

空孔コアファイバケーブル

Hollow Core Fiber Cable

武笠和則*
Kazunori Mukasa

〈概要〉

空孔コアファイバ (Hollow core fiber) は、従来の光ファイバの限界を打ち破る可能性を秘めた革新的な光ファイバである。その革新性の例は、超低損失の可能性、超低非線形性、コア内部に閉じ込められた気体との長手方向に渡る可干渉性などであり、最近、空孔コアファイバの超低遅延特性が、金融取引分野などを中心に、非常に注目されている。我々は、空孔コアファイバを低遅延伝送に用いるために、世界に先駆けて、低損失とレゾナントカップル現象により実現されるシングルモード (SM) 性を有する高性能空孔コアファイバの開発に成功している。更に、実際の低遅延伝送を実現するための空孔コアファイバコネクタや空孔コアファイバケーブルの開発にも成功した。これらの開発成果に関して、報告する。

1. はじめに

従来の光ファイバは、コアの屈折率をクラッドよりも高くすることで、全反射の原理により光を伝搬させている。一方、空孔コアファイバは、フォトリソバンドギャップ原理やアンチレゾナント原理により、99%以上の光を屈折率が~1.0の空孔コア中に閉じ込めて伝播させることが可能なため、光の実効グループインデックスは1.002程度となり、1.47程度の実効グループインデックスを有する従来のガラスコアファイバでは実現困難な様々な特性を実現することが可能となる^{1)~3)}。空孔コアファイバで実現可能な革新的特性を図1にまとめる。例えば、低信号遅延特性、低曲げ損失特性を維持したままの低非線形性など、従来のガラスコア系ファイバでは実現不可能な様々な特性が実現されることが分かる。

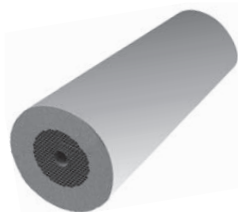
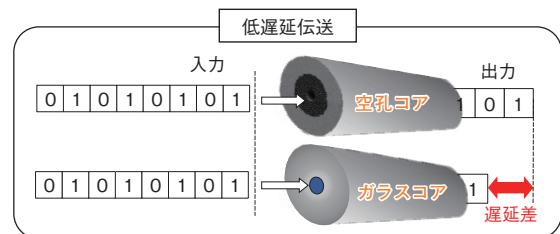


図1 空孔コアファイバによって実現される革新的特性の例
Examples of innovative characteristics achieved by HCF.

空孔コアファイバの特有原理	革新的特性
光が媒体コアではなく空孔コアに閉じ込められる	超低遅延特性
	究極の低損失の可能性
	究極の低非線形性
	超高信頼性・耐劣悪環境性
従来の全反射の理論とは異なる原理による光閉じ込め	導入気体との可干渉性
	究極の低曲げ損失特性
	特殊な分散・偏波特性

現在、それらの中でも、超低遅延特性は、金融分野の高速取引、高速コンピューティング、Beyond 5G、各種遠隔制御、データセンタ内配線などの応用から、非常に注目されている特性である^{4), 5)}。ガラスファイバでも、例えばディプレストタイプのクラッドを用いてコアを純シリカとすることで若干の改善は可能であるが、その改善率は最大でも数%程度と非常に小さい。一方で、コアをガラスコアから空孔コアにすることで、30%以上の大幅な改善が可能となる。この改善度は、リンク長が長くなるほどより顕著になる。空孔コアファイバによる遅延の改善度を図2に示す。図2から明らかな様に、1 kmを超えるリンク長では、μsオーダーの改善が実現されることが分かる。これは、金融取引などの特殊な分野だけでなく、将来、伝送遅延が致命的になり得る自動運転や遠隔医療などの分野でも重要な要求特性



リンク長	ガラスコア遅延時間	空孔コア遅延時間	改善幅
300 m	1.47 μs	1.00 μs	0.46 μs
500 m	2.44 μs	1.67 μs	0.77 μs
1,000 m	4.89 μs	3.34 μs	1.54 μs
10,000 m	48.9 μs	33.4 μs	15.4 μs

図2 空孔コアファイバによる遅延特性の改善度
Improvement of latency characteristics in HCF.

* 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

性になると考えられるため^{6), 7)}, 潜在的なニーズが極めて高い伝送路といえる。

ただし、空孔コアファイバには、その革新性だけでなく、多くの解決すべき課題も存在している。例えば、伝送損失に関しては、究極の低損失の可能性は有しているものの、現時点では従来のシリカ系ファイバと比べると、まだ大きな値になっており、プロセスの最適化などにより、さらなる低減の検討が必要である。また、多くの空孔コアファイバがマルチモード(MM)伝送になってしまうというのも、今後、多くの低遅延伝送路でシングルモード(SM)伝送が主流になると考えられる中で、大きな問題になる。空孔コアファイバには、フォトニックバンドギャップファイバ(PBGF)やアンチレゾナントファイバ(ARF)などいくつかの種類があるが、もっとも長い間検討されているのはPBGFであり、我々もPBGF構造で検討を行っている。PBGFは、光が伝搬できない波長群や角度群を形成するための規則的な配列の構造をクラッドに形成し、フォトニックバンドギャップ現象を発生させるファイバである。中心部分に不規則性構造(欠陥構造)を導入することで、空孔コアに光を入射した際にフォトニックバンドギャップ現象によってクラッドへの伝搬が禁止され、コアにモードが形成され伝搬する。PBGFの損失の主な要因は、ファイバプロセス中に熱的に発生する空気とガラスの界面の表面粗さに起因する散乱損失である²⁾。PBGFはその欠陥部分のコアがクラッド部の規則的な構造の何個分に相当するかによって、3-cell型、7-cell型、19-cell型などに分類されるが、より大きいコアの方がガラス表面とオーバーラップする光の強度が小さくなり、伝送損失が下がる方向になる。一方で、コアが大きくなるほど、より多くの高次モードが閉じ込められ、よりMMになってしまうことも知られている⁸⁾。これは、PBGFを通常の送受信機の使用を前提とした低遅延伝送路に適用するには大きな障害となる。また、低遅延伝送実使用に際しては、接続やケーブル化などの周辺技術の確立も必要になるが、それらの技術に関しても、十分に検討がなされていないという現状があった。

