



人々をつなぐ光ファイバ通信のしくみ

— 音声・映像をレーザー光に“乗せて”送る —

西原 浩

現在私たちは世界中どこへでもインターネットを通して、音声や映像を瞬時に送ることのできる世界に生きています。本当に不思議ですね。素晴らしい光通信技術のお蔭です。その光にはレーザーの光を、そして伝送には直径約10分の1mm(髪の毛くらいの太さ)のガラスファイバを使っています。ほんの40年くらい前ではそんなことは夢でした。その技術の仕組みを紹介しましょう。

むかしの光通信

光通信の歴史は古く、西部劇の映画に出てくるシーンのように、昔の人々は遠くにいる仲間知らせるのに、火を燃やして煙を立ち上らせたり、小さなガラス破片のようなもので太陽の光を反射させて、反射光をピカピカさせたりしていました。これが光通信の始まりでしょう。これでは煙や光が見えるかどうかだけでそれ以上の詳細な情報は伝えられませんが、雨天の時には役立ちません。

レーザー光による光通信

1960年にレーザーが発明されて以来、レーザーをいろいろな分野で活用する提案がありました。その中の一つが光通信です。レーザーの光は懐中電灯のような光に比べると広がりにくい光ですが、それでも直径1mmのレーザービームは100m先では最小でも直径約10cmのビームに原理的に広がってしまい弱くなってしまいます。また光は雨天では減衰が大きくて遠方には到達できません。また「カラスが飛んで光を遮っても困るなあ」と冗談っぽく言われていました。

ガラスファイバによる光通信

そこで光を空間中に送るのではなく、ガラスファイバの中を送る方式が考えられました。一般の窓ガラスなどは光を吸収散乱させて減衰させてしまいます。しかし石英系ガラスの中の光の伝搬損失の理論値が小さいこと、したがってファイバが光の長距離伝送に適していることなどが、1970年、アメリカのコーニング社のカオ博士によって明らかにされました。カオ博士はこの業績で2010年にノーベル物理学賞を授与されました。

ガラスファイバの構造と光伝送の原理

光ファイバのガラス部分の直径は125マイクロメートル μm (=0.125mm)と国際規格で決まっています。以下マイクロメートルを省略して、ミクロンとだけ書くことにします。光の波長がミクロン程度であることもあって、光の分野ではミクロンの単位がよく使われますのでそれに慣れることが必要です。1ミクロンは1000分

の1mmことです。光ファイバは、図1に示すように、中心にコア部、その周りにコア部よりも「屈折率」の小さいクラッド部といわれる部分で構成されています。

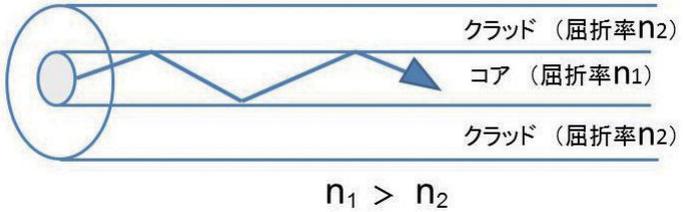


図1 ファイバ中の光伝搬のようす

媒質の屈折率とは、光が空气中を伝わる速さを1としたとき、その媒質での光の速度比の逆数で表します。例えば、ガラスの屈折率が1.5の場合には、ガラス中での光速度は $1/1.5=0.67$ となります。

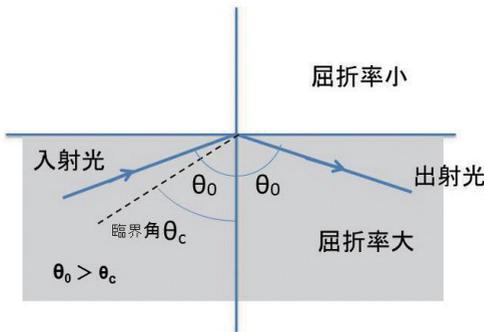


図2 全反射のようす

レーザー光は直径125ミクロンの断面の全面を通るのではなく、その中心のコア部を主に通ります。これはクラッドとコアの境界面で光が「全反射」しながら伝搬していくように工夫されているのです。「全反射」とは、例えば、図2に示すように、ガラスの中から空気側に光が進む場合、入射角が臨界角(いまの場合 41.8°)よりも大きいとき、100%反射します。これを全反射といいます。

