

光ファイバーを使ってみませんか？

利用している光学定盤のサイズの制約で光をいったん光ファイバーに入れて他の光学定盤に光を移したり、あるいは各種空間光デバイスと光ファイバーを自分自身でつないだりする必要に迫られた経験のある光学研究者・技術者の方も多いのではないのでしょうか。そこで本稿では、光ファイバーの選び方と光を光ファイバーへ結合するための集光レンズの選び方のポイントについて解説させていただきます。

1. 光ファイバーの選び方

最初に検討しなければならないのは光ファイバーの選定です。光ファイバーという言葉は、光学研究者以外の人でも日常からよく耳にする言葉ですが、光の伝搬特性によっていくつかの種類に分類できます。

1.1 マルチモード光ファイバーか、シングルモード光ファイバーか

伝搬させる光の波長を把握した上で、その光が選定候補となる光ファイバーでどのような伝搬モードを取るかを理解する必要があります。マルチモード光ファイバーは、文字通り複数の伝搬モードを有する光ファイバーです。これを用いた場合、光ファイバー出力側で観測される出力ビーム光の空間電界強度分布が、光ファイバーの曲げの影響を受けて変化する可能性があります。加えて、ナノ秒オーダーの光パルスを伝搬させると、伝搬モード間の等価屈折率の差（モード分散）により、光パルス波形が変化する可能性があります（図1）。このような問題を避け

表1 SMF のカットオフ波長と MFD の関係.

カットオフ波長 (nm)	470	590	770	920	1250	1290
MFD (μm)	3.4	4.5	5.5	6.2	9.3	10.5
NA	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13

るには、シングルモード光ファイバーの利用が有効です。石英光ファイバーにおいてシングルモード条件となる光波長と、モードフィールド径 (MFD) とよばれる光閉じ込め領域幅の典型的な値の関係を表1にまとめます。市販品で多く出されているコア径が $50\ \mu\text{m}$ 程度のマルチモードファイバーと比べて、シングルモードファイバーの MFD はかなり小さくなります。さらに、短波長用のシングルモード光ファイバーほど MFD が小さくなります（表1）。その分、光を光ファイバーに入れる作業が大変になります。

1.2 光ファイバー材料は何か

光ファイバー材料は、石英光ファイバー、プラスチック光ファイバーの2種類が主に使われています。透明度は石英系光ファイバーが最も高く、 $1.55\ \mu\text{m}$ 前後の波長で損失係数が $\sim 0.2\ \text{dB/km}$ ($1\ \text{km}$ で約 95% の光を透過) という驚異的な性能を有しています。プラスチック光ファイバーには、高純度ポリメチルメタクリレート樹脂 (PMMA) と PF ポリマーが主に用いられ、透過波長帯と損失係数は、それぞれ $\sim 100\ \text{dB/km}$ ($0.6\ \mu\text{m}$) および $\sim 40\ \text{dB/km}$ ($0.6\sim 1.3\ \mu\text{m}$) です。石英光ファイバーほど、低損失ではありませんが、曲げや衝撃に強く軽量であるといった特徴をもっています。最近では、これら

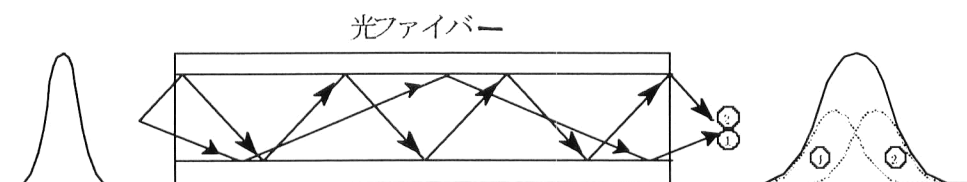


図1 マルチモード光ファイバーにおける光伝搬.

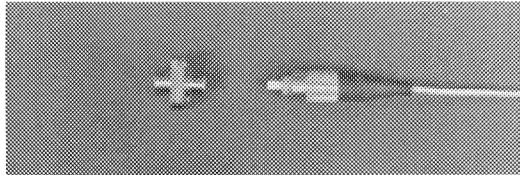


図2 FCコネクタおよびアダプター。

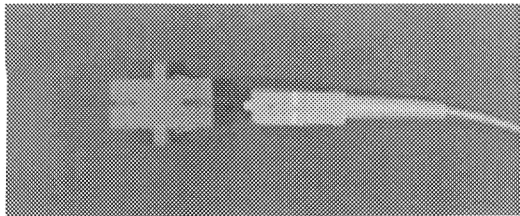


図3 SCコネクタおよびアダプター。

のポリマーを用いた大口径光ファイバー（コア径～1000 μm ）も開発され、ファイバー入力端面の汚れや傷による光損失の影響が出にくい製品の開発も行われています。

1.3 コネクタ規格は何か

光ファイバー同士を接続するには、両者の光コネクタ規格や端面形状を合わせる必要があります。光コネクタ規格にはいくつか種類がありますが、実験室ではFCコネクタ（図2）とSCコネクタ（図3）が広く使われています。FCコネクタは、金属アダプタにねじ止めする形で固定します。SCコネクタは、プラスチックアダプタに挿入するだけで固定でき、使い勝手や軽量性にすぐれています。端面形状については、主に平面研磨、球面研磨、斜め研磨の3種類に大別されます。後者のものほど、端面からの反射戻り光パワーが小さくなります。

