

## 光ファイバの 40 年

山内 良三<sup>†a)</sup>

Optical Fibers in the Past 40 Years and the Future

Ryozo YAMAUCHI<sup>†a)</sup>

あらまし 優れた物理的、化学的特性を有する石英ガラスを光ファイバに応用すべく、精力的な研究開発が始まったのは約 40 年前である。その後の進歩は目覚ましく、1980 年代に入ると公衆通信網を構成する伝送路の主役となった。特に、シングルモードファイバを基本とする技術は、低損失化が進んだのみならず、光増幅、分散制御など多くの派生技術を伴って進展した。本論文では、通信用光ファイバを中心に、これまでの技術の進展を振り返るとともに今後を展望する。

キーワード 光ファイバ、石英ガラス、VAD 法、FTTH、特殊ファイバ、光増幅、フォトニッククリスタルファイバ

## 1. ま え が き

遷移金属などの不純物を除去したガラスを用いることで、低損失光伝送路が実現できることを示唆したのは、英国で研究をしていた C.K. Kao らである (1966 年)[1]。その後、石英系ガラスファイバを対象として精力的な研究開発が進められ、その優位が確立した。2008 年、世界で推定 1 億 km を超える石英系光ファイバが製造され、公衆通信用途では、その 90%以上が、高速伝送に適したシングルモードファイバである。

当初、中継系の伝送のみに使われていたシングルモードファイバも、光加入者網構築に向けてケーブル化、接続、敷設工法など多くの検討が進み、1000 万加入者を数えるところまでできている。

本論文では、石英系ファイバ技術の進化を振り返るとともに今後の展望について述べる。

## 2. 通信用光ファイバの課題の変遷

表 1 に示すように、大きな年代区分で見ると、1970 年代から 1980 年にかけては「低損失追求」、1980 年代は「分散制御」、1990 年代は「分散と非線形のマネジメント」が光ファイバの研究開発の主要課題であった。これらの課題は、光ファイバの長距離伝送への適

用を念頭においたものである。これに対して、1990 年代からは「FTTH: Fiber-To-The-Home」が大きなテーマとなり、現在も精力的な活動が続いている。

## 3. 光ファイバの進化

ここでは、石英系光ファイバの構造・機能、材料、製造法の進化を振り返る。

## 3.1 構造、機能の進化

図 1 に、コア・クラッド型ファイバから始まる [2] 光ファイバの構造、機能の進化を示す。特に、通信用シングルモードファイバの発達は目覚ましく、単なる光伝送路というだけでなく、分散制御、光増幅、曲げ損失抑制、ファイバ型光部品への応用など、様々な機能が付与されて、長距離大容量伝送から光加入者網まで光通信を支える技術の柱となっている。

## 3.2 材料、製造法の進化

C.K. Kao らの報告 [1] の 4 年ほど後、Corning Glass Works の R.D. Maurer らが、石英ガラスにチタンを添加した光ファイバを用いて 20 dB/km を下回る損失を報告した [3]。この数値は、光ファイバの公衆通信への適用を期待させるのに十分な値であった。その後の光ファイバの構造、機能の進化は、表 2 に示すように石英系ガラスの優れた特性や、製造技術の進化によってもたらされた。

## (1) 石英系ファイバの原材料

光ファイバの材料としては、石英ガラス以外に、多

<sup>†</sup>(株)フジクラ、東京都

Fujikura Ltd., 1-5-1 Kiba, Koto-ku, Tokyo, 135-8512 Japan

a) E-mail: rio@lab.fujikura.co.jp

表 1 通信用光ファイバの課題と成果

Table 1 Major achievements and events in optical fiber development.

Decade	Major achievements and events
Pursuit for lower attenuation (Late '60s through '80s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Proposal of glass-based optical fiber.(Kao, STL, '66)</li> <li>* 20dB/km loss Ti-doped silica glass fiber(Coming Glass, '70)</li> <li>* MCVD method (BTL, '74)</li> <li>* OVD method (Coming '74)</li> <li>* Open the longer wavelength window (1.2<math>\mu</math>m, NTT and Fujikura, '76)</li> <li>* VAD method as a continuous process (NTT, '76)</li> <li>* VAD as a commercial process (NTT and Japanese cable makers, since '76)</li> <li>* Field research of optical cables (NTT, '78)</li> <li>* Water-free VAD fiber(NTT, '80)</li> <li>* Optical trunk lines through Japan islands :operation started (NTT, '85)</li> <li>* Pure-silica core fiber (Sumitomo, '86)</li> </ul>
Dispersion control ('80s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 1.5<math>\mu</math>m DSF fiber(Japan '79)</li> <li>* Stair-type DSF fiber (Japan, '85)</li> <li>* PANDA-type PM fiber (NTT, '86)</li> <li>* Development of EDFA (Late '80)</li> </ul>
Management of dispersion and nonlinearity (Late '80s through '90s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* TPC-5 (1<sup>st</sup> trans-pacific system with optical amplifiers, '92)</li> <li>* Dispersion compensation fibers (around '92)</li> <li>* Dispersion managed fibers.</li> </ul>
FTTH deployment (Since '90s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 10 million FTTH subscribers ('08)</li> <li>* Bend insensitive fibers : Micro structure fibers, etc.</li> </ul>

