

## 光ファイバ開発の黎明期

伊澤 達夫<sup>†a)</sup>

## Early History of Optical Fiber for Telecommunication Systems

Tatsuo IZAWA<sup>†a)</sup>

あらまし 光ファイバの低損失化が可能であることが実証されてから 50 年近くたち、関連技術は急速に発展するとともに、光ファイバ通信技術は社会生活に必要不可欠なものになっている。光ファイバが通信だけでなく産業機器などにも広く使われるように至る初期の経緯をまとめた。特に、材料、製法、構造などについてどのような課題があったのかを明らかにするとともに、論文などではあまり紹介されない失敗秘話を可能な限り紹介した。

キーワード 光ファイバ、シリカガラス、MCVD 法、VAD 法、OVD 法

## 1. ま え が き

光ファイバ通信方式が実用化されるまでには光ファイバとともに光源、受光器、増幅器、分波器などの部品類や変調方式など多くの技術開発が進められ大きな貢献を果たしている。光ファイバの低損失化成功はこれら部品開発を促進し、日本の光通信関連技術は世界をリードする高い水準に到達した。

本文は、光ファイバ開発初期の経緯を振り返りどのような課題があったのかを明らかにしたい。

## 2. 低損失化までの道のり

のろし通信など光を使った通信は、古くから使われていたが、光の伝送能力を生かした方式の開発は容易ではなかった。光は直進し、その伝搬経路を自由に操ることができなかつたためである。光の伝搬経路を自在に操ることができる伝送路である光ファイバが開発され、大容量通信網が実現できるようになったのは比較的最近のことである。ここでは、光ファイバが通信に使えるようになるまでの歴史の概要を解説したい。

## 2.1 光ファイバ通信の曙

John Tyndall が透明な物質の中で光が全反射する条件を明らかにし、放物線状に流れる水の中を光が伝わる実験を初めて示したのは 1870 年ごろのことであ

る。その後、ガラスやプラスチックの棒の中に光を通し通信を行おうとする試みは種々行われた。日本でも、関、根岸によって酸化ケイ素（シリカ）ガラスを使った“光線導管”による光通信の特許が 1936 年に出願されている。

全反射を利用した光の伝搬は、媒体の表面の傷や汚れなどで散乱されるため、損失が大きく長距離の光伝搬は難しい。この問題を解決するために、N. Kapany は、1958 年に光の通るコアを屈折率の低い材料で被覆した散乱損失の少ない光ファイバを考案した。全反射面での散乱は低減したが、媒体自身の損失が大きいため光が伝わるのは、1~10m 程度であった。

英国の Standard Telecommunication Laboratories (STL) にいた C. Kao [1] は、多くのガラスの散乱・吸収特性を測定し、不純物の少ないガラスを作れば通信に使える低損失の光ファイバを実現できると推定し、1965 年に論文を発表している。C. Kao は、論文を発表するだけでなく、世界中の関連研究機関を訪問し講演を行い、共同研究者を募った。

日本にも来訪し、1967 年頃 NTT の武蔵野電気通信研究所で講演会 [2] が開かれた。通信やガラスの専門家が聴講したが、光ファイバが通信に使えるという発想に共感する者はおらず徒労に帰した。当時、通信関係技術者・研究者で光が通信に使えるかもしれないと考えていたのは、ほんの一握りの人であったことが分かる。

その頃の、光通信の研究は、空間伝搬、ガスレンズ、長焦点レンズなどが検討されており、光ファイバの低

<sup>†</sup> 千歳科学技術大学, 千歳市

Chitose Institute of Science and Technology, 758-65 Bibi, Chitose-shi, 066-8655 Japan

a) E-mail: t-izawa@photon.chitose.ac.jp

損失化が可能であると考え通信技術者は、日本にいなかったようである。

## 2.2 低損失光ファイバの実現

米国のガラスメーカー Corning Glass Works は、1930 年ごろに膨張係数の小さなガラスを開発していた。このガラスは膨張係数がほとんど零で、シリカガラスの膨張係数の 10 分の 1 以下である。このガラスは、シリカに酸化チタンを添加したガラスで、通常のガラスのように鉍石粉末を坩堝で溶かす方法では作ることが難しかった。

