

光技術がもたらす次世代情報ネットワーク

Photonic Technologies for Next Generation Information Networks by Ken-ichi YUKIMATSU (Photonic Switching Systems Research Group, NTT Network Service Systems Laboratories).

行 松 健 —¹

¹ NTT ネットワークサービスシステム研究所光交換研究グループ

1. はじめに

コンピュータはすでに社会活動にはなくてはならない存在になっているが、同時にそれらを繋いで情報を伝達するネットワークがなければ、コンピュータの果たす役割はこれほど大きくはならなかったであろう。今後、ネットワークの重要性はますます高まるものと思われる。しかし、はたして21世紀にはどのようなネットワークが必要になるのか、また逆にどのような技術で何ができるようになるのか、を明快に答えることはなかなか難しい。

本稿では、光技術を活用した将来のネットワークを研究している立場から、今後のネットワーク発展の可能性とそれを支える技術について述べ、それがとくにコンピュータ通信にどのような効用をもたらすかを私見を交えて述べてみたい。

2. 通信ネットワークの現状と将来

2.1 電話網とインターネット

これからはマルチメディア通信の時代といわれている。しかし、基本となるネットワークは依然として「電話網」であって、そのためにさまざまな制約が存在する。それは帯域（転送速度）が3.4 kHz (64 kbps) に制限されているといった直接的なものだけではなく、ネットワーク自体が人と人との会話通信を前提に設計されていることに起因するものも多い。

一方、インターネットはすでに全世界を繋ぐネットワークとして広く利用されているが、一方でなかなか繋がらない、情報転送に時間がかかる、セキュリティが低いなどユーザの要求を十分満たしているとはいえない。これは、インターネットが一定の品質を保証するように設計されていな

い以上、当然のことであって、適切なリソースを使ってネットワーク設計をすれば、問題は相当程度解決できるはずである。ただ、自然発生的にボトムアップの力で発展してきたインターネットの特徴を損なうことなく、トップダウンのネットワーク設計をどこまで行えるかは、難しい問題である。むしろあまり明確なネットワーク設計やコントロールを行わなくてもよいだけの十分なリソースを、低いコストで使えるようにするのが近道かもしれない。

いずれにせよ、電話を中心とした現在の公衆通信網とインターネットとは各々別の方向に向かうのではなく、有機的に融合し、ユーザにとってより使いやすいネットワークへと進化していくべきであろう。そのために、今後どのような技術が利用できるのか、それをどのように活用していくべきなのかを考えてみよう。

2.2 コンピュータ通信とネットワークへの要求

まず、コンピュータ通信の観点から、現状のネットワーク（とくに公衆通信網）に対する要求をいくつか具体的にあげてみる。

(1) 帯域（通信速度）：リアルタイムで情報を送出ないしは受信する場合は、通信速度が直接的に通信品質を左右することになる。現在のネットワーク（専用網は除く）では高々1.5 Mbpsであり、大半は64 kbps以下であるため、動画のリアルタイム通信などを快適に行うには、広帯域（高速）化が必須である。

(2) 伝送遅延：情報を伝達する場合、たとえ光を使ったとしても絶対的な伝搬遅延時間（光ファイバ伝送の場合、5ナノ秒/m）をゼロにすることはできない。これは一定間隔で受信確認を行いながら情報を送受信する場合に最も顕著な影響

として現れ、伝送速度が速くなるほど伝送遅延の影響は相対的に大きくなる。また、距離による伝搬遅延だけでなく、ネットワーク内でさまざまな処理（多重化、同期、フロー制御、ルーティングなど）によっても遅延が加わる。したがって、ネットワーク側でできるだけ遅延時間を小さくするとともに、絶対遅延の存在を前提とした効率のよいプロトコルの開発が必要である¹⁾。

