

# 光通信

## 「光通信技術の歴史」 ◎ 一般 ● 日立

- 1937 ◎ 導管による光信号伝送方式の提案(日本 通信省電気試験所)
- 1950 ◎ 医療用ガラスファイバー開発(日本)
- 1954 ◎ メーザー(マイクロ波増幅器)によるマイクロ波発振成功(米国)
- 1958 ◎ ガラス2層構造の光ファイバー考案(オランダ)
- 1960 ◎ ルビンをういたレーザー発明(米国)
- 1962 ◎ 半導体レーザーの発振成功(米国)
- 1963 ◎ 収束型光ガラスファイバー発明(日本 東北大)
- 1966 ◎ 低損失光ファイバーの可能性示唆(イギリス)
- 1970 ◎ 半導体レーザーの室温連続発振成功(米国)
- ◎ 実用的な光ファイバー開発(伝送損失20dB/km 米国)
- 1972 ◎ 石英コア光ファイバーの作成(日本 電子技術総合研究所)
- 1973 ◎ 分布帰還型(DFB)レーザー動作の光励起による実証
- 1974 ● 埋め込みヘテロ型(BIH)半導体レーザーの提案と実証
- 1975 ◎ 各国で光通信システムの実用化が始まる
- ◎ 100Mbps光ファイバー伝送システムを電力会社に納入
- ◎ DFBレーザーの電流励起動作実証
- 1976 ◎ 伝送損失0.47dB/km(1.3μm波長帯 電電公社ほか)
- 1977 ◎ 1.3μm長波長レーザー(電電公社ほか)
- ◎ 波長多重方式提案(電電公社ほか)
- 1978 ● チャネルストラップ(CSP)レーザーの提案と実証
- ◎ 1.5μm帯BHLレーザーの実現
- 1979 ◎ 伝送損失0.2dB/km(1.55μm波長帯 電電公社)
- ◎ 100km以上の光通信システム(電電公社)
- 半導体レーザーの研究所製品化(HLP1000/2000/3000)
- 1.3μm帯BHLレーザー(HLP5000)の研究所製品化
- 32Mbps/35km伝送実験
- 1982 ◎ 大西洋横断海底通信ケーブル(TAT-8)に向けた1.3μm帯BHLレーザーの出荷開始
- 1985 ◎ 日本縦貫光ファイバー伝送路開通(旭川 鹿児島間3400km)
- 1986 ◎ エルビウム添加光ファイバー増幅(EDFA)の提案(ギリス)
  - ◎ 伝送損失0.15dB/km(1.55μm波長帯 NTT)
- 1987 ◎ 波長多重光通信システム(NTT, ATT&T)
- 変調ドープMQWレーザーの提案と実証
- 1989 ◎ 太平洋 大西洋横断光ケーブルシステム
- 1990 ● 10Gbps光通信基本技術の確立
- 10GbpsヘーソのWDM(波長分割多重方式)伝送実験(10Gbps/4波長/40km)
- 光通信用LバンドMQW-DFBレーザーの製造
- IC化10Gbps光送信器の基本技術確立
- 1992 ◎ 第4太平洋横断ケーブル
  - 16波長WDM 10Gbps伝送用DFBレーザー開発
  - 光変調器/半導体レーザーのモノリシック集積プロトを試作、10Gbps動作を実証
- 1993 ● 高コヒーレントスペクトル幅3.6nmDFBレーザー動作実証





佐々木慎也  
日立製作所 中央研究所 情報システム  
研究センター 主管研究員

### 光ファイバーと半導体レーザー

日本の全世帯約6000万のうち、すでに約1000万世帯に光ファイバーが導入され、活用されている。すべての家庭に光ファイバーが入り込み、ネットから電話、TVまですべてが一本のケーブルによって担われる……。かつて情報通信システムの未来像として描かれた姿は、この日本においてはもはや現実のものになろうとしている。

