



世界初のマルチコア光ファイバケーブルの実市街地への敷設と評価

World's First Field Deployment and Evaluation of Multi-Core Fiber Cable Testbed

永島 拓志*
Takuji Nagashima

林 哲也
Tetsuya Hayashi

川和田 怜二
Reiji Kawawada

森島 哲
Tetsu Morishima

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

マルチコア光ファイバのコア間の結合特性はファイバの曲げに大きく依存するため、実使用環境での特性評価が重要である。我々はイタリア市街にマルチコア光ファイバケーブルを常設のテストベッドとして開設し、敷設後も良好な光学特性でマルチコア光ファイバが機能することを確認したので、これを紹介する。

It is important to evaluate optical properties of multi-core optical fibers (MCFs) in a real-use environment because their coupling characteristics significantly depend on fiber bends and twists, or how the fibers are deployed. This paper reviews our recent report on the world's first MCF testbed deployed along underground tunnels in Italy. We achieved a spatial mode dispersion of 5.2 ps/√km in the root mean square value with randomly-coupled MCFs and observed no significant crosstalk degradation with uncoupled MCFs.

キーワード：マルチコア光ファイバ、MCF、テストベッド

1. 緒言

近年、動画配信やスマートフォンおよびWeb会議に代表されるネットワークサービスの発達により通信トラフィック需要が増大し続けている。一方でそれを支えるシングルモードファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) の伝送容量には限界があり、従来型の光通信ネットワークの容量限界⁽¹⁾を打破する技術として空間分割多重 (SDM: Space division multiplexing) に期待が集まっている。マルチコア光ファイバ (MCF: Multi-core fiber) は次世代光通信ネットワークでSDM伝送を実現するための伝送媒体として有力視されており⁽²⁾、中でもコア間クロストーク (XT) を抑制するためにコア間の結合を弱くした非結合型MCF (UC-MCF: Uncoupled MCF) やコア間で強いランダム結合が生じるランダム結合型MCF (RC-MCF: Randomly-coupled MCF) が注目されている。MCFはその光学特性がファイバの曲げ半径に依存することが知られているが、多くの先行研究では、実際の敷設状況におけるファイバの曲げ半径とは大きく異なるポピン巻きでの光学特性および伝送特性を報告しており、実使用環境を模擬したテスト環境下における評価結果を報告した論文はわずかである^{(3)~(5)}。本稿では、イタリアのL'Aquila市の地下共同溝へ世界で初めてMCFケーブルを実装した常設のテストベッドを開設し⁽⁶⁾、敷設後も良好な光学特性でマルチコア光ファイバが機能することを確認した結果を紹介する⁽⁷⁾。

2. ファイバ設計

MCFは1本のファイバの中に複数のコアをもつことから一般にSMFに比べて高い空間チャンネル密度を実現できるが、その種類によって特徴は大きく異なる。UC-MCFはコア間隔を離してXTを抑制し信号を各コアで独立に伝送させることから従来のSMF伝送システムの受信器をそのまま使用することができる。一方、RC-MCFはコア間隔を近づけてコア間で信号をランダムに結合させて伝送するタイプのMCFであり、受信端ではMIMO (Multiple-input-multiple-output) デジタル信号処理 (DSP: Digital signal processing)^{*1}でランダム結合を補償することで、高い空間チャンネル密度を達成できる。MIMO処理が必要というデメリットはあるものの、ランダム結合は空間モード分散^{*2} (SMD: Spatial mode dispersion) の累積を抑制するため、MIMO DSPの計算負荷を軽減することができる。またランダム結合は非線形ノイズ^{*3}の蓄積も抑制するほか、モード依存損失 (MDL: Mode-Dependent Loss) の低減にも寄与するなど、長距離伝送に適した特徴を有する。これらUC-MCF、RC-MCFのいずれにおいても、伝送媒体として優れた性能を発揮するにはコア間結合 (XT, ランダム結合) を適切に設計することが非常に重要であり、これまでにコア間結合のファイバ曲げ依存性に関する研究がなされている⁽²⁾。

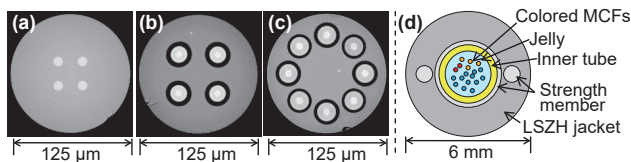
我々は今回マルチコア光ファイバケーブルを作製するに当たり、1種類の4コアを有するランダム結合型MCF (RC-4CF)、および4コア、8コアを有する2種類の非結合型