Corning 社の技術者だった J.F. Hyde は、4 塩化シリコンと 4 塩化チタンを酸水素炎中で加水分解し、出発材に吹き付けることによって酸化チタン入りのシリカガラスを作ることになり成功し、特許 [3] を出願している。原料の塩化物は常温で液体の物質で、蒸留によって簡単に純度を上げることができる。副原料の酸素、水素も高純度化が容易なのでこのガラス製法は本質的に高純度ガラスの製法と言える。

Corning 社の F.P. Kapron らはこのことに気付き、酸化チタンを添加したガラスをコアとする光ファイバを制作し、20dB/km の低損失光ファイバの実現 [4] に成功した。従来製法で作られた光ファイバの損失が 1000dB/km 以上あったからこの成功は画期的なもので、C. Kao の予測を初めて実証した研究であった。

このとき使われた製法やガラスの組成は報告されていないが、酸水素炎で作った酸化チタン添加のガラス微粒子をシリカガラス管に吹き込み、線引き時に透明化する Inside Vapor Deposition (IVD) 法だと推定される。

酸化チタンを添加したシリカガラスは、ガラス製造過程で酸素欠陥が発生し薄紫色に着色する。したがって、酸素欠陥があるガラスは吸収損失が大きく、光はほとんど伝搬しない。酸素欠陥を消失させるためには、光ファイバは高温酸素雰囲気中で熱処理する必要がある。この熱処理によって光ファイバは低損失になるが、光ファイバの表面に細かなクラックが発生し折れやすくなる。

Corning の技術者は、自ら開発した光ファイバの損失があまりにも小さいので、測定値を確認するために光ファイバを抱えて大西洋を横断し STL にもち込んだ [5]。測定値に間違いはなかったが、測定途中で試料の一部が破損して床に落ち、全てを回収することはできなかった。STL の技術者はのちにこれを回収し分析しその組成を知ったという。

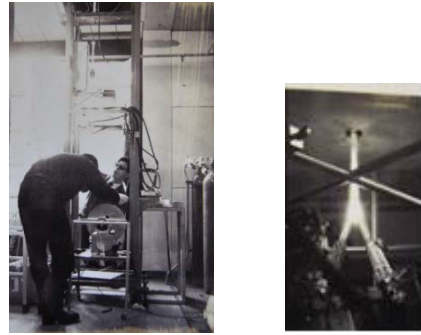


図 1 初期の線引き装置 (左) とその加熱バーナ (右)  
Fig. 1 Drawing machine (left) and heating burner (right).

## 2.3 低損失光ファイバの追試

筆者は、1970 年から光ファイバの研究を始めたが、その年の秋に Corning 社の研究成果が発表された。低損失化が達成されたので研究を断念しようと考えたが、念のため追試してみることにした。製法や組成は全く発表されていなかったが、参考文献などから製法や組成を推定した。

酸化チタン入りのシリカガラスは、簡単に作ることができたとし低膨張ガラスとして購入することもできた。このガラスを純シリカガラスで被覆し、光ファイバ母材を作り、手製の線引き装置 (図 1) で光ファイバを作ってみた。

前述したようにこの光ファイバは、光を入れても他端からは全く光が出てこなかった。酸素欠陥がある可能性に気付き、熱処理することにした。電気炉の耐火煉瓦から出る微粒子で汚染されることを防ぐため、大変高価であったがシリカガラス製の光ファイバ巻取りドラムとそのドラムが入る容器を準備した。高温で熱処理すると、報告通り 20dB/km の低損失光ファイバになっていることが分かった。