(3) 通信方式：コンピュータ通信はパースト状の情報を間欠的に送ることが多いが、現在は交換機や中継伝送路などの共通リソースを回線単位でシェアし、その占有時間で課金する料金体系をとっているため、使用効率がそのまま通信コストに影響する。したがって、コンピュータ通信には、パケット通信やATM通信のように転送情報量に比例した料金体系のサービスが強く望まれている。一方、加入者線のように個々のユーザがリソースを占有する部分は、使用効率が通信コストに影響することはないが、一本の加入者線を使ってさまざまな速度で複数の情報転送を同時に行うには、ATMのような統計多重通信方式が望ましいといえる。

(4) 誤り率：技術の進歩によって雑音などの物理的な要因による誤り率は大きく改善されてきているが、パケットやATMのような統計多重通信を導入すると、セル廃棄など別の要因で伝送誤りが生じることになる。これはリソースを十分用意して適切な制御をすれば改善できるが、当然その分コストが上昇する。低コストを優先させたいいわゆるベストエフォート型通信が今後どのように利用されていくのかは興味深いところである。

(5) ポータビリティ：人が移動する以上、端末のポータビリティは本質的な要求条件といえる。これに応えるには、端末の携帯性とネットワークの機能の両面から検討していく必要があるが、ネットワークとしては自由空間の電波資源の使い方を根本的に見直す必要があるように思われる。すなわち、今後は固定端末への放送や中継伝送のように光ファイバによる有線伝送で代替する部分は極力光ファイバで置き換え、(移動)端末とネットワークとを結ぶアクセス系に十分な電波リソースを割りあてる方向に進むべきであろう。

(6) スループット：現在の公衆通信網は人対

人の通信を前提に、ある程度のトラフィック変動への対策はとられているが、今後機械対機械のコンピュータ通信が増加すると、予想を遙かに超えたトラフィックの集中が頻繁に発生する可能性がある。これによって、交換機の処理能力（通信要求の発生頻度に依存）と伝送容量（回線の占有時間に依存）の極端なアンバランスが生じ、設備容量の割にはスループットが上がらないという事態も起こりうる。したがって、これからのネットワークでは、新しい条件に対応したトラフィック設計を行うとともに、トラフィックの変動に対して十分な余裕をもたせることが重要になってくる。

2.3 新たなニーズへの対応

前節で述べたさまざまな要求条件を、コストを上昇させることなく満足していくことが、これからのネットワーク開発の大きな課題といっていよう。しかし、それだけではなく、新しい要求に対しても応えられるものでなくてはならない。たとえば、これまで公衆通信網のユーザは、不特定多数の相手に情報を発信する手段をもたなかったが、インターネット上では誰でも容易にWWWのホームページを開設できるようになり、その数は日々急激に増えている。これも今後の情報通信においては基本的なニーズと考えるべきであろう。また、今後は通信回線を通して映画をみるなど、数メガbps以上の情報を数十分以上継続して受信するケースが頻繁に発生するであろう。このような場合でも、ほかの通信に影響を及ぼさないようなネットワーク作りが必要である。

3. フォトニックネットワーク

低損失光ファイバと信頼性の高いレーザーダイオードの実用化によって、光伝送技術はすでに広くネットワークで使われるようになった。これによって伝送コストは大幅に低下し、またメガビット/秒以上の広帯域通信も可能になってきた。しかし、現在使われているデジタル強度変調方式では、光電気変換回路（変調器や受信器）の性能はほぼ限界（数十Gbps）に達しようとしている。また、交換システムは依然として電子技術が基本であり、広帯域信号を大量に扱おうとしても、発熱などの影響によってシステム規模の上限が抑えられてしまう。したがって、現在の技術をベースにネットワークを拡張していっても、2章

で述べた新しいニーズには十分応えられない可能性が大きい。

そこで、光のポテンシャルをフルに活用し、まったく新しい概念に基づいてネットワークを再構築しようというのが、「フォトリックネットワーク」である。次の章で述べる光周波数多重技術（波長多重技術とも呼ばれ、その略称として WDM=Wavelength Division Multiplexing という表現がよく使われる）と光機能処理技術が実用レベルに達すれば、現在の電話網の 1000 倍以上の容量と処理能力をもつネットワークが、これと同程度のコストで実現できる可能性がある。このリソースを単に回線の高速化にだけ利用するのではなく、ネットワークアーキテクチャそのものも根本的に見直すことによって、コンピュータ通信はもちろんのこと、あらゆる情報通信ニーズに十分応えられる余裕のあるインフラストラクチャを構築しようという考え方である。

