

# PRISMで 中空コアファイバをシングルモードに

ジョン M. フィニ、ジェフリー W. ニコルソン

「改良シングルモードに向けた摂動共鳴」(PRISM)アプローチにより設計された中空コアファイバは、基本モードを低損失で伝搬しながら高次モードを激に減衰させる。

中空コアファイバ(HCF)は、劇的な影響を与える可能性があるために、興味深い技術となっている。ある意味で、理想的な導波路であり、光が導波材料との相互作用から逃れて自由空間を伝搬できるようにしながら、逆説的ではあるが光を制御する。コア材料を除去することで様々なシステムで画期的なパフォーマンス上の利点を提供する。通信リンクあるいは高精度計測システムでは、HCFは光の非線形性を取り除き、基本的なノイズ限界を格段に向上させる。低遅延システムでは、最小伝搬遅延が保証される。センサでは、全光出力で試料およびその他の関心対象物を捉えることができる。

これら質的利点は、HCFにいくつかの課題があるため、実施するのが難しいことが分かっている。実用面では、HCFは標準的なファイバと比べると製造も接続も難しい。より基本的な点では、ほとんどのHCFはシングルモードではなく、ファイバの損失は2005年の報告にある1.2dB/kmの記録を破るに至っていない。通常のHCFでは、これらの課題はトレードオフの関係にあり、シングルモードにしようとする損失が増えることになる。

## シングルモード、低損失HCFへ

先頃、OFS研究所の研究チームは、これまでにないクラスのシングルモー

ド化したHCFを実証した。これは、損失と伝搬モード数という通例のトレードオフの影響を受けない<sup>(2)</sup>。研究チームはシングルモード動作が不可欠な様々なアプリケーションで、ソリッドファイバに即座に置き換えられる初のHCFを発表した。それはシングルモード動作が必須であるアプリケーションの現状の損失や接続性に対しても許容できるものとなっている。用途の一例としては、データセンタの低遅延ファイバがある。そこでは、短距離リンク

なので現状のHCFの損失も許容できるが、不要なモードは直ちにファイバから除かれなければならない。

今日までに製造されたほぼ全てのHCFは、シングルモードにほど遠い。高次モード抑圧を全くしていない従来の20m長19セルHCFから得たビームプロファイルは、複数の高次モードのコヒーレントビートによって著しく歪められている。

さらに、基本モードと高次モード間の位相変動により、時間的にも波長的にもビームプロファイルが不安定になる。モード状態を計測する最先端の技術が最近開発されており、従来のHCFにおける問題の困難さを数量化できる