この様にファイバとしてのポテンシャルは高いものの、低遅延伝送路実用展開に向けては課題が多く、それらが実用化の障害となっていた。

2. 新型空孔コアファイバ、実効的SM-PBGF (PRISM-PBGF) の開発

このように、PBGFにおいては、低損失化とSM化の両立が、実際の伝送に適用する際の大きな課題となっていた。それに対して、我々は、従来の構造とは異なった、19-cellのコアを維持しながら高次モードの伝搬を抑制することが可能な新規構造を導入することにより、課題の解決を図った^{9)~11)}。この構造のSEM (Scanning Electron Microscope) 画像を図3に示す。このファイバの最大の特徴は、低伝送損失が実現可能な19-cell型コアを用いながら、センタコアの隣に7-cellに相当するサイドコア(Shunt core)を2つ有するPRISM (Perturbed Resonance for Increased Single Modedness) 構造という特殊な構造を用いていることである。この構造により、光が伝搬するセンタコアの高次モードを選択的にサイドコアにカップルさせることで伝搬

を抑制し、実効的にSM伝送を実現しているという点である。センタコアの高次モードの実効屈折率とサイドコアの基底モードの実効屈折率を合わせることで、センタコアの高次モードはサイドコアに高効率で結合するが、サイドコアは光閉じ込めが非常に弱くなるようにクラッドの端近くに配置されているので、サイドコアを伝搬することなく、効率的にリークアウトする。この新規に開発した特有原理を適用した構造により、従来のPBGFでは不可能であった実効的なSM特性が、低損失特性を維持しながら実現できるようになった。このコンセプトは、空孔コアファイバの実用化に際する大きな障害を取り除く重要、かつ斬新なコンセプトである。

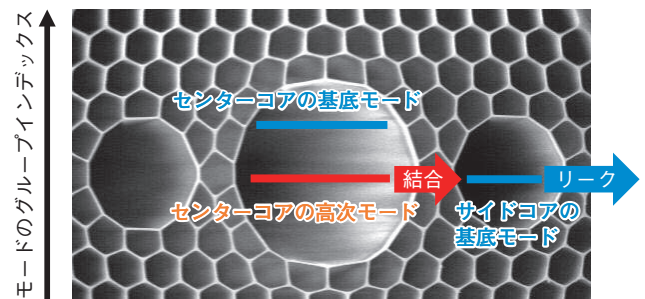


図3 新規に開発したPBGFのコンセプトを表すSEM画像
SEM image of the newly developed PBGF.

このPRISM型PBGFの作製には、非常に高度な技術が要求される。図4に作製工程の例を示すが、キャピラリと呼ばれる細いガラス管を多数用意し、これをシリカジャケット管に規則的な配列を保つように組み込み(スタックし)、その規則的な構造を保ちながら線引きを行ってファイバ化する技術が必要となる。まず、規則的な六方最密構造を、その構造を崩さないようにジャケット管に組み込んで所望の基礎構造を得ることが、PBGFにおいて所望の特性を得るための重要なプロセスとな

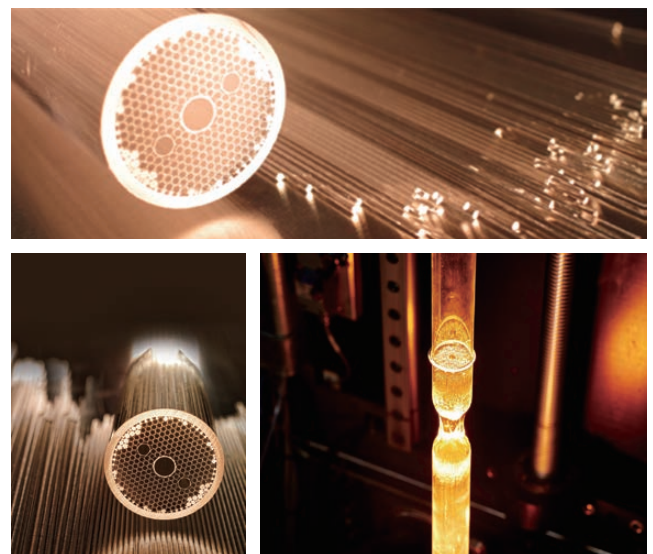


図4 新規に開発したPBGFプロセスのコンセプト図
Concept diagram of the newly developed PBGF processes.

