



# フォトニックネットワークの明日に向けて

川原 正人

通信網は、無線・有線の電信・電話網を経て、インターネットを中心としたデータ通信網に至って、通信ネットワークは単なる便利な情報のインフラから、人類文化を形成する重要な環境の一つとなるまで進化してきた。この動きは、コンピュータを中心とした情報処理技術と通信ネットワークを中心とした通信技術が今後さらに融合し、IT社会\*の形成・ユビキタスネットワーク\*社会の形成を経て新たな文化創造に貢献する方向に向かうと考えられている。これからの情報通信ネットワークが、人類にとって文化的創造活動に集中するための良き道具であると同時に、創造的精神を刺激してくれる良き道具であれば、人類文化への貢献は十分に可能性があると言える。紙と活字の発明、新聞・ラジオ・テレビなどのメディア隆盛などは、情報の量的変革をもたらしただけで、決して質的変革をもたらすものではなかったが、量的な進展が触媒となり質的な進化を促進したことは事実である。情報通信ネットワークの量的な進展をこれまで支えてきており、今後も支えていくと期待される技術の筆頭にフォトニックネットワーク\*技術が挙げられる。

日本では1999年のミレニアム・プロジェクトを皮切りに、IT21、e-Japan、e-Japan IIと、21世紀の日本を支えるIT技術進展のための国家施策が行われ、IT国家を支えるインフラとしてのフォトニックネットワーク開発も総務省、経済産業省を中心に国家プロジェクトとして推進されている。民間でも超高速フォトニック推進協議会(PIF: Photonic Internet Forum)やユビキタスネットワークフォーラムなどのフォトニックネットワーク技術やIT技術関連のコンソーシアムが活動を行っている。諸外国では、米国DARPAのDOD-N (Data in the Optical Domain Networks)、カナダCANARIEのCANet4 (Canada's Research and Innovation Network)、EUのISTプロジェクトなど、フォトニックネットワーク技術開発を含めたIT技術の国家規模の開発が強力に推進されている。フォトニックネットワークが今後も情報通信ネットワークの進展に貢献するための課題を具体的に考えるには、ネットワークがこれから直面する課題に基づきフォ

トニックネットワークが担う役割を明確にする必要がある。

## ネットワークサービスの多様化

ネットワークは今、エンドツーエンドのさまざまな要求に対応可能な「ネットワークサービスの多様化」の時代に入ろうとしている。このネットワークサービスの多様化が更に進むことにより、将来のIT社会・ユビキタス社会の実現へ繋がると考えられる。このサービス多様化に必要なことは、さまざまなメディア(データ、音声、画像、コンテンツなど)を利用するときに、さまざまな量・質的なネットワークサービスパラメータ(高速性、リアルタイム性、インテリジェンス性)を幅広くサポートし、しかもエンドユーザから見て経済性の面からもストレスなくサービスすることが必要である。今後必要となるこれらのパラメータの種類はサービスが多様化するにつれて多岐にわたり(モバイル性、ユビキタス性などの可搬性やアドホックネットワーク\*に見られるネットワーク自己形成性など)、現時点で全てを予測することは不可能でもある。

現在普及しているIPネットワークは、多様なサービスをストレスなく供給することが、ある程度可能である。これはIPのパケットをさまざまなメディアで共通に用い、同じネットワーク機器を用いて、広範囲に使用することが可能なためである。IPは本来データのために作られたため、音声、動画などのリアルタイム性を必要とするサービスでは、IPネットワークの持つ機能では不十分でQoS(特定の通信のための帯域を予約し、一定の通信速度を保証する)などの機能を必要としている。IPネットワークにより、現状では幾つかのサービスを統合することは可能であるが、リアルタイム性や可搬性やNW自己形成性など今後必要となる新たなサービスパラメータに対応するには難しく、これを解決するためにはIP統合を発展的に進めた図1に示す統合サービスネットワークが必要となる。ここで示す統合サービスネットワークは、基本的にはIPなどの共通したユーザインターフェースを用い、共通したネットワークを使用するが、特殊なネットワークサー