しかしながら、Corning 社の技術者が直面したクラック発生の課題も明らかになり、追試によってより良い添加物探索が重要な課題であることが判明した。

## 2.4 添加物探索

シリカガラスの屈折率を自由に制御でき、発色しない添加物を見つけることは比較的簡単で、多くの研究者が気付いていた。それは酸化ゲルマニウムである。

自然界に存在する元素は 100 程度あるが、遷移金属の酸化物は発色性があり候補から除外される。アルカリ金属、アルカリ土類、重金属は高純度化が難しいために不適當である。残るのは周期律表でシリコンの周

辺にある数種類の元素の酸化物である。ガラス化しやすく少量で屈折率が高くなる材料は酸化ゲルマニウムのみである。

しかしながら、酸化ゲルマニウムは、シリカガラスが溶けるような高温で蒸気圧が高く、酸化チタン添加のシリカガラスと同じような方法では作ることができない。酸化ゲルマニウムが蒸発してしまうためである。蒸発しにくい酸化アルミニウムを添加した光ファイバも作ってみたが、屈折率変化が小さく本命ではないと思われた。このような検討から、酸化ゲルマニウムを効率良く添加するガラス製法開発が次なる課題となった。

### 3. 実用的な製法

#### 3.1 MCVD 法

酸化ゲルマニウム蒸発の問題を始めに解決したのはベル研究所の J.B. MacChesney である。1974 年 MacChesney は、4 塩化シリコン、4 塩化ゲルマニウム、酸素ガスをシリカガラス管に流し、外部を酸水素炎で局部的に加熱する方法 [6] を開発した。この方法は、Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) 法と呼ばれている。塩化物は加熱され酸化物となりシリカガラス管の内壁に付着する。加熱部を軸方向に移動させると管内壁に薄いガラス膜が形成される。このような工程を 100 回程度繰り返すと酸化ゲルマニウムが添加されたガラスが積層される。

酸水素炎の火力を強めシリカガラス管が軟化する温度まで高めると、表面張力によって管の中空部は縮小し最終的にはなくなり棒状になる。積層されたガラスは、中心部に集まりコアを形成する。閉管系でガラスが積層されるため酸化ゲルマニウムの蒸発は抑えられ、酸化ゲルマニウムの添加に成功した。

中空部をつぶす工程で酸化ゲルマニウムの一部は蒸発しコア中心部に屈折率の凹みが発生するが、再現性良く高品質の光ファイバを作ることができるため初期の光ファイバ通信システムに広く使われた。

オリジナルの MCVD 法は、生産性が低いため加熱方法を改良した Plasma Chemical Vapor Deposition (PCVD) 法や Furnace Chemical Vapor Deposition (FCVD) 法がその後開発され量産に使われている。

#### 3.2 VAD 法

##### 3.2.1 製法の概要

MCVD 法は優れた方法であるが、量産性に欠けることが課題であった。NTT 研究所の伊澤らは生産性の



図 2 多孔質母材成長の様子：下のバーナからコア材，上二つのバーナからクラッド材が供給されている

Fig. 2 Growth of porous preform.

高い製法の研究開発を進め、1977 年に Vapor-phase Axial Deposition (VAD) 法と呼ばれる製法 [7], [8] を開発した。

酸化ゲルマニウムの蒸発を防ぐためガラスは 2 段階で作られた。ガラス原料である 4 塩化シリコンと 4 塩化ゲルマニウムの蒸気を比較的低温の酸水素炎中に吹き込むと加水分解または酸化されガラス微粒子となる。このガラス微粒子を出発材の先端に吹き付け、軸方向に堆積させ多孔質のコアを形成する。多孔質コアの表面にクラッドとなる純シリカガラス微粒子を吹き付け、多孔質光ファイバ母材を作る。図 2 は多孔質母材を成長させている様子を示したものである。

