

短距離伝送用細径ポリマクラッドファイバ

光電子技術研究所 岡田 健志¹・高橋 純一¹・瀧ヶ平 将人²・村田 暁¹・松尾 昌一郎³

Small Core Diameter Polymer-Clad Silica-Core Fiber for High-Speed Short-Reach Transmission

K. Okada, J. Takahashi, M. Takigahira, A. Murata, and S. Matsuo

短距離での高速伝送システムに適用可能な細径コアを有するポリマクラッドファイバの検討、試作を行った。本ファイバとVCSEL光源を用いることにより、伝送距離 20 m、伝送速度 2.5 Gbpsまでエラーフリー伝送が可能であった。また、接続軸ずれに対して許容度が高いこと、小径に曲げた場合でも十分小さな曲げ損失を有することを実験的に確認した。

A polymer-clad silica-core fiber (PCF) with a small core diameter that is suitable for high-speed short-reach transmission is studied and experimentally manufactured. Error-free transmission over 2.5 Gbps at 20-m link can be supported by manufactured fibers with VCSEL excitation. Large tolerance for a fiber connection and small bending loss for a small bending radius are experimentally confirmed.

1. ま え が き

近年、ファクトリオートメーションや車載ネットワークおよび家庭内ネットワークなどにおいて必要とされる伝送容量が増大してきており、高速伝送媒体への関心が高まっている。現在、一般的に使用されている同軸ケーブルなどの電気配線は耐ノイズ性などの点で高速化への限界が指摘されており、ポリマクラッドファイバ (Polymer-Clad Fiber, 以下PCFと記す) やプラスチックファイバ (Plastic Optical Fiber, 以下POFと記す) などを伝送媒体として用いた光配線の実用化が期待されている¹⁾。一般に、電気配線は、取り扱い性や接続性、コストの面で優れているが、伝送の高速化にともないノイズの影響が無視できなくなり、高速伝送できる距離が制限される。一方、光配線は、電気ノイズの影響を受けずに高速伝送が可能である利点があるものの、取り扱い性、接続性および低コスト化が実用化に向けての課題といわれている。これらの特徴から、ギガビットクラスの伝送速度を数十m以上伝送する領域において、光配線が必要になるといわれている²⁾。

以上から、当社では、光配線として、1 Gbps以上の伝送速度にて数十m程度伝送可能であり、接続の容易性、さらには耐熱性および小径に曲げられること(以下、かとう

性と記す)への要求を満たす細径コアPCFの開発を行った。

本稿では、細径PCFの設計、試作した細径PCFの伝送帯域と曲げ損失について示す。また、VCSEL光源を使用した励振条件における伝送実験の結果についてもあわせて報告する。

2. 細径コアポリマクラッドファイバの特徴

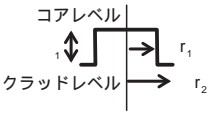
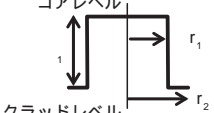
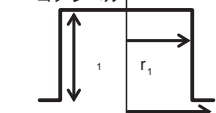

表1に、短距離光伝送用の媒体として用いられているPCF、POFおよびGI型石英ガラスファイバ (Graded Index Glass Optical Fiber, 以下GI-GOFと記す)の得失を示す。一般的なPOFはコア径が1 mm程度と非常に大きく、接続性という面からは非常に優れている。しかしながら、コアとクラッドの比屈折率差が非常に大きく設計されており、高速伝送への対応能力に制約がある。また、コア、クラッド共にポリマで構成されているので、高温になるとファイバ全体が軟化するため、使用温度が85程度に制限されている。一方、GI-GOFは、コア、クラッド共にシリカガラスで構成される。一般的なクラッド外径は125 μmであり、十分なかとう性を有している。また、POFやPCFと比べて高速伝送に適している。しかしながら、コア直径が50 μm程度と小さく、接続の容易さの面で劣る。また、PCFは、コアがシリカガラス、クラッドがポリマで構成され、85以上の高温に対して、クラッドは軟化するがコアは軟化しないため、変形せずに耐えることができる。しかしながら、現在商用化されているPCFのコア直径は一般的に200 μmと大きく、機械的な信

1 光技術研究部

2 応用電子技術研究部

3 光技術研究部グループ長

表 1 短距離光伝送用各種光ファイバの特徴
Table 1. Characteristics of optical fibers for short reach transmission.

