

光ファイバー通信における光技術

須藤 昭一

光通信の起源は、狼煙や腕木通信、手旗信号等、視認による光通信であることが指摘されているが¹⁾、光源、変調、伝送、受光（復調）の4つの機能を備えた光通信を初めて行ったのは、Alexander Graham Bellである^{2,3)}。図1は、Bellが行った光通信の実験系を彼の1881年の論文³⁾から引用したものである。太陽光を光源とし、反射量の変化によって光源を変調し、レンズガイドによって空間を数百m伝送した後、Seの光導電効果によって復調するという光通信系であった。“Photophone”と名付けられたこの世界初の光通信によって伝えられたメッセージは、“Mr. Bell, if you hear what I say, come to the window and wave your hat”であったと記述されている³⁾。

日本においては、1936年に、関・根岸によって光線通信方式の改良—すなわち、石英ガラスロッドや金属チューブを使って光を効率よく伝送する特許（図2）—が提案されている⁴⁾。この発明は、名称が「…の改良」であり、明細書の中にも、空間伝搬による光通信が従来技術として記述されていることから、Bellに起源する空間伝搬による光通信は、1936年当時の日本においても既に公知の技術であったといえる。

しかしながら、光通信が現実的な注目を集め始めたのは、1960年のレーザーの開発以降であり、光源、伝送媒体、受光系を中心に、活発な研究開発が展開されることとなった。それ以来36年後の今日、光通信（正確には光ファイバー通信）は大きな発展を遂げ、情報伝達手

段の基幹となるに至っている。統計によると、1995年、全世界で2000万km・心（ファイバー単線の総延長）を越える光ファイバーが導入されており、総累計では7000万km・心をこえる驚異的な量の光ファイバーが世界中に張り巡らされているのである。図3は、国際海底光ファイバーシステムの導入状況（1997年までの予定を含む）を示したものである⁵⁾。この結果、世界90か国は光ファイバー通信によって結ばれることになる。またこれとともに、各国内でも光ファイバーシステムの導入が急速に進んでいることはいうまでもない。

本論文では、こうした光ファイバー通信における光技術を、光ファイバー技術、特に光ファイバーの作製技術の開発経緯を中心に記述する。

1. 光ファイバーへの道—1970年までの光伝送媒体の研究開発

現在、光ファイバーは安価で良好な光伝送媒体としてさまざまな光伝送に幅広く使用されているが、1970年以前、事情は違っていた。光伝送媒体として要求される低損失、安定、柔軟、低分散等の特性を実現すべく、さまざまな媒体が幅広く検討された。図4は1960年代に研究された各種光伝送媒体の模式図である^{1,6,7)}。研究の量からみれば、60年代の前半は空間伝搬が最もよく研究され^{8,9)}、後半はレンズガイド¹⁰⁾とガスレンズガイド¹¹⁾が詳細に検討された。しかしながら空間伝搬では、霧、雨、雪等による光の減衰があるだけでなく、大気の屈折率の不均一性のためによく晴れた日でも伝搬ビームがゆらぎ、安定した通信を行うのが難しいことが明らかとなった⁸⁾。またレンズガイドでは、地下1.5mに埋設した伝送実験でも機械的な安定性に問題があることが明

Optical technology for fiber telecommunications (1996年6月20日受理)
Shoichi SUDO NTT光エレクトロニクス研究所(〒319-11茨城県那珂郡東海村白方白根162)

らかとなる¹⁰⁾とともに、曲げ半径を小さくすることが難しく、伝送路を低損失に曲げるためには、曲げ半径1 kmでもレンズを1 m間隔に配置する必要があることが明らかとなった。この解決策としてガスレンズガイドが検討されたが¹¹⁾、構造が複雑になりすぎ、結局行き詰ま

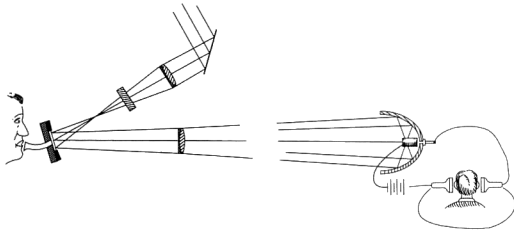


図1 Graham Bellによる光通信の実験(1881年)，“Photophone”。

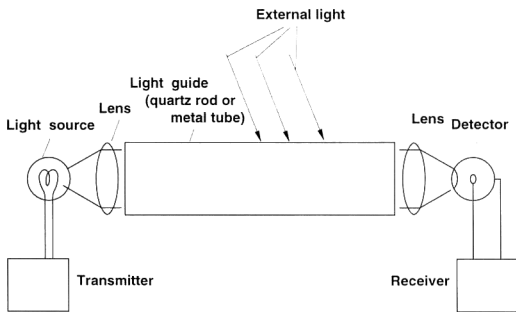


図2 関・根岸による「光線通信方式の改良」特許の構成図。

ってしまった。

一方光ファイバーについては、1930年代に石英ガラスファイバー(クラッド層なし)による光ガイドの実験が行われ、また1958年には多成分ガラス系のクラッド付きガラスファイバーが開発されたが¹²⁾、光損失がきめめて大きいため、1960年代の半ばまでガラスファイバーが長距離の光通信に使えらる人は少なかった。こうした状況のなかで、英国のCharles Kaoらが、1966年から1969年に至る一連のガラスロッドの精密な光学測定実験¹³⁻¹⁵⁾によって、石英ガラスファイバーによって20 dB/km以下、最終的には数dB/kmの光伝送損失が達成できることを精度よく示し、光通信用伝送媒体としての光ファイバーの可能性を強くアピールしたことは画期的なことであったといえる。

