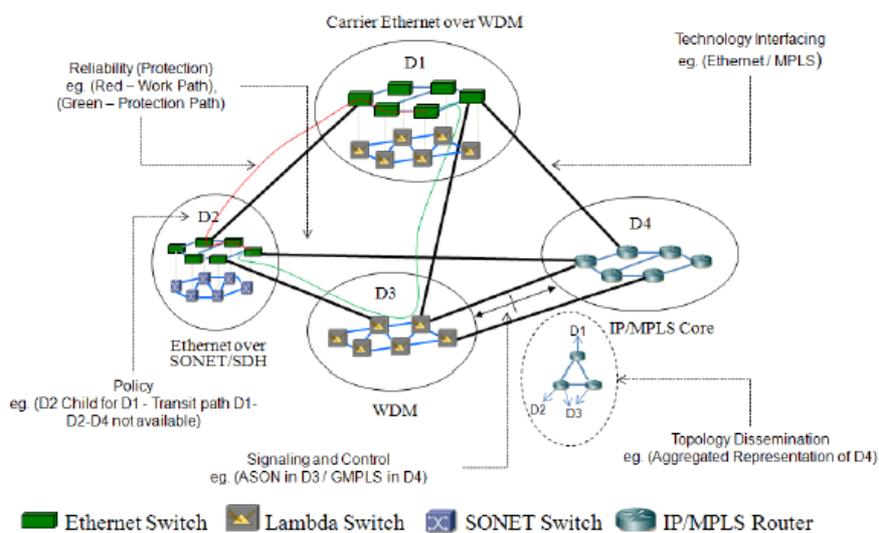
一方、IETF では、Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) や GMPLS controlled Ethernet Label Switching (GELS) の標準化が進められている [35]。また、産業界や大学の研究者の別のグループは、インターキャリアの課題、ポリシーや Service Level Agreements (SLA) の課題に取り組んでいる [36]。

光ネットワークのインタードメインネットワーク構成を図 3.7-1 に、そのモデルを図 3.7-2 に示す。基本的な考え方としては、ハイアラーキカルにネットワークを考えるものであり、その構造を図 3.7-3 に示す。ドメイン間の接続において、WDM、SDH/SONET、キャリアグレード Ethernet などの技術を用いられている。ドメイン同士を相互接続するためには、伝送レイヤにおいて、波長数、伝送速度などのインタフェース条件や伝送プロトコルを一致させる必要がある。また、制御プレーンレイヤにおいて、GMPLS、Automatically Switched Optical Networks (ASON) などの IETF や ITU-T で標準化された制御プレーンの相互接続を確保する必要がある。また、ネットワーク運用者がドメインごとに異なるため、ネットワーク資源を使用するポリシー（ルーティング方式、受付制御、リンクコストの与え方）が異なる。そのため、光パスを設定する際に、各ネットワーク運用者が設定するパラメータやポリシーを考慮しなければならない。

インタードメインのプロビジョニングの特徴について述べる。インタードメインのプロビジョニングの機能は、主にルーティング、QoS プロビジョニング、シグナリング、プロテクション、およびインタードメイン制御プレーン接続に分類される。これらの機能は相互に密接に関係している。

インタードメインにおけるルーティングは、ネットワーク規模とトポロジー情報の秘匿

という観点から克服すべき課題がある。各ネットワーク事業者は、自ドメインにおけるトポロジー情報（リンクの接続状態、リンクコスト等）を他のドメインに対して公開しない。できるだけドメイン間のトポロジー情報を交換することなしに、ルーティングを制御することが望まれている。2つのピアリングドメイン間にて最小限の情報を交換することによって、ナッシュバーゲンと双対分解というコンセプトに基づいて、ルーティングを解決する理論的なアプローチが示されている [37]。ただし、この方式は効率性と公平性の点で優れているが、2つのピアリングドメインのみの接続を対象としており、中継ドメインを網経由するルーティングを考慮していない。また、別の理論的アプローチとして、グローバル最適化問題をラグランジアン分解による解決法も示されている [38]。このアプローチでは、ドメインに流入/流出するフローを交換することを要求しており、情報取得の同期を必要とする制約を課している。さらに、実用的には、交換すべき情報量は拡張性という点で限界になる。そこで、前者と後者の2つのアプローチの利点を生かすように、2つの方式を組み合わせることが良いと考えられる。



A generic inter-domain network scenario.

図 3.7-1 光インタードメインネットワークの構成

現在、運用されているインタードメインルーティング方式として、大きく2つの機能がある。1つ目は、トポロジー情報を伝達する機能である。2つ目は、与えられたトポロジー情報を用いて、エンドツーエンドのインタードメインパスの経路を決定する機能である。

トポロジー情報の伝達では、現実のトポロジー情報を抽象化するトポロジー集約の技術が用いられる。図 3.7-2 はトポロジー集約の例を示している。QoS および分散インタードメ

インパスを計算するときに用いられるいくつかのトポロジー集約の方法が提案されており [39][40][41]、集約されたトポロジー情報のみにを用いて、要求される QoS を満足する経路、AS 間のダイバース経路を選択できるようになっている。集約されたトポロジー情報は、信頼されるドメインや集中サーバに伝達される。後者の場合、集約されたトポロジー情報を受け取った集中サーバは、当該情報を処理し、リーチャビリティ情報はすべてのドメインに送付される。

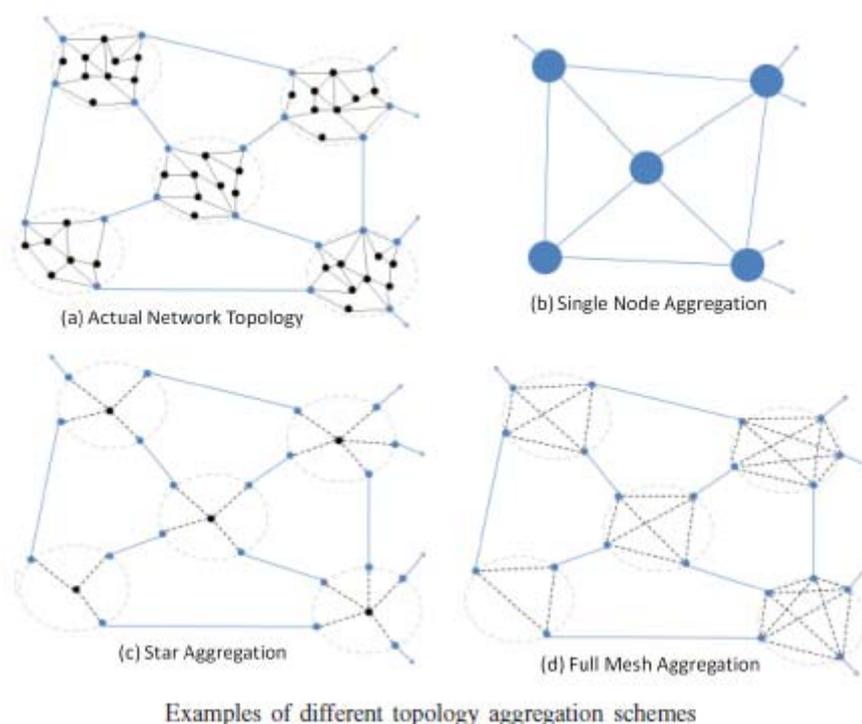


図 3.7-2 インタードメインネットワークのモデル [29]

