

## チュートリアル

# 光ファイバの基礎

## Fiber Optic Basics

### 光ファイバの基礎

光ファイバは、光エネルギーや情報を搬送することができる円形の誘電体導波路です。中央にあるコアは、コアより屈折率がわずかに（1%ほど）低い同心のクラッドに取り巻かれています。光ファイバには、一般に、 $\text{GeO}_2$ などの屈折率修正ドーパントを含むシリカ（酸化ケイ素）で作られています。また、隣接するファイバ間のクロストーク（混信）およびファイバが凹凸のある面に押し付けられた際に発生し、損失を増加させるマイクロベンディング（微小な曲げ）を低減するために、クッション性の材料（アクリレートなど）で作られた一層または二層の保護コーティングも使用されています。

環境の影響からさらに保護するために、光ファイバは、通常、ケーブルに入れられています。ケーブルは、通常、スチールまたはケブラー繊維などの補強材の内部に収容され、さらにポリエチレンの管に収容されています。

### 誘電体導波路としての光ファイバ： ファイバのモード

コアがクラッドよりも高い屈折率を持っているため、内部全反射の条件が満たされれば、光はコア内に閉じ込められます。ファイバの構造と組成によって、ファイバ内で伝播できるとびとびになった一組の電磁場が決定されます。これらのフィールドがファイバのモードです。

モードは大きく分類すると2種類になります。放射モードと導波（被嚮）モードです。放射モードは、エネルギーをコアの外に運び出してしまい、エネルギーはすぐに消滅してしまいます。導波モードはコア内に閉じ込められていて、情報やパワーを搬送するものです。ファイバのコアが十分大きければ、同時に多数の導波モードに対応することができます。各導波モードは各々の別個の速度を有していて、直交する直線偏光成分に分解できます。ファイバ内のいかなる電磁場分布も、各モードの組み合わせとして表すことができます。図1aと1bは、円形で対称な光ファイバの最も低次の2つの導波モード（ $\text{LP}_{01}$ および $\text{LP}_{11}$ で表す）を示しています。

光が光ファイバに入射すると、入射の条件、例えば、入力コーン角、スポット径、軸中心位置などによって程度は変わるものの各モードが励起されます。モード間のエネルギー分布は、モード間でエネルギーの交換が行われるため、距離とともに展開していきます。特に、ファイバのマイクロベンディングやねじれなどの擾乱によって、エネルギーは、減衰を増加させながら、導波モードから放射モードに結合を起こすことがあります。

### バンド幅の制限

光ファイバのバンド幅は搬送できる情報の量、すなわち、データ速度を決定します。ファイバのバンド幅を制限しているメカニズムは、分散として知られています。分散は、光パルスがファイバを伝わる間に広がっていくことです。その結果、各パルスは互いの中に広がり始め、符号が区別できなくなります。分散の主な2つの種類に、モード内分散とモード間分散があります。

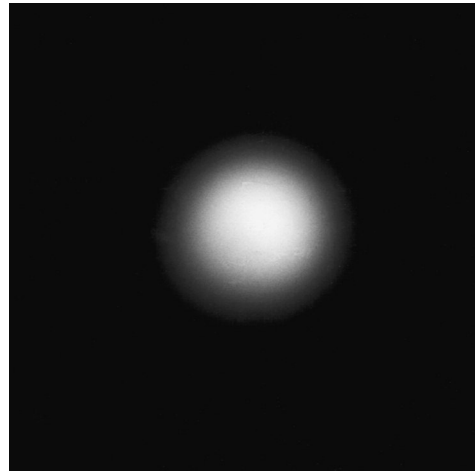


図1a： $\text{LP}_{01}$ モードの分布



図1b： $\text{LP}_{11}$ モードの分布

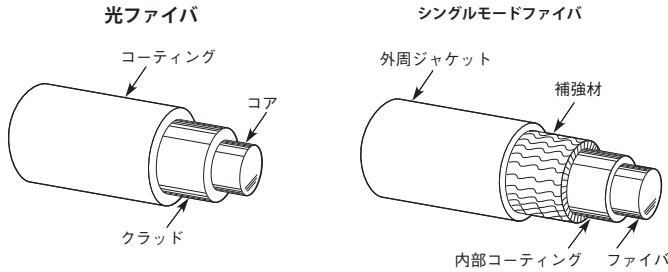


図1-分散

図2-光ファイバとシングルファイバケーブルの断面図

## モード間分散

モード間分散は、その名の通り、光ファイバの異なったモード間の現象です。従って、この種類の分散は、マルチモードファイバのみに適用されています。全ての異なった伝播モードが異なった群速度を持っているため、各モードが一定の距離を伝わるのにかかる時間も異なります。そのため、光パルスは、マルチモードファイバを伝わる間に分散を始め、互いの中に分散するまでに至ります。そして、この効果は、マルチモードファイバのバンド幅とそのバンド幅でデータを搬送できる距離の双方を制限しているのです。

## モード内分散

モード内分散は材料分散とも呼ばれることがあり、この分散のメカニズムは、光ファイバの材料の特性がもたらすもので、シングルモードファイバにもマルチモードファイバにも適用するものです。モード内分散は、はっきり2つのタイプに分かれます。すなわち、**単色分散**と**偏光モード分散**です。

屈折率は波長によって変化します。従って、異なった波長は異なった速度で光ファイバを伝わります。**単色分散**として知られています。

このことは、広い半値全幅 (FWHM) を持つパルスは狭いFWHMを持つパルスより分散することを意味しています。この分散は、情報に対応するバンド幅と距離に制限を加えます。このため、長距離の通信リンクには非常に狭い線幅のレーザを使用することが望まれています。分布帰還型 (DFB) レーザは、線幅が非常に狭い単一縦モードであるため、通信にはよく利用されています。

**偏光モード分散 (PMD)** も、確かに材料分散のもう一つの形です。シングルモードファイバは一つのモードに対応し、これは、直交する2つの偏光モードから構成されています。理想的な光ファイバのコアは完全な円です。しかし、事実本当はコアは完全な円ではなく機械的応力、すなわち、曲げなどがファイバ内に複屈折を導きます。これは、直交する偏光モードの一つが他の偏光モードより速く伝わらせることになり、そのため、光パルスの分散をもたらします。

## 減衰

ファイバ内を伝播する光パワーは、吸収と分散損失のために、長さに対して指数関数的に衰えます。減衰は、受信可能な信号レベルを維持するために必要な中継器の設置間隔を決定するものであるため、光ファイバ通信システムのコストを決定する最も重要な一つの要素となっています。