多孔質母材は、リング状ヒータを備えた電気炉に入れ局部的加熱（ゾーンメルト）すると透明な母材となる。ゾーンメルトするとき、酸化ゲルマニウムが添加されたコアガラスはシリカガラスで被覆されているため蒸発は抑えられる。

##### 3.2.2 開発を阻んだ壁

VAD 法に使われる機器類は、原料供給装置、多孔質母材引き上げ装置、酸水素バーナ、反応容器、排気装置、透明化電気炉など多岐に及ぶが、要求される機能が明確なため比較的短期間に開発することができた。

それでも酸水素バーナは、原料供給ノズルがガラス微粒子で詰まることを防ぐため数十回の試作を繰り返すなど種々の工夫が凝らされている。また、原料の利用効率向上や多孔質母材形状制御のため反応容器や排気装置なども改良を重ねた。

VAD 法が開発されるまでの最大の難関は、透明化工程にあった。多孔質母材の密度やヒータの形状を変



図 3 透明化に失敗した試料  
Fig. 3 Failed samples in consolidation process.



図 4 安定な透明化に成功した母材：下は多孔質母材，上は透明化した部分  
Fig. 4 Transparent preform (upper part) after the consolidation process in He gas atmosphere.

え 150 本以上の試作を行ったが、安定に透明化できる手法見つからなかった。図 3 に示すように気泡が残ったり、中心まで透明化できてもごく一部だったり失敗の連続であった。

### 3.2.3 VAD 法開発の危機

長期にわたる失敗の連続に業を煮やした上司が研究中止命令を出し、この研究開発は風前の灯火であった。危機に瀕し、使用を躊躇していたヘリウムガスを透明化炉に導入するとこの問題は一気に解決した。

電気炉の雰囲気は、ヒータの消耗を防ぐため窒素やアルゴンなどの不活性ガスを流していた。原理的には、半径方向の温度を均一にした帯状加熱をすれば気泡はなくなるはずと思っていた。ヘリウムガスは水素に次いで熱伝導率が高く半径方向の温度分布を均一にするには優れていることは分かっていたが、高価なので使用をためらっていた。結果的には、上司の理不尽な実験中止命令がヘリウムガス使用を促し、この研究開発を成功に導いてくれた。図 4 は、透明化が安定に成功したときの試料の一例である。

ヘリウムガスは高価で貴重な資源であるが、2014 年

の統計データによれば MRI や NMR など計測器に次いで光ファイバ製造に使われている。日本のヘリウムガス消費量の 15% が光ファイバ製造に使われており、製造コストを上げる要因になっている。

VAD 法は、光ファイバ母材の寸法が出発材の寸法に影響を受けないため大型の母材を作ることができるので生産性が高い。しかしながら開発当初は、評判が悪く、使われることは少なかった。1980 年ごろの光ファイバ通信システムは、接続が容易な Graded Index (GI) ファイバが広く使われていた。VAD 法は精密な屈折率制御が困難なため評価されなかった。

原理的には、コアを作る酸水素バーナを多数本用意すれば屈折率分布を制御できるが、設備も複雑で大型になるため GI ファイバ製造に特化した技術開発は進められなかった。

NTT の土屋らの努力で単一モード光ファイバの接続技術が開発され、伝送帯域も広いことから単一モード光ファイバが長距離通信網に広く使われるようになった。NTT の技術者が長距離通信網だけでなく FTTH にも単一モード光ファイバを使うことを決断したため、単一モード光ファイバの需要は増大し、VAD 法の評価も高まっていった。

### 3.3 OVD 法

量産性があり屈折率分布の制御も容易な製法が Corning 社の技術者が開発した Outside Vapor phase Deposition (OVD) [9] 法である。

OVD 法は VAD 法と同様、出発材にガラス微粒子を吹き付け多孔質母材を作り、出発材を引き抜いた後ゾーンメルトにより透明化する。出発材の表面にガラス微粒子を吹き付け、径方向にガラスを堆積させるため、屈折率分布の精密な制御ができることが OVD 法の特徴である。しかしながら、出発材を引き抜く工程がこの製法を難しいものになっている。