る。クラッドの規則性だけでなく、センタコアとサイドコアを含めた規則的構造を実現する必要があり、非常に高度なプロセス技術が要求される。そして、線引き工程も良好な特性の PBGF を実現するためのキーププロセスとなる。規則正しい構造が組み込まれたこのスタック母材を溶融してファイバにする工程では、キャピラリ間の空隙を残さないようにしながら、構造歪みや構造欠陥が発生しないように規則的な構造を保ってファイバ化する必要があり、非常に高度な技術が要求される。

我々は、この高度なプロセス技術を確立し、非常に規則的で

かつ所望の特性を有する PBGF を長い条長で実現することに成功した。得られた光ファイバの断面構造と伝送損失の例を図5に示す。

上記のコンセプトのところで説明したように、我々の空孔コアファイバの最大の特長は、PRISM構造により、高次モードの伝搬が抑制されていることである。通常の 19-cell ファイバと PRISM ファイバの断面構造、およびモード特性スペクトログラム¹¹⁾とフィールド分布とを図6に示す。スペクトログラムの中のより濃い青い部分が、高次モードの伝搬が抑制されてい

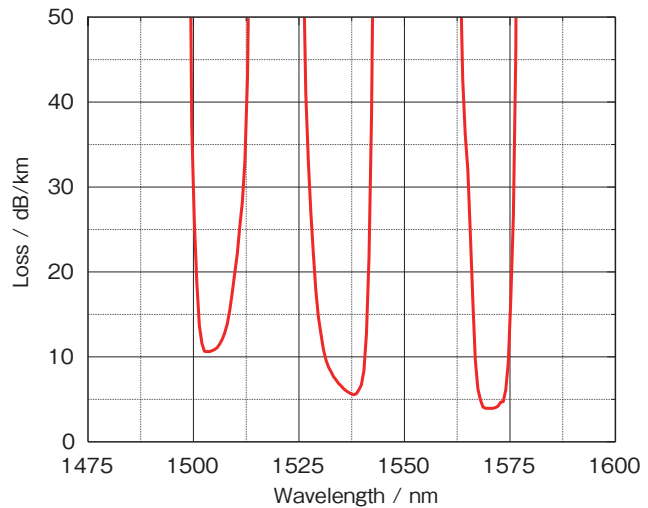
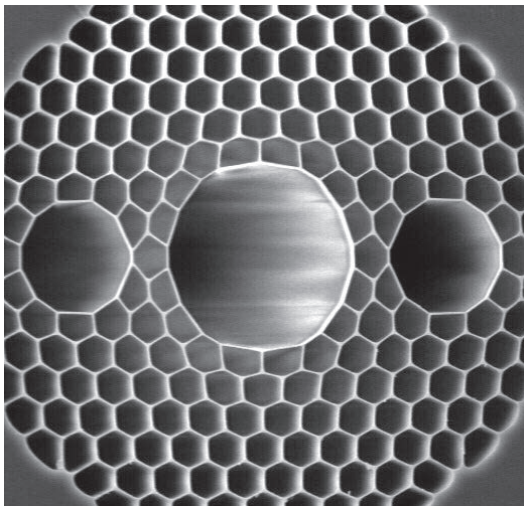


図5 新規に開発した PBGF の構造と損失スペクトルの例
Structure and loss spectrum of the newly developed PBGF.

	断面構造	高次モード特性スペクトログラムとフィールド分布の例	
従来型の 19-cell PBGF			
PRISM構造 19-cell PBGF			

図6 従来型と新規開発 PBGF のモードスペクトログラムとモードプロファイルの例
Examples of traditional and the newly developed PBGF mode profiles and spectrograms.

る部分を表しており、赤と緑の部分は、高次モード成分の多いところに相当している。図6から明らかなように、従来の19-cell型PBGFでは実現が困難であった実効的SM性を、PRISMファイバでは高次モードを効果的にサイドコアにカップルさせて伝搬を抑制することで実現できていることが分かる。これによって、フィールド分布も、従来のSMFの基底モードと同様のガウシアン形状に近づいている。よって、開発した新規構造のPRISM型PBGFが、より実用に適した特性を有していることが確認された。

我々は、さらに高次モードを抑制するために、図7に示すような6個のサイドコアを有するPBGFも開発している¹²⁾。こちらも概念は同じだが、6か所に高次モードをカップルさせるサイドコアを有しているため、曲げの方向による結合効率低下の問題を抑制し、より確実に実効的SM性を確保することが可能となる。図7に示すように、サイドコアの数を2から6に増やしても、PBGFの低伝送損失特性が維持されていることが分かった。

5 mのファイバを直径15 cmのコイルに巻いた場合の、2サイドコア型と6サイドコア型の高次モード特性の結果を図8に示す。図8から明らかな様に、2サイドコア型でも実効的SM特性が得られているが、6サイドコア型にすることで、伝送帯

における高次モード成分はさらに見えなくなっており、実際の伝送に重要な低伝送損失特性と更なるSM性の実現が可能になっていることが分かる。

実際のフィールドのケーブル敷設に際しては、空孔コアファイバは、太陽光や寒暖、機械的振動などの環境に対する耐性を有していなければならない。後述するケーブル化試作には、モード特性をさらに安定させた6サイドコア型PBGFを使用している。ケーブル試作に用いた2つのPBGFの特性を図9の左に示す。スプール状態だけでなく、ケーブル化後も損失増加は少なく、安定した低損失特性が得られている。また、分散特性も、ケーブル試作に用いたいずれのファイバも1550 nmで低い値に制御されており、低遅延伝送に好ましい特性が得られている(図9の右)。