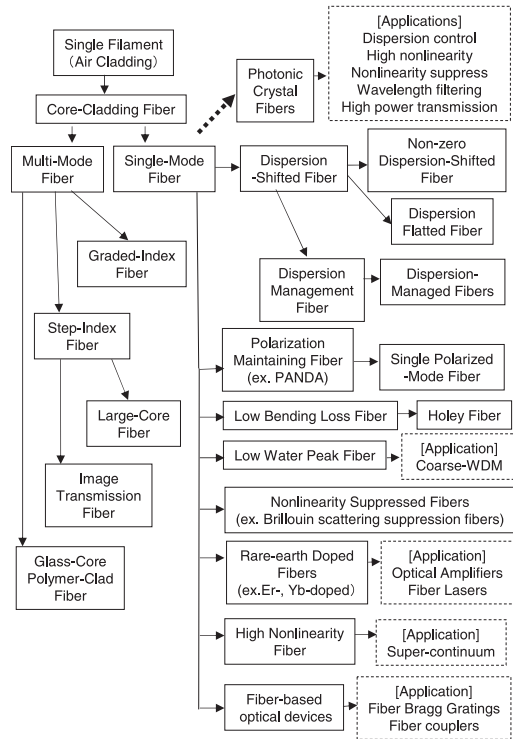


図 1 光ファイバの構造、機能の進化  
Fig. 1 Evolution of structure and function in optical fibers.

あるケイ素と原子量や価数が近いゲルマニウム，リン，ホウ素，アルミニウムなどであった．中でもゲルマニウムは，屈折率分布制御性が良く，長波長領域(1300~1650 nm)で損失を増加させないため，現在では，ほぼすべての光ファイバにドーパントとして添加されている [4] ．

一方，フッ素は，長波長帯の損失を増加させずに石英ガラスの屈折率を下げるができる特異なドーパントである．光ファイバの屈折率分布制御に自由度を与える重要なドーパントであり，クラッド部に添加するのが一般的である [5] ．

石英ガラス中のゲルマニウムやフッ素は，1500°Cを超える温度においても拡散速度が小さい．これにより，プリフォームの屈折率分布と線引き後のファイバのそれとの相似性が維持される．

(2) 製造方式の進化

現在，商用化されている石英系光ファイバの製造方法には，MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法 [6]，OVD (Outside Vapor Deposition) 法 [7]，VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 法 [8]，

成分ガラス，フッ化物ガラス，などが検討されたが，現在，公衆通信用途では全量が石英系ガラスである．

気相法を用いた合成石英ガラスの製造において，常温で高い蒸気圧をもつ原料ガスが入手可能であったことが，光ファイバの進化に貢献した．四塩化ケイ素，四塩化ゲルマニウムなどがそれである．これらの原料ガスを加水分解，熱酸化，プラズマによる酸化などの方法を用いて高純度石英ガラスを生成する．四塩化ケイ素は高純度金属シリコン製造の副産物であり，供給の不安は少ない．

光ファイバの屈折率分布形成のため，石英ガラスファイバには様々なドーパントの添加が試みられた．それらは，フッ素を除き，石英ガラスの構成元素で

表 2 石英系光ファイバの特徴  
Table 2 Features of silica-based optical fibers.

Item	Features of silica-based fibers
Nature of silica-based glass	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Low intrinsic absorption and scattering losses in a wide range of wavelength.</li> <li>2. Wavelengths of LD's fit the low loss region.</li> <li>3. Less crystallization in a wide range of temperature.</li> <li>4. Suitable dopants such as germanium exist for index profiling. (Less diffusion at high temperature.)</li> <li>5. High viscosity even at 2000°C.</li> </ol>
Manufacturing technology (Raw materials and processes)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Raw materials like SiCl<sub>4</sub> are supplied through the semiconductor industry.</li> <li>2. The raw materials have a high gaseous pressure at room temperature.</li> <li>3. Gas-phase processes provide contamination-free glass.</li> <li>4. An extremely low water content is achieved through dehydration of soot preforms.</li> <li>5. Similarity of index profile is kept between a preform and a drawn fiber.</li> <li>6. Excellent primary coating. Low loss and high tensile strength.</li> <li>7. Large preforms and high speed drawing.</li> </ol>
Characteristics of silica-based fibers	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Low loss equal to the intrinsic glass loss.</li> <li>2. High controllability of dispersion.</li> <li>3. High mechanical strength</li> </ol>

