



マルチバンド波長多重技術を用いた大容量光ファイバ伝送の研究開発 —既存の光ファイバ伝送で、伝送容量と周波数帯域の世界記録を達成—



国立研究開発法人情報通信研究機構 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

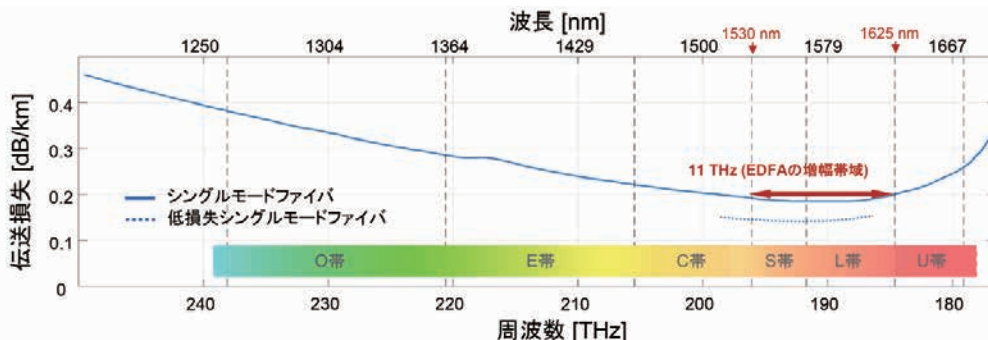
近年、2030年代の情報通信インフラとなり、あらゆる産業や社会活動の基盤となるBeyond 5G/6Gの研究開発が盛んに行われている。Beyond 5G/6Gが活用される社会では、AI（人工知能）、高精細VR/AR（仮想/拡張現実）、大規模IoT（Internet of Things）、自動運転や遠隔医療などのアプリケーションの提供が想定されており、快適で便利な社会の実現が期待されている。一方で、通信トラフィックは国内外で年率数10%の割合で増大を続けており、今後の高度なアプリケーション利用による通信需要の拡大を踏まえると、将来の情報通信インフラへの影響が懸念されている。Beyond 5G/6Gでは、多数の利用者が接続する有線・無線アクセス網だけでなく、多量のデータを扱うコア・メトロ領域の光ネットワークも一体的に捉えられており、各領域で高速・大容量化が重要な研究テーマとなっている。

既存の波長分割多重（WDM：Wavelength division multiplexing）をベースとしたコア・メトロ領域の光ネットワークでは、限られた波長帯域のみ使用されているため、将来に向けて十分な通信容量を確保することは難しい。そのため、近年、光ファイバの利用可能な波長帯を拡大したマルチバンド波長多重技術の研究が進んでいる^[1]。現在使用されている光ネットワークにおいて、新たな波長帯域を導入することが可能となると、光ファイバケーブル増設などの多額の設備投資をせずに、通信容量を経済的に増加させることができる。本稿では、マルチバンド波長多重技術を用いた大容量光ファイバ光伝送技術の最新の研究成果について紹介する。

2. 光ファイバ伝送における波長資源の利用について

図1に標準的なシングルモードファイバにおける伝送損失と波長帯域を示す。現在の長距離向けの商用光ネットワークでは、主にC帯（Conventional band、波長1,530～1,565nm）が利用されており、使用されている波長数は80程度である。また、L帯（Long wavelength band、波長1,565～1,625nm）も一部で商用に利用されている。その他に、O帯（Original band、波長1,260～1,360nm）、E帯（Extended band、波長1,360～1,460nm）、S帯（Short wavelength band、波長1,460～1,530nm）、U帯（Ultralong wavelength band、波長1,625～1,675nm）の波長帯域があり、標準的なシングルモードファイバの伝送損失は0.2dB/km以上となるものの、新たな通信用の波長帯域としての利用が検討されている。

光ファイバ伝送システムにおいて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る。光増幅方式は、エルビウム（Er）やツリウム（Tm）、プラセオジウム（Pr）などの希土類元素やビスマス（Bi）を添加した光ファイバを使った増幅、ラマン増幅、半導体による増幅などがある。希土類元素添加光ファイバ増幅は、励起光により反転分布を形成して信号光の入射による誘導放出によって信号光が増幅される現象を利用した光信号増幅システムである。主にC帯、L帯向けにエルビウム光増幅器（EDFA）が利用されており（図1参照）、短波長側には、ツリウム光増幅器（TDFA）、プラセオジウム光増幅器（PDFA）、ビスマス光増幅器（BDFA）などが利用される。また、ラ