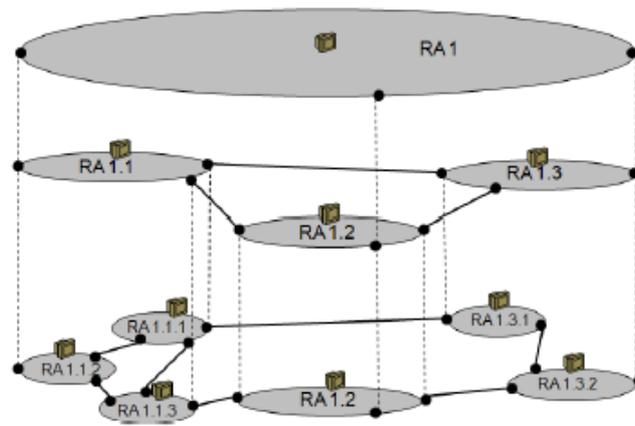
WDM ネットワークにおいて、単一ノード集約方式とフルメッシュ集約方式の場合の性能が比較されている [42][43]。この性能比較では、WDM ネットワークでは、ドメインのエッジノードに波長変換機能がある場合においても、単一ノード集約方式は、リソース活用の点で効率的でないことが分かっている。一方、フルメッシュ集約方式では、ドメインのエッジノード数を M とすると、トポロジー更新メッセージサイズは $O(M^2)$ のオーダーとなるが、リソースを効率良く活用でき、光パス設定のブロッキング率を低減することができる。ASON ネットワークに対するフルメッシュトポロジー集約の方式が提案されている [44]。この提案では、フルメッシュトポロジー集約の中にエッジノード間の光パスの遅延、ホップ数、および使用可能波長の情報が含まれており、エンドツーエンドパスの決定に使用される。ただし、ネットワーク規模が大きくなると、フルメッシュトポロジー集約の情報量

は増大する。

フルメッシュトポロジー集約の問題を解決するために、双方向シャッフルネットトポロジーが用いられている [45]。各ドメインのエッジノードは、**genetic** アルゴリズムを用いてシャッフルネットトポロジーにマッピングされる。シャッフルネットトポロジーは、フルメッシュトポロジーと比較して必要なリンク数を削減されているため、トポロジー情報のサイズを小さくしている。

エンドツーエンドの独立経路を設定するために、独自のトポロジー集約方法が提案されている [46]。このトポロジー集約の規模のオーダーは $O(M^4)$ であり、フルメッシュトポロジー集約に基づいている。エンドツーエンドの独立経路の決定には、**Suurballe** アルゴリズムをリンク独立経路の決定に用いる方式が用いられる [47]。**Suurballe** アルゴリズムは、2つの計算ステップから構成される。第1ステップでは、エンドツーエンドの最短経路パスを求める。第2ステップでは、第1ステップで求められたエンドツーエンドの最短経路パスで使用したリンクを逆方向に設定したトポロジーを新たに作成し、そのトポロジーのもとで、エンドツーエンドの最短経路パスを求める。第1ステップと第2ステップで計算された2つのパスを統合すると、エンドツーエンドの独立経路を求めることができる。その**Suurballe** アルゴリズムを用いるために、トポロジー集約において、第1ステップで用いられるフルメッシュ集約トポロジーにおけるリンクは、第1ステップで計算された結果が反映させるように、第2ステップで用いられるで用いられるフルメッシュ集約トポロジーと関連付けられている。

与えられたトポロジー情報を用いて、エンドツーエンドのインタードメインパスの経路を決定する技術において、**Path Computation Element (PCE)** を用いる経路計算のフレームワーク・プロトコルが、主流の技術の一つとして開発されている [48][49]。PCE はトポロジー情報を保持し、経路を決定するネットワークのエンティティである。従来、パス計算機能はノードの一部の機能として実装されてきた。しかし、ネットワーク内で複数のドメイン (**Area, AS, Layer**) を考慮して高度なパス計算を行う場合、パス計算は複雑化する。そこで、パス計算を専用とする機能ブロックをノードとは分離して、ネットワーク内におけるエレメントとして **PCE** として位置付けるようになった。図 3.7-3 は、ハイアラーキカルなインタードメインネットワークにおいて各ドメインに **PCE** を配置し、**PCE** 間が連携をとり、エンドツーエンドのパス計算が実行される。



Routing area hierarchy using PCEs in ASON

図 3.7-3 ハイアラーキカルなインタードメインネットワーク [29]

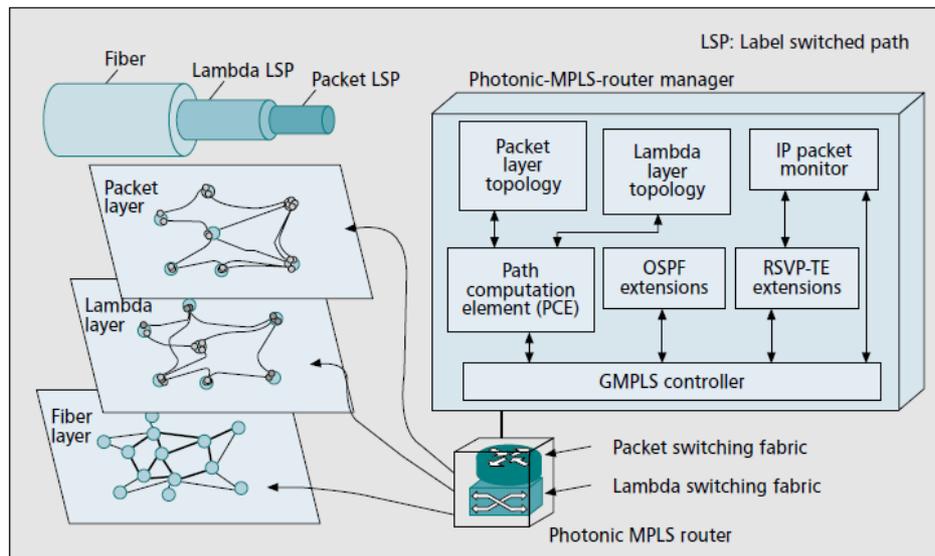
3. 8 マルチレイヤトラフィックエンジニアリング

予測困難なトラフィックの需要変動に対する柔軟性の向上や故障・災害時において、高信頼なネットワークサービスを提供しつつ、ネットワーク資源を効率的に利用することができるような柔軟性と信頼性を両立させるネットワークが求められている。

