

中空光ファイバの基礎

東北大学 松浦 祐司

なぜ中空?

さまざまな医療分野において、各種のレーザ光源が活用されているが、一般的な医療用レーザ光源は比較的大出力であるために、光源のサイズも大きくなる。そこで、医療現場においてレーザを各種の施術に利用する場合には、光源を床上や卓上に配置し、光源から照射対象まで光を導くシステムが必要となる。その際、いわゆる「電線」のように柔軟で自在に屈曲させることのできる光ファイバが最も有用となる。

一般的な光ファイバは石英 (SiO_2) から生成されるシリカガラスで構成されており、図1に示すように、その中央のコアと呼ばれる部分に微量のゲルマニウムなどを添加することにより、中央部分の屈折率が周囲(クラディングと呼ばれる)より高くなった構造をもつ。この2層構造のファイバの中央部分に十分浅い角度で光を入射すると、図1のようにコアとクラディングの境界面において、全反射という現象が生じ、全ての光パワーが反射され、この反射を繰り返すことにより、全く外部へ光が漏れることなく光がファイバ内を伝搬する。この現象は、屈折率の高い領域にとどまろうとする光の性質を利用して、高屈折率のコア部分に光を閉じ込めながら光を伝送していると見ることもできる。

このように光ファイバは原理的に

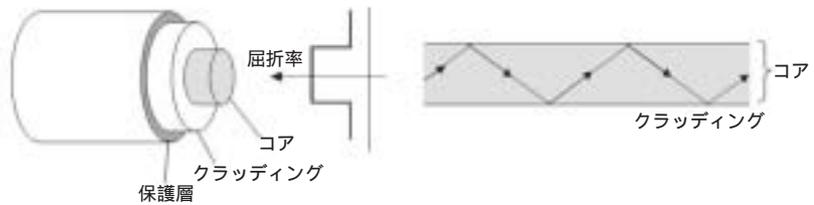


図1 ファイバの構造と光伝搬の様子

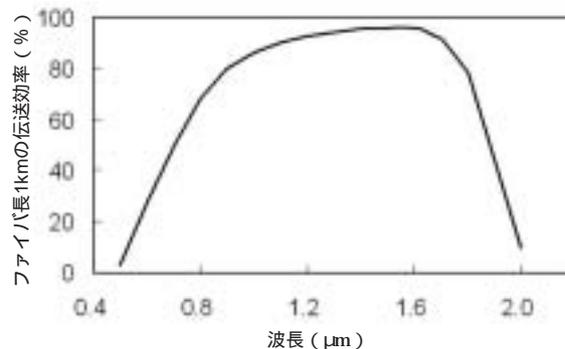


図2 石英ガラス光ファイバの伝送効率波長特性

伝送損失が生じないはずであるが、ファイバを構成する石英ガラスは、目視で透明であるように可視光ではきわめて光の透過率が高いが、波長の短い紫外光や長波長の赤外光に対しては不透明であるため、これらの波長域では光を吸収してしまいファイバとして利用することはできない。図2に石英ガラス光ファイバ(長さ1 km)の伝送効率の波長依存性を示す。この石英ガラスをファイバは、光通信に用いられる波長 1.6 μm 付

近では、長さ 1 km あたり 95% 以上ときわめて高い値を示すが、石英ガラスの透過波長域はおよそ 0.3 μm から 2.1 μm の可視から近赤外の領域に限定されこの波長域の外では、ファイバは長さ数十 cm といった短い距離でも光を伝送することは不可能である。

