

■9 群 (電子材料・デバイス) - 6 編 (受動・機能デバイス)

第 1 章 光導波路

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 1-1 光導波路の基礎
- 1-2 導波路シミュレーション技術
- 1-3 光ファイバの製法と特性
- 1-4 ホーリーファイバ
- 1-5 マルチコアファイバ
- 1-6 石英系光導波路
- 1-7 プラスチック光ファイバ
- 1-8 ポリマー光導波路
- 1-9 光接続技術

■9 群-6 編-1 章

1-1 光導波路の基礎

(執筆者：國分泰雄) [2013 年 12 月 受領]

1-1-1 光導波路の基本構造と基本パラメータ

光導波路は、光が主に伝播するコア (Core) とその周囲のクラッド (Cladding) から成る。コアの屈折率を n_1 、クラッドの屈折率を n_2 とすると、一般には $n_2 < n_1$ が成り立つ。最も単純な光導波路は、コアが平板になっていてその上下を屈折率と同じクラッド層で挟んだ対称 3 層平板導波路である。その断面構造を図 1・1(a) に示す。

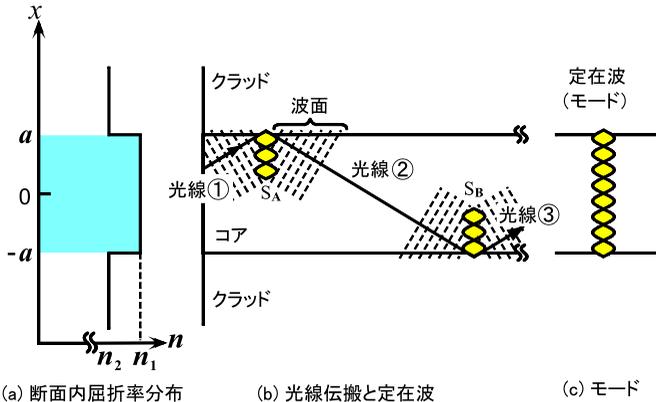


図 1・1 対称 3 層平板光導波路の断面構造とモードが形成される原理

この光導波路を伝搬する光線は、光線に垂直に形成される等位相面 (波面) が反射点で図 1・1(b) のように定在波を形成するので、伝搬波が光導波路全体に広がった定常状態では、コアとクラッド間の上側境界面と下側境界面の間には、図 1・1(c) のようにつながった定在波が形成される。定在波の個数は整数であるので、等価的な光線の伝搬角も離散的な値をとる。この定在波をモード (Mode) と呼び、モードの伝搬定数も離散的な値をとる。

光導波路はコアとクラッドの屈折率の差で光を全反射させるので、式(1・1)で定義される比屈折率差 Δ と呼ぶパラメータが最も基本的なパラメータである。

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1 \cdot 1)$$

この比屈折率差 Δ と、コアの半幅 a と、真空中の伝搬定数 $k_0 (=2\pi/\lambda, \lambda$ は真空中の波長) によって定義される

$$V = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (1 \cdot 2)$$

は V パラメータと呼ばれ、光導波路に伝播するモード数や各モードの伝搬定数、群速度、分散、

閉じ込め係数などを決定する基本パラメータである。モードの伝搬点数を β と表すとき、

$$b = \frac{\left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (1 \cdot 3)$$

を規格化伝搬定数と呼び、 V パラメータが決まると固有値方程式によって規格化伝搬定数 b が決まる。その関係を表すグラフを分散曲線 (Dispersion Curve) と呼ぶ。分散曲線はコアの断面形状やコア内屈折率分布によって異なる。図 1・1 に示す対称 3 層平板導波路の分散曲線を図 1・2 に示す。

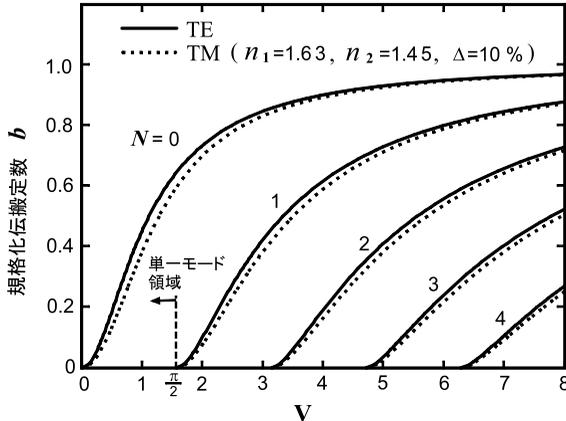


図 1・2 対称 3 層平板導波路の分散曲線

1-1-2 導波路材料と機能による分類

光導波路材料の選択は実現したい機能に依存し、低損失光導波路のためには光ファイバの製造プロセスを発展させた石英光導波路が 0.01 dB/cm の低損失を実現できるので有利である。この技術は別名 PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術と呼ばれる。半導体レーザや光検出器、あるいは半導体光増幅器や吸収型光変調器との集積化を目指す場合には半導体光導波路が用いられ、また電界によって屈折率を変化させる電気光学効果や波長変換を目的とする 2 次非線形光学効果には、 LiNbO_3 が用いられる。

これらを用いて実現される機能は、 LiNbO_3 に Ti を拡散させた光導波路とマッハツェンダー干渉計回路及び電気光学効果を組み合わせた光変調器、石英光導波路を用いて 2 光束干渉計 (マッハツェンダー干渉計) やアレイ導波路格子 (Arrayed Waveguide Grating : AWG) と呼ぶ多光束干渉計で構成した光波長フィルタ (合分波器)、更に半導体光導波路 (GaAs 系, InP 系など、及び量子井戸半導体光導波路) への電流注入や量子閉じ込めシュタルク効果 (QCSE) による位相変調と干渉計や共振器を組み合わせた高速変調器、チューナブルフィルタなどが代表例である。

1-1-3 比屈折率差による分類

LiNbO₃ 光変調器や AWG 型合分波器は既に確立された光導波路技術及び光導波路デバイスであるが、デバイスの大きさが数 mm から数 cm であり、近年はその小型化と高密度集積化技術に研究の関心が移っている。デバイスの大きさは主に光導波路の曲げ半径によって制限され、また曲げ半径はコアとクラッドの屈折率差によって決まる。式(1・1)で定義される比屈折率差 Δ で分類できる。

単一モード光ファイバでは、 Δ は 1% 以下で、石英系光導波路でも最大 5% 程度、半導体光導波路でも 8% 程度であるが、近年は 20~45% の非常に大きな比屈折率差を持つ光導波路を高屈折率差 (High Index Contrast : HIC) 光導波路と呼び、これを用いた超小型光デバイスが幾つか報告されている^{1)~3)}。高屈折率差光導波路を用いると、導波路断面積を小さくできるほかに、曲げ半径を非常に小さくすることができる。図 1・3 に示すように、従来の比屈折率差 Δ が数% の光導波路では、360 度曲がり導波路 1 周当たりの放射損失を 0.1 dB 以下にする許容曲げ半径はせいぜい数 mm であるが、比屈折率差が 20% を越えると許容曲げ半径は 10 μm 程度に、更に 40% を越えると僅か 2 μm 程度の微小半径の曲げ導波路を実現できる。つまり、比屈折率差が 1 桁大きくなると許容曲げ半径を 3 桁微小化できる。

集積型デバイスのチップ面積小型化には、導波路断面積の縮小よりも曲げ半径の極小化による効果が非常に大きい。その結果、半径 5 μm 程度のマイクロリング共振器をはじめとして、素子面積が 100 μm 角以内に収まるアレイ導波路格子 (Arrayed Waveguide Grating) 型フィルタやラティス型フィルタなどの超微小導波路デバイスが報告されている。これらの高屈折率差光導波路を実現するためのコア材料には、窒化シリコン (Si₃N₄, 屈折率 2.0) やシリコン (屈折率 3.5) が用いられる。

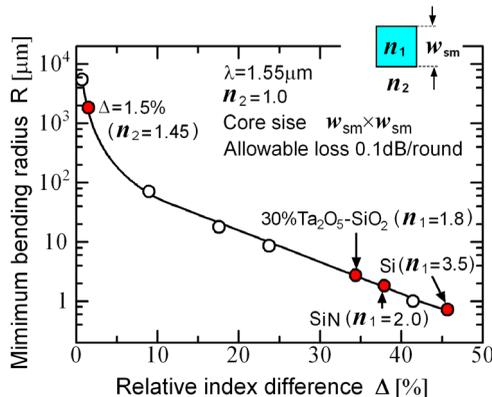


図 1・3 矩形導波路の許容曲げ半径の比屈折率差依存性

光導波路は集積型光回路の基本要素であり、特に近年の高屈折率差光導波路の発展は目覚ましく、大規模高密度光集積回路への道を開く新技術になると予想される。従来型光導波路と異なる留意点は、散乱損失が屈折率差の 2.5 乗に比例して大きくなることと、光ファイバへの結合損失の増加であるが、前者はコアとクラッドの界面を非常に平滑に加工する技術の開発、後者はスポットサイズ変換器の導入によってほぼ解決の目処がつつきつつある。

更に近年は、シリコン CMOS プロセスをそのまま利用して様々な極小光回路を製作するシリコンフォトニクスが発展しつつある。光源の集積化は未開拓であるが、10 Gbps 程度の光変調器は可能になっている。

■参考文献

- 1) Y. Kokubun : IEICE Trans. on Electronics, E88C, 349, 2005.
- 2) B. Jalali and S. Fathpour : J. Lightwave Tech., 24, 4600, 2006.
- 3) Y. Kokubun : IEICE Trans. Electronics, E90-C, 1037, 2007.

■9 群-6 編-1 章

1-2 導波路シミュレーション技術

(執筆著者：小柴正則) [2011年10月 受領]

光導波路は光を局所的に閉じ込め、任意の方向に導くものである。光を特定の領域（一般にコアと呼ぶ）に閉じ込めるには、通常、全反射が利用されるので、コアの屈折率が最も大きくなる。光導波路には、光デバイスや光回路を構成するための比較的短尺のもの（高々、数ミリメートル程度）と、長尺の光ファイバとがある。ここでは、前者の導波路を光導波路と呼ぶことにし、光導波路と光ファイバのシミュレーションに必要な解析技術について述べる。詳細については、参考文献 1)~5) や、それぞれの文献欄に記載の論文を参照されたい。

1-2-1 光導波路解析

光導波路解析は、導波モード解析、導波路不連続解析、ビーム伝搬解析の3つに大別される¹⁾²⁾⁴⁾。最近では、全反射のみならず、フォトニックバンドギャップ (Photonic Band Gap : PBG) を利用して、光を屈折率の小さな領域に閉じ込めることが可能なフォトニック結晶導波路と呼ばれる新しいタイプの光導波路も登場し、真の超小型光回路の実現が期待されている。フォトニック結晶導波路では、バンド計算や周期構造導波路としての解析も必要になる。

(1) 導波モード解析

光導波路解析の基本は、伝搬方向に構造が一樣な導波路の導波モード解析である。解析領域は導波路の断面であり、動作周波数（あるいは動作波長）を与えて、導波路に存在する固有のモード（導波モードに対応）ごとに、伝搬方向の位相定数（固有値）と、それに対応する電磁界分布（固有ベクトル）を求める。位相定数を伝搬定数と呼ぶこともある。

