

## 光ファイバ通信

倉 菌 貞 夫\*

光はわれわれに直接知覚できるために、応用や研究の歴史は古い。しかし、近代科学としての光学が発展したのは17世紀以後で、種々の光学機器の発明につれて、干渉、回折等の重要な光学的現象の究明が行われ、光の本質をめぐって粒子説と波動説の激しい論争を呼んだことはよく知られている。19世紀に至り、Maxwellが光の電磁波説を発表し、ついで、Einsteinの光量子説へと発展し、現在では光は電磁波と粒子の両面性をもつことが量子論により矛盾なく説明でき、多年の論争に決着がついている。

光を情報伝送の搬送波として用いる光通信が研究の対象として取上げられるようになったのはレーザの発明以後であるから、まだ、十数年にしかない。信号を伝送する搬送波は通信容量を増加させるために、これまで、周波数の低い方から超短波——マイクロ波——ミリ波へと発展し、通信工学の分野でより高い周波数領域の開拓は1つの目標であった。

光は大気中においては雨、雪、霧等の散乱、吸収によって大きな減衰を受けるので、マイクロ波領域で行われているような空間伝搬方式によっては安定な長距離通信系を構成することが困難である。ただし宇宙空間を伝搬路とする例えば宇宙船間の通信用としては小形のアンテナ系で指向性の鋭いものが得られるという特徴を生かすとすれば、将来利用される可能性がある。地表上で安定な伝送を行うためには、外部環境から遮へいされた伝送路を用いる必要があるが、現在、大別して光ビーム導波系と光ファイバが考えられている。光ビーム導波系というのは、光ビームの回折効果による広がり軸方向に周期的に配列したレンズまたは反射鏡によ

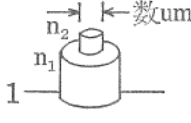
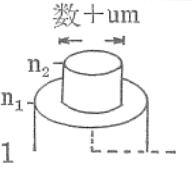
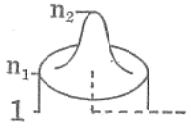
って集束しつつ伝送するもので、非常に低損失であり周波数分散も少ないために、広帯域、大容量伝送の可能性がある。しかし、レンズ等の集束素子の間隔が大きいため、機械的振動、温度変化などの周囲条件の変動によってビーム変位を生じやすく伝送特性が不安定となる欠点があり、安定化のためには、何らかのサーボ機構を導入する必要があると考えられ、技術的にはともかく経済性と保守上の問題がある。

光ファイバは基本的には直径0.1mm程度のガラスをコアとし外部をこれより僅かに屈折率の小さいガラスで覆った構造のもので、以前から胃検診用などに使われていた。当時の光ファイバの損失は1 dB/m程度と非常に大きく、長距離の光伝送には全く不向きであった。ところが数年前、米国コーニング社がガラス中の不純物を除去することによって一挙に百分の一に低損失化することに成功し、以後各国で急速に研究が進展した。現在、わが国でも数 dB/kmの低損失ファイバが再現性よく製造できる段階に達している。光ファイバの第一の特徴は大容量伝送の可能性があるを持つことで、将来画像通信が広く実用化されるためには、大容量の線路が低価格で供給される必要があるが、光ファイバはその最も有力な伝送路と考えられている。また、光ファイバは豊富に在る珪素を主材料とする点で、従来銅を用いる線路に対し資源面でも有利であるとみられている。更に、光ファイバには、電磁誘導を受けないという特徴があるので、船舶、航空機、電力送配電システムにおける制御およびデータ伝送などの分野に適用されると考えられる。

光ファイバの伝送帯域を制限する要因は多モードファイバでは、モードごとに光の群速度が異なることに起因するモード分散であり、単一モードファイバでは周波数分散である。モード

\* 倉菌貞夫 (Sadao KURAZONO), 大阪大学, 工学部, 通信工学科, 助教授, 工学博士, 超高周波工学

表1 基本的な光ファイバとその伝送損失

		屈折率分布	材 料	伝送損失
単モード			コア( $n_2$ ):石英ガラス クラッド( $n_1$ ):石英ガラス	2.5dB/km
多 モ ー ド	屈折率 階段形 (クラッド形)		コア:石英ガラス クラッド:石英ガラス	2 dB/km
			クラッド:プラスチック	2.8dB/km
	集束形 (グレーデッド インデックス 形)		石英ガラス	3 dB/km
			多成分ガラス	6 dB/km

分散を低減する方法として、これまでに、ファイバ断面内の屈折率を二次曲線状に中心からゆるやかに減少させる集束形ファイバとするものや、クラッド部分に損失のある誘電体を用いるものなどの研究があるが、前者は屈折率分布の最適化の問題や製造上屈折率分布の制御に高度の技術を要し、後者は伝送損失の増加を招くといった問題がある。最近、筆者等はモード分散の軽減法としてファイバの接続部にモード変換器を挿入することによって変換器前後の線路のモード毎の群遅延差を打消す方法を提案し、種々の検討を行った。今後モード間結合の少ない良質のファイバが製造されるようになれば有効な広帯域化の方法と考えている。