近赤外および可視領域においては、遠赤外および紫外線の吸収帯域の中心からはずれた部分によって、高純度シリカのわずかな吸収損失が起こります。市販の光ファイバでは、不純物、特に水酸化物イオンの形で水が吸収の主要因となっています。しかし、最近のファイバ純度の向上により、減衰損失は削減されています。最先端のシステムの減衰は、0.1 dB/kmのオーダーになっています。

分散も、エネルギーを導波モードから放射モードにカップリングすることがあり、ファイバからのエネルギーの損失をもたらします。また、光ファイバが固化する際にファイバ内に固定されるわずかな屈折率の変動が引き起こすレイリー分散も避け難いものです。これは、 $1/\lambda^4$ に比例した減衰を発生させます。コアの直径や形状またはファイバの軸方向の不均一も分散を引き起こします。マイクロベンディングなどの各次元について不均一を作り出すいかなるプロセスも、分散を増加させ、そのため、減衰も増加させるものとなります。

## シリカ内の典型的なスペクトル減衰

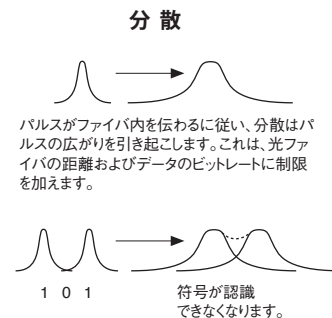


図3：分散

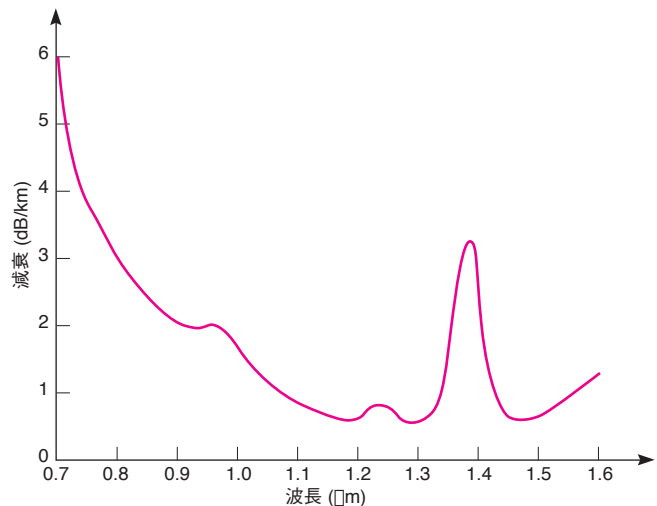


図4：シリカ内の典型的なスペクトル減衰

## ファイバのパラメータ

### 開口数 (NA)

ファイバの開口数 (NA) は、入射光線がコア内で内部全反射するためには、最大角の正弦として定義されるものです。ファイバのNAによって規定される角度の外側で射出された光線は、ファイバの放射モードを引き起こすでしょう。また、コアの屈折率が、クラッドに対して高くなるほど、NAも大きくなります。NAを大きくするための交換条件となるのは、ドーパントの濃度を上げることから生じる分散損失の増加などがあります。ファイバのNAは、ファイバの全てのモードが励起された時に、ファイバが放射する光の円錐の広がり角度を測定することによって決定することができます。

定性的には、NAは、ファイバの集光能力の目安となるものです。また、光をファイバにどの程度簡単にカップリングできるかも示しています。

開口数

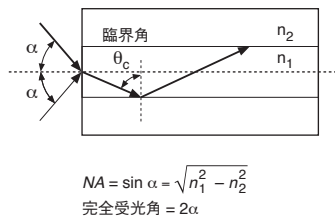


図5: 開口数

### 「Vナンバー」

ファイバの正規化周波数パラメータはVナンバーとも呼ばれ、有用な仕様の一つです。多くのファイバパラメータ、例えば、特定の波長でのモード数、モードのカットオフ条件、そして、伝播定数などは、Vに関連して表すことができます。例えば、屈折率段階変化マルチモードファイバの導波モード数は $V^2/2$ で与えられ、屈折率段階変化ファイバは $V < 2.405$ である時に特定の波長に対してシングルモードになります。数学的には、 $V = 2\pi \cdot NA \cdot a / \lambda$ であり、ここで「a」はファイバコアの半径である。

## ファイバの処理

### ファイバのストリッピング (被覆の除去)

ファイバケーブルの外部被覆は電気ケーブル用のストリッピング工具を使用して除去することができます。ケブラー補強材はハサミまたはカミソリの刃で切り取ることができます。しかし、ファイバのコアは、ファイバへの損傷を避けるために慎重に取り除かなければなりません。ファイバ表面のヒビ割れやキズはファイバ故障の原因の大部分を占めています。コーティングは、NewportのF-STRファイバコーティングストリッパを使用して取り除くことができます。

### ファイバの終端処理

終端面の品質は、ファイバのコネクタおよびスプライスの損失に影響を及ぼす最も重要な要素の一つです。高品質の終端面は、研磨またはクリーブによって得られます。ファイバがエポキシによってフェルルに固定されている場合、コネクタ用の終端処理は研磨で行われます。以下に、一般的なコネクタとそれらの終端面処理の種類について説明します。

## 光ファイバのコネクタのタイプ

**SMA** — このコネクタは、ネジ式ファイバロック機構がステンレス鋼構造で精度も低いことから、ハイパワーのレーザービームをコアの大きいマルチモードファイバにカップリングすることが必要となるアプリケーションで主に使用されています。代表的なアプリケーションには、医療、バイオ、さらに産業用のレーザービーム伝送システムなどがあります。SMAコネクタの代表的な挿入損失は1 dB以上です。

**ST** — STコネクタは、屋外と室内の双方の光ファイバLANアプリケーションに集中的に使用されています。このコネクタは、高精度セラミックフェルルによりマルチモードとシングルモードの双方で使用することが可能になっています。また、コネクタの押し回しロックを特徴とするバイネット式キー付結合機構がファイバ端の締め付けすぎと損傷を防止しています。STコネクタの挿入損失は0.5 dB未満で、通常得られる代表的な値は0.3 dBです。金属製のSTコネクタは穴開け構造で、挿入損失が1 dB以上であるため、Newportの大型コア (140  $\mu\text{m}$ 以上) のファイバに使用されています。