PCVD (Plasma-activated Chemical Vapor Deposition) 法 [9] がある。

MCVD 法と PCVD 法は内付け法に分類され、図 2 に示すように、石英ガラス管の内面に高純度ガラスを何層にもわたって堆積する方式である。そのガラス堆積工程では 1 層ごとにドーパントの量を変化させることにより、プリフォーム（光ファイバ母材）の半径方向に屈折率分布を形成する。内付け型の製造法では、ガラス管の内側にガラスを堆積するため、最終的なプリフォームの太さに制限が出る。

1976 年、堀口と小山内は、MCVD 法を用いて残留 OH 基の少ない光ファイバを作製し、それまで高損失とされていた長波長帯（1.2 μm 帯）に 0.5 dB/km 以下の低損失領域が存在することを明らかにした [10]。更に、伝送損に与えるドーパントの影響も明確になった。すなわち、石英ガラスの最低損失波長である 1.5 μm 帯では、リンやホウ素が吸収損を増大させるのに対して、ゲルマニウムは吸収損増加を生じさせないことが

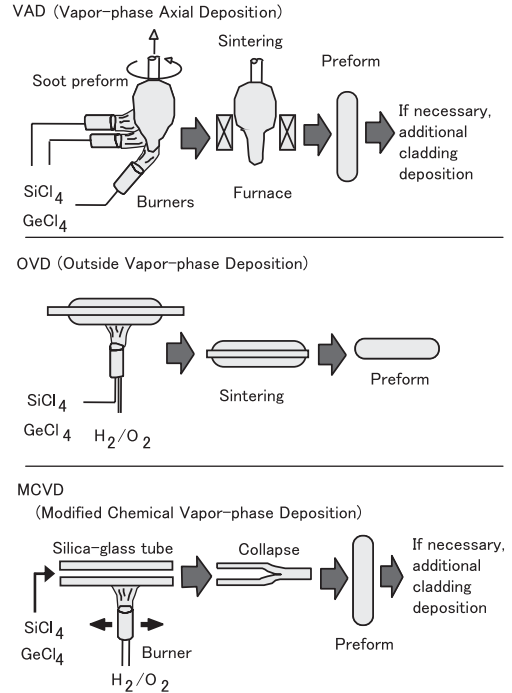


図 2 石英系光ファイバの主要製造方式  
Fig. 2 Major manufacturing processes of silica-base fibers.

明らかになった [4]。

OVD 法や VAD 法では、プリフォームが太る方向にガラス堆積を行うので、プリフォームの大型化にとって有利である。

(3) VAD が果たした役割

我が国独自の製法として発達した VAD 法は、外付け法や内付け法と異なり、プリフォーム作製時にコラプス（パイプ状プリフォームの中空部を加熱により中実化すること）を行わないので、コア中心部を汚染する可能性が少ない。VAD 法は原理的に低損失化に有利であったが [11]、本方法を実用的な製造法にまで高めたのは、旧・電電公社に加えて古河電工、住友電工、藤倉電線（現・フジクラ）など電線メーカーが積極的な取組みを行った結果である。VAD 法の開発初期には、ファイバ最外層のクラッド部に天然石英ガラスを使用していたため、不純物の影響が残っていた。その後、究極の低損失を求めて、光ファイバは全合成化されるようになった [12], [13]。

VAD 法においては、スートプリフォーム（ガラス微粉末焼結体）を加熱炉で脱水、焼結（透明化）するが、その機構が明らかにされて [14], [15]、大型プリフォー

ムの作製が可能となった。

石英ガラスは他のガラスと比べて比較的“疎な”材料であり、水素やヘリウムなどの透過率が高い。プリフォーム製造において、高温のヘリウムガス中で容易に透明ガラス化が可能なのも、ガス透過性の高さが寄与している。

VAD 法のもう一つの長所として、偏波モード分散 (PMD : Polarization Mode Dispersion) が小さいことが挙げられる。これも、コラプス工程がないので、コア断面が真円に保たれるためと考えられる。

### 3.3 シングルモードファイバが主流に

我が国では 1970 年代、マルチモードファイバ (MMF) が光通信システムに導入されたが、その伝送帯域幅はシングルモードファイバ (SMF) にははるかに及ばない。そのため、低損失化が進んだ SMF を、公衆通信網に全面的に導入する機運が高まった。SMF はコア径が細いので接続損が高くなりやすいが、コア調芯機能をもつアーク放電融着接続機が開発されて、低損失接続が可能となった [16]。

SMF は、適切な屈折率分布設計を行うことにより、ケーブル化に伴う損失増加が抑制でき、更に、零分散波長を  $1.3\ \mu\text{m}$  帯から極低損失波長帯である  $1.5\ \mu\text{m}$  帯にシフトすることもできる [17]。

