

レーザーコンパス

光ファイバーの非線形と光通信の将来

藤 井 陽 一*

Yoichi FUJII*

光ファイバーが、1970年に、現在のような低い伝送損失が得られるということが示されてから、わずか20年に満たない時日が経過したにすぎないが、この間、光ファイバーを用いた光通信というシステムは、私共の社会に確固とした根をおろしたように見える。

このことは光ファイバー自体の研究開発はむしろのこと、これをとりまく光デバイス（特に1970年に発見されたダブルヘテロ構造のレーザーダイオードは特記されるべきである）や、これらを以って構成される光通信システムの開発に携わった多くの先人の努力の賜物であることは言を俟たないが、本質的には、光ファイバーの有する技術的可能性の豊かさ、特に、その有する伝送容量の潜在的な大きさがその技術的な開発を促したというべきである。

光ファイバーの通信媒体としての特徴は、その断面が極めて小さく、単一モード光ファイバーでは、ほとんど光の波長のオーダーであること、また、可視光から近赤外光に亘って広い波長帯で透明であり、本質的に広い帯域を有することである。現在はもちろん、これを利用した数Gbit/sの光通信、さらには波長多重通信が行われているが、しかし、光ファイバーの本質的に有する広帯域性は、まだ完全には利用され

ていないように見える。

この光ファイバーの広帯域性を更に利用するための光デバイスの研究は現在も多方面に亘って盛んに行われている。その中には、もちろん極短光パルスの発生、伝送、検出に関連するデバイスの研究がある。これらは、着々と成果をあげ、ファイバーの利用される周波数帯域も日々拡大している。

このように、光ファイバーの実用性が増大するにしたがって、一体、どの位まで、光ファイバーの帯域を高めることができるかという基本的な疑問がわいてくる。これは、特に、光ファイバーは、光学的に密な（屈折率が高い）媒質であり、強い光に対しては様々な（光ケル効果、ラマン効果などの）非線形性を示すことから、単に光の帯域幅のみでは決まらない、伝送電力により制限される伝送容量の上限が考えられなければならない。

Fig. 1 に示すように、光ファイバーの伝送容量は、底面が伝送可能帯域幅×ファイバー・コアの面積である所に、SN比が1であるような、最小分解可能な光パワーの塊（分解可能光子）を詰め込んでいく過程と考えることができる。

ファイバー・コア面積の増大は、多モードファイバーによるか、あるいは、多数のコアを有す

* 東京大学生産技術研究所 教授 (〒106 東京都港区六本木七22-1)

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo (7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106, Japan)

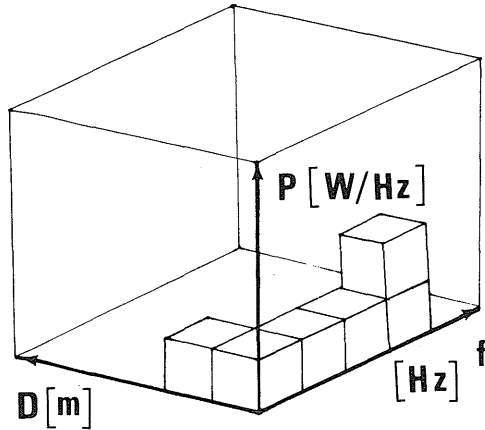


Fig.1 Channel capacity of optical fibre.

る光ファイバーにより実現でき、本質的には、光の波長と、使用できる導波路の断面積によって上限が決まる。

一方、光ファイバーの伝送可能帯域は、光ファイバーの分散（材料分散＋導波路分散）と、発生される光パルスの幅により決められる。

しかし、伝送できる情報量は、この箱にどのくらい多くの分解可能光子を積み上げることができるかという点で決まる。この積み上げることのできる上限は積み上げた光子数の合計、すなわち光のピークパワーが、光ファイバーの非線形性により制限されることで決まる。たとえば、光のピークパワーが増大すると、光ケル効果やラマン/ブリュアン散乱により、入力光子は別の周波数へ変換され、散乱される。それに伴う、不確定的な分配過程で、情報が失われていく。すなわちこの意味で、光ファイバーの非線形性は、伝送容量に対して重要である。

現在、極短光パルス発生に関する技術が革命的に進展しつつある。従来、短い光パルスの発生には、モード同期をかけたYAGレーザー、色素レーザー等が用いられてきた。現在はこれ

