

マルチメディアと光ファイバー通信技術

藤 本 正 友

I はしがき

ゲルマニウムトランジスタの発明から半世紀が経過した。半導体を用いたデバイスは、通信と情報処理技術に飛躍的な進展をもたらすとともに、新しい社会基盤である高度情報化システムの構築を可能にした。マルチメディア時代の出現を可能にしたのは、半導体デバイス(LSI:集積回路)による情報のデジタル化(コンピュータ)技術である。また、1980年の現場試験で実用化の見通しが確立した光ファイバー通信システムは、高速・大容量の長距離通信システム技術として、衛星通信システムとともに現在の世界の情報通信ネットワークシステム技術の基盤を構成している。これは現在の高度情報化社会システムの要として、重要な役割を担っているとともに、今後さらに発展を期待されるインターネットを利用する産業構造の変革を約束していると考えられる。

本紀要では、高度情報化社会の発展の起点となった光ファイバー通信に重点をおいて、光デバイス技術も含めて、大容量、高速情報通信システムの発展の経緯とマルチメディア世代のインターネットの利用および光ファイバー伝送システム技術の展開について述べる。

II アナログからデジタルへ

現在では、個人が家庭の電話機と携帯電話およびパソコンによる通信など、情報を発信する多くの手段を所有するようになり、情報を入手し、交換する機会が急激に増加した。その発端である電話機の発明はアレクサンダー・グラハム・ベルによって1876年3月に行われた。彼が、「早く来てくれ、ワトソン君」と隣の部屋にいたワトソンに伝えたということは有名な話である。ベルが振動板に向かって言ったその声は、そのうしろにある電磁石で電気信号に変換されて、これが電線を通して隣の部屋の振動板で音声に変換されてワトソンに伝えられた。この電話サービスが日本で始められたのは1890年(明治23年)である。

われわれが電話で話をする音声は、連続的な波である

音波の情報でアナログ信号である。ベルの発明した音声伝えるアナログ信号による電線上の情報の伝達およびアナログ信号の交換技術を用いた通信システムは1950年代まで用いられた。このアナログ信号による情報伝達と交換技術が、「0」と「1」の信号の伝送と交換を行うデジタル信号技術に進化したのは、1965年以降である。アナログ信号である音声信号を、あえて、デジタル信号にして伝送、交換を行うのは、デジタル信号を用いると信号を長距離区間伝送した後でも、アナログ信号の場合と比較して、より忠実に元の信号に復元できるからである。アナログ信号の伝送では、長距離伝送後には波形が乱れて元の信号へ復帰するのは不可能である。したがって、デジタル信号技術は長距離通信システムにその威力を発揮する。すなわち、伝送路の途中で元の信号波形に復帰するための中継器を設置すれば、距離がどんなに長くなっても伝送品質の劣化がない情報の伝送が可能となり、アナログ伝送技術では実現できない種々の情報伝達が可能となる。

III 光ファイバー通信技術の研究・開発の歩み

30年前の1970年は、光ファイバー通信技術にとって、記念となるブレイクスルーの幕開けであった。アメリカのベル研究所で、林巖雄氏とパニッシュが半導体レーザーの室温・連続発振に成功し、コーニング社では、カプロ・ケック・モーラらが石英の光ファイバーの純度を高くすることで光の伝搬損失の低減化に成功した。しかし、光ファイバー通信システムの実用化までには、その後10年の歳月を必要とした。デジタルの電気信号を用いて、これを銅線を通して伝送する場合と光デジタル信号を用いて光ファイバー中を伝送する場合とを比較すると、同じ情報量(伝送容量5760チャンネル)を伝送する場合は、電気信号の伝送の場合の中継間隔が1.5 kmであるのに対して、光信号を用いた光ファイバ伝送では、中継間隔が25 kmに増大する。すなわち、25 kmの遠方に情報を伝えることを考えると、光ファイバー通信では、劣化した信号波形を回復するための中継器は必要としないが、従来の銅線による電気信号の伝送では約17台の中継器が必要となる¹⁾。これは、光ファイバー

通信を情報伝達手段に用いることによって、中継器台数の削減による大幅なコストダウンが可能になるとともに中継器の保守、更改などを考慮すると飛躍的に長距離伝送システムの信頼性が向上したこととなり、さらなる経費の削減が可能となることを示唆している。