### 3.4 水素と石英系ファイバ

水素に対する石英ガラスの高いガス透過率が悪い方に作用し、1980 年代初頭に“奇妙な損失増加”が見つかった。常温においても、石英系光ファイバを水素雰囲気中にさらすと、数週間のうちに水素はコアまで拡散し、水素分子自身の吸収損を発生させる。更に、拡散した水素がガラス内に在する欠陥と結合して新たな OH 基吸収損失を発生させることが分かった [18]。

この損失増加の機構は比較的短期間のうちに解明されて対策が施された。対策としては、光ケーブル内で水素が発生しないことが要請される。光ケーブルを構成する樹脂からの水素発生をなくすことと、ケーブル内に金属線を含む場合は、これが錆びて水素を発生しないようにすることが重要である。特殊用途では、石英ファイバの表面にアモルファスカarbonを被覆して水素を透過させない方法が使われることもある。

### 3.5 線引き技術とファイバの機械的信頼性

石英ガラスの高温における粘度は、 $1\sim 10\ \text{Pa}\cdot\text{s}$  と高く、 $2000^\circ\text{C}$  を超える高温でも自然流下することがないので、るつぼを使用せずに線引きできる。プリフォーム製造と並んで、プリフォームをファイバに線引きす

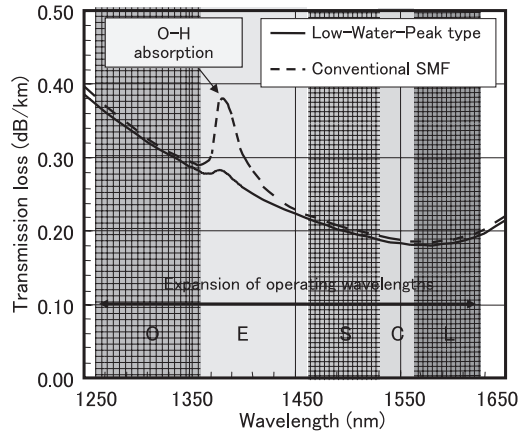


図3 低 OH 損失ファイバの損失波長特性  
Fig.3 Spectral loss of a low-water-peak fiber.

る技術も進化した。ポイントとしては、

(1) マイクロバンド損の理論的解明、損失増加を防ぐ被覆構造の設計、及び、その被覆方式の開発。

(2) スクリーニング試験による光ファイバの機械的強度の全長保証である。

(1) については、Bell 研究所の D. Gloge の解析、及び、硬軟二層構造 (外側が硬い) の樹脂コーティングの提案が大きな役割を果たした [19]。

(2) については、ガラスは脆性材料であり、その強度保証は重要な研究項目であった。Y. Mitsunaga らは、脆性材料の強度理論を発展させて、ファイバ全長にわたる機械的強度スクリーニング条件を明らかにした [20]。

### 3.6 LWP ファイバによる CWDM 伝送

海底システムに代表される長距離伝送では、光ファイバ増幅器を用いて、 $1550\ \text{nm}$  帯での高密度波長多重伝送 (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) を行うことが一般的となっている。一方、メトロ系、アクセスにおいては、 $1260\sim 1600\ \text{nm}$  という広い波長帯において、数十 nm の広い波長間隔で信号を多重する CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) 方式の適用が検討されてきた。この目的に適した光ファイバとして、波長  $1380\ \text{nm}$  付近の OH 基の吸収を極限まで低減した光ファイバ (LWP ファイバ : Low Water Peak Fiber) が商品化されている。図 3 参照。

## 4. 光ファイバ通信を支える特殊ファイバ

ここでは、光ファイバ通信を支える特殊ファイバ技

術について述べる。

#### 4.1 エルビウム添加光ファイバ増幅器

EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) は、1990年代の DWDM による長距離大容量伝送を実現した主役である。ファイバ増幅器の概念は、レーザの発明後まもなく提案されたが [21]、1980 年代半ばの Southampton 大 [22] や、Bell 研究所の報告を契機として [23]、励起用 LD、光ファイバ設計及び製造技術、システム理論、実証、などの検討が加速し実用化に至った。EDFA の特徴として、

- (1) 石英系ファイバの最低損失波長帯である  $1.55 \mu\text{m}$  帯に大きな利得を有する。
- (2) 増幅波長帯域が広い。数十 nm 以上。
- (3) 高利得・高エネルギー変換効率・低雑音・偏波無依存である。
- (4) 増幅媒体が光ファイバであるため伝送用ファイバとの親和性が高い。

などが挙げられる。

#### 4.2 偏波保持ファイバ

偏波保持光ファイバ (PMF: Polarization Maintaining Fiber) は、直線偏波を保持して伝送可能な光ファイバであり、偏波保持が必要な光部品同士の接続や、共振・干渉現象を利用する光回路に用いられる [24]。1980 年代に開発が進み、光ファイバジャイロスコープなどの光ファイバセンサ用途として発展した。様々なタイプの PMF が開発されたが、中でも断面形状の再現性が高く、接続性に優れた PANDA (Polarization-maintaining AND Absorption-reducing) 型は、PMF の代名詞にもなっている [25]。外部変調方式の高速光変調器では、偏波保持機能が必須であり、近年 PMF の使用は増加している。