図3はプラスチックの板の中をレーザー光線が上面と下面で全反射を繰り返しながら進行していく様子を写真に収めたものです。日常生活では、金魚鉢を斜め下から覗くと金魚が水面に逆さにきれいに映っているのをご覧になったことがあるでしょう。光ファイバはこの現象を利用しているのです。

国際光ファイバネットワークのような長距離ファイバには、単一モード光ファイバと云われるファイバが使われており、コア径は直径5~10ミクロンです。

クラッド部とコア部の境界面の上部と下部で光は全反射を繰り返しながら伝送していきます。実際の基本構造

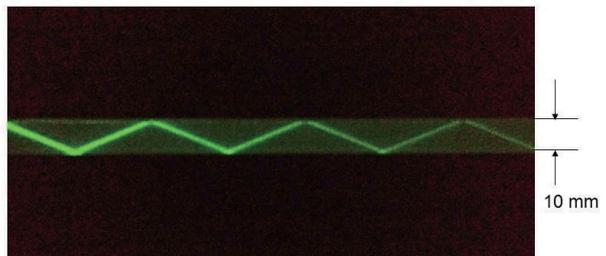


図3 プラスチック板の中を全反射を繰り返しながら伝搬するレーザー光の様子

を図4に示します。

ガラスファイバだけでは折れやすいので、周りはプラスチックのプライマコートで守られています。さらに取り扱いやすいように、直径1mmのナイロン被覆で覆われており、外観はビニールで包まれた電線のように見えます。

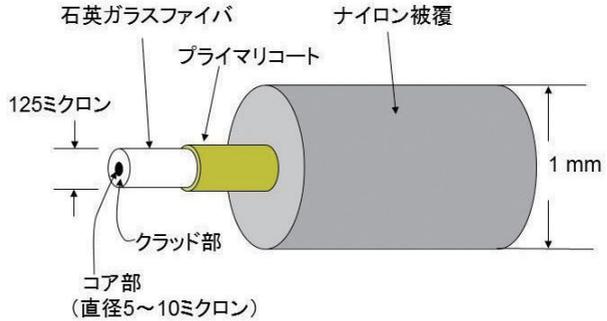


図4 単一モード光ファイバの実際の構造

光ファイバの伝送損失は、1970年ごろから研究開発が進み、日本国内の基幹光ファイバネットワークや国際海底光通信ネットワークで使われるレーザー波長1.55ミクロンにおいて0.2dB/kmが得られるようになりました。これは光のパワーが15kmで半分にしかならないほどの小さな減衰です。最も性能の良いファイバが日本で製造されています。

半導体レーザー

光ファイバ通信の光源には、レーザーの中でも特に小型、低電力、超寿命という特徴のある半導体レーザーが使用されます。半導体レーザーの構造は図5に示しますように、この例では、InGaAlAs(インジウム・ガリウム・アルミニウム・ヒ素)系の半導体結晶の多層膜でできており、レーザー結晶の大きさは幅100ミクロン、長さ300ミクロンくらいであり、レーザー作用を起こす部分は活性層の幅1〜3ミクロン、活性層厚0.1ミクロン程度、長さ300ミクロンの細長い柱状の部分です。この柱状部でレーザー発振が起こり、その端面からレーザー光が出射してきます。