	細径PCF	PCF	POF	GI-GOF
コア径 (μm)	125	200	980	50
クラッド径 (μm)	170	230	1,000	125
耐熱性 ()	+ 120	+ 120	+ 85	保護被覆材による
接続性				×
曲げ性			×	
屈折率分布				

頼性の観点から小径に曲げることができない問題がある。また、 n_1 も大きく、高速伝送には限界がある。細径コアPCFは、PCFの欠点である小径曲げへの対応能力や高速伝送能力が改善され、短距離用伝送媒体として各種特性のバランスがとれることが期待できる。

今回試作した細径PCFのポリマクラッド材は、シリカガラスの屈折率より低い屈折率の材料を使用し、紡糸工程において、線引きされたシリカコア周囲にポリマクラッド材をコーティングすることでクラッドを構成する。PCFの理論的な伝送帯域は、コアクラッド間の比屈折率差 n_1 に依存し、コア径依存はほとんど無視できる。 n_1 が大きくなるほど、より高次のモードが伝搬可能となり、伝送帯域が狭くなる傾向がある。一方、曲げ損失は、 n_1 が大きくなるほど、小さくなることから、伝送帯域と曲げ損失はトレードオフの関係になる。

3. ファイバの設計と試作

まず、多モードファイバの伝送特性として広く用いられている、全モード励振³⁾条件下での特性について検討した。これは、開口数 (Numerical Aperture, 以下NAと記す) の大きいLED光源などを使用して励振した場合に相当する。全モード励振条件下での3 dB帯域をWKB法⁴⁾を用いてシミュレーションした。シミュレーション条件を表2に示す。次いで、実際に3種類の異なる屈折率をもつポリマクラッド材を使用して試作、評価を行い、シミュレーション結果と比較した。使用したポリマクラッド材の屈折率は1.425, 1.430, 1.435である。曲げに対する信頼性および接続の容易性の観点から、シリカコア直径を125 μmとした。表3に試作したPCFの測定結果を示す。伝送帯域は、パルス法⁵⁾で測定し、測定波長850 nm, 測定条長は20 mとした。図1に比屈折率差 n_1 から換算されるNAに対する伝送帯域特性のシミュレーション結果および測定結果を示す。これからわかるように、測定結果と計算結果はよい相関を示した。また、 n_1 が最も小さいファイバAの伝送帯域測定値は、条長20 mで588 MHzであり、試作ファイバ中で最大であった。

表 2 シミュレーション条件
Table 2. Conditions of simulation.

波長 (nm)	850
シリカコア屈折率	1.453
ポリマクラッド屈折率	1.40 ~ 1.45
シリカコア直径 $2r_1$ (μm)	125
ポリマクラッド直径 $2r_2$ (μm)	170

表 3 試作PCFの測定結果
Table 3. Measured characteristics of manufactured PCFs.

	fiber A	fiber B	fiber C
シリカコア屈折率 @ 850 nm	1.453	1.453	1.453
ポリマクラッド屈折率 @ 850 nm	1.435	1.430	1.425
比屈折率差 n_1 (%)	1.2	1.6	1.9
NA	0.23	0.26	0.28
3 dB全モード励振帯域 @ 20 m (MHz · 20 m)	588	553	428

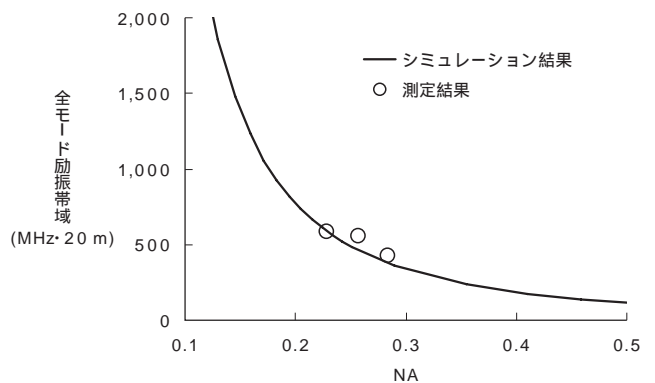


図 1 シミュレーション帯域と測定帯域のNA依存性
Fig. 1. Simulated and measured bandwidths as a function of NA.

図2にファイバAにおける全モード励振時の曲げ損失の曲げ回数依存性を示す。PCFは、曲げ半径が小さいほど曲げ損失が大きく、さらに、曲げ回数の少ない領域において、曲げ損失が大きく増加し、曲げ回数が多い領域

では曲げ損失の増加が少なくなる傾向を示した。これは、高次のモードほど曲げ損失が大きいことが原因であり、曲げ回数が少ない領域で高次のモードから損失し、徐々に曲げ損失の小さい低次のモードが残ることに起因する。

4. 伝送実験結果

伝送速度 1 Gbps を超える短距離高速伝送システムでは、変調周波数の観点から、LEDではなく面発光レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, 以下 VCSEL と記す) 光源が用いられる。VCSEL 光源による励振状態は、VCSEL 光源の NA に依存し、結果として、限定モード励振となる。前節で示した全モード励振における伝送帯域は、限定モード励振時と比較してファイバの伝送速度を過小評価する傾向がある。よって、試作ファイバの