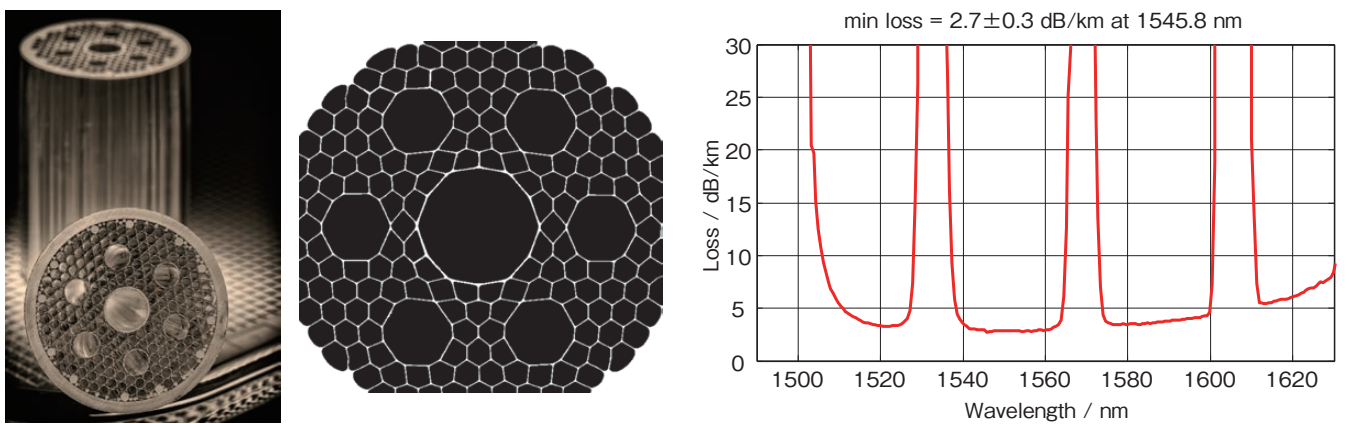


図7 6サイドコア型PBGFのスタックプリフォームとファイバの断面(左)および伝送損失特性(右)の例
Stack preform for 6-shunt core type PBGF (left) and its transmission loss (right).

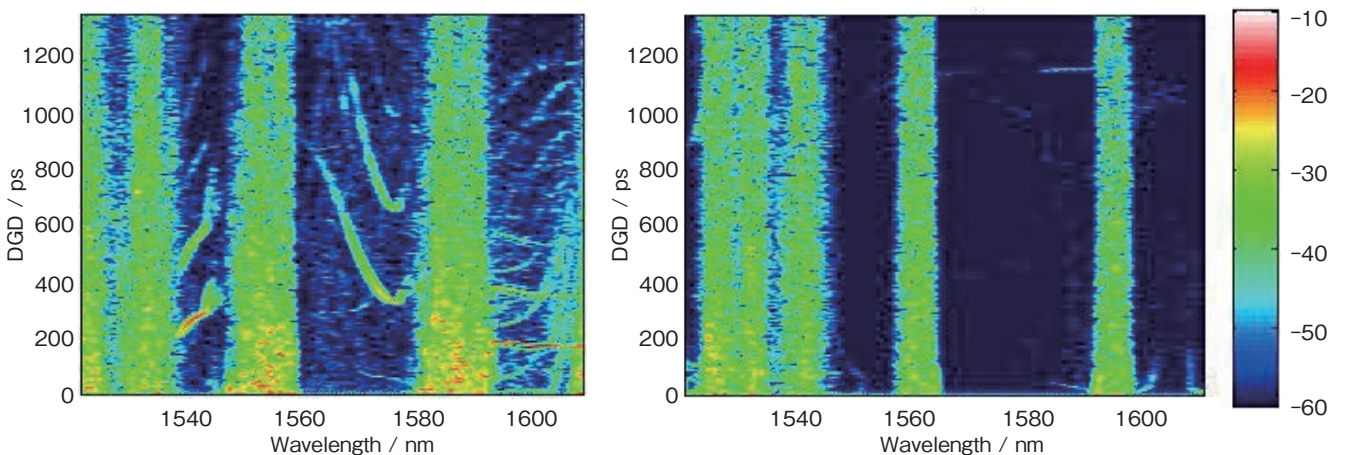


図8 2サイドコアファイバ(左)と6サイドコアファイバ(右)の高次モード特性
Mode spectrograms of 2-shunt core (left) and 6-shunt core (right) PBGFs.

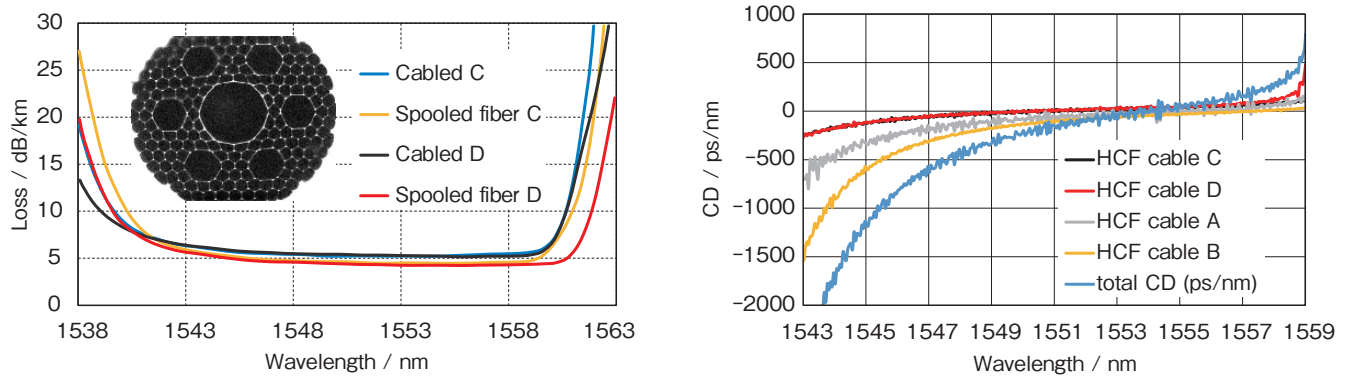


図9 ケーブル試作に用いた6サイドコア型PBGFの構造・損失の例と波長分散(CD)特性
Examples of structure and loss of 6-shunt core PBGF and wavelength dispersion characteristics.

