

■5 群 (通信・放送) - 5 編 (フォトニックネットワーク)

1 章 ネットワークアーキテクチャ

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 1-1 光パスネットワーク
- 1-2 光アクセスネットワーク
- 1-3 光パケットネットワーク
- 1-4 光バーストネットワーク

■5 群-5 編-1 章

1-1 光パスネットワーク

(執筆著者：妹尾尚一郎) [2011年3月 受領]

1-1-1 光パスの概念

長距離かつ高速な光伝送技術の進展により、1本の光ファイバ上に複数の波長を多重化する波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) が実用化されたことから、局と局との間の伝送路 (以下、リンクと呼ぶ) に閉じていた波長を光伝送の単位とし、1つ以上の局を経由して設定されるパスとして運用するネットワーク、すなわち光パスネットワークが提唱された。

光パスネットワークでは、光ファイバや局の配置を前提に、複数のリンクにまたがる波長の連続性、光伝送の劣化要因がもたらす制約条件、光パスの高信頼化のための冗長化などを考慮し、局間のトラヒック需要に応じて光パスを設計する。設計した光パスを光パスネットワークのノード装置である OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) や WXC (Wavelength Cross Connect) へ設定し、ネットワーク監視システムから運用・監視を行う。

更に、IP ネットワーク上のトラヒックの急速な増大へ迅速に対処し、またトラヒック変動に応じて局間の光パスの本数を増減させるため、動的な光パス設定を可能にする制御プロトコルが 2000 年代初めより研究開発されている (2 章を参照)。

光パスネットワークを可能とした光伝送技術・光デバイス技術には、光アンプによる波長多重伝送技術、波長の多重化 (Multiplexing) 及び逆多重化 (Demultiplexing) を行う AWG (Arrayed Waveguide Grating) 及び波長選択スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch), MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) による光スイッチなどの光デバイス技術などがあるが、本節では立ち入らない。

光パスが適用される長距離ネットワークは、規模や敷設される地域によりいくつかに分類され、例えば次のような分け方がある。

- ・メトロネットワーク
- ・長距離ネットワーク (あるいはコアネットワーク)
- ・海底ケーブルネットワーク

1-1-2 光パスネットワークのトポロジー

局間を結ぶ光パスネットワークのトポロジーは、リニア、リング、メッシュに分類される (図 1-1)。

従来の光パスネットワークはリニアないしリングが主であったが、1-1-5 節に詳述するノード装置の進歩により、メッシュトポロジーが可能となってきた。また複数のリングを接続した階層化リングというトポロジーもあり、リング型の光パスネットワークを結ぶことで光パスの長延化を可能とする。

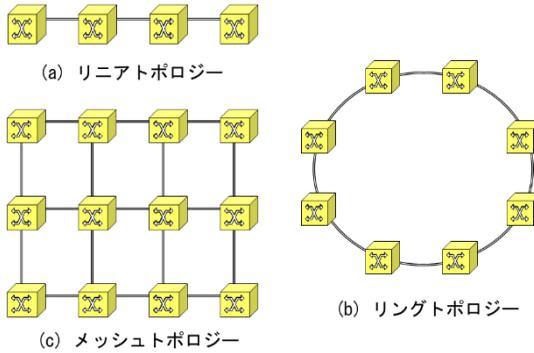


図 1・1 光パスネットワークのトポロジー

1-1-3 経路・波長割当て (RWA : Route and Wavelength Assignment)

光パスネットワークにおいては、光のままでは波長を変えることができるデバイスが実用化されていないことより、一つの光パスの全長にわたって波長が変わってはならないという制約を設けており、これを波長連続性 (Wavelength Continuity) と呼ぶ。また、1本の光ファイバ上で伝送可能な波長数の制限もある。一般に長距離の光伝送では ITU-T 勧告 G.694.1²⁾ において高密度波長分割多重 (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) 向けに規定された波長グリッドが用いられるが、波長間隔が 100 GHz の波長グリッドを C 帯 (1530~1565 nm) に適用すると、波長数は 45 本となる。これらの制約条件のもとで、トラフィック需要に対して最も効率的な光パスの経路と波長の割当てを決定することを RWA (Route and Wavelength Assignment) と呼ぶ。

RWA の解法としては、Dijkstra アルゴリズムなどを適用した制約付き最短経路問題としての定式化や、与えられたトラフィック行列に対して光パスの距離の総和などの目的関数を最小とする経路・波長割当てを求める最適化問題としての定式化があるが、後者は NP-Complete であることが知られており、ヒューリスティックな解法が研究されている。

1-1-4 光信号の劣化要因

長距離にわたって高速に光信号を伝送する場合、光伝送の特性から生じる様々な劣化要因 (Impairment) がある。主要な劣化要因には波長分散 (Chromatic Dispersion)、PMD (Polarization Mode Dispersion)、OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) が、また非線形の劣化要因として、SPM (Self-Phase Modulation)、FWM (Four-Wave Mixing) がある。

光パスネットワークの設計において、これらの劣化要因をも考慮した光パスの経路・波長割当てを、Impairment-Aware RWA と呼ぶ。

光信号の劣化を克服するため、波長分散に対してはこれを補償する分散補償ファイバが用いられる。更に、光パスの中途に 1R、2R、3R に分類される再生中継手段が挿入される。

1R (Reamplification)

2R (Reamplification and Reshaping)

3R (Reamplification, Reshaping and Retiming)

1R としては、波長多重された光信号を一括して増幅できる光アンプ (Optical Amplifier) が使用されている。3R には、光信号をいったん電気に戻して中継する OEO 再生中継器 (Repeater) が用いられるが、波長ごとに中継器を要する。

Impairment-Aware RWA に関連して、光パス設計時に上記の再生中継手段を最適に配置する課題も研究されている。

1-1-5 光パスネットワークのノード装置

光パスネットワークのノード装置は、その主要な機能に従って OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) と WXC (Wavelength Cross Connect) に分類される。

OADM は波長単位で光パスを終端 (Add/Drop)、あるいは中継 (Cut-through) するための装置であり、クライアント側インタフェースからの信号を局間インタフェース向け信号へ変換するトランスポンダ部と、局間インタフェースの 1 対のファイバに対して受信側では波長を逆多重化 (demultiplex) し送信側では多重化 (multiplex) する波長多重分離部、そして監視制御部からなる。図 1・2 に代表的な構成を示す。

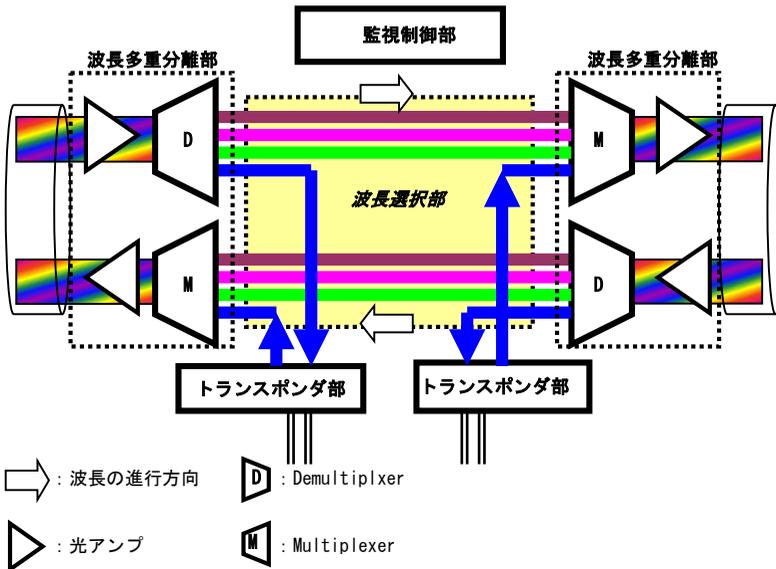


図 1・2 OADM (ROADM) の構成

図の上半分では、左から入って右方向へ進行する各波長を色分けして示しており、多重化された波長が左側の Demultiplexer にて個別の波長に分けられ、中継 (Cut-through) 波長は右側の Multiplexer へと入力され、本装置にて終端される波長は分岐 (Drop) されてトランスポンダ部へ入力されている。更に、Multiplexer へは本装置にて挿入 (Add) される波長もトランスポンダ部から入力される。一方、図の下半分には逆方向へ進行する各波長が示され、同様に波長の