シリカガラスは一般に添加物を加えると膨張係数が大きくなる。光ファイバ母材は、半径方向に組成分布があり膨張係数が変化しているため強い圧縮応力がかかっている。このため透明化時の急激な温度変化によって母材にクラックが入りやすい。多孔質母材から出発材を引き抜く際、内面を平滑にすることも難しく、内面にクラックを誘引する欠陥が残りやすい。また、出発材を引き抜く際の応力で多孔質母材を破損することもあった。

Corning 社の技術者は、組成を調整による応力の低減や多孔質ガラスの密度を調整するなどしてクラック



の発生を抑える工夫をした。熱履歴の頻度を少なくするために透明化と線引きを同一の加熱炉で行うなどの試みも行われている。

OVD 法は GI ファイバの量産技術として優れているが、工程が複雑なため細部にわたるノウハウを確立する必要がある。OVD 法の基本技術が完成した時期は定かでないが、比較的初期に書かれた報告 [9] によれば、1979 年と推測される。Corning 社が光ファイバの量産化を初めて開始してこのとき、その工場で OVD 法と MCVD 法の 2 方式が使われたという興味深いことが書かれている。この事実は、OVD 法の難しさを表しているのかもしれない。

### 3.4 生産量と製法

2014 年の光ファイバの生産量は、年間 3.16 億 km だったと報告されている。そのうち、MCVD 法で作られるものは 1%に過ぎないが、PCVD, FCVD 法も含めると 18%、OVD 法で作られたものが 22%、VAD 法で作られたものが、60%であった。このようなデータから VAD 法が量産技術として広く利用されていることが分かる。

## 4. 構造と伝送特性

光ファイバの構造は、伝搬するモード数によって単一モード光ファイバと多モード光ファイバに大別される。それぞれその構造によって伝送特性が大きく変わるため種々の提案がなされた。

### 4.1 多モード光ファイバ

コア径や屈折率差を大きくすると、多くのモードが伝搬するため多モード光ファイバを伝搬した光パルスは広がってしまう。パルスの広がりを抑えるために GI ファイバが考案された。コアの屈折率が中心部からほぼ放射線状に低くなる構造をもっている。その理論的検討は、低損失光ファイバが実現される以前にガスレンズに関連し精力的に進められた。1968 年に川上、西澤は、理想的な屈折率分布を明らかにした。

1969 年に内田、北野らによって多成分ガラスに含まれるタリウムなどの重いイオンを軽いアルカリイオンに交換することにより GI ファイバを初めて実現した。この光ファイバは、天然鉱石を粉碎洗浄して坩堝で溶かされた従来のガラスが使われたため損失は大きく通信には利用できなかった。

MCVD 法が開発されると、低損失の GI ファイバが容易に製造できるようになり、通信システムに広く使われるようになった。GI ファイバは、コア径が 50 $\mu\text{m}$

程度で単一モード光ファイバのコア径に比べたいため接続が容易である。

最近では、長距離通信システムに使われることは少なくなってきたが、光源や受光器との接続コストが低いためコンピュータや通信機器内配線などに広く使われている。最近市販されている GI ファイバの伝送帯域は、500MHz $\cdot$ km 程度である。

### 4.2 単一モード光ファイバ

モード分散がないため単一モード光ファイバは伝送帯域が広く長距離通信網に適している。しかし、コア径が 8 $\mu\text{m}$  程度で細いため光源や光ファイバ同士の接続が難しく、当初、利用されることがなかった。種々の接続技術が開発され 1980 年頃から使われるようになった。

材料分散は、吸収損失が最小となる 1.3 $\mu\text{m}$  で零になるが、散乱損失が加わった総合損失が最小となる 1.55 $\mu\text{m}$  では大きな分散となり光パルスは広がってしまう。