マルチレイヤエンジニアリングは、上位レイヤ+下位レイヤからなるネットワーク、例えば IP ネットワークと光パスネットワークから構成される IP 光ネットワークにおいて、高度なネットワーク資源を効率的に利用するための技術である。

IP 光ネットワークを例にして考える。IP ネットワークとマルチレイヤエンジニアリングでは、IP ルータと伝送系装置のネットワーク資源を一元的に管理し、光 IP 網の経路の計算を行う。また、トラフィックの需要変動や故障時のネットワーク状態の急激な変化に対して即座に柔軟に対応するために、IP 網トポロジーを動的に再構成する。このようなネットワーク運用の高度化に加え、安定した高信頼なネットワークサービスを提供するために、必要なネットワーク資源を有効利用する。

マルチレイヤネットワークの構成と Photonic MPLS ルータの構成を図 3.8-1 に示す。図にあるように、Photonic MPLS ルータは Packed switch と Lambda switch を連携して持ち、マルチレイヤを効率よくオペレーションできる特徴がある。

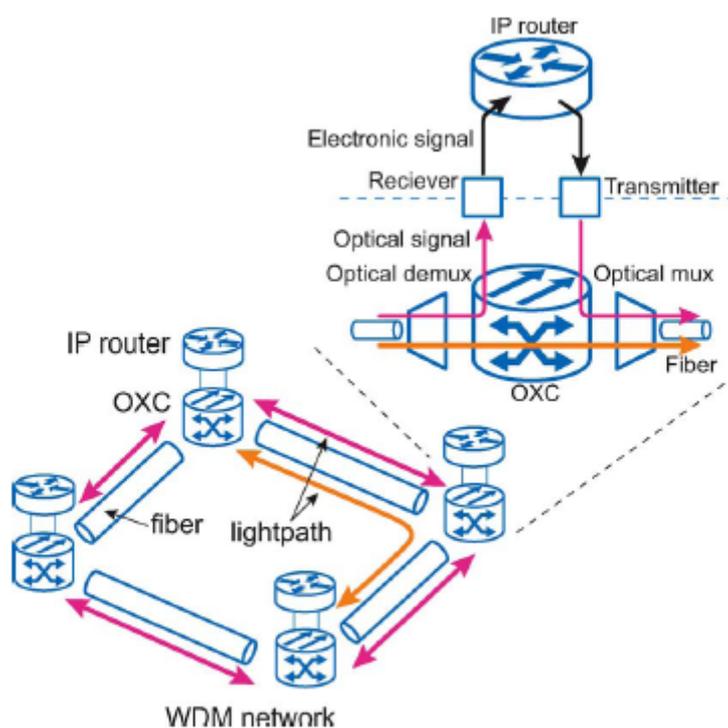


The structure of a photonic MPLS router with multilayer traffic engineering.

図 3.8-1 マルチレイヤ構成と Photonic MPLS ルータ [72]

マルチレイヤエンジニアリングは、光 IP 網トポロジー情報を基に、パスの最適な経路を計算するパス計算や適切な区間にパスを設定するパス制御などの機能要素から構成される。さらに、パス制御については論理的網 (IP 網) トポロジーを再構成することが可能であ

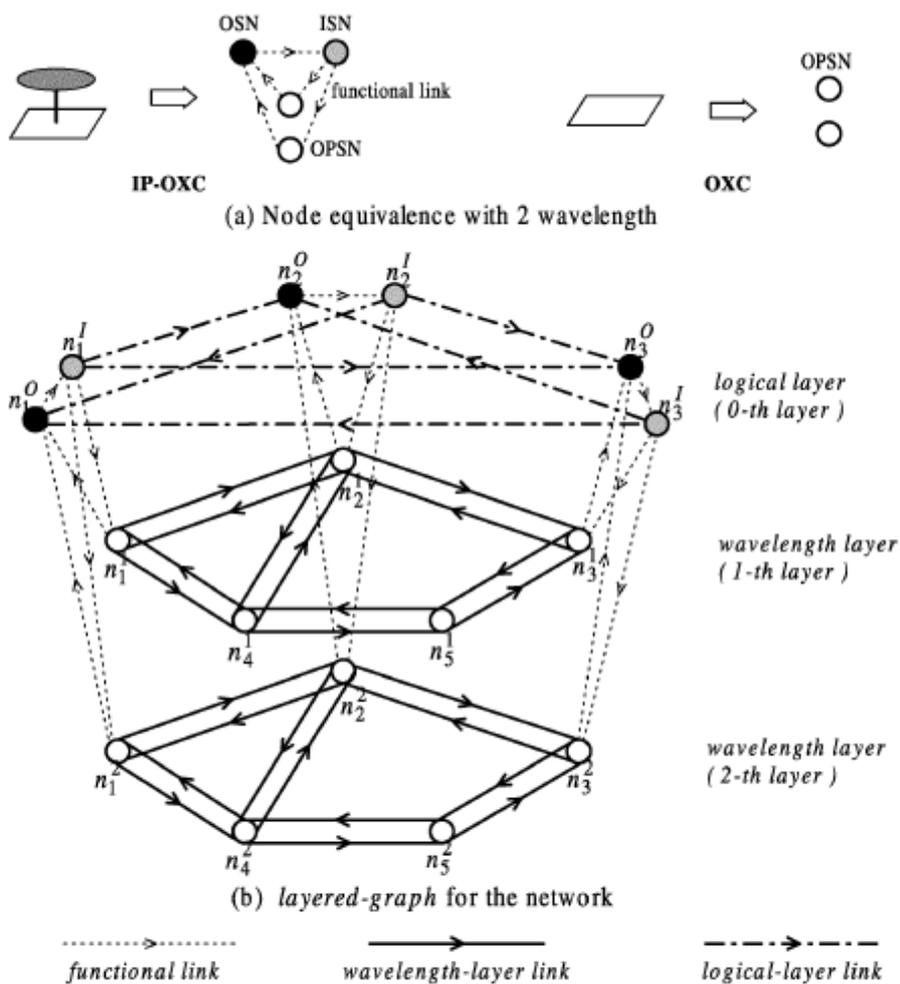
る。論理トポロジーは Virtual Network Topology (VNT) と呼ばれている。IETF において、VNT 制御についてフレームワーク・要求条件が議論され、必要なプロトコルが規定されている [50][51]。マルチレイヤエンジニアリングの最新動向である物理トポロジーと波長ルーティングを図 3.8-2 に示す [52]。



Example of wavelength-routed WDM networks; a physical topology.

図 3.8-2 物理トポロジーと波長ルーティング [52]

波長に従って光クロスコネクでスイッチングし、光パスが設定される光パスネットワークのトラヒックエンジニアリングについて、図 3.8-3 に示すような形での研究がされている [53][54][55][56][57][58][59]。



Layered-graph for the sample network shown in Fig. 1. (a) Equivalence relations of IP-OXC and OXC. (b) Layered-graph for the network. In the layered-graph, the zeroth layer represents the logical layer and the w th layer indicates the w th wavelength layer ($1 \leq w \leq 2$).