光導波路の導波モード解析を解析的に厳密に行うことは難しく、数値シミュレーションが必要になる。光導波路の導波モード解析のための数値シミュレーション技術には様々なものがある。なかでも、断面形状が任意の光導波路への適用が容易で、スプリアス解と呼ばれる非物理的な解が発生しない辺要素と節点要素を併用した有限要素法 (Finite Element Method : FEM) がよく利用されている。

漏れ（リーキー）構造となる光導波路では、導波路を構成する材料に損失がなくても、固有値、すなわち伝搬方向の位相定数は複素数（虚数部は減衰定数に対応する）になる。こうしたリーキーモードの解析では、解析領域端からの非物理的なスプリアス反射を抑圧するために吸収境界条件の導入が不可欠であり、吸収性能に優れた完全整合層 (Perfectly Matched Layer : PML) がよく利用されている。

(2) 導波路不連続解析

光導波路を伝搬方向に曲げたり、分岐させたり、あるいは複数の導波路を接続したり、結合させたり、更にはテーパ構造やグレーティング構造を導入することによって、様々な光デバイスや光回路を構成することができる。こうした光デバイスや光回路の設計には、導波路不連続解析が必要になる。

導波路不連続解析における解析領域は、その内部にすべての不連続箇所を含む領域全体になる。任意形状の導波路不連続の解析には、時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method : FDTD) や FEM がよく利用されている。FDTD では、クーランの条件によって時間ス

トップに制約が課せられる。最近、こうした制約を緩和できる時間領域のビーム伝搬法 (Beam Propagation Method : BPM) が開発されている。導波路不連続解析では、不連続箇所において反射波、透過波、放射波などが生じる。これらが解析領域端まで到達する構造では、解析領域端からのスプリアス反射を抑圧する必要があり、PML が利用されている。

(3) ビーム伝搬解析

光導波路では、導波路構造が伝搬方向に緩やかに変化し、反射波を無視できる場合がある。こうした構造では、緩慢変化包絡線近似に基づくビーム伝搬解析が有効である。ビーム伝搬解析のための解析法を BPM と呼ぶ。BPM では、解析領域を、光の伝搬方向と、それに垂直な面とに分け、伝搬方向に逐次的に計算を進めていくので、導波路不連続解析に比べて計算負荷を大幅に削減することができる。

BPM の原型は、光の伝搬過程を、全空間を均質としたときの回折効果と導波構造を反映した位相回転効果とに分離するスプリットステップ法に基づくものであり、回折効果は高速フーリエ変換によって処理される。この BPM は簡便であるが、シリコン細線のように、高密度配線が可能な高屈折率差導波路には適用できないため、伝搬方向と垂直な面に FEM や差分法を適用し、伝搬方向には無条件に安定なクランク-ニコルソン法を適用した BPM が開発されている。ビーム伝搬解析においても、解析領域端からのスプリアス反射を抑圧するための吸収境界条件として PML がよく利用されている。また、BPM は、通常、近軸ビーム伝搬解析に用いられるが、広角ビーム伝搬解析に対応可能な BPM も開発されている。

1-2-2 光ファイバ解析

光ファイバはコアとクラッドの僅かな屈折率差を利用し、全反射によって光をコア内に閉じ込め、長距離伝送させるものである。光ファイバは、通常、軸対称構造を有しているが、実際の光ファイバには、多少なりとも非軸対称性が存在する。単一偏波化のために、意図的に非軸対称性を与えることもある。最近では、フォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber : PCF) と呼ばれる新型ファイバが登場し、従来の光ファイバでは実現し得ない特異な性質に関心が集まっている。また、従来の光ファイバでは、通常、コアは1つであるが、こうしたシングルコアファイバ (Single-Core Fiber : SCF) の伝送容量を飛躍的に拡大することが可能な光ファイバとして、マルチコアファイバ (Multi-Core Fiber : MCF) に関する検討も進められている。

光ファイバ解析の基本は、伝搬方向に構造が異なる光ファイバの導波モード解析である。特に、長距離伝送に使用される光ファイバの場合には、固有値、すなわち位相定数の波長に関する1階微分 (群速度に対応) のみならず、2階微分 (群速度分散に対応)、3階微分 (分散スロープに対応) など、高階微分の評価が必要になるので、導波モード解析には高い精度が要求される。なお、電磁界分布はモードフィールド径や実効断面積の評価に用いられる。

ところで、曲げ損失も光ファイバの重要な評価項目の一つであり、曲げの効果を反映した等価的な屈折率に基づく等価直線導波路近似が簡便な方法としてよく利用されている。また、光ファイバのコア径は非常に小さいため、非線形性が現れやすく、非線形光ファイバとしての解析も重要である。

(1) 軸対称光ファイバ

軸対称光ファイバには、コア内の屈折率が均一なステップインデックス型ファイバ (Step-Index Fiber : SIF) とコア内の屈折率が半径方向に徐々に変化するグレーデッドインデックス型

ファイバ (Graded-Index Fiber : GIF) とがある。コアとクラッドの屈折率差は非常に小さいので、いずれの場合もスカラ波動方程式に基づくスカラ波近似解析によって、実用上十分な精度の解が得られる。SIF の場合には、どんなに多層になっても解析的に厳密な解析が可能である。一方、GIF の場合には、厳密解が存在しないので、屈折率分布を適当な階段関数で近似する階段近似法が利用される。また、屈折率分布を階段近似することなく、より忠実に評価できる FEM も広く利用されている。

(2) 非軸対称光ファイバ

通常の軸対称光ファイバには、互いに直交する 2 つの独立したモードが存在する。実際の光ファイバでは、僅かな摂動によって、これらのモードの縮退が解け、モード間結合が生じてしまうので、コア形状を非軸対称とした単一偏波ファイバが開発されている。

コア形状が非軸対称になると、解析的に厳密な解析は困難になるので、非軸対称光ファイバの解析には FEM がよく利用されている。非軸対称光ファイバは、非軸対称な応力分布を与えることによって実現できる。この場合には応力解析も必要になり、FEM が唯一の方法として利用されている。

(3) フォトニック結晶ファイバ

PCF は、クラッド部にクラッドの屈折率よりも低屈折率あるいは高屈折率の柱状散乱体を多数配置した複雑な構造を有している。PCF には、従来型ファイバと同様に、全反射によって光をコア内に閉じ込めるものと、PBG によって光を相対的に低屈折率となるコア内に閉じ込めるものがある。

クラッド部に配置する散乱体には空孔を用いることもできるので、コアとクラッドの屈折率差を従来型ファイバに比べて格段に大きくできる。このため、PCF の解析では、スカラ波近似解析は成り立たず、ベクトル波動方程式に基づく、より厳密なベクトル波解析が要求され、任意形状の散乱体への適用が容易な FEM がよく利用されている³⁾。なお、PBG を利用する場合には、ファイバ断面内のバンド計算も必要になる。

(4) マルチコアファイバ

MCF では、通常の SCF で必要となる解析に加えて、コア間クロストークの解析が必須である。MCF のコア間クロストークは、曲げやねじれの影響を受けやすく、また、こうした曲げやねじれは伝送方向に不規則に揺らいでいるため、統計的な取り扱いが必要になる。光ファイバは長尺であるため、BPM では対応が難しく、モード結合理論 (Coupled-Mode Theory : CMT) やパワー (電力) 結合理論 (Coupled-Power Theory : CPT) の開発が進められている。

CMT では、クロストークの統計平均を算出するために数多くのサンプルについてシミュレーションを繰り返す必要があるが、CPT では、不規則揺らぎの統計的性質が理論に組み込まれているため、ただ 1 回のシミュレーションで平均クロストークを算出できる。なお、CPT 解析では、パワー (電力) 結合係数 (Power-Coupling Coefficient : PCC) をあらかじめ定めておく必要があり、曲げやねじれのある MCF のクロストーク解析のための局所 PCC が、指数型、ガウス型、三角型の自己相関関数に基づいて具体的に導出されている⁵⁾。

■参考文献

- 1) 小柴正則：“光導波路・光回路の解析技術,” 信学誌, vol.82, no.9, pp.947-955, Sep. 1999.
- 2) 小柴正則：“有限要素法による光・マイクロ波導波路シミュレーション,” 信学誌, vol.83, no.11, pp.860-

865, Nov. 2000.

- 3) M. Koshiba : “Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method,” IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, no.4, pp.881-888, Apr. 2002.
- 4) 電気学会(編) : “計算電磁気学,” 培風館, 2003.
- 5) M. Koshiba, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo : “Multi-core design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory,” Opt. Express, accepted for publication.

■9 群-6 編-1 章

1-3 光ファイバの製法と特性

(執筆者：山内良三) [2011年10月 受領]

光ファイバの材料としてプラスチックなども使われるが、通信用光ファイバとして技術的にも産業的にも大きく伸長したのは、優れた伝送特性、機械特性を有する石英ガラスを主成分とする光ファイバ（以下、石英系ファイバ）である。

1-3-1 光ファイバの製法

図 3・1 に示すように、光ファイバの標準的な構造は、屈折率の高いコアを屈折率の低いクラッドで覆った円筒形状をしている。

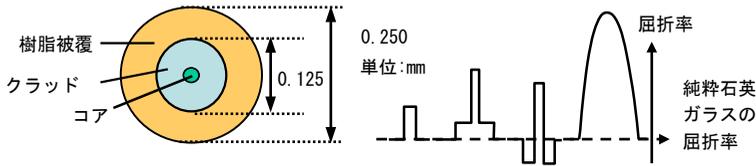


図 3・1 光ファイバの断面（左）と、光ファイバの半径方向屈折率分布の例（右）
 （屈折率分布は、左から順に、標準型シングルモードファイバ、分散シフトファイバ、
 ディプレスト・クラッドファイバ、グレーデッド型マルチモードファイバ）

石英系ファイバを作製するには、光ファイバと相似な断面構造を持つガラス棒（プリフォーム）を準備する。プリフォームの主要な製造法として、外付け法、プラズマ CVD 法、改良内付け法¹⁾ (MCVD : Modified Chemical Deposition, 図 3・2)、気相軸付け法²⁾ (VAD 法 : Vapor-Phase Axial Deposition, 図 3・3) が知られている。特に、VAD 法は、日本で発明、確立された製法であり、世界で使われる光ファイバの半数近くを製造している³⁾。

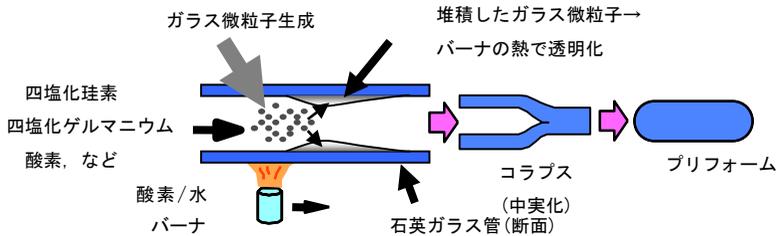


図 3・2 MCVD 法によるプリフォームの作製

いずれの製法も気相反応を基礎として、珪素やゲルマニウムのハロゲン化物を酸化することにより高純度の石英系ガラスを得る。気相法の採用により、伝送損失を生じる鉄や銅など遷移金属の混入を危惧する必要がほとんどないので、プリフォーム作製工程では、ガラスへの水 (OH 基) の混入を防ぐことに多くの注意が払われる。