中継・分岐・挿入が行われている。

OADM において、波長多重分離部とトランスポンダ部との間の波長の接続を、光パッチパネルを介して手で切り替えるものを Fixed OADM と呼ぶ。一方、波長多重分離部とトランスポンダ部との間に監視制御部から制御可能な波長選択部を持ち、光パスを終端するか中継するかを動的に変更できるものを ROADM (Reconfigurable OADM) と呼ぶ。図 1・2 における点線のブロックが波長選択部を示している。波長選択部を実現するには、波長ごとの 1×2 光スイッチアレイや波長選択スイッチ (WSS) が用いられる。

図 1・2 に示した OADM 及び ROADM を直列に接続することでリアトポロジーの光パスネットワークが、円周上に接続することでリングトポロジーの光パスネットワークが構築できるが、方路 (degree) が 2 つに限られるため、他のトポロジーは構築できない。最近では、波長選択スイッチ (WSS) あるいは MEMS 型光スイッチを内蔵することで、3 つ以上の方路を収容してそれらの中で光パスを中継できる Multi-degree ROADM と呼ばれるノード装置が開発され、メッシュトポロジーの光パスネットワークの構築を可能にしている。

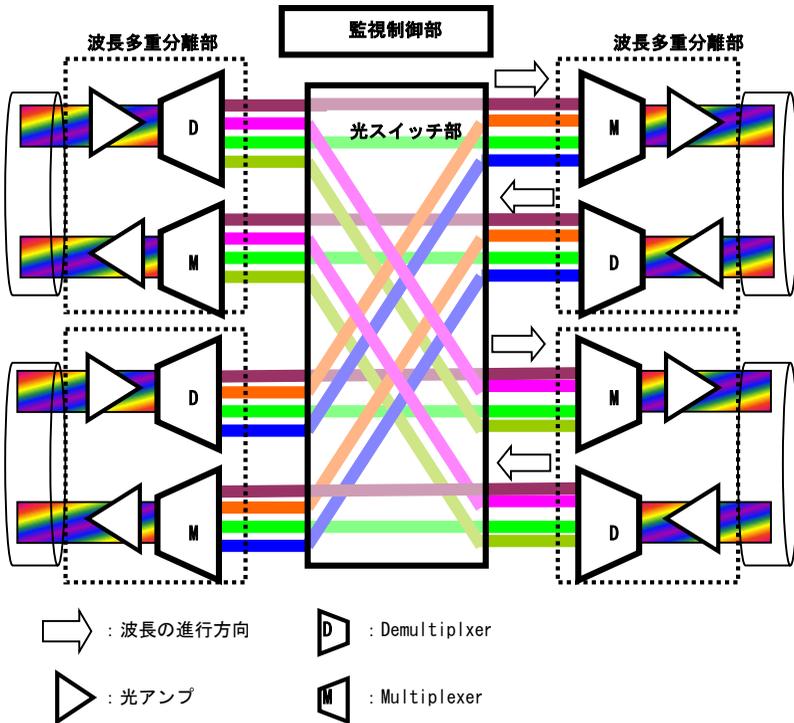


図 1・3 WXC の構成

WXC は波長単位で光パスを交換するための装置であり、OADM と同様の波長多重分離部と、波長を局間インタフェース間で交換する光スイッチ部、そして監視制御部からなる。図 1・3 に

4 方路の WXC の構成例を示す。WXC とほぼ同じ意味で、全光型光クロスコネクタ (All-Optical Cross Connect) あるいはフォトニッククロスコネクタ (Photonic Cross Connect : PXC) という言葉が使われる場合もある。

1-1-6 光パスの監視

光パスの監視は、ITU-T により OTN (Optical Transport Network)³⁾ として規定された光ネットワークアーキテクチャが基本になる。OTN においては、波長多重された光信号を下記のレイヤに分けて定義するとともに、光信号の伝送速度やフォーマット、オーバーヘッドを用いた監視方法を規定している。

OMS : Optical Multiplexing Section (光多重セクション)

OTS : Optical Transmission Section (光伝送セクション)

OCh : Optical Channel (光チャネル)

OMS はノード装置間のリンクに相当し、波長多重信号が分岐や挿入なしに伝送される区間を表す。OTS は波長多重信号が IR 中継なしに伝送される区間を表す。OCh は光パスに相当する。

ノード装置間で波長多重信号を一括して監視するため、OSC (Optical Supervisor Channel) が定義されており、各レイヤにおける警報の転送などに用いられる。

1-1-7 光パスの高信頼化

リングトポロジー及びメッシュトポロジーでは光パスの経路に冗長性を持たせることが可能であるため、ノード装置自体やノード装置間のリンクに障害が生じたときに光パスの経路を切り替えてデータの転送を維持する高信頼化手法が用いられる。

(1) プロテクション (Protection)

光パスを終端するノード装置間で、あらかじめ複数の経路で光パスを設定しておき、障害発生時に切り替える高信頼化の手法。更に次の分類がある。

(a) 1+1 プロテクション (1+1 Protection)

光パスを終端するノード装置間にて、あらかじめ設定した 2 本の経路にて同一のデータを転送し、受信端のノード装置にていずれの経路から信号を受信するかを切り替える方式 (図 1・4(a))。ノード装置間で切替えのための制御信号をやり取りする必要がないが、波長の利用効率は 50% に留まる。

(b) 1:1 プロテクション (1:1 Protection)

光パスを終端するノード装置間にて、あらかじめ 2 本の経路を設定し、通常は現用経路にてデータを転送し、現用経路において障害を検出した場合はデータを転送する経路を予備経路へ切り替える方式 (図 1・4(b))。切替えに際し、ノード装置間で切替えのための制御信号をやり取りする必要がある一方、予備経路を優先度の低いデータの転送に用いる (Extra Traffic と呼ぶ) ことで、波長の利用効率を上げることができる。1:1 プロテクションの拡張として、 N 本の現用経路を M 本の予備経路で保護する $M:N$ プロテクション ($M:N$ Protection) や、異なる光パスの間で予備経路を部分的に共用する Shared Mesh Protection (図 1・4(c)) がある。

(2) リストレーション (Restoration)

光パスを終端するノード装置間で、いったん設定した光パスに障害が発生したときに、新た

な経路を探索して光パスを設定し直す高信頼化の手法. 動的に光パスを設定する機能が必要であり, そのためのプロトコルが GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) において標準化されている.