各種サービスNWを統合サービスネットワーク内に収容

- ・ユーザインタフェースは共通 (IPなど)
- ・サービス特性はサービスNW間で差別化

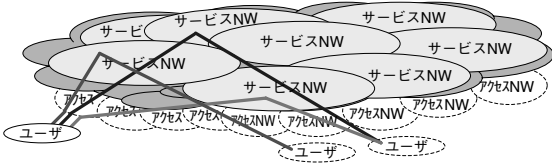


図1 統合サービスネットワーク

サービスパラメータを必要とするサービスには、必要なネットワークサービスパラメータをサポート可能な内部サービスネットワークを使用してサービスを行う。これによりサービスの多様化に対応が可能となる。

統合サービスネットワークの長所短所を以下にまとめる。

- 複数サービスの単一ネットワークへの収容によるコスト低減が可能 (メリット)
- サービス寿命短期化に対するネットワーク構築時間の短期化と経済化 (メリット)
- サポートされていない特異なネットワークサービスパラメータを要するサービスを収容出来なくなる (デメリット)

この中でフォトニックネットワークが担う役割として、次の三つが上げられる。

- ① エンドユーザと統合サービスネットワークを結ぶ高速アクセスとしてのフォトニックアクセス系
- ② 高速大容量化する各種サービスネットワークにおける基盤ネットワーク
- ③ 高速大容量性、リアルタイム性などフォトニックネットワーク技術が得意とするネットワークパラメータを主眼に置いたサービスネットワーク。

①と②はユーザにとってストレスなくスムーズにサービスが受けられるために、経済的でボトルネックのないネットワークをいかに構築するかというフォトニックネットワークへの課題である。③は超高速・大容量性およびリアルタイム性を要求するサービスを実現することであり、多様なサービスのうちの一つを実現するというフォトニックネットワークへの課題である。コストにあまり縛られずに、新技術を開拓することにより、新たなサービス提供が期待される分野でもある。以上のフォトニックネットワークの課題とは、次の二つである。

- 多様化するネットワークサービスの実現
- ボトルネックのないネットワークの実現

これらの課題を解決するには、今まで進展してきたフォトニックネットワークの長所を伸ばすことと、フォトニックネットワークにとって不得手と見られる機能 (たとえ

ば信号処理機能など) を克服することの両面が必要となる。

フォトニックネットワークの現状

図2に示すネットワークの構成要素であるリンク部とノード部と、ネットワークとユーザ間のインターフェース部分であるアクセス部のそれぞれの機能の現状と問題点について次にまとめる。

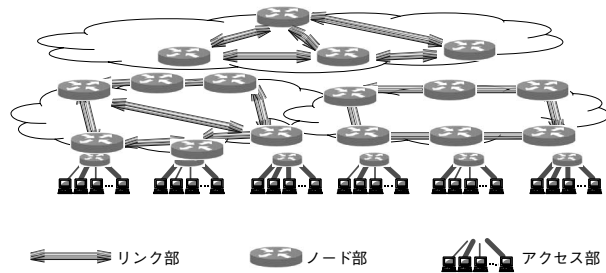


図2 ネットワークの構成要素

リンク伝送機能

リンク技術が今まで飛躍的に進展してきたために、ネットワークが今後必要とされるであろう伝送容量は充分供給可能な状態にある。実用可能な伝送速度は10Gbit/sから40Gbit/sに更新されつつあり、DWDM技術\*、光バンド多重技術\*などの多重化技術とあわせて、数千キロの長距離伝送が数テラの伝送容量で技術的には可能となっている。これは、インターネットのトラフィックが年間で2倍ずつ増えている現状においても10年以上は持ちこたえられることを意味する。信号周波数効率\*の向上や、光結晶ファイバ\*などのファイバ素材の改良など、更なる大容量化を進める要因もある。

ノード信号処理機能

リンク機能の進展と比較してノード機能については、従来の電気によるノード処理技術では将来の通信需要の拡大には対応できないことが指摘されている。信号処理を行う半導体集積回路技術における、信号処理容量の限界、大規模化による消費電力と装置寸法から来る限界などの大きな問題を抱えている。これを克服する手立てとして、現在では

- ノード信号処理機能をネットワーク内で分散させる手法
- リンク部で実現されたフォトニック技術の大容量性をノード処理に適用し、大容量処理ノードを実現しようとする手法