当初開発が進められていた半導体レーザーは、その発振波長が**0.85**ミクロン（ミクロンは 10^{-6}m ）であった。光ファイバーの光伝送損失が最低となる領域が**0.85**ミクロンを中心とする領域であったからである。ところが、光ファイバーの高純度化の研究が進むにつれて、伝送損失が最低になる波長領域が**0.85**ミクロンの波長から**1.55**ミクロンの長波長領域に移行した。それにとともに、半導体レーザーの研究・開発も、**1.55**ミクロンでレーザー発振の可能な材料・デバイスの開発に集中し、**1980**年には、**1.55**ミクロンで室温・連続発振の可能な半導体レーザーの開発に成功した。ここにいたるまでには数多くのブレイクスルーとなる技術が報告されている²⁾。

さて、当初開発された**0.85**ミクロンの半導体レーザーの研究・開発の成果は、その後どのように利用されているであろうか。当初の通信技術のために開発された**0.85**ミクロン程度の波長の短い半導体レーザー（以下では短波長半導体レーザーと呼ぶ）は、現在では、パソコン、家電製品等に必須の光源部品の一部として利用されている。CD、DVDなどのディスクへの書き込み、読み出しの光源などには、当初の光ファイバー通信に開発された短波長半導体レーザーが利用されている。これらの短波長半導体光源の情報端末への利用は今後も重要であろう。このように、成熟途中の技術が新しい分野へ適用されたり、周辺技術の進展を促すなど、新しい技術の研究・開発が他分野の新しい産業の創出に発展することが多い。現在、注目されている短波長半導体レーザーでは、可視光領域の波長で最も短い波長領域である青、紫色の半導体レーザーの開発がある。この青色領域の波長の半導体レーザーの実用化が完成すると、可視光領域のすべての波長領域で発光する半導体デバイスを利用できることとなり、その応用範囲は一挙に拡大するであろう。すなわち、青色領域の光源とすでに実用化されている赤、緑色の発光ダイオードとの加色混合によって、白色を含むあらゆる可視光領域の色を実現できるからである。交通信号の赤、黄、青色のシグナルが半永久的な寿命を持つ低消費電力の発光ダイオードに置き換えればその波及効果は大きい。このような半導体光源による信号を用いると、従来朝日、夕日の直射で明確に見えなかった信号の色がはっきり見えるようになり交通渋滞、交通事故の防止にも役立つだろう。なお、半導体光

源を用いた交通信号は、一部の都市では実用部品として使用されている。

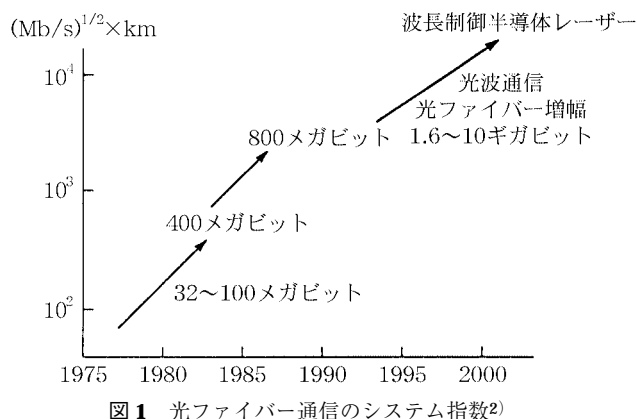
IV 情報通信の大容量化と高速化

マルチメディア技術の目的は、文字、音声、静止画像、動画像などの多種類の情報を同じように扱い、人間により親しみやすい環境を作ることである。そのためには、多くの情報をだれでも、いつでも、どこからでも、素早く、安価に、正確に入手し、伝えることができる情報通信システムを構築する必要がある。初期の情報通信形態であったアナログ信号の通信がデジタル信号の通信に発展したことにより、遠方に、安価に情報を伝えることが可能になったことはすでに述べた。コンピューター（半導体集積回路）はデジタル信号を迅速に処理することを得意としている。したがって、コンピューターとデジタル通信技術の融合性は非常によい。