Kaoらによる指摘以降、低損失光ファイバーを実現すべく、世界中で活発な研究が行われた結果、1970年米国コーニング社のグループによって20 dB/kmの光ファイバーが、石英系ガラス素材によって実現された¹⁶⁾。当時20 dB/kmという光損失値は、距離1 kmの光通信ができるギリギリの損失値として重要な意味もっていた。光ファイバーは、この20 dB/kmの値を実現させたことで、低損失、安定、柔軟等の特性を有する光伝送媒体の有力候補として一気に浮上することとなった。低損失光ファイバーの歴史が本格的に始まったのは、まさにこの20 dB/kmファイバーの実現からであるといつて過言でない。

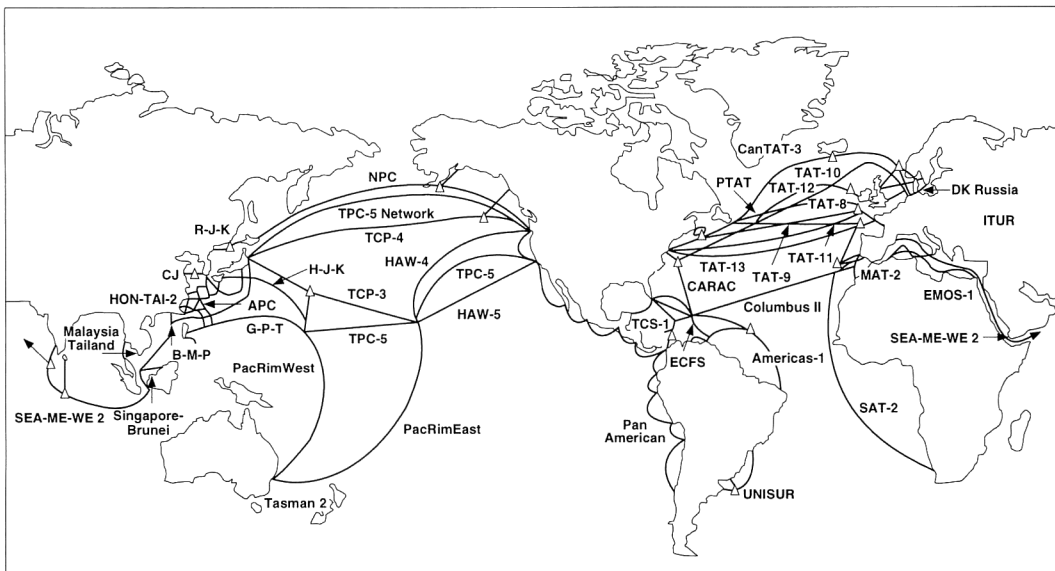


図3 国際海底光ファイバーシステムの導入状況(1997年までの予定を含む)。

2. 低損失光ファイバーの実現とキー技術

本節では、低損失光ファイバーの開発におけるキーポイントを記述することとした。この技術開発においては、技術的に面白い側面だけでなく、教訓的な経過が多分にあり、それらも併せて記述することとした。

2.1 ストーププロセス (Soot Process)ードーブト石英ガラス作製の基本技術

ガラスファイバーは、素材から石英系ガラスファイバーと多成分系ガラスファイバーに大別される。作製技術からみたそれぞれの特徴（少なくとも1970年当時）は石英系は高純度ガラスの作製は比較的容易だが、屈折率制御やファイバー構造の形成が難しく、一方多成分系は屈折率制御やファイバー構造の形成は比較的容易であるが、高純度のガラス作製が難しいことであった。

前記のコーニング社のグループは、1966年 Kao らが低損失の可能性を指摘した石英系ガラス素材をまず採用した。そして、高純度化や屈折率制御のために、約30年前に開発された技術^{17,18)}を掘り起こして適用し、20 dB/kmの光ファイバーを実現したことは見事であった。このドーブト石英ガラス作製の基本技術が、ストーププロセスと呼ばれるものである。図5は、ストーププロセスの概略図である¹⁷⁾。ストーププロセスは、液体原料32 (SiCl₄等)を蒸留・輸送し、トーチ56による火炎加水分解反応によって石英ガラス (SiO₂等)の微粒子58を作製し、これをもうひとつのトーチ57によって高温に加熱して透明なガラス体を作る方法である。この工程によって、高純度でかつTiO₂やGeO₂等を添加(ドーブ)して屈折率を制御した石英ガラスの作製が可能となるものである。この方法は、1940年前後にコーニング社のJ. F. HydeとM. E. Nordbergによって、高純度なドーブト石英ガラスの作製方法として考案されたが、

その後長い間忘れられていた。その技術を、同じコーニング社のDonald KeckとPeter Schultzが光ファイバー用石英ガラスファイバーの作製方法¹⁹⁾として改良・活用したものである。KeckとSchultzが20 dB/km光