が半導体レーザーの領域にまで拡大していく一方で、いわゆる受動的な非線形光伝送媒質によって、周波数チャープングをおこさせ、これを線形の分散性媒質により入力パルスより、幅がきわめて圧縮されて光パルスを作るものである。

この受動的なパルス圧縮技術は、現在、非線形媒質として光ファイバーの光ケル効果が、線形な分散媒質としては、たとえば、回折格子対のような適当な負の分散を有する干渉計が用いられている。現在、ベル研究所のグループによりモード周期色素レーザーを光源として、このパルス圧縮を行った結果、6 fs 幅の光パルスが得られたとされている。これは、もはや一つのパルスに、3周期分の波しかなく、光が波として考えられうる極限にまで至っていることがわかる。

このように、光圧縮法により、きわめて短い幅のパルスが得られることがわかったが、これは、そのまま、高い情報密度が得られることにつながらない。すなわち、高い通信容量を得るためには、短いパルスに十分にランダムな情報をのせることが可能で、かつ、これらのパルスを高密度に配置することができなければならないからである。

また、負の分散と、非線形性とが組み合わせられると、いわゆるソリトンと称する定常的なパルスが伝搬することが知られている。これによりきわめて短いパルスの生成、伝搬に関して、一段と高い関心が寄せられるようになった。

このような光カー効果という、屈折率 n が、

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 \quad (1)$$

のように、入力パワーに比例して変化する場合は、これを利用して、光パルス波形を変形してやる

波形処理光回路を作ることが可能になる。

その簡単な一例が、いわゆる光パルスの分離である。

入力光パルスがあまり密でありすぎると、分散の影響などにより、パルス幅が広がり、相互に重なり合うため、従来の光検出器では、これら二つを分離して検出することができない。しかし、これに、パルス圧縮と同様に、光カー効果をも有する光ファイバと回折格子対からなる分散媒質を用いると、個々の重なったパルスを圧縮して幅を短くするだけで、情報を担ったままで、二つに分離することができる。

これを用いると、従来の伝送路の分散による群遅延の枠を超えた広い帯域をとることができるようになる。

このようなパルス分離効果、あるいは、非線形光ファイバにおける光パルスの情報伝送において、それを制限する因子として、次のような原因が考えられる。光ファイバの高次の分散は従来の2次の分散によって生ずる不確定的なパルスの広がりを、さらに、不規則に増加させる。しかし、これは、この高次項(特に3次項)は、決定論的である限り、何らかの手段により補正可能であり、複雑にはなっても、本質的な制限因子とはなりにくい。現に上述の6 fsのパルス発生では、この第3次項の分散を補正したといわれている。

しかし、第2の原因として考えられる、非線形性による他の損失を有する振動系、たとえば格子振動への結合であるラマン散乱においては振幅が大きくなるにつれて損失が非線形的に増

大するだけでなく、エネルギー量子が不確定的に分離される過程を含むために情報を失う。すなわち、伝送容量に対しての制限因子となることが考えられる。

このような上限の光のピークパワーの値は、物質に依存するパラメータであるから、実験的に定めなければならない。現在のところ、まだそのためのデータは十分とはいえないが、おそらく、10W程度と考えることができる。

一方、上述の6 fsパルスのように、極短光パルスが通信に用いられるようになると、また、通信の帯域も増大し、これに伴って、その帯域内の量子雑音も増大する。その値が、周波数 f までの光のベースバンドパルスとして

$$N = \int_0^f hf df = (1/2) hf^2 \quad (2)$$

となるから、可視光域 10^{14} Hzでは、 $N \sim 10^{-5}$ Wのオーダーになり、非線形伝送路の上限パワーに比べて、あまり十分なSN比あるいはダイナミックレンジがとれなくなる恐れもでてくる。

以上のように、非線形性を有する光伝送路、特に光ファイバーでは、その本質的な広帯域とあいまって、このような非線形性によって、光通信の伝送容量が一体どのような要素によって定められるのかをより根本的に見直して見る機会であると考えられる。これにより、従来の波動を主とする光学から、いわばベースバンドパルスを取り扱う、いわば、デジタル光学へと大きく飛躍していく契機となるものと思われる。