アナログ通信の電話のネットワークは、まず伝送路がデジタル化されたが、**1980**年代になって交換機もデジタル化された。**1990**年代になって加入者線の交換機および端末（企業、家庭内）までデジタル信号を用いて情報を伝達することが可能となった。いわゆるデジタルネットワーク（ISDN: Integrated Services Digital Network, サービス総合デジタル網）の構築である。大都市間および国際間の長距離の情報伝達に光ファイバ通信が有効であることの理由はすでに述べたが、都市内の情報伝達においても、大量の情報伝達、たとえば高精細画像、動画像などの情報伝達を行う際には、光ファイバー通信技術の利用がますます重要になる。このようなシステムをFTTH（Fiber to the Home）と呼んでいる。

さて、デジタル信号の基本信号は、**0**と**1**（信号があるか、ないか）である。デジタル情報の伝達を行うには、このデジタル信号を単位時間にどれだけ多く送出し、ファイバー内を伝搬し、誤りなく受信できるかが基本技術となる。そのためには、半導体レーザーの光信号の断続信号（パルス）を、単位時間にどれだけ多く送出できるかが鍵となる。また、単一の波長で位相のそろったレーザー光を発振する半導体レーザーを実現する必要があった。ここにも多くのブレイクスルーとなる技術が考案された。**1975**年に日立中央研究所の中村道夫氏は、波長が制御された単一モード半導体レーザーの室温・連続発振に成功し、大容量の光ファイバー通信技術が大きく前進した。

20年前に実施された光ファイバー通信の現場試験では、伝送速度は**1**秒間に**100**メガビット（**1**秒間に**1**

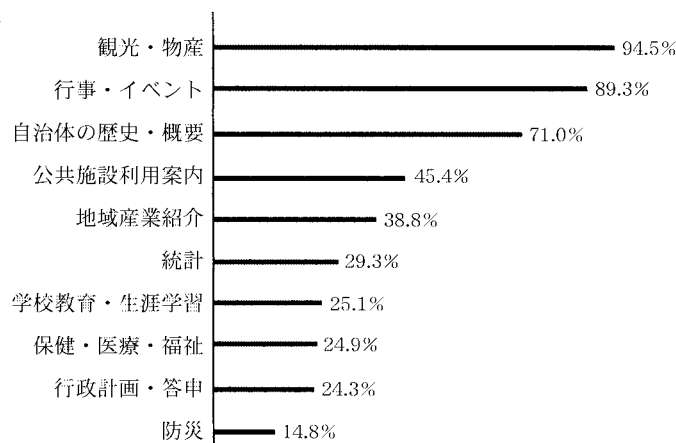
図1 光ファイバー通信のシステム指数²⁾

億回の光パルスの点滅)であったが、現在の長距離の実用回線では、1秒間に10ギガビット(1秒間に100億回の光パルスの点滅)以上の技術が用いられている。光情報通信システムのコスト・パフォーマンスは、情報伝送速度の平方根と伝送距離の積で評価される。1970年代後半からの光ファイバー通信システムのコスト・パフォーマンスの進展を図1に示す²⁾。光ファイバー通信技術がマルチメディアの情報伝達に果たしてきた役割が大きいことがわかる。

V インターネットの普及

インターネットは全世界のコンピュータネットワークを接続した地球規模のネットワークであり、人・場所・時間の制約なしに、世界中の人と情報を交換できるシステムである。平成11年版の通信白書によれば、日本におけるインターネット人口は約1700万人であり、世帯普及率は10%以上である。また、インターネットに関連するビジネス分野では、インターネットコマース、接続、広告などにおいて、平成9年度の27,505億円から平成10年度の66,879億円へと約2.4倍に成長している。公共分野においても、国の機関のホームページの充実が進んでいる。また地方公共団体のホームページ開設は、11年度末で70%を越える見込みであると報告されている。そのホームページ上での発信情報において「観光・物産」は95.4%でトップの地位を占めている。(図2: 情報発信のランキング)「観光」におけるインターネットの利用がいかに重要かがうかがえる³⁾。

インターネットの起源は、30年前の1969年に米国国防総省高等研究計画局(ARPA: Advanced Research Project Agency)が、将来起こる危険性のある核戦争の被害を最小限にするために、軍事用としてのコンピュータを分散配置する目的で計画した分散型情報ネットワークARPAnetである。この軍事用のネットワークに一般