**FC** — FCコネクタは、シングルモードに対して選ばれるコネクタとなっており、光ファイバ機器、SM光ファイバコンポーネント、および、高速光ファイバ通信リンクに主に使用されています。この高精度セラミックフェルルを装備したコネクタは回転防止キーを備え、ファイバの終端面の損傷と、ファイバの回転アライメント感度を低減しています。このキーは、損失が最小になるように最適化された位置に高い再現性でファイバのアライメントを行うためにも使用されているものです。マルチモード用のこのコネクタも用意されています。FCコネクタの一般的な挿入損失は0.3 dBです。金属製のFCコネクタは穴開け構造で、挿入損失が1 dB以上であるため、Newportの大型コア (140  $\mu\text{m}$ 以上) のファイバに使用されています。

**SC** — SCコネクタは、シングルモード光ファイバの通信とアナログCATV、屋外に展開されているリンクにますます多く利用されています。高精度セラミックフェルル構造は、シングルモード光ファイバのアライメント用に最適です。このタイプのコネクタの四角い外形は、プッシュ・プル式の結合機構と相まって、各機器および配線盤にさらに高い実装密度でコネクタを接続することを可能にしています。キー付きの外部本体は、回転の影響とファイバ端面の損傷を防止しています。マルチモード用のこのコネクタも用意されています。SCコネクタの代表的な挿入損失は、約0.3 dBです。



## コネクタ端面処理

光ファイバに特定のコネクタが取り付けられると、コネクタの端面の処理が、後方反射という名称でも知られているコネクタのリターン損失の程度を決定することになります。後方反射とは、コネクタを通じて前方に向かって伝播する光と、コネクタの表面で反射されて光源に向かって戻る光との比を表すものです。後方反射を最小に抑えることは、モードホッピングや出力変動を起こしやすいDFBレーザなどの狭い線幅の光源を利用する高速アナログ光ファイバリンクにおいては、非常に重要になっています。

**平面研磨** — コネクタ表面に平面研磨を施すと、後方損失が約-16dB (4%) に低減されます。

**PC研磨** — 物理的接触 (PC) 研磨を施すと、わずかに凸面になったコネクタ表面が仕上り、接続しているコネクタの双方のファイバ端を互いに物理的に接触させます。これでファイバと空気の界面が排除され、そのため、後方反射が30~40dBに低減されます。PC研磨は、ほとんどのアプリケーションで採用されている最も普及したコネクタ端面処理です。

**SPCおよびUPC研磨** — スーパーPC (SPC) およびウルトラPC (UPC) 研磨では、研磨工程を増やされてコネクタの表面の品質が向上し、後方反射は40~55dBに低減されます。この研磨法は、高速デジタル光ファイバ伝送システムに使用されています。

**APC研磨** — 角度付きPC (APC) 研磨は、コネクタ端面に8°の傾斜を付けるものです。この研磨法では、-60dB以下の後方反射が常に達成できます。

ファイバのクリーブ (劈開) は、鏡面レベルの平坦なファイバ端を達成する最短の方法です。わずか数秒しかかかりません。この基本原理は、ファイバに張力をかけ、ダイヤモンドまたはカーバイドの刃で光軸に垂直にスクライブ (キズ付け) してからファイバを引っ張ってきれいに切断するものです。Newportの**F-BK3**または**FK11クリーバ**は、このプロセスを特に素早くかつ簡単に行うことができるものです。研磨にせよ、クリーブにせよ、処理後にファイバ端面を検査することをお勧めします。



図6：コネクタ端面

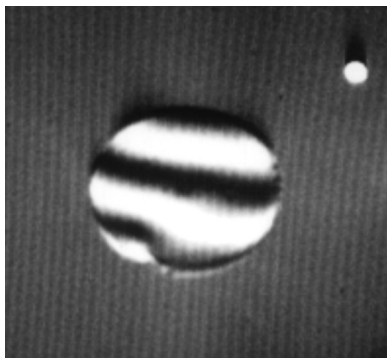


図7—代表的なF-BK3クリーブは、クリーンで平らで垂直です。

## ファイバへの光のカップリング

良好なカップリング効率を得るには、焦点に集めたレーザービームのスポットにコアの中心を合わせるためのファイバの精密な位置合わせが必要です。マルチモードファイバについては、コアが大きいので、ファイバポジションナ (例えばNewportの**FPシリーズ**) で良好なカップリング効率を達成することができます。シングルモードファイバには、**ULTRAlign** および**562F**ステンレス鋼ポジションナ、および、**F-915**および**F-1015カブラ**などのサブミクロンの位置合わせ分解能を備えたより精巧なカブラが必要になります。これらの製品は、最大のカップリング効率が必要な場合にも有用なものです。

良好なカップリング効率を得るためには、焦点に集められたビームスポットの特性をファイバのパラメータに合わせなければなりません。マルチモードファイバについては、これは簡単なことです。一般的な指針は、以下の通りです。

焦点に集められたスポットは、コアのサイズと同じであること。

入射光の円錐角 (収束角) は、ファイバのNAの逆正弦 (arcsine) を超えないこと (例えば、NAが0.2なら23°、NAが0.3なら35°)。

シングルモードファイバへのカップリングを最大にするためには、入射光の強度分布をファイバモードの分布に合わせなければなりません。例えば、屈折率段階変化ファイバのHE<sub>11</sub>モードのモード分布はガウス分布で近似することができ、強度が1/eになるガウス幅wは、以下の式で求めることができます。

$$w = d \left( 0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right)$$

ここで、dはコアの直径、Vは「Vナンバー」です。

NewportのFSVファイバの場合、V=2となり、ガウス幅は、コアの直径より約28%大きくなります。従って、光は、ファイバ面にコア直径の1.28倍のスポットサイズに集められます。ガウス分布のレーザービームの場合では、直径wの集光スポットを作り出すために必要とされる焦点距離fの集光レンズ上に入射するビーム直径D = 4f/(πw) となります。この径はレーザービームの絞られた直径と広がり角が与えられれば、集光レンズとレーザの距離を調整しビームを拡大することによって簡単に決定することができます。

ガウス分布をするビームに対しては、光ファイバへのレンズの整合をより簡単に取るために、モードフィールドの直径が与えられています。

レーザダイオードの広がっている出力ビームは、集光する前に、大開口数レンズでコリメートしなければなりません。Newportの**F-Lシリーズレーザーダイオード集光レンズ**は、一般的なレーザーダイオード波長での高透過率を実現するARコーティングが施され、0.5のNAにより、コリメートにも集光にも有用なものとなっています。