MCF (UC-4CF⁽⁸⁾ および UC-8CF⁽⁹⁾) を作製した。表1に作製したMCFの諸元を示す。また、図1(a)~(c)にそれぞれの断面構造を示す。クラッド径はいずれのMCFも汎用シングルモード光ファイバ (SSMF: Standard single-mode optical fiber) と同じ125 μm である。RC-4CFのコアは純シリカであり、カットオフ波長シフトシングルモードファイバ (ITU-T G.654) に準拠して設計した。実効断面積 A_{eff} の平均値は81 μm^2 である。UC-4CFおよびUC-8CFのコアはSSMFに準拠して設計しており、そのモードフィールド径 (MFD: Mode field diameter) はITU-T G.652で勧告されている8.2-9.6 μm を満たしている。UC-8CFの22mカットオフ波長 (ITU-T G.650.1) はITU-T G.652勧告の最大値 (1.26 μm) より僅かに長いものの、100mで測定したカットオフ波長は1.26 μm 以下でO帯における高次モードの伝搬を十分に抑制できていることから、O帯では実効的にシングルモードとみなすことができる。XTおよび空間モード分散の特性は5節で議論する。

表1 作製したMCFの特性⁽⁷⁾

ID	RC-4CF	UC-4CF	UC-8CF
コア間結合	結合型	非結合型	非結合型
コア数	4	4	8
コア間隔	ⁱ⁾ 25.4 \pm 0.2 μm	ⁱ⁾ 40.2 \pm 0.2 μm	ⁱ⁾ 30.3 \pm 0.1 μm
クラッド外径	125 μm	125 μm	125 μm
MFD	^{i, iii, iv)} 10.1 \pm 0.2 μm	ⁱⁱⁱ⁾ 8.4-8.5 μm	ⁱⁱ⁾ 8.4-8.5 μm
コアモードの A_{eff}	^{i, iii, iv)} 80.9 \pm 3.3 μm^2	n/a	n/a
22mカットオフ波長	1.41-1.51 μm	1.21-1.24 μm	*1.27-1.30 μm
伝送損失	ⁱⁱⁱ⁾ 0.170-0.175 dB/km	ⁱⁱⁱ⁾ 0.201-0.246 dB/km	ⁱⁱ⁾ 0.347-0.363 dB/km
伝送帯域	C帯~L帯	O帯~L帯	O帯

- (i) 平均値および標準偏差
(ii) 測定波長1.31 μm
(iii) 測定波長1.55 μm
(iv) 非コヒーレント測定法を用いコアモードの平均的な強度プロファイルから測定⁽¹⁰⁾
(*) 100mカットオフ波長は \leq 1.26 μm



(a) RC-4CF, (b) UC-4CF, (c) UC-8CF, (d) MCFケーブル

図1 断面構造⁽⁷⁾

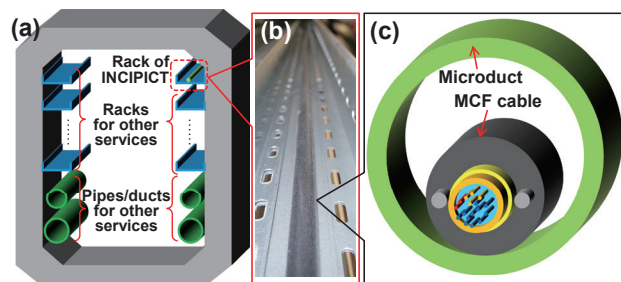
3. マルチコア光ファイバケーブル

次に、これらのMCFを用いて長さ6.29kmのケーブルを作製した。ケーブル構造は欧州で広く普及しているジェ

リーを充填したルースチューブケーブル (図1 (d)) を採用し、外径は6mmとした。このケーブルには18心のMCFが収容され、うち12心がRC-4CF、4心がUC-4CF、2心がUC-8CFである。

