

## 5.3 ■ 情報処理技術 — 過去十年そして今後の十年 —

# コンピュータネットワークを支える 通信技術

行松 健一 日本電信電話（株）情報流通基盤総合研究所

コンピュータネットワークを支える通信技術について、ハードウェア技術や通信プロトコルを中心にその発展の歴史を振り返る。また、1980年代後半からの通信ネットワークの発展過程を電話網とインターネットを対比する形で辿り、最新の技術動向を踏まえて、それらが今後どのような展開をするのかを大胆に予想してみる。ハードウェア技術の中では、特に通信容量の飛躍的な拡大、通信品質の向上をもたらした光通信技術に着目して最近の技術動向を詳しく述べるとともに、光技術やモバイル技術がこれまで培われてきたネットワーク技術と密に融合することによって、情報通信の領域でさらに大きなパラダイム変化が起きる可能性があることを述べる。

「あなたはパソコンをお持ちですか？」文学部の学生に向かってこう質問したとしよう。10年前ならおそらく怪訝な顔をされただろうが、今なら「ええ、持っていますよ。だって、パソコンがなくては友達とメールのやりとりができませんから。」という返事がすぐに返ってくるに違いない。10数年前の大型コンピュータに匹敵する処理能力を持ったれっきとした「コンピュータ」がここまで普及したのは、小型、低廉、省電力を達成した高集積半導体技術などハード面の進歩によるところが確かに大きい。同時に「電子メール」「Webアクセス」といった新しいアプリケーションを利用する手段として多くの人たちに受け入れられたという面も見逃してはならない。親しい友人と気軽にコミュニケーションしたい、知らない人とも仲良くなりしたい、知らないことをもっと知りたい、そしてそれによって人生をより充実させたいという人間の根源的な願望と結びついたからこそ、「情報通信のパーソナル化」がここまで進んだといえる。このことは、携帯電話がわずか数年で数千万台にまで普

及したことをみても明らかであろう。携帯「電話」が携帯「情報端末」としてごく当たり前に使われるようになるのも、もはや時間の問題である。このように、「コンピュータ」と「通信」と「個人」がしっかりと結びついたことは、さまざまな技術革新を成し遂げた20世紀の棹尾を飾る最大の「事件」の1つであるといっても過言ではない。

本稿は、「情報通信のパーソナル化」に至る技術の歩みとその将来について、主に「通信技術」に焦点をあてて述べるのが目的である。前半では、通信技術や通信ネットワークが、特にここ10年ほどでどのように発展してきたのかをさまざまな角度から振り返ってみる。さらにそれを踏まえて、今後情報通信がどのような方向に進んでいくのか、また解決すべき課題は何なのかといったことを、私見を交えて述べてみたい。

筆者は長年、公衆通信キャリアの研究所に籍を置いて交換システムや通信ネットワークの研究に携わってきたが、電信・電話を起点として成長してきた公衆通信ネットワークのパラダイムが、今まさに大きく変わ

ろうとしていることを強く感じる。とはいえ、それは単に電話網からインターネットへとといった単純な遷移ではないだろう。まだ明確な答えは見つからないが、これまでの技術やネットワークの歴史をもう一度見直してみることによって、多少なりともその答えに近づくヒントが得られるのではないかと考えている。

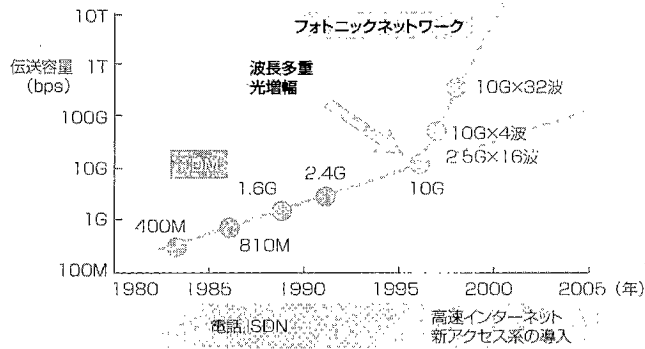


図-1 大容量光伝送方式の研究動向 (出典：NTT技術ジャーナル)

