

フォトニックネットワーク

——全光化へ向けて——

北山 研一

Photonic Networks: Toward All-Optical Networking

Ken-ichi KITAYAMA

This review paper describes present status and the perspectives of IP over photonic networks. Particularly, focusing on all-optical networking an evolution from present opaque network to target transparent networks is discussed. First, motivations as well as the evolution scenario of all-optical networking are discussed. Next, in the all-optical networking core technologies both for the link and node have to be developed, including the long-distance transmission, optical 3R repeating, optical cross-connect. Then, the degree of all-optical is classified into opaque link/opaque node, opaque link/transparent node, and transparent link/transparent node, and the capabilities of these three classes are discussed. As a near-term solution to all-optical networking G-MPLS (generalized-multiprotocol label switching) based optical path network is presented, and the advantage of cut-through of IP layer is focused on. Finally, optical burst switching is introduced as the mid-term solution, and then an ultimate long-term solution, photonic packet switching is presented.

Key words: opaque, transparent, generalized-multiprotocol label switching (G-MPLS), optical burst switching, photonic packet switching

インターネットのユーザーは3億人を超え、世界中の人口の6%がインターネットを使っている。数年後には10億人を超えるであろう。またホストコンピューターの数是世界中で1億台を超え、過去5年間の伸びは平均で年率約1.6倍である¹⁾。今後、first one mileのブロードバンド化と常時接続および通話料金の定額・低廉化が進むと、P2P (peer-to-peer)、動画などのストリーミング、リモートオフィスなどのサービスが一気に立ち上がり、インターネットのトラフィックは拡大の一途をたどるであろう。

インターネットのオリジンを振り返ってみると、当初の目的と現在の使われ方とは隔たりがあることがわかる。パケットスイッチングの発明者である米国のBaranは、最近“The Internet: Past, present, and future”というIEEEの雑誌の特集号にパケットスイッチングの興味深い回顧録を寄稿している²⁾。米ソ冷戦下の1960年代には米国軍の通

信網は短波通信とAT&Tの公衆電話線に頼っていたが、短波は水爆実験による衝撃波のために途絶することがしばしばあり、電話回線は中枢の交換機が攻撃を受ければネットワーク全体が麻痺してしまう危険性があった。Baranの当初のアイディアはネットワークを分散化し、複数の経路を用いてデータをブロードキャストすることによってsurvivabilityを確保しようというものであった。しかし、この方法では通信容量が膨大になり現実的でない。そこで、データをデジタル・パケット化しヘッダー情報を付けて送信し、ノードごとにバッファリングし、その間にヘッダー情報に基づいて動的に経路を選択し、経路を切り替えパケットを送り出すというパケットスイッチングを発明したのである。これによってパケットごとに異なる経路をとっても受信端でもとの情報が再生でき、しかも1本の回線を同時に共同利用できるというメリットもある。しかし

大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1) E-mail: kitayama@comm.eng.osaka-u.ac.jp

ながら、回線交換のようにリアルタイムのコネクションをもたないこのアイデアは当時としては斬新すぎて、クレイジー、ペテンなどという散々な評価を受けたと Baran 自らが記している。しかしながら、このアイデアには分散ネットワーク、非同期、統計多重、VC (virtual circuit)、hot potato とよばれる高速ルーティングアルゴリズムなどの現在の ATM (asynchronous transfer mode) やインターネットの核となる概念はほとんどすべて含まれており、これが1969年から細々と開始された ARPANET (advanced research projects agency network) というインターネットの最初の実験の基礎となったのである。さらに1974年に TCP/IP とよばれるプロトコルが開発され、現在のインターネットの技術基盤がほぼ確立されたのである。

インターネットがグローバルな規模の通信のユーティリティのような役割を担うまでに発展してくると、それまで予測だにできなかったさまざまな問題が顕在化しはじめた。例えば、トラフィックの自己相似性に起因するといわれる輻湊³⁾が発生したり、本来ベストエフォートであるインターネットに QoS (quality of service) やセキュリティのメカニズムを組み込みたいという要求まで生じてきている。一方、インターネットが生まれた30年前にはまったく存在していなかった超高速・大容量光ファイバー通信技術と、これをベースとするフォトニックネットワーク技術をわれわれは現在手中に収めている。フォトニックネットワーク上にインターネットのトラフィックを流す、いわゆる IP オーバーフォトニックネットワークが、上記のさまざまな問題に対するソリューションを提供してくれることは疑う余地はないであろう⁴⁾。では、その究極のターゲットが全光化なのであるか、そしてそれはどのようなインパクトをもたらすのであるか。テレコムウィンターとよばれるこの時代に、通信キャリアや通信機器ベンダーは生き残りを賭けて、設備投資と維持管理のコストの削減と、新たな収益の柱となるサービスの提供にしのぎを削っているなかで、全光化が徐々にではあるが進行しつつある。