長く通信システムを担ってきた電波やメタルケーブルに比べ、桁違いの高速・大容量伝送を可能にした光ファイバー。その特性を説明してくれたのは、1980年代から伝送システムを中心に光通信システムの開発を担ってきた佐々木慎也(中央研究所情報システム研究センター 主管研究員)だ。

「光は通常の電波に比べてはるかに波長が短く、狭い周波数領域にたくさんの情報を載せることができる。ただ、200THzという光の周波数に対し、今、光ファイバーで使っているのはその40分の1の5THz程度ですから、非常にポテンシャルが高いことがわかり

ます。

むしろ、光ファイバーの発明以来、変わらず重要なだったのは信号を運ぶ電磁波が、長距離になっても、なかなか弱くならないことです。CATVなどでは、使われる同軸ケーブルでは、わずか1.5mで電磁波のエネルギーが半分になってしまふ。光ファイバーは15kmで半分。減衰の度合いが全く違うのです。この違いは何かというところ、光ファイバーの驚異的な透明性です」

純粋な石英(○)を主成分とする光ファイバーは太さ125μm(0.125mm)。実際に情報が送られる10μmの細い「コア」のまわりを厚い「クラッド」が囲んでいる。二つの層はごくわずかな成分の違いにより、屈折率が異なっている。コアに入射した光は、クラッドとの境界に当たっては全反射し、コア内を上下左右に跳ね返りながら、はるか遠くまで運ばれていく。

こうした現象を情報通信に使えないかと、1963年に真つ先に提案したのは東北大学教授(当時)の西澤潤一氏だ。その3年後、イギリスのスタンダード通信研究所にいたチャールズ・カオ博士らが実用レベルの通信光ファイバーの実現可能性を示した。それから3年後の70年に、米コニング社が1km当たり20dBという、当時としては驚異的な低損失のファイバーの試作に成功し、これ

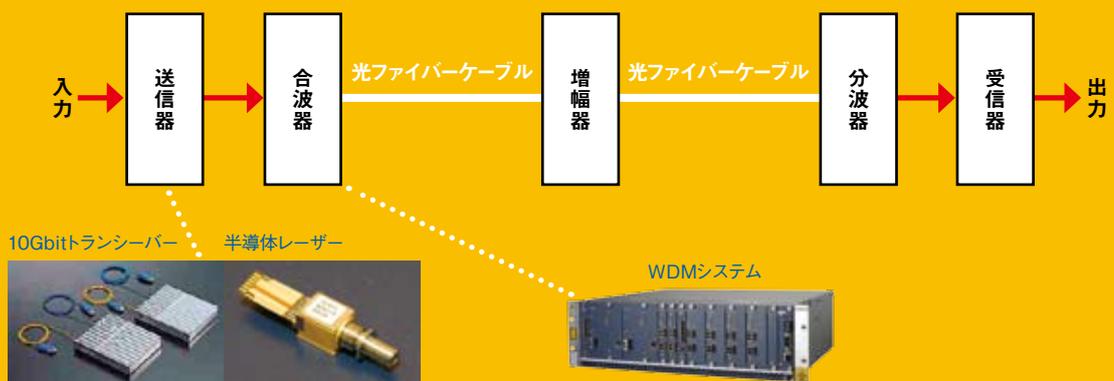
により光通信の一つの道が開けた。

「こうした情報の通り道はできたわけですが、もう一つ必要なのが、情報を載せる光です。もともと光はデジタルと非常に相性がいい。光の点滅が情報の0と1に対応するからです。その光の中でも、波長や位相にバラつきがなく、指向性にも優れたレーザーが最適です。ところが先行開発された固体レーザーや二酸化炭素レーザーなどは、ON/OFFのスピードが遅いため、たくさんの情報が送れない。そこで注目されたのが半導体レーザーです」(佐々木)

半導体レーザーは電流を大小変化させるだけで高速のON/OFF光信号を発生する。しかも超小型で量産性にも優れているという特徴がある。問題は室温動作。当時の半導体レーザーは、仮に連続的に発振させるには極低温の状態に保つ必要があった。