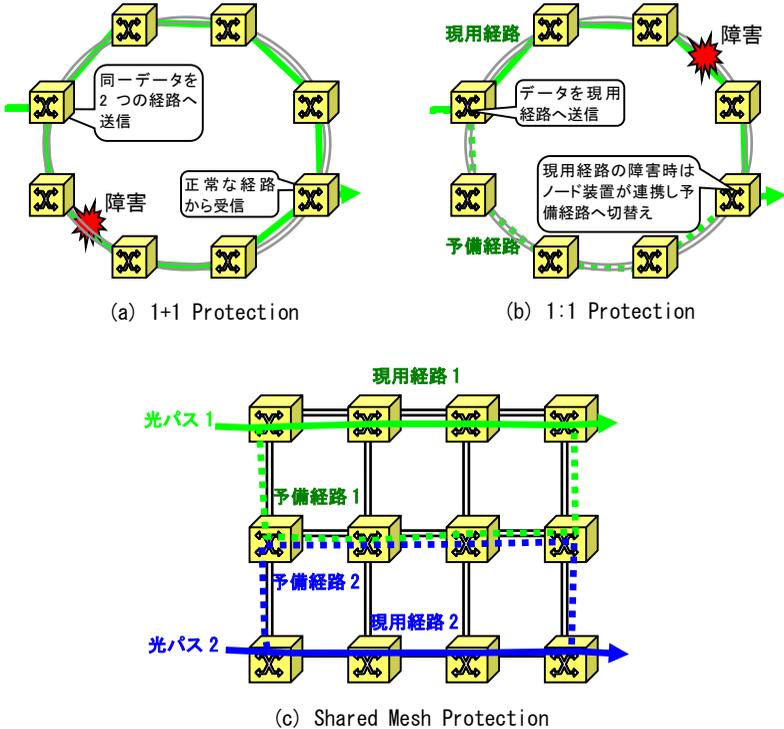


図 1.4 プロテクションの分類

プロテクションによる光パスの高信頼化を可能にするには, あらかじめ設定しておく複数の経路が, 単一障害点 (Single Point of Failure) によって同時に不通にならないことが必要である. 光パスの経路・波長割当てはノード間のリンクと波長に基づくが, リンクが異なっても実際には管路を共有する場合もあり, 経由するリンクとノード装置がすべて異なる2つの経路が同時に不通にならないという保証はない.

そこで, この問題を解決するために SRLG (Shared Risk Link Group) という概念が提唱された. SRLG は, 単一の障害により同時に不通となる可能性のあるリンクをグループ化して識別子を与えたものである. プロテクションのため複数の経路を割り当てる際, 異なる SRLG を持つ経路を選択することで, 単一の障害への耐障害性が得られる.

■参考文献

- 1) 佐藤健一, 岡本聡: “オプティカルパスレイヤ技術の展開,” 1992 信学秋季全大, SB-7-1, March 1992.

- 2) ITU-T : “Recommendation G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” ITU-T, 2002.
- 3) ITU-T : “Recommendation G.872, Architecture of optical transport networks,” ITU-T, 2001
- 4) “ROADMs: Components, Systems, and Networks,” the Ninth International Workshop on Optical Networking Technologies (IWONT), Globecom 2008, New Orleans, LA, USA, 2008.

■5 群-5 編-1 章

1-2 光アクセスネットワーク

(執筆者：小崎成治) [2011年3月 受領]

光アクセスネットワークはその名のとおりに、光ファイバを伝送媒体とし、その高速広帯域性を活かした伝送技術、制御技術などを適用した加入者収容装置及びシステムによって構成されるネットワークである。光アクセスネットワークは加入者の種別や光ファイバの引込み個所の違いによって、FTTH (Fiber to the Home)、FTTB (Fiber to the Building/Business)、FTTC (Fiber to the Curb) など、幾つかの呼称があり総じて FTTx と呼ぶ。光アクセスネットワークは異なる個所に点在する多数の加入者を収容することから、基本的な要求条件として、構成する装置が小型・低コストであり、また消費電力や保守費用のような運用コストも安価に実現する方式や技術の適用が求められる。

本節では上記を背景とし、光アクセスネットワークのトポロジーとアクセス方式、システムの構成、主要な技術について述べ、更には地理的・分野的・サービスの適用範囲を広げるために必要となる技術を概説する。

1-2-1 ネットワークトポロジー

光アクセスネットワークのトポロジーとしては、局側装置 (OLT : Optical Line Terminal) と加入者側装置 (ONU : Optical Network Unit) を 1 対 1 に接続する Point-to-Point 型 (図 2・1) と、1 対多で接続する Point-to-Multi-point 型 (図 2・2) がある。一般に局側装置は 1 個所に複数のインタフェースを集約しており、加入者宅は収容局周辺に点在することからネットワークの形状はスター型になるため、Point-to-Point 型を Single Star (SS) タイプ、Point-to-Multi-point 型を Double Star (DS) タイプとも呼ぶ。DS タイプは 2 段目の分岐点にスイッチや終端回路などの

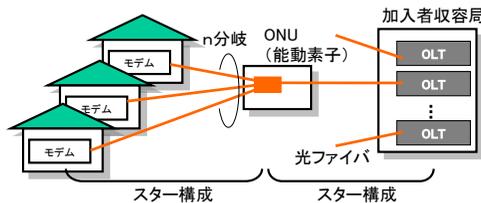


図 2・1 Point-to-Point (SS) 型ネットワーク構成

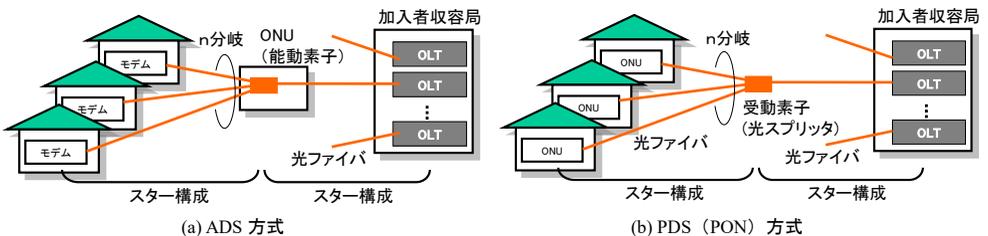


図 2・2 Point-to-Multi-point 型

能動素子を用いる ADS (Active Double Star) と、光スプリッタなどの受動素子を用いる PDS (Passive Double Star) の 2 種類があるが、近年では PDS を PON (Passive Optical Network) と呼ぶことが一般的である。

1-2-2 光アクセス方式と多重伝送方式

光アクセス方式としては、伝送フォーマットや伝送速度によって幾つかの種類に分かれるが、実際には、用途や適用時の成熟技術によって方式が決まってきた経緯がある。表 2・1 に各種の光アクセス方式についてまとめる。Point-to-Point 型の MC (Media Converter) 方式は局側装置から加入者までをシンプルに 1 対 1 で光接続する方式である。一方、Point-to-Multi-point 型では、幾つかの PON 方式が開発されている。STM-PON (Synchronous Transfer Mode Based PON) は双方向通信に TCM (Time Compression Multiplexing) 技術を用いた方式であり、電話や ISDN の収容を目的とした。ATM-PON (Asynchronous Transfer Mode Based PON), B-PON (Broadband PON), G-PON (Gigabit Class PON), NG-PON (Next Generation PON) は ITU-T にて標準化されており、転送フレームとして ATM セルや GTC (G-PON Transmission Convergence), GEM (G-PON Encapsulation Method) フレームを用いる。Ethernet PON はその名のとおりに Ethernet フレーム