図2 発信情報のランキング(地方公共団体アンケート³⁾)

の研究者も参加し、1983年にはARPAnetから軍事用が分離し、1986年には全米科学財団(NSF: National Science Foundation)がNSFnetの運用を開始した。このnetは、1989年にARPAnetを吸収した。このネットワークに大学・研究所が接続されたが、当時は、一般の企業の使用は禁止されていた。しかし、1991年に商用インターネットの相互接続組織(CIX: Commercial Internet eXchange)が設立され、企業および個人のコンピュータをインターネットに接続するインターネット・サービス・プロバイダーが設立され、インターネットの利用が急増した。

日本においても、当初は大学、学術情報センター等の学術研究用のネットワークとして発展してきたが、1992年から商用のインターネットサービスが開始され、多くのインターネット・サービスプロバイダーが誕生した。インターネットが急速に普及した背景には、学術研究、商用、個人を問わず、誰にでもオープンな環境でネットに接続できることをその大きな特徴としてきたことがある。

1993年には米国イリノイ大学の研究者が、インターネットの機能を効果的に活用できるブラウザソフトMosaicを発表し、これを無償で公開した。これにより、インターネットで文字、静止画、動画などのマルチメディア情報を画面で簡単に取り扱うことが可能となり、ネット上の情報交換がさらに活発になった。

インターネットの急速な普及によって、高速・大容量のデジタル回数(ISDN)が急激に増加している。クリントン大統領は2000年までに全米のすべての教室をインターネットで接続し、誰もが12歳でインターネットに接続できるようにするという目標を発表している。

我が国の公立学校におけるインターネット接続率は18.7%(平成10年3月末現在)であり³⁾、平成13年度にすべての公立学校がインターネットに接続されること

を目標に環境整備が進められている。「デジタルネットワーク社会」に適應するための情報機器を扱う操作能力（情報リテラシー）を日米で比較したデータが報告されている³⁾。パソコン（PC）およびネットワーク（NW）リテラシーにおいて格差が大きい。PCリテラシーで21.3ポイント、NWリテラシーで24.0ポイント、日本が劣っている。これは米国では従来からタイプライターが普及しているため、キーボードに親しみやすいことと家庭へのインターネットの普及率に差があるためと考えられている。日本の家庭におけるインターネットの普及率は6.4%であるのに対して、米国における普及率は28.4%と4倍以上の普及率である。

当初のインターネットは、これにアクセスする端末は、すべて固定されたコンピュータであったが、現在では無線回線（衛星回線）を介して移動端末（ノートパソコン、携帯電話、自動車電話、PHSなど）にも拡大され、いつでも、どこからでも世界中の人々にアクセスできる環境になっている。電話については、従来は企業、家庭の固定電話が大半を占めていたが、最近の統計によれば、携帯電話（自動車電話、PHSを含む）の加入者台数は、今年度末に5770万台となり、固定電話の5600万台を、はじめて上回ることが確実に became となつてきている。これは、携帯端末から音声だけではなく、メール、画像などの豊富な情報の伝達が可能になったためであろう。

衛星インターネットも今後の新しいサービス形態である。この特徴は、カバーする領域の広大さと同報通信（同じ情報を一斉に配信すること）にある。このような情報伝達容量の需要増に応える技術開発も進んでいる。

VI 情報伝達容量の増大に向けて

光ファイバーによる情報伝達において、その伝達容量を増大する手法には大きくわけて2つの技術がある。1つは波長分割多重伝送（WDM: Wavelength Division Multiplexing）で他は時分割多重伝送（TDM: Time Division Multiplexing）である。さらに両者を組み合わせたWDM-TDM伝送方式があり研究・開発が進められている。TDM方式では、伝送信号のパルス幅をどの程度まで狭くできるか、パルスの占有率はどこまで大きくできるか、パルスのピークの出力をどこまで大きくできるかなどといった問題がある。技術的には1秒あたり100ギガビットが長距離光ファイバー通信の限界と考えられている。WDM方式では、波長が正確に制御された半導体レーザー、多くの信号を一括して再生・増幅することができる安価な光増幅器が求められる。この

ために光ファイバー増幅器が考案されている。光ケーブルの多芯化は100芯程度が可能である。海底ケーブルでは、敷設作業の難易度、中継器の大きさの制限から1ケーブルあたり8芯程度であろう。10ギガビットの信号を16波多重にした160 Gbpsの大容量伝送方式が実用化されている。

