



SDM光伝送技術の最新動向と今後の展望



株式会社KDDI総合研究所
先端技術研究所

そう ま だい き
相馬 大樹



株式会社KDDI総合研究所
先端技術研究所

べっ ぶ しゅうへい
別府 翔平

1. 空間分割多重 (SDM) 光伝送システム

光伝送システムの飛躍的な大容量化に向けて、空間分割多重 (SDM) 光伝送システムが検討されている。図1に示すように、SDM用光ファイバとしては、コアを複数持つマルチコアファイバ (MCF) と、伝搬モードを複数持つマルチモードファイバ (MMF) がある。

MCFは、コア間のクロストークの大きさによって、弱結合型と結合型に分けられる。弱結合型MCFは、ファイバ断面の屈折率設計によってクロストークを抑圧しており、従来の光送受信器が使用可能である。このような弱結合型MCFの設計としては、簡素な屈折率分布を用いることでコストを抑えたステップインデックス (SI) 型と、コアの周囲に屈折率の低いトレンチ層を設けることで光の閉じ込めを強くし、クロストークを低減させるトレンチアシスト (TA) 型がある^[1]。弱結合型MCFにおいては、実現可能なコア数はクロストークにより制限される。長距離伝送を想定すると、従来のシングルモードファイバと同じ125μmのクラッド径 (標準外径) の場合には、4コア程度が上限と考えられている。

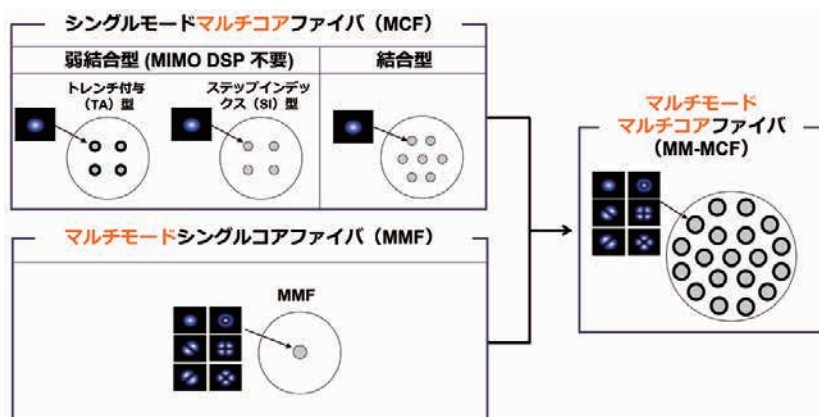
更なるSDM数の増加に向けた光ファイバとしては、結合型MCF及びMMFがある。結合型MCF及びMMFでは、コ

アまたは伝搬モード間のクロストークを許容し、SDM数を増加させる。発生したクロストークは、受信器に実装した大規模な多入力多出力デジタル信号処理 (MIMO DSP) により除去する。結合型MCFは、現在のところSDM数はMMFに比べて劣っているものの、伝搬損失が低く、コア間偏差も少ないこと等から、主に1,000km以上の長距離伝送システム (陸上または海底ケーブル) への適用が検討されている^[2]。MMFは、主に最大1,000km程度の短～中距離伝送システム (データセンター間または陸上) において、SDM数を更に拡大させる手段として検討されている。結合型MCF及びMMFのいずれにおいても、SDM数に応じた大規模なMIMO DSPの実現が重要な課題となっている。

また、更なるSDM数の増加に向けては、MCFとMMFのハイブリッドであるマルチモード・マルチコアファイバ (MM-MCF) もあり、10コア×10モード=100SDMを超える伝送実験が報告されている^[3, 4]。

2. 記録的な大容量・長距離SDM光伝送実験の動向

弱結合型MCFを用いた大容量かつ長距離の伝送実験としては、標準外径TA-4コアファイバを用いた138.9Tb/s



■ 図1. SDM伝送用光ファイバの分類

12,345km伝送実験が報告されている^[5]。本実験では、大容量化のために、既存の波長帯域であるCバンドに加えてL及びSバンドが用いられている。また、更にコア数が多い大容量の伝送実験として、TA-22CFを用いた2.15Pb/s 31km伝送実験が報告されている^[6]。ただし、このような多コアの弱結合型MCFでは、クロストークを抑圧するためにコア間距離を一定以上確保する必要があり、一般には標準外径ではなくなってしまう。外径の大きなファイバは折れやすく、機械的信頼性に課題があるとされている^[1]。近年では、早期実用化に向けて、標準外径という制約の中で、どこまで大容量・長距離の弱結合型MCF伝送システムが実現できるかが盛んに検討されている^[1]。このような標準外径の弱結合型MCFの取組みについては後述する。