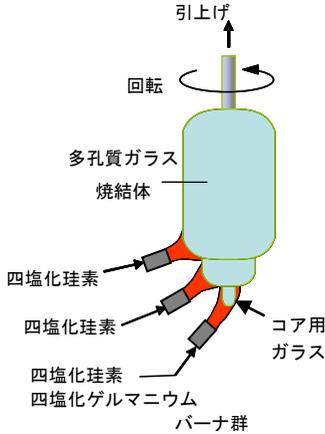


図 3・3 気相軸付け法 (VAD 法) によるプリフォームの作製

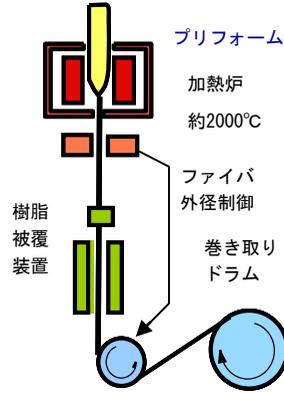


図 3・4 光ファイバの線引き

標準的な光ファイバでは、コア部に酸化ゲルマニウムを添加して屈折率分布が形成される。逆に、クラッドにフッ素を添加して屈折率を下げ、コアに純粋石英ガラスを用いたファイバでは、0.15 dB/km 以下の損失が報告されている⁴⁾。

完成したプリフォームは端部から加熱され、所定の外径にまで引き伸ばされて光ファイバとなる (図 3・4)⁵⁾。この工程を線引きと呼ぶ。

ガラスは脆性材料であり、微小な表面傷が破断原因となることがある。これを防ぐため、光ファイバ線引き工程で樹脂を連続的に被覆し、更に、十分な機械的強度があることを確認するため、全長にわたって引っ張り試験 (スクリーニング試験) を行う⁶⁾。

1-3-2 光ファイバの特性

光ファイバは、伝搬可能なモードの数によりシングルモードファイバ、マルチモードファイバに分けられる。厳密には、シングルモードファイバには縮退した 2 つの偏波モードが存在するが、通常の使用状況ではあまり意識されない⁶⁾⁷⁾。光ファイバの構造に異方性を与えることにより偏波間の結合を抑制した偏波保持ファイバも作製されている⁵⁾。

石英系ファイバの伝送損失は、主として、ガラスの固有損失であるレイリー散乱と赤外吸収により決定され、波長 1200~1650 nm において 0.4 dB/km 以下が達成されている。1970 年代には多くのマルチモードファイバが光通信に使用されたが、この波長帯で発光する半導体レーザの進歩と並行して、低損失シングルモードファイバを安定に作製できる製造法が確立し、また、コア径の細いファイバを低損失で接続できる融着接続機やコネクタが開発されたため、長距離大容量伝送から FTTH (Fiber-To-The-Home) までシングルモードファイバが広く使われるようになった。通信用光ファイバの 90% 以上がシングルモードファイバであり、マルチモードファイバは、データセンタやコンピュータ周辺の短距離通信で使われることが多い。表 3・1 に各種石英系ファイバの典型的な寸法、伝送特性、光学特性を示す。

表 3・1 石英系光ファイバの特性 (典型的な値)

項目	標準型シングルモードファイバ ^(*)	1.55 μm 分散シフトファイバ ^(*)	グレーデッド型マルチモードファイバ
コア径 [μm]	9 程度	15 程度	50 または 62.5
クラッド径 [μm]	125	125	125
コア・クラッド 相対屈折率差 [%]	約 0.35	ピークで 1.0 程度 屈折率分布は複雑	1 % (50 μm 型) 2 % (62.5 μm 型)
樹脂被覆径 [μm]	250	250	250
伝送損失 [dB/km] (測定波長)	0.35 (1.31 μm) 0.20 (1.55 μm)	0.21 (1.55 μm)	0.5 (0.85 μm)
波長分散 [ps/km/nm] (測定波長)	2 程度 (1.31 μm) 18 程度 (1.55 μm)	± 2 以内 (1.55 μm)	—
モードフィールド 径 [μm]	9 程度 (1.3 μm) 11 程度 (1.55 μm)	8 程度 (1.55 μm)	—

(*)1) ITU-T (国際電気通信連合・電気通信標準化部門) では、残留 OH 基損失や、2 次モードのカットオフ波長、波長分散、曲げ損失許容値などを規定したより細かい標準化が行われている⁹⁾。

■参考文献

- 1) 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 held in Kyoto, pp.6・40-6・45, Jul. 1974.
- 2) 伊澤, 宮下, 塙 : "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. 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, Apr. 1982.
- 3) 桑原一也 : "単一モードファイバの低損失化技術," 電子情報通信学会誌, vol.91, no.8, pp.678-682, 2008.
- 4) 山内良三 : "光ファイバとその材料," 先端材料シリーズ「光エレクトロニクス」, 裳華房, 日本材料科学会(編), 第 3 章, pp.72-122, 2000.
- 5) Recommendation ITU-T G.652 (2009) : "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, Geneva.
(このほか, G.651.1 (マルチモードファイバ), G.657 (曲げ損失低減シングルモードファイバ) など, 6 種のファイバが勧告化されている)
- 6) 末松安晴, 伊賀健一 : "光ファイバ通信入門 (改訂 4 版)," オーム社, 2006.
- 7) 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.

■9群-6編-1章

1-4 ホーリーファイバ

(執筆著：官 寧) [2011年10月受領]

ホーリーファイバ (HF : Holey Fiber) は図 4・1 のようにコアの周りに長さ方向に均一な空孔アレイが形成されている光ファイバの総称であり、構造によって、フォトニック結晶ファイバ (PCF : Photonic Crystal Fiber)、微細構造ファイバ (MOF : Microstructured Optical Fiber) またはフォトニックバンドギャップファイバ (PBGF : Photonic Band-Gap Fiber) とも呼ばれている。ホーリーファイバは動作原理により、等価的に屈折率が低いクラッドで光を閉じ込める全反射型と周期構造のクラッドによるブラッグ反射で光を閉じ込めるバンドギャップ型に大きく分類される。

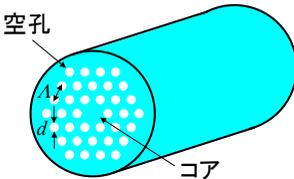


図 4・1 ホーリーファイバの構造

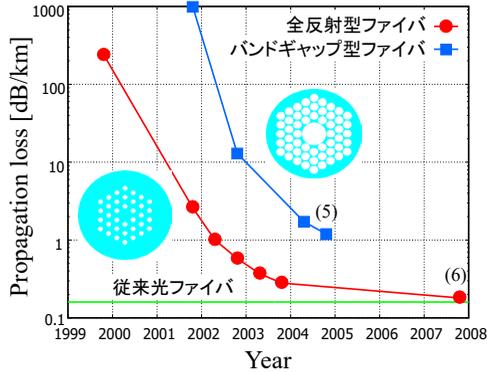


図 4・2 ホーリーファイバの伝搬損失

ホーリーファイバの研究は周期構造の誘電体におけるフォトニックバンドギャップ (Photonic Band-Gap) の予見¹⁾に触発されて開始されている。1996年にクラッドに空孔アレイが形成されている全反射型ファイバ²⁾、1998年にバンドギャップ型ファイバ³⁾が実証されてから、ホーリーファイバは理論究明とともに実用化検討が盛んに行われるようになった⁴⁾。

初期のホーリーファイバは伝送損失が非常に高かったが、今日では均質なファイバが安定的に作るできるようになり、図 4・2 が示すようにソリッド断面を持つ従来の光ファイバなみに伝送損失が下がってきている^{5,6)}。更に、ホーリーファイバは空孔部分も導波するので、レイリー散乱が小さく、潜在的に従来の光ファイバよりも伝送損失が小さくなると期待されている⁶⁾。

図 4・3 はホーリーファイバの伝搬ダイアグラムを示す。ただし、 A は空孔間ピッチ (従来ファイバではコア径)、 β は波数、 ω は角周波数、 c は光速を表す。図示のように、ホーリーファイバは従来の光ファイバより動作領域が格段に広い。更に、空孔が石英と屈折率の差が大きく配置にも自由度があることから、ホーリーファイバは (a) エンドレスシングルモード動作する、(b) 広帯域分散制御性を有する、(c) 大きい実効断面積 (A_{eff}) が実現可能である、(d) 極端に小さいコアが可能である、(e) コアとクラッドの間に大きな屈折率差が得られる、(f) 高い複

屈折または単一偏波が実現できる、(g) 空孔コア構造が可能である、などのユニークかつ有用な光学特性を豊富に持つ。ここで、図 4・1 のように空孔間ピッチ Λ 、空孔径 d の三角空孔格子の中心に位置する空孔のみを充填してコアを形成する標準ホーリーファイバの基本特性について述べる。

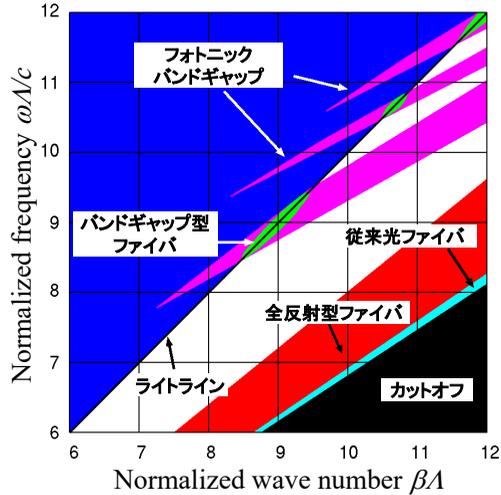


図 4・3 ホーリーファイバの伝搬ダイアグラム

従来の光ファイバは、次の規格化周波数 V の値でシングルモード動作が判別される⁷⁾：

$$V(\lambda) = \frac{2\pi D}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} < 2.405 \quad (4 \cdot 1)$$

ただし、 λ は波長、 D はコア径、 n_{co} 、 n_{cl} はそれぞれコアとクラッドの屈折率を表す。 n_{co} 、 n_{cl} が波長に大きく依存しないので、従来の光ファイバは波長が短くなるといずれマルチモードになる。

一方、ホーリーファイバのシングルモードは次の類似式で評価される⁸⁾：

$$V(\lambda) = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2(\lambda) - n_{cl}^2(\lambda)} < \pi \quad (4 \cdot 1)$$

ここで、 n_{cl} はクラッドの基本空間充填モード (Fundamental Space-Filling Mode) の等価屈折率であり、図 4・4 のように n_{co} とともに波長変化する。その結果、図 4・5 が示すように、空孔の配列が $d/\Lambda < 0.4$ なる条件のもとで、ホーリーファイバはエンドレスシングルモード動作する。

ホーリーファイバの屈折率分布は軸対象ではないが、空孔の配列が C_m ($m > 2$) の対称性 (角度 $2\pi/m$ の回転対称性及び π/m の鏡像面を有するパターン) を持つ場合、伝搬モードは軸対称分布で非縮退か、または非軸対称分布で 2 重縮退し⁹⁾、図 4・6 のように従来ファイバと同じように分類することができる。また、空孔の配置と大きさを工夫することにより、ファイバの分散特性を広い波長領域にわたって制御することができる¹⁰⁾。