## モードスクランブルとモードフィルタリング

マルチモードファイバに関する多くの実験は、ファイバのモード間のパワー分布に影響を受けやすくなっています。パワー分布は、入射光の状態、ファイバの擾乱、さらに、ファイバの長さによって決定されています。モードスクランブルとは、ファイバ内の光パワーを全ての導波モード間に安定して分布させる技術です。モードフィルタリングは、高次のファイバモードを減衰させることで数kmの長さのファイバの影響をシミュレートするものです。

スクランブル技術の一つに、2本の屈折率段階変化ファイバの間における一定の長さの屈折率連続変化ファイバのsprayがあります。これにより、下流（端末方向）のファイバのコアは、入射条件に関係なく安定したモード分布が確保されます。モードフィルタリングは、曲げが高次モードを抑えるのを利用し、ファイバを指ぐらいの太さの心棒に数回巻き付けることで行うことができます。

スクランブルとフィルタリングの双方を行う方法に、全てのファイバモードと高次モードの減衰を迅速にカップリングさせるためのマイクロベンディングの導入があります。このための一つの手法は、ファイバの被覆を除去した部分を鉛玉で満たした箱に配置することです。さらに精密な手法は、Newportの**FM-1モードスクランブラ**の利用です。特別設計のこの装置は、モードスクランブルとモードフィルタリングのためにマイクロベンディングを導入するための較正済みメカニズムを採用しています。

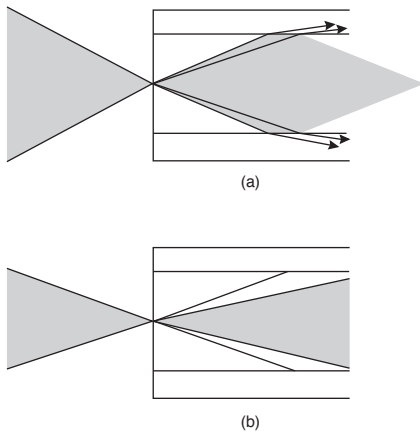


図8: マルチモード光ファイバ内の入射条件  
(a) 許容外 (b) 許容内

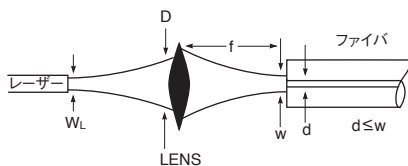


図9: 光ファイバへの光のカップリング概略図

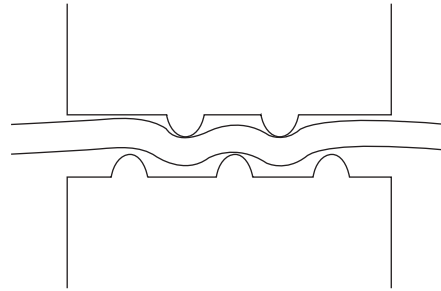


図10: 光ファイバ用モードスクランブラ。曲げは、高次モードと放射モードをカップリングさせやすく、長距離にわたって安定したモード分布に光を分布させる傾向にあります。

## クラッドモードの除去

光の一部は必ずファイバのクラッドに入射します。クラッドモード（クラッドに入射した光）は、ファイバの長さに従って即座に消滅しますが、測定に影響を及ぼすことがあります。例えば、光がクラッドを伝播した場合、シングルモードファイバの出力はガウス分布を示しません。クラッドモードを除去するには、ファイバのコーティングを一定の長さだけ取り除き、グリセリンなどの屈折率マッチング液にベアファイバを浸します。

## 光に関する一般的なパラメータ

以下は、光ファイバコンポーネントに関連した光の一般的なパラメータを掲げたものです。これらのパラメータの測定につきましては、Newportのウェブサイトまたはお電話でアプリケーションノートをご請求下さい。



図11

**ポート構成**: 入力ポートの数×出力ポートの数、例えば、2×2など。

**カップリング比**: 入射されたパワーに対する出力ポートにおけるパワーの (dBで表された) 比、例えば、 $-10 \log (P_2/P_1)$  など。

**アイソレーション**: 消滅した波長帯域でのパワーに対する伝送された波長帯域での出力ポートにおけるパワーの (dBで表された) 比。

**指向性**: 入射したパワーに対する他の入力ポートに戻ったパワーの (dBで表された) 比、例えば、 $-10 \log (P_4/P_1)$ 。

**バンド幅**: 性能パラメータが指定されている操作波長の範囲。

**過剰損失**: 入射したパワーに対する全ての出力ポートでの全パワーの (dBで表された) 比、例えば、 $-10 \log \{ (P_2+P_3) / P_1 \}$ 。

**均一性**: 最大挿入損失と最小挿入損失との間の差。

**消光比 (吸光比)**: 伝送したパワーに対する偏光状態で消光されて残存しているパワーの (dBで表された) 比。

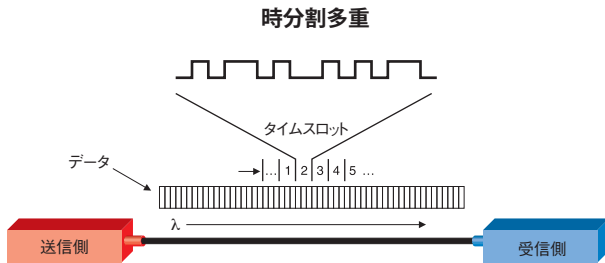
**リターン損失**：入射したパワーに対する入力ポートに戻ってきたパワーの (dBで表された) 比、例えば、 $-10\log(P5/P1)$ 。

**偏光依存損失 (PDL)**：入力偏光が変化による挿入損失の最大値 (ピーク-ピーク) の (dBで表された) 変化。

## 光ファイバ通信

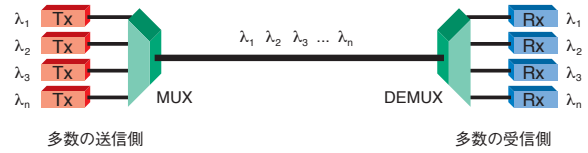
1550 nmウィンドウのみの光ファイバ通信における論理上のバンド幅は、凡そテラビットとなります。最近の光ファイバシステムは、使用できる非常に将来性があるバンド幅をまだ活用してはいません。

バンド幅を増加させるには、2つの方法があります。第一番目は、時分割多重通信 (Time Division Multiplexing) あるいはTDMとして知られている方法です。多重チャンネルは変調レートを増やし、各チャンネルにタイムスロットを割り当てることによって、単一の搬送波で伝送するものです。しかし、システムのビットレートを増やすことは、通信リンクの送信側と受信側でさらに複雑な高速電子技術を必要とします。また、ビットレートが増えるにつれ、光ファイバの特性を制限する固有変調が大きくなってきます。単色および偏波モード分散がパルスの拡がりを起こし、これはさらに長い距離の伝送の信号品質に影響を及ぼします。