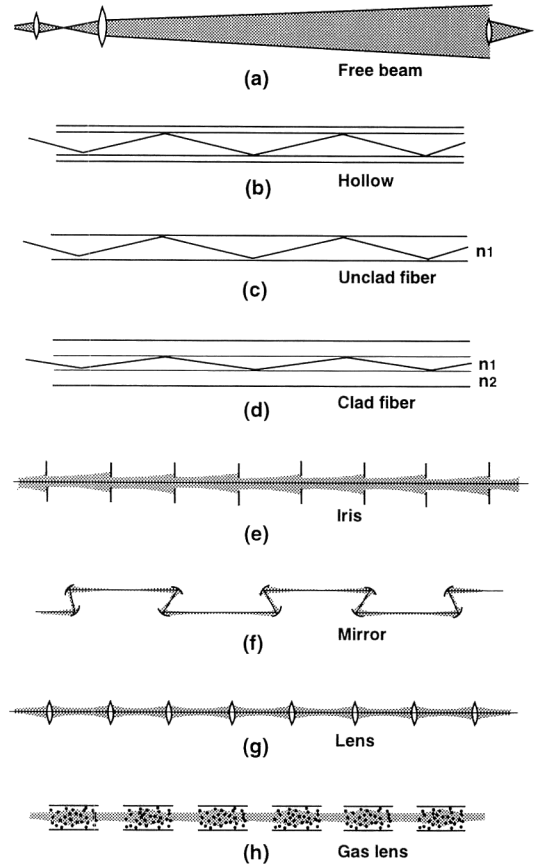


図4 1960年代に検討された各種光伝送媒体。

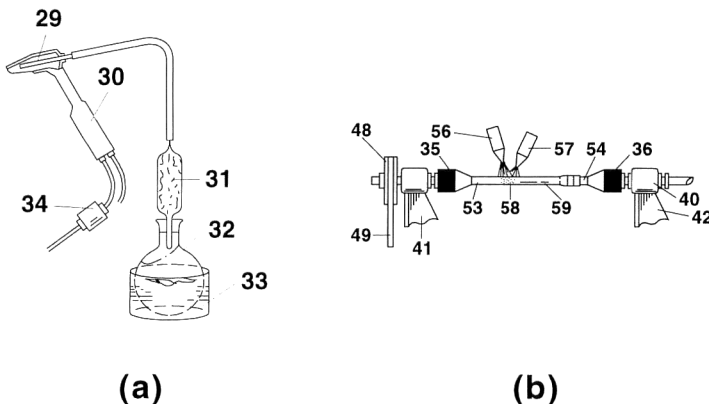


図5 1940年前後に考案されたストーププロセスの概略図。

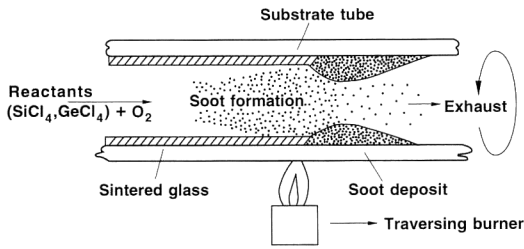


図6 MCVD法による光ファイバー母材作製の概念図。

ファイバーを作製した方法は、火炎中で合成した SiO_2 - TiO_2 のガラス微粒子を石英ガラス管の内側へ堆積させてコアガラス層とし、これを高温に加熱・透明化しながら線引き（ファイバー化）する方法であり、コアの小さな単一モードファイバーを数百 m 作製した。論文¹⁶⁾に明確な記述はないが、さらに Ti^{3+} を Ti^{4+} にするための熱処理を施して、20 dB/km の値を実現したと推定される。

2.2 MCVD法 (modified chemical vapor deposition method)

Keck と Schultz が開発した石英ガラスファイバーの作製方法は、石英系ガラスファイバーの可能性を示すことには有効であったが、ファイバー作製技術としては完成度の低いものであった。低損失な光ファイバー作製の安定した作製方法として最初に登場したのが、1974年に AT & T Bell 研究所のグループによって開発された MCVD 法である²⁰⁾。図6は MCVD 法による光ファイバー母材作製の概念図である。この方法の特徴は、(1) 石英ガラス管内部の閉管系での気相反応のため、不純物 (OH 基、遷移金属等) の混入をきわめて少なくでき、高純度のコア・クラッドガラスを合成しやすいこと、(2) ストーププロセスによって GeO_2 の添加を可能にしたこと、(3) 部分加熱の熱源 (バーナー) を採用し、かつ移動式としてガラス層の堆積速度・効率を高めたこと、等である。光ファイバーの研究者は、この方法の登場によって初めて本格的な低損失ファイバーというものを手にしたといえる。付け加えると、MCVD 法は、それ以前に検討されていた CVD 法 (chemical vapor deposition method) を基礎としているが、さらにその起源は半導体材料の作製技術である。

2.3 VAD法 (vapor-phase axial deposition method)

次に VAD 法について述べるが、VAD 法は筆者も開発者の一人であるため、本節の記述が主観的なものなることをあらかじめお断りしておきたい。

2.3.1 なぜ VAD 法か

MCVD 法は洗練された低損失光ファイバーの作製方法であるが、2, 3 の問題点を残していた。その1つが量産性であり、今1つがコアガラスの均一性である。まず量産性の問題であるが、これは MCVD 法の最大の特徴である「石英ガラス管内部でのガラス合成」という独特の構成から生じる制限要因である。すなわち、石英ガラス管を使用する限り、それ以上大きなファイバー母材を作製することは難しく、また大きな直径の石英ガラス管を使用すると石英管内部の均一な加熱が難しく、良質なファイバー母材を作製することが難しいということである。つまり、MCVD 法はファイバーの大量生産が得意でないということである。またコアガラスの均一性の問題は、ガラス層を何十層、何百層と堆積させてコア部を作るため、一層ごとのドーパントの濃度変動がさらに重複され、ガラスの均一性が悪くなり、結果として散乱損失等に悪影響を及ぼすことである。

こうした MCVD 法の問題点を解決し、光ファイバーの大量生産に適した方法として提案されたのが、1977年当時の日本電信電話公社茨城電気通信研究所のグループ (筆者もその一人である) によって開発された VAD 法である²¹⁾。この方法の起源は、2つの光ファイバー作製法である。その1つは、高温の酸水素火炎を熱源として、 SiCl_4 等のガラス原料から透明なガラス母材を、母材の軸方向に作製する直接ガラス化法²²⁾、もう1つは棒状のマンドレルの側面にストープ層を堆積する OVPO 法 (outside vapor phase oxidation method)²³⁾ である。このうち直接ガラス化法では、透明なガラス母材を作製するために火炎を高温にする必要があり、このため蒸気圧の高い GeO_2 の添加は難しく、添加できるドーパントは蒸気圧の低い Al_2O_3 と TiO_2 であったが、この2つのドーパント材料は低損失ファイバーの作製には適したものではなかった。また OVPO 法は工程が複雑で、コアガラスの中心にマンドレルを引き抜いた穴が開くため、低損失なファイバー作製法としては理想的なものとはいえないが考えた。

