

空孔コアファイバの実用化の研究

Studies for Practical Applications of Hollow Core Fibers

高木武史*1 武笠和則*1 高畑慶大*1 津軽誠一*1 新子谷悦宏*1 Kazunori Mukasa Takeshi Takagi Keita Takahata Yoshihiro Arashitani Seiichi Tsugaru 中野仁志*2 細井英昭*2 高岡隆治*2 田邊明夫*2 Hitoshi Nakano Hideaki Hosoi Rvuii Takaoka Akio Tanabe Tristan Kremp *3 Brian J. Mangan *3

〈概要〉

空孔コアファイバ (Hollow core fiber) は、低遅延、低損失、低非線形性、環境耐性などの観点で、 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として注目されている。我々 は、独自構造による空孔コアファイバのSM化と低損失化の両立、コネクタ化、ケーブル化などに世 界に先駆けて成功をし、古河電工時報第140号で、これらの開発成果に関して報告を行った¹⁾。その 後、さらに、実用化を促進するために、空孔コアファイバの信頼性試験、融着条件の最適化、および ケーブル敷設試験、応用評価実験などを行ったので、それらの結果を報告する。

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 る事で、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、フォトニックバンドギャップ原理やアンチレ ゾナント原理により、光を空孔コア中に閉じ込めて伝播させる ことが可能なため、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^{2)~4)}。空孔コアファ イバで実現可能な革新的特性を図1にまとめるが、例えば、低 遅延特性、低非線形性、低散乱・吸収損失など、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ている ことが分かる。従来のガラス系ファイバの根本的な限界がいよ

	空孔コアファイバの 特有特性	革新的特性
0	光が 媒体コアではなく 空気コアに 閉じ込められる	超低遅延特性
		究極の低損失ポテンシャル
		究極の低非線形性
		超高信頼性·耐劣悪環境性
		導入気体との可干渉性
	従来の全反射の 理論とは異なる 原理による 光閉じ込め	究極の低曲げ損失特性
		特殊な分散・偏波特性

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.

*1 研究開発本部 フォトニクス研究所

*2 ファイバ・ケーブル事業部門 光接続機器部

*3 OFS Laboratories

いよ真剣に議論されてくる中で,空孔コアファイバの注目は非 常に高まっている。

空孔コアファイバの低遅延特性を活かした応用検討は、現在 までに非常に盛んに検討されてきたが5),6),近年,超低非線形, あるいは高パワー耐性を活かした応用の検討も盛んになってき ている。その適用例の1つとして、次世代アクセス分野への適 用が検討されている。図2にその構成の一例を示すが、将来に おいては256以上の分岐数を有する多分岐PONシステムなど が適用されると考えられる。また、将来、情報の伝送だけでな く、例えば、IoT機器の充電など、電力も光で伝送する応用が 増えてくると想定されている。そのような応用を考えると、伝 送路に入力されるパワーはけた違いに大きくなることが想定さ れるため、従来の光ファイバで伝送をすると、非線形現象よる 信号品質の劣化やファイバヒューズによるファイバの損傷など の懸念が発生する。一方で、伝送路に極めて非線形性の低い空 孔コアファイバを用いれば、これらの課題を解決することが可 能であり、新システムの構成の自由度が大幅に広がる。そのい くつかの例を、第3章で報告する。





実用化に向けた課題の解決 [古河電工時報第140号より]

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、空孔コアファイ バのシングルモード化や周辺技術の向上がその一例となる。古 河電工時報第140号で、これらの開発成果に関して報告を行っ たが¹⁾、改めてその成果を簡単に述べる。

まず、シングルモード化に関しては、フォトニックバンド ギャップファイバ (PBGF) に従来の構造とは異なる、PRISM (Perturbed Resonance for Increased Single Modeness)構造と いう新規構造を適用することにより、低損失化とシングルモー ド化の両立に成功した⁷⁾。図3に、新規PBGFのモードスペク トグラム特性と損失特性、および構造を示すが、シングルモー ド性、低伝送損失の両面で、良好な特性が確認できる。

また、空孔コアファイバの実用化に向けては、ファイバ以外

に、接続やケーブルなどの周辺技術の高度化も重要なファクタ になる。接続技術としては、融着やコネクタなどの技術が考え られるが、PBGFコネクタに関して、世界に先駆けて開発に成 功した⁸⁾。また、世界で初めてルーズチューブ型のPBGFケー ブルを作製し、良好な特性を確認した⁹⁾。

作製した空孔コアファイバコネクタの構造と特性を図4に示すが、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、かつ1571 nmの反射損失-31.3 dB、と良好な結果が得られた。

さらに,SMFと融着接続されたLC/UPCコネクタを両端に 有する空孔コアファイバケーブルも作製した。ケーブルの構造 と特性を図5に示すが,ケーブル化後も,損失,分散,PMD(偏 波モード分散)のいずれも良好な特性であることを確認してい る。さらに,この空孔コアファイバケーブルの伝送特性も評価 し,こちらでも良好な特性を確認した。









図4 PBGFコネクタの構造(左)と特性(右) Images (left) and characteristics (right) of PBGF connectors.



