

特 別 寄 稿

WDM通信システムとフォトニックネットワークの展望

Prospects on WDM Systems and Photonic Networks

電気通信大学 情報通信工学科 教授

三木 哲也

Tetsuya Miki

1990年代の半頃に初めて商用化されたDWDM（高密度波長分割多重）通信システムは、インターネットの普及と軌を一にして普及してきた。技術開発も非常な勢いで進んでおり、1芯の光ファイバで10 Tbpsを越える大容量伝送が実現されている。いま光通信の研究開発は、WDMをベースとしてネットワークに必要な機能を全て光処理によることで超高速インターネットを実現する、フォトニックネットワークへ向かっている。10年後には、光パケットスイッチによる完全なフォトニックネットワークが実現するものと予測される。

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) transmission systems were commercialized in the middle of 1990s, and have been booming with Internet penetration. The development for larger volume of DWDM systems is also rapidly progressing, and just attained 10 Tbps transmission over a single fiber. Now, the leading R&D for optical communication technologies is towards the photonic networks which process every required network function with optical technologies to realize the ultra high speed Internet. It is predicted that the complete photonic networks will be realized around 10 years from now by the development of optical packet switch.

1. はじめに

近年の光通信関連の技術と産業は飛躍的に発展しているが、その様子を最も良く反映しているのが毎年北米で開催されるOFCという国際会議とその展示会である。昨年はボルチモアで開催され、展示会参加者は約17,000名、会議参加者も4,000名ほどであり数年前のOFCとは様変わりしたことに驚いていたら、アナハイムで本年3月に開催されたOFC2001では、展示会参加者が40,000名弱、会議参加者は11,000にも達したとのことで、その規模は通信分野で最大規模の会議となったのではないだろうか。この背景には、インターネットの普及とITビジネスの勢いに乗ってこの5～6年、北米を中心としたWDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重) 通信の需要が急増していることがある。

長距離伝送路へのWDM通信の導入は1995年頃から本格化した。当初は4波多重であったが、この数年で32波ないし128波へと多重数は飛躍的に拡大してきた。実験室レベルの技術としては、波長あたり40 Gbpsのデータを2百数十波多重化して、1芯の光ファイバで10 Tbpsを越える超大容量伝送を達成するところまできている。

この様にWDM通信技術が進歩し、波長多重数をさらに増加させる見通しも出てきたため、波長を選ぶことによって通信対地を変えたり、通信路を変えることが出来る様なネットワークの可能性が大いに高まってきたのである。

1つの波長上の光信号は途中のノード局において光信号のまま経路を切替えることで、ネットワークに必要な基本機能（既存の概念では伝送と交換の機能）を全て光信号のまま実現できることになる。これが一般にフォトニックネットワークと呼ばれているものであり、これにより電気処理における速度の限界を超える超高速のネットワーク化が可能となる。このような全光のネットワークは「フォトニックネットワーク」と呼ばれており、いま世界的な研究ブームとなっている。

2. WDM通信

WDMは一芯の光ファイバ内に波長の異なる複数の光信号を多重伝送する技術であり、光通信の研究開発が本格化した1970年代の終わり頃には既に着想があった。筆者は早い段階で波長多重の可能性を研究し、1977年に3波のWDM伝送実験を行っている¹⁾。しかし、当時のWDMは光源であるレーザーダイオードの正確な発振波長制御や損失の少ない多波長の光合波・分波器などの実現が難しかったし、光増幅器が存在しなかったため中継点ごとに電気信号に戻して増幅・波形再生を行う必要があったため、幹線系の大容量化を図る目的には適さなかった。幹線系においては、TDM (Time Division Multiplexing : 時分割多重) によって高ビットレート化を進めた方がコストにおいて優位性があった。ただし、アクセス系や近距離通信の領域では中継器の問題がなく、1芯の光ファイバで上り下りの回

線を構成することができ、コスト低減効果が得られることから、WDMが実用に供されていた。この場合は多重数が少ないことと、上り下りの光信号は例えば $1.3\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ というように波長間隔が大きかった。