本特集「フォトニックネットワーク：全光化への序章」は、全光化という現在直面している最も喫緊の課題に切り込むタイムリーな企画といえる。本総合報告では、フォトニックネットワークにおける全光化のモチベーションやアプローチ、キーとなる技術について私見をまじえながら解説し、近未来のソリューションである光パスネットワーク、さらにはより将来的な課題である光バーストスイッチングやフォトニックパケットスイッチングについて述べる。なお、全光化に必須の技術である光 3R 機能、光クロスコネクトスイッチ、フォトニックルーター、光多重方式や

表1 オペークネットワークからトランスペアレントネットワークへの移行。

リンク/ノード		リンク	
		オペーク	トランスペアレント
ノード	オペーク	O/O	T/T
	トランスペアレント		

超高速フォトニック信号処理については、本稿に続く解説に詳しく述べられているのでご参照いただきたい。

1. 全光化：オペークからトランスペアレントへ

1.1 光化すべきもの

オペークな光ネットワークからトランスペアレントな全光ネットワークへという進化が起こりつつある。トランスペアレントとは、ビットレート、変調フォーマット、多重方式に依存せずに光信号のままに伝送できることを意味しており、全光ネットワークでは光信号の経路の途中で光・電気変換がまったく存在しない (図1(a))。これに対して、end-to-end を結ぶパスの途中で光・電気変換が存在するのが、オペークネットワークである (図1(b))。ネットワークの全光化を実現するためには、リンクとノードの両方を光化しなければならない。過渡的には、比較的实现が容易なノードの光化をまず達成してから、全光化を目指すシナリオが有力視されている (表1)⁵⁾。

1.2 全光化へのシナリオ

では、全光化のモチベーションは何であろうか。既存のネットワークの全光化を行う際に、ネットワーク事業者がまず考えることは投資効果であり、トラフィックの増大が見込める部分から段階的に全光化を進めるのが常套である。ここでは、具体的な全光化のアプローチを紹介する⁶⁾。いま、数千 km 規模の北米大陸や欧州大陸などの幹線ネットワークのアーキテクチャーを考え (図2(a))、これをいくつかのノードを集約したメトロ/地域ネットワークである collector-network と、集約されたノード間を大容量の DWDM (dense wavelength division multiplexing) リンクで結ぶ Express-network の2階層に分割する (図2(b))。Express-network と collector-network がそれぞれ全光とオペークの場合について、全体のコストモデルを評価し、表2の結果を得ている。両ネットワークともに全光化した場合には最小コストが実現でき、次にコストが低くなるのは全光 express-network + オペーク collector-network の組み合わせとなる。シミュレーション結果では、全ノード数が256に対して、express-network のノード数は20~50、集約されるノード数はこれに対応して

表2 幹線系およびメトロ/地域ネットワークの全光化のコスト比較.

		Express-network (幹線)		Collector-network (メトロ/地域)	
		全光	オペーク	全光	オペーク
Express-network (幹線)	全光	—	—	1*	2
	オペーク	—	—	3	4
Collector-network (メトロ/地域)	全光	1	3	—	—
	オペーク	2	4	—	—

*数字1が最小コスト, 4が最大コストを表す.

13~5となる. この結果から, まず最先端の技術を駆使して express-network の全光化を優先して行い, それと並行してトラフィックの増加が見込めるメトロ/地域ネットワーク全光化を進め, エリアを徐々に拡大していく (図2(b)中の点線) というアプローチが現実解であろう.

1.3 全光化のキーとなる技術

1.3.1 リンクの全光化

リンクの全光化は, 3R 中継器や光・電気変換デバイスが WDM のチャンネル数分だけ必要となるので, ネットワークの設備コストの削減に大きく寄与する. まずは, WDM 伝送技術の進歩を概観してみよう. 中継距離の伸長には多大な努力がはらわれてきた結果, ごく最近では, 9000 km の 1R 中継 (42.7 Gbit/s×32 波) も達成されている⁷⁾. 一方, WDM チャンネル数は光増幅器の利得波長帯の開拓や DWDM 技術の進展により, すでに 10.9 Tbit/s (40 Gbit/s×273 波)⁸⁾ が実現されている. 光ファイバー増幅器の出現によって, 増幅のみを行う光 1R 中継が可能となり中継間隔は一気に伸長したが, それでも距離が長くなると光増幅器の雑音が蓄積するので, 現状では一定間隔で電気 3R 中継を行わなければならない. 3R 機能とは増幅, リタイミング, 再生である. 全光化を実現するためには, トランスペアレントな光 3R 中継技術が必須であり, これによって上記の express-network の全光化が実現できる. 光 3R 中継の商用化は, まだ5年以上先になると見込まれている⁹⁾. 詳細は, 本号の特集をご参照いただきたい. したがって, メトロ・地域ネットワークより規模が大きくなると (>100 km), 現状では全光化は難しいであろう.