図 3.8-3 マルチレイヤネットワークのレイヤードグラフ [54]

また、IP トラフィック需要に応じて光パスから構成される VNT を制御する技術であるマルチレイヤトラフィックエンジニアリングも図 3.8-4 に示すように広く行われている [60][61][62]。IEFT で標準化されている Generalized Multi-Protocol Label Switch (GMPLS) プロトコル群を用いて、VNT を分散的に制御する方式が述べられている [60]。

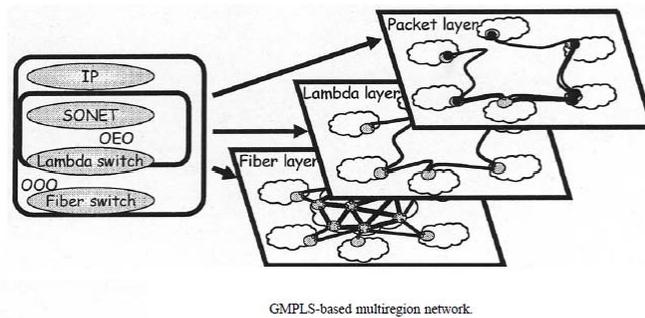


図 3.8-4 GMPLS による VNT 計算例 [60]

インターネットトラフィックの急増に従って、ピアツーピアネットワーク、Voice over IP、ビデオオンデマンドのようなアプリケーションレイヤサービスの出現により、大きなトラフィック変動が起きる。そして、急激なトラフィック変動に対応できる仮想ネットワークトポロジ (VNT) 制御技術は、色々と研究されている [63][64][65]。

VNT を制御するアプローチは、オフライン制御とオンライン制御に大きく分類できる。

オフライン制御では、予め発着ノード間のトラフィック需要が分かっている場合に適用できる。トラフィック変動に応じて VNT を制御すると、ネットワーク使用効率が向上することが示されている [63]。発着ノード間のトラフィック量が小さい場合は、多くの光パスを設定すると光パスの使用率が低下する。この場合は、設定する光パスの本数をなるべく少なくして、トラフィックを集約して、光パスの使用率を向上させるようにする。一方、発着ノード間のトラフィック量が大きい場合は、光パスの使用効率は十分に大きくなる。もし、光パスの本数が少ないと経路する中継ルータが多くなり、各ルータで多くのトラフィックを処理するためパケット処理のコストが増大する。この場合は、設定する光パスの本数を多くする。このように、トラフィック需要に応じて、最適な光パス配置することがネットワーク運用コストの削減につながる。

オフライン制御による VNT 制御は他にも研究されている [66][67][68]。ただし、トラフィック需要が時々刻々変動する状況下では、オフライン制御はトラフィック輻輳を招く恐れがあるので、オンライン制御が必要になってくる。

オンライン制御では、トラフィックの要求において VNT を制御したり、周期的にトラフィックを計測したりすることで、より適切な VNT になるように変更する制御を行う。オンライン制御に関する VNT 制御の研究は多々行われている [69][70][71][72][73]。その研究の一例を紹介する。

VNT の上位レイヤが MPLS のようなパケットパスを動的に設定するネットワークにおいては、VNT を制御するいくつかの制御ポリシーが提案され、パケットパスの要求条件やト

ラヒック需要に応じて制御ポリシーの適用領域が示されている [72][73]。図 3.8-5 に示すように、2つの制御ポリシーがある。ポリシー1では、パケット（上位レイヤ）パスの設定要求に対して、なるべく既存光パス（下位レイヤ）に新規パケットパスを収容できるようにする。もし、既存光パスが使用不可の場合、光パスを新設する。ポリシー2では、新設パケット設定要求に対してなるべく1ホップ光パスを使う。1ホップ光パスが存在しない場合は、光パスを新設する。パケットレイヤと光パスレイヤを処理できる Photonic MPLS ルータにおいて、Packet Switching Capable (PSC) ポート最大同時使用可能数が十分大きい場合、つまり、IP リソースの制限より波長リソースの制限の方がボトルネックとなっている場合は、なるべく対地間にダイレクトに OLSP を設定するのを優先するポリシー2の方が、ポリシー1 より多くのトラヒックを収容できる。PSC ポート最大同時使用可能数が少ない場合は、波長リソースの制限より IP リソースの制限の方がボトルネックになっており、なるべく少ない光パスでパケットパスを束ねるポリシー1の方が、ポリシー2 より多くのトラヒックを収容できる。波長数が固定の場合、PSC ポート最大同時使用可能数に応じて、ポリシーの適用領域があることが示されている。

ネットワーク運用管理の観点から、現状の VNT から移行すべき VNT に制御する際に、設定変更すべき光パスの本数を制約条件として考慮すべきである。この制約条件を考慮して、VNT 制御問題が線形計画問題として定式化されている [69]。周期的にトラヒックを計測することにより、発見的なアルゴリズムにより最適計算を行うことで NT を制御している [70][71]。

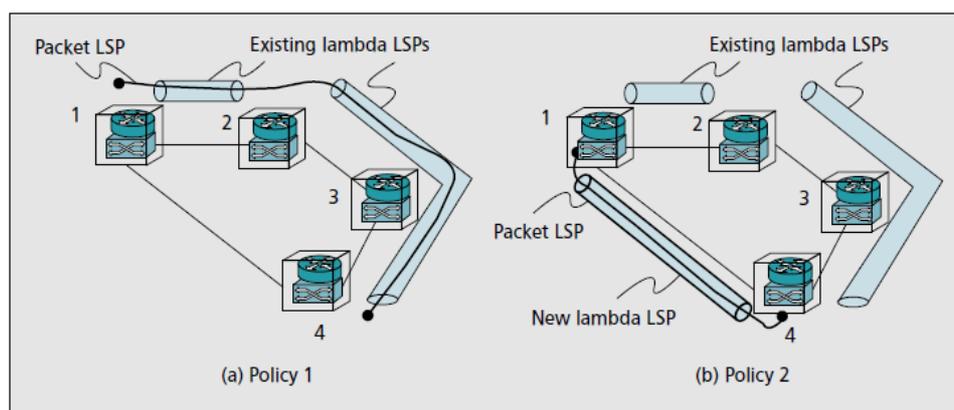
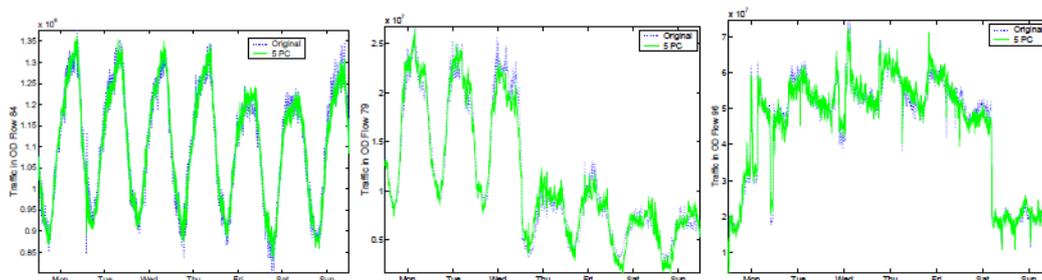