大容量通信を目的としたWDMは、1990年代に入りエルビウムをドープした光ファイバによる実用的な光増幅器；EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)²⁾ が出現したことで、一挙に実現性が高まった。一方、WDMを使わない従来の光通信システムは順次高速化され、1990年代に入ると10 Gbps システムの研究開発の段階に達していた。この速度の長距離伝送では光ファイバの分散特性（伝送中に光パルス幅が広がる特性）が大きな問題となる。日本では、これを見越して光ファイバが最低損失となる波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で分散を零とする（すなわち、伝送する光信号のパルス幅が広がらない）零分散シフトファイバ（DSF；zero-Dispersion Shift Fiber）を敷設していたため、WDMを用いずに10 Gbpsの光通信システムを商用導入することが出来た。しかし、アメリカでは敷設されていた光ファイバのほとんどが従来型の光ファイバであったことから、10 Gbpsの伝送はそのままでは困難であった。そのため、4波のWDMによって既開発の2.5 Gbpsシステムを4多重して10 Gbps相当の光通信を実現した。これが契機となって1995年頃からWDM通信システムの商用導入が広く始まった。

ここで用いられている技術は、それまでのWDM通信とは違い高密度に光信号を配置するものであり、特にDWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) と呼ばれる。ITUで標準化されている光信号配置は、周波数間隔で100 GHz（波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯では大よそ0.8 nm）である³⁾。

3. DWDM通信技術の急速な進展

期せずして1990年代中頃からインターネットが急速に普及し始めた。そのため高速データ回線への需要はうなぎ上りとなり、特に北米では通信事業の競争の激化から、コストの優位性をもつ超大容量化への投資が競ってなされるようになった。このため、1995年以降は図1に見るように、光通信システムの大容量化が従来とは比較にならない早いテンポで進むことになった。一方、早くから地道に研究されてきたWDM技術の蓄積があったことが、これを可能とした。特に光合波・分波器、レーザーダイオードの発振波長制御、EDFA、光ファイバ分散制御、等々の日本の進んだ光技術に負うところが大きい。

伝送速度の超高速化による大容量化の研究開発も行われており、すでに40 Gbpsの伝送技術は実現されている。しかし、経済性を考慮すると実用化への判断は難しいところにある。これは、電子回路の高速化技術が電子デバイスの限界に近づいていることの現われである。このようなことから、今後の光通信の大容量化はWDM技術が主流になることは間違いない。

DWDMの多重数は年々増加し、製品としても既に120

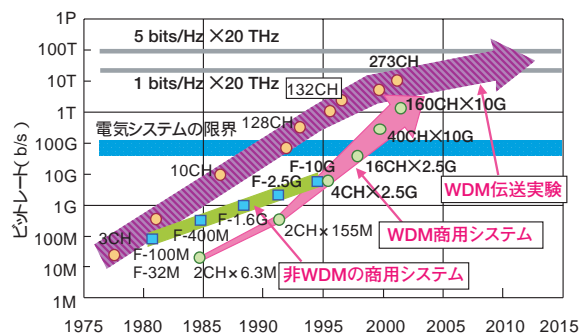


図1 波長分割多重 (WDM) 通信技術の発展

波ないし160波をうたう光通信システムが出現している。現在は1波当たり10 Gbpsが主流であり、1芯の光ファイバ当たりの伝送容量は1.2~1.6 Tbpsという膨大なものとなる。

一方、研究の最前線では数年前からテラビットに達するDWDMの伝送実験の結果が発表されてきたが、前述のOFC2001においては日本電気⁴⁾とアルカテル⁵⁾から10 Tbpsを越えるDWDMの伝送実験が発表されて話題を呼んだ。この発表を含めて、最近の国際会議での同様な発表を表1に示す。この表でも明らかなように、超大容量化を実現するには複数の光増幅器を組合せて広い波長帯をカバーする必要がある。先の日本電気が行った10.92 Tbpsの伝送実験では3種類の光増幅器（2種類のEDFAとTDFA：Thulium-Doped Fiber Amplifier）が用いられている。また、最近では増幅する波長帯に対する自由度の大きいラマン増幅器の実用化へ向けた開発が各所で行われている。

超大容量化という目的にWDMは大変な効果を発揮しているが、1芯の光ファイバによる伝送容量の可能性という観点では、その限界にかなり近づいてきた。通常の2値伝送では1 bit/Hzの伝送効率が妥当であるから、光ファイバが利用できる低損失領域を周波数に換算しておおよそ20 THz程度とすると、伝送容量は高々20 Tbpsということになる。先のアルカテルが行った10.2 Tbpsの伝送実験では、VSB (Vestigial Side Band) 変調と偏波多重を用い、さらに特殊な周波数配置を行うことによって1.28 bit/Hzという高い伝送効率を実現している。光領域では高度な信号処理は難しいが、無線通信で使われている64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) のような高効率な変調技術が将来は実現できたとしても周波数利用効率は5 bit/Hz程度であるから、100 Tbps程度の伝送容量が限界となろう。