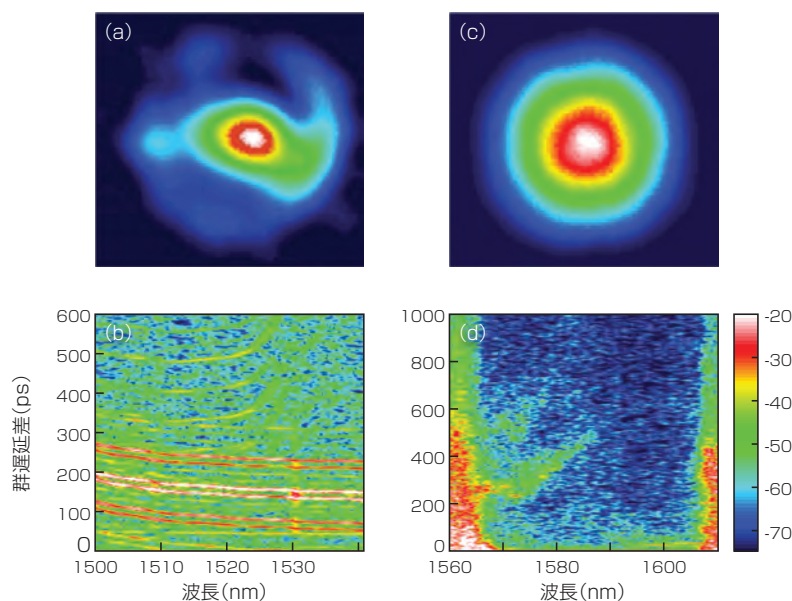


図1 (a)従来の低損失、19セル中空ファイバ20mを通した後のビームプロファイルは、高次モードによる歪が見られる。(b)19セルファイバのスペクトログラム(分光写真)は、波長と群遅延差(DGD)の関数としての高次モードコンテンツを示しており、低損失波長に高次モードの数が多いことが分かる。(c)PRISMファイバからのビームプロファイル、(d)PRISMファイバのスペクトログラムは、シャントコアを使って高次モードを確実に除去し、効果的にシングルモード動作が達成された結果を示している。

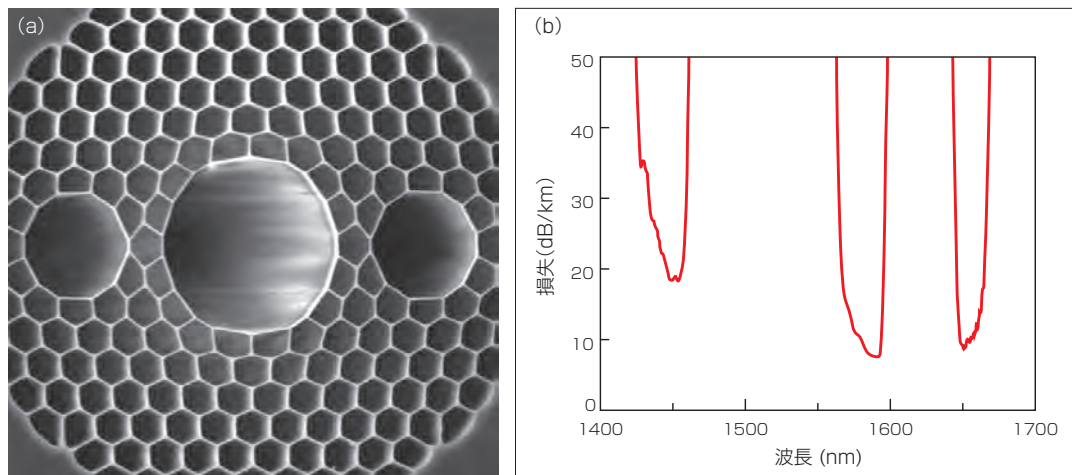


図2 (a)作製したファイバ構造のSEM画像。(b)測定した損失は、最小値7.5±0.5dB/kmを達成。

ようになっている<sup>(3)</sup>。モード干渉は別々のビートノートとして取り出し、HCFのスペクトログラムを得て(図1)、高次モード状態対波長と群遅延差(DGD)をプロットすることができる。多数の明るい線1つ1つが、個別の明確な高次モード(HOM)に対応している。

シングルモード実現のために、HOM抑圧特性を持つようにファイバを作製した(図2)。その格子(ホール間隔45μm、空隙95%)および「19セルコア」(19の格子エレメントを除去して形成)は、従来のファイバやこれまでの多くのHCFと似ている。特別な点は、一対のサイドコア、つまり「シャント」(バイパス)である。これによってコアの不要モードが外側のクラッドに染み出る。ファイバをシングルモードにするために、この漏出の選択性が強くなければならない。不要なモードは素早く消えてしまい(1dB/m程度のレート)、一方で基本モードの過剰損失は無視できる程度(例えば、1dB/kmくらい)でなければならない。

選択性の高い損失の決め手は位相整合である。コアモードは直接クラッドには浸透しないが、シャントを踏み台として使う。まずシャントモードに結合し、次いで消失させる。コアモードとシャン

トモードが一致しているならば、この二段階結合は非常に効果的である。したがって、シャントはコアモードのうち最も問題があるLP<sub>11</sub>モードと位相整合された共鳴を持つように設計されている。しかし、位相が外れて伝搬するモードでは、コアから一点で結合する光はファイバから数センチメートル進んだところでコアに戻るだけだ。シャントは、基本コアモードと位相がずれるように設計されており、したがってこのモードは本質的に結合せず、結合に関連した損失も無視できる。