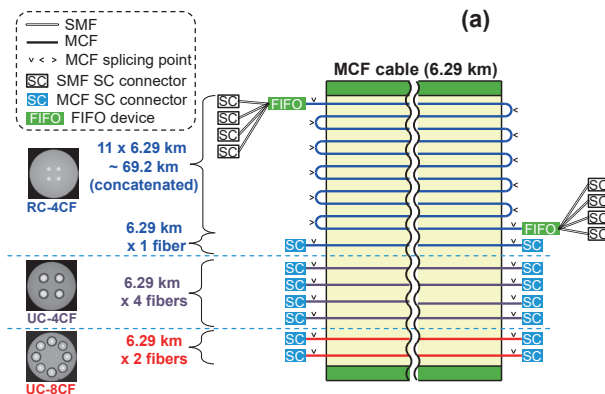
4. テストベッドの構成

作製したMCFケーブルはINCIPICT プロジェクト⁽¹¹⁾の実験用光伝送ネットワークの一部として、現地のケーブル敷設業者によって地下共同溝内 (図2 (a)) に敷設された。共同溝内のラック上に内外径がそれぞれ10mm、12mmの



(a) 地下共同溝の断面図 (b) ラックに敷設されたマイクロダクトケーブル (c) マイクロダクトケーブル内のMCFケーブル

図2 ケーブル敷設の概要⁽⁷⁾



(a) 端末終端後のMCFケーブルの構成 (b) ケーブル両端を収納した19インチラック光パネル

図3 ケーブル終端処理⁽⁷⁾

高密度ポリエチレン製耐鼠マイクロダクトが置かれ (図2 (b))、MCFケーブルは空気圧送を用いてマイクロダクト内に敷設された (図2 (c))。MCFケーブルの総長は6.29kmで、うち5.63kmは共同溝内、残りの0.66kmのケーブル両端部分が実験室内に置かれた。図3 (a) にMCFケーブルおよびfan-in/fan-out (FIFO) デバイスの構成を示す。UC-4CFおよびUC-8CFの各心は、あらかじめSCコネクタを実装した数mのMCFピグテールを両端に融着することで終端した。RC-4CFのうちの1心も同様に終端した。これによりこれらのMCFはSCコネクタを介し、同様にSCコネクタが実装されているFIFOデバイスに接続することができる。残り11心のRC-4CFは互いに連結することで計69.2kmのリンクを形成し、長距離の周回伝送実験に用いることができるようにした。またその両端はFIFOを融着接続して終端した。その後、終端部の保護およびアクセス向上のため、ケーブル両端を19インチのラックマウント光パッチパネルに収納した (図3 (b))。

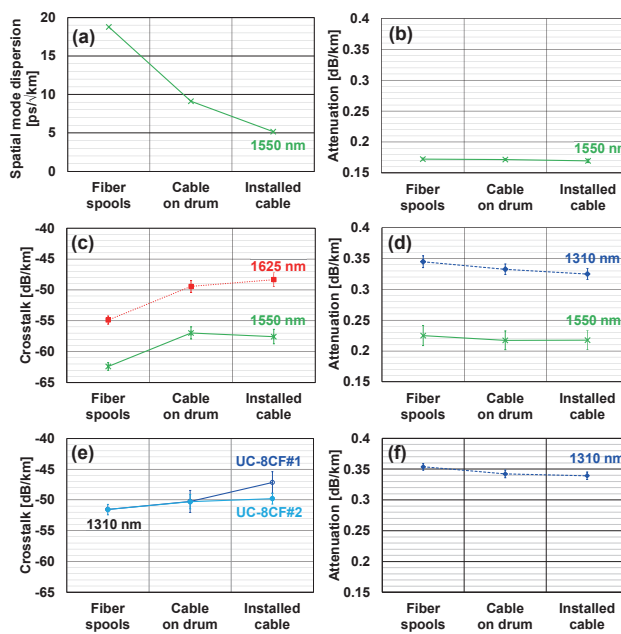
5. 敷設ケーブルの光学特性

RC-4CFの融着に先立ち、波長掃引法⁽¹²⁾ およびOTDR法を用いてSMDおよび伝送損失の評価を行った。表2にケーブル敷設後の各RC-4CFのSMDの測定値を示す。また図4 (a) にケーブル化および敷設前後のSMDの測定値を示す。同図よりケーブル化や敷設によりSMDが改善していることがわかる。これはケーブル化や敷設でマクロバンドが緩和してコアモード間のスキュー^{*4}が抑制され、あるいは、ランダム結合が生じやすくなったためと考えられる。また、ルースチューブ内でMCFを蛇行させるとランダム結合が生じやすくなることから、MCFに適切な余長を付与することで敷設後のランダム結合を保証することができる⁽⁵⁾。図4 (b) にケーブル化および敷設前後の伝送損失の変化を示す。RC-4CFの波長1550nmにおける伝送損失はケーブル化や敷設による変化が無視できるレベルであり、敷設後も平均値で0.170dB/kmと良好な特性が得られた。