4. フォトリックネットワークの基本技術

フォトリックネットワークの基本となる光周波数多重技術と、光機能処理技術について、その可能性と技術の現状を簡単に紹介する。

4.1 光周波数多重技術

光を電磁波としてみると、その周波数は約 200 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)、これをキャリアとして用いると理論的には数十 THz の情報を伝送できるといわれている。この広大な周波数資源を有効利用するための技術が光周波数多重技術であり、異なる周波数（波長）の光にそれぞれ異なる情報を乗せ、それらを 1 本のファイバに多重して伝送する。1 キャリアあたり 10 Gbps の信号が伝送できるとして、これを 100 波多重すれば、全体では 1 Tbps の伝送が可能になる²⁾。しかし、実際に長距離の周波数多重伝送を実用化するには数々の課題が存在する。その 1 つが光ファイバの分散特性に対する対策である。光ファイバなどの媒体はその周波数によって伝搬速度が異なるという性質をもっており、それが受信側で波形の歪みやクロストークとなって現れる。とくに我が国では長距離伝送用に 1.5 μm 帯の単一光源に最適化した分散補償ファイバが敷設されており、複数の周波数の光を伝送しようとする、非線形光学効果によって雑音光が発生し、SN 比が低下するという問題

がある。そのため、複数のキャリア周波数の配列を不等間隔にするなどの対策が検討されている。これから新たに敷設するファイバ用としては、周波数多重伝送に最適化した新しいファイバの開発も進められている。

周波数多重伝送に重要な役割を果たすもう 1 つの要素技術が、広帯域光増幅器である。エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) の発明により、光増幅技術は一気に長足の進歩を遂げ、その優れた広帯域特性によって、周波数多重伝送も可能になったといえる。現在の技術ではフラットな増幅可能周波数領域は数 THz であり、100 GHz 間隔で周波数多重した場合、数十チャンネル程度の多重が可能である。

4.2 光機能処理技術

(1) WDM クロスコネクタ：光周波数多重技術によって、伝送容量が拡大したとしても、ポイントポイント間の伝送だけではそのリソースを有効に活用することは難しい。周波数多重された情報ストリーム (1 つのキャリアに対応) を独立したパスとして光のまま自由にリンク間で組替えができるようにするのが、WDM クロスコネクタであり、周波数多重伝送網には不可欠の要素である³⁾。光のまま周波数多重パスを組み替えるには、特定周波数の光信号を正確に抜きとる高性能のフィルタや光周波数変換回路が必要になるが、現在のところ 8 波~16 波の WDM クロスコネクタはほぼ実用段階に近づきつつある。周波数多重伝送路とクロスコネクタによって、波長単位に自由にパスの設定・切替えが可能な Gbps クラスのパス網を早期に実現しようというプロジェクトが、アメリカ (MONET⁴⁾) やヨーロッパ (METON⁵⁾) でも精力的に進められている。

(2) 光スイッチング：WDM クロスコネクタは波長パスを低速で切り替えるものであるが、パケットやセルの単位で自由にルーティングできればより柔軟なネットワーク制御が可能になる。電子技術で実現可能な ATM ノードのスループット限界は数百 Gbps といわれており、それを超えるテラビット級の ATM ノードを実現するには、光レベルでのセルルーチング技術が必要である。図-1 は、数十ナノ秒の周期で異なる波長の光を発生できる可変周波数光源と、キャリア周波数によってセルを振り分けるアレイ導波路光フィルタ

(AWGF), それに光バッファを組み合わせた光 ATM スイッチのプロトタイプモデルで, 10 Tbps 級のスループットを実現することを目標に研究が進められている⁹⁾.

(3) 光プロセッシング: プリズムやレンズを用いた幾何光学的な画像処理は以前から実際に使われているが, さらに光集積デバイスによる 2 次元情報の並列処理, ホログラムを利用した光演算など, 光独特の性質を利用した新しい可能性の探求も続けられている. 通信に直接かかわるものとしては, 光回路による超高速プロトコル処理 (光信号の同期, セルヘッダの識別など) などが期待できる.