大まかに位相を合わすことは簡単である、適切なシャントのサイズを選べばよいからだ。19セルコアと7セルシャントは造りやすく、コアLP<sub>11</sub>モードとの位相整合にかなり近づく。単に共鳴シャントサイズを選択するという製法は、通常のソリッドファイバなど、正確で成熟した製造プラットフォームでは容易である<sup>(4)</sup>。しかし、HCFは全く違う。製造が複雑で、固有感度があり、モデリングが難しく、ファイバ形状を明確にすることさえ難しいので、物理学の支援のない、机上の位相整合設計は無意味である<sup>(5)</sup>。したがって、HCFにはもっと強固な設計原理が必要になる。

## PRISM

1つのソリューションを「改良シングルモードに向けた摂動共鳴」(PRISM)と名付けている。ここでは、作製されたファイバはわずかに不完全、つまり位相整合を回復するために摂動が加わると、オフ共鳴となる。ファイバを曲げると、とりわけ容易であり、これはよく理解された摂動を結合共鳴に適用することである。

シミュレーションでは、個別のモードの実効屈折率を比較することで位相整合を数量化している(図3a)。シャントモード(濃い緑)とLP<sub>11</sub>(赤)はほぼ位相が合っているが、非摂動ファイバのシングルモード性を壊す程度にミスマッチがある。ファイバ曲げ半径を10cmにすると、シャントモードの実効屈折率は、明るい緑の網掛け領域内でドリフトする。したがって、4つのLP<sub>11</sub>的なモードはファイバの、あるポイントで共鳴している。ファイバ自体を曲げると、ケーブルがまっすぐになっているようなアプリケーションでは、適切なケーブル構造を用いればコントロール可能である。

## HCF有効なシングルモード動作

図1に戻ると、PRISMアプローチの

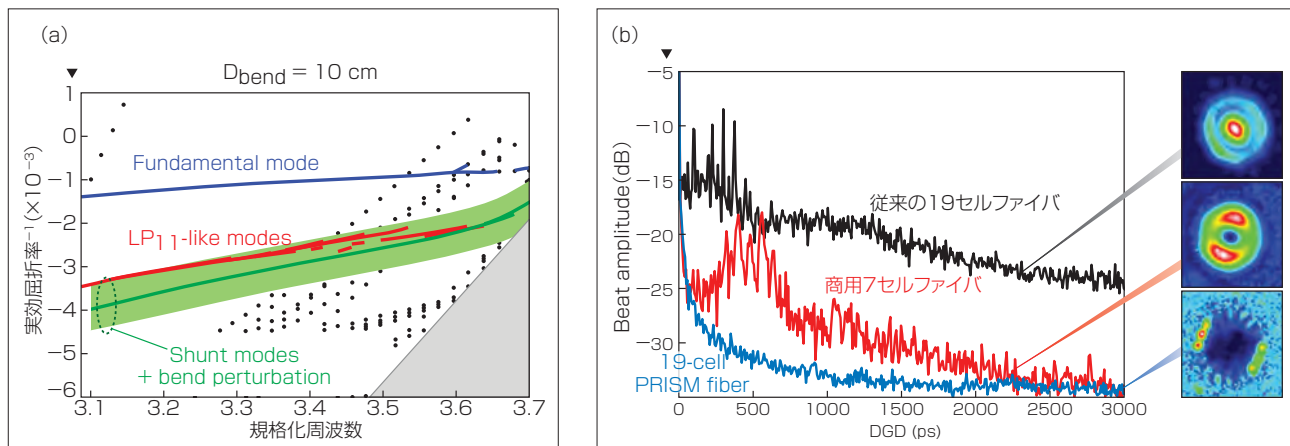


図3 計算された実効屈折率 (a)は不要なLP<sub>11</sub>的なモード(赤)が、10cmの曲げ摂動により、シャントモード(濃い緑)の摂動共鳴域(明るい緑)内で落ちていることが分かる。S<sup>2</sup>イメージング結果(b)は、19セルファイバ、商用7セルファイバ、それとPRISMファイバのDGD関数としてのモードビートを示している。右は、個々のファイバの高次モード像をまとめたもの。PRISMファイバからはコア導波の高次モードが取り除かれ、基本モードよりも27dB弱い表面モードだけが残っている、つまり効果的なシングルモード動作となっている。