図 3.8-5 ポリシーによって VNT の変更を行う例 [72]

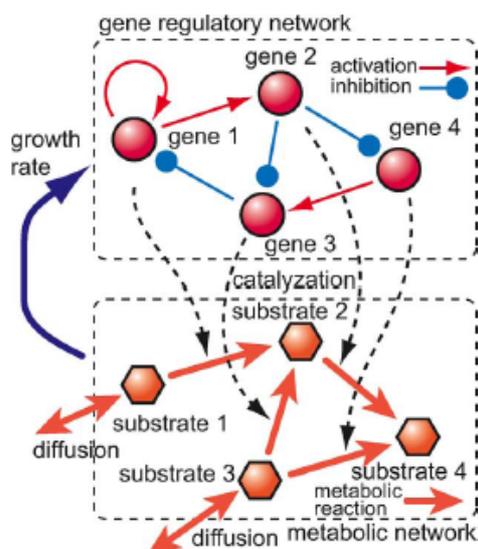
これまでの VNT 制御において、図 3.8-6 に示すように、トラヒック需要のモデルは周期的に変動すると仮定していることが多い [74]。トラヒック需要は、急激に変化したり周期

的に変動したりするとは限らない。そこで、図 3.8-7 に示すように、生物学的アプローチによるアトラクター選択を用いた VNT 制御を提案されている [52]。この方式では、生物の振る舞いを表す微分方式を VNT 制御に取り入れている。これにより、急激に変化するトラフィック需要に対して、簡易に効率的に VNT を制御できることを示している。



Reconstructing OD flow timeseries with 5 principal components (left and center plots: Sprint-1; right plot: Abilene).

図 3.8-6 VNT 制御におけるトラフィック需要モデル [74]



Gene regulatory and metabolic networks.

図 3.8-7 生物学的モデルによる VNT 制御 [52]

Path Computation Element (PCE) を用いて、マルチレイヤトラフィックエンジニアリングに適用することが検討されており、IETF では PCE マルチレイヤトラフィックエンジニアリングのフレームワークと要求条件が策定された [75][76]。PCE プロトコルである PCEP のマルチレイヤ拡張の標準化が進められている [77]。

PCE マルチレイヤトラフィックエンジニアリングのフレームワークを紹介する。図 3.8-8

に示すように、上位レイヤ（MPLS ネットワーク）と下位レイヤ（GMPLS ネットワーク）から構成されるネットワークを考える。GMPLS ネットワーク内の GMPLS パスを設定すると、当該パスは MPLS ネットワークに対して、リンクとして扱うことができる。

発 MPLS ルータから着 MPLS ルータまで、エンドツーエンドの MPLS のパス計算をすることを考える。MPLS ネットワークと GMPLS ネットワークのルーティングドメインが分離されている場合、MPLS ルータは GMPLS ネットワーク内の TE トポロジーを知ることができない。そこで、PCE は、両ルーティングドメインから TE トポロジー情報を収集し、GMPLS ネットワーク内のリソースを勘案しながら MPLS パスのルートを算出する。H2-H4 間に MPLS リンクが設定されていない場合、シングルレイヤのパス計算では MPLS パスを探索できない。インターレイヤパス計算では、GMPLS ネットワーク内のリソース情報を有しているので、H2-H4 間に GMPLS パスの新設を判断することにより、エンドツーエンドの MPLS パスの経路を算出する。

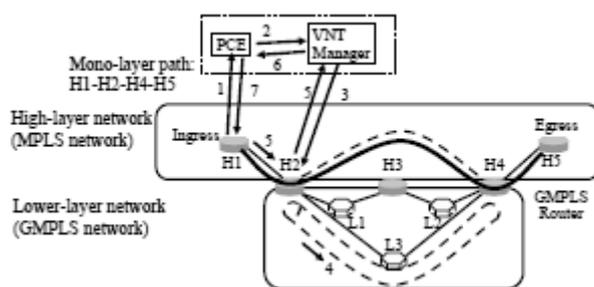


図 3.8-8 VNT Manager 駆動モデル

PCE によるパス制御モデルを図 3.8-8 と図 3.8-9 に示す。GMPLS パスを制御する方式として、VNTM (Virtual Network Topology Manager) 駆動モデル (図 3.8-8) と上位レイヤシングナリング駆動モデル (図 3.8-9) がある。両モデルにおいて、PCE はインターレイヤパス計算を行い、GMPLS パスの新設の判断まで行う。

VNTM 駆動モデルでは、GMPLS パスの新設を実施するエレメントを VNTM として定義する。下位レイヤのパス (GMPLS パス) の集合は VNT を構成する。MPLS ルータ H1 は、H5 までのパス計算を PCE に依頼する。PCE によるパス計算の結果、GMPLS パスの新設が必要と判断された場合は、VNTM を介して MPLS ネットワークと GMPLS ネットワークの境界に位置するボーダルータ H2 に GMPLS パス新設制御を行う。GMPLS パスが設定された後、PCE は MPLS パス経路 H1-H2-H4-H5 を H1 に返答し、H1 は MPLS パスシングナリングを開始する。

上位レイヤシングナリング駆動モデルでは、PCE によるパス計算の結果、GMPLS パスの

新設を MPLS シグナリングの途中で行う。PCE は MPLS パス経路と GMPLS パス経路を含む経路 H1-H2-L3-H4-H5 を H1 に回答し、H1 は MPLS パスシグナリングを開始する。MPLS シグナリングメッセージを受け取ったボーダルータ H2 は、GMPLS シグナリングを開始し、GMPLS パス設定が完了後、MPLS シグナリングが H2 より再開される。

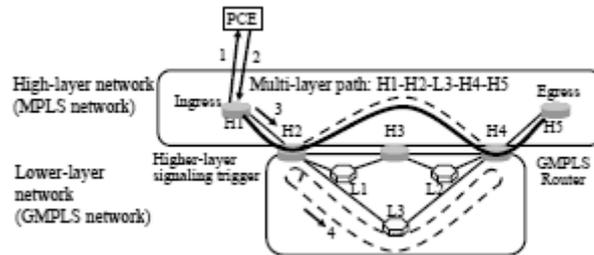


図 3.8-9 上位レイヤシグナリング駆動モデル

3. 9 まとめ

光ネットワークの制御技術に関して報告する。今後最も重要なテクノロジーとなる光エラストックパス技術について、その概要と基本的な研究動向を示した。また、本技術を使って光スペクトルの効率を上げて、それぞれ仮想的にネットワークと分離する SLICE の技術についても述べ、その設計法や信頼性に対する取り組みについて述べた。制御技術としては、GMPLS を利用しており、割り当てに関しては ILP の応用について述べた。