伝送技術の究極の目標のひとつは, シヤノンの第二基本定理¹⁾で規定されている伝送速度あるいはスペクトル利用効率を実現することである. 近年, 超長距離海底方式では, FEC (feed-forward error correction) とよばれる誤り訂正符号化を送信信号に施し, 受信データに基づいて誤りを推定しデータを訂正することが可能となり, 中継距離が飛

躍的に伸びている. 例えば, 8 bit のシンボル長の Reed-Solomon 符号を用い, 239 のデータシンボルに 16 シンボルの誤り訂正符号を付加することによって, 64 bit の誤り訂正が可能であり, ビット誤り率 (BER: bit error rate) は 10^{-5} から 10^{-15} に改善され, 6 dB の符号化利得が得られている (図3). 一方, WDM の光周波数スペクトル利用効率は $0.8\sim 1.6$ bit/s/Hz^{8,10)} を記録するまでになっており, ファイバーの非線形効果の影響を考慮すると, 理論的には 3 bit/s/Hz までは実現可能という予測もなされている¹¹⁾.

1.3.2 ノードの全光化

一例として, 1 入力ファイバー×2 出力ファイバーのノードにおいて, 次のようなコネクションを考えてみよう.

入力ファイバーの波長 λ_1 → 終端

入力ファイバーの波長 λ_2 → 出力ファイバー 1

入力ファイバーの波長 λ_3 → 出力ファイバー 2

最も簡便な方法は, パッチパネルを手作業で操作し, WDM の終端装置と PAD の端子のつなぎ変えを行う方法である (図4(a)). ノードはトランスペアレントにはなるが, 接続の切り替えが頻繁にある場合には現実的ではない. これにスイッチを導入することによって, コネクションを動的に変えることができる. 入力光信号は波長ごとに分離された後光・電気変換され, 電氣的なスイッチによって設定された経路を通り出力ファイバーへ導かれ, 再び所定の波長の光信号に変換して送信される (図4(b)). この段階ではノードはオペークである. 電気スイッチを光スイッチに置き換えることによって, トランスペアレントノードが実現できる (図4(c)). 一方, オペークノードでは波長変換が容易に行えるという利点がある.

スイッチはクロスコネクトスイッチとパケットスイッチに大別でき, どちらを採用するかによって, ネットワークのアーキテクチャーは根本的に異なってくる. 前者は光パケットネットワークという回線交換的な光 (波長) パスの切り替えを行うので, スイッチ速度はミリ秒からマイクロ秒と

† 通話路容量が C [bit/s] である場合に, 伝送速度 $R < C$ [bit/s] の情報を任意に小さい誤り率で伝送する符号化方法が存在することが証明されている. ただし, 具体的な実現方法については触れられていない. これを実現するためには, 多値変調や誤り訂正符号等が必要であり, また伝送路の非線形性も考慮に入れなければならない.

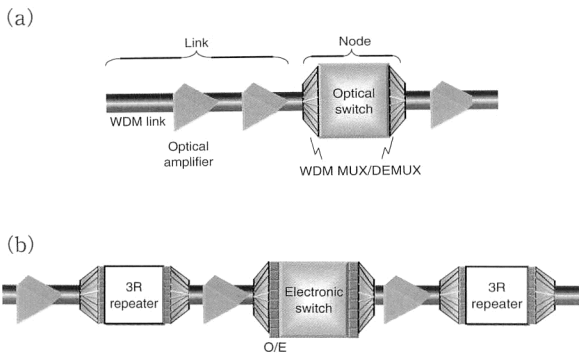


図1 (a) 全光 (トランスペアレント) ネットワーク: トランスペアレントリンク/トランスペアレントノード. (b) オペークネットワーク: オペークリンク/オペークノード.

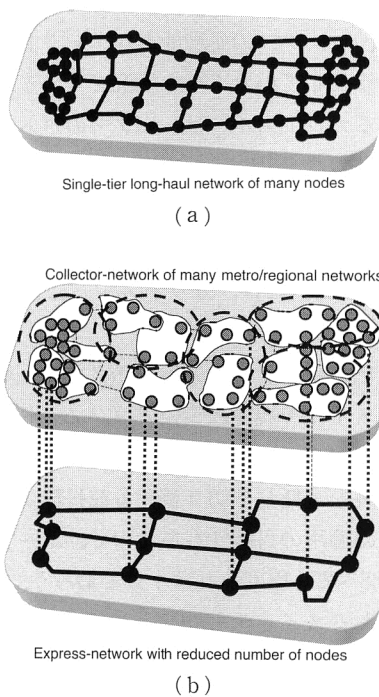


図2 (a) 幹線系ネットワークのアーキテクチャー. (b) 複数のノードを集約したメトロ/地域ネットワークである Collector-network と, 集約されたノード間を大容量DWDM リンクで結ぶ Express-network の2階層に分割.