このような段階に到達し、これからのWDM技術は、高度な光ネットワーク化に向けた応用や、伝送容量の拡大よりも経済性や保守性を重視した広い分野への応用へと進みつつある。そのうちの一つの新しい動向は、メトロネットワーク（都市部を中心とした地域ネットワークを米国ではこう呼ぶ）やアクセスネットワークにおけるCWDM (Course WDM) の適用である⁶⁾。CWDMというのは、近距離伝送において光増幅器を使わなくとも済むような場合、光増幅

表1 ECOC2000およびOFC2001(*印)に発表されたWDM伝送実験

	伝送容量 (Tbps)	速度 (Gbps)	波長数	伝送距離 (km)	パルス 形式 変調形式	周波数 間隔 (GHz)	帯域利用 効率 (bps/Hz)	光アンプの 種類(注)
日本電気	6.4	40	160	200	NRZ	50	0.8	ED
Alcatel	5.12	40	128	300	NRZ	50/75	0.64	ED + Raman
Siemens	7.04	40	176	50	NRZ	50	0.8	ED
Nortel Networks	1.28	40	32	1,000	RZ	100	0.4	ED + Raman
KDD 研究所	2.0	20	100	2,700	RZ	35	0.6	ED
Tyco Labs	1.12	20	56	6,200	RZ	50 - 83	0.4	ED
三菱電機	1.0	20	50	4,100	RZ chirped	50	0.4	ED
富士通	2.11	10	211	7,200	RZ	37.5	0.26	ED + Raman
日本電気*	10.9	40	273	117	NRZ	50	0.8	ED + TD
Alcatel*	10.2	42.7	256	100	NRZ VSB	50/75	1.28	ED

(注) ED : Erbium-Doped Fiber Amplifier, TD : Thulium-Doped Fiber Amplifier, Raman : Raman Amplifier

器の利得を有する波長にとらわれずに広い波長帯域にわたって光信号を配置するWDMのことである。検討されている波長間隔は20nmであり、波長域は1280nm～1625nmである。これをDWDMの波長域と比較して示すと、図2のようになる。波長間隔が広いことで、レーザーの発振波長を安定化する制御系が不要になることや、合分波器の特性を緩和できることで、システム的大幅な低コスト化が期待されている。

なる。そこで、光信号のままノード局で必要な波長パスの処理を行う必要性が出てきた。処理する機能は電子的なADMシステムやXCシステムと同じであるが、それを波長の単位で行うのである。このような光装置はOADM (Optical Add Drop Multiplexer) およびOXC (Optical Cross Connect) と呼ばれている。

これらOADMおよびOXCを用いたネットワークは光信号のままノード局を通過させたり対地の設定・切換えを行うことができるので、従来の光通信とは本質的に異なり、光波ネットワークまたはフォトニックネットワークと呼ばれる⁶⁾。各波長で伝送されている信号をさらに木目細かく処理するためには、既存のADMシステムあるいはXCシステムを使うことになる。

OADMおよびOXCによる光ネットワークの構成図を図3および図4に示す。

OADMは小規模な光ネットワークを作るのに都合の良いシステムである。リング状に接続されたWDM伝送路から、自ノードに必要な波長(パス)を光フィルタによって取り出し、あるいは挿入する機能があれば良い。リングネットワークの信頼性を確保するには、障害があった場合は