次にケーブル端末処理後のUC-4CFおよびUC-8CFのXTおよび伝送損失の評価結果を図4 (c)~(f) に示す。ケーブル化および敷設による伝送損失への影響は無視できる程度である。ケーブル化によりUC-4CFのXTは5-6dB増加しているが、これはケーブル化そのものに起因するものではなく、ファイバドラムとケーブルドラムの直径の差によりファイバの曲げ半径が異なることによる。なお、UC-8CF

表2 RC-4CFのSMDの測定値 (ケーブル敷設後)⁽⁷⁾

Fiber ID	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
SMD[ps/√km]	2.9	2.5	2.8	3.4	3.0	4.9	4.8
Fiber ID	#8	#9	#10	#11	#12	RMS	Avg.
SMD[ps/√km]	8.0	8.0	4.2	6.8	6.1	5.2	4.8



(a) RC-4CFのSMD (b) RC-4CFの伝送損失 (c) UC-4CFのXT (d) UC-4CFの伝送損失 (e) UC-8CFのXT (f) UC-8CFの伝送損失

図4 ケーブル作製および敷設による光学特性の変化⁽⁷⁾

のケーブル化によるXTの変化は1-2dBと比較的小さいが、これは隣接コア同士を僅かに異なる構造に設計したためである⁽⁹⁾。また、ケーブル敷設の前後でUC-MCFのXTがあまり変化していないのは、ルースチューブ内のMCFの蛇行による曲率半径がドラム巻きによる曲率半径と同等以下であるため、敷設前後でのファイバ曲率半径があまり変化しなかった前者がXTに与える影響の方が支配的であるためと考えられる。UC-8CFのうちの1心ではXTの増加が見られるが、これについては後述する。

次に、融着により連結したRC-4CFリンクの評価を実施した。RC-4CF間の10カ所の融着損失の平均値は1箇所当たり0.12dBであることをOTDRを用いて確認した。融着損失に関しては融着条件の最適化により改善の余地があるものと考えている。融着損失を含む伝送損失は波長1550nmで0.187dB/km (0.170dB/km + (0.12dB/箇所 × 10箇所)/69.2km) であった。光ファイバリンクを69.2km伝送した後のSMDは47psであり (5.7ps/√km)、これは連結した11心のSMDの二乗平均平方根 (RMS) の値5.2ps/√kmと整合する。

最後に、FIFO接続後の連結RC-4CFリンクおよび各MCFの非連結リンクの挿入損失を表3に示す。連結RC-4CFリンクの挿入損失はMCFの伝送損失、2箇所の融着損失および2つのFIFOの損失を含む。非連結MCFリンクはSCコネクタを介してFIFOと接続するため、さらに2箇所の接続損失を含む。また挿入損失からMCFの伝送損失を差し引くことで、融着やFIFOおよびMCFコネクタの損失からなる終端

損失を見積もった結果を同表に合わせて示す。UC-8CFのうちの1心で終端損失が大きくなっていることから、敷設後にUC-8CFのXTが増加したのはMCFとコネクタ付きピグテールの融着点における回転方向の調心ずれが原因だと考えている。

表3 挿入損失（実測）および終端処理による損失（推定値）⁽⁷⁾

RC-4CF				
Fiber ID	(連結：69.2km)		(非連結：6.29km)	
測定波長	1.55μm			
挿入損失[dB]	15.7		4.5	
終端損失[dB/end]	1.3		1.7	

UC-4CF				
Fiber ID	#1	#2	#3	#4
測定波長	1.55μm			
挿入損失[dB]	3.9-4.2	3.3-4.3	4.1-4.4	3.7-3.8
終端損失[dB/end]	1.3-1.5	1.1-1.4	1.3-1.5	1.2-1.3

UC-8CF		
Fiber ID	#1	#2
測定波長	1.31μm	
挿入損失[dB]	7.9-10.1	5.7-6.4
終端損失[dB/end]	2.9-4.0	1.8-2.1