70年、旧ソ連のジョレス・アルフォロフ、ベル研究所の林巖雄、M・B・パニッシュらが、発光材にガリウム・アルミニウム・砒素を用い、ほぼ同時期に室温での連続発振に成功。しかし、当時の半導体レーザーはマッチ棒と呼ばれた。光つたらすぐ壊れてしまふ。さらに、電流を流すと光の分布が不安定になるという問題もあった。日本では多くの研究者や技術者が企業や大学といった組織の壁を取り払って研究を進めた。その結果、半導体レーザーは日本を中心に急速な進歩を遂げ、80年代になるとその寿命は10万時間を超え、

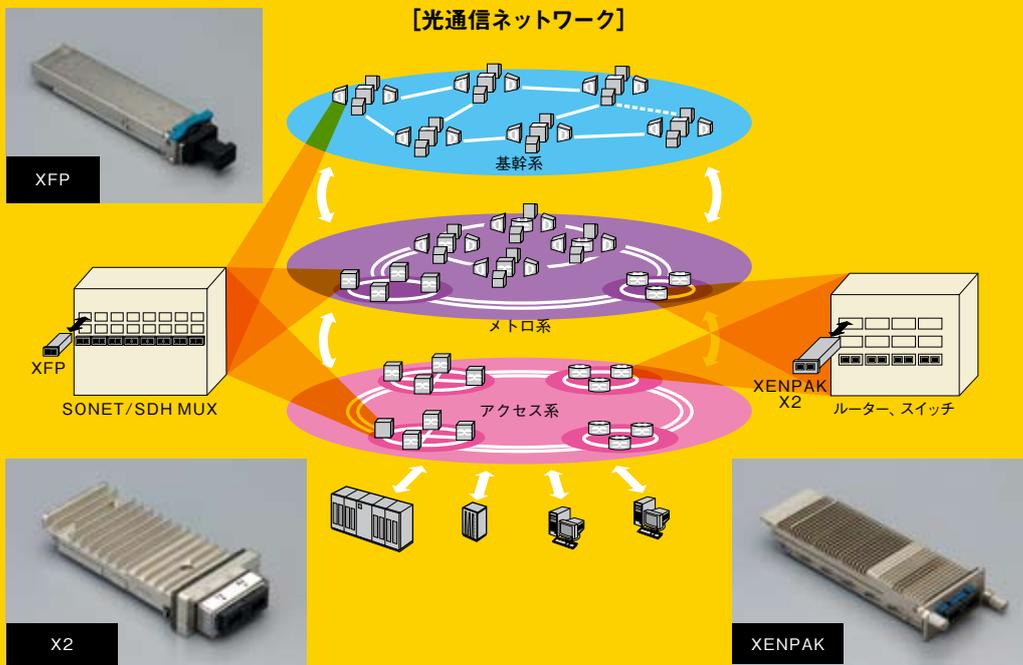
【光ファイバー通信の基本構成】



光ファイバー通信を担うことになる。

半導体レーザーの室温連続発振が実現した70年は、くしくもコニング社によって実

【光通信ネットワーク】



用レベルの光ファイバーが開発された年でもあり、「光ファイバー通信元年」と呼ばれている。光信号⇄電気信号から、光信号⇄光信号へ

日立は、1970年代の初めに、半導体レー

ザーや光通信システムに関する技術開発に参入している。78年に入社し、光・電子デバイスの研究開発に取り組んできた辻伸二申

ことになった。

「入社当時は、まさに光通信システムが実

用化されるかどうか、という時期でした。私は1:3μ帯の半導体レーザの研究グループに入り、翌年には新聞発表にまでこぎつけた。その

レーザが大西洋横断海底通信ケーブルに最適だということ

で海外の通信事業者から共同開発のオファーがあり、にわかに活気づいたことを覚えて

います」

82年、日立は世界初の大西洋横断海底通信ケーブル（TAT8）に向けて、1.3μ帯BHレーザの出荷を開始する。歴史を変えたプロジェクトに本格的にかかわることにより、日立は、わが国における光通信普及の推進役となっていく。