【参考文献】

- [1] S. J. B. Yoo, "Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet," *J. Lightwave Tech.*, vol. 24, no. 12, 2006, pp.4468–92.
- [2] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, Nov. 2009.
- [3] M. Tomizawa et al., "Terabit LAN with Optical Virtual Concatenation for Grid Applications with Super-Computers," *Proc. OFC/NFOEC '05*, vol. 4, 2005.
- [4] R. Izmailov et al., "Hybrid Hierarchical Optical Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 11, 2002, pp. 88–94.
- [5] Y. Sone et al., "Highly Survivable Restoration Scheme Employing Optical Bandwidth Squeezing in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path (SLICE) Network," *Proc. OFC/NFOEC '09*, 2009, paper no. OthO2.
- [6] B. Kozicki, H. Takara, T. Yoshimatsu, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Filtering characteristics of highly spectrum efficient spectrum-sliced elastic optical path (SLICE) network," *Proceedings of OFC*, 2009, p. Jwa43.
- [7] B. Kozicki et al., "Optical Path Aggregation for 1-Tb/s Transmission in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network," *IEEE Photonics technology Letters*, vol. 22, no. 17, September 1, 2010.
- [8] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)," *IEEE Communications Magazine* Vol. 48, issue. 8, pp 138-145, 2010.
- [9] B. Kozicki, H. Takara, Y. Sone, A. Watanabe, and M. Jinno, "Distance-Adaptive Spectrum Allocation in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Bit per Symbol Adjustment," *Proc. OFC/NFOEC*, Paper OMU3, 2010.
- [10] H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A Hirano, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Distance-Adaptive Super-Wavelength Routing in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Optical OFDM," *Proc. ECOC*, Paper We.8.D.2, Sep. 2010
- [11] H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A Hirano, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Distance-Adaptive spectrum allocation considering optical filtering effects," *OECC2010 Technical Digest*, July 2010.
- [12] Q. Yang, W. Shieh, and Y. Ma, "Bit and Power Loading for Coherent Optical OFDM," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 20, no. 15, 2008, pp. 1305–7.
- [13] O. Rival, A. Morea, and J. Antona, "Optical Network Planning with Rate Tunable NRZ Transponders," *Proc. ECOC '09*, 2009.
- [14] Y. Wang, X. Cao, and Y. Pan, "A study of the routing and spectrum allocation in the SLICE network," *Proceedings of IEEE INFOCOM' 11*, pp. 1–9.
- [15] Y. Wang, X. Cao, and Y. Pan, "Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks," *Proceedings of IEEE ICC' 11*, pp. 1–5.
- [16] K. Christodouloupoulos et al., "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-Based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation," *IEEE Globecom*, Dec. 2010.
- [17] M. Klinkowski and K. Walkowiak, "Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network," *IEEE Commun. Let.*, pp. 884-886, Aug. 2011.
- [18] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, B. Kozicki, Y. Sone, and M. Jinno, "Algorithm for Maximizing Spectrum Efficiency in Elastic Optical Path Networks that Adapt Distance Adaptive Modulation," *Proc. ECOC*, Paper We.8.D.5, Sep. 2010
- [19] T. Takagi et al., "Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation,"

- OSA/OFC/NFOEC 2011, OTuI7.
- [20] Y. Cai, M. Matsuura, E. Oki, N. Kishi, and T. Miki, "Optical Broadcast-and-Select Network Architecture with Centralized Multi-Carrier Light Source," *IEICE Electronic Express*, vol. 5, no. 11, pp. 796-801, Nov. 2008.
 - [21] Y. Cai, E. Oki, M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, "Design and Evaluation of an Optical Broadcast-and-Select Network Architecture with a Centralized Multi-Carrier Light Source," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 21, pp. 4906-4906, Nov. 2009.
 - [22] Y. Cai, E. Oki, M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, "Optical Broadcast-and-Select Network Architecture With Centralized Multi-Carrier Light Source," *IEEE ICC 2009*, Jun. 2009.
 - [23] Y. Cai, E. Oki, M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, "Design of Optical Broadcast-and-Select Network Architecture based on Centralized Multi-Carrier Light Source," *iPOP 2009*, Jun. 2009.
 - [24] Y. Cai, M. Matsuura, E. Oki, N. Kishi, and T. Miki, "Optical Drop-Add-Drop Network Architecture with Centralized Multi-Carrier Light Source," *IEEE Commun. Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 700-702, Sep. 2009.
 - [25] Y. Cai, M. Matsuura, E. Oki, N. Kishi, and T. Miki, "A Resilient Star-Ring Optical Broadcast-and-Select Network with a Centralized Multi-Carrier Light Source," *Photonic Network Commun.*, vol 20, no. 3, pp. 293-302, Dec. 2010.
 - [26] Y. Cai, M. Matsuura, E. Oki, N. Kishi, and T. Miki, "Resilient Optical Broadcast-and-Select Network Using Centralized Multi-Carrier Light Source," *14th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM 2010)*, Feb. 2010.
 - [27] M. Keri, E. Oki, and M. Matsuura, "Wavelength Assignment in Multi-Carrier Distributed Optical Ring Networks with Wavelength Reuse," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 4, pp. 281-289, Apr. 2011.
 - [28] M. Keri, M. Matsuura, and E. Oki, "A Wavelength Assignment Design Scheme for a Carrier Wavelength Reusable WDM Ring Network," *iPOP 2011 Jun.* 2011.
 - [29] M. Chamania and A. Jukan, "A Survey of Inter-Domain Peering and Provisioning Solutions for the Next Generation Optical Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 33-51, 2009.
 - [30] *IEEE802.1Qay, Provider Backbone Bridge Traffic Engineering*, <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ay.html>
 - [31] *Global Lambda Integrated Facility: Control Plane Working Group*, <http://www.glif.is/working-groups/controlplane/>
 - [32] *CA*net 4 Research Program Update - UCLP Roadmap for creating User Controlled and Architected Networks using Service Oriented Architecture*, http://www.canarie.ca/canet4/uclp/UCLP_Roadmap.doc
 - [33] *Interdomain Reservation and Authorization on OSCARS/DCN Version 0.3*, <http://www.internet2.edu/dcresearch/DCN-reserv.arch.v5-1.pdf>
 - [34] T. Lehman, J. Sobieski, B. Jabbari, "DRAGON: A Framework for Service Provisioning in Heterogeneous Grid Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 84-90, March 2006.
 - [35] D. Fedyk, H. Shah, N. Bitar, A. Takacs, "GMPLS control of Ethernet PBB-TE", *IETF Internet Draft* <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-ethernet-pbb-te-01.txt>, July 2008.
 - [36] *The North American Network Operators' Group*, www.nanog.org
 - [37] G. Shrimali, A. Akella, A. Mutapcic, "Cooperative Inter-Domain Traffic Engineering Using Nash Bargaining and Decomposition," *IEEE INFOCOM 2007*.
 - [38] A. Tomaszewski, M. Pioro, M. Mycek, "Distributed Inter-Domain Link Capacity Optimization for Inter-Domain IP/MPLS Routing," *IEEE GLOBECOM 2007*.