この問題を解決するために、光ファイバの構造を変え分散が零となる波長を 1.55 $\mu\text{m}$  にシフトさせた Dispersion-Shifted Fiber (DSF) が考案された。更に、波長分割多重通信方式が使われるようになると、非線形現象を抑制し伝送特性を良くするために、ゼロ分散波長を 1.55 $\mu\text{m}$  からずらした Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZ-DSF) も開発され広く使われている。

## 5. 損失と材料

### 5.1 損失要因と損失限界

光ファイバの低損失化が実現した当時、ガラスのような透明な材料の光損失がどこまで小さくなるかについては明らかでなかった。しかし、低損失光ファイバが実現し高純度ガラスの損失特性が精密に測定され、損失限界も明らかになった。

#### 5.1.1 不純物吸収損失

吸収損失の原因となる遷移金属などの不純物は原料の塩化物を蒸留することによって簡単に純度を上げることができ、ガラス中の不純物は ppb 以下になり、不純物吸収を光学的に認めることはできないレベルになっている。

最後まで残った不純物は、OH 基である。ガラスを作る際、酸水素炎を使うため多孔質母材には大量の OH 基が残る。幸いなことに多孔質母材は塩素系ガスによって簡単に脱水することができるので、1.3 $\mu\text{m}$  に

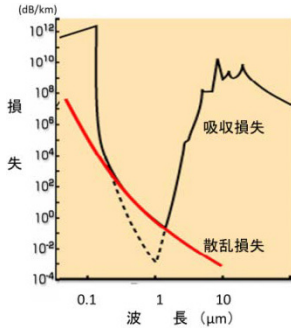


図 5 シリカガラスの吸収損失と散乱損失

Fig. 5 Absorption loss and scattering loss of silica glass.

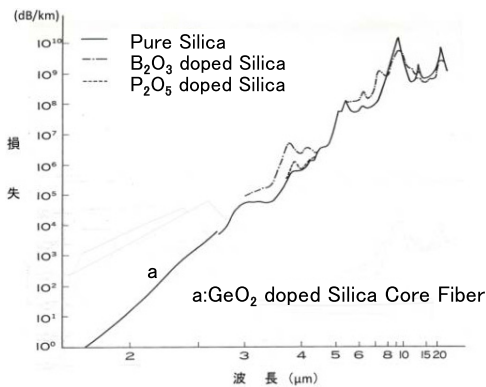


図 6 添加物の入ったシリカガラスの赤外吸収 [11]

Fig. 6 Absorption loss of doped silica glass [11].

現れる OH 基の高調波吸収はほぼ完全に除去できる。

### 5.1.2 ガラス固有の損失

酸化ガラスの光損失は、図 5 に示すように赤外域に現れる Si-O, Ge-O などの分子振動吸収の高調波成分と紫外域にある電子遷移吸収のテール並びにガラス特有の密度揺らぎによる散乱損失で決まる。

紫外域と赤外域の吸収は、 $1.3\mu\text{m}$  で交わり吸収損失が最小となり、材料分散は零となる。この波長でのシリカガラスの散乱損失は吸収損失より大きいため光ファイバの総合的な損失は、散乱損失と分子振動吸収で決まり、最小損失は、 $1.55\mu\text{m}$  で  $0.1\text{dB/km}$  程度 [10] となる。

### 5.2 純シリカコア光ファイバ

屈折率や膨張係数などを制御するためにシリカに他の酸化物を添加すると、図 6 に示すように、その赤外分子振動吸収が加わるため一般に損失は大きくなる。

そこで、純シリカガラスをコアとし、フッ素を添加

して屈折率を低くしたシリカガラスをクラッドとする純シリカコアファイバが作られた。最近の報告によれば、損失は、 $0.15\text{dB/km}$  で、海底ケーブルなどの長距離回線に使われている。