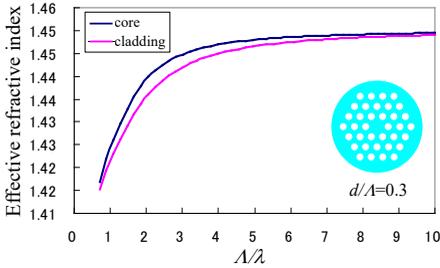


図 4・4 標準ホーリーファイバの等価屈折率

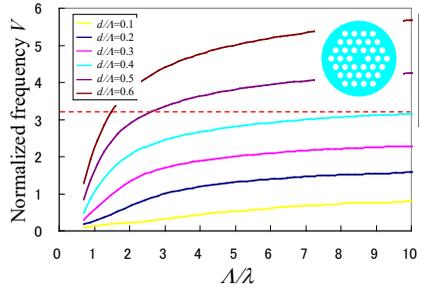


図 4・5 標準ホーリーファイバの規格化周波数

モード	HE ₁₁	TE ₀₁	HE ₂₁	TM ₀₁
LPモード	LP ₀₁	LP ₁₁		
縮退度	2	1	2	1
電界分布				

図 4・6 ホーリーファイバのモード分類

分類	全反射型					フォトニックバンドギャップ型	
	標準	空孔アシスト	偏波保持	高非線形	高NA	空気コア	空孔コア
サブ分類							
主な応用	<ul style="list-style-type: none"> 広帯域通信 分散補償 低非線形応用 	<ul style="list-style-type: none"> 低損失伝送 低曲げ損失 	<ul style="list-style-type: none"> 偏波依存部品 コヒーレント通信 	<ul style="list-style-type: none"> 白色光源 波長変換 	<ul style="list-style-type: none"> 光増幅 ファイバレーザ パワー伝送 	<ul style="list-style-type: none"> 低損失伝送 低非線形応用 センサ 	<ul style="list-style-type: none"> 広帯域伝送 分散補償 センサ

図 4・7 ホーリーファイバの分類と応用

ホーリーファイバは標準タイプのほか、図 4・7 が示すように多種多様な構造があり、様々な分野に応用することができる。特に、従来のコアを有する空孔アシストファイバ (Hole-Assisted

Fiber) は曲げ損失が小さく, FTTH (Fiber-To-The-Home) における屋内配線などでの使用が期待されている¹¹⁾.

■参考文献

- 1) E. Yablonovitch : “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.58, no.20, pp.2059-2062, 1987.
- 2) J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell, and D.M. Atkin : “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding,” *Opt. Lett.*, vol.21, no.19, pp.1547-1549, 1996.
- 3) J.C. Knight, J. Broeng, T.A. Birks, and P.St.J. Russell : “Photonic band gap guidance in optical fibers,” *Science*, vol.282, pp.1476-1478, 1998.
- 4) P.St.J. Russell : “Photonic-crystal fibers,” *J. Lightw. Technol.*, vol.24, no.12, pp.4729-4749, 2006.
- 5) P.J. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B.J. Mangan, D.P. Williams, L. Farr, M.W. Mason, A. Tomlinson, T.A. Birks, J.C. Knight, and P.St.J. Russell : “Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres,” *Opt. Express*, vol.13, no.1, pp.236-244, 2005.
- 6) K. Tajima : “Low loss PCF by reduction of hole surface imperfection,” *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, PD2.1, pp.75-76, Berlin, Germany, Sep. 2007.
- 7) A.W. Snyder and J.D. Love : “*Optical Waveguide Theory*,” Chapman and Hall, London, 1983.
- 8) N.A. Mortensen, J.R. Folkenberg, M.D. Nielsen, and K.P. Hansen : “Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers,” *Opt. Lett.*, vol.28, no.20, pp.1879-1881, 2003.
- 9) P.R. McIsaac : “Symmetry-induced modal characteristics of uniform waveguides—I: Summary of results,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-23, no.5, pp.421-429, 1975.
- 10) K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa, and E. Sasaoka : “Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion,” *Opt. Express*, vol.11, no.8, pp.843-852, 2003.
- 11) N. Guan, K. Izoe, 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, 2006.

■9群-6編-1章

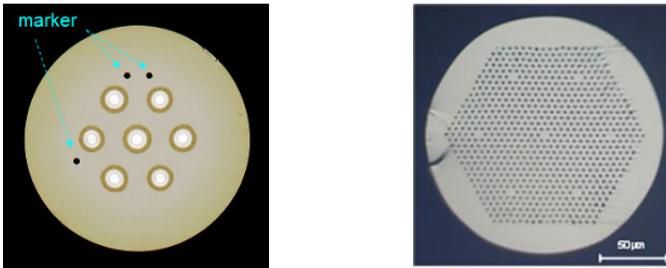
1-5 マルチコアファイバ

(執筆者：八木 健) [2011年10月 受領]

1-5-1 マルチコアファイバとは

増大する情報伝送容量を支える通信インフラとしての光ファイバケーブルは、基本的に1本のコアだけを持つ光ファイバが使用されている。一方で、光伝送技術の進展、特に波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)方式により、1コアあたりに数100波の信号が入力されるようになってきている。その結果、光ファイバのコアに入力される光パワーは数百mWを超えている。最も一般的に使用されているシングルモード光ファイバ(SMF: Single Mode Optical Fiber)のコア径は約10μmしかなく、この範囲に1.4Wを超える光パワーが集中するとコアが溶融すること(ファイバフュージ現象)¹⁾²⁾が知られており、1コア(シングルコア)の光ファイバで伝送できる伝送容量(パワー)の限界に近づいている。

このシングルコアでの伝送の限界を打破する概念として、マルチコアファイバ(MCF: Multi-Core Optical Fiber)が提案されている³⁾。マルチコアファイバは図5・1のように、1本の光ファイバを構成するクラッド内に複数のコアを配置したものである。ここで、イメージガイドやライトガイドも複数コアを有することから、マルチコアファイバの範疇に含めることも可能であるが、ここでは光通信用途に限定する。



(a) 充実型⁴⁾ (b) 空孔構造型⁵⁾

図5・1 マルチコアファイバの断面(例)

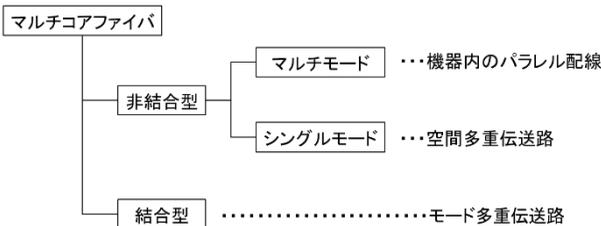


図5・2 マルチコアファイバの分類と主な用途

図5・2に機能を基準としたマルチコアファイバの種類を示す。それぞれのコアを伝播する光信号同士のクロストークを抑制し、それぞれのコアが独立した導波路して動作する非結合

型^{9,7)}と、コア間のモード結合を積極的に利用する結合型^{9,8)}に分類される。

非結合型は、更にコアがシングルモードとマルチモードに更に分けられる。シングルモード非結合型マルチコアファイバは、独立したコアによる伝送信号の多重化、すなわち空間分割多重 (SDM : Space Division Multiplexing) による長距離大容量伝送路に用いることが提案されている。例えば、7コアの非結合型マルチコアファイバ1本で、伝送容量 100 Tbit/s を超える SDM 伝送が達成されている^{9,10)}。また、マルチモード非結合型マルチコアファイバは、シングルコアのマルチモードファイバと同様に、比較的短距離の機器内配線に使用される。マルチコアにより、高速パラレル伝送配線の用途が考えられている¹¹⁾。一方で、結合型は、結合モードを利用したモード多重伝送に適用が検討されている。

それぞれのマルチコアファイバは、導波路を形成する構造で、標準シングルモードファイバと同じ充実型 (ソリッド型) (図 5・1(a)) と、ホーリーファイバやホールアシストファイバのような空孔構造型 (図 5・1(b)) で分類される。

1-5-2 マルチコアファイバの実現方法

(1) 設計論

マルチコアファイバにおいても、それぞれのコアについては通常の光ファイバと同様に伝送損失、波長分散、偏波モード分散、モードフィールド径などの光学特性の最適化、コア偏心、クラッド径に対する寸法精度が要求される。加えて、複数のコアが存在することで

- ① コア間の相互作用
- ② コア間隔、位置精度
- ③ コア密度あるいは実効コア数 (ファイバ断面積あたりのコア数)

が加わる。

コア間相互作用は、非結合型では最小に、結合型では適切なモード結合が生じるように設計される。非結合型においてコア間の相互作用 (クロストーク) は、コア間隔を広げることで抑制可能であるが、ファイバクラッド径の増大につながり、結果としてコア密度の低下を招く。そこで、コアの伝搬定数が異なるコア (異種コア) を組み合わせることで、コア間の相互作用を抑制する方法が提案されている。具体的には、コアの比屈折率差^{9,7)}あるいはコア径¹²⁾を変

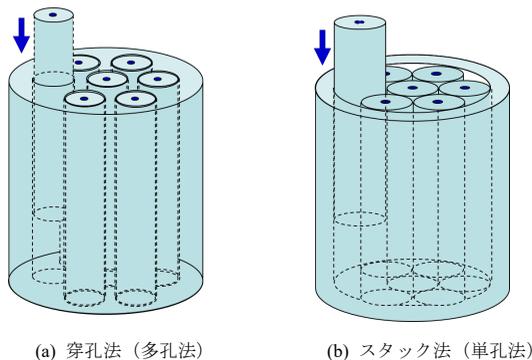


図 5・3 マルチコアファイバの作製方法

化させることで実現している。更に、トレンチ型屈折率分布^{4),13),14)}や空孔構造⁵⁾によってコアへの光パワーの閉じ込めを制御する手法も使われている。また、異種コアをより積極的に利用し、1本のファイバ内に正分散ファイバコアと負分散(分散補償)ファイバコアを配置し、1種類のファイバで分散マネージメント伝送路を実現する方法も提案されている¹⁵⁾。

一方で、結合型では同種コアを密に配置して、コア間干渉が起きるようにしている^{6),8)}。

(2) 作製方法

図5.3のように、(a)クラッドを形成するシリカガラス系ロッドに機械的に孔を開け、その孔にコアロッドを挿入する、あるいは(b)シリカガラス系チューブにコアロッドを束ねて挿入する、などの方法で作製したプリフォームを線引きすることで実現している。使用するコアロッドは、VAD法やMCVD法など、従来の光ファイバ作製方法で作製可能である。