2. 集光レンズの選び方

光を効率よく光ファイバーに結合するには、幅数 μm 程度の光ファイバーコア領域にレンズを用いて集光する必要があります。したがって、光ファイ

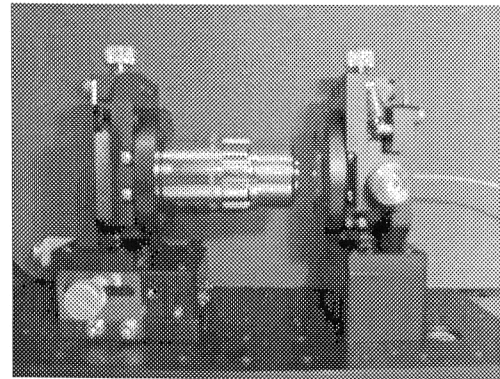


図4 個別レンズ方式（対物レンズと光ファイバー）。

バーの開口数（numerical aperture; NA）等をよく理解した上で、集光レンズを選ぶ必要があります。

2.1 レンズと光ファイバーの空間結合による方法

レンズと光ファイバーを個別に用意して空間結合する方式です。光を効率よく光ファイバーに入れるには、両者を微動台上に固定し、ファイバー端面のコア部分が焦点となるようにレンズ位置を微調整しなければなりません。微動台の中には、対物レンズを直接支持するタイプもあります（図4）。効率のよい結合を実現するには、コリメートレンズから光ファイバー端面に光が入射する角度を開口数で規定される角度 θ_{max} 以下にする必要があります。シングルモード光ファイバーの典型的なNAは、0.1～0.15 ですから、空気との界面での θ_{max} は、 10° 弱の角度になります。図5に示すように、コリメート光を光ファイバーに結合させる場合、 θ_{max} を考慮に入れつつ、コリメート光のビーム径 D 、ビームウエスト径 w 、光波長 λ 、レンズ焦点距離 f との関係式、

$$D = \lambda f / (\pi w)$$

より、コリメートレンズの焦点距離 f とコリメートビーム径 D の適切な組み合わせを選びます。 D と f の関係から求められるビーム光の最大入射角度 θ が θ_{max} に近いほど、結合損失が低減します。

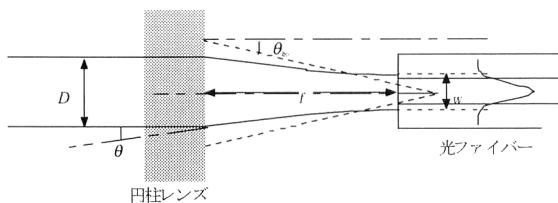


図5 空間結合系.

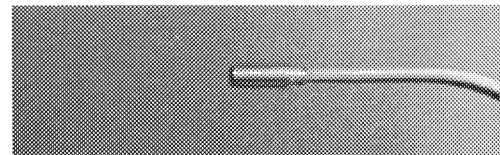


図6 ファイバーレンズ方式 (コリメートレンズ付き光ファイバー).

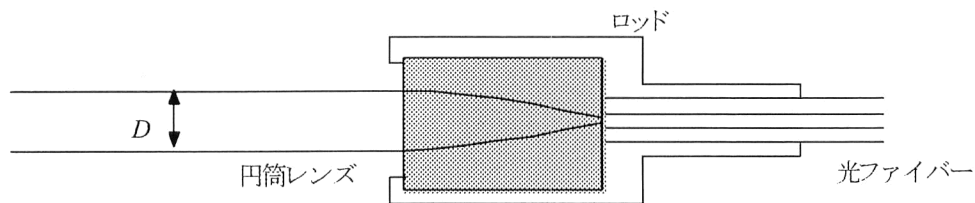


図7 コリメートレンズ付き光ファイバーの結合系.

2.2 レンズ付き光ファイバーを用いる方法

コリメート光を結合させる場合には、光ファイバー円柱状レンズと光ファイバーが一体化されたコリメートレンズ付き光ファイバーを用いると、手軽に高効率の結合を実現できます (図6)。典型的な結合損失は1 dB 弱です。ただし、図7に示すように入射されるコリメート光のビーム径が各コリメートレンズ付き光ファイバーの規格値 (逆に光を出力したときに得られるコリメート光のビーム径) と同じである必要があります。また、レンズと光ファイバーが固定されているため、ビーム光の波長に伴う焦点距離の変動に伴い、結合効率が低下することがあります。したがって、コリメート光の波長にも十分注意が必要です。

点光源から出力される光をファイバーに入れる場合には、光ファイバーの先端にレンズ効果をもたせるように加工処理が施された、先球光ファイバー、

テーパ状光ファイバーを用いると便利です。これらの光ファイバーは、加熱溶融で先端形状を変形させるか、あるいは高屈折率ガラス蒸着等の加工処理を施して作られます。典型的な結合損失は3 dB 前後です。

空間伝搬光と光ファイバーの結合テクニックが1度身につきますと何かと便利です。例えば、赤外波長域では、高出力光ファイバーアンプ等の高性能光デバイスを手軽に利用できるようになります。干渉計も光ファイバーで作ると、光ファイバーの熱膨張の影響は残りますが、振動に対して安定になります。一度挑戦されてみてはいかがでしょうか。この記事に関してのご意見は、omatsu@image.tp.chiba-u.ac.jp あるいは optics@kobe-u.ac.jp までお願い申し上げます。 (今宿 互)