### ■ハードウェア技術のキーワードは光とデジタル

まず、通信の基幹となるハードウェア技術から振り返ってみることにしよう<sup>1)</sup>。

光通信の研究は、1970年代に入ってその基本要素である低損失光ファイバやレーザの実用化が急速に進み、1981年には最初の本格的な光伝送システムであるF-32M/F-100M方式が商用化された。1980年代半ばには、全国縦貫光ケーブルルートが完成している。さらに、1989年にエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)が実用化されると、光伝送の中継間隔は飛躍的に拡大し、1990年代前半には長距離伝送システムの光化が一気に進んでいった(図-1)。1995年には我が国の市外電話回線の全デジタル化が達成されている。

我が国の長距離光伝送システムは光ファイバの伝送損失が最も低い1.55 $\mu$ mの波長帯を使っており、2.4Gビット/秒ないし10Gビット/秒の伝送容量を持つ。これによって、電話換算で10万回線以上を1本のファイバで伝送できるため、従来の同軸ケーブルを用いる方式に比べて1回線あたりのコストが大幅に低下した。同時に伝送品質(ビット誤

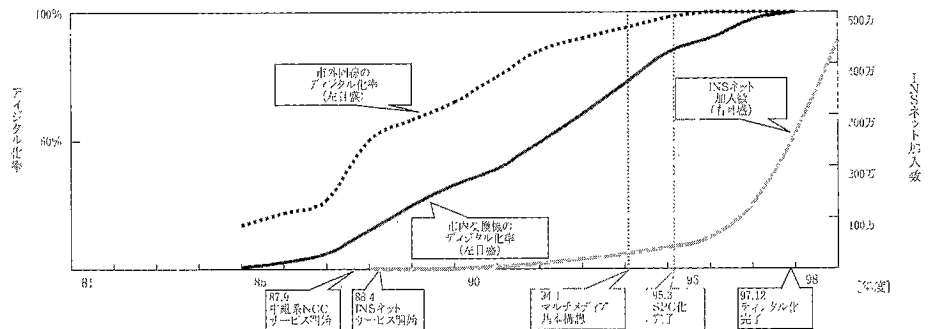


図-2 ネットワークデジタル化の進展 (出典：インフォメーションNTT1999)

り率)も大幅に向上し、1989年に国際標準化されたSDH<sup>☆1</sup>(Synchronous Digital Hierarchy)方式の採用によって、さまざまな障害に強く柔軟性の高いネットワークが構築できるようになった。

「電話網」として発達してきた公衆通信網において、もう1つの重要な構成要素は交換システムである。制御系の電子化は1960年代から始まり、コンピュータと同じ蓄積プログラム方式を採用することによって高機能化、融通性の向上が図られたが、スイッチそのもののデジタル化は、経済的な理由などによって伝送システムより遅れて進行した。しかし、1990年代に入るとデジタル交換システムの導入も急速に進み、1997年度までにはすべての交換機のデジタル化が完了した(図-2)。これに伴い、全国どこでも64kビット/秒のデジタル回線交換<sup>☆2</sup>サー

ビス(INSサービス)を利用できるようになり、アナログ音声を伝達するという従来の電話網の役割がここで大きく変わることになった。ISDN(Integrated Services Digital Network)時代の幕開けである。

一方、端末と中継ネットワークを繋ぐアクセスラインの部分は、まだ大半が電話用に敷設された銅線で、INS64サービスを提供する際には、回路的な工夫によって64kビット/秒 $\times$ 2回線の双方向デジタル伝送を行っている。最近では、メタリック線を使って数100kビット/秒程度のデジタル伝送が可能なADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)などが実用化されているが、この方式はアクセスラインの長さや収容条件による制約があるため、現在の電話加入者すべてが利用できるわけではない。今後は銅線を光ファイバで置き換えるFTTH(Fiber-

<sup>☆1</sup> 物理的な伝送路に、時分割多重で多数のデジタル情報チャンネルを多重伝送するための方法を定めたITU-T勧告。SONETとも呼ばれる。SDHのフレームには情報チャンネルだけでなく、保守・運用に関する情報も含まれる。

<sup>☆2</sup> 通信の要求があると、エンドーエンド間に一定速度(帯域)のチャンネルを割り当て、通信中はそれを占有させる方式。電話網やISDNは回線交換方式のネットワークである。他の通信の影響を受けることなく通信品質を一定に保つことができるが、情報を送らない時にもチャンネルを占有しているため、短いコマンド/レスポンスのやりとりをするような場合は効率が悪い。