そこで、直接ガラス化法のもつ軸方向へのファイバー母材の作製という重要な特徴とストーププロセスによる GeO_2 の添加という利点を結合し、「軸方向にストープ (多孔質) 母材を作製する」VAD 法を開発したのである。そしてその狙いは、良好なファイバーの大量生産であった。ちなみに、VAD 法は日本語では気相軸付け法というが、最初の名前は気相ベルヌーイ法 (vapor-phase Verneuil method) といい、水晶の粉から溶融石

英ガラスを作製するベルヌーイ法²⁴⁾から命名したのであった。

2.3.2 VAD法の技術的課題とその解決方法

「軸方向に多孔質母材を作製する」というアイデアは単純であるが、それを実現するのは容易ではない。図7はVAD法のご概念図である^{25,26)}。このVAD法を完成し、低損失な光ファイバーを作製するためには、多くの技術的な課題(難題)を解決せねばならなかった。これらの課題は主に次の5点であった^{25,26)}。

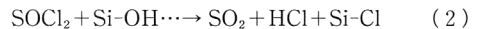
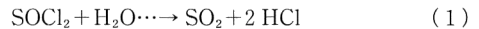
- (1) どのようにして軸方向にガラス微粒子だけの壊れやすい多孔質母材を作製するか?
- (2) どのようにして多孔質母材から透明なガラス母材を作製するか?
- (3) 酸水素火炎によって合成したガラス微粒子と多孔質母材中に含まれるH₂OやOH基をどのようにして除き、低損失化を達成するか?
- (4) コアガラスの屈折率分布の制御をどのように実現するか?
- (5) コアが小さく、厚い合成クラッド層の必要な単一モードファイバーの作製をどうするか?

まず、(1)の多孔質母材の軸方向への作製であるが、このポイントは、ガラス微粒子から多孔質母材を形成する合成トーチの構造と、トーチ、多孔質母材、排気口的位置関係であった。安定した多孔質母材の作製が可能になるまでトーチの改良が繰り返され、開発初期だけで100本をこえる石英ガラス製のトーチが作られた。また合成トーチの多孔質母材に対する傾け角と排気口的位置が重要で、この改良には反応部を覆うガラス製容器と合

成トーチの支持機構が繰返し改良された。この結果、太さ数cm、長さ40~50cmの多孔質母材を安定して作製できるようになった。

次に、(2)の透明ガラス化である。これは当初の最大の課題で、気泡のたくさん残ったガラス母材を数多く作製する結果となった。VAD法の開始当初、透明ガラス化の雰囲気は不活性ガスであればよいと考え、窒素ガスやアルゴンガスを使用していたが、これが大きな誤算であった。雰囲気ガスをヘリウムにただけで、99%失敗せずに透明化できるようになった。同じ不活性ガスでもアルゴンガスとヘリウムガスでは、多孔質母材から透明母材になる透明ガラス化過程における挙動が10³倍ほど違うことが、後で行った理論的解析の結果明らかとなった²⁷⁾。

(3)の多孔質母材中に含まれるH₂OやOH基を除去する脱水技術については、当初、真空引きや乾燥ガスを検討したが、透明ガラス母材中の残留OH基の濃度がどうしても5~30ppm以下にならなかった。いろいろ検討した結果、化学反応によってOH基をClで置換する方法(ハロゲン化操作)を開発した。反応剤は扱いやすい塩化チオニル(SOCl₂)を用い、次の反応によって、OH基をClで置換するものである。



このハロゲン化処理によって、残留OH基の濃度を一気に0.4ppmまで下げることができ²⁸⁾、最終的には0.008ppmまで低下でき、極限的な低損失光ファイバーを実現した²⁹⁾。

(4)の屈折率分布の制御は、キーポイントは多孔質母材の表面温度制御であった。解析実験の結果、SiO₂-GeO₂系ガラス微粒子では、微粒子中に添加されるGeO₂の濃度が表面温度によって決まることが明らかとなり³⁰⁾、これを利用して屈折率分布の制御技術³¹⁾を確立したのであった。

最後に、(5)単一モードファイバー母材の作製であるが、屈折率分布制御の検討から、予期せぬ副産物があった。角形の合成トーチの考案とそれを利用した細径な多孔質母材の作製である³²⁾。図8はVAD法による単一モードファイバー用多孔質母材の作製状況である。下方にわずかに見えるのが角形合成トーチであり、これによって細径な多孔質母材が作製され、さらに2本の丸形合成トーチによって厚いクラッド層が形成されている様子がわかる。また、図9はVAD法による光ファイバー母材作製装置(1980年撮影)である。製造技術においては