更なるSDM数の増加に向けた結合型MCFの検討では、最大コア数としては標準外径の結合型19CFがあり、1.7Pb/s 63.5km伝送^[7]が報告されている。結合型MCFの特徴を生かした多コアかつ長距離の伝送実験としては、結合型12CF 1.2Tb/s 7,280km伝送実験が報告されている^[8]。さらに、既存のWDM技術による大容量化と長距離性を両立した伝送実験として、結合型4CF 50.4Tb/s 9,150km伝送実験が報告されている^[9]。このように、結合型MCFは、長距離伝送に適した特性を持ち、かつ波長依存性が小さく広帯域であることから、大容量かつ長距離伝送が求められる陸上や海底ケーブル伝送システムへの適用が期待できる。

MMFを用いた大容量伝送実験としては、結合型MCFの最大コア数（19コア）を超える標準外径の55モードファイバを用いた3.56Pb/s伝送実験が報告されている^[10]。多モードかつ長距離の伝送実験としては、15モード 273.6Tb/s 1,001km伝送が報告されている^[11]。

しかし、これらの結合型MCF及びMMFを用いた伝送実験の報告では、外径は標準外径であるものの、MIMO DSPがオフラインでしか動作していないことが重要な課題である。

MMFとMCFを組み合わせたMM-MCFでは、2017年に初めて100以上のSDM数の6M-19CF（6mode×19core=114SDM）を用いた10Pb/sの超大容量伝送実験が報告され^[3]、2023年にはWDM波長帯域の拡張により22.9Pb/sの超大容量伝送実験が報告された^[4]。ただし、MM-MCFは、標準外径ではない上にMIMO DSPも必要となるため、SDM伝送システムとしては将来技術と考えられている。

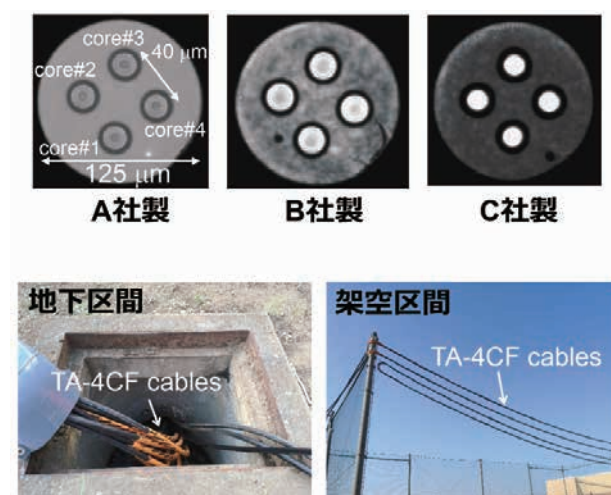
3. SDM光伝送システムの実用化に向けた取組み

3.1 標準外径SDM光ファイバ/ケーブル

SDM伝送システムの早期実用化に向けては、MIMO DSP不要かつ機械的信頼の高い標準外径の弱結合型MCFが有望視されている。具体的な伝送アプリケーションとして、陸上及び海底への敷設を見据えた標準外径4CFのケーブル化も報告されており、ケーブル化を行っても大きな光学特性（クロストーク等）の劣化がないことが確認されている^[1, 12]。また、隣接するコア同士で伝搬方向を変える双方向コア多重伝送方式を採用すれば、クロストークを一層抑圧でき、伝送距離の延伸が可能となる^[13]。2023年には、Google社が双方向伝送を想定した設計の標準外径弱結合型2CFを海底ケーブルへ導入することをアナウンスした^[14]。

3.2 敷設環境下における検証

特に陸上伝送システムは、実験室内とは異なり、架空区間などの外乱が多い敷設環境が含まれる。また、融着やコネクタによる接続箇所も多くなるため、実際の敷設環境における伝送性能の検証が重要となる。イタリアのラクイラ市では、市街地の地下トンネルに敷設された標準外径の弱結合型4CFを用いて、偏波変動速度や伝搬遅延揺らぎの評価等が行われている^[15]。国内では、NTTから、地下洞道に敷設された標準外径の4CFを用いた伝送実験が報告されている^[1]。同様に、KDDIからも、架空やマンホール等を含む外乱環境下かつ異ファイバベンダ間の相互接続損失を含む、実用環境に近い標準外径4CF伝送路を用いた実験が報告されている^[16]。4CF断面及び4CFケーブル敷設環境の写真を図2に示す。本実験では、接続による損失及