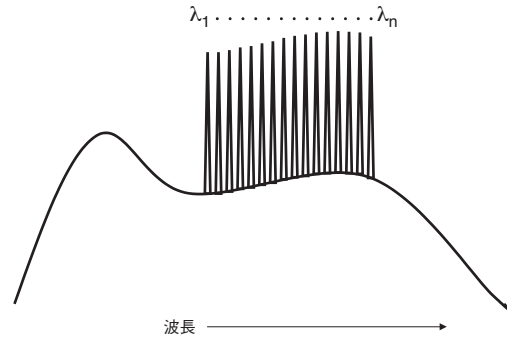
光ファイバ通信システム容量を増やすもう一つの方法は、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing) あるいはWDMとして知られている方法です。この方法を用いると、1本の光ファイバ上に複数の光搬送波 (波長) を使用でき、その結果、容量を増やすことが可能になります。従って、光ファイバに第2の送受信装置を加えれば、通信システムのバンド幅を2倍にすることができます。光システムの容量を増加する方法は、様々な理由で魅力があります。もし、システムがTDMだけを使用して容量を増やした場合、既存の送受信装置は、より高速かつ高価な送受信装置に交換されます。しかしながら、WDM方式を使用すれば、既存の送受信装置を交換する必要がありません。単に、異なった波長の第2の送受信装置を追加するだけです。これは、1本の光ファイバの中に2つのレーザの出力を結合させるだけか、多重送信だけで行えます。受信側において2つの波長を分離するか、非多重化し、それぞれの搬送波をそれ自身の受信装置に経路決定します。1310 nmのレーザを使用した伝送システムでは、通常、1550 nmの第2のレーザが追加されます。これらの波長を選択したのは、それらが「ウィンドウ」内または最小の減衰レンジであるためです。これによって、信号はさらに長い距離を伝わるすることができます。

### 波長分割多重



WDMのアイデアは、近年、光ファイバの潜在的なバンド幅を十分に活用するために拡張されつづけています。国際電気通信連合 (International Telecommunication Union) (ITU) は、1550nmのウィンドウで1セットの近接した間隔の波長を提案しました。WDMのこの方法は、高密度波長分割多重 (Dense Wavelength Division Multiplexing) あるいはDWDMとして知られています。これらの異なる波長またはチャンネルの間隔は、100GHzで約0.8 nmに相当します。このチャンネルのセットは、一般にITU-Tグリッドとして知られ、周波数で指定されます。ITUが1550 nmウィンドウを選んだ理由は、2つあります。一つは最も減衰量が小さいウィンドウの一つであること、また、もう一つは、これがエルビウムドープ光アンプが動作する帯域内にあることです。

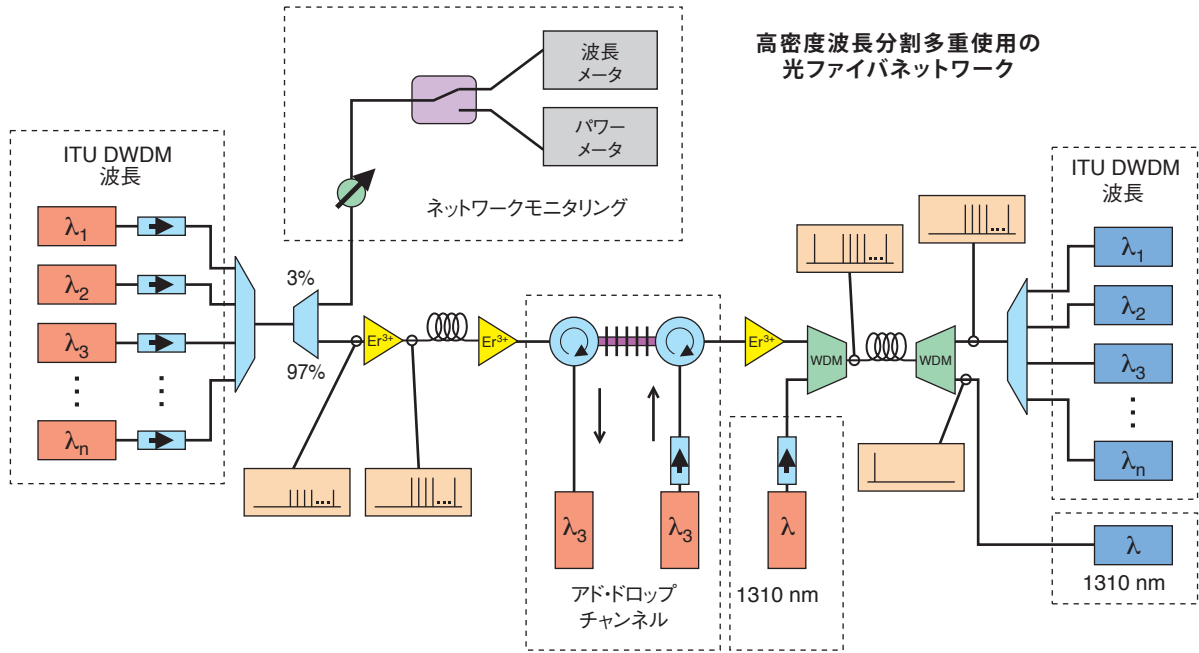
### 高密度波長分割多重



### ITU-T DWDMグリッド

チャンネルコード	λ波長 (nm)	チャンネルコード	λ波長 (nm)	チャンネルコード	λ波長 (nm)	チャンネルコード	λ波長 (nm)
18	1563.05	30	1553.33	42	1543.73	54	1534.25
19	1562.23	31	1552.53	43	1542.94	55	1533.47
20	1561.42	32	1551.72	44	1542.14	56	1532.68
21	1560.61	33	1550.92	45	1541.35	57	1531.90
22	1559.80	34	1550.12	46	1540.56	58	1531.12
23	1558.98	35	1549.32	47	1539.77	59	1530.33
24	1558.17	36	1548.52	48	1538.98	60	1529.55
25	1557.36	37	1547.72	49	1538.19	61	1528.77
26	1556.56	38	1546.92	50	1537.40	62	1527.99
27	1555.75	39	1546.12	51	1536.61		
28	1554.94	40	1545.32	52	1535.82		
29	1554.13	41	1544.53	53	1535.04		