6. 結 言

我々は、ランダム結合型MCFおよび非結合MCFを実装したMCFケーブルを、知る得る限りで初めて実市街に敷設した。敷設によるXTや伝送損失への顕著な影響は確認されなかった。敷設したランダム結合型MCFの空間モード分散は二乗平均平方根（RMS）で $5.2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ であった。今回のケーブル敷設によりMCFが実使用環境下でも適切に機能することが示された。今後このMCFケーブルはテストベッドとして活用される予定であり、既にUC-4CFおよびUC-8CFの挙動については、4スパンのUC-4CFを繋いだ25.16kmのリンクにおいてコア間スキューの変動が1.5ps以下と非常に小さいことが確認されており⁽¹³⁾、また、敷設したUC-8CFの群遅延時間変動がポピン巻きのファイバに比べて1桁以上小さいことが確認されている⁽¹⁴⁾。今後の更なるテストベッドの活用が、MCFの実用化加速に寄与することが期待される。

7. 謝 辞

The authors would like to thank Prof. Antonio Mecozzi and Prof. Cristian Antonelli of University of L'Aquila for their leading role in this SDM fiber testbed deployment project. The authors also thank Opticable S.A., a joint venture of Nexans S.A. and Sumitomo Electric

Industries,Ltd., for MCF cabling, and Optoscribe Ltd. for fan-in/fan-out device manufacturing. These MCF testbed deployment and measurements were supported by the Italian Government under CIPE resolution no.135 (December 21, 2012), project INnovating City Planning through Information and Communication Technologies(INCIPICT).

用語集

※1 MIMO DSP

MIMOとはMultiple-input-multiple-output（多入力多出力）の略で、DSPはDigital signal processing（デジタル信号処理）の略。複数空間チャネルを持つ伝送系における空間チャネル間クロストークをMIMO DSPにより補償し、クロストークが起こる前の信号を復元することができる。

※2 空間モード分散

空間モード毎に光の進む速さが異なること。空間モード分散があると光信号の中に速く進む成分と遅く進む成分が生まれ、波形が歪む。伝送距離が延びるほど分散が蓄積し、これを光学的あるいは電氣的に補償する必要が生じる。

※3 非線形ノイズ

強い光と誘電体の相互作用により生じる非線形な干渉により生じる雑音。WDMにおいて、強い光を光ファイバに入射すると、波長の異なる光が干渉しあい雑音が発生する。

※4 スキュー

複数の信号間の時間的なずれ。伝搬遅延差。非結合型MCFではコア間の構造揺らぎや、周辺環境により変動する。スキューがあると受信端で時間的なずれを補償する必要が生じる。

参 考 文 献

- (1) P. J. Winzer and D. T. Neilson, JLT 35 (5), 1099-1115 (2017)
- (2) M.-J. Li and T. Hayashi, in Optical Fiber Telecommunications VII, Chapter 1, A. Willner, ed. (Academic, 2019)
- (3) T. Hayashi et al., in *IEEE OI Conference* (2016), WB4
- (4) T. Tsuritani et al., in *OFC 2019*, M3J.4
- (5) T. Hayashi et al., in *OFC 2019*, Th4A.2
- (6) The University of L'Aquila, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Optoscribe Ltd, "The World's First Field Deployed Multi-Core Fiber Testbed for Optical Communications Installed in L'Aquila, Italy," *News Release* (June 6, 2019)
- (7) T. Hayashi et al., in *OECC/PSC 2019*, PDP3
- (8) T. Matsui et al., in *OECC/PGC 2017*, doi: 10.1109/OECC.2017.8115049
- (9) T. Hayashi et al., in *IWCS 2018*, P-6
- (10) T. Hayashi et al., JLT 35 (3), 450-457 (2017)
- (11) C. Antonelli et al., in *2018 IEEE 5GWF*, 410-415
- (12) T. Sakamoto et al., JLT 34 (4), 1228-1237 (2016)
- (13) B. J. Puttnam et al., *CLEO 2020 STu4R.1*
- (14) R. S. Luis et al., in *OFC 2020*, T4J.4

執 筆 者

永島 拓志* : 光通信研究所 主査



林 哲也 : 光通信研究所 グループ長補佐
博士 (工学)



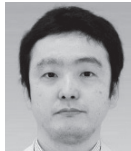
川和田 怜二 : 研究企画業務部



森島 哲 : 光通信研究所 主査



中西 哲也 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者