3. 実用化に向けた関連技術の開発

3.1 PBGF コネクタの開発

空孔コアファイバの実用化に向けては、接続が重要なファクターになる。接続技術としては、融着・コネクタなどの技術が考えられる。融着に関しては、様々な検討が行われている^{13)~15)}が、PBGFと従来型SMFのフィールドミスマッチと融着時のPBGFの構造乱れのために、融着損失が高いという問題があった。また、反射損失も大きい傾向にあった。我々は、ケーブル化したPBGFで1 dB程度の融着損失を達成するまでに検討を進めている。また、現在の伝送システムへの適用を考えると、PBGFコネクタがキーコンポーネントの1つになるが、現在まではその実現は困難であった。我々は、このPBGFコネクタに関しても、世界に先駆けて開発に成功している¹⁶⁾。

コネクタには、我々の独自構造であるPRISM型PBGFを用いた。センタコアは19-cellコア構造を用いているため、伝送損失は 3.9 ± 1.2 dB/km (1571 nm)と低いうえ、実効的なSM性が実現されている。このPBGFの実効コア断面積 (A_{eff}) は200

μm^2 であり、通常ファイバの A_{eff} である $80 \mu\text{m}^2$ と比べると非常に大きい。そこで、通常SMFとコネクタ接続すると A_{eff} の違いによる結合損失が発生してしまうことが予測される。そこで、PRISM型PBGFとフラットクリープした各 A_{eff} のソリッドファイバとを物理的接合をさせた場合の結合損失を調査した。結果を図10の左側に示し、 A_{eff} が $165 \mu\text{m}^2$ 程度の際に、最低損失の0.25 dB程度の結合損失が得られることが分かった。これは円形のガウシアンモードを有する通常ソリッドファイバと、より六角形的なフィールドを有するPBGFの結合を考えると、理論限界に近い値となっている。この結果を元に、まずは A_{eff} が $165 \mu\text{m}^2$ のソリッドファイバを用いたFC/PCコネクタを作製した。反射損失を抑制するために、今回はARコーティングを施した。図10の右側には、フラットクリープされたまのファイバとARコーティングしたコネクタの反射損失を示し、ARコーティングを行うことで、1585 nmの反射損失を -42.5 dBまで抑制できることが分かった。

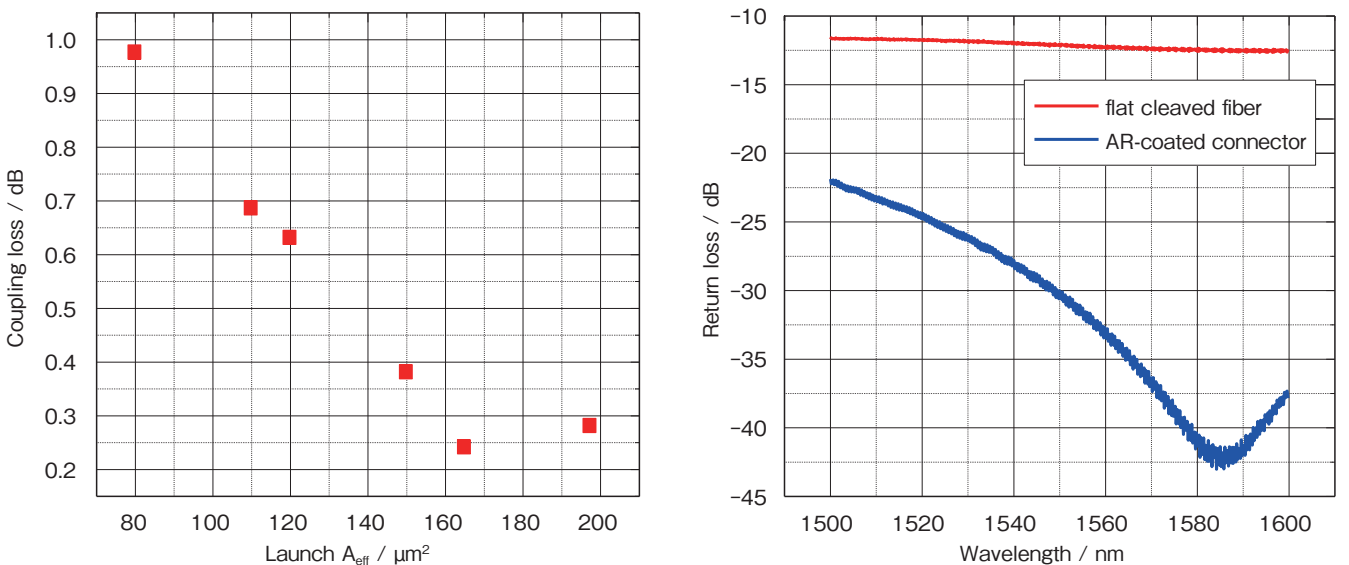


図10 PBGFと各 A_{eff} のソリッドファイバとの物理結合時の損失とフラットクリープ、およびARコーティングされたコネクタの反射損失特性
Coupling loss and connector reflection loss characteristics during physical coupling between PBGF and solid fiber.