表 2・1 各種の光アクセス方式

種別	方式	多重方法*	伝送速度 [bps]	用途
Point-to-Point (SS)	MC (Media Converter)	—	125 M, 1.25 G, 10 G	主にデータ通信
Point-to-Multi-point (PON)	STM-PON	TCM	25 M	電話, ISDN
	ATM-PON, B-PON, G-PON, NG-PON	WDM	156 M, 622 M, 1.24 G, 2.5 G, 10 G	マルチメディア
	Ethernet PON (GE-PON, 10G-EPON)	WDM	1.25 G, 10 G	データ通信→マルチメディア

* : 上り下り伝送の多重方法

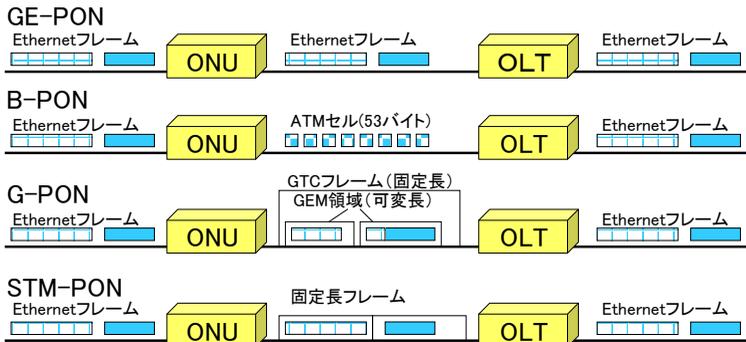


図 2・3 各種 PON 方式の転送フォーマット

を転送フォーマットとして用いる方式であり、IEEE を中心に標準化されている。図 2・3 に各 PON 方式における Ethernet フレームの転送フォーマットを示す。

アクセス技術はインターネットを中心としたサービス帯域の増加とデバイス技術・制御技術の進展によって、アクセスネットワーク・システムの高速化を支えてきた。表 2・1 に示した各種のアクセス方式では、いずれも上り・下りそれぞれの伝送信号は TDM (Time Division Multiplexing) 技術を用いて多重化されている。これは冒頭に述べた基本的な要求条件である「低コスト」を実現するための最適解となっており、2009 年に標準化された 10 G-EPON (10Gigabit Ethernet PON) など、10 Gbps クラスの PON 方式まで、TDM 技術をベースに光アクセス技術は進展してきている。しかし、10 G 超級を実現するアクセス方式に関しては、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術や OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技術、CDM (Code Division Multiplexing) 技術の適用や TDM 技術との融合形態による高速化が検討されている。

また、今後は高速化だけでなく、収容サービスや適用領域の拡大に向けた高機能化の技術の進展が想定される。

1-2-3 光アクセスシステムの構成

光アクセスネットワークを構成する要素は、伝送媒体である光ファイバ（方式によっては光スプリッタを含む）と局側装置（OLT : Optical Line Terminal）及び加入者側装置（ONU : Optical Network Unit）からなる。図 2・4 に光アクセスシステムを実現する方式として最も普及している GE-PON (Gigabit Ethernet PON) のプロトコルスタックを示す。実際の OLT/ONU 装置には図 2・4 に示す上位レイヤ機能として、セキュリティ（暗号）・認証・優先制御・VLAN (Virtual LAN) 制御などが実装され、サービスを提供するアクセスシステムを構成する。

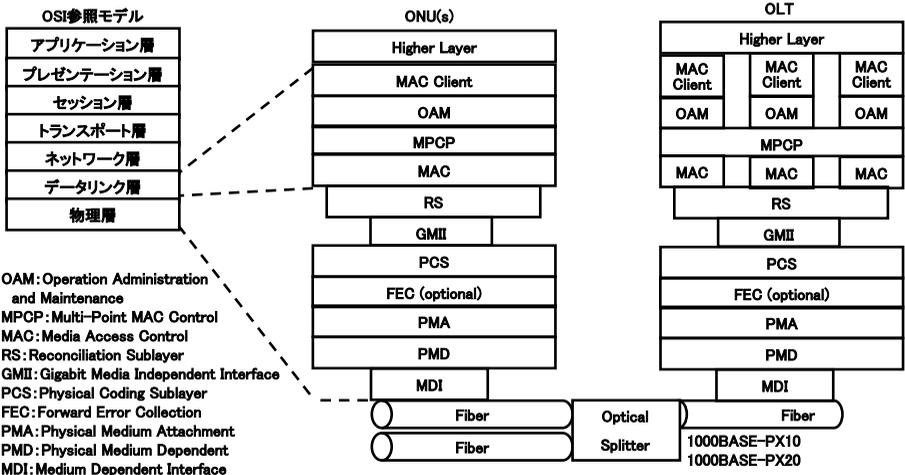


図 2・4 GE-PON のプロトコルスタック

1-2-4 光アクセスネットワークを支える技術

光アクセスネットワークを構成するシステム・装置には様々な分野の技術が適用されているが、特に PON システムを実現する技術については、他のアクセス方式に用いられる技術をほぼ包含している。したがって、本項においては、PON の主要技術を中心に説明する。

図 2・5 は PON システムとその主要技術である、バースト伝送・同期技術、アクセス制御技術及び帯域制御技術について示している。以下、それぞれの技術について説明する。

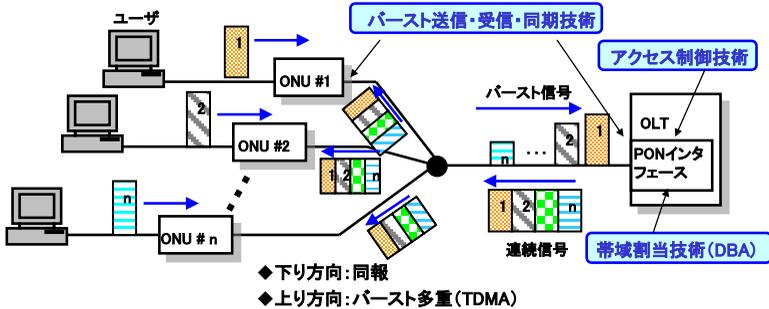


図 2・5 PON システムと主要技術

(1) バースト伝送・同期技術

PON システムは上り方向に TDMA (Time Division Multiplexing Access) 技術を用いるため、各 ONU からの上りデータはバースト信号となって伝送される。図 2・6 に PON の上りバーストデータフォーマットを示す。図 2・6 におけるバースト起動・同期・停止の各時間の合計をバーストオーバーヘッドと呼ぶが、このオーバーヘッドを如何に小さくするかが、上り方向の伝送帯域の効率を左右する。IEEE や ITU-T ではこれらのパラメータを一定値以下とするように規定している。このうちバースト起動・停止時間は ONU における光送信器の発光・停止制御の高速化により、バースト同期時間は OLT における光受信器の応答やビット識別回路の同期引込み動作の高速化によって、それぞれ短縮することが可能となる。