以下は、光ファイバネットワークの概念的な例です。



## 光ネットワーク

全てが光によるネットワークは、光通信の次の進化段階となるでしょう。現在のDWDMシステムは、信号が一つの始点と一つの終点を持つことを意味するPoint-to-Pointリンクです。これらのネットワークが、固定されたPoint-to-Pointリンクに限定されないネットワークに進化するための研究が行われています。

光学レイヤにおける透明性が将来多くの可能性を開きます。デジタル伝送やアナログ伝送を同一の光ファイバ上で行うことが可能です。異なったプロトコルを使用した異なったビットレートが、全ての同時に伝送されるのです。現在、リアルタイムでの光ネットワークの再構築について研究が行われています。波長選択可能スイッチングにより、波長は個々にネットワークを通るルートが決まります。このアプリケーションのいくつかはネットワークの復帰と予備のためであり、ネットワークが装置故障または光ファイバの断線のような故障から復帰するまでの間の完全なバックアップシステムの必要性を減少させるか、または完全になくすためです。再構築可能なネットワークは、通信の渋滞部分に対して最適化するためにそれ自身を再構築するためのオンデマンドのバンド幅を提供できるものです。将来は、光ドメインで、ある波長の通信量を他の波長に変換するための波長変換も含まれるかもしれません。

全ての光スイッチングは未だに研究段階ですが、研究者たちは、スイッチング速度が速い高信頼性かつ低損失なスイッチを作成する方法を模索しています。光パケットスイッチングへの可能性の調査や他の新しい技術は現在進行中です。

## フォトリック結晶ファイバ はじめに

フォトリック結晶ファイバは、1980年代後半に始まったフォトリック結晶の分野をさらに拡張して得られるファイバです。フォトリック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) は1990年代の後半になって始めて試作研究が開始された大きな可能性を秘めた分野ですが、それ以後商業ベースの技術として発展を続けています。PCFは大きくは2種類のカテゴリに分類されます。その1つは個体コアを持つ屈折率ガイドファイバ (Index Guiding fiber) であり、他の1つは周期的微細構造エレメントを持ちコアを低屈折率材料 (例: 空孔コア) で構成したフォトリックバンドギャップ (PBG) ファイバです。PCFは通常の光ファイバでは得られない次のような特性を持っています: 大きなモードフィールド径を持ちUVからIRをシングルモード動作でカバー、スーパーコンティニュームを形成する高度な非線形性能、非常に小さな値から0.9近傍までをカバーする開口数 (NA)、非常に優れた分散特性、空孔による光ガイド等々。この理由により、現在PCFは分光、計測、生物医学、画像処理、電気通信、産業機械、軍事等々の様々な分野で大きな注目を集めています。

光源

ファイバー・オブ・ティックス

レーザー

光学測定

分光機器

オブティカルポジショニング  
マウント

バイプレジション  
コントロール

## 製作と特徴

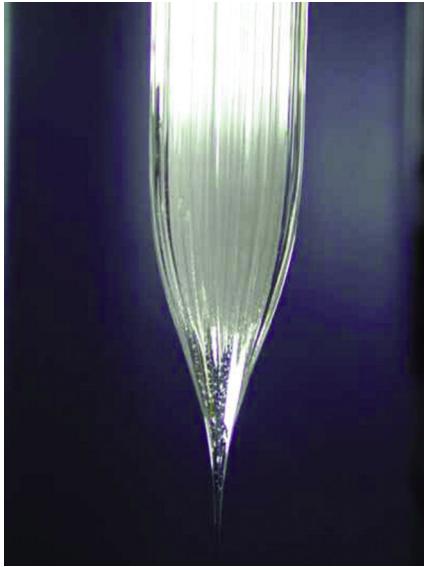


図12：PCF予備形成品の拡大

インデックスガイド型PCF製造の標準的なスターティングポイントは中空キャピラリシリカチューブの束を、中心部のキャピラリを置き換えた純粋シリカロッドの回りに配置することです。PBGファイバでは1本または複数のキャピラリチューブを単純に予備形成品中心部から引き抜くことによって中空欠陥コアを作り出します。予備形成品を形成するアセンブリ全体をスリーブチューブで囲んでおきます。予備形成品はファイバ引き上げタワーで約2000まで加熱され、重力と圧力を利用してゆっくりと引き伸ばすことによりファイバを作ります。ファイバの典型的な外径は125  $\mu\text{m}$ 程度ですが、80から700  $\mu\text{m}$ 程度であれば日常的に製造が可能です。このファイバは予備形成品の構造を保っていますが、サイズは顕微鏡のスケールに縮小されています。ファイバの操作性向上のため、標準的な保護ポリマーコーティングを施します。

PCFの分散特性を操作することにより、可視波長領域でゼロ分散、低分散、異常分散特性を示すファイバを作り出すことができます。さらに平坦分散特性を実現することも可能です。このような特徴を小型モードフィールド領域と組み合わせることにより、並外れた特性を持つ非線形ファイバを作ることができます。空孔のパターンを変えたり、あるいは使用材料を工夫することでPCFの他の特性（シングルモード遮断周波数、NA、その他の非線形係数）を人工的に操作することも可能です。非常に柔軟性に富む設計が可能であり、設計者は多くの異なる、ある場合は奇妙な空気孔パターンを作り出して特異なPCFパラメータを実現することができます。シングルモードファイバで使用される典型的な方法はクラッド部分に円形空気穴を三角パターンに配置することです。クラッドの中で空気の占める部分を多くしてゆくと、段々とマルチモードファイバのような挙動を示すようになります。楕円形コアにすると偏光を保持して高い複屈折特性を示すファイバができます。

200~2500nmの波長範囲を使用する殆どのアプリケーションではシリカを使用するファイバが優れた性能を発揮しますが、それ以外の材料を使用することで特定のパラメータ（非線形性や、このスペクトル範囲以外での導波特性）が改善されることがあります。さらに、シリカに使用できるドーパントの数は非常に多数あります。現在ではドーピングされたシリカが多くのファイバレーザや増幅器で使用されており、これらの材料をPCFのユニークな能力と組み合わせることで更に有用なデバイスを作り出すことができます。

カップリングとスプライシング、コネクタ化もPCFの重要な問題です。何故ならば、この種のファイバのモードフィールドは極端なパラメータとNAを持つことが多く、カップリング方法も標準的なファイバとは大きく異なることがあるからです。ただし、PCFの場合にもユーザーは標準的なファイバツールでストリッピングと切断を行うことができます。実験室ではファイバを単に切断して端が開放状態で使用するのが普通です。このような使用法で重要なのは、ファイバの端を液体に接触させないことです。キャピラリ効果によってファイバ中の細いホールに数センチにわたって液体を吸い込んでしまい、導波特性を乱してしまうからです。