5. 次世代ネットワークの実現に向けて

ここでは, フォトニックネットワークの 1 つの実現形態として, 我々が検討を進めている「ハイパーメディア光情報ネットワーク」構想について述べる.

5.1 ハイパーメディア光情報ネットワーク

ハイパーメディア光情報ネットワーク^{7),8)}は, 現在のネットワークがもつさまざまな制約条件をできるだけ緩和し, より自由度が高く使いやすいネットワークを目指して研究開発を進めているものである.

その基本的なコンセプトは,

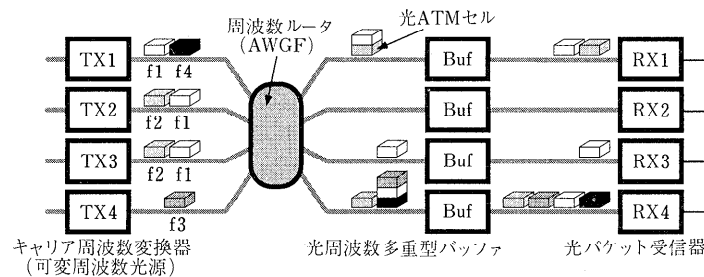


図-1 光 ATM スイッチの基本構成

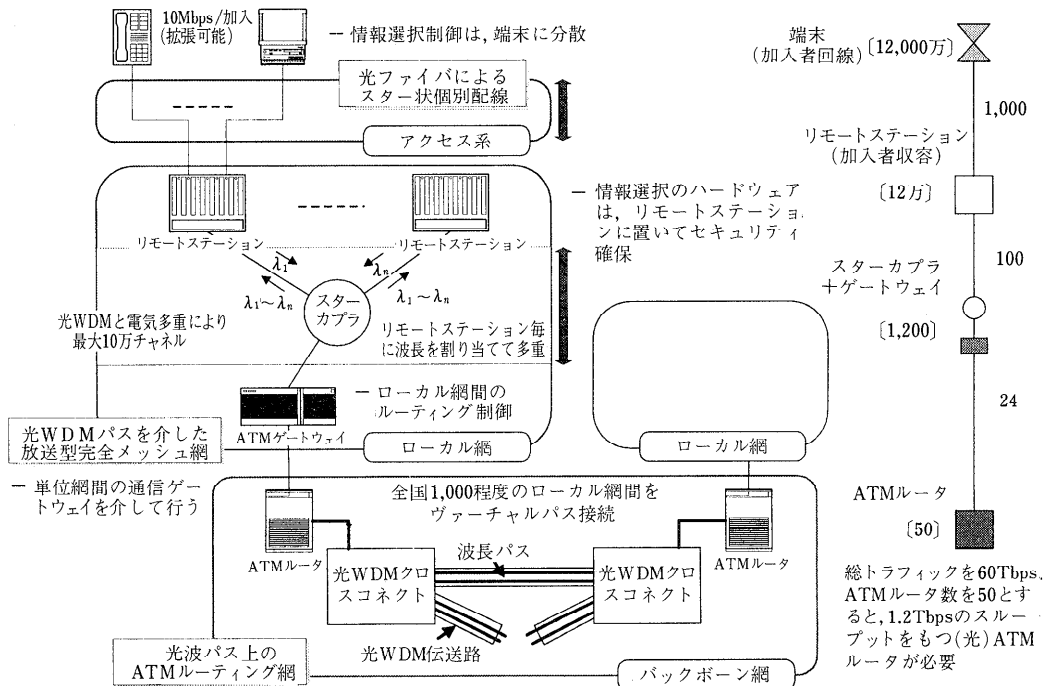


図-2 ハイパーメディア光情報ネットワーク

(1) 広帯域通信を想定し、約10 Mbpsを基本回線速度とする。

(2) 1対1通信のみならず、1対複数のマルチキャスト通信、放送を基本機能として包含する。ほかの通信の影響を受けず、いつでも必要な情報の送信、受信を可能にする。

(3) 通信のプロトコルは極力簡易化し、端末での制御の自由度を高くする。

(4) 端末のポータビリティを確保する。

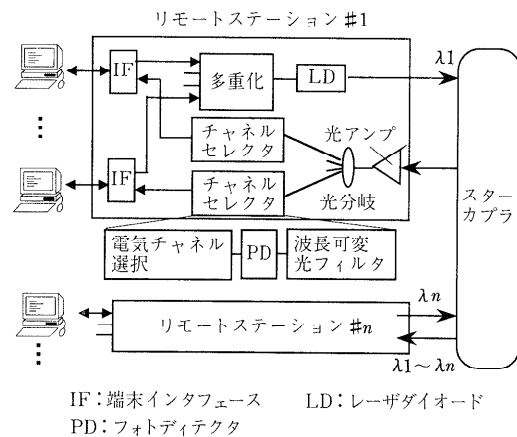
(5) コストは、一般家庭の可処分所得の範囲で利用可能なレベルを目指す。

の5つで、次世代光技術をベースに、ネットワークアーキテクチャも従来の概念を根本的に見直す形で検討を進めている。

ハイパーメディア光情報ネットワークは、図-2に示す3階層の基本構造をもち、とくにローカル網がこのネットワークの特徴を具体化する重要なエレメントとなる。

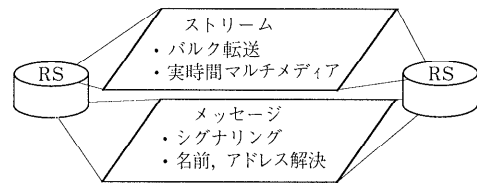