空孔コアファイバコネクタに関しては、**図11**に示すようにFC/PCコネクタの中央空隙部に空孔コアファイバを差し込み、突き出た部分をフラットクリップして、そのファイバ端面をコネクタの表面部まで戻してエポキシ樹脂で固定して作製した。作製した空孔コアファイバコネクタは、前述のARコーティングされたAeff拡大ファイバコネクタと接合された。このような形で、200 mの両端コネクタ付き空孔コアファイバジャンパコードが作製された。特性は**図11**の右側に示す通りで、2か所のコネクタ接続を含むジャンパケーブルの挿入損失は1571 nmで1.4 dBであり、これは、ファイバ自体の損失からわずかに0.6 dB上昇しただけであった。入射方向による挿入損失のちがいが、ほとんど確認されなかった。また、1571 nmの反射損失は、ARコーティングを用いないAeff拡大(ULA)ファイバコネクタを用いない場合は、大きな反射損失になっていたのに対し、ARコーティングを用いることで、-31.3 dBと良好な結果が得られているが、PBGFの伝送ウィンドウを反射コーティングの有効波長に合わせて調整することで、更なる改善が可能である。

ARコーティングAeff拡大ファイバコネクタから空孔コアファイバコネクタへの結合損失は0.3 dB程度であり、物理接合時の0.25 dBよりはわずかに高くなったが、融着の最適化で得られている損失は0.75 dB程度であり、明らかなメリットがあ

る。また、7-cell型PBGFとSMFの斜め切断物理接合損失の記録である1.2 dB¹¹⁾と比べても飛躍的な改善となっている。よって、我々が開発した空孔コアファイバコネクタにより、実用化に不可欠な接続に関する技術が飛躍的に進展した。

3.2 PBGF ケーブルの開発

光ファイバの光学特性は、ケーブル化されると、ケーブル時に掛かる引張応力やケーブル化後の環境などによって変化することが知られている。空孔コアファイバにおいても、実際に使用されるケーブルの状態での損失、分散、PMD(偏波モード分散)などの特性を評価する必要がある。

我々は、第2章で述べた6個のサイドコアを有するPBGFを用いて、世界で初めてルーズチューブ型のPBGFケーブルを作製し、評価を行った¹⁷⁾。それぞれのケーブルは、従来型SMFとの融着接続により作製されたLC/UPCコネクタで終端された。ケーブル化後の損失増加は1544.9~1558.6 nmで0.7 dB/km以下であり、-40℃から80℃の厳しい環境試験でも問題がないことを確認している。従来ファイバと同様に、PBGFにおいてもPMD特性は重要な光学特性である。**図12**は、ツイスト線引きされていないPBGFのPMD(左)とツイスト線引きされているPBGFのPMD(右)特性を示している。線引き時にツイストされていないファイバは、スプール状態(オレンジ)とケーブル

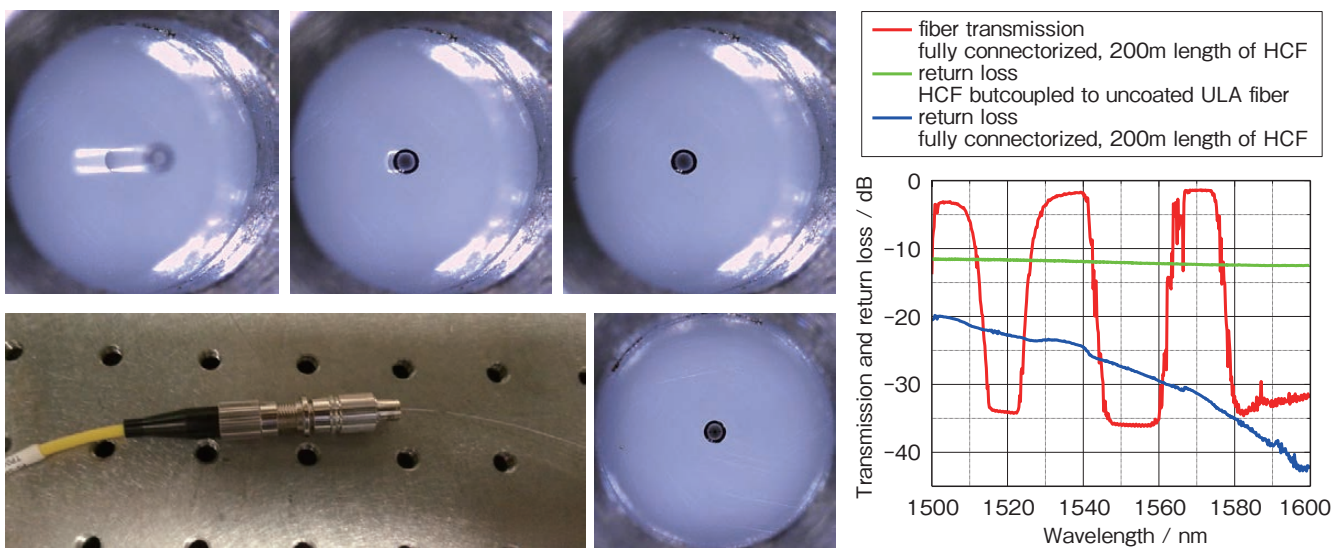


図11 PBGFコネクタの構造(左)と特性(右)
Images (left) and characteristics (right) of PBGF connectors.