図5 空孔コアケーブルの構造と損失,分散,PMD特性 Examples of structure of 6-shunt core PBGF cable, loss, wavelength dispersion and PMD characteristics.

3. 空孔コアファイバ実用化に向けた検討

これらの研究成果により,空孔コアファイバの実用化に向け て大きく前進したが,実使用に向けては,まだいくつかの課題 があった。それらに関して,さらなる検討を行ったので,その 結果を報告する。

3.1 空孔コアファイバの信頼性試験

空孔コアファイバは、上述のシングルモード化実現を契機に 実用化が大きく加速しているものの、まだ新しいファイバとい うことで、伝送損失や分散、PMDなどの光学特性に注目され がちである。しかし、実際の社会実装に向けては、それらの光 学特性と合わせて、マクロ/マイクロベンド損失特性や機械強 度特性などの信頼性試験特性が重要である。そこで、これらの 信頼性試験をほぼ同じファイバ径/被覆径を有する最適化され たフォトニックバンドギャップ型の空孔コアファイバ(PBGF) とアンチレゾナント(反共鳴)型の空孔コアファイバ(ARF)で 行った¹⁰⁾。

まず、マクロ/マイクロベンド測定の結果を図6に示す。マ イクロベンド損失は、従来ファイバで広く用いられている固定 ドラム法(JIS C6823規定)で測定を行った。PBGFに関しては、 マクロベンド損失はITU-Tの厳しい曲げ損失規格であるG.657 A2規格にかなり近い特性を有しており、マイクロベンド損失 も海底用 Aeff拡大ファイバと同程度のレベルに抑制されてい るが、ARFでは比較的大きなマクロ/マイクロベンド損失に なっていることが確認された。よって、PBGFに関しては、現 在の構造でも現状の使用に近い形態で使用できる可能性がある が、ARFに関しては、使用の形態などを新規に考える必要性 が出てくる可能性もある。もちろん、現在のPBGFとARFの 構造が、マクロ/マイクロベンド損失の観点で必ずしも最適化 されている訳ではないので、この結果だけで結論が出されるわ けではないが、実用に際しては、これらの特性も十分に考慮し ていく必要があることは間違いない。引き続き、これらの点も 踏まえた最適化検討を行っていく予定である。



Macro-bending loss (upper)/Micro-bending loss (lower) properties of 2 types of hollow core fibers.

また,光ファイバの強度に関しても,実用化を考えると非常に 重要な要素となる。そこで,光ファイバ素線の強度評価の手法 として広く用いられている,引っ張りによる動的疲労係数測定 (IEC60793-1-B7A規定)の評価を行った。ほぼ同じ外径の2種 類の空孔コアファイバ(ARFとPBGF)を用いて,0.025 %/min, 0.25 %/min,2.5 %/min,25 %/minの引張強度で湿熱試験 (85℃ 85%Rh 720 h)前後での動的疲労係数測定を実施した。 ガラスの断面積を考慮に入れた湿熱試験前の疲労係数(n値)は 29.2 (PBGF)と26.1 (ARF),湿熱試験後は22.7 (PBGF)と23.6 (ARF)と通常のガラスコアファイバと比べても遜色ない結果 を確認した。さらなる追加試験や構造を変えた場合の体系的な 検討なども必要になってくるが,実用化を考えると非常に重要 な結果である。

3.2 空孔コアファイバの融着接続特性

空孔コアファイバの実用化に向けては、古河電工時報140号 で報告したコネクタ接続技術と合わせて、融着接続技術が重要 になる。さらに、融着技術に関しては、空孔コアファイバ同士 の融着と合わせて、空孔コアファイバとガラスファイバの融着 の技術開発が必要になる。同種空孔コアファイバの接続として は、T. Krempらの報告が一例としてある¹¹⁾。この論文では、 サイドビュー回転調心などの融着条件だけでなく、均一な放電 熱分布を有するFitel[®] S185PMROF 融着機という適切な融着 機を用いることで、中央値で0.13 dBのARF同種融着損失を実 現した結果が報告されている。我々は、このような適切な融着 機を用いるということも重視して、融着に関する研究開発を 行っていることも重要な点である。