上記の大容量化技術以外にも多くの研究・開発が進められている。現状の長距離光ファイバー通信は、その変調速度にも依存するが、光ファイバーで送られてきた光信号の変形による劣化を元の光信号波形に戻すために中継器を用いている。この中継器では、光の信号を受光素子で電気信号に変換して、電気回路で信号の修正、増幅を行い、再び光信号に変換して光ファイバー内に送出している。すなわち、光信号→電気信号→光信号の中継伝送形態である。これを光信号のまま中継するために光ファイバー増幅器が考案された。これは特殊な光ファイバーにレーザー光を外部から注入して、弱くなった光信号を元に戻す技術である。

さらに、光波通信による大容量伝送方式の研究も進められている。現在の光ファイバー通信は1.55ミクロンの波長を中心としたTDM方式を用いている。光を周波数として扱えば、利用可能な周波数帯域は波長が1.1ミクロンから1.7ミクロンまでで約100テラヘルツの周波数領域となり、その利用可能な帯域は非常に大きくなる。しかし、このためには正確に発振波長を制御した半導体レーザーの実用化が必須となる。現在、このような半導体レーザーの研究が進められている。

さらに高速・大容量の光伝送技術として光ソリトン波による研究・開発も進んでいる。光ソリトン技術は、石英系光ファイバーの性質として、光ファイバー内に存在する光パルスの波形が広がる性質と狭まる性質をバランスをとりながら伝送することにより、光パルスを元の波形を保ったまま長距離伝送を行う技術である。理論的には100 Gbpsで20,000 kmの光ソリトン波の伝送が可能と考えられている。研究段階であるが光ソリトン技術を波長分割多重伝送技術に応用して、1芯のファイバーで20 Gbpsで20波のWDM、総伝送容量400 Gbpsが報告されている。

VII 図書館のデジタル化

マルチメディアとインターネットに関連して、図書館の電子化について述べる。図書館は、書物、雑誌等の資料を収集・集積し、教育・研究・学習などの支援を行うことがその使命である。それぞれの図書館が必要な書籍を収集し、そこでその資料を閲覧することが行われてい

た。しかし、マルチメディアのデジタル処理技術、デジタルネットワークの充実により、図書館の利用形態が急激に変化している。文字、図形、写真、ビデオ、音声などをデジタル化して蓄積・処理し、付加価値の高い機能を持つ図書館になるとともに、それがネットワークで結ばれて、多くの図書館があたかも1つの図書館のように機能するようになった。

図書館協会の創立100周年を記念して、1992年に出版された図書館白書の前書きで「人が何か知りたい、学びたいと思ったとき、だれでも自由に必要な資料や情報に接することのできる社会システムとして図書館がある……」と述べられている。インターネットの普及により、まだ制約はあるものの、ネットワークに入ることができれば、いつでも、だれでも、どこからでも自由に、安価にネット検索を利用して必要な図書や新しい書籍情報に接することができるようになった。

書誌的情報である2次情報（書名、著者名、出版社、出版年など）をコンピュータに入力して、これを利用するOPAC（On line Public Access Catalog）データベースは、ここ数年の間に、各大学図書館でかなり充実した。新しいものから順次古いものへと遡って入力しているが、現状ではすべての蔵書の30～40%が入力されている程度であり、まだ満足できる状態ではない。しかし、OPACの利用により、必要とする図書・雑誌の所在が瞬時に判明する。学術情報センターが提供するNACSIS-ILL（National Center for Science Information Systems-Inter Library Loan）システムにより、資料現物の貸借の依頼、受付がオンラインで可能になったために、それぞれの大学図書館が所蔵する文献複写が迅速化された。全世界のネットワーク上で1つの大きな図書館が誕生したといってもよい。

これから新しい分野を学ぼうという学生諸君が、講義内容の理解を深めるために、図書や新しい情報が必要な場合がある。日本全国そして世界各国の図書館に保管されている知的財産（書籍）がデジタル化され、それらがコンピュータネットワークで結ばれていると、世界の新しい情報を即座に入手することが可能となる。

