

## 標準外径空間多重光ファイバを用いた長距離大容量光ファイバ伝送の研究開発 —世界記録更新、標準外径の19コア光ファイバで毎秒1.02ペタビットの1,808km伝送を達成—

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) ネットワーク研究所  
フォトニックICT研究センター フォトニックネットワーク研究室 室長

ふるかわ ひであき  
古川 英昭



### 1. はじめに

近年、通信トラフィックは国内外で年率10%を超える伸び率で増加しており、2030年ごろのコア・メトロ領域の光通信ネットワークでは、光ファイバ1本当たりペタビット級の容量が必要とされている。しかし、40年以上前に実用化された既存の光ファイバや伝送損失が少なく増幅技術が確立されている波長帯域 (C帯、L帯) のみを使用した光ファイバ通信システムでは、将来に向けて十分な通信容量の確保は難しい。そのため2010年代より、光ファイバ中の経路数 (空間チャンネル数) を増やし伝送容量を増加させるマルチコアやマルチモードファイバによる空間多重光ファイバ伝送技術の研究が盛んに行われている<sup>[1]</sup>。

既存の長距離用の標準的な光ファイバは、コアと伝搬モード (コア内の光路) がそれぞれ1個であるシングルコア・シングルモードファイバである。一方、クラッド中に複数のコアを配置したものがマルチコアファイバで、「非結合型」と「結合型」に分けられる。非結合型は、それぞれのコアを独立の空間チャンネルとして光信号の伝送を行うことが可能である。また、マルチモードファイバや結合型マルチコアファイバでは、複数の伝搬モードを空間チャンネルとして利用し、異なる光信号を同時に伝送するモード多重伝送が可能である。

急速に発展を遂げたマルチコアファイバは、当初、コア数スケーラビリティを重視する観点から、標準クラッド径を上回る大口径の光ファイバを中心に開発され、光ファイバ1本の伝送容量の世界記録を更新してきた。その後、既存製造設備によるケーブル化の可能性、強いファイバ曲げや引っ張りに対する破断率の低さ、ファイバ融着接続の容易さ等の利点から、標準クラッド径 (標準外径) を持つマルチコアファイバが注目を集めている。特に、各コアの信号を独立にコア内に閉じ込めたまま受信端まで伝搬可能な非結合型は、既存の光送受信技術を使用でき、早期実用化に適している。しかし、コア間の信号漏れによる干渉 (クロストーク) を抑えるためにコア間隔を広くする必要があり、標準クラッド径では4~5コア程度が収容限界と見込まれ、更なる伝送容量増加の実現方策が望まれていた。

NICTは、標準外径光ファイバによる大容量光ファイバ通

信システムの実現可能性を示すことを目的として、波長チャンネル数を増やせる新規波長帯を使ったマルチバンド伝送技術、受信時に信号処理 (MINO処理) を必要とするが空間多重度を大幅に増やせるマルチモードファイバ/結合型マルチコアファイバにモード多重伝送技術を導入した光ファイバ通信システム開発に取り組んでいる。本稿では、標準外径空間多重光ファイバを用いた長距離大容量光ファイバ伝送技術の最新の研究成果について紹介する。

### 2. 標準外径空間多重光ファイバを用いた長距離大容量伝送の実証

図1に、NICTが実証してきた様々な標準外径のマルチコアファイバやマルチモードファイバを用いた長距離大容量伝送の成果を示す。標準外径の非結合型4コア光ファイバでは、毎秒0.319ペタビット・3,001km<sup>[2]</sup>、毎秒0.138ペタビット・12,345km<sup>[3]</sup>の伝送容量・伝送距離を達成した。非結合型マルチコア光ファイバでは、コア間の信号干渉抑制のためコア数が制限されるため、商用の長距離光ファイバ伝送システムで利用されている波長帯 (C帯、L帯) に加え、一般的に商用化されていない波長帯 (S帯) まで拡張するマルチバンド技術を用いて大容量化を実現している。新しい波長帯域を利用可能にするためには、特に光ファイバ伝送時の光信号の伝送損失を補償するための光増幅器が必要不可欠であり、S帯用にツリウム添加光ファイバ増幅器 (TDFA) や、光ファイバの材料であるガラス素材における誘導ラマン散乱現象を利用して大パワーの励起光より長波長の信号光を増幅するラマン光増幅器を使用した。

マルチモード光ファイバや結合型マルチコア光ファイバを用いた伝送方式は、受信器におけるMIMOデジタル信号処理による干渉除去を前提に、非結合型マルチコア光ファイバのコア数制限を打破する次世代の大容量伝送技術として研究開発が行われている。これまでに、標準外径の15モード光ファイバを用いて毎秒0.273ペタビット・1,001kmの伝送容量・伝送距離を達成している<sup>[4]</sup>。しかし、マルチモード光ファイバ伝送では、モードごとの伝搬特性の差が大きいため、更なる長距離化に向けてファイバの最適化や負荷の大きいMIMO処理が必要などの課題を抱えている。また、