To-The-Home) が確実に進んでいくものと考えられる。

### ■パケット、IP、ATM

初期のコンピュータ通信はアナログ電話回線やアナログ専用線を用いてコンピュータ間を直接繋ぎ、簡単な伝送手順を用いてたかだか数kビット/秒の情報伝送を行っていた。その後、IBMが情報をブロック化して転送する高速同期伝送手順SDLC (Synchronous Data Link Control) を発表すると、それをもとにブロック化情報に宛先を示すラベルをつけて多重伝送・交換するパケット交換方式が生まれた。1970年頃には、すでに無線回線を用いたALOHAシステムの実験が行われている。

この方式は、間欠的に発生するデータ情報を効率よく多重でき、しかも交換機のような特別の設備がなくともコンピュータと通信回線だけでどこへでも情報を伝達できるという特徴を持っている<sup>2)</sup>。これは、当時核戦争にも耐え得る高信頼ネットワークを必要としていた米国DoD (国防省) の要請にうまく合致し、その実用化に多額の補助金が大学などに出された。同じ頃、公衆通信キャリアは、データ通信サービス用にコネクション型<sup>3)</sup>のX.25方式の標準化を進めていたが、品質優先でオーバヘッドが大きかったため、DoDのARPA網では独自のプロトコルが開発された。これが、後のTCP/IPである。当初、TCP/IPは片方向のデータ伝送が主で、拡張性・融通性が高いこと、通信処理の負荷ができるだけ軽いこと、アプリケーションソフトとの親和性が高いことなどが優先された。

一方、1980年代に入ってデジタル電子回路の高速化、高集積化が進

むと、パケット交換のようなラベル多重・ルーティング方式を基本に、一定の品質を保証しつつ効率のよいマルチメディアネットワークを実現しようという研究が始まる。そこでは、双方向の音声通信が回線交換並みの品質で提供できることを前提に検討が進められ、情報を48バイト(ヘッダ5バイト)の固定長ブロック(「セル」)に区切る方式が採用された。また、専用のハードウェア回路で高速にセルをルーティングすることによって、スイッチング能力を高め、かつスイッチング時間を大幅に短縮するようにした。これが、ATM (Asynchronous Transfer Mode) 方式である<sup>3)</sup>。現在標準化されているATM方式では、品質を一定に保つため、X.25プロトコルと同様、通信開始の時点であらかじめ端末間に仮想的なコネクションを設定するのが特徴である。ただし、X.25のようなリンク・バイ・リンクの誤り制御やフロー制御は行わない。

1980年代後半から1990年代前半にかけてATMスイッチのさまざまな構成アルゴリズムが提案され、高速LSIを用いた大容量ATM交換機が次々と実用化されていった。現在では、数100Gビット/秒程度の処理能力を持つATM交換機が実用化されている。さらに、光スイッチング技術を適用したより高速で大容量のシステムの研究<sup>4)</sup>も進められている(図-3)。

ATMは、音声や画像を含むマルチメディア通信用の方式として開発が進められてきたが、現在の電話サービスを直ちにATMに移行させるという状況には至っていない。そこで、当面の適用範囲は高速で低コストなデータ通信ということになる。一方、データ通信はここ数年で急速にIP化が進んでいるため、IPパケットをATMセルに分割し、ATM網

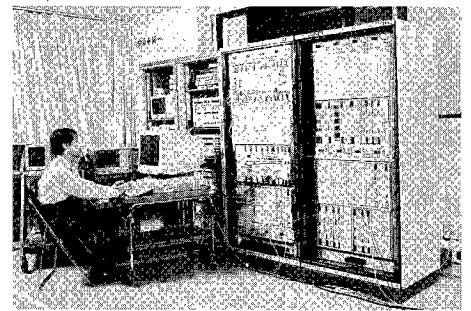


図-3 光ATM交換機の試作システム

経由で一気に高速転送しようという考え方が出てくる。これがIP over ATMという方式である。しかし、その一方で、IPプロトコルとATMプロトコルには機能的に重複する部分があり、IPパケットをさらに短いATMセルに分割するのは効率が悪いという見方もある。IPパケットをSDHのチャネルを使ってより効率的に転送しようという方式を総称してIP over SDHと呼ぶ。図-4に示すMAPOS<sup>5)</sup>はその一例である。このところ、IPパケットの転送にATMを使うことの是非が盛んに議論されているが、その主張のなかには新たなビジネスチャンスをつかむためのプロバガンダに類するものも少なくはない。今後は、すでに標準化された方式だけにこだわらず、利用者の利便性と利益を優先させた真に技術的な議論を深め、着実に実用化を進めていくことが重要である。