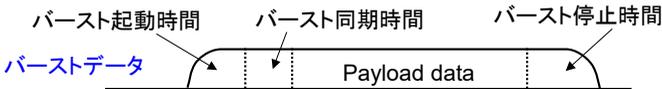


図 2・6 PON の上りバーストデータフォーマット

(2) アクセス制御技術

各 ONU から OLT に向かう上りデータ同士が光スプリッタで合流する際に衝突しないよう、OLT は各 ONU における出力タイミングを指示し、各 ONU は OLT からの指示に従ってデータを送信する。図 2・7 に GE-PON のアクセス制御に用いられている MPCP (Multi-Point-Control-Protocol) のタイミング制御について示す。GE-PON の OLT は図 2・7 に示す方法にて各 ONU に対する RTT (Round Trip Time) を把握したうえで、各 ONU に対する送信許可信号 (Gate 信号)

を送出する。Gate 信号には上り方向のバースト送信開始時刻及びバースト送信時間が含まれており、各 ONU はこの情報に従って上りバースト信号を送出する。OLT は受信予定時刻から RTT 分の時間を減じることで、各 ONU の送信開始時刻をスケジューリングすることが可能となる。

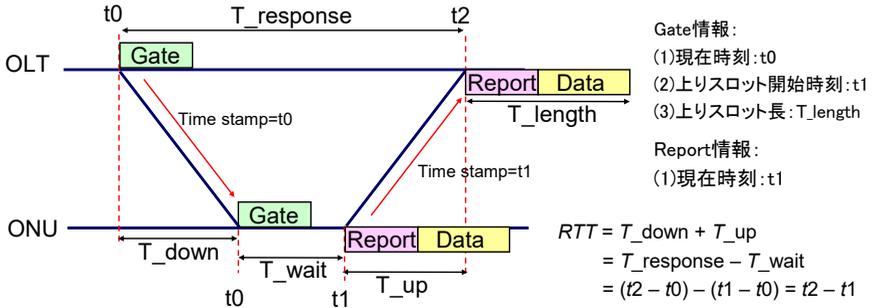


図 2・7 GE-PON のアクセス制御 (MPCP) に用いられるタイミング制御方式

(3) 帯域制御技術

上記(2)のアクセス制御技術によって、OLT は各 ONU に対して上り方向の送信制御を実現できるが、伝送帯域を有効に使用するためには、加入者の契約などによってその割当て量を制御することが必要となる。特に、各 ONU 配下の加入者端末からのトラフィック状態に応じて、各 ONU への割当て量を動的に変化させる、動的帯域割当て (DBA: Dynamic Bandwidth Allocation) 技術が重要である。図 2・8 に PON における帯域割当て方式について示す。

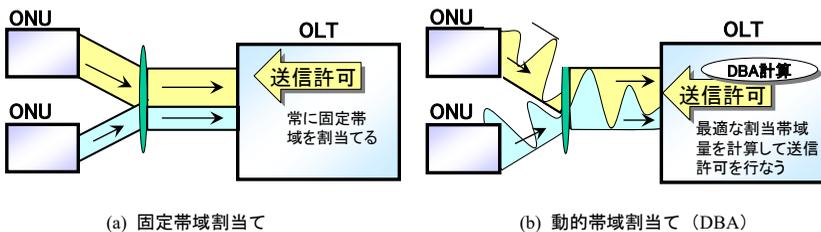


図 2・8 帯域制御技術

上記(1), (2), (3)は PON の主要技術であるが、適用領域を広げるための拡張機能や技術も多く存在する。例えば、①ビットレート異なる ONU を同一ファイバ上に收容するために下りを WDM, 上りを異速度 TDMA とする多重化技術, ②未使用時の ONU を停止させて電力消費量を低減するパワーセーブ技術, ③ビジネス用途など高信頼性が必要なケースに使用する冗長切替え技術, ④PON の同報性を活かしたマルチキャスト技術などがある。

今後はサービス、ユーザの多様化がますます進み、高速化に加えて上記のような光アクセス技術の展開が期待される。

■参考文献

- 1) 坪川 信：“光アクセスネットワーク技術,” 電子情報通信学会誌, vol.91, pp.669-705, 2008.8.
- 2) 葉玉久哉：“ブロードバンドサービスのさらなる発展を目指す光アクセスシステムの動向,” NTT 技術ジャーナル, pp.53-56, 2010.2.
- 3) IEEE 802.3, 2008.
- 4) ITU-T G.983, G.984

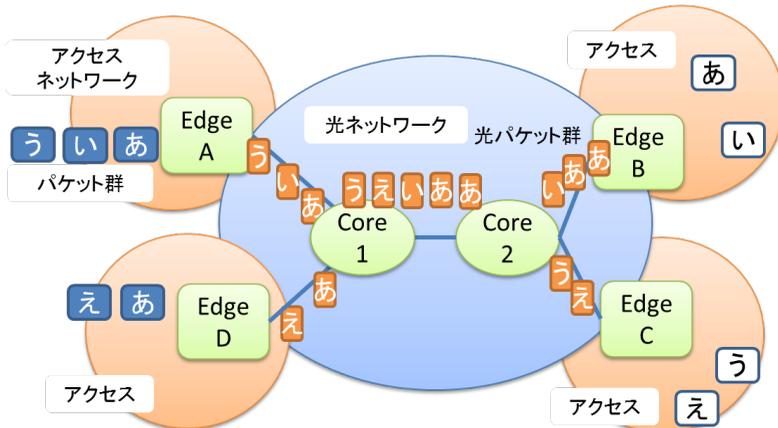
■5 群-5 編-1 章

1-3 光パケットネットワーク

(執筆著：原井洋明) [2015年5月受領]

光パケットネットワークとは、光ネットワークとそのアクセスネットワークからなるネットワークにおいて、アクセスネットワークから光ネットワークのエッジノードへ到着したパケットを「光パケット」に変換し、中継ノードで光パケットのデータ部分を電気信号に変換せず光交換し、出口のエッジノードで光パケットを電気信号のパケットに変換する光ネットワークである。アクセスネットワークのエンド端末から送出されたパケット1つにつき光パケットが1つ生成される。図3・1にその概要図を示す。

光パケットネットワークは、1990年代にはATMネットワークを光化する目的で、21世紀以降は、IPネットワークやデータセンタ内ネットワークを光化する目的で研究開発が行われている。電子処理を大幅に減らす光パケットネットワークにより、高速化とICTのエネルギー効率化を両立することができる。電子処理を用いて成熟したルータはICT機器の消費電力全体の14%を占めるといわれ、エネルギー効率化の影響は大きい。



エッジノード（ここでは A, D）ではアクセスネットワークから到着するパケットがそれぞれ光パケットに変換される。中継光ノード（コア 1, 2）は光パケットを適切な方路に交換する。光の終端ノード（エッジ B, C）は光パケットを再びパケットに変換し、受信ホストに向けて送出する。

図 3・1 光パケットネットワーク

1-3-1 ネットワークアーキテクチャ

インターネットに光パケットネットワークを敷設することを前提として、先の図3・1を用いて説明する。光コアノードでは、光パケットが光スイッチで交換される。その際のヘッダ処理において、IPの情報に基づいて宛先検索処理を行えば、光パケットスイッチはレイヤ3スイッチあるいはルータである。光ネットワークはレイヤ3の外部電気ネットワークと同じ経路制御（OSPFやBGP、SDNなど）で動作させることができる。一方、制御技術の制約、例えば、短