光ファイバ型	非結合型 4コアファイバ	非結合型 4コアファイバ	15モード ファイバ	結合型 3コアファイバ	結合型 19コアファイバ
ファイバ断面					
総伝送容量 (ペタビット/秒)	0.319	0.138	0.273	0.172	1.02
伝送距離(km)	3,001	12,345	1,001	2,040	1,808
伝送容量・距離積 (エクサビット/秒・km)	0.95	1.71 (従来の世界記録)	0.27	0.35	1.86 (世界記録)
使用した波長帯域	S, C, L	S, C, L	C	C, L	C, L
MIMO処理の負荷	なし	なし	大	小	小
特長・可能性	波長帯域拡張 既存の送受信技術	波長帯域拡張 既存の送受信技術	多モードの 長距離伝送実証	結合型マルチコアの 長距離伝送実証	既存の波長帯域 大容量・長距離両立

■図1. NICTによる標準外径の新型光ファイバによる長距離大容量伝送実証

結合型マルチコア光ファイバを用いた伝送は、マルチモード光ファイバ伝送に比べ、各コアを伝搬する信号の伝搬特性は均一化されるので、MIMO処理の負荷を小さくできる。これまで、標準外径の結合型3コア光ファイバにより、毎秒0.172ペタビット・2,040kmの伝送容量・伝送距離を実証している<sup>[5]</sup>。

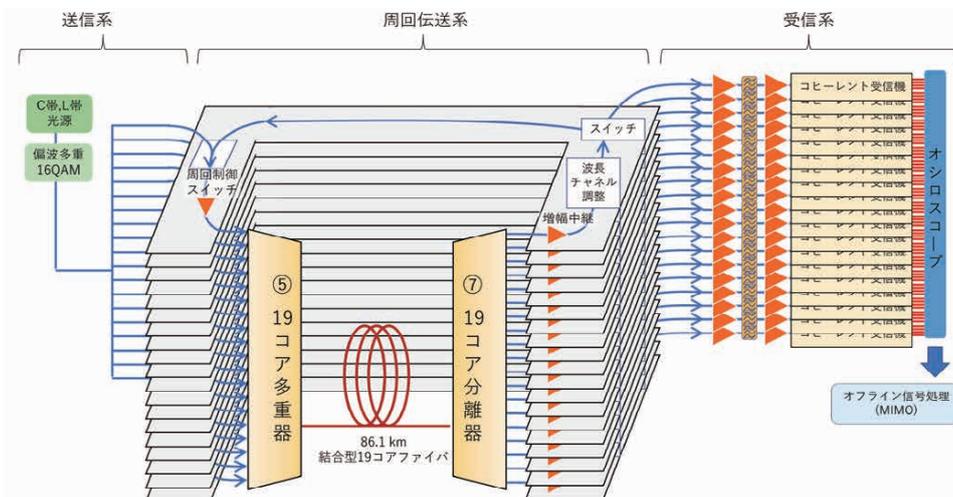
### 3. 標準外径19コア光ファイバを用いた 毎秒1.02ペタビット・1,808km伝送

長距離大容量伝送に適している標準外径の結合型光ファイバについては、現時点で最大コア数となる結合型19コア光ファイバが開発されているが、毎秒1.7ペタビット・63.5kmの伝送容量・伝送距離の実証に留まっており<sup>[6]</sup>、長距離大容量伝送のための光ファイバの損失低減や光増幅中継機能の実現が課題であった。

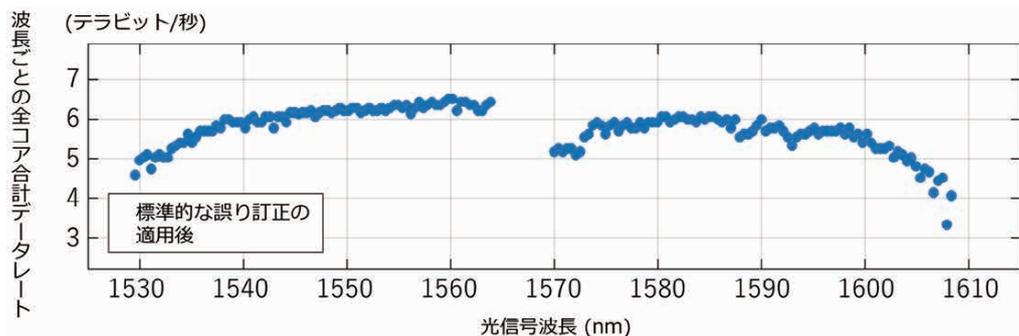
今回、長距離大容量伝送を目的として、標準外径の結合型19コア光ファイバのコアの構造と配置の最適化により、