### ■電話網とインターネット

ここで、電話網とインターネットの成長過程の違いをもう一度振り返ってみたい。

電話は、そもそも「わざわざ移動して行かなくても、離れた場所にいる人と即時に会話ができる」ことが目的であり、一定の品質を保ちつつ

<sup>3)</sup> パケット転送方式の一種で、複数のパケットからなる一連の情報転送において、エンドーエンド間に仮想的(論理的)なコネクションを設定し、パケットの順序逆転などが起こらないように制御する。これに対して、個々のパケットを独立に転送する方式をコネクションレス型という。

・ LANからWANまでシームレスなネットワーク

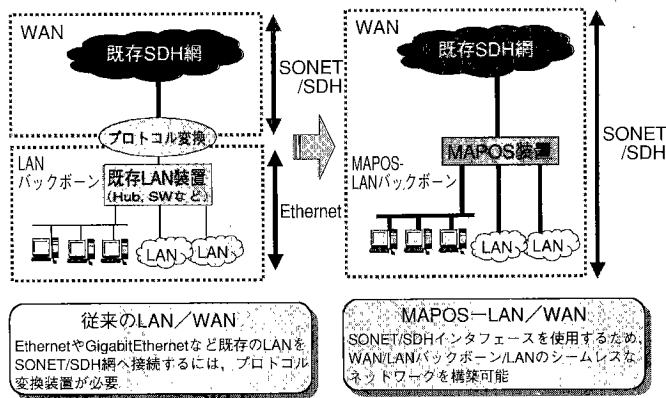


図-4 IP over SDHの研究例-MAPOS-

いかに距離を伸ばし、通信できる範囲を広げていくが常に最優先課題であった。また、最初から一般の人(すなわち特殊な技能を持った専門家ではない人)が利用する公衆網であることを大前提としていた。

一方、コンピュータネットワークは、「スタンドアロンでも機能するコンピュータを通信回線で繋いで付加価値を高める」ことから出発しており、最初は利用者がコンピュータの専門家に限られていた。したがって、まずは近くのコンピュータ同士をできるだけ簡単にコストの安い方法で接続し、限られた利用者が互いに了解しあって利用できればよいというのが基本であった。これがLAN (Local Area Network) であり、コンピュータネットワーク独特のネットワーク形態である。確かに、でき上がった結果だけをみると、電話網でのPBX (Private Branch Exchange) を使った内線通話はLANと同じようにも思えるが、PBXの場合はあくまで公衆電話網が先に存在し、その枝を広げるために設置された機器と考えるべきである。「ネットワークや機能は必要に応じてまず局所的に実現し、徐々に周りと整合させながら広域ネットワークへと発展させていく」というの

が、LANから出発したインターネットの基本思想であり、これが、「まずネットワーク全体から考える」という電話網(公衆網)の思想と大きく異なる点である。

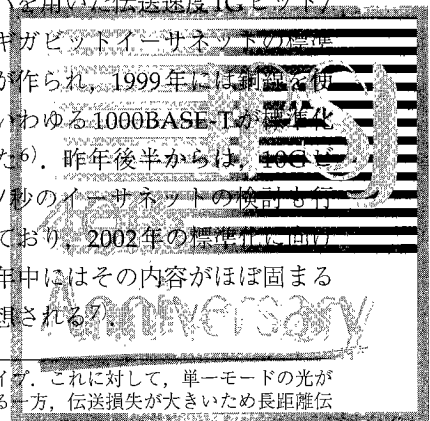
しかし、こうした両者の違いは、近年次第に曖昧になってきている。たとえば、プロバイダを介してインターネットにアクセスする一般の利用者(ホームユーザ)にとっては、自分が特定のLANに属しているという意識はなく、インターネットアクセスという基本サービスに対しては、できるだけ均一で安定した品質を求めている。一方、電話網においては、サービスが多様化しており、全国均一に導入できるかどうかの判断を待つことなく特定の地域だけ新サービスを先行導入するケースや、希望する利用者だけにカスタムサービスを提供するといったケースが今後ますます増えていくと思われる。また、情報のマルチメディア化によってトラフィック変動の予測が困難になると、範囲を限って品質保証するようなネットワークの構造なども考えていかなければならない。こうしたボトムアップ的な考え方は、今後公衆網(ISDN)全体のアーキテクチャにも徐々に反映されていくことであろう。