■参考文献

- 1) R. Kashyap and K.J. Blow : "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers," *Electron. Lett.*, vol.24, no.1, pp.47-49, 1988.
- 2) 瀬尾浩司, 西村直也, 柴 啓明 : "光伝送路における耐ハイパワー特性の検討," 2003年信学ソ大, B-10-2, 2003.
- 3) 中沢正隆, 盛岡敏夫, 淡路祥成, 笹岡英資, 武笠和則, K.S. Abedin, 齊藤晋聖, 松尾昌一郎, 國分泰雄, 小柴正則, 宮崎哲弥, 福知 清, 森田逸郎, 鈴木正敏 : "我が国基礎・基盤研究の現状~NICT EXAT 研究会~, " *ITU ジャーナル*, vol.39, no.5, pp.3-25, 2009.
- 4) K. Imamura, K. Mukasa, and R. Sugizaki : "Trench Assisted Multi-Core Fiber with Large Aeff over 100 μm^2 and low attenuation loss," *Proc. ECOC 2011, Mo.1. LeCervin.1*, 2011.
- 5) K. Imamura, K. Mukasa, Y. Mimura, and T. Yagi : "Multi-core holey fibers for the long-distance (>100 km) ultra large capacity transmission," *Proc. OFC2009, OTuC3*, 2009.
- 6) Y. Kokubun and M. Koshiha : "Novel fibers for space/mode-division multiplexing-proposal of homogeneous and heterogeneous multi-core fibers," *Proc. EXAT2008, S1-3*, 2008.
- 7) M. Koshiha, K. Saitoh, and Y. Kokubun : "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," *IEICE Electronics Express*, vol.6, no.2, pp.98-103, 2009.
- 8) Y. Kokubun and M. Koshiha : "Nobel multi-core fibers for mode division multiplexing: proposal and design principle," *IEICE Electronics Express*, vol.6, no.8, pp.522-528, 2009.
- 9) J. Saguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe : "109 - Tb/s (7x97x172 - Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8 - km homogeneous multicore fiber," *Proc. OFC2011, PDPB6*, 2011.
- 10) B. Zhu, X. Liu, S. Chandrasekhar, T. Taunay, M. Fishteyn, M. Yan, J.M. Fini, E. Monberg, and F. Dimarcello : "112-Tb/s (7x160x107Gb/s) Space-Division Multiplexed DWDM Transmission over a 76.8-km Multicore Fiber," *Proc. ECOC2011, Tu.5.B.5*, 2011.
- 11) B.G. Lee, D.M. Kuchta, F.E. Doany, C.L. Schow, C. Baks, R. John, P. Pepeljugoski, T.F. Taunay, B. Zhu, M.F. Yan, G.E. Oulundsen, D.S. Vaidya, W. Luo, and N.Li : "120-Gb/s 100-m transmission in a single multicore multimode fiber containing six cores interfaced with a matching VCSEL array," *Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2010 IEEE, pp.223-224, 2010.
- 12) K. Imamura, K. Mukasa, Y. Mimura, and T. Yagi : "Investigation on Multi-Core Fibers with Large Aeff and Low Micro Bending Loss," *Proc. OFC2010, OWK6*, 2010.
- 13) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, and E. Sasaoka : "Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission," *Proc. OFC2011, PDPC2*, 2011.
- 14) K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiha : "Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber," *Proc. OFC2011, OWJ4*, 2011.
- 15) 姚 兵, 権名則文, 大藪和正, 福里宏史, 本郷晃史, 関谷晴彦 エジソン, 齋藤和也 : "分散マネージメントマルチコアファイバの開発," *信学技報, OFT2011-5*, pp.21-24, 2011.

■9群-6編-1章

1-6 石英系光導波路

(執筆者：河内正夫) [2011年10月 受領]

物理的・化学的に安定で透光性に優れた石英系ガラスを用いて平面基板上に光導波路を形成する試みは、集積光学の初期概念が1969年に提案¹⁾されて以来、数多く行われてきた。1970年代は、光が伝播するコア層の膜厚が0.5 μm程度以下の薄膜系の石英系光導波路が主な研究対象であったが、石英系光ファイバが通信用として実用化された1980年代以降は、光ファイバとの接続性を重視した厚膜系の石英系光導波路へと開発対象が移った²⁾³⁾。そして1990年代以降、石英系光導波路技術は、光信号の位相や干渉を精密に制御して有用な光回路機能を引き出すプレーナ光波回路(PLC: Planar Lightwave Circuit)技術として体系化され、光分岐、波長多重、光路切換などを行う実用的な導波路型光部品を提供手段として、今日の商用光ファイバ通信網を支えている⁴⁾。

石英系光導波路の作製は、石英系ガラス膜の堆積技術と微細加工技術とが基本になっている。石英系ガラス膜の堆積方法としては、FHD(Flame Hydrolysis Deposition)法やCVD(Chemical Vapor Deposition)法などがある。微細加工技術はLSI技術を利用したフォトリソグラフィを伴うRIE(Reactive Ion Etching)法が多用されている。代表例としてFHD法とRIE法との組合せによるSiO₂-GeO₂系単一モード光導波路の作製工程³⁾を図6・1に示した。

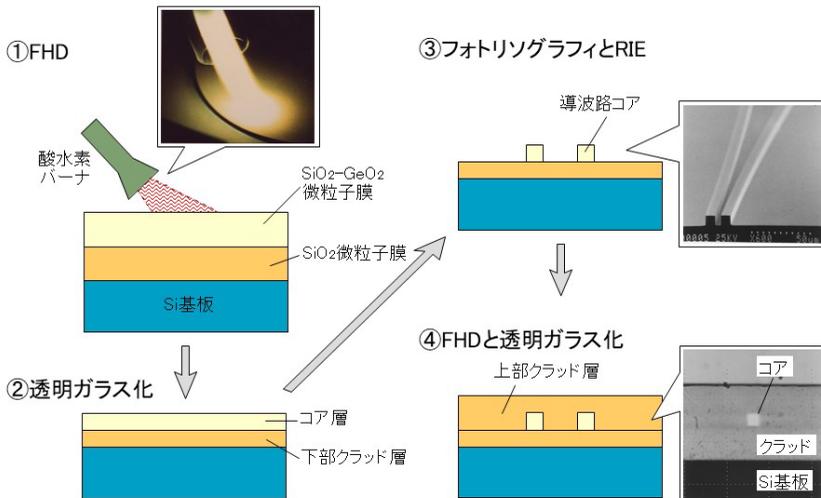


図6・1 石英系光導波路の作製工程

まず、ガラス形成原料(SiCl₄, GeCl₄)を気相状態にして酸水素バーナ中に送り込み、火炎中で加水分解して得られるガラス微粒子をシリコン基板(Siウエハ)上に堆積させる(図6・1①)。原料ガス中のGeCl₄濃度を変えることにより下部クラッド用ガラス微粒子とコア用ガラス微粒子の2層構造とする。続いて、ガラス微粒子膜を電気炉中で高温(1200~1300℃)に加熱して、

シリコン基板の上面を覆う透明な光導波膜とする (②). 次に, RIE によりコア層の不要部分を除去してリッジ状のコアを残す (③). 最後にコア部を覆うように上部クラッド層を再度 FHD で形成して, 埋込み構造の $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系単一モード光導波路ができあがる (④). 図 6・1 では省略したが, ガラスの軟化温度や熱膨張係数調整用の補助ドーパントとして P_2O_5 や B_2O_3 を (特に上部クラッド層に大目に) 添加することも一般的に行われている. シリコン基板の代わりに石英ガラス基板を用いる場合には下部クラッド層の形成を省略することも可能である.

表 6・1 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系光導波路の基本特性

導波路タイプ	0.25% Δ路	0.45% Δ路	0.75% Δ路	1.5% Δ路	2.5% Δ路
コア・クラッド間の比屈折率差(Δ)	0.25%	0.45%	0.75%	1.5%	2.5%
コア寸法	8×8 μm	7×7 μm	6×6 μm	4.5×4.5 μm	3.5×3.5 μm
許容曲り半径*	25mm	12mm	5mm	2mm	1mm
伝播損	<0.01 dB/cm	0.02 dB/cm	0.03 dB/cm	0.05 dB/cm	0.08 dB/cm
ファイバ接続損**	<0.1dB	0.1dB	0.5dB	1.8dB (0.4dB)★	3dB (0.5dB)★

* 90度曲り損失が0.1dB(at $\lambda=1.55\mu\text{m}$)を超えない最小半径

**通常の1.3μm帯分散単一モード光ファイバとの接続損失(屈折率整合剤使用時)

★ スポットサイズ変換部あり

シリコン基板上に作製した $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系単一モード光導波路の基本特性例を表 6・1 に示した. 現在, 目的とする PLC のパターン形状や光ファイバとの接続損失を考慮して, 数種類の光導波路が作り分けられている. コア・クラッド間の比屈折率差 Δ が 0.25 % や 0.45 % の光導波路は, 通常の単一モード光ファイバとの接続性を第一優先に設計された光導波路である. Δ が, 0.75 %, 1.5 %, 2.5 % と大きくなるにつれて, 伝播損と光ファイバ接続損が増大するが, 許容曲り半径は小さくなり, 光回路を基板上にコンパクトに配置するのに適している. Δ が 1.5 % や 2.5 % の光導波路では, スポットサイズ変換部を形成して, 光ファイバ接続損を 0.5 dB 程度に低減することも成功裡に行われている⁹⁾.

石英系光導波路の伝播損は, 通信波長である 1.3~1.6 μm 帯で 0.01~0.1 dB/cm のレベルと, 平面基板上の光導波路としては十分に低損失であり, 通常, 実用上の支障はないが, 同質材料から成る石英系光ファイバの伝播損に比べると数桁以上も大きい. その理由であるが, 光ファイバの場合は, 2000℃ もの高温での線引き工程を経ることによって, コア・クラッド界面が完全に平滑化されて光散乱損が極小になるのに対し, 平面基板上の光導波路では, 基板の融点や軟化点を超えての加熱や線引きを行うことは不可能であり, RIE 加工揺らぎなどによる光散乱損が残ってしまうためと考えられる.

石英系光導波路は, 明確な正方形のコア形状を有するため, ビーム伝播法や有限要素法などの理論解析と良好な一致を示し, 直線路, 曲り路, Y 形分岐路, X 形交差路, ギャップ路, スラブ路, 方向性結合器, 熱光学位相シフタ, などの基本的な光回路要素が実現されている. 熱光学位相シフタは, 光導波路の上部クラッド表面に薄膜ヒータ (幅 50 μm, 長さ 5 mm 程度)

を設けたものである。薄膜ヒータにより光導波路コア部の温度を局所的に上昇 ($\Delta T \sim 10^\circ\text{C}$) させ、石英系ガラスの熱光学効果を利用して光路長 (位相) の微調を可能にするもので、石英系光導波路にチューニングやスイッチングの機能を付与することができる。熱伝導性に優れたシリコン基板は、薄膜ヒータのヒートシンクとして有効に働く。

上述の光回路要素やユニットを平面基板上で、許容曲り半径を考慮しつつ、適切に配置することにより、これまでに、光スプリッタ、アレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed-Waveguide Grating)、熱光学スイッチ、などの多彩な PLC 製品群が実現されていて、コア系、メトロ系、アクセス系などの光通信網で広く実用に供されている⁴⁾。

実用上、石英系光導波路端に光ファイバの光軸をいかに合わせて固定するかが重要であり、あらかじめ用意した光ファイバアレイブロック (1~64 芯) を、紫外線硬化型接着剤を介して導波路端に固定する方法が用いられている。モニタ光を用いて最適接続位置を自動調芯し、0.1 dB 程度の過剰損で光ファイバアレイを接続し固定する装置が開発されている。接着剤の改善や接着部への水分の浸入を防ぐパッケージング構造の工夫などにより、電柱上などの屋外環境にも耐える長期信頼性が保証されている⁶⁾。

■参考文献

- 1) S.E. Miller: "Survey of integrated optics," IEEE J. Quantum Electronics, vol.8, no.2, pp.199-205, 1972.
- 2) T. Izawa, H. Mori, Y. Murakami, and N. Shimizu: "Deposited silica waveguide for integrated optical circuits," Appl. Phys. Lett., vol.38, no.7, pp.483-485, 1981.
- 3) M. Kawachi: "Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components," Optical and Quantum Electronics, vo.22, no.5, pp.391-416, 1990.
- 4) 河内正夫: "プレーナ光波回路技術の歩みと見果てぬ光集積回路の夢," 信学会和文論文誌 C, vol.J92-C, no.8, pp.360-370, 2009.
- 5) T. Mizuno, T. Kitoh, M. Itoh, T. Saida, T. Shibata, and Y. Hibino: "Optical spotsize converter using narrow laterally tapered waveguide for planar lightwave circuits," IEEE J. Lightwave Technol., vol.22, no.3, pp.833-839, 2004.
- 6) Y. Hibino, F. Hanawa, H. Nakagome, M. Ishii, and N. Takato: "High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits," IEEE J. Lightwave Technol., vol.13, no.8, pp.1728-1735, 1995.