の二つの動きがある。恐らくはこの二つを同時に適用することが今後必要と考えられる。

## アクセス機能

アクセス系は単に高速化だけではなくネットワークサービスの多様化に伴う種々のアクセス方法の多様化への対応が本質的に必要である。その一部として超高速アクセスの実現も重要であり、フォトリックアクセスは超高速アクセスの分野で主力となっている。現状では、ADSL、FTTHなどが普及しており、数10Mbit/sのアクセスが可能である。しかし、サービスの多様化により今後数Gbit/sから数十Gbit/sのアクセスが必要になった場合に、リンク技術の高価なDWDM技術などがそのままでは使えず、コスト問題が一番微妙に絡むので容易には数Gbit/sから数十Gbit/sのアクセスが実現できないのが問題である。

ボトルネックのないネットワークを実現するためには以上の三つの機能をバランスよく発展させることが必要である。現状では、リンク伝送機能が充分であり、アクセス機能でもADSL、FTTHなどが普及する中でのノード信号処理機能が将来ボトルネックになるのではと懸念されている。

## フォトリックノードの開発動向

将来のボトルネックと懸念されるネットワークノード処理機能をフォトリックネットワークの技術を用いて解決するためには、ノード処理のためのキーデバイス（光スイッチ）、ノード信号処理方式、ノード制御方式の開発が必要とされている。

### 光スイッチ

光スイッチは方式的に導波路型、自由空間型など幾つかの方式が考えられ、動作原理も反射型、干渉型などさまざまなものが開発されてきており、その一部には充分実用になりうるものも少なくない。フォトリックネットワークのノード処理部に使われる光スイッチの特性として

- ①透過損失（約-2dB以下）
- ②消光比（-60dB以下）
- ③スイッチ規模（数十×数十以上）
- ④信頼性（デバイス寿命十数年以上）
- ⑤スイッチング速度（ミリ秒以下）
- ⑥偏波依存性、モード依存性

が問題となる。特に①～③が重要であり、④以降は適用するシステム仕様にあわせて考慮すべき値である。さまざまな光スイッチの中でこれら必要仕様を満たす最右翼と考えられているものにMEMSスイッチ\*がある。MEMSスイッチは、半導体加工技術を利用して作られる、機械的な反射型スイッチであるが、①②の要因に関しては充

分な特性をもち、特に③に関しては他の方式には見られない1000×1000程度の規模のスイッチが可能であり、多チャンネルのスイッチ制御方式がまだ確立されていないことを除けば信頼性もほぼ確保できることが分かってきている。他の光スイッチ方式と比べて大規模なフォトリックノードを構築することが可能と考えられ、有望視されている。MEMSスイッチの出現によりフォトリックノードの現実味が増したことは事実である。

MEMSスイッチ以外にもさまざまな形式の光スイッチが開発されているが、どのような形式の光スイッチを使おうと、光スイッチの基本機能は広帯域の光信号通過特性が得られるという点に尽きる。

電子方式のスイッチでは、信号通過特性には限界があり、波長多重信号を一括して透過させることは不可能である。逆に、光スイッチでは、複雑な信号処理はほとんどできず、透過状態から切り替えるために要する時間もかなり長いという短所がある。光スイッチの持つ特徴を生かし、短所を補うために種々のフォトリックノードでの信号処理方式が考えられている。

### フォトリックノード信号処理方式

今現在、フォトリックノードでの光信号の処理として次の3つの方式が考えられている。（別掲記事参照 p.69）

- 光ストリームスイッチ方式
- 光バーストスイッチ方式
- 光パケットスイッチ方式

光ストリームスイッチ方式では、光スイッチを用いて固定された地点間のファイバ接続を切り替えたり切戻したりすることを目的としており、次の三つの用途で検討されている。

- ①ネットワーク配置変更
- ②リンク障害対策
- ③時間を区切ったネットワーク利用方法の変更

①のネットワーク配置変更は、ネットワークプロビジョニングの可変機能と考えられ、切り替えは頻繁には行わないため、スイッチング時間はあまり考慮していない設計がされている。②のリンク障害対策では、プロテクション、リストラクションを行う機能として使用され、ファイバを切り替えるために用いられる。障害に対する信号断の時間を抑える程度により、光スイッチの切り替え時間に対する制限が厳しくなる。③はファイバ接続を固定せずに、時間で区切ってファイバ接続を変化させてネットワークを多用途に使用するためのものである。光ストリームスイッチ方式の共通した考え方は、通信路のバス（光バス）を光スイッチの動作のたびに、新たに生