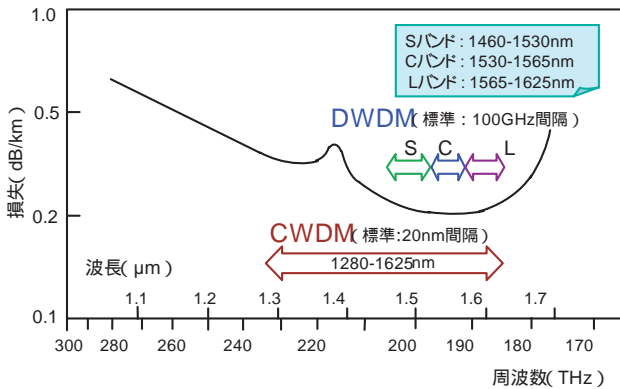


図2 光ファイバの損失特性とWDMの波長帯

4. WDMによるフォトニックネットワーク

現在のWDM通信は、いわゆる2地点間の伝送路の大容量化を図る技術として発展してきた。したがって、端局すなわちノード局においては、すべての光信号は電気信号に変換され、回線の処理は全て電子的に行われている。それは、既存のSDH/SONET仕様のADM (Add Drop Multiplexer) またはXC (Cross Connect) 装置によって行われる。しかし、WDM通信システムの波長多重数が増すにつれて、ADMやXCの装置群も増大し、スペースも必要に

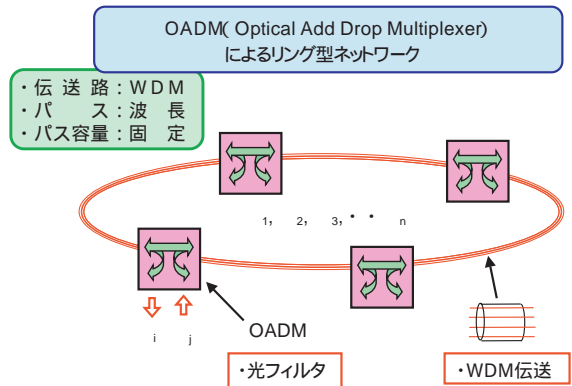


図3 OADMによるフォトニックネットワーク

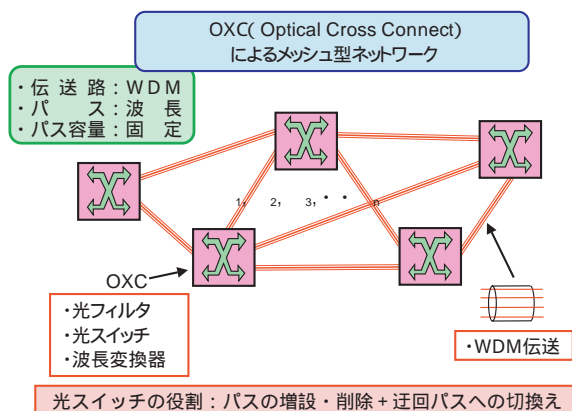


図4 OXCによるフォトニックネットワーク



図5 SUPERCOMM2001における光クロスコネクシステム (OXC) の試作品展示 (NTT 未来ねっと研究所提供)

その区間の両側で波長パスを折り返す機能を必要とするが、高速性はそれほど必要ないので、機械式の光スイッチなどによって実現できる。すでにこのタイプのOADMは製品化されている。

OXCは、一般にメッシュ状のネットワーク構成をとっている幹線ネットワークなどの大規模ネットワークにおいて、対地が数多くなり任意のパス設定が必要となるときに必要となる。この場合には、自ノードに必要な波長（パス）を取り出すための光フィルタは勿論のこと、方路を切替える光スイッチが必要となる。また、同一方路に設定したいパスの波長が競合する場合があるために、事前にどちらかの波長を変換して出方路での波長の競合を避ける必要がある。そのため、波長変換器が不可欠となる。また、各ノードのOXCは連携して動作する必要があるため、OXCの制御ネットワークも必要である⁸⁾。

光スイッチについては、ルーセント社が発表したマイクロミラーを使うMEMS (Micro Electro-Mechanical System) スイッチが注目されている。これは2軸の可動機構付きの直径0.5 mmほどの微小なミラーを平面上にマトリクス状に配置し、入力側nポートからの光ビームを空間的に任意の方向に制御し、出力側nポート中の任意のポートへ導くことによって、n対nの光スイッチを立体構造で構成するものである。このMEMSスイッチと波長変換器を組合せた100対100のOXCの試作装置が発表されている⁹⁾。

種々の構成法によってOXCの試作は数多く行われており、商用化も間近い状況にある。図5は今年のSUPERCOMM2001にNTTが展示したOXCである。

5. 高度なフォトニックネットワーク

1990年代中頃から広く普及しはじめたインターネットは、パソコンの普及、ネットワークビジネスの開発などで先行する北米において動きが最も顕著であり、データ通信のトラフィックを急増させ、結果としてWDM通信システムへの需要を大きく喚起した。日本においてもそれを追う状況が生じており、インターネット指向のネットワーク化