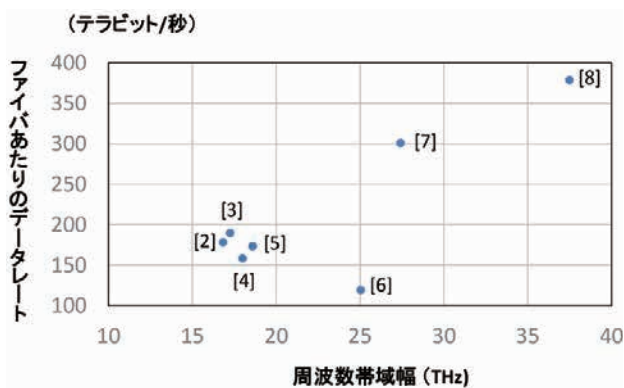


■図1. 光通信波長帯と標準的な光ファイバの伝送損失



マン増幅は、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を利用して、大パワーの励起光より長波長の信号光が増幅する現象を利用した光信号増幅システムであり、広い波長帯域にわたって増幅が可能である。

上述の広大な波長帯域を用いて、従来のC帯、L帯から波長帯域を拡大したマルチバンド波長多重技術を用いた光ファイバ伝送システムの大容量化が検討されている。図2は、標準的なシングルモードファイバとマルチバンド波長多重技術を用いた最近の光ファイバ伝送の実証実験例を示す^{[2]-[8]}。従来のC+L帯の約11THzから、S帯等を活用して更に波長帯域が拡大されている。最新の成果では、O帯からU帯までの37.6THz程度の波長帯域を用いて、毎秒378.9テラビットの伝送実証がなされている^[8]。これは、現在の商用光伝送システムにおける光ファイバ1本当たりの伝送容量の約10倍

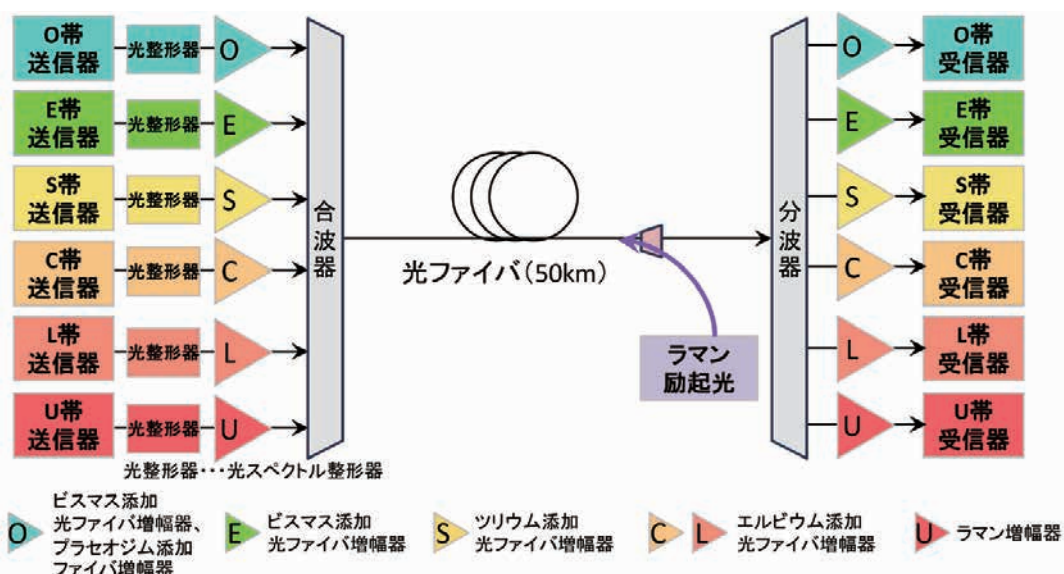


■ 図2. シングルモードファイバとマルチバンド波長多重技術を用いた伝送実証

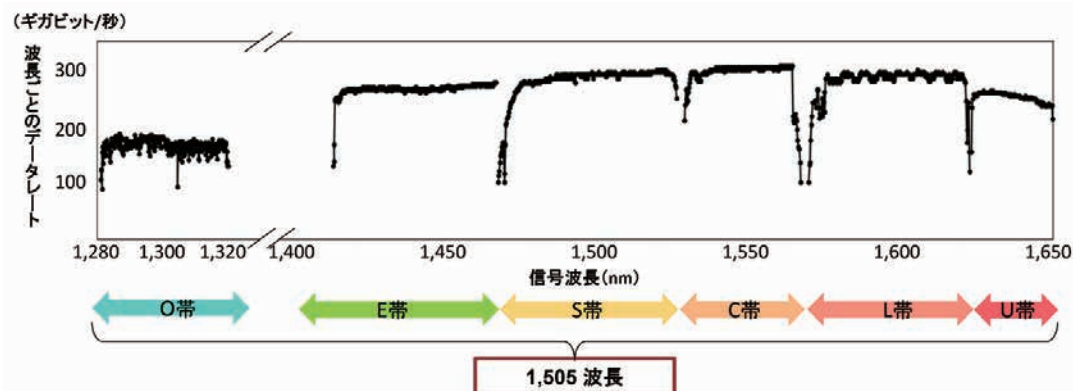
であり、マルチバンド波長多重技術は将来の伝送容量増強に向けて高いポテンシャルを有する。