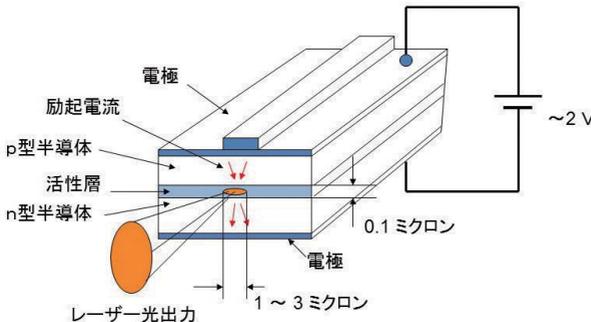
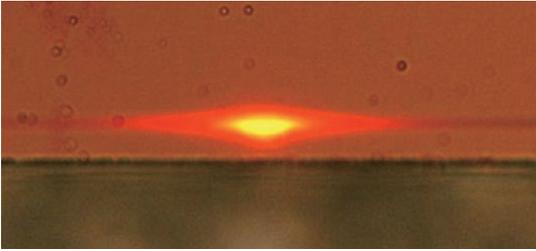


図5 半導体レーザーの構造

レーザー発振のために、柱状部のある結晶の上面電極と下面電極に数Vの電圧を印加するのですが、上面から下面へと数10mAの励起電流が共振器を横断して流れます。この励起電流により柱状部内の原子が励起され(エネルギーを得て)不安定になり、安定状態に戻る



波長0.65ミクロン 光出力5mW
図6 半導体レーザー発光の様子

ときに光を放出します。この光が柱状部の中を前後方向に往復するうちにだんだんと増幅され、レーザー発振が起こるレベルにまでなり、端面からレーザー光として出射してきます。その様子が図6の写真に見られます。ここでは、出射光が見やすいように、波長0.65

ミクロンの可視光レーザーを選びました。光通信システムでは、ファイバの低損失波長領域に合わせて、発振波長は1.3ミクロン付近および1.5ミクロン付近(赤外光のため肉眼では見えません)が使われます。小さい部分から出射してきた光をファイバの小さなコアに入れるのは精密な難しい技術が要求されます。

光ファイバ通信システム

現在、日本中ばかりか世界中にファイバが張りめぐらされ、光ファイバ通信ネットワークは五大陸内ばかりか、大陸間が海底ケーブルによって結ばれ、グローバルに構築されています。ファイバの総延長はどれくらいになるのでしょうか。地球を何周もするでしょう。その中を半導体レーザーの光が走り回っているのです。その光に音声、映像、データ、などのいろいろな情報が“乗って”います。

図7はアナログ音声電気信号をデジタル電気信号に変える過程を説明したものです。

(a) 図のように音声電気信号を時間に対して自然のままに表す方式をアナログ方式といいます。このアナログ信号を(b)図のように一定時間間隔ごとに数値化し(これをサンプリングといいます)、これをデジタル化して(d)図のように0と1の組み合わせのデジタルコードで表現します。これを電気信号に直し、さらに光信号に直すと、(e)図のように、“ある”か、“ない”か、すなわち、1か0かの組み合わせの光パルス列信号がえられ

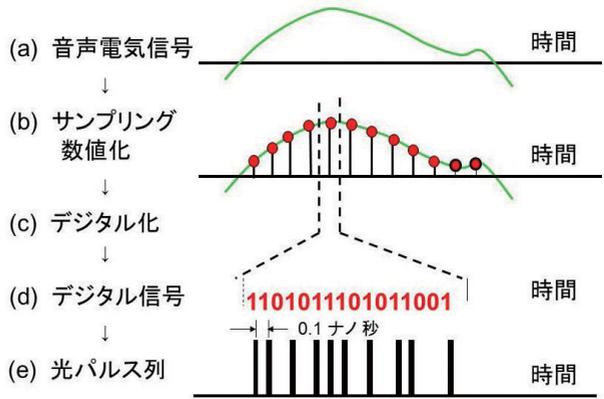


図7 音声電気信号のデジタル化



ます。信号のこのような表現方式をデジタル方式といいます。たとえば、写真を送信する場合には、まず写真を多数の小さな点に分解し、その位置のアナログ電気データをとり(サンプリング)、各点の明るさ、色などの情報をすべてデジタルコード化し、光パルス列として送り出します。一方、受信側では受光素子でその光パルス列を電気信号に変換し、そのデジタル信号をアナログ信号に戻し、順次、元の位置に戻すことにより、元の写真を復元するのです。