VCSEL 励振時の伝送速度を評価するために伝送実験を行った。

図3にVCSEL励振時の伝送実験模式図を示す。社内で試作した波長 850 nm の VCSEL モジュールは、パルスパターンジェネレータ (Pulse Pattern Generator, 以下 PPG と記す) で変調され、NRZ PRBS $2^{23}-1$ 信号を発生する。VCSEL は、サンプルファイバに結合され、結合状態は、精密微動台を使用して調整することができる。サンプル長は 20 m とした。サンプルファイバからの出射光は、フォトディテクタ (Photo Detector, 以下 PD と記す) で受光される。受光された信号は、アンプにより増幅され、そして、デジタルサンプリングオシロスコープまたはエラーアナライザ (Error Analyzer, 以下 EA) へ伝送され、アイパターンおよびビットエラーレート (Bit Error Rate, 以下 BER と記す) を測定する。

図4に変調周波数 2.5 Gbps の信号をファイバ A, B および C に 20 m 伝送させた後のアイパターンを示す。ファイバ A では十分にアイが開いているが、ファイバ B, そしてファイバ C になると信号のジッタが大きくなり、アイ開口が小さくなる傾向を示した。図5には、ファイバ A, B および C を 20 m 伝送後の BER の変調周波数依存性を示す。これからわかるように、ファイバ A では、変調周波数 2.5 Gbps, ファイバ B では 2.0 Gbps, ファイバ C では 1.8 Gbps までそれぞれ BER が 10^{-12} 以下で伝送可能であることを示

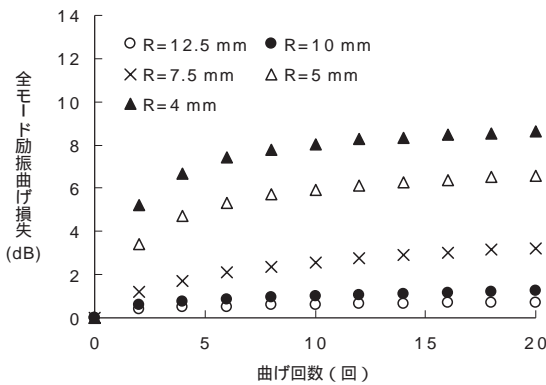


図2 曲げ損失の曲げ回数依存性
Fig. 2. Bending losses as a function of turn number.

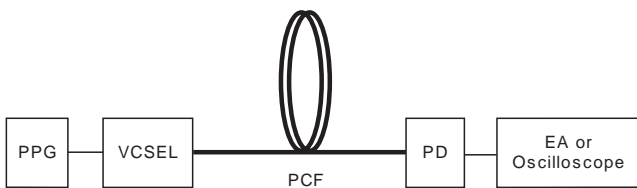


図3 伝送実験測定系
Fig. 3. Setup for transmission experiment.

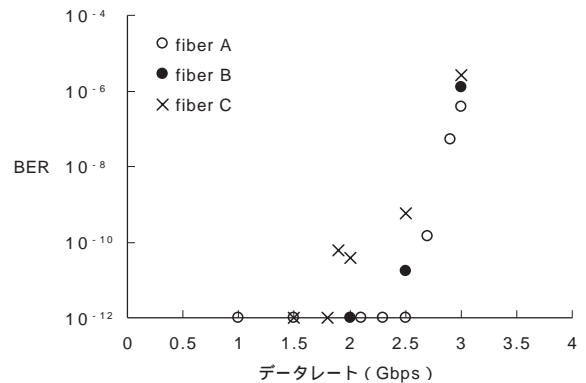


図5 20 m 伝送後の BER
Fig. 5. Measured BERs after 20-m transmission.

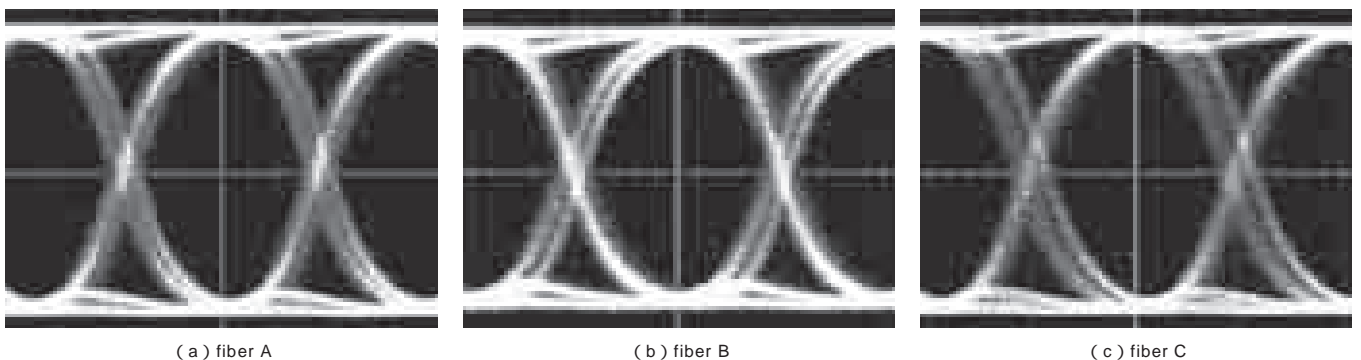


図4 周波数 2.5 Gbps, 20 m 伝送後の測定アイパターン
Fig. 4. Measured eye diagrams at 2.5 Gbps after 20-m transmission for fiber A, B, and C.