## ■イーサネットからギガビットイーサネットへ

インターネットの構成単位であるLANの基本技術はイーサネット(Ethernet)である。これは、1980年代の半ばから1990年にかけてIEEE標準802.3として標準化され、その後急速に普及していった。

イーサネットは簡便で低コストである反面、スループットが最大10Mビット/秒でケーブル長もただ数100mに制限されることから、1990年代になると、より高速で伝送可能距離の長い方式への要求が顕在化してくる。その1つの答えが、光ファイバを用い100Mビット/秒で最大200kmの伝送が可能なFDDI (Fiber Distributed Data Interface) である。これは、もちろんLANにも適用できるが、比較的安価なマルチモードファイバ<sup>☆4</sup>や発光ダイオードを使うにもかかわらず、イーサネットに比べるとかなりコスト高であるため、結局LANとしてはほとんど普及しなかった。現在では、LAN間のバックボーンネットワークとして使われている。その一方で、高速LANへの要求に答えるため、IEEEでは機能は従来のままで伝送速度を100Mビット/秒にしたファーストイーサネット (Fast Ethernet) を1995年に標準化した。このうち銅線(撚り対線)を用いるものを、従来の10BASE-Tに対して100BASE-Tと呼んでいる。さらに、1998年には光ファイバを用いた伝送速度1Gビット/秒のギガビットイーサネットの標準規格が作られ、1999年には銅線を使ったいわゆる1000BASE-Tの標準化された<sup>6)</sup>。昨年後半からは、40Gビット/秒のイーサネットの検討も行われており、2002年の標準化に向けて今年中にはその内容がほぼ固まると予想される<sup>7)</sup>。

☆4 光ファイバの一種で、モードの異なる複数の光がコアとクラッドの境界で反射を繰り返しながら伝播していくタイプ。これに対して、単一モードの光がコア内を直進していくタイプをシングルモードファイバと呼ぶ。マルチモードファイバは製造が容易で安価である一方、伝送損失が大きいため長距離伝送には適さない。



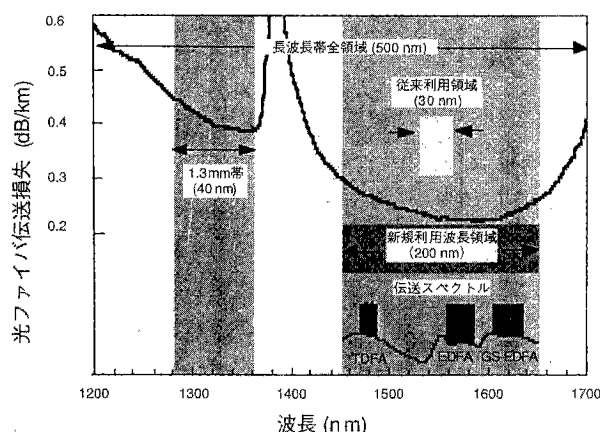


図-5 光ファイバ利用可能帯域の拡大<sup>9)</sup>

### ■ TSSから電子商取引へ

インターネットはLANから発展していったものであるが、古くから利用されているもう1つのコンピュータネットワークの形態がTSS (Time Sharing System) である。これは、入出力機能だけを持つ端末を公衆通信回線でセンタに接続し、時分割処理によってセンタのコンピュータを多重利用する。最初は大型計算機の共用が主目的であったが、次第にデータベースシステムと一体化して、遠隔地からのデータベースアクセスに比重が移っていった。銀行のATMやコンビニエンスストアのPOS端末などが代表的な専用端末であり、簡単な予約サービスなどの場合は、電話機も端末として利用される。インターネットへのダイヤルアップ接続で電子商取引を行うのもまさにこの形態であり、このときインターネットプロバイダのサーバは電話の加入者交換機とほとんど同じ役割をしているといつてよい。このように、公衆網（電話網）とインターネットとの融合や類似性の顕在化が、ネットワーク形態だけでなく機能面でも進行しており、もはや一方だけのコンセプトで次世代のネットワークのあり方を考えることはできない状況になってきている。