また、空孔コアファイバとソリッドファイバの融着に関して も、研究開発を進めている。ソリッドファイバとの融着は、ソ リッドファイバと溶融の仕方が異なることで適切に接合する難 しさがある。また、同種融着でも同様であるが、空孔コアファ イバの融着に関しては、融着時の放電の際に、空孔コアファイ バの構造が乱れて、非常に大きな損失が発生するという課題が ある。図7に特に融着機や条件を最適化せずに融着を行った場 合の、側面、及び断面の構造例を示す。下記に示すように、最 適化をしないまま融着放電を行うと、構造がつぶれたり、中の 構造体が一部、あるいは全部消失したりして、例えば5 dB以 上の非常に大きな融着損失が発生することが分かった。

そこで、接続対象のガラスファイバ、融着機と融着条件など

を最適化し、融着損失低減の検討を行った。接続対象のガラス ファイバに関しては、コネクタ化の検討と同様に、MFDの最 適化を行い、十分な強度を保ちながら低融着損失が得られるよ うに融着条件の最適化を行った。その結果、PBGFとガラスファ イバで、0.45 dBの低損失融着を実現した。さらに、ARFとガ ラスファイバでも、同様の最適化によって0.54 dBの低損失融 着を実現している。これらの結果も、実用化という面で非常に 重要な達成である。

3.3 空孔コアファイバケーブル敷設試験

上記のようにケーブルや接続などの周辺技術の研究開発は進んでいるが、実用化に向けてはケーブル化の検討だけでなく、 実際のフィールドに敷設しての試験が必要となる。そこで、 図8に示すように、開発した空孔コアファイバケーブルを慶應 義塾大学、新川崎タウンキャンパス内の「慶應義塾大学未来光 ネットワークオープン研究センター」に敷設し、複数のビル間 を結ぶ超低遅延ネットワークキャンパスの実験を開始した。

これにより,世界で初めて世界中のエンジニア達が実用に近 い環境で空孔コアファイバの実験をできる施設が完成してい る。ケーブルはマンホールの中などにも敷設されており,実際 のフィールドの環境が再現されている。古河電工と慶應義塾大 学でプレスリリースを発信しているが¹²⁾,下記のYouTube チャネルでも内容をご紹介している。

関係者インタビュー「世界初!空孔コアファイバで繋がる 未来光ネットワークオープン研究センター」

日本語版:https://youtu.be/RObYJCngxCs

英語版:https://youtu.be/8jZIj6XBzTM

今後,この設備を用いた実用に近い環境での試験なども進ん でいくと考えられ,より実用化の進展が進んでいくものと考え られる。

ケーブル敷設後の特性として,非常に重要なのが,経時特性 の確認である。我々は,ケーブル敷設後の空孔コアファイバの 経時損失特性を確認している。結果を図9に示すが,時間の経 過に対して,安定した損失特性が得られており,実用化に向け て安定した特性が確認されている。



図7 条件を最適化せずに融着を行った場合の空孔コアファイバの側面図(左)と 断面図(右) Side image (left) and cross-sectional image (right) of hollow core fibers

Side image (left) and cross-sectional image (right) of hollow core fibers after splicing without optimizing the conditions.



図8 慶應義塾大学に敷設した空孔コアファイバケーブルの模式図 Image of the HCF cable installed in the Keio-University campus.



図9 慶應義塾大学に敷設した空孔コアファイバケーブルの経 時損失特性 Temporality change of the loss of the HCF cable installed in the Keio-University campus.

3.4 空孔コアファイバの応用実験

空孔コアファイバの実用化に向けては、上記の研究開発と合わせて、実際のシステムを想定した応用実験での特性確認が極めて重要になる。そこで、慶應義塾大学や電気通信大学と連携しながら、数多くの応用実験を行っている。検討結果の例を **表1**に示すが、空孔コアファイバの特徴を活かした様々な応用 実験が行われ、非常に良好なパフォーマンスが実証されている。 よって、実応用展開においても、空孔コアファイバが大きなポテンシャルを有していることが確認された。

表1 空孔コアファイバを用いた応用実験のまとめ Summery of application experiments using the HCF.