が進むと考えられる。その裏づけは情報通信の全トラフィックの傾向を調べることによってはっきりする。

図6は、日本の情報通信トラフィックの増加傾向を、メリルリンチ社の調査結果を参考に作図したものである。従来の情報通信の主流は電話（固定電話、携帯電話、PHSの和）であったが、インターネットを中心とするデータ通信の増加率は著しく、昨年にはデータ通信トラフィックが電話のトラフィックを追い抜いた。さらに、今後とも現在のトラフィック増が続くとすると、データ通信は10年後には現状の1,000倍ないし10,000倍に増加することになる。

このようなトラフィックの傾向から、今後のフォトニックネットワークの研究開発は、インターネット用のIPパケットをいかにネットワーク上を効率良く疎通させるかが課題となっている。このためには、IPパケットのルーチングが可能なフォトニックネットワークということになる。しかし、ふんだんにメモリを用い、プロセッサによるソフトウェア処理をベースに作られたIPルータ機能をそのまま光化することは得策ではない。そこで、WDM通信をベースとした光通信技術と調和できるパケットネットワークの構成法が検討されている。

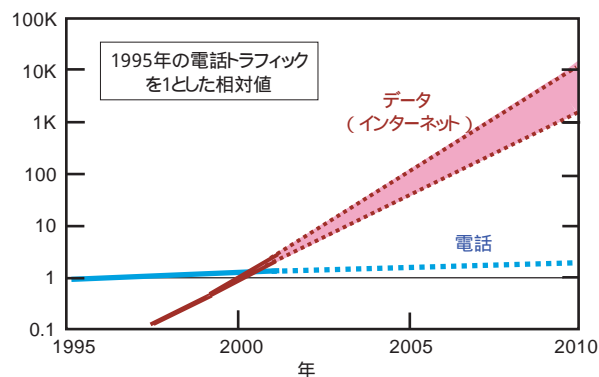


図6 情報通信トラフィックの増加傾向

近い将来に、最も実現性が高いと考えられている構成法は、既存技術による電子的ルータと光スイッチを連携動作させることで、大容量のトラフィックが存在するルートには波長を割当てパケットを連続的に伝送できる波長パス（これをストリームと呼ぶ）を設定し、トラフィックの少ないルートのパケット処理は電子的ルータで行う方法である。

さらに、1波長を単位としてルートに割当てるのは、伝送効率が良くないので、1波長の中にいくつかのルートに対応する光信号を時間的に切換えて乗せる方法（これをバーストスイッチと呼ぶ）も検討されている。この場合も、トラフィックの少ないルートのパケット処理は電子的ルータで行い、光バーストスイッチ部と電子的ルータ部がトラフィックの状況に応じて連携して動作するようにする。ここで、光スイッチ部と電子的ルータからなるシステムを光ルータと称する。このようなネットワークの構成を単純化して図示すると図7のようになる。

光ルータをノードに配置した光ネットワークは、外部から見れば単なる伝送機能のみならず、パケット信号に対するルーティング機能を備えたものであり、ほぼオール光のネットワークと見なすことが出来る。このような光処理が高度化した光ネットワークをフォトニックネットワークと呼んでいる¹⁰⁾。

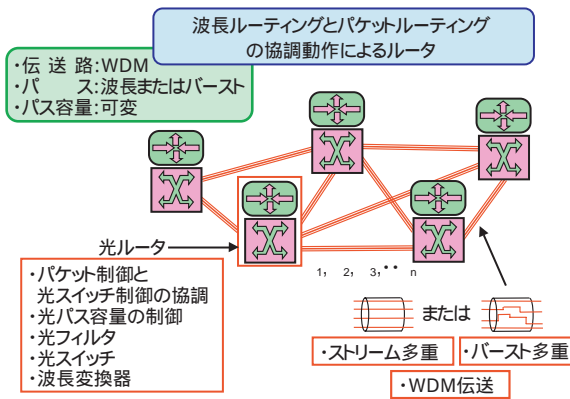


図7 光ルータによるフォトニックネットワーク

さらに進めて、パケットのルーティングに必要なスイッチやバッファメモリなどの機能を全て光回路によって実現することが出来れば、電子的な信号処理の速度限界を越える光信号処理型のルータが可能となる。このようなルータはフォトニックルータと呼ぶに相応しく、より完全なフォトニックネットワークが実現できることになるが、そのイメージを図8に示す。このタイプのフォトニックルータは、現在のところは基礎研究の段階であるが、10年程度の将来には実現できるものと考えられる。最も基本的な課題は、パケットの競合に対してパケットを退避させるバッファメモリがパケットスイッチには不可欠であるが、光領域で超高速に読み書きの出来る光メモリが今のところ実現されて