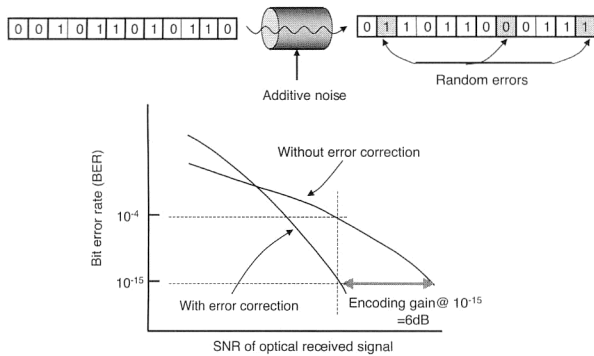


図3 誤り訂正符号化の原理. ビット誤り率 (BER: bit error rate) と符号化利得の関係.

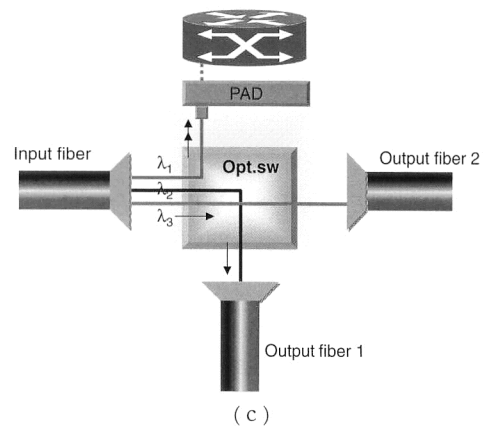
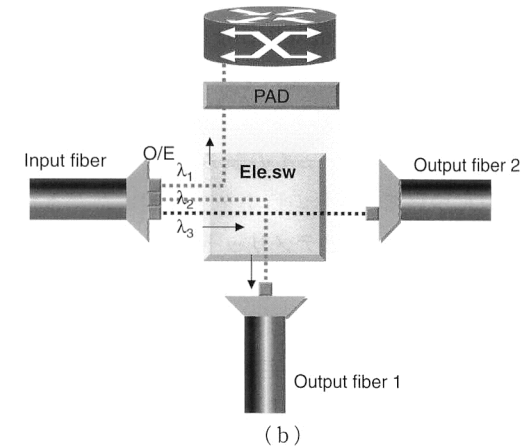
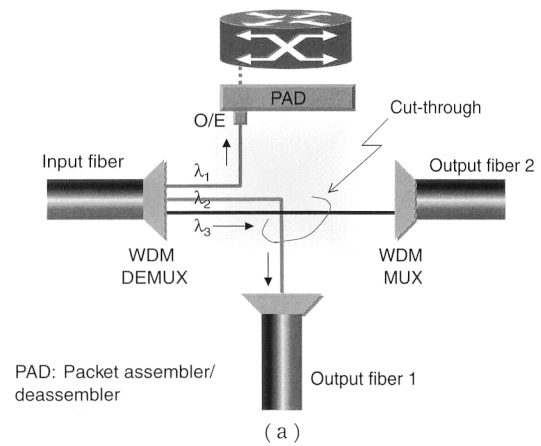


図4 (a) コネクション: 入力ファイバーの波長 λ_1 → 終端, 入力ファイバーの波長 λ_2 → 出力ファイバー1, 入力ファイバーの波長 λ_3 → 出力ファイバー2. (b) 電気クロスコネクストスイッチを用いたコネクション. (c) 光クロスコネクストスイッチを用いたコネクション.

低速でよい. これに対して, 後者は IP パケットのヘッダーの情報に基づいて経路を設定し, パケットごとに転送するパケットスイッチングに用いられるので, スイッチ速度はパケット長程度, すなわちナノ秒と高速でなければならない. 光パスルーチングについては2章で, パケットスイ

表3 ネットワークの制御, 管理, オペレーションからの比較.

	O/O (リンク/ ノード)	O/T	T/T
ネットワーク制御	○	△	△
ネットワーク管理	○	△	△
多重化/グルーミング	○	×	×
ルーチングにおける波長変換	○	○	×
ビットレート, 変調フォー マット, 多重方式	×	×	○*

*現状ではトランスペアレントな技術はいまだ確立されていない.

チングについては3章で詳しく述べる.

ノードには, スイッチングの機能以外にも, WDM と TDM (time domain multiplexing) の多重フォーマット変換やビットレート変換などのゲートウェイの機能も必要になる場合がある. これらの機能を全光で実現しようとするフォトニックゲートウェイの試みもすでになされている¹²⁾. これについては本号の特集をご参照いただきたい.

1.4 全光化のメリットとデメリット

全光化の利害得失をネットワークの制御, 管理, オペレーションの観点から考えてみよう. まず, ネットワークの制御とは, 最適の光パスを設定するための情報を伝達することである. 詳しくは2章で述べる. ネットワーク管理は, 障害の発見と復旧である. これ以外にも, フォトニックレイヤーにおけるビットレートと信号フォーマットの制約などが重要である. リンク/ノードがオパークまたはトランスペアレントである3つの場合について比較した結果を表3に示す⁹⁾. O/O の場合には, ビットレートと信号フォーマットの制約があることを除けば, 他の機能はすべて実現できる. これに対して, O/T や T/T の場合にはネットワークの制御や管理が難しいという問題がある.