医療用途においては、赤外波長域の炭酸ガス(CO_2)レーザ(波長 10.6 μm)やエルビウムヤグ(Er:YAG)レーザ(2.94 μm)が有用である。

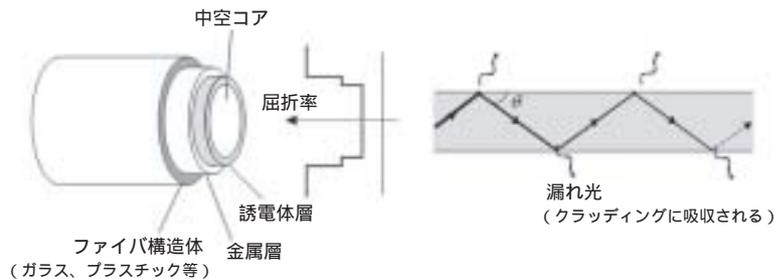


図3 中空光ファイバの構造と光伝搬の様子

これは赤外光が生体組織の水分に強く吸収される性質を持つためである。レーザが吸収される際に発生する局所的な熱により組織が蒸発するため、これらのレーザはレーザメスや歯牙切削などに用いられる。しかし、前述のように、一般的な石英ガラスファイバは利用できないため、石英以外のさまざまな材料で構成された特殊光ファイバが開発されてきたが、耐久性や安全性に問題があり、決定的なものは存在していなかった。

そこで赤外光に対してきわめて透明性の高い「空気」をコアとして光を伝送しようとするものが中空光ファイバである。中空光ファイバは図3にその構造を示すように細管状をしており、通常の光ファイバとは対照的に、屈折率の低い空気（屈折率 ≈ 1 ）をコアとし、高屈折率の誘電体や金属でクラディングを構成したものである。そのため、コアとクラディングの境界面では全反射が生じず、光のエネルギーの一部は反射時に外部に漏れながらコア内を伝搬する。しかし、伝送する光の波長においてファイバ内面での反射率を高めて、ほぼ100%に近づけることができれば、中空光ファイバにおいても低損失伝送が実現可能となる。また、空気は赤外光だけでなく、より波長の長いテラヘルツ光や、可視光より波長の短い紫外光やX線に対

しても高い透明性をもつために、中空光ファイバは通常の石英ガラスファイバでは伝送が難しいあらゆる波長域の光伝送に対応できる。

2 中空光ファイバの構造と製法

伝送効率の高い中空光ファイバを得る方法として、高い反射率を示す金属を用いてファイバを構成することが考えられる。これは内部が鏡面である筒状の伝送路の内面で光が反射しながら伝搬するようなイメージである。しかし、赤外波長域においては、金などの金属でも十分に高い反射率は得られない。そこで金属の表面上に、赤外域で透明な誘電体の薄膜を増反射コーティングとして形成することが有効である。金属板の表面に薄膜を形成すると、ある特定の波長の光に対して、薄膜の表面で反射する光と、薄膜と金属板の境界面で反射する光とが互いに強めあうような光の干渉効果が生じる。この結果、金属板のみの場合と比較して、より高い反射率を得ることができる。そこで、伝送しようとする光の波長において、適切な厚さの膜を金属管の内面に形成することにより、ファイバ内面での光の反射率を増大させ、結果としてファイバの伝送効率を上昇させることができる。

ファイバの製作工程は、銀薄膜形



図4 銀成膜装置の概略図

成とその表面への誘電体成膜工程の2つに分けられる。母材として使用するガラスチューブは内径0.3~1.0mm程度で、ガラス肉厚は30~50 μm 程度である。摩擦や衝撃により薄いガラス層に損傷が生じないように、チューブ外面にはポリイミドやアクリル樹脂の保護層が形成されている。その細い径と薄いガラス肉厚により、これらのチューブは高い柔軟性を持ち、内径0.3mmのものであれば曲げ半径1cm程度までの急峻な曲がりを加えることができる。

はじめにガラスチューブの内面に銀薄膜を形成するが、これは図4に示すように、硝酸銀水溶液と還元剤溶液をチューブ内に注入することにより、銀を還元させてガラス表面に析出させる銀鏡反応を利用する。ファイバが低損失となるためには、生成した銀薄膜の表面粗さが十分に小さくなることが必要であり、そのための前処理、液の流入速度、反応温度・時間が重要なパラメータとなる。適切な条件のもとで生成された銀薄膜の表面粗さは数ナノメートル程度