PCFを標準ファイバと接続することも可能です（標準ファイバの様々なコネクタ形式を利用することができます）、PCF同志の接続も可能です。Newportは標準ファイバと接続したPCFと、特注ベースで直接コネクタ化したPCFの両方を提供しています。ただし、接合とコネクタ化したファイバコアオフセット、およびコネクタ同志のカップリング強度は常に標準ファイバと同等とは限りません。

この他に、直接コネクタ化されたファイバは光が広がってファイバ終端面での強度が低くなり、高パワーレベルでの損傷の危険性が小さくなります。詳しくは弊社へお問い合わせください。

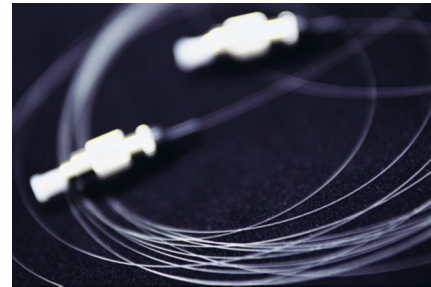


図13：大部分のPCFファイバはコネクタ化処理が可能です。詳しくは弊社へお問い合わせください。

Newportの**F-SM**、**F-NLシリーズ**は屈折率ガイドファイバです。従来型ファイバと同様に、屈折率ガイドPCFは固体コア内で光が全反射することによって光を伝えます。PCF内の、マイクロ構造化されて空気が充填された領域は実効的にクラッドの屈折率を低下させ、ステップインデックス光ファイバと同じ効果を生じさせます。このファイバは多くの点で標準ステップインデックスファイバ（典型例はGeドーピングして屈折率を上昇させたコアを純粋シリカクラッドで囲んだタイプ）に似た挙動を示しますが、同時に標準ファイバとは異なる多くの利点を備えています。屈折率ガイドPCFはドーピングされていないシリカを使用するため損失が小さく、パワーと温度レベルを高く保つことができ、しかも放射線照射にも耐性があります。PCFの設計にもよりますが、クラッド部分の空気を利用して極端に大きな、あるいは極端に小さな屈折率のステップを作り出すことができます。



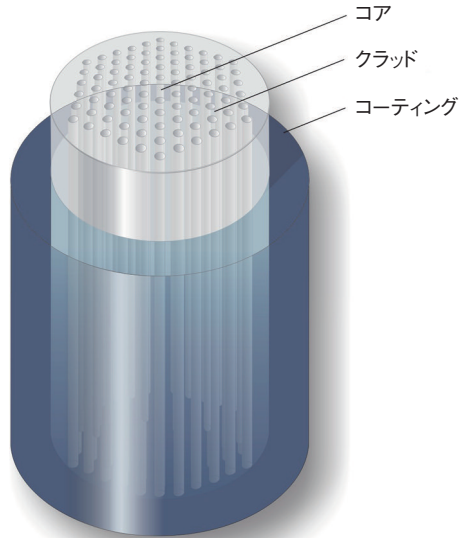


図14: 屈折率ガイドPCFの構造

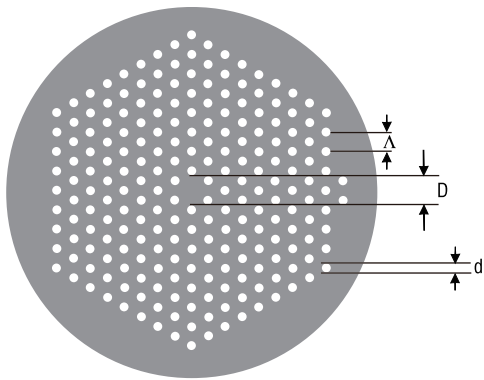


図15: 三角クラディングPCFの断面

屈折率ガイドPCFの典型的な断面例を図2と図3に示します。PCFは三角の格子状に配置された空気孔から構成されており、この空気孔が無い部分をコアと定義します。図のラベルAはピッチ、すなわち空孔構造の周期（空孔中心から隣の空孔中心までの距離）を表します。ラベルdは空孔サイズ（直径）を表します。

ある種のPCFではクラッドの屈折率が強い波長依存性を示すことがあります。本質的に設計の柔軟性が高いことに加えて、PCFならば全く新しい特性を開発できる理由の一つがここにあります。エンドレスシングルモードファイバ（FSMシリーズ）、極端な非線形特性ファイバ、可視光領域で異常分散を示すファイバ（FNLシリーズ）などがこのような特性の例に含まれます。

PCFの持つユニークな特徴は、1つのファイバだけで300nm近傍から2000 nmを超える波長範囲でのシングルモード動作をサポートできる可能性があり、これはモードフィールド面積が大きく（数百  $\mu\text{m}^2$ ）なってもあてはまります。この特性により、PCFを使用すれば、途中で非線形（損失の原因となる）バリアにぶつかることなく非常に大きなパワーを高いビーム品質で伝送することが可能になります（CW動作で数百ワット）。その一方で、強い非線形を持つファイバをシングルモードファイバとして作ると、このようなファイバは極端に小さなモードフィールド面積（典型値3  $\mu\text{m}^2$ ）を持つことから光をコアに効率的に閉じ込めることが可能になります。

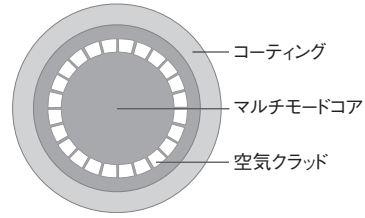


図16: 空気クラッドPCFの断面

PCF技術は、屈折率の異なる固体ガラスを用いて光を導く標準的なファイバ技術と比較して幾つかの新しい特性を実現することができます。次に示すのがその例です。

- 非常に広いスペクトル範囲でシングルモード動作するファイバ（原理的には全波長域）
- 非常に小さなモードサイズを実現できる（1  $\mu\text{m}$ 近くまで）
- 非常に大きなモードサイズを得ることができる（25  $\mu\text{m}$ 、あるいはそれ以上）
- 1300 nm以下の領域でゼロ分散波長を実現できる（600 nm近傍まで）
- 極端に強い複屈折（ $10^2$  近くまで）を実現できる
- 非常に高い開口数（0.9まで）を得ることができる

以上より、PCFは次のような機能を必要とするアプリケーションに理想的なファイバであると言うことができます：強い非線形性、シングルモードで広帯域動作、大きなモード面積、大きな立体角を使用する集光、など。