全光化の利害得失はこれだけでは判断できるものではなく, 1章3節で論じた設備コストや, 全光化によってはじめて発現する機能やサービスも含めて総合的に論じる必要がある, 2章で考察したい.

2. 近未来のソリューション: G-MPLSベースの光パスネットワーク

2.1 光パスネットワーク

光パスを動的に設定することが可能になれば, オンデマンドで光パスを提供するなどの新規のサービスが提供できる. このような期待を担っているのが, 光パスネットワークである^{13,14)}. 一般に中間ルーターでは, 到着したすべて

の packets をルーターで処理し, 終端される波長 λ_1 の光パスの packets とノードを通過する波長 λ_2 の光パスの packets が振り分けられていた (図5). これに対して, ネットワークの入り口であらかじめ行き先ごとの光パスに packets を乗せてしまえば, 次のノードではその波長に応じて光信号のまま転送できるので, 通過トラフィックはノードにおいて IP レイヤーをカットスルーすることが可能となる (図4(c)). これによって, ノードにおける光・電気変換デバイスが削減できるだけでなく, ルーターの負荷も大幅に低減できる. コアネットワークにおいて, 自ノードに終端される packets の割合は, ノードに流れ込むトラフィックは全体の 20~30%程度といわれており, それ以外は通過トラフィックである. したがって, トラフィックが増大し続け, ルーターの処理能力がエレクトロニクスの限界に達しようとしているような状況を考えると, ノードの全光化によるカットスルーはルーターのボトルネックの解消のための有効なソリューションである. また, カットスルーによって end-to-end を光速で転送できるので, 最小遅延時間が保証でき, 例えば北米大陸のように平均ホップ数が約 17 と多い場合には, カットスルーによる転送遅延の低減効果は絶大である.

ノードの光化のキーデバイスは, 光クロスコネクタスイッチである. スイッチ規模については, ノードにつながるリンク数が現状では 3~4 程度あれば十分といわれており, 複数の波長を一括して切り替える波長群 (waveband) スイッチングの適用の可能性もあるので, ポート数は当面はたかだか 128~256 程度あれば十分であろう. すでに商用に近い段階にあるスイッチも開発されているので^{15,16)}, 導入にあたっての技術的な問題はほぼ解決されているといえる. 光クロスコネクタスイッチについては本号の特集をご参照いただきたい.

2.2 ネットワークの制御: G-MPLS 技術の導入

大規模で信頼の高い光パスネットワークを構築するためには, ネットワークの制御技術が必要となる. ネットワークの制御は, ネットワークのトポロジーや波長の利用状況などをノード間で交換し, 最適の光パスを設定するための情報を伝達するルーチングとシグナリングを行うことである. 光パスネットワークの制御技術として, IETF (Internet Engineering Task Force) や OIF (Optical Internet Forum) などで標準化が進められているのが, G-MPLS (generalized-multiprotocol label switching) である¹⁷⁾††. MPLS は元来 IP packets をグローバルな IP アドレスに

†† IETF, OIF の HP はそれぞれ <http://www.ietf.org>, <http://www.oiforum.com> である.

基づいてノードで転送処理を行う、いわゆる hop-by-hop の転送をするかわりに、行き先ごとに集約したパケットにネットワーク内部のラベルを付け、あらかじめ設定したパスに乗せて転送するために開発されたものである。この MPLS のラベルとして、波長などの光の属性を用い光ネットワーク用に拡張したものを G-MPLS とよんでいる。G-MPLS を導入することの最大のモチベーションはトラフィックエンジニアリングである。これによって光パスをトラフィックが存在する場所にダイナミックに割り当てることが可能となるので、将来的にはちょうど電話をかけるのと同じ要領で、ユーザーが端末からオンデマンドで一定期間だけ光パスを確保する新しいサービスが実現するかもしれない。

3. より将来的なソリューション

3.1 光バーストスイッチング

光バーストスイッチングは、全光化の次のステップとして G-MPLS の進化版と考えられる。光パスを予約により必要な期間だけ確保し、予約した光パスは転送が終了した直後に解放するので、波長の利用効率は光パスルーチングよりも高く、光信号のままで中間ノードをカットスルーするので最小遅延の転送が行えるという特徴がある。ハードウェアについては、バッファレスであり、スイッチング速度に対する要求がそれほど厳しくない光クロスコネクタスイッチが使用できるので、実現にあたっての困難性は少ない。バーストスイッチングは、バーストの集約、経路制御用光パケットの送信、波長予約、バーストの転送と波長の開放というプロトコルに従う。波長予約の確認の有無によって、それぞれ wait-for-reservation と tell-and-go の 2 つのプロトコルに大別される。前者は波長予約を確認した後、バーストの転送を開始するので送達保証されるが、スループットは目的地までの往復伝播時間 (RTT) に制限される (図 6(a))。一方、Tell-and-go では波長の予約の確認を待たずにオフセット時間をおいてバーストの送信を開始するので、途中でバーストの棄却が生じる可能性がある。波長予約の確認を行わないので、スループットが高くなる可能性がある。Tell-and-go の一例として、JET (just-enough-time) とよばれるプロトコルを図 6(b) に示す¹⁸⁾。