■9 群-6 編-1 章

1-7 プラスチック光ファイバ

(執筆者：小池康博) [2013年5月 受領]

プラスチック光ファイバ (Plastic Optical Fiber : POF) は、コアクラッドにプラスチック材料を用いた柔軟性に優れた光ファイバで、ガラス製では実用に耐えない大口径径が可能である。LED 光源からのインコヒーレント光を高効率に取り込むことが可能で、各種光学素子と容易に結合できるため、端末部材や端末処理が簡便で安価なものとなる。一方、伝送損失はガラス製に比べて 2 桁程度高く、その使用は短距離通信に限定される。本節では、広帯域化が目覚ましい GI (Graded Index) 型 POF を中心に、POF の研究開発動向を概説する。

1-7-1 POF の広帯域化

光ファイバは、1 つの導波モードを有する SMF (Single Mode Fiber) と複数の導波モードが伝搬可能な MMF (Multimode Fiber) に大別される。通常、POF は MMF に分類される。MMF では、導波モードに対応する幾何光学的な伝搬経路が多数存在するため、モード間の伝送遅延 (モード分散) が伝送帯域を制限する主な要因となる。GI 型とすれば、コア内の屈折率分布によりモード分散が大幅に低減されるが (図 7・1 参照)、ギガビットをはるかに超える GI 型 POF が実現したのは、低分子ドーピングに基づく屈折率分布形成技術が確立されてからである¹⁾。一連の基礎研究によって、GI 型コア内部の屈折率不均一構造は光の波長に比べて十分に小さくなり、GI 型 POF の伝送損失は理論限界近くまで低減された^{2),3)} (図 7・2 参照)。

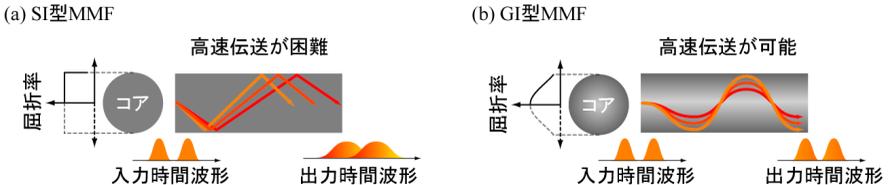


図 7・1 (a) SI 型 MMF、及び (b) GI 型 MMF におけるモード分散

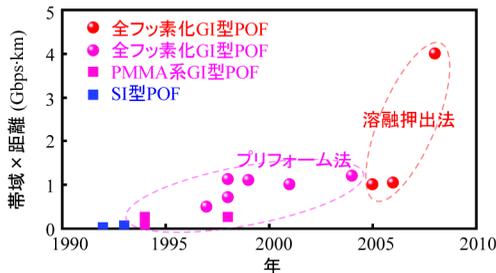


図 7・2 POF 広帯域化の歴史

2008 年には、後述する溶融押出法により作製された 100 m の GI 型 POF を用いた 40 Gbps の

信号伝送実験に成功している⁴⁾⁵⁾。一方、高速伝送が困難とされてきた SI 型 POF でも、種々の変調方式や電気分散補償による広帯域伝送が検討されており、50 m で 1 Gbps を超える伝送速度が報告されている⁶⁾。

1-7-2 POF の低損失化

POF の普及には、低損失化による更なる伝送距離の拡大が課題となる。POF の損失要因は、製造工程で生じる外的なものを除けば、分子振動吸収、電子遷移吸収とレイリー散乱である。ポリメタクリル酸メチル (PMMA) 系 POF の場合、分子内に多数存在する C-H (炭素-水素) 結合に由来する分子振動吸収が支配的となる。C-H 結合は他の結合に比べて伸縮振動の基本共鳴周波数が高く、可視光領域に低次の倍音 (5~7 倍音) 及びそれらと変角振動との結合音が存在する。正味の損失は、短波長側で顕著となる電子遷移吸収とレイリー散乱との重ね合わせとなるが、例えば低損失の“窓”となる 650 nm の波長では、それらの損失への寄与は非常に小さく、その損失理論限界値 (約 100 dB/km) の大半は C-H 結合由来の吸収である。したがって、水素原子を重水素原子やフッ素原子などへ置換すれば、可視光領域に現れる倍音吸収が高次化するため、大幅な低損失化が可能となる⁷⁾。全フッ素化ポリマーをコア母材とした GI 型 POF の場合、850 nm 及び 1310 nm の波長における損失は 20 dB/km 以下まで低減されている (図 7・3 参照)。

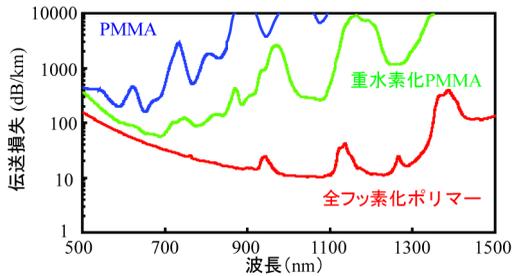


図 7・3 GI 型 POF の伝送損失スペクトル

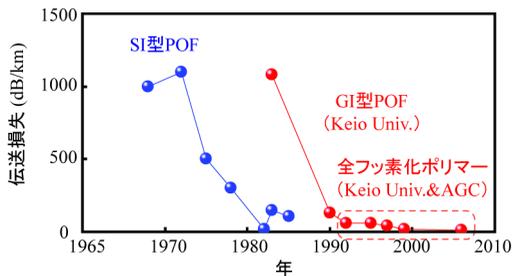


図 7・4 POF 低損失化の歴史

全フッ素化ポリマーは、PMMA や石英ガラスに比べて屈折率の波長依存性が小さいため、伝送帯域を制限する材料分散の小さい POF 母材である。GI 型 POF 母材とした場合、屈折率分布

形状の波長依存性も小さくなり、より広い波長範囲で広帯域特性が得られる特長を有している⁸⁾。

1-7-3 POFの量産技術開発

従来のGI型POFの製造は、コア母材用モノマーの重合過程でドーパント濃度分布（屈折率分布）を形成する必要があったため、その工程にプリフォームの熱延伸を要していた。このようなバッチ方式では、一度に生産可能な光ファイバ量に実用上の制限があった。最近、慶應義塾大学によってドーパント拡散溶融押出法が開発され、半永久的な連続生産を可能とするGI型POFの量産技術が確立された⁹⁾。溶融押出法では、高屈折率ドーパントを添加したコア材とクラッド材を別々に溶融して押し出し、加熱・拡散工程におけるドーパント分子の熱拡散により屈折率分布が形成される。屈折率分布形状は、使用材料の溶融物性やドーパント拡散条件による高精度な制御が可能である。

1-7-3 おわりに

POFは、取り扱いやすさと安全性を備えた民生用途に適し、電磁ノイズの影響を受けずに高速伝送が可能な伝送媒体である。近年、SI型POFによる車載ネットワークがBMWなどの欧州車に搭載されているほか、GI型POFによるギガビットネットワークの建物内への敷設例も増えてきている¹⁰⁾。GI型の課題とされてきた耐熱性に関しても、ガラス転移温度の高いポリマーや可塑効果の小さいドーパントに関する研究が進んでおり、家庭内、オフィス内、乗り物内で大容量のデータ伝送が必要とされる近い将来、GI型POFがその伝送媒体の有力な候補となることが予測される。

■参考文献

- 1) Y. Koike: "Optical resin materials with distributed refractive index, process for producing the materials, and optical conductors using the materials," U.S. Patent 5 541 247; JP Patent 3 332 922; EU Patent 0 566 744; KR Patent 170 358; CA Patent 2 098 604; originally filed in 1991.
- 2) Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei: "High-bandwidth graded-index polymer optical fiber," J. Lightwave Technol., vol.13, no.7, pp.1475-1489, Jul. 1995.
- 3) Y. Koike, S. Matsuoka, and H.E. Bair: "Origin of excess light scattering in poly (methyl methacrylate) glasses," Macromolecules, vol.25, no.18, pp.4807-4815, 1992.
- 4) A. Polley and S.E. Ralph: "100 m, 40 Gb/s plastic optical fiber link," Proc. OFC/NFOEC, OWB2, Feb. 2008.
- 5) S.R. Nuccio, L. Christen, X. Wu, S. Khaleghi, O. Yilmaz, A.E. Willner, and Y. Koike: "Transmission of 40 Gb/s DPSK and OOK at 1.55 μ m through 100 m of plastic optical fiber," Proc. ECOC, We. 2. A. 4, Sep. 2008.
- 6) I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, and S. Randel: "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project POF-ALL," IEEE Commun. Mag., vol.47, no.8, pp.58-68, Aug. 2009.
- 7) W. Groh: "Overtone absorption in macromolecules for polymer optical fibers," Makromol. Chem., vol.189, no.12, pp.2861-2874, Dec. 1988.
- 8) Y. Koike and K. Koike: "Progress in Low-Loss and High-Bandwidth Plastic Optical Fibers," J. Pol. Sci., vol.B 49, no.1, pp.2-17, Jan. 2011.
- 9) M. Asai, R. Hirose, A. Kondo, and Y. Koike: "High-bandwidth graded-index plastic optical fiber by the dopant diffusion coextrusion process," J. Lightwave Technol., vol.25, no.10, pp.3062-3067, Oct. 2007.
- 10) 小池康博, 石樽崇明: "プラスチック光ファイバの種類と特性," "The POF", POF コンソーシアム(編), pp.2-26, 共立出版, 2004.

謝辞

本執筆内容の一部は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものである。

■9 群-6 編-1 章

1-8 ポリマー光導波路

■9 群-6 編-1 章

1-9 光接続技術

(執筆者：三田地成幸) [2011 年 10 月 受領]

光接続技術の研究開発は 1970 年代から光ファイバの研究開発とほぼ並行して行われてきた。光ファイバ同士の接続には永久接続/半永久接続 (スプライス) と着脱可能な光コネクタ接続がある。光ファイバの永久接続には、①一対のファイバ端面をアーク放電などにより相互に熱溶融して接続する融着接続、②一対のファイバを突き合わせ、突き合わせ部に屈折率整合剤を入れ、光ファイバを機械的に固定するメカニカル接続、③一対の光ファイバを突き合わせ、透明な接着剤によって固定する突き合わせ接着接続などがある。着脱可能な光コネクタ接続は単心光コネクタ、2 心光コネクタ、多心光コネクタ接続に分けられる。

更に、1990 年代に入ると平面光波回路 (PLC) が本格実用化され、モジュール実装のための光ファイバと PLC 間接続及び PLC との多心光ファイバ接続、2000 年代に入ると PLC と PLC 間の直接接続などにより多くの多機能光モジュールが開発されフォトニックネットワークに導入されている。