いないことである。光ファイバを遅延線として使い、不完全ながらバッファメモリとして動作させることなどの工夫によって実験をおこなっている状況である。光メモリのみならず、ルータには種々の処理機能が必要であるため、これらを可能とする新しい原理のデバイス技術が必要になってくる¹¹⁾。

フォトニックネットワークのいくつかの段階について、階層構造の違いを示すと図9のようになる。また、予想される商用化へ向けた展開は図10のようになろう。

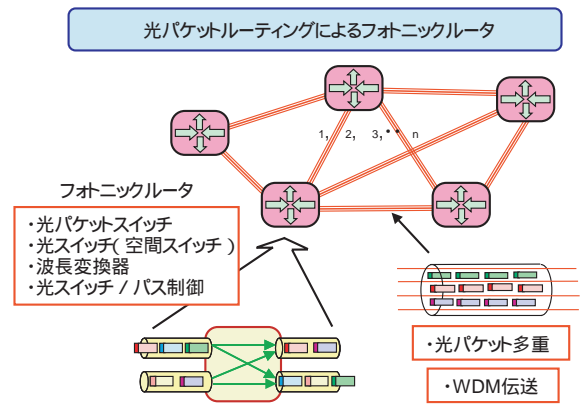


図8 フォトニックルータによるフォトニックネットワーク

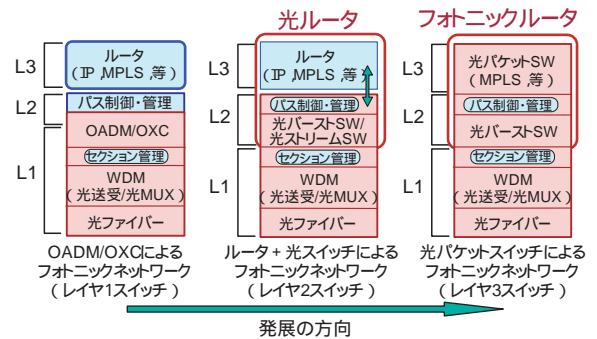


図9 フォトニックネットワークの階層構造

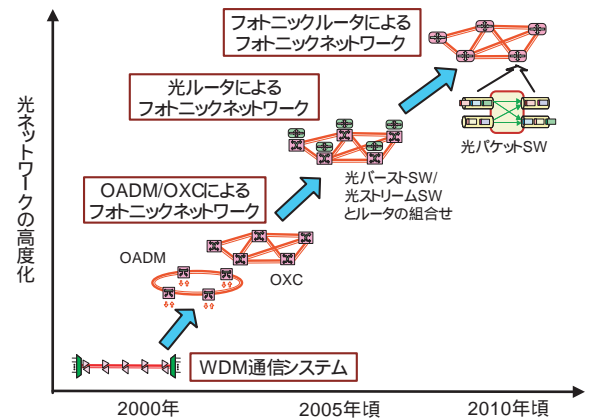


図10 WDM通信からフォトニックネットワークへの展開シナリオ

6. 将来のトレンド—あとがきに代えて

現在、日本でもインターネットのブロードバンド化が急速に進みはじめた。ユーザ数も大分増えよう。また、インターネット上での仕事や、娯楽、生活情報の収集も一層増えよう。これらの相乗作用によって、10年後のトラフィックが現在の1,000~10,000倍というのは妥当なように思える。問題は、トラフィックの流れがどのように変わるかである。それによって、情報通信ネットワークの具体的な作り方や投資の傾向が変わってくる。