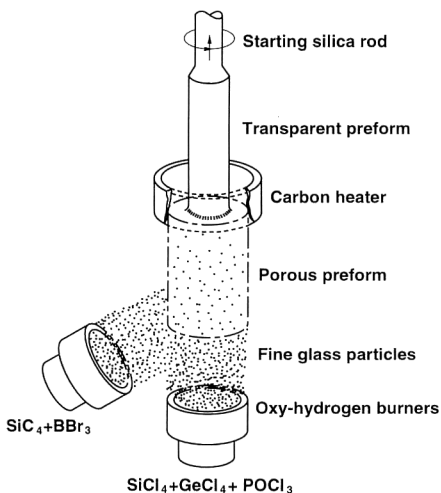


図7 VAD法による光ファイバー母材作製のご概念図。

製造装置が研究開発の成果の重要な成果であり、VAD法の技術開発においても頻繁に装置の改良を繰り返した。この図9の装置は、3~4世代目の装置である。

2.3.3 VAD法の成果

上記のような技術開発によって多くの難題を解決し、



図8 VAD法による単一モードファイバー用多孔質母材の作製状況。

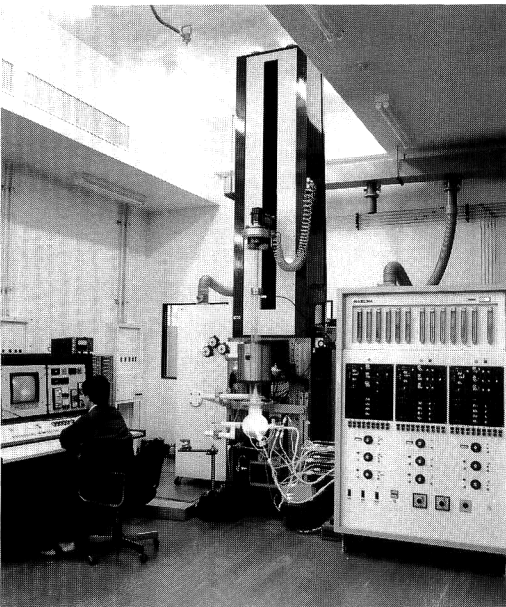


図9 VAD法による光ファイバー母材作製装置 (1980年撮影)。

1980年には極限的な低損失ファイバーの作製に成功した²⁹⁾。図10はこの損失波長特性である。OH基による吸収損失等はほぼ完全に除かれ、ファイバーの損失は、レーレ散乱損失 (Rayleigh scattering loss) と赤外吸収損失 (IR absorption loss), そしてわずかな構造不完全性損失から構成されている。また図11はVAD法によって作製した100 km長のファイバーとその母材の写真 (1981年) である。その後VAD法はさらに技術開発が進み、多重火炎合成トーチによる高速VAD技術³³⁾等

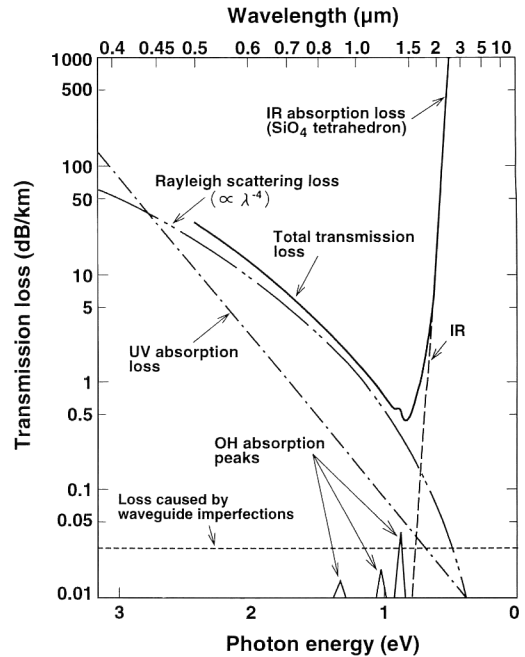


図10 極限的な低損失VAD光ファイバーの損失特性 (1980年)。

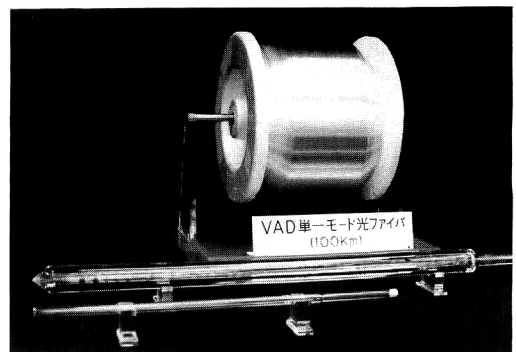


図11 VAD法によって作製した100 km長のファイバーとそのファイバー母材 (1981年撮影)。

の開発によってさらに量産性が向上し、1980年代から本格的に始まった光ファイバー通信の実用化に大きな役割を果たすこととなった。

2.4 超低損失光ファイバーはなぜ難しいのか

1980年の石英系ガラスファイバーの極限的な低損失値の達成以後、ガラス素材をかえて、さらに低損失な光ファイバーを実現するための研究が活発化した。この研究の根拠になったのが、1970年代に可能性が提案されたフッ化物ガラス、ハライドガラス等の赤外透過材料による2~10 μm の長波長帯における超低損失光ファイバー(0.001 dB/km以下)である^{34,35)}。この超低損失値の推定根拠は、光ファイバーの損失は主にレーレ散乱損失と赤外吸収損失とからなり、レーレ散乱損失は波長の4乗に反比例して小さくなるので、赤外吸収端が石英ガラスよりも長波長にあるフッ化物ガラス、ハライドガラス等では、2~10 μm の波長域で0.01 dB/kmあるいは0.001 dB/km以下の超低損失値を実現できるということであった。しかしながら、1970年代から1990年代にかけての10数年に及ぶ検討の結果、実現できた損失値は0.45 dB/kmで³⁶⁾、しかも60 mの長さのファイバーでの値であった。長い(例えば1 km)ファイバーでは、ファイバー内に発生する散乱体のために損失値はこれよりはるかに大きくなってしまった。

では、なぜ超低損失光ファイバーの実現は難しいのであろうか。図12はこの説明図である。この図は実験結果と材料特性を基に筆者が作成したものである⁷⁾。図に示すように、光ファイバーの損失はレーレ散乱損失と赤外吸収損失によって表せ、赤外吸収端が長波長の材料(Y, Xで示す材料)ほど、最低損失値(損失の谷の値)は小さくなる。しかしここで忘れてはならないもう

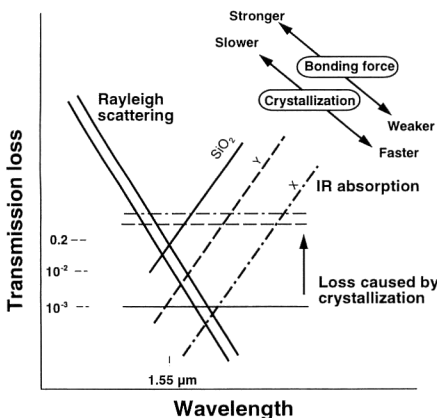


図12 超低損失光ファイバーはなぜ難しいのか。

ひとつの重要な損失要因がある。結晶化等によって生じ、波長に依存しない構造不完全性損失である。この構造不完全性損失は、石英(SiO_2)ガラスの場合、石英ガラスはきわめて結晶化(石英の結晶は水晶である)しにくいため、図10の損失特性にみられるように、きわめて小さな値となり、ほとんど無視できるほどである。しかしフッ化物ガラス、ハライドガラス等の赤外吸収端が長波長の材料(Y, Xで示す材料)では事情は大きく異なる。赤外がよく透る材料ほど(Y材料よりもさらにX材料のほうが)原子間の結合が弱い材料であり、したがって結晶化しやすく、ファイバー内には結晶散乱体ができやすく、このため図12に示すように、構造不完全性損失は大きくなりやすいこととなる。結局、赤外がよく透る材料は構造不完全性損失が大きくなりやすいため、現実のファイバー作製技術においては、最低損失を石英ファイバーより小さくすることは困難であるといえる。