ビット数の検索しかできない、一部の宛先しか処理ができない、があれば、外部電気ネットワークとは別に光ネットワーク内で閉域のドメインが作られる。外部からみれば、光ネットワークは大きな1つのルータとして扱われる。

図3・1の光エッジノードで、電気パケットが光パケットに変換される。光パケットスイッチがレイヤ3スイッチやルータの場合には光パケットのヘッダにIPアドレスと論理上同じ(変調方式など物理信号の同一性は問わない)宛先アドレスを含め、IPパケットを光パケットにカプセル化し、光パケットを光ネットワークへ流す。そうでない場合は、光ネットワーク内部で固有の宛先アドレスあるいはラベルを定義し、それを付与したヘッダとともに、IPパケットを光パケットにカプセル化し、光パケットを光ネットワークへ流す。

1-3-2 ノード装置：OPS

最初に光パケット交換装置(OPS: Optical Packet Switch)の機能を、電子処理するパケット交換装置(EPS: Electronic Packet Switch)と比較して説明する。図3・2、図3・3に示すように、パケットは、スイッチとバッファを通過する。

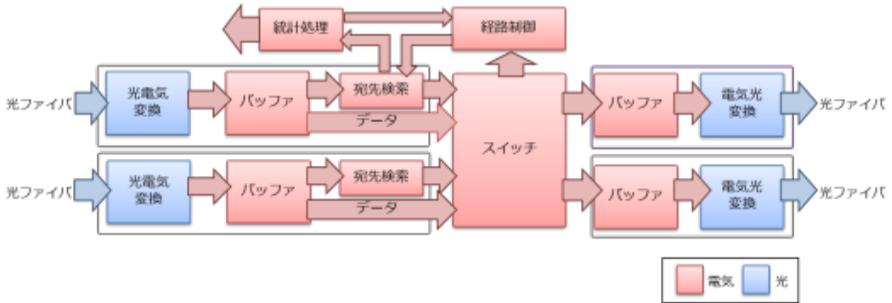


図3・2 EPSの内部構造概略

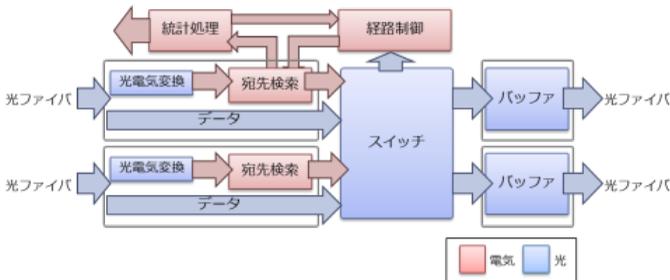


図3・3 OPSの内部構造概略

OPSとEPSはそれが光か電気かの違いで区別できる。EPSの場合は、到着したパケットは光電変換の後に一旦バッファに格納される(ストアアンドフォワード型)。その後、宛先検索やスイッチが施され、再びバッファへパケットが格納され、再び光信号に変換されて光ネットワー

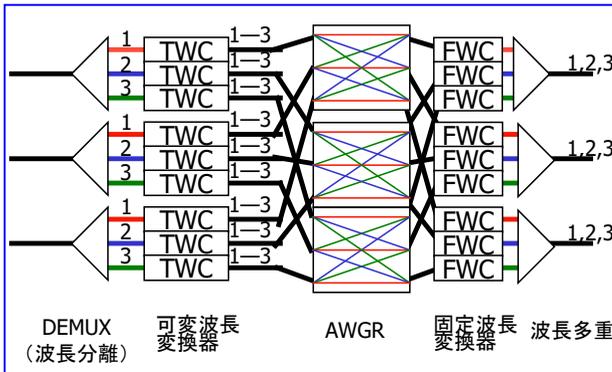
クへ出力される。バッファやスイッチの動作速度の制約から、電気信号は低速のバス（複数信号）で処理される。

OPS では、光パケットは光電変換されずに、光スイッチと光バッファを通過して再び光ネットワークへ出力される。OPS では、光スイッチの前にバッファがないので、到着したパケットを、パケットの到着間隔以下の時間で処理するという厳しい制約がある。逆に、光電変換やメモリへの格納をしないので、光信号を低速の信号に変更せずとも、高速で広帯域の光スイッチが可能となる。光パケットが OPS へ到着し出力されるまでの時間は EPS と比べて短くなる傾向にある。昨今の EPS の最短パケット滞留時間が数マイクロ秒であるのに対し、OPS では 1 マイクロ秒に満たない時間で処理される。

なお、EPS、OPS とも宛先検索や経路制御、統計処理などの機能は一緒に、電子処理によって実現される。

スイッチングとバッファリングは、従来から、光システムによる実装技術が研究されている。パケット交換において、中継ノードでパケットのペイロードへのアクセスとそのために施されるシリアルパラレル信号変換は不要で、ペイロードを高速にするほど光システムの利点を享受できるからである。OPS 用光スイッチの代表的な構成例を以下に示す（詳しくは参考文献 1)）。

- 光空間スイッチにより方路を切り替える方法²⁾。
- 光プラと光ゲート (ON/OFF) スwitch による構成³⁾。各入力ポートの信号を N 分岐し、それぞれに光ゲートを配置する。
- 波長変換と AWGR (Arrayed Waveguide Grating Router, 周回型アレイ型導波路) による構成 (図 3・4)⁴⁾。



数字は波長の識別子を示す。出力波長可変波長変換器 (TWC) で所望の出力ポートに向かう波長に変換し、AWGR を通過。出力での衝突回避のために出力波長固定波長変換器 (FWC) で波長変換。

図 3・4 3ポート3波長多重のスイッチ構成（バッファなし）

一方、オール電子処理のパケットルータでは、ペイロードが高速なほど内部バスの高速化やメモリアクセス速度の向上などのためにコストがかさむ。

宛先検索は、インターネットのデータ転送を担うルータにおける処理と同様、OPSへ到着する光パケットをどこに転送したらよいかを決めるために使われる機能である。より具体的には、光パケットの宛先アドレスと OPS 内の経路表を照合してパケットの出口を決めるための処理を指す。宛先検索には、宛先を、経路表を含むメモリと照合する従来型の電子処理による方法が多く取り入れられている。例えば参考文献 5) では、TCAM 互換の低消費電力 eDRAM 検索エンジンを用いた光パケットヘッダの最長一致検索を可能にし、電子処理による消費電力の増加を抑えている。

更に、宛先検索を瞬時にする光システムが開発されている⁹⁾。このシステムでは光信号が進行するだけで方路検索が済むので 1 処理の時間は短い。複数ラベルの単一光システム処理も可能になっている⁷⁾。