成・消滅させることにより通信路を制御しようとしていることである。この光パスの切り替え（生成・消滅）は高速に行わない（行えない）ため、必要とする光スイッチに関してさほど高速な光スイッチを用いなくて済む。

光バーストスイッチ方式は、エンドツーエンドのサービスセッションなどを単位として、エンドツーエンドの間で光スイッチを利用して光ファイバの回線を用意することで、高速かつ遅延のないサービスを目的としている。前述の光ストリームスイッチ方式は光パス切り替えにより光ファイバ接続を切り替えることを目的とするが、光バーストスイッチ方式では、切り替えを頻繁にすることによりファイバ利用効率を上げようともくろんだものである。切り替え時間は光ストリームスイッチ方式と比べて、頻繁に行う必要がある分、光ファイバの利用効率は上がるが、セッションの間ファイバ接続を占有することにより、他ユーザとの衝突を避けるためネットワーク全体のネゴシエーションが必要となる。パケット単位でのスイッチングをするためにはどうしてもノードでのパケットバッファが必要になるが、光バーストスイッチ方式はこのパケットバッファの使用を避けるために考え出されたノード処理方式である。ノードでバッファを使用せずに、回線でエンドツーエンドを結ぶことで、遅延を抑えられるため、サービスの多様性の一つとして重要なノード処理方式と考えられる。

光パケットスイッチ方式は電気の信号処理を行うルータの変わりに、光スイッチを用いてパケットごとにフォワーディング処理を行うことにより、電気のルータ（またはラベルスイッチルータ）の容量限界を打ち破ろうとするものである。これを実現するためには、

- ①ノードでのパケットごとの高速なスイッチング
- ②ノードでのパケット衝突を回避するバッファリング
- ③大量のラベル情報の処理

が課題となる。技術的には①の高速スイッチングはある程度可能にはなった。②は現状では光ファイバの遅延線と光スイッチで制御する方法しかなく、今後のこの方面の技術開発が必須である。③の課題はネットワーク全体でラベル数を減らす工夫が必要となる。光パケットスイッチ方式は従来の電気式ルータの大容量化が目的であり、実現されれば現状のIPをベースとしたネットワークノードのボトルネック回避に有力な手段となると期待されている。その反面、電気式ルータと同じバッファ技術を使うため、遅延特性などはまったく同じなため、ネットワークのサービスの多様化に対応するためには、光バーストスイッチ方式など他のスイッチ方式とあわせて利用されると考えられる。

## フォトリックノード制御方式

三つのフォトリックノード信号処理方式は、どの方式でも、光レイヤでノードを制御するだけでは十分に機能を発揮することは出来ず、上位のネットワークレイヤと協調して制御する必要がある。光ストリームスイッチ方式では、光パスの生成・消滅の管理を、光バーストスイッチ方式では、セッションなどの単位での回線の開閉の管理を、光パケットスイッチ方式では光パケットスイッチに用いられるラベルのネットワーク全体での管理などが上げられる。今後もネットワークの主流プロトコルであるIPプロトコルの観点からみて、光レイヤとこの上位レイヤとの協調動作の仕組みとしてGMPLS\*という標準の枠組みがIETF\*などの標準化団体で出来つつある。GMPLSは、光レイヤに属する光関連のネットワーク機器（WDM、光スイッチなど）と従来のネットワーク機器（IPルータなど）を合わせて、ネットワーク全体で管理するためのプロトコル群全体をまとめようとするものである。現在のところ、光ストリームスイッチ方式のノード装置に最低限必要な機能の標準化が進んでいて、光パスの生成に関する大枠が完成し、リストレーション機能の実現のための標準化などを進めている。今後のフォトリックネットワークの各方式を実用化するためには、フォトリックノードの必要機能を実現するだけでなく、上位レイヤとの協調機能を、GMPLSを中心とした標準にさらに組み込みないしは拡張してゆかなければならない。

フォトリックネットワークが目指す機能実現のためだけでなく、ネットワークサービスが多様化してゆく中で多様化するサービスを、ネットワークの量的な面を支えるフォトリックネットワークという技術で実現するためには、標準化の中でネットワークとサービスがうまく協調する仕組みを構築することが重要となる。