- [39] R. Douville, J.L. Le Roux, J.L. Rougier, S. Secci, "A Service Plane over the PCE Architecture for Automatic Multidomain Connection-oriented Services," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46 pp. 94-102, June 2008.
- [40] S. Secci, J.L. Rougier, A. Pattavina, "AS Tree Selection for Inter-Domain Multipoint MPLS Tunnels," *IEEE ICC 2008*, pp.5863-5868.
- [41] S. Secci, J.L. Rougier, A. Pattavina, "On the Selection of Optimal Diverse AS-paths for Inter-domain IP/(G)MPLS Tunnel Provisioning," *Telecommunication Networking Workshop on QoS in Multiservice IP Networks*, 2008. IT-NEWS 2008.
- [42] Q. Liu, M. A. Kok, N. Ghani, V. M. Muthalaly, M. Wang, "Hierarchical Inter-Domain Routing in Optical DWDM Networks," *IEEE INFOCOM 2006*, pp. 1 – 5.
- [43] Q. Liu, M. A. Kok, N. Ghani, V. M. Muthalaly, M. Wang, "OPN08-02: Inter-Domain Provisioning in DWDM Networks," *IEEE GLOBECOM 2006*, pp. 1 – 6.
- [44] S. Sanchez-Lopez, X. Masip-Bruin, E. Marn-Tordera, J. Sol-Pareta, J. Domingo-Pascual "A Hierarchical Routing Approach for GMPLS based Control Plane for ASON," *IEEE ICC 2005*.
- [45] P. Wan, W. Jiao, X. Wu, "A Novel Topology Aggregation Method for Hierarchical Routing in ASON Network," *IEEE GLOBECOM 2007*, pp. 2275-2279.
- [46] A. Sprintson, M. Yannuzzi, A. Orda, X. Masip-Bruin, "Reliable Routing with QoS Guarantees for Multi-Domain IP/MPLS Networks," *IEEE INFOCOM 2007*, pp.1820 -1828.
- [47] J. Suurballe, "Disjoint Paths in a Network," *Networks*, 4:125-145, 1974
- [48] JP. Vasseur, JL. Le Roux (Editors), A. Ayyangar, E. Oki, A. Atlas, A. Dolganow, Y. Ikejiri, K. Kumaki, "Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP)," *RFC 5440*, Mar. 2009.
- [49] JL. Le Roux (Editor), D. Cheng, K. Kumaki, E. Oki, R. Zhang, R. Zhang, "PCE Communication Protocol (PCECP) specific requirements for Inter-Area (G)MPLS Traffic Engineering," *RFC 4927*, Jun. 2007.
- [50] K. Shimoto et al., "Requirements for GMPLS-Based Multi-Region and Multi-Layer Networks (MRN/MLN)," *RFC 5212*, July 2008.
- [51] JL. Le Roux, and D. Papadimitriou, "Evaluation of existing GMPLS Protocols against Multi Layer and Multi Region Networks (MLN/MRN)," *RFC 5339*, Sept. 2008.
- [52] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiomoto, and M. Murata, "Adaptive Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 11, pp.1720-1731, Jun. 2010.
- [53] J. Li, G. Mohan, E. C. Tien, and K. C. Chua, "Dynamic routing with inaccurate link state information in integrated IP over WDM networks," *Comput. Netw.*, vol. 46, pp. 829–851, Dec. 2004.
- [54] T. Ye, Q. Zeng, Y. Su, L. Leng, W. Wei, Z. Zhang, W. Guo, and Y. Jin, "On-line integrated routing in dynamic multifiber IP/WDM networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 9, pp. 1681–1691, Nov. 2004.
- [55] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E83-B, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [56] N. Ghani, S. Dixit, and T.-S. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 3, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [57] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Apr. 2001, pp. 358–366.
- [58] J. Comellas, R. Martinez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, "Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks," *IEEE Netw. Mag.*, vol. 17, no. 2, pp. 22–27, Mar./Apr. 2003.
- [59] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, "On the integration of IP routing and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proc. SPIE*, Nov. 2005, vol. 6022,

- 602205.
- [60] K. Shiimoto, E. Oki, W. Imajuku, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "Distributed Virtual Network Topology Control Mechanism in GMPLS-Based Multi-Region Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 8, pp. 1254-1262, Oct. 2003.
 - [61] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 4, no. 5, pp. 684-696, Oct. 1996.
 - [62] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 840-851, Jun. 1996.
 - [63] E. Oki, K. Shiimoto, S. Okamoto, W. Imajuku, and N. Yamanaka, "A heuristic-based multi-layer optimum topology design scheme based on traffic measurement for IP+Photonic networks," in *Proc. OFC 2002*, Mar. 2002, pp. 104-105.
 - [64] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Mar. 2005, pp. 2543-2553.
 - [65] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "On the stability of virtual network topology control for overlay routing services," in *Proc. BROADNETS*, Raleigh, NC, Sep. 2007.
 - [66] F. Ricciato, S. Salsano, A. Belmonte, and M. Listanti, "Off-line configuration of a MPLS over WDM network under time-varying offered traffic," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Jun. 2002, vol. 1, pp. 57-65.
 - [67] G. Agrawal and D. Medhi, "Lightpath topology configuration for wavelength-routed IP/MPLS networks for time-dependent traffic," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Nov. 2006, pp. 1-5.
 - [68] B. Chen, G. N. Rouskas, and R. Dutta, "On hierarchical traffic grooming in WDM networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 5, pp. 1226-1238, Oct. 2008.
 - [69] B. Ramamurthy and A. Ramakrishnan, "Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical WDM networks," in *Proc. GLOBECOM*, Nov. 2000, vol. 2, pp. 1269-1275.
 - [70] A. Gençata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 2, pp. 236-247, Apr. 2003.
 - [71] S. F. Gieselmann, N. K. Singhal, and B. Mukherjee, "Minimum-cost virtual-topology adaptation for optical WDM mesh networks," in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2005, vol. 3, pp. 1787-1791.
 - [72] E. Oki, K. Shiimoto, D. Shimazaki, N. Yamanaka, W. Imajuku, and Y. Takigawa, "Dynamic Multilayer Routing Schemes in GMPLS-based IP+Optical Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 1, pp. 108-114, Jan. 2005.
 - [73] E. Oki, K. Shiimoto, M. Katayama, W. Imajuku, N. Yamanaka, and Y. Takigawa, "Performance Evaluation of Dynamic Multi-Layer Routing Schemes in Optical IP Networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E87-B, no. 6, pp. 1577-1583, Jun. 2004.
 - [74] A. Lakhina, K. Papagiannaki, M. Crovella, C. Diot, E. D. Kolaczyk, and N. Taft, "Structural analysis of network traffic flows," in *Proc. ACM Sigmetrics*, Jun. 2004, pp. 61-72.
 - [75] E. Oki, J.L. Le Roux, and A. Farrel, "Framework for PCE-Based Inter-Layer MPLS and GMPLS Traffic Engineering," *RFC 5623*, Sep. 2009.
 - [76] T. Takeda, A. Farrel (Editors), E. Oki, J.L. Le Roux, and K. Kumaki, "PCC-PCE Communication and Discovery Requirements for Inter-Layer Traffic Engineering," *RFC 6457*, Dec. 2011.
 - [77] E. Oki, T. Takeda, J-L Le Roux, A. Farrel, and F. Zhang, "Extensions to the Path

Computation Element communication Protocol (PCEP) for Inter-Layer MPLS and GMPLS Traffic Engineering, " IETF draft, draft-ietf-pce-inter-layer-ext-06.txt, Jan. 2012.