#### 4.3 分散補償ファイバと分散マネージメント

分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensation Fiber) は、伝送路ファイバとは異符号の波長分散値をもち、伝送用ファイバに接続することにより、目標とする波長範囲で分散をキャンセルする機能をもつファイバである。一般的には、コア径を細くし、かつコアクラッドの比屈折率差を大きくして  $1.55 \mu\text{m}$  帯において大きな負の波長分散を得ることで、標準的なシングルモードファイバの正の分散を補償する [26]。屈折率分布形状を変形させて波長分散特性を変形させることで、対象ファイバに応じた、WDM 通信で必要となる広い波長域での波長分散補償が可能となる [27]。

日本では、早い時期から長距離伝送用に DSF (Dis-

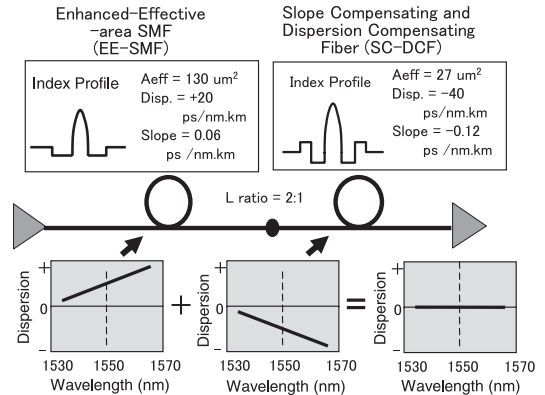


図 4 実効コア断面積の大きなファイバと分散補償/分散スロープ補償ファイバの組合せによる分散・非線形マネージメント

Fig. 4 Dispersion managed fiber combination: a large core fiber and a dispersion and dispersion slope compensation fiber.

persion Shifted Fiber) が使用されたため [28]、DCF を用いずに 10 Gbit/s 伝送が可能であり、DCF の必要性は低かったが、近年、トラヒックの増加とともに、L バンドでの WDM 伝送、及び 40 Gbit/s 伝送の導入に対応すべく、L バンド DSF 用 DCF が開発されている [29]。L バンドについては図 3 を参照。

光増幅多段中継により長距離・高密度・波長多重伝送を行うと、コア内の光電力密度が高く、波長間隔は狭く、相互作用長も長いので、四光子混合などの非線形効果が顕著となる。その結果、光ファイバの分散と非線形効果を同時に管理することが要請されるようになった。

図 4 に示すように、分散値の異なる 2 種類のファイバを組み合わせることで分散マネージメントを行うことができるが、下記のように設計の妥協点を探ることが必要となる [30]。

- (1) 前段ファイバは、 $100 \mu\text{m}^2$  を超える実効コア断面積拡大をもち、非線形性は低減されているが、ケーブル化に対する損失感受性が高くなる。
  - (2) 広い波長域において、分散補償と分散スロープ補償を同時に満たすような RDS (Relative Dispersion Slope) 設計。
  - (3) コア径差の大きい異種ファイバ間の接続損の低減。
- などの課題解決が求められる。

2000 年代に入り超長距離海底光システムの構築は減ったが、世界的な情報量は増加しており、40 Gbit/s

表 3 マイクロストラクチャファイバ  
Table 3 Micro-structure fibers.

Class	Total reflection types (PCF, HF, MOF)					Photonic Band-Gap Fiber(PBGF)	
	Large Cross section	Hole-Assist type	Polarization maintaining	High Nonlinearity	High NA	Air core	Air-rich core
Subclass							
Application	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Large capacity transmission</li> <li>◆ Dispersion compensation</li> <li>◆ Low nonlinearity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Low bending loss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ PM components</li> <li>◆ Coherent transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ White light source</li> <li>◆ Wavelength conversion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Optical amplifier</li> <li>◆ Fiber lasers</li> <li>◆ High power transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Low loss transmission</li> <li>◆ Low nonlinearity</li> <li>◆ Power transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Large capacity transmission</li> <li>◆ Dispersion compensation</li> </ul>

を超えるシステムへのグレードアップを含めて、分散・非線形マネージメントは重要な技術と考えられる。

#### 4.4 ファイバ型光部品

溶融延伸型の光ファイバカプラや、ファイバブラッググレーティングなどのファイバ型光部品は、伝送路ファイバと融着接続が容易であり、また、光を空間に出すことなく、分岐、合波、分波などを操作を行うことできる。このため、高い光電力の EDFA などの構成部品として使われている [31]。