以下、最近の国内の動向を述べる。

- NTT フォトニクス研究所は、光処理の高速性と電子処理の機能性を活かした光電子融合型光パケットルータを開発している⁸⁾。光ラベル処理器、光スイッチ、共有バッファから構成される。ラベル処理は、主に、光ラベルと電気信号のシリアル/パラレル変換を行う光クロックトランジスタアレイと、CMOS 回路により実現される。CMOS 回路にて、光ラベルと経路表を参照し、光パケットの出力ポートを決定する。光スイッチは、パーストモードレシーバ、二重リング共振器型波長可変レーザ、LN 変調器を用いた波長変換器に、AWGR を組み合わせた構成になっている。共有バッファでは、光パケットのペイロードに対してシリアル-パラレル変換を行い、CMOS-RAM に書き込む。開発されたプロトタイプは、8×8 のスイッチ規模であり、総スループットは 160 Gbit/s、消費電力は 360 W である。衝突のない場合、システム全体の遅延時間は 380 ns である。
- NICT は、2003 年に 10 Gbit/s の 1 波長 OOK 信号の光パケット交換に成功した後、OTDM や WDM、差動 4 値位相変調 (DQPSK) などの信号方式を用いて光交換するパケット速度の増加に成功し⁹⁾、2014 年に波長多重及び偏波多重と 16 QAM による伝送路当たりの速度が 12.8 Tbit/s、伝送距離 50 km で光バッファ付きの光パケット交換実験に成功している¹⁰⁾。光スイッチには LN 変調器や SOA 光スイッチ、PLZT などを用い、光空間スイッチや、光カブラと光ゲート (ON/OFF) スwitch による光スイッチを行う。また、NICT は、IP ネットワークと光パケットネットワークの融合を図り、IP パケットを 100 Gbit/s 光パケットに変換する装置の開発、及び、その光パケット交換に成功する¹¹⁾とともに、この光パケットネットワークを実環境で利用している¹²⁾。

■参考文献

- 1) 原井洋明：“光パケットルータ技術動向,” 電子情報通信学会誌, vol.90, no.1, pp.48-53, January 2007.
- 2) 池澤克哉, 他：“光パケットネットワーク要素技術の開発,” 信学技報 (PN2005-5), pp.25-30, Apr. 2005.
- 3) K. Habara, H. Sanjo, H. Nishizawa, Y. Yamada, S. Hino, I. Ogawa, and Y. Suzuki：“Large-capacity photonic packet switch prototype using wavelength routing techniques,” IEICE Transactions on Communications, vol.E83-B, pp.2304?2311, October 2000.
- 4) S.J.B. Yoo, F. Xue, Y. Bansal, J. Taylor, Z. Pan, J. Cao, M. Jeon, T. Nady, G. Goncher, K. Boyer, K. Okamoto, S. Kamei, and V. Akella：“High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for the next-generation Internet,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, no.9, pp.1041-1051, September 2003.
- 5) 原井洋明, 古川英昭, 黒田泰斗, 小山昌司：“16 ビット最長一致検索処理を用いた 100 Gbps 光パケット

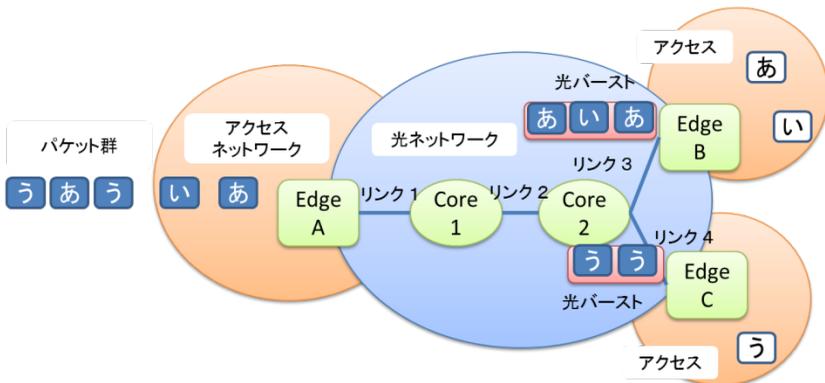
- 交換実験,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2013-261), pp.491-496, March 2014.
- 6) K. Kitayama and N. Wada : “Photonic IP routing,” IEEE Photonic Technology Letters, vol.11, no.12, pp.1689-1691, December 1999.
 - 7) N. Wada et al. : “Characterization of a full encoder/decoder in the AWG configuration for code-based photonic routers Part II: experiments and applications,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.24, pp.113-121, January 2006.
 - 8) R. Urata, T. Nakahara, H. Takenouchi, T. Segawa, H. Ishikawa, A. Ohki, H. Sugiyama, S. Nishihara, and R. Takahashi : “4x4 optical packet switching of asynchronous burst optical packets with a prototype, 4x4 label processing and switching sub-system,” Optics Express, vol.18, no.15, pp.15283-15288, July 2010.
 - 9) 和田尚也, 原井洋明, 古川英昭 : “光パケットスイッチング技術の最新動向,” 電子情報通信学会誌, vol.94, no.2, pp.100-105, February 2011.
 - 10) S. Shinada, J.D. Mendinueta, R. Luís, and N. Wada : “Operation of a 12.8 Tbit/s DWDM Polarization Division Multiplexing 16-QAM Optical Packet Switching Node after 50-km of Fiber Transmission,” ECOC 2014 Technical Digest (We.3.5.4), September 2014.
 - 11) H. Furukawa, H. Harai, T. Miyazawa, S. Shinada, W. Kawasaki, and N. Wada : “Development of Optical Packet and Circuit Integrated Ring Network Testbed,” Optics Express, vol.19, no.26, pp.B242-B250, December 2011.
 - 12) H. Harai, H. Furukawa, K. Fujikawa, T. Miyazawa, N. Wada : “Optical Packet and Circuit Integrated Networks and Software Defined Networking Extension,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.32, no.16, pp.2751-2759, August 15, 2014.

■5 群-5 編-1 章

1-4 光バーストネットワーク

(執筆者：原井洋明) [2015 年 5 月受領]

光バーストネットワークとは、光ネットワークとそのアクセスネットワークからなるネットワークにおいて、光ネットワークの入口で、アクセスネットワークから到着した複数のパケットをまとめ、一つの「光バースト」と呼ばれる束にし、光バーストを一つの単位とし光ネットワークの入口から出口まで光バーストを伝達する光ネットワークである。図 4・1 にその概要図を示す。光バーストネットワークは、1997 年にニューヨーク州立大学バッファロー校の Chunming Qiao らによりその構想が述べられた¹⁾。光バーストネットワークにおける交換方式は Optical Burst Switching (OBS) と呼ばれる。本節では光バーストネットワークのアーキテクチャとスイッチング方式に焦点を当てる。

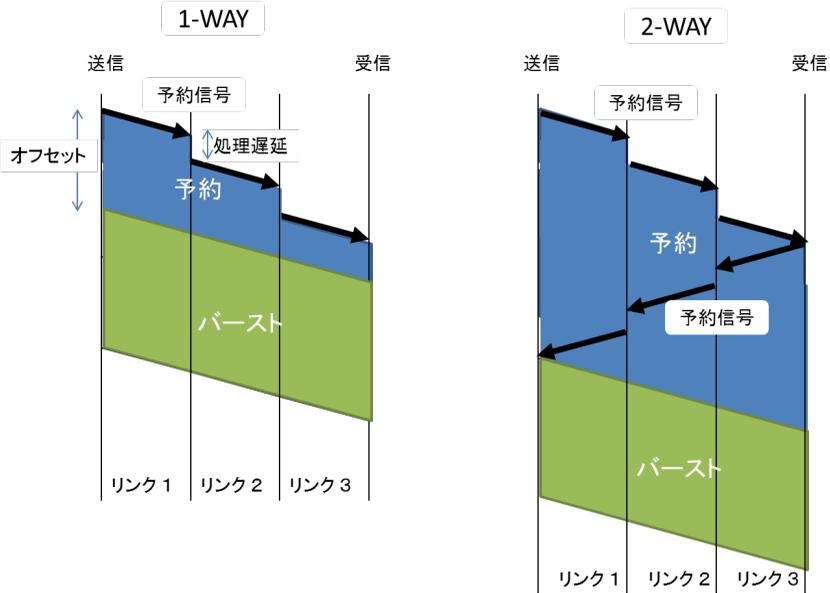


エッジノード（ここでは A）ではアクセスネットワークから到着するパケットを受信ノードが接続されるエッジノードごと（エッジ B、エッジ C）に振り分け、それぞれ複数のパケットから構成される光バーストを生成する。中継光ノード（コア 1、2）は光バーストを適切な方路に交換する。光の終端ノード（エッジ B、C）はパケットを取り出し、受信ホストに向けてパケットを一つずつ送出する。