バーストスイッチングを効果的に適用するためには、 $(RTT)/(\text{バーストデータサイズ})$ が小さい ($<10\%$) 場合には wait-for-reservation プロトコルで確実に送達し、この値が大き ($>10\%$) なるときには Tell-and-go プロトコルを用いるという選択が必要であろう。この判断基準に従えば、バーストデータのサイズはネットワークの規模

によって決定できる (図 7)。例えば、1000 km の WAN (wide area network) では数 GB 以上のデータならば wait-for-reservation プロトコルが適用できるが、50 MB 程度のデータに同様の方法を用いても実用上メリットがないことになる。

光バーストスイッチングが商用に導入された例はまだないが、さまざまな適用が考えられる。ストリームデータとバースト的なデータが混在する場合には、光パスルーチングだけでは波長の利用効率が上がらないが、これにバーストスイッチングを併用し、ストリームデータとバーストデータに対してそれぞれ最適な転送方式を選択することによって、波長の利用効率を改善することができる。実現方法の一例として、2 つの波長群 (waveband) に分割し、それぞれ専用に割り当てる方法が考えられる (図 8)。2 種類のトラフィックの量に応じて波長群のサイズをダイナミックに変更したり、バーストデータであってもストリームデータ用の波長に空きがある場合には、その波長を利用してストリームとして転送するなど柔軟な運用が可能であろう。

3.2 フォトニックパケットスイッチング

パケットスイッチングは必要と時のみ帯域を使用する統計多重であるため、回線交換的な光パスネットワークに比べて波長の利用効率を最大限まで高めることができる。IP パケットのスイッチングに用いる IP ルーターの機能は、経路制御 (ルーチング) 機能とパケット転送 (フォワーディング) 機能からなる (図 9)。経路制御機能は、経路情報を交換し IP パケットの宛先を決める経路テーブルを作成する機能であり、大容量のメモリーと複雑な論理処理が必要となるので、現在のところ電氣的に処理を行う以外に方法はない。パケット転送機能はフレーミング、宛先検索、スイッチングからなる。フレーミングは、受信した光信号から IP パケットを取り出す機能およびルーター内でスイッチングした IP パケットを送信するために光信号に変換する機能である。宛先検索は IP パケットのヘッダーのアドレスと経路テーブルのアドレスを照合しパケットの宛先を決定する機能であり、スイッチングは IP パケットを宛先情報に基づきルーターの入力ポートから出力ポートに送る機能である。パケット転送処理に要する時間の大半は宛先検索に要する時間で占められており、パケット処理能力を決めている。宛先検索からみたエレクトロニクスルーターのパケット処理能力は、現状では数十 Mpps (pps: packet per second) が限界とされており、仮にメモリーアクセス速度が 1 桁速くなったとしてもたかだか数百 Mpps 程度で、パケット長が 56 byte の場合にはインターフェイスのビットレートは 10 Gbit/s が限界となる。