■図2. 屋外敷設された弱結合型4CFケーブルの例



びクロストーク増加を考慮しても、63.5Tb/s 1,800kmもの大容量かつ長距離の伝送が可能であることが示されている。

4. SDM光伝送システムの今後の展望

4.1 SDM数の拡大に向けたMIMO信号処理のリアルタイム化

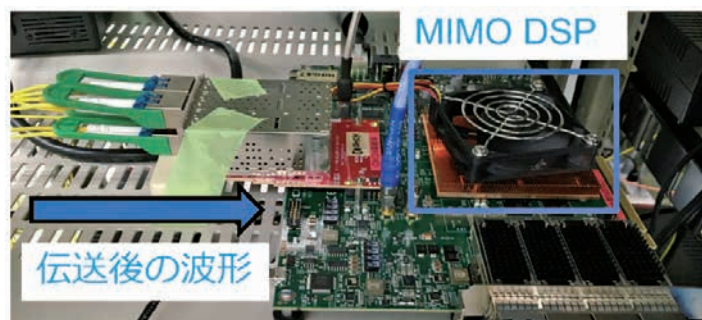
標準外径の弱結合型MCFでは、最大コア数はクロストークによって制限される。更なるSDM数の増加に向けては、MIMO DSPによるクロストーク除去を前提とした結合型MCF及びMMF伝送技術が必須となる。したがって、MIMO DSPのリアルタイム動作及び専用集積回路（ASIC）化を実現する必要がある。リアルタイム実装では、オフラインとは異なり、大規模MIMO演算で生じる演算遅延を考慮する必要がある。遅延の存在下で、刻一刻と変動するコア及びモード間の結合状態の変動に対して追従できるかどうかは重要な検討項目である。近年、FPGAを用いたリアルタイムMIMO DSPの実装及びリアルタイム伝送実験が行われている。2015年に、60kmの結合型3CFを用いたリアルタイム伝送実験が初めて報告された^[17]。2021年には、結合型4CFを用いた7,200kmの長距離リアルタイム伝送が実証された^[18]。本実験で用いた、結合型4CF用のリアルタイムMIMO DSPを実装したFPGAボードを図3に示す。これらは実験室内で行われたものであるが、より過酷な敷設環境のファイバに対する追従性の検証も報告されている^[15]。この実験では、イタリアのラクイラ市に敷設された結合型の4CFを用いて検証を行っている。コア間結合状態の変化は、従来のシングルコアファイバにおける偏波間結合に比べれば高速であるものの、MIMO DSPで追従可能な範囲であることが示されている。2024年には、具体的なASICの設計が初めて報告された^[19]。今後、MIMO DSP ASICの実現による、結合型MCF等を用いた大容量SDM伝送システムの実現が期待される。

5. おわりに

本稿では、大容量化に向けたSDM光伝送技術の最新動向として、記録的な大容量・長距離SDM光伝送実験について紹介した。また、早期実用化に向けて有望視されている標準外径の弱結合型MCF伝送の実証実験について述べた。最後に、弱結合型MCFにおけるコア数上限を打破するMIMO DSPアシスト型大容量SDM光伝送技術について、実現の鍵となるリアルタイムDSPに関する最新の成果を紹介した。

参考文献

- [1] T. Mori et al., J. Lightwave Technol., vol. 42, no. 3, 1044–1055, Feb. 2024.
- [2] T. Hayashi et al., J. Lightwave Technol., vol. 35, no. 3, 450–457, Feb. 2017.
- [3] D. Soma et al., J. Lightwave Technol., vol. 36, no. 6, 1362–1368, 2018.
- [4] B. J. Puttnam et al., ECOC 2023, Th.C.2.1, 2023.
- [5] M. Van Den Hout et al., ECOC 2023, M.A.5.5, 2023.
- [6] B. J. Puttnam et al., ECOC 2015, PDP.3.1, 2015.
- [7] G. Rademacher et al., OFC 2023, Th4A.4, 2023.
- [8] M. Arikawa et al., OFC 2024, Th3E.1, 2024.
- [9] D. Soma et al., J. Lightwave Technol., vol. 39, no. 22, 7099–7105, Nov. 2021.
- [10] G. Rademacher et al., ECOC 2023, We.A.1.1, 2023.
- [11] M. Van Den Hout et al., OFC 2023, 294–297, Th4B.5, 2023.
- [12] H. Takeshita et al., OFC 2022, M4B.1, 2022.
- [13] T. Ito et al., OFC/NFOEC 2013, OTh3K.2, 2013.
- [14] Google, “Boosting Subsea Cables with Multi-Core Fiber Technology.”, 2023.
- [15] M. Mazur et al., OFC 2022, Th4B.8, 2022.
- [16] D. Soma et al., OFC2023, Tu2C.5, 2023.
- [17] S. Randel et al., IPC 2015, PD4, 2015.
- [18] S. Beppu et al., J. Lightwave Technol., vol. 40, no. 6, 1640–1649, Mar. 2022.
- [19] E. Borjeson et al., OFC 2024, W1E.4, 2024.



■ 図3. 結合型4CF用リアルタイムMIMO DSP