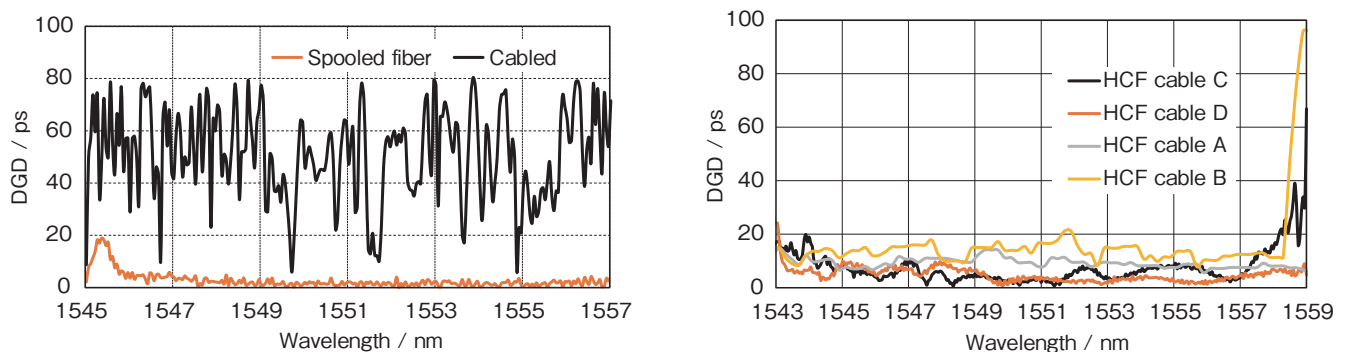


図12 ねじりを加えていないPBGF(左)と加えたPBGF(右)のPMD特性
PMD characteristics of the fiber without twisting (left) and the fiber with twisting in cables (right).

状態(黒)で測定されており、スプール状態ではファイバ同士の重なりによる偏波の結合に伴うPMD低減効果が見られるのに対し、ケーブル化されるとその効果は減少し、ファイバが構造的に持っているPMDが現れてしまう。我々は、図12の右に示すように、ファイバのビート長よりも長いピッチで線引き時に連続的にねじりを加えることで偏波結合を起こさせ、ケーブル化後もPMDを低減することに成功している。1 kmでの典型的なPMDは10 ps以下であった。

作製した空孔コアファイバケーブルの性能を評価するため、10 Gb/sのNRZ (non-return-to-zero) 信号WDM伝送を行った。1544.92 ~ 1558.58 nmの、50 GHz幅の35チャンネルを奇数チャンネルと偶数チャンネルを分けて多重化し、ブースター増幅器で増幅して空孔コアファイバケーブルに入射した。空孔コアファイバケーブルは、2本の0.59 kmのケーブルと2本の1 kmのケーブルの合計約3.1 kmのケーブルで構成され、それぞれは従来型SMFとの融着接続により作製されたLC/UPCコネクタで接続された。今回は通常モードフィールド径のファイバとの融着を含む構成にしたので、1550 nmのトータルリンクロスが30 dBだったが、前述のPBGF/大Aeffファイバコネクタを用いれば、さらなる低減が可能と思われる。伝送された信号は、増幅されてから分割され、レシーバへと送られ、特性が評価された。

得られた特性を図13に示す。図13の上側は、2つの中心付近のチャンネルと4つの端付近の波長のOSNRとBERの関係を示している。10⁻¹⁵以下のBERが1545.32 ~ 1558.17 nmの33

チャンネルで得られている。ほとんどのチャンネルは、BERが10⁻¹⁵のところ、4~5 dBのOSNRペナルティとなっており、端の方のチャンネルは6 dB程度のペナルティとなっている。図13の下側には、受信OSNRが20 dB/0.1 nmの時のBERといくつかのアイダイアグラムを示している。33のチャンネルでエラーフリー伝送(BER<10⁻¹⁵)が確認されており、平均で4.5 dB/0.1 nmのシステムマージンを確認することが出来た。また、アイダイアグラムの解析により、短波長側のペナルティは主に分散によって、長波長側のペナルティは主にPMDによって発生していることが分かった。

結果として、非常に良好な伝送パフォーマンスが、実際に試作した空孔コアファイバケーブルで確認された。よって、我々が世界で初めて実現した空孔コアファイバケーブルは、今後、実際の低遅延伝送やスーパーコンピューティングとしての使用において、良好なパフォーマンスを発揮するものと思われる。

4. おわりに

金融分野などへの展開が期待される空孔コアファイバケーブルの研究で大きな進展を実現した。独自の新規PRISM構造とファイバ作製プロセスの最適化により、空孔コアファイバの低損失化とSM化の両立に成功した。また、空孔コアファイバコネクタと、LC/SCコネクタが接続されたケーブルの開発にも成功し、低遅延実伝送路適用へ大きく前進した。ケーブル化におけるPMDの影響などを調査し、線引きプロセスでその問題を解決することで、3.2 kmの空孔コアファイバにおいて、33チャンネルのエラーフリー伝送を実現した。このような実用化に向けた包括的な研究成果は、空孔コアファイバの低遅延伝送路としての実使用に繋がっていくものと考えている。