筆者は、将来は次の様にトラフィック形態が変わってくると予想している。トラフィックの内訳は、電話型のリアルタイム通信は全体の極区一部となり、大部分はWEB型の情報検索や、インターネットで映画を楽しむような非リアルタイムの情報通信となるであろう。非リアルタイム情報はすなわちサーバ（データベース）に蓄積されている情報である。一方、ユーザの立場で考えると、電話型の通信が最小遅延時間のリアルタイムで行われなければならないことは勿論のこと、非リアルタイム情報と言えども欲しいと思ったら直ちにリアルタイムで手元に届いて欲しい。すなわち、いずれも最小遅延時間の情報通信が必要と言うことになる。現在のインターネット型のネットワークは全ての通信に対してリアルタイム性を保証することが難しい。ところが、もともとはWEB型の非リアルタイム情報が大部分であるから、必要な情報はキャッシュ技術を使って近くのサーバに蓄えられるようになっていけば、全てのトラフィックに対して最小遅延時間の通信が必要なのは、メトロとアクセスネットワークに限ることが出来る。図11にその様子を示す。長距離通信の部分では、大部分のトラフィックがキャッシングのためのファイル転送であり、電話型のリアルタイムトラフィックは限定された一部となる。このようなトラフィック状態であればリアルタイム通信の伝送品質と遅延時間を保証する方法はいくつも考えられ、長距離ネットワークにおける問題は少ない。

従って、今後のネットワークの最重要な課題は、メトロ・アクセス系の大容量通信ネットワークをどのように構成するべきか、ということになる。先に述べた光パケットスイッチによるフォトニックネットワークは、現在のパケットネットワークをモデルにした一つのコンセプトではあるが、まったく別のコンセプトもあり得るのではないだろうか。例えば、5,000波オーダーの超多重WDMというのも考えられる。光ファイバを電波と類似の光波空間と考え、ラジオやテレビの感覚で必要な情報へアクセスすることも考えられる。

いずれにしても、全ての家庭にブロードバンドインターネットが行き渡り、FTTHも当たり前という世の中が早く到来することが望まれる。

本稿が、今後の光通信技術を考える上で、多少なりとも参考になれば幸いである。

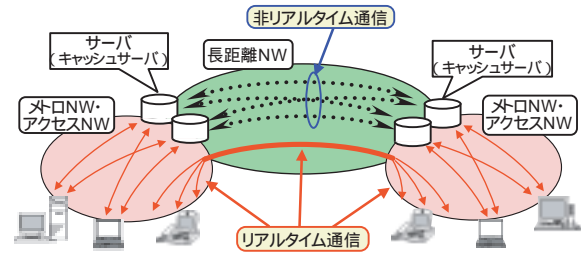


図11 将来のトラフィック形態の予想

参考文献

- 1) T. Miki and H. Ishio: Viabilities of the Wavelength-Division Multiplexing Transmission System Over an Optical Fiber Cable, IEEE Trans on Comm., Vol.com-26, No.7, p.1082-1088 (1978)
- 2) S.V.Kartalopoulos: Introduction to DWDM Technology, IEEE Press, 1999.
- 3) P.C. Becker, N.A. Olsson and J.R.Simpson: Erbium-Doped Fiber Amplifiers, ACADEMIC PRESS, 1999.
- 4) K. Fukuchi, et al.: 10.92-Tb/s (273 x 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment, OFC2001, PD24, March 2001.
- 5) S. Bigo, et al.: 10.2Tbit/s (256 x 42.7Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100km TeraLight fiber with 1.28bit/s/Hz spectral efficiency, OFC2001, PD25, March 2001.
- 6) P. Humblet: The direction of optical technology in the metro area, OFC2001, WBB1, March 2001.
- 7) 三木哲也: 光波ネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-B-I, No.5, p.251-258 (1994)
- 8) S. Okamoto, et al.: Robust Photonic Transport Network Implementation with Optical Cross-Connect Systems, IEEE Communications Magazine, Vol.38, No.3, p.94-103 (2000)
- 9) J. Leuthold, et al.: All-Optical Nonblocking Terabit/s Crossconnect Based on Low Power All-Optical Wavelength Converter and MEMS Switch Fabric, OFC2001, PD-16, March 2001.
- 10) 青山友紀: フォトニックネットワークの展望, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.7, p.704-712 (1999)
- 11) 大津元一: ナノフォトニクスとその展望, 電子情報通信学会誌, Vol.84, No.1, p.26-32 (2001)



三木 哲也 (みき てつや)

電気通信大学 情報通信工学科 教授 工博
1970年3月東北大学大学院博士課程修了
同年、電電公社入社、1992年NTT光ネットワークシステム研究所長、1995年現職
光通信、情報ネットワーク等の教育研究に従事。