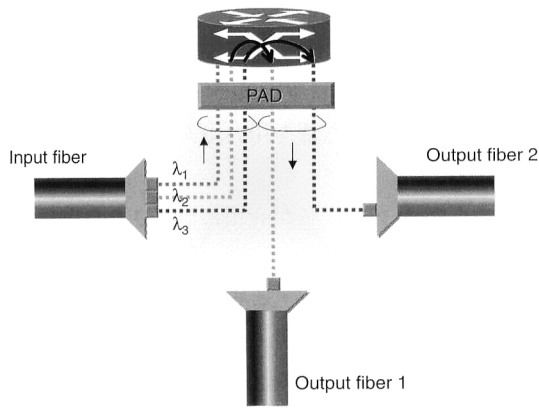


図5 従来のノードにおけるIPパケット処理。

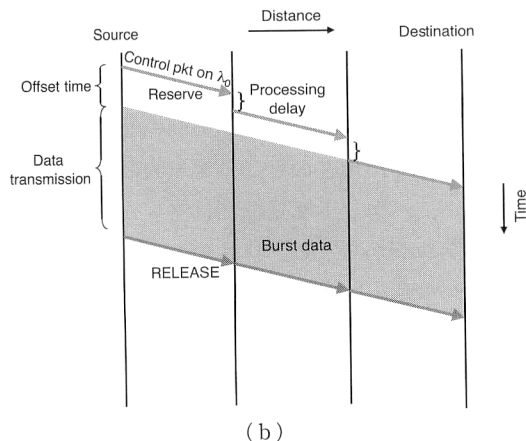
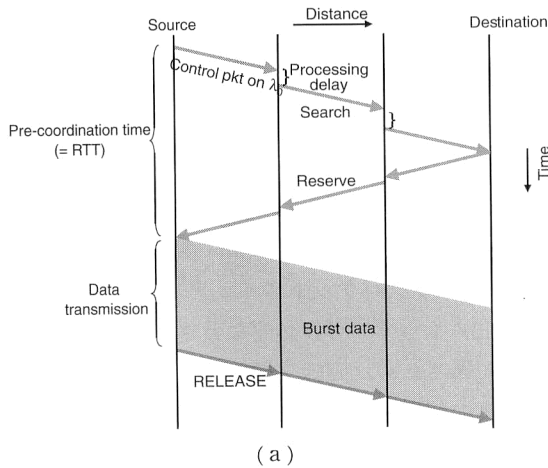


図6 (a) Wait-for-reservation プロトコル。(b) Tell-and-go プロトコル: JET (just-enough-time) の場合。

したがって、フォトニックパケットスイッチングのモチベーションは宛先検索の高速化にある。いくつかの試みがなされているが、ここでは、筆者らが手掛けている光相関に基づく宛先検索を紹介する。まず、IPアドレスの情報を光符号に置き換える。光符号は、光パルス波形の振幅または位相に符号情報を埋め込んだ時間波形であり、光符号分割多重 (OCDM: optical code division multiplexing) に用