効果が分かる。PRISMファイバのビームプロファイルはきれいに仕上がっており、高次モードの除去で、時間的にも波長的にもビームプロファイルは安定している(図1c)。さらに、PRISMファイバのスペクトログラムは、低損失波長の高次モードが完全に除去されていることを示している(図1d)。巻径を適切にすると、全ての高次モードの損失は、5000dB/kmであることが計測により明らかになっている。

最後に、10m長PRISMファイバのシングルモード特性と従来の19セル(損失5.6dB/km)および商用7セル中空コアファイバ(NKT HC-1550-02、損失16dB/km)とを比較した。これにはマルチモードファイバの残存高次モードを数量化するために最近開発したS<sup>2</sup>(“spatially and spectrally resolved”空間およびスペクトル分解能)技術を用いた(図3b)<sup>(6)</sup>。

S<sup>2</sup>データ解析からモードビート対群遅延、残存高次モード量と基本モードに対する相対的な力が見える。19セルの総モード量は-7.6dB(対基本モード)、7セルファイバでは-22dB、PRISMファイバでは-27dBだった。さらに、モード画像から19セルファイバと7セル

ファイバの高次モードが主としてコア導波モード(それぞれLP<sub>02</sub>とLP<sub>11</sub>)で構成されることが分かる。対照的に、コアモードはPRISMファイバでは完全に除去され、残像表面モードだけが残っている(図3b)。

これらの結果は、PRISMアプローチによってHCFの損失とシングルモードとの通常のトレードオフが克服できることを実証している。このファイバは、通常の7セルHCFよりもシングルモード性は遙かに優れており、同時に計測された損失は1590nmで7.5 ± 0.5dB/kmで、これまでに報告された7セルファイバよりも大幅に低損失になっている。

PRISMファイバの一層の低損失化が現在進められている。計測した損失は、コアウエブ形状の不完全性によるものであり、製造と設計の改善により損失を減らすことができる。実際、PRISMアプローチは現在、コア設計に幅広く適用されており、結果が示すところによるとPRISMファイバの損失は対応するノンPRISMファイバと同等レベルに下げられる。この結果は、HCFは「ステップインデックス」設計の閉じこめと機能を現実的に超えることが可能であることも実証している。構造安定性が組み込まれている限りにおいて、複雑な設計も可能である。

謝辞

著者はこの記事に対する以下の各紙の貢献、支援に感謝する。Robert S. Windeler, Eric M. Monberg, Linli Meng, Brian Mangan, Anthony DeSantolo, Frank DiMarcello, および David J. DiGiovanni

参考文献

- (1) P. Roberts et al., Opt. Exp., 13, 236 (2005).
- (2) J.M. Fini et al., Opt. Exp., 21, 6233 (2013).
- (3) J.W. Nicholson et al., Opt. Exp., 20, 20494 (2012).
- (4) J. M. Fini et al., "Bend Insensitive Fiber for FTTX Applications," OFC, paper OTuL4 (2009).
- (5) J. M. Fini, "Suppression of Higher-Order Modes in Aircore Microstructure Fiber Designs," CLEO-QELS, paper CMM4 (2006).
- (6) J.W. Nicholson et al., Opt. Exp., 16, 7233 (2008).

著者紹介

ジョン M. フィニ (John M. Fini)、ジェフリー W. ニコルソン (Jeffrey W. Nicholson) は OFS 研究所 (OFS Laboratories) 技術スタッフの著名なメンバー。www.ofsoptics.com.