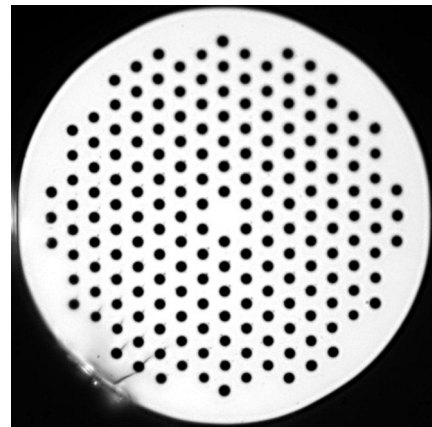


図17: 大モード面積ファイバ（F-SMシリーズ）

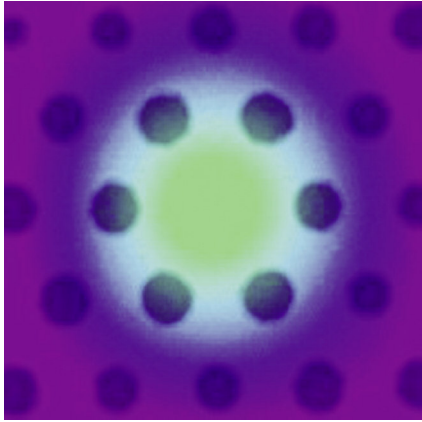


図18：F-SMファイバの近視野像（1550nm）

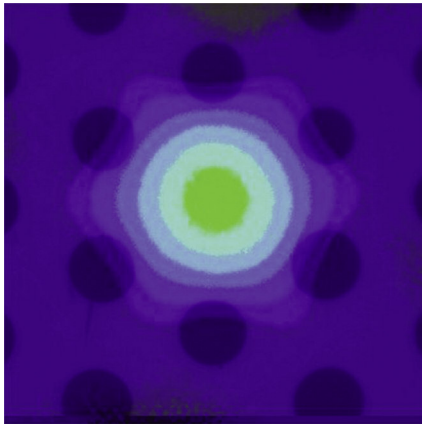


図19：F-SM20ファイバのモード構造

フェムト～ピコ秒レベルの短い、かつ強力なパルスが非線形媒体を通過することによる広い連続スペクトルの発生（SCG: supercontinuum generation）は1970年に最初に発見され、それ以後様々な材料を対象として広範囲な研究が行われてきています。スーパーコンティニュームという用語は特定の現象を表すものではなく、光パルススペクトルの大規模な広がりや、様々な出力等々の非線形効果により生ずる多種多様な効果を包括的に表現したものです。これに関連する非線形効果は材料の分散特性に依存し、自己位相変調（SPM）やラマン散乱、位相マッチング、孤立波なども効果を及ぼします。

PCFがSCGに及ぼす結果については、異常分散領域でのポンピングおよび可視光／および赤外波長領域のゼロ分散波長におけるポンピングとして紹介済みです。大部分の実験はフェムト秒ポンピングを利用しており、一般にはこの方法によって驚くほど広いスペクトルが得られます。ピコ秒ポンピングで得られるスペクトルはこれよりも狭くなりますが、レーザー光源の価格がはるかに安いことから商業ベースで注目を集めています。

十分なポンピングパワーがあれば水滴でもSCGを観測することができますが、特定の領域で連続スペクトルを発生させるために分散を設計できるPCFはSCGのための理想的な媒体とすることができます。この方法を用いて与えられた光をより長い、あるいは短い波長どちらにでも変換することができます。これは丁度、オクターブを超える非常に広いスペクトル範囲が今までは考えられなかった低いパワーレベルで実現できることに相当します。

## 実用的なスーパーコンティニュームのチップ

SCG-800とSCG-800-CARS（P346参照）は超高速レーザーを使ってスーパーコンティニュームを発生させるのに適しています。フェムト秒レーザーを結晶ファイバにカップリングさせて最高の性能を実現させるにはパルス歪みに関わる多くの問題に対処しなければなりません。このセクションではCoherent Mira 900Ti Sapphireレーザーを1.7 μmコアPCFへカップリングさせるケースを例として注意事項を説明します。

最初に対処しなければならない問題はファイバ表面からの4%の反射です。これによりパルストレインに歪みが発生するばかりでなく、極端な場合にはレーザーのモードロックが停止してしまいます。ファイバをその角度で切断することで後方反射を最小化できる角度が存在します。しかし、弊社がお奨めするにはファラディアイソレータを使用してこの問題を回避することです。ビームの一部をカップリングから取り出してNewportの**パルススカウトオートコリメータ**（P1254参照）へ導き、パルス幅とビーム品質をリアルタイムでモニタリングすることもできます。

顕微鏡の標準的な対物レンズを通すことにより、フェムト秒パルスを簡単にファイバにカップリングさせることができます。40倍から60倍程度の倍率が良い結果をもたらします。非球面ボールレンズを使用する方法も考えられますが、このタイプのレンズは色消しではありませんから広いスペクトルレンジを含む短いフェムト秒パルスには使用できません。顕微鏡対物鏡内での分散を補償するために補償済みプリズムまたは回折格子コンプレッサを使用して可能な限り短い（最も強い強度の）パルスをファイバに導かなければなりません。レーザービームの直径は顕微鏡対物の開口にマッチしている必要がありますが、これは標準的なテレスコープを使用して簡単に実現できます。

非線形効果は入力パワー変動に対して本質的に敏感です。したがって、非常に安定性に優れたマウントを必要とします。熱、振動その他の望ましくない効果によりファイバ終端部の位置が空間的に変動するのを避けるために、ファイバはできるだけ端に近い位置で固定しなければなりません。さらに安定性を向上させるためにファイバをマウントに接着する、あるいはコネクタ化されたファイバを使用する等の方法を用います。

偏光保存ファイバを使用する場合は、線形偏光したフェムト秒パルスの偏光軸をファイバのいずれかの主軸と一致させる必要があります。1/2波長板を使用するか、またはファイバを回転させてこれらの軸の相対的位置関係を調節します。主軸を見つけ出すには出力の偏光状態を測定しながら1/2波長板またはファイバを回転させ、出力が線形偏光状態になる位置を探します。

上に説明したアラインメント操作を行うことにより、40%を超えるカップリング効率が普通に得られます。

## F-SMファイバの幾何形状と強度

細かな曲げに起因する損失から守るために、FSMシリーズはコアサイズができるだけ大きくなるように大きなクラッド半径で製造されています。すべてのファイバには単層アクリレートコーティングが施されており、5.0 N以上の張力をかけた試験が実施されています。