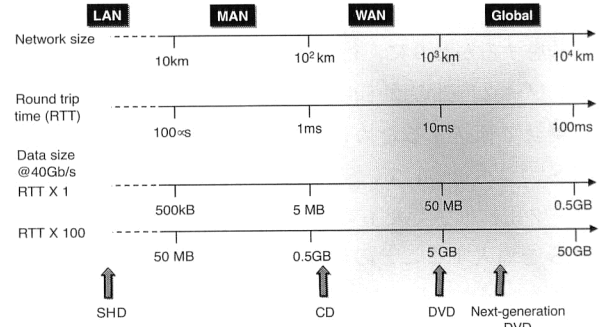


図7 ネットワーク規模、往復伝播時間 (RTT: round trip time) とデータサイズの関係。

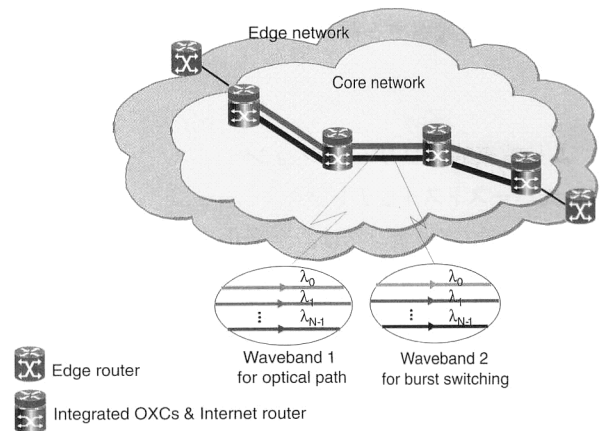


図8 波長分割による光バーストスイッチングと光パルスルーティングのオーバーレイ。

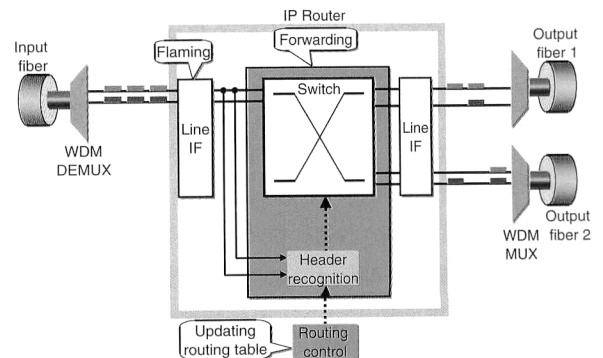


図9 光パケットスイッチのアーキテクチャー。

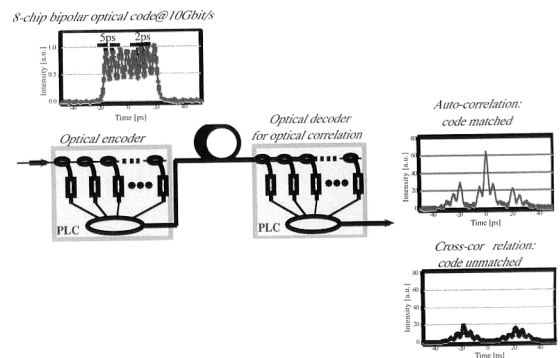


図10 光符号ラベルを用いた光相関に基づく宛先検索。

いられてきたものである。宛先検索は、ルーチング表のアドレスに対応する光符号器を用意し、入力光符号の時間波形との光相関をとることによって一致・不一致を判別する。光相関はアナログ演算であり、最大のメリットは、光符号器は光導波路デバイスやFBGなどが受動光デバイスであり、すべて光領域で実行できるため超高速処理が可能である点である。図10には、8チップバイポーラー光符号と、そのマッチトフィルタリングの結果を示している¹⁹⁾。符号の一致・不一致によってそれぞれ自己相関波形、相互相関波形が得られており、符号の一致、不一致の識別が可能であることがわかる。これらの結果からは10 Gpps以上のパケット処理能力が確認され、表2に掲げた目標をクリアできる可能性を秘めている。この宛先検索を用いた非同期・可変長パケットに適用可能なフォトニックパケットスイッチの構成も提案されており、ファイバー遅延線をバッファとして用いることによりWDMのバッファサイズを波長数倍に拡大できるので、パケットの棄却率をほぼゼロにできることが理論的に明らかにされている²⁰⁾。超高速光スイッチ、光バッファなどのハードウェア的なバリエーションが高いので、長期的な研究課題といえよう。

本総合報告では、フォトニックネットワークにおける全光化のモチベーションやアプローチ、キーとなる技術について述べた。テレコムウィンターの先に光明を望むのであれば、全光化への研究開発の努力を片時も怠るわけにはいかない。

有益なご議論をいただいたフォトニックネットワークをベースとするインターネット (PNI) 研究専門委員会のメンバー各位、超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会のメンバー各位、大阪大学・村田正幸教授に深謝いたします。

文 献

- 1) Internet Software Consortium, Nominum, Inc. and Network Wizards Announce: The Release of January 2000 Internet Domain Survey.
- 2) P. Baran: "The beginnings of packet switching: Some underlying concepts," *IEEE Commun. Mag.*, **40**, No. 7 (2002) 42-48.
- 3) V. Paxson and S. Floyd: "Wide-area traffic: The failure of Poisson modeling," *IEEE/ACM Trans. Networking*, **3** (1995) 226-244.
- 4) 北山研一: "総論—21世紀ネットワークの創造と限りないインパクト—", *電子情報通信学会誌*, **85** (2002) 298-305.

- 5) S. Chaudhuri: "Challenges in deploying an all-optical mesh network," *IEEE LEOS Summer Topical Meeting*, MG2 (Quebec, 2002).
- 6) A. A. M. Saleh: "All-optical networking in metro, regional and backbone networks," *IEEE LEOS Summer Topical Meeting*, MG3 (Quebec, 2002).
- 7) H. Sugahara, M. Morisaki, T. Ito, K. Fukuchi and T. Ono: "9,000-km transmission of 32×42.7 Gb/s dense-WDM signals using 195-mm²-A_{eff} fiber and inverse double-hybrid span configuration," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA 2002)*, Post-deadline paper (Vancouver, 2002).
- 8) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono: "10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC 2001)*, PD24 (Anaheim, 2001).
- 9) 光産業振興協会編: ロードマップ (2002).
- 10) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s QPSK-OCDM/WDM (4 OADM×40 WDM×40 Gbit/s) transmission using optical hard thresholding," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (2002) 555-557.
- 11) P. P. Mitra and J. B. Stark: "Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications," *Nature*, **411** (2001) 1027-1030.
- 12) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "Photonic gateway: Multiplexing format conversions of OADM-to-WDM and WDM-to-OCADM at 40 Gbit/s (4×10 Gbit/s)," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* (in press).
- 13) 佐藤健一, 北山研一: "フォトニックバックボーンネットワークの先端技術—2010年のIPオーバフォトニックネットワーク像(2)—", *電子情報通信学会誌*, **85** (2002) 94-103.
- 14) M. Murata and K. Kitayama: "A perspective on photonic multiprotocol label switching," *IEEE Network Mag.*, **15**, July/Aug (2001) 56-63.
- 15) K. Sato, N. Yamanaka, Y. Takizawa, M. Koga, S. Okamoto, K. Shimano, E. Oki and W. Imajuku: "GMPLS-based photonic multiplayer router (Hikari Router) architecture: An overview of traffic engineering and signaling technology," *IEEE Commun. Mag.*, **40**, No. 3 (2002) 96-101.
- 16) P. D. Dobbelaere, K. Falta, L. Fan, S. Gloeckner and S. Patra: "Digital MEMS for optical switching," *IEEE Commun. Mag.*, **40**, No. 3 (2002) 88-95.
- 17) 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 (SCAT, 2002).
- 18) C. Qiao: "Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration," *IEEE Commun. Mag.*, **38**, No. 9 (2000) 104-114.
- 19) K. Kitayama, N. Wada and H. Sotobayashi: "Architectural considerations of photonic IP router based upon optical code correlation (Invited)," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **18** (2000) 1834-1844.
- 20) M. Murata and K. Kitayama: "Ultrafast photonic label switch for asynchronous packets of variable length," *In-focom 2002*, 1 (New York, 2002) pp. 371-380.

(2002年9月2日受理)