1970年代に行われた超低損失光ファイバーの最低損失推定^{34,35)}においては、上に述べた結晶化のしやすさとそれによって生じる構造不完全性損失の重大な影響を考慮していなかったところに、推定値と実現値との大きな乖離が生じる根本原因があったといえる。逆の見方をすれば、石英(SiO_2)ガラスのほうがガラス素材としては例外中の例外で、この材料はきわめて結晶化しにくいため構造不完全性損失をほとんど考慮する必要がなく、ファイバーの損失特性をレーレ散乱損失と赤外吸収損失によってほぼ近似できるきわめて希な(たぶん唯一の)ファイバー材料なのだといえる。

3. 低損失光ファイバーから光ファイバー増幅器へ

光ファイバーは誠に特異な光デバイスである。低損失光ファイバーが実現され、世の中が実用化へ邁進し、そして次の新しい光デバイスの探索を活発に行い始めた1980年代の後半、光ファイバー増幅器が登場した³⁷⁾。もちろんそれ以前から、光増幅器の検討は半導体レーザー増幅器等によって行われていたし、光ファイバー増幅器の検討も歴史をたどれば1960年代のE. Snitzerらによる検討がある³⁸⁾。しかしながら、高効率な光ファイバー増幅器が実現されたのは1987年であった。この実現には、3つの重要な要素があった。すなわち、(1) MCVD法を改造した作製技術によって、低損失な希土類イオン(Er^{3+})添加の石英ガラスファイバーを作製できたこと、(2) レーザーを励起光源として効率のよい励起を実現したこと、(3) Er^{3+} を活性イオンとして使用

し、量子効率のよい遷移（波長 1.5 μm 帯）を使用したこと、である。

さらにこの後半導体レーザーによる励起が実現され^{39,40)}、光ファイバー増幅器は大変な勢いで研究開発と実用化への検討が進められた。この結果、この10年未満の間に、増幅利得、雑音特性、周波数特性等はすでに電気の増幅器を凌ぐものとなるとともに、この光ファイバー増幅器を使った新しい光通信システムが次々と研究開発され、低損失ファイバーや半導体レーザーの開発時に匹敵する大きな技術革新を光伝送システムや光計測等の技術分野にもたらしつつあることは、まさに驚異的できえある。事実、図3に示した海底光ファイバーシステムのうち、1995年以降に建設が開始されたTPC-5、TAT-12/13は光ファイバー増幅器による再生中継を導入したシステムであり、これによって1本のファイバー当たりの伝送容量を約10倍向上できている。

こうした急速な光ファイバー増幅器技術の展開は、光ファイバー通信技術の成長で蓄積されたさまざまな光ファイバー技術や半導体レーザー技術などが基本となって達成されたものといえるが、そこにはまたパッシブファイバー技術からアクティブファイバー技術への遷移の歴史があり、ホストガラスと増幅活性イオンの面白い相関

関係があり、大変興味深い。図13は、パッシブファイバー技術とアクティブファイバー技術の主な歴史をまとめたものである⁷⁾。これを見ると、パッシブファイバー技術とアクティブファイバー技術の変遷の経緯 (alternating growth: 筆者) がよくわかる。新しい技術の誕生は、誠に面白い経緯から生じると思う。

光ファイバー増幅器の詳細については紙面の関係で言及できないが、少し述べておきたいことは、超低損失ファイバーでは陽の目を見ることができなかったフッ化物ガラスが光ファイバー増幅器用のホストガラスとしてすぐれた特性（すなわち、ホノンエネルギーが低いこと、希土類イオンの溶解度が高いこと）を有することが明らかとなり、将来性のあるホストファイバー材料として急浮上している⁷⁾ ことである。新たな alternating growth の歴史の始まりかもしれない。

本号のテーマが世の中を変えた光技術ということであるが、光ファイバーはなぜ世の中を変えたのか、あるいは変えることになったのか、その答えの一端を図14に示す。図は、光ファイバーの損失低減化の経過を中心に、ガラスの光損失低減化の歴史を総括したものである⁷⁾。1960年代には 10^3 dB/kmの光損失であったが、