### ■ アクセスはモバイルの時代

電話網とインターネットの融合が最も顕著になっているのはアクセスラインであるが、この部分については今後無線アクセスを抜きに議論することはできないであろう。今のところ移動通信は音声メインであるが、携帯可能な物量が限られている移動時にこそ、さまざまな情報へのアクセスが迅速に行えるメリットは大きいはずで、マルチメディア化はまずモバイルから進行していくことになる。現に、メールの送受信やインターネットアクセスが簡単に行える携帯端末の数が、発売から1年足らずの間に我が国最大のインターネットプロバイダの加入数を超えてしまうほどの勢いで、電話と同様、携帯端末の数が固定端末の数を上回るの、インターネットの世界でもそう速くはないと予想される。

技術面では、たとえば最大2Mビット/秒のデータ転送が可能なIMT-2000方式<sup>8)</sup>が来年にも実用化される予定で、インターネットの世界でも移動端末へのIPアドレス付与方法やアクセス方法などの検討が進められている。ただ、こうした需要の拡大に対して、限られた電波資源の割り当てや、端末が移動することに伴うさまざまな課題（安定した通信品質の確保、移動端末の迅速な追尾、

トラフィックの偏在への対応など）の解決が当面の急務であり、固定ネットワークとの融合のあり方を含めて、総合的な検討をすべき時にきていると思われる。また、今後は携帯端末が情報通信用としてだけでなく、位置情報の発信源として、あるいは個人の認証手段としても幅広く利用されることになる。人が携帯する端末のみならず、自動車などの移動体もすべて情報の入出力・処理と通信機能を持つ (ITS: Intelligent Transport Systems) ようになると、情報通信ネットワークの様相はさらに大きく変化するに違いない。

### ■ 光通信はWDM時代へ

現在の通信技術で最も重要なものの1つが光技術であることをはじめに述べた。光は、周波数200T ( $2 \times 10^{14}$ ) Hzの電磁波であり、原理的には数10THzの帯域が情報伝達に利用できるといわれている。現在の単一波長光伝送システムの伝送速度はただだか数10Gビット/秒であるから、光の持つポテンシャルのごく一部を利用しているにすぎない。これは、送受信回路の動作速度限界によるところが大きく、光ファイバや光増幅器の帯域はそれより十分に広い (図-5)。そこで、複数の波長の光を1本のファイバで多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) して伝送し、波長ごとに送受信回路を設ければ、1本のファイバの伝送容量は飛躍的に拡大する。インターネットによる通信トラフィックの増加が著しい米国では、光ファイバを新設するより既設のファイバでWDM伝送した方が経済的である場合が多く、ここ数年WDM伝送システムの導入が急速に進んでいる。我が国の場合は、長距離伝送用に敷設されているファイバが単一波長伝送に最適化された「分散シフトファイバ」であるため、多波長のWDM

伝送を行うには工夫が必要なこと、すでに多数本の光ファイバケーブルが敷設されていて当面の需要には十分対応可能なことから、米国に比べると導入のペースは遅い。ただ、今後のトラフィックの伸びや情報の広帯域化を考えると、WDMが全面的に導入されるのは時間の問題と考えられる。現状では、数10波から100波程度の多重が可能で、光ファイバ1本で数Tビット/秒の伝送容量を持つシステムの実用化も近い。

WDMは伝送容量を拡大するだけでなく、光通信システムの高機能化、フレキシビリティの向上にも役立つ。たとえば、キャリア周波数(波長)によって情報の行き先(方路)を変えられる光機能デバイスや、外部からの制御により単一のデバイスで異なる波長の光を発生するレーザダイオードなどがすでに実用の域に達しつつあり、これらを利用した大容量の光交換機や光ルータの実現も決して夢ではなくなっている<sup>10)</sup>。

## ■ NetworkからCommunication Sphereへ

伝送システムやルータの大容量化は今後ますます進むと考えられるが、これを活かす方向は必ずしも高速の情報を大量に伝達することだけではない。

その1つは、これまでの点(ノード: ホスト, 端末, ルータ, 交換機など)を線(リンク: 伝送路)で結んでネットワークを形成していくという発想から脱却し、光ファイバの広帯域性, 低損失性, 相互干渉性<sup>☆5</sup>を活かして広大かつ面的に広がる情報通信空間(Communication Sphere)を実現していくということが考えられる。これまで同報