日本に光通信システムが導入されたのは、それに先立つ81年。世界に先駆けて、日本電信電話公社（現NTT）が電話局間を中継する伝送距離2kmのマルチモード光ファイバーを用いたシステムを導入した。さらに大きなエポックとなったのは、85年における旭川・鹿

児島間、約3400kmを結ぶ日本縦貫光ファイバー伝送路の完成だ。こうした中で、重要な技術テーマの一つとなっていたのが光信号の増幅である。

光通信システムは、電話やPCなどの電気信号を光信号に変換し、光ファイバーケーブルで伝送し、再び電気信号に変換して受信するが、ケーブルでの伝送の途中で、中継器による信号の増幅が必要になる。

「それまでは、80kmほどの間隔で中継地点

があって、そこで光信号をいったん電気信号に戻してから増幅し、再び光信号に変換していたわけです。それを、ファイバーのコアにエルビウムという元素を微量に添加したところに、少し波長の短い光を当てることで増幅作用をもたせ、直接光信号から光信号へと、中間の高速電子回路抜き増幅を実現させたのです。'86

年にイギリスで提案されたこの技術は、光ファイバー通信における『第一の革命』といえます」(佐々木)

この「光増幅器」によれば、増幅時のエネルギー供給源としての電気は必要だが、信号そのものは光から光へと変換されるため、効率もよく精度もきわめて高い。'88年に光通信の波長で使えるという原理実験が成功して以来、世界の光通信システムのあり方を根本から変えることになり、その後、1000kmを超える長距離システムの低コスト化が実現されるまでになった。

「私は88年当時は、ベル通信研究所（ベルコア）に派遣研究員として滞在していましたが、その年のOFC（光通信会議）に参加し、光増幅器によって歴史が大きく動いたことを実感しました。帰国してから、半導体レーザ方式の光増幅器の検討を始め、当時最高レベルのデバイスを実現したように思いますが、光ファイバー方式にはとてもかなわなかった。自分自身がやってきた技術へのこだわりが強すぎたのですね。これはビジネス創生の点で大きな失敗例となったと反省しています」(辻)

光ネットワークシステムは、主要な電話局の間を結ぶトランスポートネットワーク（基幹系）と、都市内の伝送や家庭やオフィスなどのユーザーと電話局を結ぶメトロネットワーク（アクセスネットワーク）に分けられる。経済効果を発揮しやすい基幹系から導入が始まり、次第にその範囲を広げてきたが、メトロ



辻伸二  
日立製作所 中央研究所 ソリューション  
LSI研究センタ 主管研究員

系、さらには毛細血管であるアクセス系への移行、いわゆるFTTH(Fiber to the Home)への展開には、「第二の革命」が必要だった。

## 波長多重技術という第二の革命

「実は私が入社した1980年の時点ですでに、家庭に光ファイバーを引くという話があったのですが、実現には、コスト削減に寄与する技術の開発が求められていました。まずは、長距離通信系、近年はメトロ網に導入されて、通信コスト削減に大きな威力を発揮したのが、異なる波長の複数の光を束ね、1本の光ファイバーで伝送する波長多重技術(WDM: Wavelength Division Multiplexing)です。これが『第二の革命』です」(佐々木)

ほとんどのレーザーでは発振波長が決まっているが、半導体レーザーでは、その発光部の材料組成をわずかに変化させることによって、同じ方式のレーザーから、ごくわずかなず違うレーザー光を発振させることができる。違う波長であれば、どんなに狭い領域に詰め込んでもよく、理論上は無限の本数のレーザー光を、1本の光ファイバーに同時に載せてやることもできるのだ。現実には、その周波数間隔は国際標準によって100GHzあるいは50GHzとなるよう決められており、今では、0.01mmのコア部分に100以上のレーザー信号を詰め込んだシステムが稼働