ローカル網は、「分配選択型光 WDM 網」という新しい概念の構造で成り立っている。光の周波数多重技術と電気的な多重技術とを組み合わせると、1本の光ファイバで10 Mbpsクラスの回線を数万チャンネル以上多重することが可能（多重波長数：数10～100、1波長あたりの多重チャンネル数：1,000程度）であり、各チャンネルを収容する全端末（論理的な端末：コネクション型通信では1つのコネクションに対応）にそれぞれ割りあてるようにすれば、数万端末規模の放送型完全非閉塞網が実現できる。すなわち、全端末が常時情報を送出しても輻輳は起きず、しかも、すべての情報は全端末に分配されるので、受け手はほかの通信に影響されることなく、常に希望する情報を受信することができる。こうしたことが可能になるのは、多重・選択技術の進歩だけでなく、光増幅器によって光の分配が自由に行えるようになったためである。このネットワークでは、受信端末ごとに設けた情報選択回路（セレクタ）で情報の選択を行うが、これはちょうどローカル網全体が巨大な1段のノンブロックスイッチング網になったとみなすことができる。

このネットワークでは放送型の情報転送が基本であるため、1対1通信の機密性を確保するには、ネットワーク側で受信側アクセス権を制御する必要がある。図-3は、ローカル網のノードで



IF: 端末インタフェース LD: レーザダイオード
PD: フォトディテクタ

図-3 分配選択型光 WDM 網の構成



RS: リモートステーション

図-4 情報転送モード

あるリモートステーションとそれらを結んだローカル網の構成を表しているが、情報の送信側から送られてくる受信許可端末番号に従ってリモートステーションの受信側でフィルタリングを行い、許可された端末のみ情報の選択ができるようにする。

分配選択型光 WDM 網では、10 Mbps 程度のストリーム型情報転送が基本になるが、情報チャンネルのいくつかをパケット転送用のチャンネルに割りあて、これを用いたメッセージ通信機能を併用することで、ネットワークとしての利用効率や融通性を大幅に向上させることができる⁹⁾ (図-4)。たとえば、サーバから大きなサイズのファイルをダウンロードする場合、サーバ名とサーバに割りあてられたストリームチャンネルとの対応づけなどにメッセージ通信を使用し、ファイル転送は高速のストリームチャンネルを使用する。