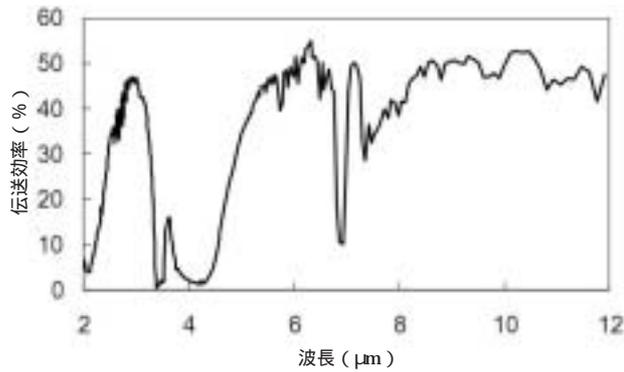


図5 中空光ファイバの伝送効率波長特性

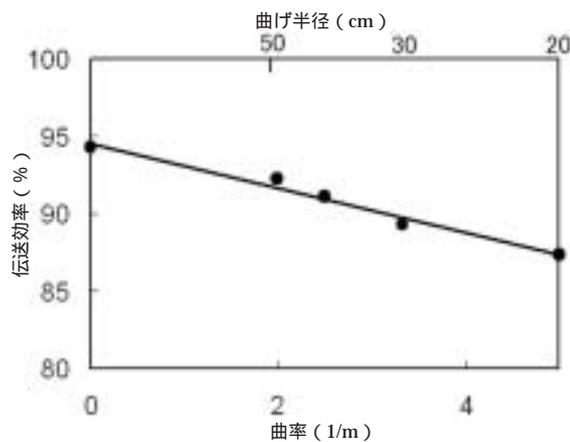


図6 中空光ファイバ(内径0.7 mm 長さ1 m)のCO₂ レーザ光伝送効率



図7 歯科用 Er:YAG レーザシステム

(二乗平均値)となり、きわめて平滑な金属薄膜が生成される。

銀薄膜の表面に反射率を増強させるために形成する誘電体薄膜としては、銀の表面をヨウ化させヨウ化銀を形成する方法¹⁾や、赤外波長域で透明性の高い樹脂を形成する手法²⁾などがある。樹脂としては、耐熱温度が150 以上と比較的高く、可視から中赤外の広い波長域にわたって透明な環状オレフィンポリマー(COP)などが主に用いられる³⁾。溶剤で希釈したポリマー溶液をチューブ内に流入させた後、加熱・乾燥を行うことで一様な薄膜をチューブ内面に形成することができる。

図5は上記の手法で製作した、内径7 mm、長さ1 mのCOP中空光

ファイバの中赤外域における伝送効率のスペクトルである。波長7 μm付近にポリマーの吸収に起因する効率のディップが見られるものの、CO₂ レーザ波長の10.6 μmには目立った吸収は見られず、レーザの伝送には影響が小さいことがわかる。一方、波長2 μmおよび4 μm付近に見られる効率の低下はポリマー薄膜における光の干渉効果によるものであり、その波長およびピーク形状からファイバ内壁のポリマー薄膜の膜厚を知ることができ、このファイバはポリマーの膜厚が0.9 μmであると推測される。このポリマー薄膜における干渉効果により、波長10.6 μmにおける伝送損失が低減されている。

図6はCO₂ レーザ光を内径0.7 mm、長さ1 mのCOP中空光ファイバに入射して測定した伝送効率である。直線状態の伝送効率は95%程度と図5と比較して高くなっているが、これは入射条件の差によるものである。図5の測定では拡がり角の大きいランプ光を光源として用いているため、ファイバ内には伝搬角(図3中の q)が大きな高次モードと呼ばれる光が多く入射する。このモードでは、ファイバ長さ当たりの反射回数が増大するとともに、ファイバ内面での反射率が低下するために、伝搬光の損失が非常に大きくなる。一方、レーザ光を光源とした場合、伝搬角が小さく伝送損失が小さな低次モードがファイバ内に数多く励振