している。

「その実現には、半導体レーザーの発振波長が10年以上にわたって長期的に安定なのか保障する必要があります。ベル通信研究所は日立との共同研究で波長が長期的に安定であることを実証したのです。ここでも日立の半導体レーザーは活躍しました」(辻)

90年、日立は10Gbpsベースの波長多重伝送実験に成功し、その後、96年に米国で現場試験を行い、99年に商用化した。当初、WDM技術がインパクトを与えたのは基幹系であつて、一時、大容量化した基幹系の容量供給を需要を上回るという事態も起きたが、2000年を過ぎ、インターネットが浸透すると、市場の中心はメトロ・アクセス系と移行し、蓄積された技術はユーザーの目に見えるところでも大きく開花していくことになる。

この革命からおよそ15年。驚くことに、大量の情報を流す都市/都市間幹線と、家庭やオフィスなどへの引き込み用ファイバーは、実はまったく同じ太さ、同じものであるという。1本の光ファイバーは全国規模のコアネットワークにも、家庭などへのアクセスネットワークにも、さらには家庭内の光LANにも使えるということだ。

一方で、増加するトラフィックに対応するために、さらなるブレイクスルーが求められる。これに対して、日立が02年から取り組んでいるのが「光多値変復調」による伝送技術だ。これは、光の強度ではなく、「位

相」と「振幅」、さらにそれらの組み合わせを利用して、一度により多くの情報を送ろうというもの。たとえば位相2値に振幅2値を組み合わせた4値であれば、これまでの2倍の伝送量を確保できる。日立では07年に、当時世界最多の32値多値変復調による50Gbpsの伝送技術を実現し、現在は、100Gbpsまで視野に入れている。

このほかにも、アクセスネットワークの進展、FTTHの普及の背景には、1本の光ファイバーで、複数のサービスを、複数のユーザーが利用することで、経済性、利便性を飛躍的に高めたPON(Passive Optical Network)システムの実用化など、多くの技術革新がある。そうした伝送技術の多くは、情報サービスの大衆化に欠かせない低コスト化の流れといえよう。

## 光デバイスのテーマは、高速、省エネ、低ノイズ

光通信システムのもう一つの大きな柱が光デバイスである。その主なものは、光信号と電気信号の交換を行う光送信器・光受信器伝送中に減衰した光信号を中継地点で増幅する光増幅器、そして、光のON/OFFによつて強度変調を行う光変調器だ。こうした光デバイスは、WDM技術など伝送システムの発達に促される形で、技術革新と市場拡大を遂げてきた。

【ブロードバンド契約数の推移】



総務省「情報通信白書」

「伝送システムの発達に伴って、1990年代前半から、まず基幹系が爆発的に拡大します。これを機に、それまで他社に市場を

占められていた基幹系の通信機器に参入しようと、中央研究所では10Gbpsに集中して光デバイス開発を進めることにしました」(辻)

皮切りは、91年からの10Gbps光送信器の開発。それ以後、日立では、外部変調方式を実現する高速MZマッハツェンダ型光変調器、増幅器用の高出力CW光源など、数多くの新技術を開発、実用化し、95年には、当時10Gbps送受信器としては世界で初めて

永瀬唯(ながせ・ただし)

1952年生まれ。東京都立大学理学部卒業。理工学系出版社の編集を経て、科学技術ライターとなる。1987年、サイバーバンクムーブメントを契機として、技術文化史、SF思想史を中心とした評論活動を開始。明治大学理工学部講師。著書『宇宙世紀科学読本 スペース・コロニーとガンダムのできるまで』(角川書店)、『腕時計の誕生』(廣済堂出版)、『京極夏彦の世界』(青弓社)、『欲望の未来 機械じかけの夢の文化誌』(水声社)ほか。