複数の波長帯域(C帯、L帯)で光ファイバの損失低減を実現した。さらに、19コアの信号を同時に増幅中継する機能を有する伝送システムを開発した(図2参照)。

伝送システムは、送信系、受信系、周回伝送系から構成される。周回伝送系は、19コア光ファイバ、合波器/分波器、光増幅器、周回制御スイッチから構成され、19コア光ファイバ用の光増幅中継機能は、各コアの光信号に対応するように並列にした19台の光増幅器により実現される。19コア光ファイバの信号は、分波器により各コア用に分岐し、光増幅器により伝搬中の信号減衰が補償され、合波器により各コアの信号が再び光ファイバに入力される。長距離大容量伝送を実証する実験を行い、送信系にてC、L帯における180波長の偏波多重16QAM信号を19コア多重して合計毎秒1.02ペタビットの光信号を生成し、1区間当たり86.1kmの19コア光ファイバを19回周回させ、光信号を1,808km伝送させた。周回伝送後、受信系にて全コアの信号を一括で受信し、MIMO処理によってコア間の信号干渉を除去し、



■図2. 結合型19コアファイバを用いた伝送システムの概略図



■ 図3. 結合型19コア光ファイバ1,808km伝送後の波長ごとの全コア合計データレート

各波長のデータレートを測定した。図3の実験結果のグラフは、各波長における誤り訂正適用後の全コア合計データレートを示し、C帯では毎秒約4.5～6.7テラビット、L帯では毎秒約3.3～6.2テラビット程度のデータレートが得られており、全波長合計の伝送容量は毎秒1.02ペタビットであった。この結果、毎秒1.02ペタビット・1,808kmの伝送容量・伝送距離を実証した（図1の赤枠）<sup>[7]</sup>。この結果は、伝送能力の一般的な指標である「伝送容量と距離の積」に換算すると1.86エクサビット/秒・kmとなり、標準外径の光ファイバにおける従来の世界記録である1.71エクサビット/秒・km<sup>[3]</sup>を上回り、新たな世界記録となった。

## 4. 結論

将来の情報通信インフラを支えるために、大容量光ファイバ通信システムの開発が期待されている。これまでにNICTは、標準外径のマルチコアファイバやマルチモードファイバを用いた伝送システムの開発・実証を行い、長距離大容量通信に向けた高いポテンシャルを示してきた。今回の結合型19コアファイバを用いた伝送実証では、総伝送容量は毎秒1ペタビットを超えており、また、総伝送距離は、おおよそ札幌－福岡間に相当する1,808kmとなり、国内の大都市を結ぶペタビット級の光通信ネットワークの実現可能性を示した。今後は、光増幅中継技術の更なる効率化やMIMOデジタル信号処理の高速化を進め、実用化の可能性を探求していく。

### 参考文献

- [1] B. J. Puttnam, G. Rademacher, and R. S. Luis, "Space-division multiplexing for optical fiber communications," *Optica*, vol. 8, no. 9, pp. 1186-1203, Sep. 2021.
- [2] B. J. Puttnam, R. S. Luis, G. F. Rademacher, Y. Awaji, and H. Furukawa, "319 Tb/s Transmission over 3001km with S, C and L band signals over >120nm bandwidth

in 125μm wide 4-core fiber," 44th Optical Fiber Communications Conference (OFC), FB3.3, Online, Jun. 2021.

- [3] M. van den Hout, B. J. Puttnam, G. Di Sciallo, R. S. Luis, G. Rademacher, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Transmission of 138.9 Tb/s over 12345km of 125μm cladding diameter 4-core fiber using signals spanning S, C and L-band," 49th European Conference on Optical Communication (ECOC), M.A.5.5, Oct. 2023.
- [4] M. van den Hout, G. Di Sciallo, G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, M. Mazur, D. T. Neilson, P. Sillard, F. Achten, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "273.6 Tb/s Transmission Over 1001 km of 15-Mode Fiber Using 16-QAM C-Band Signals," 46th Optical Fiber Communications Conference (OFC), Th4B.5, Mar. 9, 2023.
- [5] G. F. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, R. Ryf, S. van der Heide, T. A. Eriksson, N. K. Fontaine, H. Chen, R. Essiambre, Y. Awaji, H. Furukawa, and N. Wada, "172 Tb/s C+L Band Transmission over 2040km Strongly Coupled 3-Core Fiber, (Post-deadline paper)" 43th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4C.5, San Diego, Mar. 2020.
- [6] G. Rademacher, M. van den Hout, R. S. Luis, B. J. Puttnam, G. Di Sciallo, T. Hayashi, A. Inoue, T. Nagashima, S. Gross, A. Ross-Adams, M. J. Withford, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Randomly Coupled 19-Core Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4A.4, Mar. 9, 2023.
- [7] R. S. Luis, M. v. d. Hout, S. Gaiani, B. Kalla, D. Orsuti, Y. Goto, G. Rademacher, B. J. Puttnam, A. Inoue, T. Nagashima, T. Hayashi, P. Boffi, T. Bradley, C. Okonkwo and H. Furukawa, "1.02 Petabit/s Transmission Over 1,808.1 km in a 19-Core Randomly-Coupled Multicore Fiber," 48th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4A.1, Apr. 3, 2025.