1-9-1 単心光コネクタ接続

光コネクタ開発初期には、まず高性能、高信頼性が追及され、単一モード光ファイバの低接続損失や低反射特性の実現のために、光接続特有のサブミクロンレベルの精密な光軸合せと加工精度が要求された。日本では 1979 年頃にネジ締結方式の FC 型光コネクタ (Fiber Transmission System Optical Connector; 平面研磨型で屈折率整合剤使用) が開発され F-400M システムに、1986 年には FC-PC 型 (屈折率整合剤フリーの光ファイバ端面直接接触の Physical Contact 型) が完成し F-1.6G にと、それぞれ日本の基幹回線網に導入された¹⁾。一方、米国ではバヨネット方式と呼ばれる回転締結機構を有する ST 型光コネクタが開発され通信用として広く使われていた。その後、日本では FC コネクタに替わるプッシュプル締結方式 (直線的に押し引きするだけの回転機構を伴わない PC 接続方式) を採用した SC 型光コネクタ (Single fiber coupling optical Connector) の開発により、世界のシェアの 7~8 割を占める日本が誇る世界のデファクトスタンダード技術が確立した²⁾。この SC 型光コネクタの開発技術においてサブミクロンの加工精度と繰り返し着脱に耐える高い機械強度を保つための材料探索において、日本はジルコニアフェルールの開発とプラスチック金型成形技術によるプラスチック製コネクタハウジング開発において光コネクタの領域で世界を席捲するに至っている。FC コネクタや ST コネクタに比べて SC コネクタの優れている点は、回転機構を伴わないことから、2 心のデータコムなどの光コネクタ接続において決定的な技術的優位性を有していた点にある。

FC コネクタ、SC コネクタ共に、①光ファイバを固定しサブミクロンの精度で光軸合せできるように微細孔が正確に中心に開けられた精密フェルール、②2 本のフェルールの割りスリーブ内でサブミクロンの精度で整列し一定応圧力で PC (屈折率整合剤フリーで直接接触) させる接続法、③プラグ及びアダプタ内でフェルールとスリーブがフロートする 2 重重合構造で外力の影響避けられる構造、から構成されている。光通信網の進展に伴う伝送容量の増大に合わせ、より低反射で損失のばらつきを少なくするために、フェルール端面を凸球面状に研磨し、規格値の端面パラメータを遵守すれば互いに一定応圧力で直接接触させることで、接続損失は

0.5 dB 以下（平均 0.1 dB 以下）、研磨技術の進展で現在は反射戻り光を 10 万分の 1（50 dB）以下に抑えることも可能となっている（図 9・1 参照）。

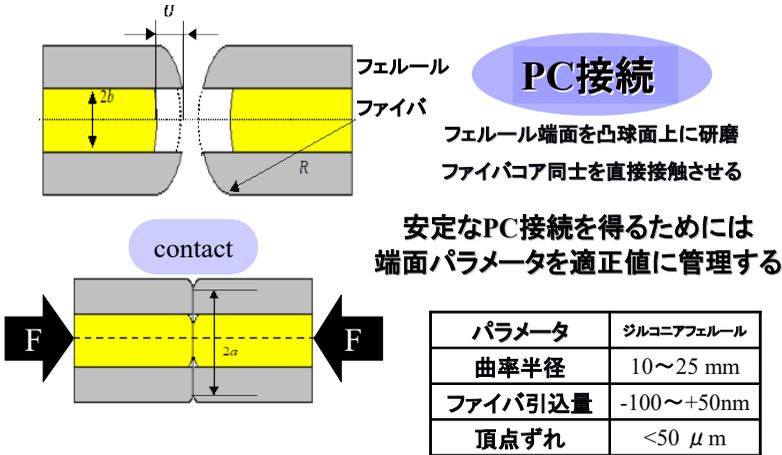


図 9・1 光コネクタにおける PC 接続原理

1-9-2 光ケーブル接続用多心光コネクタ接続

光ケーブル接続においては、多心光ファイバケーブルのテープ心線（4～12 心）同士が一括で接続可能な MT（Mechanically Transferable）コネクタが開発されている³⁾。MT コネクタは樹脂により一体成形されたフェルールにテープ心線を固定し、2 本のガイドピンで整列する方式である。アクセス系の多心ケーブル間接続や、多心ケーブルの通信事業者ビル内引き込み部分の光配線盤への接続に広く用いられている。更に、MT フェルールをプッシュオン型ハウジングに納めた MPO 型光コネクタも開発されている。

1-9-3 高密度光接続

光通信網の進展に合わせた伝送装置や交換装置などの高機能化に伴い、通信事業者ビル内のデジタルシステム装置間接続用の光コネクタ開発が行われた。初期の DS 型コネクタ（Optical Fiber Connector for Digital System Equipment）に引き続いて高密度実装用として MU 型光コネクタ（Miniature-Unit Coupling Optical Fiber Connector）が開発された。従来の FC, SC, ST, DS 型光コネクタが 2.5 mmφ 外径の円筒形フェルールを用いているのに対し、MU 型光コネクタでは 1.25 mmφ の細径フェルールを採用し、接続密度を従来の 4 倍に向上させている。また、自己保持構造による高密度接続を可能とする装置用バックプレーンタイプの光接続方式を開発し、高密度実装用 MU 型光コネクタシステムとして世界標準に制定されている⁴⁾。米国でも MU 型光コネクタより少し遅れて、LC コネクタという 1.25 mmφ のフェルールを採用した低コスト/高密度実装用の光コネクタが開発され、両者が高密度実装用の光コネクタ領域で世界のトップシェア争いを演じた。ヨーロッパでもこれに追随しようと F-3000, LX.5 といった LC コネクタ同様のレバーロック解除タイプの細系フェルール光コネクタが開発されている。図 9・2 に標準

化された単心光コネクタの代表例と、多心光ファイバ接続用の MT 型及び MPO 型光ケーブル用コネクタを併せて示す。

米国発の LC 型光コネクタ

日本発の世界標準に制定された光コネクタ
(左から SC 型, DS 型, MU 型, MT 型, MPO 型)

図 9・2 世界標準に制定された光コネクタ

1-9-4 FTTH 推進に向けた光コネクタ改良技術と信頼性維持

1990 年代半ばには、FTTH（ファイバトゥザホーム）推進のための低コスト化に向けた光コネクタ改良と信頼性維持のための技術開発が盛んに行われた。(1)部品数の低減による構造の簡易化, (2)部材費, アセンブリーコストの低減, が主なものであった⁵⁾。更に, 2000 年代になって本格化する FTTH 進展に伴う現場施工法のスキルレス化に向けた, (3)現場組立用光コネクタ改良技術開発, (4)ハイパワー耐性, (5)屋外環境を考慮した信頼性維持, などが代表的な光コネクタ改良技術開発である。

(1) 部品数の低減による構造の簡易化

装置の内部側ではケーブルに外力が加わらない点に着目し, 部品点数を 13 部品から 4 部品に低減した SC 型簡易レセプタクルと MU 型簡易レセプタクルが開発され, FTTH サービスを提供する光配線盤 (1 架当たり 4000 心終端) に適用され, 経済的な光回線サービス実現に貢献している⁶⁾ (図 9・3 参照)。



図 9・3 4000 心 FTM (MU 型簡易レセプタクルを用いた 1 架 4000 心を収容する光ファイバ終端架)

(2) 部材費、アセンブリーコストの低減

光コネクタの構成部品のなかで最も高価なフェルールの低コスト化とアセンブリーコストの低減を目指し、結晶化ガラスフェルールが開発された。高コストな側面研磨加工を要するジルコニアフェルールに比較し、光ファイバと同様な線引き手法によるサブミクロン精度の側面研磨レスの安価な高精度フェルールの大量生産が可能で、光ファイバと同種のガラス組成材料を一部結晶化したものであるため、光コネクタ接続端面の研磨工程が簡略化でき、アセンブリーの低コスト化に大きなポテンシャルを有している。金属ドープ光ファイバを用いた SC 型光固定減衰器のような長尺フェルール作製にも適する⁷⁾。

あらかじめフェルール、コイルばね、ストップリングを一体化した SC 型プリアッセフェルールを用いる、人手による組立てと検査コスト低減を目指した SC コネクタ組立て・検査全自動化システムも開発された。

(3) 現場組立て用光コネクタ改良技術開発

急速な FTTH 進展に対応し、2000 年代中ごろからは大量光開通工事に向けた現場組立て用光コネクタ改良技術開発が盛んに行われている。ポイントとなる技術要素は、①各ユーザ宅に合わせた現場組立て、②架空光クロージャ内の融着接続を避けた光ファイバ接続のコネクタ化、③余長処理レス、④研磨工程フリー、⑤ケーブル外被除去工程フリー、⑥屈折率整合剤フリー、⑦工事人の手腕に依存しない光接続を実現できるスキルレス化、⑧D.I.Y 感覚での宅内光ファイバ配線工事、などである。それぞれの技術には一長一短があるため各社各様の技術開発がなされ百花繚乱である。

光ファイバコードを現場で簡単に組立可能なメカニカルスプライス型光コネクタ、ユーザ宅の軒下や宅内にてドロップケーブルとインドアケーブルの外被をコネクタに直接把持することが可能で心線の余長収納の必要のない現場組立て単心のケーブル外被把持型コネクタ、光コネクタ内での光ファイバ座屈による弾性力で PC 接続する屈折率整合剤を不要化した簡易組立光コネクタ、端面研磨済内蔵光ファイバによる屈折率整合剤フリーの簡易組立て光コネクタ、アナログ映像サービス用反射減衰量 60dB 以上の光ファイバ内蔵フェルールユニットによる融着接続技術使用の低反射、低損失現地組立コネクタ、小型化した配管配線用コネクタ及び直角曲げコネクタ、光カールコードを用いた配管配線と住宅内光配線工事のスキルレス化、「曲げ」「折り」「結び」が自在な光ファイバコードによる D.I.Y 感覚での宅内光ファイバ配線工事などが次々と開発されている。

(4) ハイパワー耐性

WDM 伝送での光ファイバ増幅器使用やハイパワー通光試験に向けたハイパワー耐用の信頼性確保のための部品、素材、コネクタ清掃などの操作技術の見直しチェックも行われている。最近では、光ブロードバンドサービスの普及に伴い、インターネット、IP 電話、映像配信サービスの需要も急速に拡大し、それに対応した設備の増加に伴い光アクセス設備では特異的な故障の発生が報告されている。光パワーの大きい光接続部の光コネクタにおいては、コネクタ端面に付着した汚れが端面溶融の原因とされている。光通信ネットワークにおける伝送装置などにおいて、分布ラマン増幅システムに代表されるように近年大きなパワーの光信号が取り扱われるようになっており、光コネクタや光受動部品の耐パワー特性に関する関心が高まっている。単心系光コネクタとして、伝送装置などに幅広く使われている SC 型光コネクタや MU 型光コネクタなどの PC 接続型の光コネクタ (PC コネクタ) について、1W レベルのハイパワー信号

に対して PC 光コネクタを使用する場合、①接続損失 0.25 dB 以下 (IEC 61755-1 Grade B)、②反射減衰量 45 dB 以上 (同 Grade 2)、③接続前に必ず清掃、の 3 点が最低条件となる⁸⁾。

(5) 信頼性維持

(a) 屋外環境暴露試験

1997 年ころより、将来の FTTH 進展に向けた高温高湿環境下や極寒での信頼性確認必要性の認識から、屋外環境や従来から一層厳しい環境下での使用を想定した光コネクタの信頼性維持向上のための試験として、沖縄県宮古島 (最高温度 50°C) や北海道土士幌 (最低温度 -25°C) での、光コネクタ屋外環境暴露試験が行われていて現在も継続中である。十数年経過後でもフェルール端面形状や光学特性に大きな劣化や変化は見られず、SC 型及び MU 型単心系光コネクタの良好な対環境特性が確認されている⁹⁾。