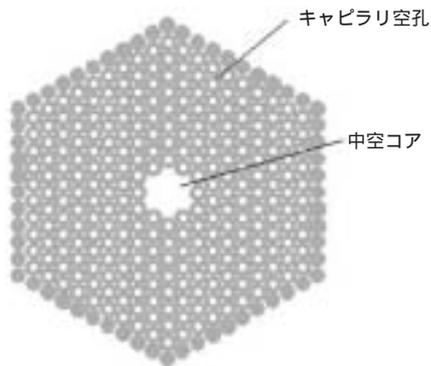


図8 フォトニックバンドギャップ中空光ファイバ

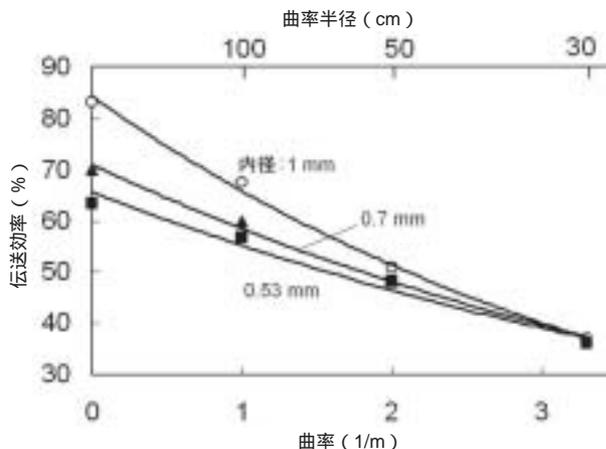


図9 アルミニウム中空光ファイバ (長さ 1 m) の ArF エキシマレーザ伝送効率

される。また図6に示すように、ファイバの伝送効率は曲率の増加とともに低下する。これはファイバの曲がりによって、ファイバでの伝搬角が増大するため、上記と同じ理由で現れる現象であり、この曲がり損失は中空光ファイバの重要な特徴のひとつである。しかし、曲げ半径 20 cm (曲率 5m^{-1}) においても伝送効率は 87% と高く、実用に十分な低損失性を持っていることが確認された。特に冷却を施さなくても本ファイバは 100 W 程度の CW レーザ光の伝送が可能であり、医療用途としての高いポテンシャルを有している。また、本ファイバはレーザ医療機器を中心に実用化が進んでおり、図7に示す市販の歯科用 Er:YAG レーザ装置では、ハンドピース出射端においてパワー 350 mJ、繰返周波数 20Hz 程度のパルスレーザー出力が得られている⁴⁾。

3 さまざまな中空光ファイバ

3.1 フォトニックバンドギャップファイバ

近年、光デバイスとして各種のフ

ォトニック結晶が提案されるとともに、中空コアとフォトニック構造をもつクラディングの組み合わせにより、コア内に光の閉じ込め作用をもたせる各種のファイバが提案されている。代表的な例としては、図8に構造を示すようなものがあげられる⁵⁾。これは多数のガラスキャピラリを六角形上に組み上げたものを加熱融着し、その後の線引きによりファイバ状としたものである。2次元的に配置された空孔によるフォトニックバンドギャップにより、目的とする波長域の光を中空コア内に閉じ込め、ファイバ軸方向へ伝搬させることができる。

これらのファイバの導波原理は前述のパワー伝送用のファイバと同じであり、フォトニック構造を用いることにより、特定の波長域においてファイバ内面の反射率を 100% に近づけるものである。理想的なフォトニック構造であれば反射率は完全に 100% となり、材料吸収、分散ともにほぼゼロである空気をコアとする超低損失な伝送路が原理的には実現可能となる。ただし、現状ではおもに構造不整により反射率が低下し、ファイバ

外部への漏れ損失を生じ、伝送損失は大きなものとなっている。多くの研究グループ、企業がこれらのフォトニック構造をもつファイバの開発を始めており、今後は、医療分野での応用が急速に発展する可能性をもっている。

3.2 エキシマレーザ伝送用アルミニウム中空光ファイバ

中空光ファイバは上述した赤外光のみでなく、あらゆる波長の光を伝送することが可能である。波長 350 nm 以下の紫外領域で発振するエキシマレーザは、その高い光子エネルギーを生かした非熱的アブレーション作用による眼科治療、またはバイオ応用における遺伝子操作などに使用されている。エキシマレーザはガラス材料の紫外吸収や、それに起因する多光子吸収や色中心の生成による伝送特性の劣化のため、通常の石英系ガラスファイバでは安定して高エネルギーパルスを送送するのは難しい。