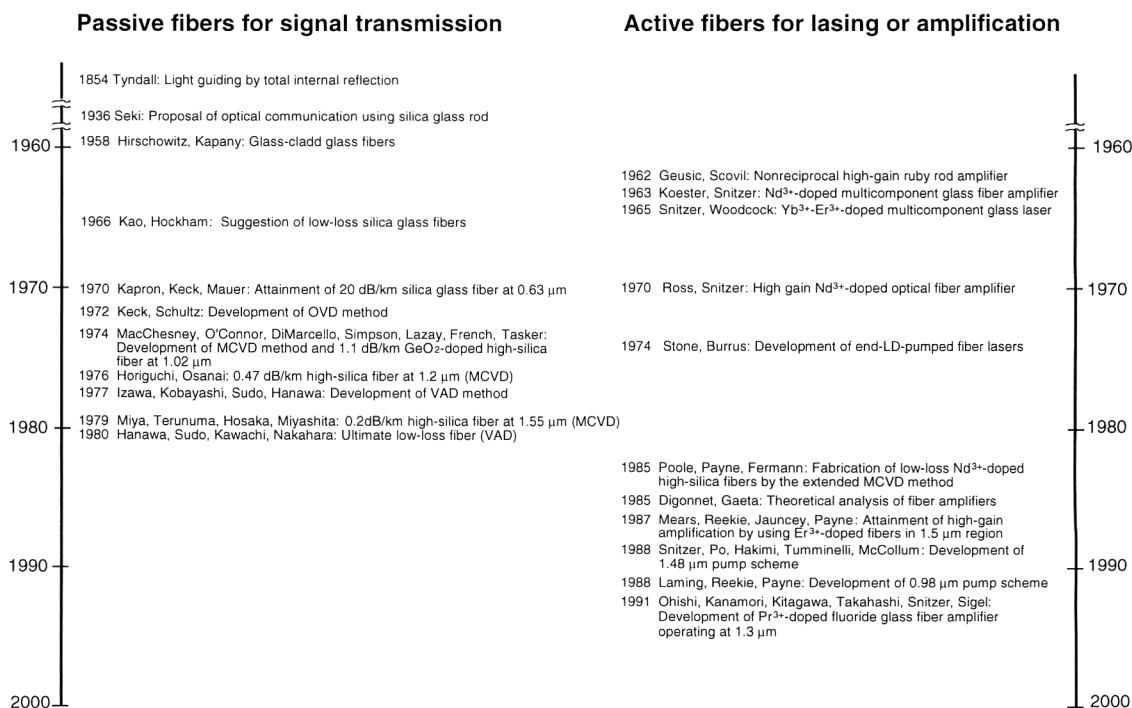


図13 パッシブファイバー技術とアクティブファイバー技術の主な歴史。

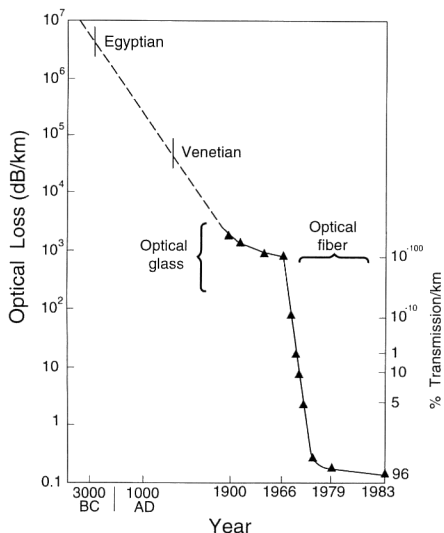


図14 光損失低減化の歴史.

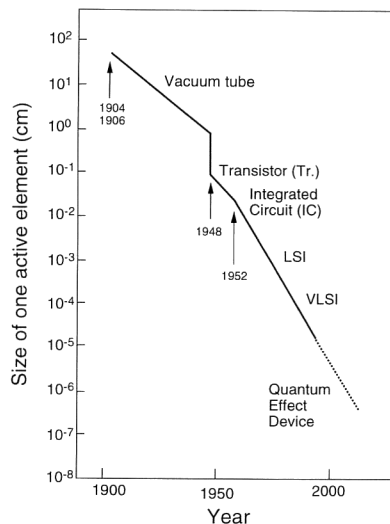


図15 電子デバイス小型化の歴史.

10年余りの間に 10^{-1} dB/km にまで、すなわち 10^4 倍特性が改善されたのである。 10^4 倍の改善とは、まさしく驚異的であり、1m先までしか光信号を送れなかった光ファイバーが10km先まで信号を送れるようになるということ、もっと卑近な例でいえば1円が1万円になるということである。こうした驚異的な特性改善が、世の中を変える一端になったといえる。

同様の例を電子デバイスに見ることができる。図15は能動電子デバイスの小型化の経過を1素子の大きさを指標としてまとめたものである⁷⁾。光ファイバーの損失同様に、ほぼ 10^4 倍に相当する改善（小型化）が行われており、やはりこの小型化が世の中を変える一端になったといえる。

光ファイバーの損失低減化、能動電子デバイスの小型化ともに、「桁違い」の改善が世の中を変えたのである。しかしながら、この「桁違い」の改善が図られるには、多くの人の英知、努力とともに、「嬉しい誤算」の要素も幾分かあったに違いない。筆者が一員として研究開発したVAD法においても、量産性には自信があったものの、開発の当初から図10に示した極限的な低損失ファイバーができると考えていたわけではなかった。「嬉しい誤算」といえる成果である。しかしながら、筆者はこうした「嬉しい誤算」が生まれる技術だからこそ、世の中を変えるほどの技術に成り得るし、さらにいえば、「嬉しい誤算」が生じない技術は世の中を変えるところまで成長できないとも感じている。どうしたら「嬉しい誤算」が生まれるのか、生み出せるのか、それが技術開

発の醍醐味なのだと思う。

文 献

- 1) 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 光ファイバの基礎 (オーム社, 1976).
- 2) A. G. Bell: "On selenium and the photophone," *Electrician* 5 (1880) 214-220.
- 3) A. G. Bell: "On the production and reproduction of sound by light," *Proc. Am. Assoc. Adv. Sci.*, 29 (1881) 115-136.
- 4) 関 壮夫, 根岸 博: "光線通信方式の改良", 特許第125946 (1936).
- 5) J. M. Sipsress: "Undersea communications technology," *AT & T Tech. J.*, 74, January/February (1995) 4-7.
- 6) 末松安晴, 伊賀健一: 光ファイバ通信入門 (オーム社, 1989).
- 7) S. Sudo, Y. Oishi, T. Kanamori, K. Fujiura, M. Yamada and M. Shimizu: *Optical Fiber Amplifiers* (Artech House, Boston, 1996 出版予定).
- 8) D. C. Hogg: "On the spectrum of optical waves propagated through the atmosphere," *Bell Syst. Tech. J.*, 42 (1963) 2967-2969.
- 9) M. Subramanian and J. A. Collinson: "Modulation of laser beams by atmospheric turbulence," *Bell Syst. Tech. J.*, 44 (1965) 543-546.
- 10) D. Gloge: "Experiments with an underground lens waveguide," *Bell Syst. Tech. J.*, 46 (1967) 721-735.
- 11) P. Kaiser: "An improved thermal gas lens for optical beam waveguides," *Bell Syst. Tech. J.*, 49 (1970) 137-153.
- 12) B. I. Hirschowitz, L. E. Curtiss, C. W. Peters and H. M. Pollard: "Demonstration of a new gastroscope, the "fiberscope"," *Gastroenterology*, 35 (1938) 50-53.
- 13) K. C. Kao and G. A. Hockham: "Dielectric fiber surface waveguide for optical frequencies," *Proc. IEE*, 113 (1966) 1151-1158.
- 14) K. C. Kao and T. W. Davies: "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses I: single beam method," *J. Sci. Instrum. (J. Phys. E.)*, 1 (Ser. 2) (1968) 1063-1068.
- 15) K. C. Kao and T. W. Davies: "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses II: double beam