3. マルチバンド波長多重技術を用いた大容量光ファイバ伝送の実証

マルチバンド波長多重技術について、これまでに我々は、希土類添加光ファイバを使った増幅器とラマン増幅の増幅方式を駆使して、商用で利用されているC帯、L帯に加え、一般的に商用化されていないS帯も使用した光ファイバ伝送システムを構築し、大容量伝送を実証してきた^[3]。最近、E帯用のビスマス添加ファイバ光増幅器や光スペクトル整形器を開発し、E、S、C、L帯にわたる212.3nm波長範囲（波長1,410.8nmから1,623.1nmまで）のほぼ全域に相当する、世界最大の27.8THzの周波数帯のマルチバンド波長多重技術を活用し、合計1,097波長チャンネルの波長多重信号を、実用化されている標準的な単一コア・単一モードファイバで150kmまで伝送することに成功した。伝送距離50kmでは、毎秒301テラビットの伝送容量を実証し、単一コア・単一モードファイバでの伝送容量記録を23%更新した^[7]。さらに、O帯向けビスマス添加ファイバ光増幅器やU帯ラマン増幅器、O帯・U帯用の光スペクトル整形器などを開発し、波長範囲をO、E、S、C、L、U帯に拡張し、標準的な単一コア・単一モードファイバにおいて37.6テラヘルツの周波数帯、毎秒378.9テラビットの伝送実験に成功し、周波数帯域と伝送容量の世界記録を更新した^[8]。図3は、今回開発したマルチバンド波長多重技術を用いた伝送システムの概



■ 図3. マルチバンド波長多重技術を用いたO、E、S、C、L、U帯光ファイバ伝送システム



■ 図4. 伝送実験の結果

略図を表している。図4の実験結果のグラフは、誤り訂正を適用した後の波長ごとのデータレートを示しており、1,505波長合計で毎秒378.9テラビットとなる。

4. 結論

将来の情報通信インフラを支えるために、大容量光ファイバ伝送システムが期待されている。これまでに我々は、標準的なシングルモードファイバで37.6テラヘルツの周波数帯、毎秒378.9テラビットの伝送を実証し、マルチバンド波長多重技術の伝送容量増強に向けた高いポテンシャルを示した。今後、広大な波長資源を利用した光ファイバ伝送システムを実現するためには、広帯域に対応した光増幅器や光送受信器等の基盤技術を確立する必要がある。また、多数の空間チャンネルを持つマルチコアファイバ等と組み合わせることで、光ファイバ伝送の更なる容量向上が見込まれる。

参考文献

- [1] T. Hoshida et al., "Ultrawideband Systems and Networks : Beyond C+L-Band," Proceedings of the IEEE, vol. 110, no. 11, pp. 1725-1741, 2022.
- [2] L. Galdino et al., "Optical Fibre Capacity Optimisation via Continuous Bandwidth Amplification and Geometric Shaping", IEEE Photonics Technol. Lett., pp. 1-1, 2020.

- [3] B. J. Puttnam et al., "S, C and Extended L-Band Transmission with Doped Fiber and Distributed Raman Amplification", in Optical Fiber Communications Conference (OFC2021), Fb3.3, Jun. 2021.
- [4] F. Hamaoka et al., "173.7-Tb/s Triple-Band WDM Transmission using 124-Channel 144-GBaud Signals with SE of 9.33 b/s/Hz", in Optical Fiber Communications Conference (OFC2023), Th3.F.2, Mar. 2023.
- [5] Y. Frignac et al., "Record 158.4 Tb/s Transmission over 2x60 km Field SMF Using S+C+L 18THz-Bandwidth Lumped Amplification", in European Conference on Optical Communication (ECOC2023), M.A.5.2, Oct. 2023.
- [6] D. Soma et al., "25-THz O+S+C+L+U-band digital coherent DWDM transmission using a deployed fibre-optic cable", in European Conference on Optical Communication (ECOC2023), Th.C.2.2, Oct. 2023.
- [7] B. J. Puttnam et al., "301 Tb/s E, S, C+L-Band Transmission over 212 nm bandwidth with E-band Bismuth-Doped Fiber Amplifier and Gain Equalizer", in European Conference on Optical Communication (ECOC2023), Th.C.2.4, Oct. 2023.
- [8] B. J. Puttnam et al., "402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band Transmission", in Optical Fiber Communication Conference (OFC2024), Th4A.3, Mar. 2024.