### 5. 新しい光ファイバ

近年、ホーリーファイバ、フォトニック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber)、微細構造ファイバ (MSF: Micro Structure Fiber)、フォトニックバンドギャップファイバ (PBGF: Photonic Band Gap Fiber) などと呼ばれ、従来のコアクラッド型ファイバとは異なる構造や導波原理をもつ一群の光ファイバ [32] が注目を浴びている。各名称は、ファイバの構造や導波原理の特徴を表現したものであるが、空孔や周期構造をもつことが共通する特徴である。表 3 に、筆者の組織で試作した例を示す [33] ~ [37]。

屈折率導波型 PCF は、空孔の低屈折率性を利用し等価的なクラッドを構成させたものといつてよい。空孔配置の設計によって、(1) 広帯域シングルモードファイバ、(2) 低曲げ損失ファイバ、(3) 低非線形ファイバ、(4) 超高非線形ファイバ、(5) 高複屈折偏波保持ファイバ、(6) 超高 NA マルチモードファイバ、などを得ることが可能であり、センサやレーザへの応用が進みつつある。近年、波長 1550 nm における伝送損が 0.18 dB/km と SMF と同等の伝送損を有するファイバ [38] も発表されている。

PBGF は、多数の空孔により屈折率の周期構造を形

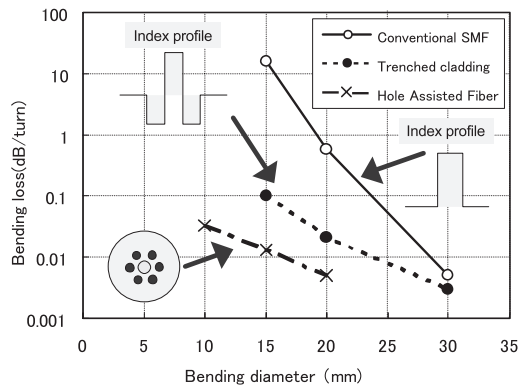


図 5 各種シングルモードファイバの曲げ損失特性  
Fig. 5 Bending losses for single mode fibers.

成し、周期性を崩した領域に光を閉じ込めた光ファイバである。したがって、空孔に光を閉じ込めて伝搬させることが可能であり、材料に起因する入力パワー限界や損失限界を超えられる可能性も秘めている。

ホールアシストファイバ (HAF: Hole-Assisted Fiber) は、当初分散補償ファイバとして提案された [39]。その後、FTTH への応用に着目し曲げ損を低減できるファイバとしての提案 [40] があり、既に宅内配線コード用として実用化されている。FTTH の進展に伴い、光ファイバにも一般加入者宅での乱暴な取扱いも耐える機械的強度や、小さな曲げ径に対しても損失増加が小さいことが求められている。図 5 に、ホーリーファイバを含めた曲げ損低減型ファイバの特性例を示す [41]。

### 6. む す び

光通信用途を中心に、過去、約 40 年間の石英系光ファイバ技術の進歩について概要を述べた。最後に今

後の展望を述べる。

(1) 高速通信では, FEC (Forward Error Correction), EDC (Electronic Dispersion Compensation), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), 各種位相変調方式など, 無線通信で培われた技術を光ファイバ通信に適用することが一般的になってきた。しかし, Loss penalty も零ではなく, また, 電子回路のエネルギー消費も零にはならないことから, パッシブ素子としての光ファイバの改良は今後とも必要であろう。例えば, 偏波分散は時間的に変動するため, 今後とも光ファイバ技術を磨く価値は高い。

(2) FTTH 用途では, 使用する物品に低コスト, 容易な工事, 使い易さが求められる。この観点では, 曲げ損失が小さく機械的強度の高いファイバは重要な位置を占めるだろう。

(3) 紙面の制限から今回は触れなかったが, 通信以外の用途でも光ファイバ技術の利用が進むものと考えられる。センシング分野や医療分野では, 安心・安全・環境・高齢化・高度医療などのキーワードに沿った用途開発が進むと思われる。

(4) 現在, PCF や PBGF など微細構造ファイバ (MSF) の応用は, 低曲げ損失ファイバなど限定的であるが, 非通信分野を含めて検討が進むことを期待したい。

(5) 資源の観点から光ファイバ作製技術を考える。近年, 太陽電池の生産量が増えて, 高純度の金属シリコンの需要が増大しているが, ケイ素はクラーク数 2 位の元素であり枯渇の可能性は低い。一方, ドープメントであるゲルマニウムとガラスの焼結で使用しているヘリウムについて, 日本は 100% 輸入に頼っており, 中長期的には代替材料及び技術を考える必要があるかもしれない。