(b) 屈折率整合剤使用時の接続間隙の影響

FTTH の普及により、光アクセスシステムにおいて、MT コネクタやメカニカルスプライスなどを用いた光接続点が増加している。この際に光ファイバ心線接続部にエアギャップが存在すると、光コネクタ端面における多重反射や損失が発生し通信品質の劣化が生じる。また、WDM システムの導入により、光コネクタ接続部の光パワー密度は波長多重数に応じて高くなり、接続点端面の影響は通信品質に大きく影響すると考えられる。現場組立コネクタを用いて、カット不良端面を使用した光ファイバ接続部の性能劣化の分析も行われていて、カット不良端面による大きな損失増加は、空気と整合剤の混在状態によって引き起こされている可能性が指摘されている。また、接続点に空気間隙がある場合、反射減衰量は広範囲な波長で著しく変化し、符号誤り率劣化が発生すると推測されている。反射量の大きい接続点は GE-PON システムに影響を与えと言えよう。屈折率整合剤使用の光接続においては、光ファイバカット端面状態への細心の注意が必要である。

1-9-5 超多心光接続

ルータやサーバなどの装置内、装置間における高速光配線の普及により、多チャンネル光モジュールの需要が拡大している。これら装置の大容量化に伴い、多チャンネル光モジュールには、チャンネル当たり 10 Gbps 超の高帯域化、ボードへの高密度実装を目指した超多心光接続用コネクタの開発が盛んに行われている。フェルールレスで光ファイバの座屈力を押圧力にして PC 接続する FPC (Fiber Physical Contact) コネクタが経済的で高密度光接続ように提案・開発された。ガイドホール内でファイバを突き当てることによりアライメント及びフィジカルコンタクトが得られる構造になっている¹⁰⁾。このコネクタを用いることにより多量のファイバを簡単に接続することが可能である。装置インタフェース用 16 心 FPC (Fiber PC) コネクタや、MU 嵌合構造を適用したシャッタ付 16 心 FPC コネクタ、光バックプレーン用プラグイン Fiber PC 光コネクタを用いたフルメッシュ光ファイバ配線などの開発であるが、これらの技術を利用し、現在は通常のシングルモードファイバが使用可能な SF (Sagged Fiber) 光コネクタが多チャンネル光モジュールの開発に適用されている¹¹⁾。高密度 60 心 MT 型コネクタ、光インターコネクション用 MM 光ファイバを適用した 72 心 MPO コネクタ、100 心一括超高密度両端コネクタ付光ケーブルなども開発されている。光ファイバ配線を含む光ボード実装の経済化、高集積化を図るファイバマネージメント技術を、128 チャンネル AWG (アレイ導波路格子) といった超多チャンネル型光モジュールを含むボード実装に適用可能にするための斜め接続を用い

た 32 心，64 心型 PLC コネクタの開発も行われている¹²⁾。

1-9-6 マルチモジュール集積

幾つかの機能性光モジュールからなる光ボードは更に複雑な機能を実現することができ来る。機能性モジュールには光スイッチや V-AWG などが含まれる。しかし、従来の方法では各モジュールからの光ファイバを融着接続する必要があり、更に、余長処理のためファイバを引き回すスペースと作業が必須であったため更なる集積化には限界があった一つはピグテールファイバに代わるフレキシブルファイバシートで、2 枚の接着性シートの中にファイバが挟まれた構成になっており曲げや交差などのパターンを簡単に作製することができる。FPC コネクタを用いることにより多量のファイバを簡単に接続することが可能となる。図 9・4 はこれらの技術を使って作製した光スイッチボードで、スイッチとカプラ間で 128 個所のクロスした接続が簡単に実現されており、これからの光ボードを作製する有力な技術として期待される¹³⁾。フォトニックネットワークの波長ルーティング技術や光パケットルーティング技術の心臓部となる装置の中枢部に適用されよう。

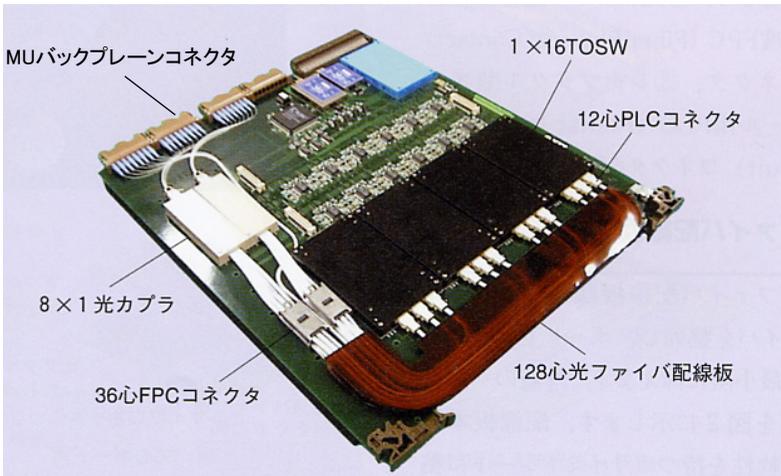


図 9・4 8×16 光スイッチボード (NTT 技術ジャーナル 2003.10 号.p.26 より)

1-9-7 光デバイス間直接光接続

従来はそれぞれ個別のモジュールをファイバ融着で接続していたためファイバの取り回し作業やファイバ収納スペースが必要であり、モジュールサイズは大きくアSEMBリーコストが高い原因であったが、複数の PLC を直接接続するマルチチップ集積技術によってその課題を解決することができる。異なる機能を持つ PLC チップを組み合わせるマルチチップ集積 PLC 技術を用いた複合機能デバイスが開発されている。本技術は実装コストを大きく増大させずに多機能を持つ複合機能デバイスを実現できる。PLC ハイブリッド集積技術を用いた 10 Gb/s×4 チャンネル WDM 送信・受信モジュール、PLC チップ直接接続による 1×8 スプリッター/WDM フ

イルタアレイハイブリッド集積モジュール、DFB-LD アレイと $\Delta 1.5\%$ 石英系 PLC をバットジョイントしたハイブリッド集積モジュール、PLC と $\text{LiNbO}_3(\text{LN})$ 高速光変調器アレイとを端面接続により集積化した高機能かつ小型の各種光変調モジュールが盛んに開発され、FSK 変調、多値変調器、OFDM 変調器、EO 変調型 160 Gb/s OTDM-MUX モジュール、小型 RZ-DQPSK 変調器、64 QAM 変調器、OTDM-MUX モジュール、CS-RZ 変調モジュールなどが実現されている¹⁴⁾。

1-9-8 光接続技術の将来動向

(1) マルチコアファイバ間接続

今後、空間多重による伝送容量拡大の可能性を有するマルチコアファイバ間の接続技術においても、融着接続とコネクタ接続両方で低損失接続、低反射接続技術の開発が重要となろう。この実現にはマルチコアファイバの構造の標準化とコアピッチばらつき、コア間角度ばらつきなどの構造パラメータを如何に安定にするかにも依存する。

(2) ホーリーファイバ接続

ホーリーファイバ (HF) は、コアと空孔クラッド部の屈折率差が大きい為、優れた曲げ損失特性を持っている。HF を用いた宅内配線向け各種光コードの検討が活発になっている。現地付けコネクタによる接続の要求に応えるため、固形状の屈折率整合剤を使用したり、HF 先端部の空孔を高強度レーザにより封止したり、硬化型屈折率整合材を用いたりして、電線コードのようにフレキシブルに扱えるホーリーファイバ技術の開発が行われている。

(3) 光インターコネクション

光インターコネクション実現に向けて、ピックアップ用オンボードコネクタ、光導波路型スルーホールを有する 4-ch \times 10 Gb/s チップ間光インターコネクション用パッケージ、高分子導波路によるブラグブル 10 Gbps \times 4 ch 光導波路モジュール、光 I/O 内蔵システム LSI モジュールの光 I/O である PETIT (Photonics/Electronic Tied InTeface) コネクタ接続構成などが検討されている。また、ボードレベル光インターコネクションを実現するための自己形成光導波路による光素子と光線路の接続技術も研究開発中で、このような素子間インタフェース光接続は今後更に研究開発が盛んとなろう。

(4) 新たな光接続技術

新たな動向として、フェムト秒レーザを用いた石英系平面型光波回路内での導波路接続や、3 次元導波路インターコネクションを低損失に形成するといった試みも始まっている。フォトニック結晶デバイスの研究が進展すれば、従来の光ファイバとの接続も今後重要な光接続課題となってこよう。

■参考文献

- 1) N. Suzuki, M. Saruwatari, and M. Okuyama : "Low insertion- and high return-loss optical connectors with spherically convex-polished end," Electron. Lett., vol.22, no.2, pp.110-112, 1986.
- 2) E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, and T. Shintaku : "SC-type single-mode optical fiber connectors," IEEE J. Lightwave technol., vol.7, no.11, pp.1689-1696, 1989.
- 3) S. Nagasawa, T. Tanifuji, M. Matsumoto, and M. Kawase : "Single-mode multifiber connectors for future large scale subscriber networks," Proc. ECOC'93, MoP1.5, 993.
- 4) S. Iwano, R. Nagase, K. Kanayama, E. Sugita, K. Yasuda, and Y. Ando : "Compact and self retentive multi-ferule

- optical backpanel connector,” IEEE J. Lightwave Technol., vol.10, no.10, pp.1356-1362, 1992.
- 5) 三田地, 岩野, 長瀬: “局内系光コネクタの技術動向と経済化の展望,” NTT R&D, vol.45, no.6, pp.569-574, 1996.
 - 6) 宇留野, 泉田, 中村: “所内光配線マネジメントシステムにおける経済化 MU コネクタ技術,” NTT 技術ジャーナル, vol.15, no.10, pp.12-15, 2003.
 - 7) S. Mitachi, R. Nagase, and Y. Takeuchi: “Glass ceramic ferrule realizing low cost optical fiber connector for fiber to the home,” OECC’97 Post-Deadline Papers Technical Digest, Seoul, Aug. 1997.
 - 8) 長瀬 亮: “通信用光コネクタのハイパワー特性,” 2007 年信学会ソサイエティ大会, BCS-1-6, p.S-11, Sep. 2007.
 - 9) 阿部, 柳, 浅川, 長瀬: “SC 及び MU 形光コネクタの屋外環境下での信頼性評価,” 2008 年信学会ソサイエティ大会, CS-3-3, p.S-4, Sep. 2008.
 - 10) M. Kobayashi, S. Iwano, R. Nagase, and S. Mitachi: “A new physical contact connection method using the buckling force of optical fiber,” IEICE Trans. Electron., vol.E80-C, no.2, pp.334-339, 1997.
 - 11) 鹿間, 浅川, 小林: “量産型マイクロホール部品を用いた SF 光コネクタ,” 2011 年信学会総合大会, C-3-65, p.240, Mar. 2011.
 - 12) 浅川, 小林, 阿部, 長瀬: “斜め接続を用いた 64 心形 PLC コネクタの試作,” 2003 年信学会総合大会, C-3-15, p.155, Mar. 2003.
 - 13) 杉田彰夫: “PLC 集積技術とハイブリッド集積光デバイス,” 2005 年信学会ソサイエティ大会, CS-8-5, pp.S-77-78, Sep. 2005.
 - 14) 山崎, 山田, 郷, 美野, 佐野, 宮本: “石英系 PLC-LN ハイブリッド多値変調器,” 2010 年信学会総合大会, CS-6-4, pp.S-35-36, Mar. 2010.