## フォトリックネットワークの今後

- 多様化するネットワークサービスの実現
  - ボトルネックのないネットワークの実現
- という今後のネットワークの課題に対して、ノード処理技術の高速化によるノード部分でのボトルネックの回避がフォトリックネットワークの直面している課題である。今後、新たなネットワークサービスを提供する手段と進化したネットワークでのボトルネックの解消手段がフォトリックネットワークに求められると考えられる。具体的には、
- 数Gbit/sから数十Gbit/sの多様化した高速アクセスサービスの実現
  - エンドツーエンドの大容量低遅延ネットワークサービス

の実現

などが上げられる。今後の課題を解決するためにはフォトニックネットワークが保持している現状技術の展開以外にも、フォトニックネットワークに関連する新領域での研究開発・技術開発が重要である。◆◆

## ● 筆者紹介

川原正人：Kawahara Masato. IPソリューションカンパニー  
ネットワークインキュベーション本部 主幹技術者  
光物性専攻理学博士、沖電気入社後は各種光デバイス開発、光システム開発に従事。

# TIPS

## 【用語解説】

### IT 社会：

コンピュータや通信技術の発展により、情報流通の費用と時間を劇的に低下させ、密度の高い情報のやり取りを容易にし、人と人との関係、人と組織との関係、人と社会との関係を一変させる。この結果、世界は知識の相互連鎖的な進化により高度な付加価値が生み出される知識創発型社会をさす。  
(参照) [www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/index.html](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/index.html)

### ユビキタスネットワーク：

ユビキタスネットワークとはいつでも、どこにいてもネットワーク、端末、コンテンツを自在に意識せずに、ストレスなく安心して利用できる情報通信ネットワークである。  
(参照) [www.ubiquitous-forum.jp](http://www.ubiquitous-forum.jp)

### フォトニックネットワーク：

光通信技術を拠所としたネットワーク。  
(参照) [www.scats.or.jp/photonic/index.html](http://www.scats.or.jp/photonic/index.html)  
(参考文献)

超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会編  
「フォトニックネットワーク革命」

### アドホックネットワーク：

多数の端末をアクセスポイントの介在なしに相互に接続（マルチホップ通信）する形態のネットワーク。

### DWDM 技術：[Dense Wavelength Division Multiplexing]

光ファイバ通信において、波長間隔 1nm 以下の複数の光信号を同一の光ファイバを用いて送受信する技術。現在の技術で 1000 波長程度の多重が可能で、将来 2000 から 3000 が可能とも考えられている。

### 光バンド多重技術：

光ファイバを用いた DWDM 技術において、光増幅器が使用できる帯域を光バンドという。複数の光増幅器を併用することで、複数の光バンドを用いて多重度を上げる技術。

### 信号周波数効率：

光通信などで高速信号を送る場合、使用する光波長に対応する周波数を中心に信号速度に比例した周波数帯域を必要とする。通信方式・信号波形などの違いにより信号速度と使用する周波数帯の比が決まる。この比が小さいほど波長多重は有利となる。

### 光結晶ファイバ：

光学的に 2 次元や 3 次元の繰り返し構造を持った物質は、光学的に光閉じ込めなど得意な現象を示す。この性質を光ファイバに用いたもの。ファイバに中空部分を規則的に作りこむことで得られる。従来の光ファイバと比べて設計の自由度が大幅に増え、各種用途の光ファイバが開発される可能性が生まれた。

### MEMS スイッチ：Micro Electro Mechanical System Switch

シリコンなどの半導体基板上に半導体リソグラフィ技術を用いて、各種機械部品を作成する技術が MEMS 技術で、MEMS スイッチは反射ミラーをつくり電極を用いて反射面の角度を変えることで動作させる。半導体技術を使用するため、微小・高集積で精度の良いものができる。

### GMPLS：[Generalized Multi Protocol Label Switching]

レイヤ 3 のラベルスイッチ方式である MPLS をレイヤ 1 の光レイヤまで拡張したもの。光レイヤのラベルには波長を用いることが可能で、シグナリングなどの機能が標準化されている。

### IETF：[Internet Engineering Task Force]

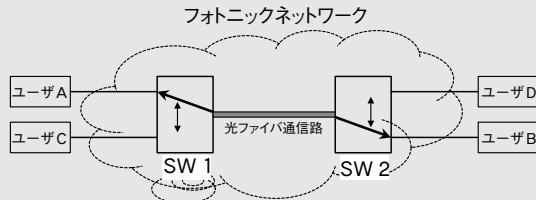
インターネットで使用される各種プロトコルの標準化を行っている標準化団体。GMPLS 関連の標準化は IETF 以外にも、ITU と OIF でも関連した標準化を行っている。