5.2 分配選択型 WDM 網のドメイン間通信方式と IP ネットワークへの応用¹⁰⁾

ローカル網を1つのドメインと考えると、全国規模のネットワークを構成するには、相互に接続されたドメイン間通信が必要になる。その場合、

ドメイン内で実現されている諸機能が仮想的に全ドメインに渡って拡張可能であることが望ましい。そこで、ドメイン間通信を想定したいくつかの基本通信手段（通信プリミティブ）を規定し、これを使用して通信 API やアプリケーションを構築する。ドメイン間通信は各ドメインに置かれたドメインマスタ（DM）を介して行い、マルチキャスト通信の場合も、受信者の分散状況に応じて最適な経路選択と情報転送を行うようにする。

ハイパーメディア光情報ネットワークでは、すでに広範に普及している IP ネットワークとの整合性を考慮すべきと考えている。そこで、IP ネットワークに接続するサーバを分配選択 WDM 網にも収容し、エンドーエンド間の情報転送は高速のストリームチャンネルを介して行う「IP バイパス方式」を提案し、その具体化を検討している。本方式は既存のソフトウェアモジュールをそのまま利用するので、インターネットプロトコルとも整合性がよく、実際、すでにプロトタイプシステムを用いた実験で、FTP や HTTP に対して所望の動作が得られることを確認している。

6. おわりに

これからの情報通信ネットワークは、ニーズを適切に捉えて目標を具体的に描くことは非常に難しく、技術の進展の方向によっても大きく左右されると考えられる。そこでネットワーク開発を進める立場から、大胆にその目標イメージを描き、我々自身の研究課題を具体化するとともに、利用される側からのさまざまなご批判をいただきたいという考えで本稿の筆を執った次第である。光技術はまだまだ底知れぬ可能性をはらんでいる。これをいかに役立てていくかは、光の技術者だけでなく、ネットワークやアプリケーションの開発者、さらには利用者までも巻き込んだ議論がぜひ必要であり、本稿がそのための出発点の一部にでもなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 後藤滋樹, 村上健一郎: ギガビットネットワークの壁, 情報処理, Vol. 36, No. 7, pp. 589-595 (July 1995).
- 2) Morioka, T. et al.: 100 Gbit/s \times 10 channel OTDM/WDM Transmission using a Single Supercontinuum WDM Source, Proc. of OFC96, PD21 (1996).
- 3) Sato, K.: Photonic Transport Network OAM Technologies, IEEE Communications Magazine, No. 12, pp. 86-94 (1996).
- 4) Vodhanel, R. S. et al.: National-Scale WDM Networking Demonstration by the MONET Consortium, Proc. of OFC97, PD27-1 (1997).
- 5) Hill, A. M. et al.: Optical Networking in the European ACTS Programme, Proc. of OFC96, Th11 (1996).
- 6) Matsunaga, T. et al.: Design of Photonic ATM Switch and a Rack-Mounted Prototype, Proc. of ICC97, 36.1 (1997).
- 7) 行松健一: ネットワークダウンサイジングとハイパーメディア光情報ネットワーク, 信学技報, SSE96-33 (1996).
- 8) Yukimatsu, K. and Hiramatsu, A.: Hypermedia Photonic Information Networks, Photonic Networks, pp. 67-78, Springer, London (1997).
- 9) 小河原成哲他: 分配選択型 WDM システムの動作確認実験, 信学技報, SSE96-145 (1997).
- 10) 柳谷雅之, 平松 淳, 小河原成哲: 分配選択型 WDM ネットワークにおけるドメイン間通信方式と IPv4/IPv6, 信学技報, SSE96-146 (1997).
(平成 9 年 5 月 7 日受付)



行松 健一

1947 年生, 1971 年東京大学工学部電気工学科卒業, 1973 年同大学院修士課程修了. 現在, NTT ネットワークサービスシステム研究所 主席研究員 (光交換研究グループリーダー), 工学博士. ATM 通信方式, 光交換方式, 光ネットワークの研究に従事. 著書「光スイッチング技術入門」(電気通信協会, 1995). 電子情報通信学会, IEEE 各会員.
e-mail: yukimatu@ps.nslab.ntt.co.jp