あとがき

アクセス技術、トランスポート技術、および光ネットワークの制御技術について述べた。

アクセス技術に関しては、単なる経済化としてのアクセスではなく、QoS や信頼性、さらにサービスに対するフレキシビリティが重要となっている。従来のようなホームユースを中心としたデータアクセス（インターネット）から、モバイルバックホールやビジネスのミッションクリティカルな専用線サービスまでを統合するアクセスネットワークのアーキテクチャが重要である。今後はエネルギーを削減したアーキテクチャへの発展が期待される。

トランスポート技術に関しては、パケットをベースとしたトランスポートが近年ホットである。特に、MPLS-TP は MPLS をベースとしたトランスポートプロトコルとして、実用化を含めて急速に進展している。本技術に関しては、標準化動向やキャリアの戦略を含めて解説を試みており、特に日本がテクニカルなリーダーシップをもっている部分でもある。米国でもインタオペラビリティが行なわれており、国内でも PIF が共催している iPOP において公開実験が企画されている。光パスと組み合わせて、今後の重要な技術である。

最後の光ネットワークの制御技術であるが、エラスティック光パス技術の進展により、光スペクトルのよりダイナミックで効率的な利用法が進んでいる。それに合わせてネットワークの仮想化技術が進展し、制御や設計技術にインパクトを与えている。制御技術として、この波長や周波数領域の技術進展について解説を試みた。

以上のことから、本報告書では、特にトランスポートよりも上位層を中心として解説を試みており、より詳細な物理層やデバイスは今後に譲ることとした。

【略語の説明】

2G	2 nd Generation
3G	3 rd Generation
3GPP	3 Rd Generation Partnership Project
4G	4 th Generation
AC	Attachment Circuit
ADM	Add/Drop Multiplexor
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AIS	Alarm Indication Signal
APS	Automatic Protection Switching
ASON	Automatically Switched Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BFD	Bidirectional Forwarding Detection
BGP	Border Gateway Protocol
BSC	Base Station Controller
BSS	Business Support System
BTS	Base Transceiver Station
CC	Connectivity Check
CE	Customer Edge
CT	China Telecom
CP	Control Plane
CV	Connectivity Verification
DP	Data Plane
DT	Deutsche Telekom
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
E-LAN	Ethernet Local Area Network service
E-LINE	Ethernet Line service
E-NNI	External Network to Network Interface
e-VLAN	Ethernet VLAN service
E2E	End to End
ECMP	Equal Cost MultiPath routing
EPL	Ethernet Private Line service
ETH	Ethernet
EVC	Ethernet Virtual Connection
EVPL	Ethernet Virtual Private Line service
FE	Front End
FEC	Forwarding Equivalent Class
FR	Frame Relay
FRR	Fast ReRoute
FT	France Telecom
G-Ach	Generic Associated Channel
GAL	G-Ach Label
GbE	Gigabit Ethernet
GFP	Generic Framing Procedure
GMP	Generic Mapping Procedure
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
GW	GateWay router
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
I-NNI	Internal Network to Network Interface
IA	Implementation Agreement
ID	Identifier
IETF	Internet Engineering Task Force

IP	Internet Protocol
iPOP	IP + Optical Network
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector
L1	Layer 1
L1VPN	Layer 1 Virtual Private Network
L2	Layer 2
L2VPN	Layer 2 Virtual Private Network
L3	Layer 3
L3VPN	Layer 3 Virtual Private Network
LAG	Link Aggregation
LDP	Label Distribution Protocol
LER	Label Edge Router
LOC	Loss of Continuity
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switched Router
LTE	Long Term Evolution
ME	Maintenance Entity
MEF	Metro Ethernet Forum
MEG	Maintenance Entity Group
MEP	MEG End Point
MIP	MEG Intermediate Point
MP	Management Plane
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MPLS-TP	Multi-Protocol Label Switching Transport Profile
MS-PW	Multi-Segment Pseudo Wire
MSPP	Multi-Service Provisioning Platform
MSSP	Multi-Service Switching Platform
MSTP	Multi-Service Transport Platform
MTU	Maximum Transfer Unit
NG	Next Generation
NG-ADM	Next Generation Add/Drop Multiplexor
NMS	Network Management System
NNI	Network to Network Interface
OAM	Operation, Administration, and Maintenance
OCN	Open Computer Network
ODU	Optical channel Data Unit
OIF	Optical Internetworking Forum
OSPF	Open Shortest Path First
OSS	Operation Support System
OTN	Optical Transport Network
OTP	Optical Transport Platform
OXC	Optical Cross-Connect
P-OPT	Packet Optical Transport Platform
P2MP	Point-to-Multi-Point
P2P	Point-to-Point
PBB	Provider Backbone Bridge
PC	Permanent Connection
PCF	Packet Control Function
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PE	Provider Edge
PHB	Per-Hop Behavior

PHP	Penultimate Hop Popping
POS	Packet over SDH/SONET
POT	Packet Optical Transport
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTN	Packet Transport Network
PTS	Packet Transport System
PW	Pseudo Wire
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RDI	Remote Defect Indication
RFC	Request for Comments
ROADM	Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexor
RSVP-TP	Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering
SC	Switched Connection
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SNC	Service Node Core
SNE	Service Node Edge
SNMP	Simple Network Management Protocol
SON	Self Organized Network
SONET	Synchronous Optical Network
SPC	Soft Permanent Connection
SSH	Secure Shell
STM	Synchronous Transfer Mode
T-MPLS	Transport Multi-Protocol Label Switching
TDM	Time Division Multiplexing
TE	Traffic Engineering
TI	Telecom Italia
TMC	T-MPLS Channel
TMP	T-MPLS Path
TN	Transport Node
TTL	Time-To-Live
ULH	Ultra Long Haul
UNI	User to Network Interface
UNI-C	User to Network Interface for Client side
UNI-N	User to Network Interface for Network side
VC	Virtual Container
VLAN	Virtual Local Area Network
VPLS	Virtual Private LAN Service
VPN	Virtual Private Network
VPWS	Virtual Private WAN Service
VRF	Virtual Routing and Forwarding
VSI	Virtual Switching Instance
VZ	Verizon
WAN	Wide Area Network
WSS	Wavelength Selective Switch