全I/C化を達成した、多重化端局装置と中継装置を实用化した。

これらの光電子技術は10 GbpsベースのWDMに適用され、伝送容量の爆発的な拡大につながっていく。さらに40 Gbpsベースでは、90年代初頭から研究に着手したE/A(Electro-Absorption)変調器を2000年に実用化、その後、研究目標を長距離伝送から短距離伝送にシフトし、03年には世界最小(外形2.4×1.9mm)の光送信器を実現している。

さまざまな光デバイス、さまざまな技術開発……。とてもつぶさに見ていくわけにはいかないが、技術開発の基本的なテーマは共通しているのだという。

「より多くの光信号を高速で効率よく送る、というのが伝送システムのテーマですが、光増幅器によって伝送過程ではその必要はなくなったものの、送受信の末端では必ず電気信号に変換しなければならない。

その変換をいかに速くするか、変換に伴うエネルギーをいかに減らすか、高速・大容量になるほど難しくなりますが、それをクリアすることが光通信システム全体のメリットを高めることになります。さらに、1波長当た

りの伝送速度が増えると、それだけ雑音成分も増える。低ノイズ化も大きなテーマです」(辻)

高速化、省エネ化、そして低ノイズ化。その明快なコンセプトは今日でも全く変わらない。たとえば09年3月に発表された100 Gbpsイーサネット\*向けの光受信器では、高精度のレンズを集積した受光素子を開発することによって、受光感度の向上と変換速度の高速化を両立させた。さらに、高速、低雑音の増幅回路を開発してエネルギー利用効率に優れた小型受信器を実現させている。

### 社会インフラとしての光通信ネットワーク

さて、次の時代の光通信ネットワークはどうなるのだろうか。私たちユーザーは何を求め、技術はそれにどう応えようとしているのだろうか。

「2000年以降、光通信ネットワークの需要を引っ張ってきたのはインターネットです。そこに電話、TVが一本化され、1000万世帯に光ファイバーが入ってきた。その一方で、社会インフラとしてのさらなる活用が期待されます。

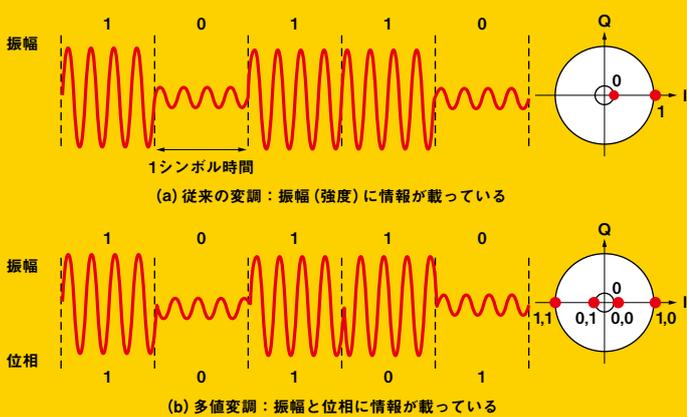
たとえば、資源やエネルギーの効率的な運用や制御。光通信ネットワークなら、リアルタイムで一括管理ができるなど、そのポテンシャルは大きいと思います。さらに、バーチャ

ルなトランスポートーションとしてのメリットもあります。つまり人が動くことなく、それと同等の価値やサービスが享受できる。これは省エネ・省資源効果と同時に、遠隔医療や在宅看護など医療福祉分野での効果が大きい。もう一つは、いつまでもなく災害時など安全・安心のための機能です。こうした社会インフラとしての機能をどう構築していくか、それが問われているのではないのでしょうか」(辻)

一方で、社会インフラとしての機能を十分に果たすには、まさに「いつでも、どこでも、誰でも」つながるシームレスなシステムでなければならぬ。「非常時であっても使えないと困るわけです。それとやはりコストと使い勝手。ライフラインとしてのFTTHという意味では、電気、水道のようにほぼすべての家庭に届かなければなりません。1000万世帯が光ファイバーでつながった今、そのゴールも見えてきました」(佐々木)

\*イーサネットは富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

### 【光多値変調の原理】



### 【光多値変復調の実験例】