謝辞 最後に, 本論文をまとめるにあたり協力頂いた (株) フジクラの関係者に感謝する。

## 文 献

- [1] K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies," *Proc. IEE*, vol.113, no.7, pp.1151-1158, July 1966.
- [2] N.S. Kapany, *Fiber Optics*, Academic Press, New York, 1967.
- [3] F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer, "Radiation loss in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol.17, no.7, pp.423-425, Nov. 1970.
- [4] H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi, T. Izawa, and H. Takata, "Effect of dopants on transmission loss of low-OH-content optical fibres," *Electron. Lett.*, vol.12, no.21, pp.549-550, Oct. 1976.
- [5] K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh, and Y. Chigusa, "Ultra low loss (0.1484 dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance," *Electron. Lett.*, vol.38, no.20, pp.1168-1169, Sept. 2002.
- [6] J.B. MacChesney, P.B.O' Conner, E.V. DiMarcello, J.R. Simpson, and P.D. Lozay, "Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion," 10th Int'l Congress on Glass, vol.6, pp.40-45, Kyoto, Japan, July 1974.
- [7] D.B. Keck, P.C. Schultz, and F. Zimar, United States Patent 3,737,292, June 4, 1974.
- [8] 伊澤達夫, 宮下 忠, 塙 文明, "光ファイバ用母材の製造方法及びその製造装置," 日本特許, 特願昭 51-38883, 昭和 51 年 4 月 6 日。
- [9] P. Geittner, D. Küppers, and H. Lydtin, "Low-loss optical fibers prepared by plasma-activated chemical vapor deposition (CVD)," *Appl. Phys. Lett.*, vol.28, no.11, pp.645-646, June 1976.
- [10] M. Horiguchi and H. Osanai, "Spectral losses of low-OH content optical fibres," *Electron. Lett.*, vol.12, no.12, pp.310-312, June 1976.
- [11] S. Tomaru, M. Yasu, M. Kawachi, and T. Edahiro, "VAD single mode fibre with 0.2 dB/km loss," *Electron. Lett.*, vol.17, no.2, pp.92-93, Jan. 1981.
- [12] M. Kawachi, M. Yasu, S. Tomaru, T. Edahiro, and S. Sakaguchi, "Wholly synthesized VAD single-mode fibre," *Electron. Lett.*, vol.18, no.8, pp.328-330, April 1982.
- [13] A. Wada, R. Yamauchi, M. Miyamoto, T. Uehara, K. Seto, K. Harada, N. Sato, and K. Inada, "Fully synthesized single mode fiber fabrication by two-step V.A.D. process using high-rate cladding deposition burners," *Proc. 12th European Conf. on Optical Commun.*, pp.21-24, Barcelona, Spain, Sept. 1986.
- [14] T. Edahiro, M. Kawachi, S. Sudo, and H. Takata, "OH-ion reduction in v.a.d optical fibres," *Electron. Lett.*, vol.15, no.16, pp.482-483, Aug. 1979.
- [15] S. Sudo, T. Edahiro, and M. Kawachi, "Sintering process of porous performs made by V.A.D. method for optical fiber fabrication," *Trans. IECE Japan*, vol.E63, no.10, pp.731-737, Oct. 1980.
- [16] O. Kawata, K. Hoshino, Y. Miyajima, M. Ohnishi, and K. Ishihara, "A splicing and inspection technique for single-mode fibers using direct core monitoring," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-2, no.2, pp.185-191, April 1984.
- [17] H. Tsuchiya and N. Imoto, "Dispersion-free single-mode fibre in 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength region," *Electron. Lett.*, vol.15, no.15, pp.476-478, July 1979.
- [18] N. Uesugi, Y. Murakami, C. Tanaka, Y. Ishida, Y. Mitsunaga, Y. Negishi, and N. Uchida, "Infra-red optical loss increase for silica fibre in cable filled with