(放送)的な情報伝達には主として無線が使われてきたが、電波資源には限りがあり、すでに資源枯渇の問題が起きている。そこで、電波資源はワイヤレスが必須の移動通信(端末からアクセスポイントまでのリンク)にできるだけ割り当て、ネットワーク内は放送トラフィックも含めてすべて面的に張り巡らされた光ファイバ空間で伝達するようにすれば、光の多重数やファイバの本数を増やすことで、利用可能な帯域をほぼ無限に拡大できるはずである。今後指数関数的に増えていくであろうマルチメディアトラフィックをうまく捌いていくためには、こうした新しいネットワーク形態やそこでの効率的な情報転送方式、ネットワークリソースの余裕を活かした品質やセキュリティの保証方法などを、物理レイヤからアプリケーションレイヤまでを見通した形で改めて検討していくことが不可欠である<sup>11)</sup>。

## ■ デジタルマイグレーション

はじめにも述べた通り、20世紀後半の目覚ましい技術進歩によって、「情報通信のパーソナル化」が現実のものとなってきている。かつて自動車, エアコン(クーラー), カラーテレビは3Cと呼ばれ、それらを所有することが豊かな生活の象徴と考えられた時代があった。しかし、今ではこれらももはや一家に1台から1人1台の時代へと移り変わろうとしている。自動車の普及には道路網の整備が不可欠であると同様、「情報通信のパーソナル化」も単に端末を安く使いやすくするだけで達成できるものではなく、それを支える高度な情報通信システムがあってこそ、初めて意味のあるものとな

る。また、有用な情報をいかに迅速に手に入れられるかということも重要なファクタである。21世紀に入り、「情報通信のパーソナル化」が真に役立つものとして社会全体に受け入れられるようにするには、これまでの分業化された技術開発の集合体としてではなく、Computer, Communication, Contentsという新時代の3Cがデジタル技術を核に三位一体となるような新たな技術開発の潮流を作っていく必要がある。ここでは、これを「デジタルマイグレーション(Digital Migration)」と名づけよう。その出発点に立ってもう一度歴史を振り返り、3Cそれぞれの本質を考へてみることは決して無駄なことではないだろう。同時に、すべての技術者, 研究者が常に「人」すなわち利用者を意識して技術開発を進めていくことを忘れてはならない。最先端の技術が、かえって「情報弱者」を生み出す結果にもなりかねないからだから。

### 参考文献

- 1) 青木利晴, 行松健一, 佐藤健一: デジタル通信, 信学誌, Vol.83, No.1, pp.23-27 (2000).
- 2) タネンバウム, A. S.: コンピュータネットワーク(第3版), ピアソンエデュケーション(1999).
- 3) ドップライカー, M.: ATM詳解, プレンティスホール(1996).
- 4) 行松健一: 光スイッチングと光インターコネクション, 共立出版(1998).
- 5) 高橋直久: MAPOS ネットワーキング—光の波に夢をのせて, bit, Vol.31, No.7, pp.9-15 (1999).
- 6) マルチメディア通信研究会編: ギガビットEthernet教科書, アスキー出版局(1999).
- 7) <http://grouper.ieee.org/groups/802/3/ae/index.html>
- 8) 「次世代の移動通信」特集, 信学誌, Vol.82, No.2, pp.101-160 (1999).
- 9) 児嶋一他: 分散型ネットワークの2波長帯域WDM伝送, 信学春全大, Vol.6, p.10129, p.490 (1999).
- 10) 青山友紀: フォトニックネットワークの展望, 信学誌, Vol.82, No.7, pp.704-712 (1999).
- 11) 行松健一: 光技術がもたらす次世代情報ネットワーク, 情報処理, Vol.38, No.8, pp.652-662 (Aug. 1997).

(平成12年3月7日受付)

Anniversary

☆5 複数の電気信号を近接して伝送すると、それによって生じる電磁界の影響を相互に受けあって、元の信号に対するノイズとなる。その影響は、信号が高速になるほど大きい。それに対して、光信号は相互に干渉し合うことがないため、高速で高密度な伝送してもノイズの影響を受けることがなく、高品質な伝送が可能になる。