謝辞

これらの成果は、OFSのBrian J. Mangan, Jeffrey W. Nicholson, Zhu Benyuan, Tristan Kremp, Merari Cortes, Matt Corrado, Gabe Puc, Yuriy Dulashko, Vitaly Mikhailov, Robert S. Windeler, Eric M. Monberg, Kyle Dube, Ken Marceau, Brian Violette, Donald Cartounis, Ralph Lago, Brian Savran, Tahar Irid, Robert J. Blakley, Ji Lie, Daryl Inniss, David J. DiGiovanniをはじめとする多くのメンバーの検討による成果で構成されたものである。

参考文献

- 1) P. J. Roberts et al., "Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres", Opt. Express, Vol. 13, No.1, pp.236-244 (2005).
- 2) B. J. Mangan et al., "Low loss (1.7dB/km) hollow core photonic bandgap fiber", OFC 2004, paper PD24, (2004).
- 3) T. D. Bradley et al., "Antiresonant hollow core fiber with 0.65dB/km attenuation across C and L telecommunication bands", ECOC 2019 PD.3.1, (2019).
- 4) B. J. Mangan et al., "First demonstration of hollow-core fiber for intra data center low-latency data transmission", OFC 2015, paper M3D.4, (2015).
- 5) Y. Chen et al., "Demonstration of an 11 km hollow core

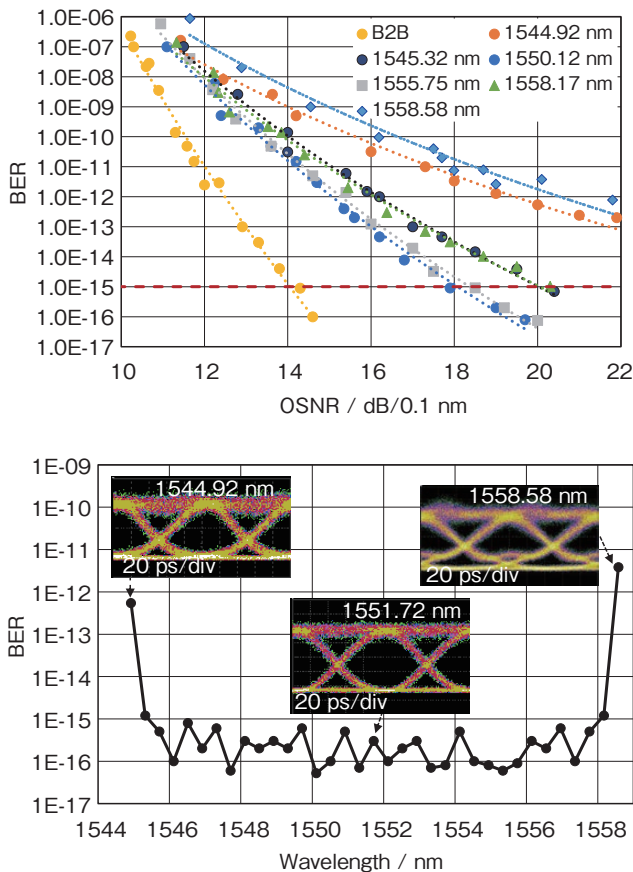


図13 空孔コアファイバの伝送特性
Transmission characteristics of HCF.

- photonic bandgap fiber for broadband low-latency data transmission”, OFC2015, paper Th5A.1, (2015).
- 6) 水島知央ら, “遠隔型自動運転システムにおける遠隔操作時の映像遅延が操舵の操作に与える影響の評価”, 自動車技術会論文集, 2019年50巻3号, pp970-976, (2019).
 - 7) 米田巖根ら, “遠隔手術を想定した映像遅延が上肢の微細な位置決めおよび押し下しに与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.1, pp61-69, (2017).
 - 8) M.N. Petrovich et al., “Robust single mode hollow core photonic bandgap fiber”, Opt. Express 16, pp4337-4346, (2008).
 - 9) J. M. Fini, “Aircore microstructured fibers with suppressed higher-order modes”, Opt. Express 14, pp11354-11361, (2006).
 - 10) J. M. Fini et al., “Low-loss hollow-core fibers with improved single-modedness”, Opt. Express, 21 (5), pp6233-6242, (2013).
 - 11) J. W. Nicholson et al., “Measuring higher-order modes in a low-loss, hollow-core, photonic-bandgap fiber”, Opt. Express 20, pp20494-20505, (2012).
 - 12) B. J. Mangan et al., “Single mode, polarization maintaining hollow core fibre with significantly improved higher order mode reduction”, ECOC 2015, Mo.3.1.2, (2015).
 - 13) F. Couny et al., “Reduction of Fresnel back-reflection at splice interface between hollow core PCF and single-mode fiber”, IEEE Phot. Tech. Letter 19, pp1020-1022, (2007).
 - 14) L. Xiao et al., “Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: Microhole Collapse Effect”, J. Lightwave Technology 25, pp3563-3574, (2007).
 - 15) K. Z. Aghaie et al., “Optimization of splice loss between photonic-bandgap fibers and conventional single-mode fibers”, Opt. Lett. 35, pp1938-1940, (2010).
 - 16) J. W. Nicholson et al., “Low-loss low return-loss coupling between SMF and single-mode, hollow-core fibers using connectors”, CLEO Applications and Technology, paper JTu4A, (2014).
 - 17) B. Zhu et al., “First demonstration of hollow-core-fiber cable for low latency data transmission”, OFC 2020, paper Th4B.3, (2020).