現在の光通信では、音声も映像も文書もすべての情報はデジタル化されます。デジタル化すると、すべての情報を等しくデジタル信号処理ができて便利です。また、信号を伝送したり、処理したりするときの誤りが少なくなると同時に、誤りを訂正することもできるからです。

ファイバ中を走っている信号は図7(e)のような光パルス列になっており、元の信号の振幅、周波数、位相などの情報をすべて含んでいます。パルス幅を細くすることができればできるほど、1秒間に多くの情報を送ることができるわけです。現在実用されている最小のパルス幅は0.1ナノ秒(1ナノ秒=10億分の1秒)、間隔も同程度です。このパルスの形はファイバのなかを長距離走ると、形が鈍って来て隣のパルスと重なり、区別がつかなくなるので、そのようなことにならないうちに、通常50kmから100kmごとに中継器というものをに入れてパルス列の形を整えて長距離伝送に耐えるようにしています。

光ファイバ通信の簡単なモデル

図8に光ファイバ通信の一例として音声を送る例を示します。Aさんがマイクに向かって話するとこの電気信号が半導体レーザーの電流を直接変調し、レーザー出力光が音声信号に応じてアナログ変調されます。光に音声信号を“乗せた”こととなります。これをファイバによってBさんまで送り届けます。Bさん側ではこの音声信号を光検出器によって元の音声信号に変換し、これをスピーカーで聞くことができます。これはアナログ通信システムですが、ここで音声信号をA/D

(アナログ/デジタル)変換をして音声のデジタル信号をレーザーに入れ、受信側で再びD/A変換すればデジタル通信システムになります。アナログ

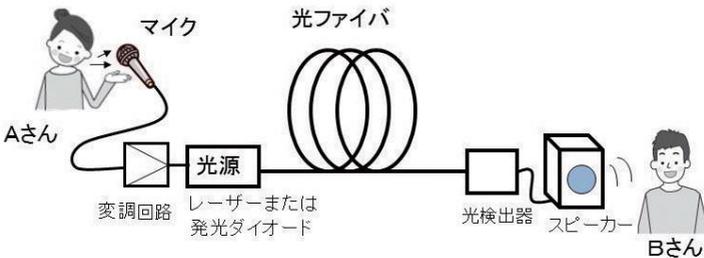


図8 光ファイバ通信システムの基本構成 (アナログ方式)

システムは、比較的簡単に作製するキットが市販されていますので、興味のある方は挑戦してみてください。

筆者は、毎年8月にハービスHALL(大阪市北区梅田)で開催されるサイエンス・フェスタに参加してきましたが、2009年から3年間に図8のような光ファイバ通信システム(アナログ)を手細工で作製し展示しました。そして入場者



図9 2009大阪サイエンス・フェスタ
「光ファイバーつうしん」

の方に光ファイバ通信システムとはどんなものかを見てもらい、また実演として本人の声を送信したり、子供さんの声をお母さんが受信したりして、楽しんでもらいました。図9はそのときの展示の様子の写真ですが、ファイバには取り扱いやすい直径2mm、長さ10mのプラスチックファイバを使用しました。スタッフが指を差しています。写真でご覧になれますでしょうか。

むすび (電話、インターネット、TV、携帯電話への応用)

いまや総人口の7割の人が携帯電話を利用しているとの統計があります。携帯電話は、近くの基地局アンテナとの間で電波のやり取りをして情報の送受信をしているのですが、基地局を過ぎたあとは光通信ネットワークに入るようになっています。また現在は多くの家庭に光ファイバが導入されており、ONU(光ネットワークユニット)によって電気信号に変換され、電話機、テレビ、コンピュータに接続されています。

このように多くの情報機器は基本的には光ファイバに接続されていますので、現代人は生活のあらゆる面で光ファイバ通信のお世話になっているのです。

著者紹介 にしはらひろし

2001年大阪大学工学研究科退職、2008年放送大学退職。大阪大学名誉教授。専門は光エレクトロニクス。2009年からサイエンスガイド、2010年からは科学デモンストレータなどをしながら子供の理科教育活動にも励んでおり、また旅行やスケッチ(水彩)を楽しんでいる。