そこでガラスキャピラリチューブの内面に、紫外域で高反射率を示すアルミニウムの薄膜を形成した中空光ファイバが開発されている。ファ

イバの製作方法としてはMOCVD法(有機金属気相成長法)により、ガラスキャピラリ内面に一様なアルミニウム薄膜を生成する。

図9はこの方法により製作したさまざまな内径のアルミニウム中空光ファイバ(長さ1m)のArFエキシマレーザ(波長193nm)に対する伝送損失の測定結果である。使用レーザの出力は8mJ、パルス繰返周波数は100Hzであり、レーザ伝送の際には、空気による吸収を抑えるため、ファイバ中に不活性ガスを流入させながらレーザ光を伝送している。

3.3 短パルスレーザ伝送用中空光ファイバ

QスイッチNd:YAGレーザは、10MW以上といった非常に高いピークパワーが得られ、その基本波(波長1.06 μm)や第2高調波(0.53 μm)、第3次高調波(0.35 μm)によるアブレーションを利用した応用が展開され、医療用途としては特に皮膚科応用におけるシミ・アザの除去のほか、さまざまな分野で使用されている。これらのレーザの波長域は石英ガラスの透過域に存在するが、QスイッチNd:YAGレーザの高ピークパワーパルスを送る石英ガラスファイバに入射すると、ガラスにおける非線形光学効果による自己集束現象が原因とな

り、ファイバのコアや端面の破壊を招いてしまうことがある。そこで中空光ファイバが有望な伝送路となり得る。さらにコアを真空化することによりレーザ光の焦点における空気の絶縁破壊を抑制し、ピークパワー約18MWの伝送に成功した例も報告されている。

またフェムト秒パルスをもちいた実験では、パルス幅196fs、パルスエネルギー700 μJ 、繰返し1kHzのパルスを内径1mmの中空光ファイバによって伝送している。伝送損失は0.15dB/m程度、ファイバ伝送後のパルス幅は213fsであった。石英光ファイバ中をフェムト秒パルスが伝搬すると、ガラスの非線形性によりガラスファイバ伝送中にパルスが延伸してしまため、通常ファイバによる伝送が困難であり、中空光ファイバがフレキシブルな伝送路として利用されれば、その応用範囲は飛躍的に拡大されることが期待される。

4 まとめ

高屈折率のガラスコア中を光が伝搬する通常ガラス光ファイバとは、伝送メカニズムや構造が全く異なる中空光ファイバは、石英ガラスファイバが伝送できない波長域の光やきわめて短いパルス光の伝送が可能で

ある。中空光ファイバは伝送損失が比較的大きいため、長距離伝送には不向きだが、必要とされるファイバ長が数メートル程度である医療用途では、その高耐久性や安全性などからさまざまなアプリケーションへの応用が考えられる。また、空気はほとんどあらゆる波長の電磁波に対して透明であるため、光ファイバが存在しないX線やテラヘルツ波といった極端波長域の電磁波の伝送も可能であり、これらの医療応用においても中空光ファイバは有効な伝送路となり得るものである。

参考文献

- 1) T. Abel, *et al.*: Opt. Lett., 19, 1034 (1994)
- 2) Y. Kato, *et al.*: Electron. Lett., 31, 31 (1995)
- 3) Y. Abe, *et al.*: Opt. Lett., 25, 150 (2000)
- 4) (株)モリタ製作所カタログ
- 5) J. C. Knight, *et al.*: Science, 282, 1476 (1998)

まつうら・ゆうじ

東北大学 大学院医工学研究科、工学部電子・情報系 教授、工学博士



-入門者のためのレンズ・ミラー、光学部品解説-

基礎からわかる光学部品

◆体裁：A5判 約290頁 ◆定価：3,465円(本体3,300+税)

◆著者：中村 荘一、藤江 大二郎