した．さらに，ファイバAについて，結合状態をファイバ断面方向に 100 μm オフセットさせて伝送を行ったところ，アイパターン，BER共にほとんど変化しなかった．これは，接続に許容される軸ずれ量が十分に大きいことを示し，一般的な 200 μm コア PCF と比較してコア径を 125 μm と小さくした影響はほとんどないといえる．

図 6 は，ファイバAについて，全モード励振時と限定モード励振時の曲げ損失の曲げ半径依存性を示す．曲げ回数は 10 回転とした．また，限定モード励振は，コア直径 10 μm ，NA 0.18 である GOF を使用して VCSEL 励振を模擬した．この GOF のスポットサイズと NA は，今回使用した VCSEL 光源と同等である．限定モード励振時の曲げ損失は，全モード励振時の曲げ損失の 3 分の 1 程度であった．今回の結果から外挿した曲げ半径 15 mm での曲げ損失は，低曲げ損失 GI-GOF⁶⁾ と同等である．以上から，試作した PCF の中で最も広帯域な全モード伝送帯域を持つファイバA，つまり， β_1 が小さく最も曲げに弱いファイバAにおいても，短距離光リンクに適用可能な曲げ損失を有していることがわかる．

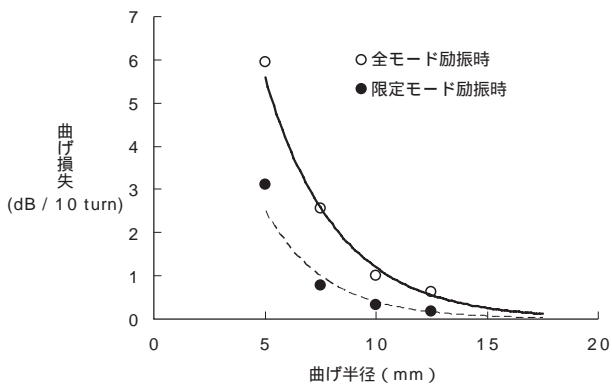


図 6 曲げ損失の曲げ半径依存性

Fig. 6. Measured bending losses as a function of bending radius for different launch conditions.

5. む す び

3 種類の細径 PCF を試作し，全モード励振および VCSEL 励振での帯域を評価した．全モード励振時の帯域が 588 MHz \cdot 20 m である PCF が，VCSEL 励振時は，2.5 Gbps の変調周波数において，20 m エラーフリー伝送が可能であることを確認した．同様に，全モード励振帯域が 553, 428 MHz \cdot 20 m のファイバに関しても，VCSEL 励振においては，全モード励振帯域と比較して，より伝送速度が速い領域までエラーフリー伝送が可能であることを確認した．また，コアクラッドの比屈折率差を最適化したファイバAについて，軸ずれ接続時の伝送速度についても評価し，軸ずれ量が 100 μm まで 2.5 Gbps でのエラーフリー伝送が可能であり，接続に対する許容軸ずれ量が十分大きいことを確認した．さらに，ファイバAの限定モード励振における曲げ損失は，低曲げ損失 GI-GOF と同等であることを確認した．

以上から，細径 PCF は，耐熱性，短距離高速伝送能力，接続平易性および低曲げ損失といった特色を有しており，短距離伝送用ファイバとして優れた特性を有しているといえる．

参 考 文 献

- 1) Ton Koopen, et al.: BROADBAND ACCESS AND IN-HOUSE NETWORKS EXTENDING THE CAPABILITIES OF MULTIMODE FIBRE NETWORKS, ECOC-IOOC2003 (2003), Mo3.1.5
- 2) 光回路実装技術ロードマップ (03 年度版) 光インターコネクションの実現への展望, エレクトロニクス実装学会, 光回路実装技術委員会, 2003
- 3) IEC 60793-2-30:2001
- 4) Gloge, et al.: Multimode Theory of Graded-Core Fibers, Bell Syst. Tech. Jour., 52 (1973) pp.1563-1578
- 5) IEC 60793-1-41:2003
- 6) Makoto Shimizu, et al.: Next Generation Multi-Mode Fiber and Cables, 53rd IWCS / Focus (2004), p.246