図 4・1 光バーストネットワーク

1-4-1 ネットワークアーキテクチャ

光バーストネットワークは、先に述べた光バーストを伝達するために、複数のパケットの固まり（バースト）の伝達ごとに必要な光回線資源を確保する光ネットワークであり、当時は ATM (Asynchronous Transfer Mode) における ABT (ATM Block Transfer) /FRP (Fast Reservation Protocol) に例えられた。ABT には、ABT/IT (Immediate Transmission) モードと ABT/DT (Delayed Transmission) モードがあるが、光バーストネットワークでは、ABT/IT に着想を得た JET (Just Enough Time) プロトコルを代表例とする 1-way 方式と ABT/DT に着想を得た JIT (Just In Time) プロトコルを代表とする 2-way 方式が提唱されている¹⁾²⁾。図 4・2 に両者の違いをするため、光バーストネットワークの回線資源確保を例示する。



バーストを送出する前に送信ノードが予約信号を含めた制御信号を受信ノードに向けて送出する。各ノードでは回線の空きを確認し確保するとともに光スイッチを適切に設定する。これを経路上で繰り返して経路の全リンクで回線を確保する。送信ノードではあらかじめ定められたオフセット時間後にバーストを送出する。1-way は 2-way と比べ、バースト転送に実際に必要な時間に対して、占有時間（予約時間と転送時間の和）が非常に小さくなる。

図 4・2 光バーストネットワークの回線資源確保とバースト転送効率 (1-way と 2-way)

光バーストネットワークが画期的なのは、ABT-IT の単なる追従ではなく、光スイッチにメモリが備わっていないことを前提に制御メッセージとデータの送出時刻に差を設けたことにある。制御パケットの中に回線予約情報を入れ、予約がエンドツーエンドで完了する前に光バーストデータを送出する。すなわち、中継ノードで回線予約にかかる時間（処理遅延）を想定しながら、オフセットを定義し、制御パケットを送った後、オフセット時間経過後に、エンドノード（光エッジノード）がパケットを一つに束ねたバーストデータを送出するという 1-way モードを提唱したことである。その代表的な方式が JET である。

なお、光バーストネットワークには、従来の回線交換と同様に、エンドツーエンドに光パスを設定してから光バーストを送出するという 2-way モードもあるが、こちらは、設定解放時刻が明示されているか（光バースト）、明示されていないか（光パス）という違い以外に大きな差はない。JIT などがそれに当たる。

光バーストネットワークの特長を、光バスネットワークと光パケットネットワークとの比較により述べる。光バーストネットワークは光バスネットワークのように回線予約の確認を待たずにデータを送出する。したがって、エンドツーエンドの途中から帯域が不足して追加で帯域

が必要になったときなど、すばやい回線の確保が可能となる。また、回線の保留時間を最小限にでき、回線の有効利用ができる。図 4・2 には 1-way と光パストネットワーク (2-way) の違いを例証している。一方、光パケット交換と比べて、光スイッチへの要求性能を大幅に緩和できる。また、パケット交換で必須のバッファも光ネットワークの入口の電気バッファのみですむ。一方、光パケット交換では光バッファが必要である。したがって、技術的なハードルが低い。以上のように、光パストネットワークは、従来の光パストネットワークと光パケット交換ネットワークの弱点を補うことができるネットワークである。

日本では、2001 年から情報通信研究機構の委託研究プロジェクトにて、「光パストスイッチングを用いたフォトリックネットワーク技術の研究開発」が実施され、大規模光スイッチや、学習型波長選択方式、光ラベルによる高速制御方式などの成果を創出した。

1-4-2 ノード装置 : OBS

光パストネットワークのノード装置は、ネットワークの中継装置と送受信装置に分類できる。

光パストネットワークの中継装置である光パストスイッチ Optical Burst Switch (OBS) は、光パストを交換する光スイッチと、そのスイッチのインターコネクションを決めるための制御部からなる。パストの単位 (占有時間) が必要な光スイッチを決める。回線速度が 10 Gbps であれば、イーサネットの MTU である 1500 バイトは、1.2 マイクロ秒である。例えば、一度に 100 フレーム分のデータ転送を行うとし、回線を効率良く利用するとすれば、120 マイクロ秒に対して 1 マイクロ秒オーダーの程度の切替え時間でスイッチできる光スイッチが必要となる。光パストネットワークの制御はアウトオブバンド型であることは先に述べたが、回線確保を確認せずに送信装置が光パスト転送を始める 1-way 型であることも述べた。それゆえ、制御遅延を減らすためには、光パスト部と同じ、または、それより短い転送時間で制御データを受け取ることが望まれる。すると、制御回線は光パストデータと同じリンク (ファイバ) を通ることが現実的であり、インタフェース速度は 10 Gbps 程度となる。

光パストネットワークの送受信装置では、光パストの構成 (アSEMBル) と分解、制御メッセージの生成が主な機能となる。ここでアクセスネットワークからは IP パケットが到着すると仮定する。入口では、光ネットワークの出口ごとに異なる光パストを生成する。回線の利用効率という観点から効率的な光パストの配信にはできるだけ多くのパケットを一つにまとめ、光ネットワークに送出するほうがよい。これは、光パストを 1 回送出するにあたり、特に、2-way 方式において予約をするがメッセージを流さない無駄な時間が発生することに着目すると、光パストの数を減らすことで、回線の予約時間を減らすことにつながるからである。一方、ネットワーク全体のパケット転送遅延を減らすためには、できるだけ少ないパケット数、あるいは、できるだけパケットを入口装置のバッファに溜めることなくすばやく、一つの光パストを構成したほうがよい。これらのトレードオフを考慮したタイムベース、パスト長ベースに基づいて一つの光パストを構成する様々な方式が提案されている³⁾。光パスト制御メッセージには、光パストの出口装置情報や光パスト長などの情報が含まれる。ネットワークの制御方針に応じて明示的に経路が指定されたり、パストの処理優先度などの情報が含まれたりすることもある。

■参考文献

- 1) M. Yoo, M. Jeong and C. Qiao : “A High-speed Protocol for Bursty Traffic in Optical Networks,” Conf. on All-optical Comm. Systems, SPIE vol.3230, pp.79-90, Nov. 1997.
- 2) C. Qiao and M. Yoo : “Optical Burst Switching - A New Paradigm for an Optical Internet,” Journal of High Speed Networks (JHSN), Special Issue on Optical Networks, vol.8, no.1, pp.69-84, 1999.
- 3) Y. Chen, X. Yu and C. Qiao : “Optical Burst Switching (OBS): A New Area of Research in Optical Networking,” IEEE Network, vol.18, no.3, pp.16-23, May/June 2004.