純シリカ結晶の糸をコアとすることができれば、散乱損失が低くなるため損失は更に一桁以上低減するはずであるが、残念ながら結晶の糸を作る技術は開発されていない。

### 5.3 光ファイバアンプ

ネオジミウム (Nd) やエルビウム (Er) などの希土類イオンをガラスに添加すると増幅、発振機能があることが 1961 年 E. Snitzer によって報告され光ファイバによる増幅作用も実験された。

1987 年に D.N. Payne らは Er イオンをドープした光ファイバをイオンレーザで励起し、通信に使われる  $1.55\mu\text{m}$  帯の増幅を発表した。中沢は、半導体レーザで励起できることを示し通信網に利用できる小型化に成功した。

光ファイバアンプ開発成功に伴って、光ファイバの低損失化研究は急速に縮小されていった。光ファイバアンプは、波長分割多重通信方式とともに長距離通信網に広く使われるようになり主要な構成部品の一つになっている。

### 5.4 プラスチック光ファイバ

酸化ガラス以外の材料でも低損失光ファイバ開発の努力は行われた。各種ポリマやカルコゲナイドガラスの光ファイバが開発されている。

プラスチックは、C-H の分子振動吸収が強く、その高調波成分が可視域まで伸びているため低損失化が難しい。水素をフッ素や重水素に置換し損失を低減する努力が行われ、 $10\text{dB/km}$  程度の損失が実現している。量産されているプラスチック光ファイバは、コアを PMMA クラッドにフッ素化ポリマを使って波長  $650\text{nm}$  で  $150\text{dB/km}$  の損失のものが作られている。ポリマは可撓性に富み折れる心配が少ないため自動車や産業機器の光配線に使われている。

## 6. む す び

光ファイバの低損失化が実現し、1980 年以降それまで使われていた同軸ケーブル方式に代わり光ファイバ通信方式が広く使われるようになった。この結果、伝送容量は格段に増大し設備コストは低下したため、あらゆる情報が地球規模で短時間に拡散するようになった。

このように通信環境を激変させた光ファイバ開発の初期に研究生を送り、良き同僚・上司とともに光ファイバ通信網実現のために少しでも貢献できためぐりあわせを感謝している。

## 文 献

- [1] C. Kao and T. Davies, "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses1: Single beam method," J. Sci. Instrum., vol.1, p.1063, 1968.
- [2] 喜安善一, 情報通信の源流を求めて, 三田出版会, 東京, 1997.
- [3] J.F. Hyde, "Method of making a transparent article of silica," US patent 2,272,342, 1934.
- [4] F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., vol.17, p.109, 1970.
- [5] J. Hecht, City of Light, the Story of Optical Fiber, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [6] J.B. MacChesney, "Preparation of low Loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion," Proc. 10th Int. Congr. Glass, vol.6, p.40, 1974.
- [7] T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo, and F. Hanawa, "Continuous fabrication of high silica fiber preform," IOOC'77, C1-1, 1977.
- [8] T. Izawa, "Early days of VAD process," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol.6, pp.1220-1227, 2000.
- [9] T. Lie ed., Optical Fiber Communications, vol.1, Fiber Fabrication, Academic Press, Orland, 1985.
- [10] 伊澤達夫, "光ファイバの損失限界," 昭和 51 年電気 4 学会連合大会講演論文集, p.3, 1976.
- [11] T. Izawa, N. Shibata, and A. Takeda, "Optical attenuation in pure and doped fused silica in IR wavelength region," Appl. Phys. Lett., vol.31, p.33, 1977.

(平成 29 年 2 月 7 日受付, 5 月 18 日再受付,  
9 月 12 日公開)



伊澤 達夫 (名誉員)

1965 東京大学・工卒。1970 同大学院博士課程了。NTT 取締役・基礎技術総合研究所長, NTT エレクトロニクス (株) 代表取締役社長, 東京工業大学理事・研究担当副学長などを歴任。現在, 千歳科学技術大学理事長。紫綬褒章, 恩賜発明賞, J.

Tyndall Award などを受賞。