1次情報である図書、雑誌そのものの電子化は、研究段階では進んでいるが、まだ取り組みが始まったばかりである。図書館のコンピュータから利用者のコンピュータに図書・雑誌の内容をデジタル化して電子的に送りとどける機能を持つ電子図書館の実現は、図書館の今後の大きな目標であろう。特定の図書館にしか存在しない貴重な書物をデジタル情報として保管することにより、全世界の図書館がそれを共有することとなる。文字情報だけではなく、図形、写真、画像（あるいは動画

像）などの豊富な情報量を経済的にデジタル化する必要がある、大容量の高速情報通信ネットワークの充実が不可欠である。また、これにともなう著作権保護システムの確立も重要である。著作権が存在するデジタル情報の利用には、その対価を支払うこととなり、電子的な決済、課金システムが必要となる。

1980年に、学術審議会の答申で大学図書館が「学術情報システム」という体制のもとに位置づけがなされ、その後、学術情報センター、計算機センター、情報処理センターなどとともに多くのサブシステムが形成された。ネットワーク上の学術情報が量的に増大してくると、その情報資源を組織化して提供する「図書館機能」の必要性が高まっていく。21世紀にはネットワークで結ばれた世界図書館が実現するだろう。

VIII ネットワークインフラストラクチャーの整備

社会経済の進展において、情報通信への依存度が高くなるにつれて、大量の情報を高速で安価に伝送し得ることが不可欠になってきた。その送られる情報の内容が、音声、静止画から高精細の動画像になってくると、急速に必要な伝送容量の増大が要求される。平成10年度末現在、日本では約27%の地域において光ファイバーネットワークが整備されている。平成17年度には全国で光ファイバー網の整備が完了することを目標に光ファイバーの敷設が進められている。

将来、各家庭で現在必要とされている通信容量の1000倍程度の容量の需要に耐えうるような大容量の伝送システムを実現するための全光通信の研究・開発が精力的に進められている。この場合の問題点の1つとして、石英系光ファイバーが高価なこととファイバーの接続損失の増大がある。そのため、石英系の光ファイバーよりも安価なプラスチックファイバーの研究も活発になった。プラスチックファイバーは、石英系のガラスファイバーと比較して、その光伝搬損失は数百倍大きい。しかし、各家庭あるいはオフィス内に引き込む距離は100メートル以内であり、この光伝搬損失は許容できる範囲である。また、プラスチックファイバーの直径が0.1mmから1mmのため、石英ファイバー（直径10ミクロン）と比較して、ファイバーの断面積が大きいので接続が容易である。ただし、使用できる波長領域は0.65～0.70ミクロン程度であり、長距離光ファイバー伝送の使用波長である1.55ミクロンとの整合性が問題となる。また使用できる温度の上限は80℃であり耐熱性の向上が必要である。今後このような問題点を解決するとIVで述

べた FTTH の実現も容易になろう。

IX おわりに

マルチメディア世代の基盤となる光ファイバー通信技術とインターネットの急速な普及について、光デバイス、光通信システムの進展を含めて記述した。光通信システム技術は、21世紀の社会システムの基盤として重要なインターネットを支えるものとして今後も発展を続け21世紀にはグローバルなシステムとしてその重要性はさらに増大すると思われる。

米国の調査会社がまとめた「その都市につながるインターネット用国際回線の総容量の集計」によると「世界のインターネットハブ（集積地）都市ランキング」では、1位はロンドン、2位はニューヨーク、東京は15

位、大阪は37位である⁴⁾。ロンドンでは毎秒18.0ギガビット（1ギガは10億）の回線容量で世界の主要都市と情報を交換している。米国では複数の都市が国際的なハブの役割を担っているためにニューヨークは毎秒13.2ギガビットで2位になっている。一方、日本では東京が2.4ギガビット、大阪は0.25ギガビットである。情報リテラシーの向上、通信コストの低減など解決すべき問題が残されている。

参考文献

- 1) 葉原耕平, 木村英俊『高度情報通信システム-INS ネットワークの本質』オーム社, 1985年, 63頁。
- 2) 藤本正友『マルチメディア世代に向けて-光通信の舞台裏-』裳華房, 1999年, 104頁。
- 3) 郵政省『通信に関する状況報告』1999年, 54頁。
- 4) 『日本経済新聞』1999年11月24日付。