光通信システムを実現するためには、伝送路の他に種々の光機能素子、光回路素子を開発する必要がある。筆者らは過去にミリ波帯の回路素子の研究を行って来たが、ミリ波も光も伝送という観点に立てば周波数が $10^4$ 程度異なるのみでともに同じ電磁波であり、したがって共通の原理に基づいた回路素子が多数見出される。パラボリアンテナ、円形導波管のハイブリッド素子等は古典的光学の成果をミリ波帯に応用した例であり、一方光カップラは古く電話ケーブ

ルの漏話の解析に適用された分布結合理論を用いてマイクロ波、ミリ波帯で開発された方向性結合器を光回路に応用した例である。ところで、従来の光学機器はレンズ、プリズム、ミラー等を高精度に配列し、光はその間の空間をビームの形で伝える構造のものであった。光通信回路素子も当初同様な構成に適合するBulk構造で出発したが、電子回路のIC化と同様に素子の微小化、高信頼性をねらいとして薄膜化、IC化が提唱され、興味深い研究課題として注目を集めた。光ICの明確な定義はまだなされていないが、二つ以上の回路素子を一体として集積したもので信号が光によって伝達されるものと考えてよからう。具体的な回路素子としては、光発生素子、光検出素子、光制御素子、伝送路(光結合器、分岐等の受動素子を含む)等がある。光IC内の伝送路としては誘電体線路が用いられる。これはSubstrate上にそれより1%程度屈折率の高い誘電体の薄膜またはStripをつけたもので、散乱損失を小さくするために表面の凹凸は数百Å以下に抑える必要があり、高精度の微細加工技術が要求される。

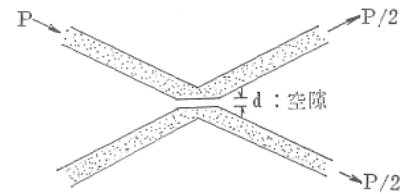
光搬送波に実際に情報をのせる機能をもつ

が光変調器である。これは強誘電体の屈折率を電気光学効果、音響光学効果などにより変化させる方法によって実現される。大容量通信には応答の速い電気光学効果を用いる必要があり、結晶としては  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  などが使われる。光変調器は IC 化することにより制御電圧が従来の  $\text{Bu 1 k}$  形と比較して一挙に  $10^{-3}$  程度に低下できる利点がある。筆者等は、先に、分布結合した二つの線路間の光パワの移行現象を利用する新しい二つの形の光変調方法を提案し、種々の検討を行った。一つは線路または線路間の媒質の屈折率を変えることによって線路の伝搬定数または線路間の結合係数を変化させる形式のもので、他の一つは二個の 3 dB 結合器と外部信号によって位相量を変化し得るような位相器を組合せた形のものである。これらの変調方式は現在それぞれ方向性結合器形およびバランスブリッジ形と呼ばれ、構成の容易さと変換効率の点で有利で将来有望と目されている。また、分布結合した線路間の 0 dB 結合は二線路の伝搬定数が一致している場合にしか起らないと考えられていたが、検討の結果、伝搬定数が異なる線路の場合にも従続接続することによって 0 dB 結合が可能であることが理論的に明らかとなった。この方法は光変調器だけでなく他の分布結合を用いる方向性結合器、モードフィルタ等の光 IC 素子を実現するうえで広範な応用が可能である。

現在は光 IC 用の二分岐およびハイブリッドとして図 1 のような構造の誘電体線路につき、理論計算と並行してミリ波帯でのモデル実験を行っている。両方とも境界面と空隙部分における光の全反射現象とトンネル効果を利用して放



(a) 光二分岐回路



(b) 光ハイブリッド

図 1 光 IC 用二分岐およびハイブリッド

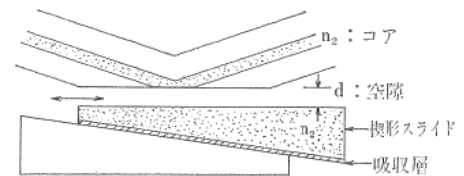


図 2 光ファイバ用可変減衰器

射損失の少ない回路を実現することを狙いとしている。図 2 は同様な原理を用いた光ファイバ用の可変減衰器の提案である。光ファイバ通信を行う上でこの種の回路素子の開発が重要となる。

以上、光通信に関連した研究の現状の一端とわれわれの処で行ってきた研究について述べた。光通信、ことに光 IC の分野は積極的な研究開発が始められてまだ日も浅く解決すべき問題が山積している。しかし、今後微細加工技術の進歩や材料面の後押しにより急速に発展することが期待される。