No.	項目	詳細
1	報告学会	2023 Photonics in Switching and Computing
	筆頭著者	Shunpei Kimura (慶應義塾大学)
	タイトル	+30.8 dBm, IM-DD, 32 Gbit/s high power optical transmission with 4 km photonic bandgap fiber
	概要	4 kmPBGFに対する>+30 dBm入力32 Gb/s伝送
2	報告学会	電子情報通信学会 PN研 2023年8月研究会
	筆頭著者	村上夏尉(電気通信大学)
	タイトル	空孔コアファイバを用いた光ファイバ無線の伝送特性評価
	概要	1 km 大電力 RoF 伝送特性に関する SMF と PBGF の比較
3	報告学会	OFC 2024
	筆頭著者	Kai Murakami (電気通信大学)
	タイトル	Over 1-Watt Analog RoF Signal Transmission Using a 1-km Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber
	概要	1 kmのPBGFを用いた>1 WのアナログRoF伝送特性
4	報告学会	The 6th Optical Wireless and Fiber Transmission Conference 2024
	筆頭著者	Hironori Yamaji (電気通信大学)
	タイトル	Simultaneous Data and Power Transmission Using a Hollow-Core Fiber for Passive Optical Network
	概要	1 kmのPBGFと8分岐PONを用いた>5 WのRoFシグナル伝送と14.4%のパワー伝送効率の確認
5	報告学会	IEEE Annual Congress on Artificial Intelligence of Things 2024
	筆頭著者	Naoaki Yamanaka (慶應義塾大学)
	タイトル	Disaggregated Computing Access Network using Newly Structured Hollow-Core fiber for AIoT Platform
	概要	オープンラボ空孔コアファイバ低遅延ネットワークを用いた AIoT プラットフォーム用時空間同期ディジタルツインの提案
6	報告学会	電子情報通信学会 PN研 2024年8月研究会
	筆頭著者	岡本 聡 (慶應義塾大学)
	タイトル	キャンパス敷設空孔コアファイバケーブルを用いたLocal 5G over PON 構築実験
	概要	敷設空孔コアファイバケーブルを用いたLocal 5G over 10G-EPON システムの構築
7	報告論文	ECOC 2024
	筆頭著者	Ryuta Murakami (慶應義塾大学)
	タイトル	First Demonstration of Switched RoF Concept Using MEMS Optical Switch and High-linearity Installed Hollow Core Fiber Cable
	概要	敷設空孔コアファイバを用いたアナログ光ファイバ無線区間への光スイッチ導入実証実験
8	報告学会	ECOC 2024
	筆頭著者	Souya Sugiura (電気通信大学)
	タイトル	Demonstration of power-over-hollow-core-fiber with 5G NR signals for optically powered remote antenna units
	概要	空孔コアファイバを用いた5G NR信号と光給電の同時伝送

4. おわりに

空孔コアファイバの研究開発は大きな進展を遂げている。古 河電工時報140号で報告した空孔コアファイバのSM化,空孔 コアファイバコネクタの実現,空孔コアファイバケーブルの開 発成功に続いて,良好な信頼性特性の確認,空孔コアファイバ 融着技術の高度化,空孔コアファイバケーブル敷設実験成功, 数多くの応用実験の成功を達成し,空孔コアファイバの実用化 に向けてさらに大きく前進した。このような実用化に向けた包 括的な研究成果により,空孔コアファイバの実使用の急激な拡 大は,目前に迫ってきている。

参考文献

- 武笠和則:"空孔コアファイバケーブル",古河電工時報,140 (2021),32 https://www.furukawa.co.jp/rd/review/fj140/ fj140_09.pdf(参照日:2025年2月12日).
- P. J. Roberts et al.: "Ultimate low loss of hollow-core phtonic crystal fibres", Opt. Express, Vol. 13, No.1, pp.236-244 (2005).
- B. J. Mangan et al.: "Low loss (1.7dB/km) hollow core phtonic bandgap fiber", OFC 2004, paper PD24, (2004).

- Y. Chen et al.: "Hollow Core DNANF Optical Fiber with <0.11dB/km Loss", OFC 2024, paper Th4A.8, (2024).
- 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).
- Y. Chen et al.: "Demonstration of an 11 km hollow core photonic bandgap fiber for broadband low-latency data transmission", OFC2015, paper Th5A.1, (2015).
- J. M. Fini: "Aircore microstructured fibers with suppressed higher-order modes", Opt. Express 14, pp11354-11361, (2006).
- 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).
- B. Zhu et al.: "First demonstration of Hollow-Core-Fiber Cable for Low Latency Data Transmission", OFC 2020, paper Th4B.3, (2020).
- 高木武史,武笠和則:"空孔コアファイバの機械特性の比較", 電子情報通信学会2024年総合大会,B-10A_B-13-12, (2024).
- T. Kremp et al.: "Fast, Reliable and Portable Low-loss Antiresonant Hollow-core Fiber Fusion Splicing", OFC 2024, paper M3J.3, (2024).
- 古河電工ニュースリリース,超低遅延ネットワークキャンパスの実験を開始,2023年11月16日 https://www.furukawa.co.jp/release/2023/kenkai_20231116.html(参照日:2025年2月12日)