- method," *J. Sci. Instrum. (J. Phys. E.)*, **2** (Ser. 2) (1969) 331-335.
- 16) F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer: "Radiation losses in glass optical waveguides," *Conf. Trunk Telecommun. Guided Wave* (Sept. 29-Oct. 2 1970) pp. 148-153.
 - 17) J. F. Hyde: "Method of making a transparent article of silica," U. S. Patent No. 2272342 (Filed Aug. 27, 1934, Patented Feb. 10, 1942).
 - 18) M. E. Nordberg: "Glass having an expansion lower than that of silica," U. S. Patent No. 2326059 (Filed Apr. 22, 1939, Patented Aug. 3, 1943).
 - 19) D. B. Keck and P. C. Schultz: "Method of producing optical waveguide fibers," U. S. Patent No. 3711262 (Filed May 11, 1970).
 - 20) J. B. MacChesney, P. B. O'Connor, F. V. DiMarcello, J. R. Simpson and P. D. Lazay: "Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion," *Proc. Int. Congress on Glass*, Vol. 6 (1974) pp. 40-45.
 - 21) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo and F. Hanawa: "Continuous fabrication of high silica fiber preform," *Technical Digest of IOOC '77* (Tokyo, Japan, July 1977), Paper C 1-1.
 - 22) S. Kobayashi, H. Nakagome, N. Shimizu, H. Tsuchiya and T. Izawa: "Low loss optical glass fiber with Al₂O₃-SiO₂ core," *Electron. Lett.*, **10** (1974) 410-411.
 - 23) D. B. Keck and P. C. Schultz: "Method of forming optical waveguide fibers," U. S. Patent No. 3737292 (Filed Jan. 3, 1972, Patented June 5, 1973).
 - 24) A. Verneuil: "Reproduction artificielle du rubis par fusion," *Nature (Paris)*, **32** (1904) 77.
 - 25) S. Sudo: "Studies on the vapor-phase axial deposition method for optical fiber fabrication," Ph. D. Thesis, University of Tokyo (1982).
 - 26) T. Izawa and S. Sudo: *Optical Fibers; Materials and Fabrication* (D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1987).
 - 27) S. Sudo, T. Edahiro and M. Kawachi: "Sintering process of porous preforms made by a VAD method for optical fiber fabrication," *Trans. IECE Jpn.*, **E63** (1980) 731-737.
 - 28) S. Sudo, M. Kawachi, T. Izawa, T. Edahiro, T. Shioda and H. Gotoh: "Low OH content optical fiber fabricated by vapor-phase axial deposition method," *Electron. Lett.*, **17** (1978) 534-535.
 - 29) F. Hanawa, S. Sudo, M. Kawachi and M. Nakahara: "Fabrication of completely OH-free VAD fiber," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 699-700.
 - 30) M. Kawachi, S. Sudo, N. Shibata and T. Edahiro: "Deposition properties of SiO₂-GeO₂ particles in the fame hydrolysis reaction for optical fiber fabrication," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19** (1980) 169-171.
 - 31) S. Sudo, M. Kawachi, T. Edahiro and K. Chida: "21.2 km graded-index VAD fiber with low-loss and wide-bandwidth," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 151-153.
 - 32) M. Kawachi, S. Tomaru, S. Sudo and T. Edahiro: "Fabrication method of single-mode optical fiber preform," U. S. Patent No. 4345928 (Filed Sept. 19, 1980).
 - 33) H. Suda, S. Shibata and M. Nakahara: "Double-flame VAD process for high-rate optical fiber preform fabrication," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 29-30.
 - 34) L. G. Van Uitert and S. H. Wemple: "ZnCl₂ glass: a potential ultralow-loss optical fiber material," *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 57-59.
 - 35) C. H. L. Goodman: "Devices and materials for 4 μm-band fiber-optical communication," *IEEE J. Solid-State Electron Devices*, **2** (1978) 129-137.
 - 36) D. Szebesta, S. T. Davey, J. R. Williams and M. W. Moore: "OH absorption in the low loss window of ZBLAN(P) glass fiber," *Tech. Dig. 8th Int. Symp. Halide Glass* (Sept. 22-24, 1992, France, 1992) pp. 26-32.
 - 37) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm," *Tech. Dig. Conf. on Opt. Fiber Commun./Int. Conf. Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun. (OFC/IOOC '87)* (Reno, Nevada, Feb. 1987) Paper W 12.
 - 38) C. J. Koester and E. Snitzer: "Amplification in a fiber laser," *Appl. Opt.*, **3** (1964) 1182-1186.
 - 39) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli and B. C. McCollum: "Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm and Yb sensitized Er oscillator," *Tech. Digest of OFC '88* (1988) pp. 447-450.
 - 40) M. Suyama, K. Nakamura, S. Kashiwa and H. Kuwahara: "14.4-dB gain of erbium-doped fiber amplifier pumped by 1.490-μm laser diode," *Tech. Digest of OFC '89* (1989) PD 2.