## TIPS

## 【フットニックノード信号処理方式】

フットニックネットワークの三つのノード信号処理方式

1. 光ストリームスイッチ方式
  2. 光バーストスイッチ方式
  3. 光パケットスイッチ方式
- を説明する。



図A フォトニックネットワークの例

図Aのフォトニックネットワークの中にある二つの光スイッチ（SW1、SW2）ではさまれた光ファイバ通信路を考える。この光ファイバ通信路をユーザA-ユーザBの間とユーザC-ユーザDの間の通信で使うときを例として、各々の方式を説明する。

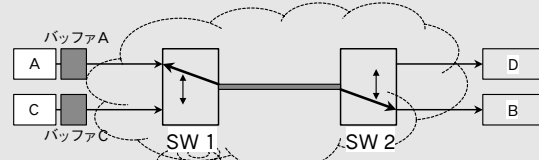
### 1. 光ストリームスイッチ方式

ユーザA-B間で使用するには図Aに示すように、SW1でAを光ファイバ通信路に、SW2でBを光ファイバ通信路に接続して、ユーザA-B間を結ぶ。ユーザC-D間で使用するには、SW1でCを光ファイバ通信路に、SW2でDを光ファイバ通信路に接続するように切り替えて、ユーザC-D間を結ぶ。必要に応じて二つの接続方法に切り替えて使用することができるが、二つの接続方法を同時には使えない。使っている接続の光バスはネットワーク上で存在するが、使っていない接続の光バスはネットワーク上で存在しないと認識される。

### 2. 光バーストスイッチ方式

光ストリームスイッチの場合と同様に、A-B間で使うにはスイッチ（SW1、SW2）を用いて光ファイバ通信路とA、Bを結ぶ。結ばれている時間はセッションの時間内など短めに設定し、A-B間の通信が終了した時点で、必要に応じて接続を換える。A-B間で接続されている最中に、C-D間の接続が必要になった場合は、A-B間の接続が終了するまで待たなければならない。そのため、ユーザ装置（ユーザC）の出力端には図Bに示すように、バッファが必要となる。このように通信路が複数のユーザで要求された場合は、ユーザ出力端バッファで待たなければならないが、

一旦通信がはじまれば遅延のない高速通信が可能となる。これはリアルタイム性のある大容量通信に向いていると考えられる。この方式を実現するためには、ユーザ出力端バッファ以外にも、ネットワーク全体で同期をとる機構が必要となる。

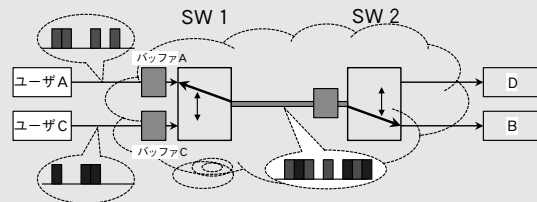


図B 光バーストスイッチ方式

図Bの例では、A-B間とC-D間の利用が重なっても同期を取れば両方も通信が可能のため、二つの接続に対する光バスは、常に生きている扱いとなる。セッションが始まるまでの待機時間が長いいため、この方式は基本的にエンドユーザ間をワンホップでつなぐことを前提としていると考えられる。

### 3. 光パケットスイッチ方式

通常のルータ（またはラベルスイッチルータ）のようにスイッチの内部にバッファを設けて、光バーストスイッチのようなネットワーク全体の同期制御の必要をなくしたものが光パケットスイッチ方式である。図Cではルータ入力側に遅延バッファを置いた方式を示す。



図C 光パケットスイッチ方式

バッファでの遅延は生じるが、出力側の帯域が許されるまで、多重が最大限可能である。光SWによる高速切り替え、バッファ制御、パケット情報からのSW切り替え情報の取得や書き換えなど解決すべき課題が多いが、パケットが光スイッチ内部を通過する速度には際限がないため、大容量処理が可能な次代のルータと期待されている。ネットワークの制御から見て、異種の光バスが一つの光ファイバに同時に存在すると認識される。