- water," *Electron. Lett.*, vol.19, no.19, pp.762-764, Sept. 1983.
- [19] D. Gloge, "Optical-fiber packaging and its influence on fiber straightness and loss," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.54, no.2, pp.245-262, Feb. 1975.
- [20] Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, and Y. Ishida, "Reliability assurance for long-length optical fiber based on proof testing," *Electron. Lett.*, vol.17, no.16, pp.567-568, Aug. 1981.
- [21] E. Snitzer, "Proposed fiber cavities for optical masters," *J. Appl. Phys.*, vol.32, no.1, pp.36-39, Jan. 1961.
- [22] S.B. Poole, D.M. Payne, R.J. Mears, M.E. Fermann, and R.I. Laming, "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-4, no.7, pp.870-876, July 1986.
- [23] E. Desurvire, J.R. Simpson, and P.C. Becker, "High-gain erbium-doped traveling wave fiber amplifier," *Opt. Lett.*, vol.12, no.11, pp.888-890, Nov. 1987.
- [24] J. Noda, K. Okamoto, and Y. Sasaki, "Polarization-Maintaining Fibers and Their Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-4, no.48, pp.1071-1089, Aug. 1986.
- [25] Y. Sasaki, T. Hosaka, and J. Noda, "8-km long polarization-maintaining optical fiber with highly stable polarization state," *Electron. Lett.*, vol.20, no.19, pp.792-794, Sept. 1983.
- [26] J.M. Dugan, A.J. Price, M. Ramadan, D.L. Wolf, E.F. Murphy, A.J. Antos, D.K. Smith, and D.H. Hall, "All-optical fiber-based 1550 nm dispersion compensation in a 10 Gb/s, 150 km transmission experiment over 1310 nm optimized fiber," *Technical Digest of Optical Fiber Commun. Conf.*, no.PD14, San Jose, CA, Feb. 1992.
- [27] L. Grner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, G. Jrgensen, L.V. Jrgensen, B. Plsdtitir, and D. Jakobsen, "Dispersion-compensating fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol.23, no.11, pp.3566-3579, Nov. 2005.
- [28] M. Ohashi, N. Kuwaki, C. Tanaka, N. Uesugi, and Y. Negishi, "Bend-optimised dispersion-shifted step-shaped-index (SSI) fibres," *Electron. Lett.*, vol.22, no.24, pp.1285-1286, Nov. 1986.
- [29] 鈴木龍次, 愛川和彦, 姫野邦治, "分散シフトファイバ用分散補償ファイバモジュール," *信学技報*, OCS2003-6-103, April 2003.
- [30] S. Matsuo, K. Aikawa, N. Shimada, S. Tanigawa, K. Himeno, and K. Harada, "Non-linearity suppressed fiber link of large-effective-area medium dispersion fiber and dispersion compensation fiber," *Proc. 28th European Conf. on Optical Commun.*, vol.2, pp.1-2, Copenhagen, Denmark, Sept. 2002.
- [31] 山内良三, "ファイバグレーティングの最新技術動向," *信学技報*, OFT99-8, May 1999.
- [32] A. Bjarklev, Jes Broeng, and A.S. Bjaklev, *Photonic Crystal Fibers*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [33] N. Guan, K. Izoë, K. Takenaga, R. Suzuki, K. Aikawa, and K. Himeno, "Holey fibers for low bending loss," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E89-C, no.2, pp.191-196, Feb. 2006.
- [34] N. Guan, K. Takenaga, K. Izoë, R. Suzuki, and K. Himeno, "Highly birefringent photonic crystal fiber for a wide wavelength range," *Proc. 30th European Conf. on Optical Commun.*, no.Mo4.3.4, Stockholm, Sweden, Sept. 2004.
- [35] N. Guan, K. Takenaga, T. Hamada, and K. Himeno, "Holey fibers with ultra high NA," *10th OptoElectronics and Commun. Conf. Technical Digest*, no.5D1-3, Seoul, Korea, July 2005.
- [36] K. Takenaga, N. Guan, T. Hamada, and K. Himeno, "A trial of air-core photonic bandgap fibers," *10th OptoElectronics and Commun. Conf. Technical Digest*, no.5D1-5, Seoul, Korea, July 2005.
- [37] K. Takenaga, N. Guan, R. Goto, S. Matsuo, and K. Himeno, "A new photonic bandgap fibre with extended triangular lattice and capillary core," *Proc. 31st European Conf. on Optical Commun.*, no.Tu1.4.2, Glasgow, UK, Sept. 2005.
- [38] K. Tajima, "Low loss PCF by reduction of hole surface imperfection," *Proc. 33rd European Conf. on Optical Commun.*, no.PD2.1, Berlin, Germany, Sept. 2007.
- [39] T. Hasegawa, E. Sasaoka, M. Onishi, M. Nishimura, Y. Tsuji, and M. Koshihara, "Novel hole-assisted light-guide fiber exhibiting large anomalous dispersion and low loss below 1 dB/km," *Proc. Optical Fiber Commun. Conf. (OFC2001)*, PD5, Anaheim, CA, USA, March 2001.
- [40] J. Zhou, K. Nakajima, K. Tajima, K. Hogari, K. Sato, and I. Sankawa, "Application of hole-assisted type PCF with good bending loss performance," *Proc. 52nd Int'l Wire and Cable Symp./Focus*, pp.48-52, Philadelphia, USA, Nov. 2003.
- [41] K. Himeno, S. Matsuo, N. Guan, and A. Wada, "Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the home," *J. Lightwave Technol.*, vol.23, no.11, pp.3494-3499, Nov. 2005.

(平成 20 年 12 月 25 日 受付)



山内 良三 (正員:フェロー)

昭 47 名大・工・電気卒, 昭 49 同大大学院修士課程了, 同年, 藤倉電線(現・フジクラ)入社。以来, 光ファイバ, 光ケーブル, 光部品の研究開発に従事。現在, 同社常務執行役員研究開発部門副統括, 工博。