大容量光通信システムの発展と展望







日本電信電話株式会社 NTT未来ねっと研究所 フェロー

裕

1. はじめに

本稿では、光ファイバの低損失性と広帯域性をフルに活 用した大容量光通信システムのこれまでの発展並びに今後 のパラダイムシフトを起こす新技術の展望について解説す る。代表的な大容量光通信システム^{[11}として陸上光ネット ワークと海底ケーブルシステムを取り上げ、それぞれにおけ る実装・敷設条件等のシステム要求条件の違いによる発展 の経緯と今後の技術動向について述べる。

2. 陸上光通信システムの進展と将来展望

本章では、近年の陸上光通信システムの進展と現状技 術と将来展望を述べる。

2.1 陸上基幹伝送システムのリンク容量の発展

図1に我が国での陸上基幹光ネットワークの発展の推移 を示す。我が国で最初の陸上基幹光通信システムは、多モー ド光ファイバ (MMF) を用いた32Mbit/s再生光中継シス テムであり、1981年に近距離区間に実用化された。単一モー ド光ファイバ (SMF) を用いた基盤技術が世界に先駆けて 早期に実用化され、1985年には、SMFを用いた日本縦貫 ルートが完成した。陸上光ネットワークでは、既設の光ファ イバケーブルを用いて、既存システムとの中継間隔の後方 互換性を保ちながら中継装置を置き換えることで大容量化 が図られる。パラダイムシフトを起こす数々の中継伝送技 術の革新が重層的に実用化されることで、これまでに、 SMFをベースとした光中継伝送技術が飛躍的に発展し、 40年で約6桁の大容量化が達成されている。

1990年代半ばまで、強度変調直接検波方式を用いた TDM (Time-division Multiplexing) による単一波長シ ステムの高速化により大容量化が実現され、1987年には、 1.5µm帯単一モードレーザを適用したF-1.6G方式(単一波長、 1.6Gbit/s再生中継方式)、1996年にはエルビウム添加光 ファイバ増幅中継器(EDFA)を用いたFA-10G方式(単一 波長10Gbit/s光増幅中継方式)が実用化された。その後、 2000年代にはWDM (Wavelength Division Multiplexing) と広帯域光増幅中継技術により、リンク容量1Tbit/s級の



8

10Gbit/sチャンネルベースWDMシステムによる大容量化が 実現された。現在の陸上光ネットワークでは、主要なネット ワークノード(ノード)間の代表的な再生中継間隔は500~ 1,000kmであり、ノード間には、複数の中継ビルに平均中 継間隔約80~100km程度で光増幅中継器が配置され、送 信した光信号が光ファイバ中で受ける損失を光増幅中継器 で補償されながら中継されている。2010年代には、多値デ ジタル変復調信号処理技術を駆使したデジタル・コヒーレン ト技術によるWDMシステムにおける周波数利用効率向上 と長距離化が進み、2013年には、100Gbit/sチャンネル(偏 波多重4値位相変調)を用いたリンク容量8Tbit/s WDM光 ネットワーク、2017年からは、400Gbit/sチャンネル(マル チキャリア16値QAM(Quadrature Amplitude Modulation) を用いた伝送容量20Tbit/s級のデータセンタ間ネットワーク や長距離WDM光ネットワークが実用化されている。

2.2 マルチバンド波長多重伝送技術による大容量化

陸上長距離光ネットワークでは、ケーブル1心当たりの平 均的なファイバ心数は数100心程度であり、当面の大容量 化に向けては、既設のSMF資源を有効に活用した大容量 化の検討が進んでいる。これまではC帯またはL帯など単 ーのEDFA光増幅帯域として約4.5THzを用いた光増幅中 継システムが主に実用化されてきた。しかしながら、近年 のデジタル・コヒーレント技術の実用化により周波数利用 効率の大幅な高度化が進んだ結果、今後、更なる周波数 利用率の大幅な向上が難しくなりつつある。さらに、近年 の研究開発により、SMFを用いた長距離伝送時のリンク容 量の物理的限界が、光非線形効果による信号歪や安全な 許容入力パワ制限により、図1に示すとおり、100Tbit/s付 近にあることが分かってきている (キャパシティクランチ)。 このため、今後のSMFを用いたシステムの100Tbit/s級大 容量化に向けては、波長多重チャンネル容量の高速化と WDMシステム当たりの波長チャンネル数確保(100ch程度) を両立するために、C+L帯(約9THz)やそれを超えるマル チバンド長距離伝送技術の実用化が検討されている。最 近では、SMFの許容パワ制限や光非線形効果を考慮した リンク容量100Tbit/s超級伝送実験例として、バンド間の誘 導ラマン散乱効果を考慮した1,000km級3バンド光増幅中 継伝送実験(中継スパン80km)^[2、3]が報告されている。

2.3 空間多重光通信技術による大容量化

長距離大容量光通信システムにおけるキャパシティクラ

ンチを抜本的に回避する技術として、2008年に発足した EXAT研究会から、空間多重光通信技術(Space Division Multiplexing (SDM))の重要性が提唱された^[4]。以来、 日本が本分野をリードして、本特集に代表される様々な研 究開発がグローバルに進められている。なかでもMulticore Fiber (MCF) を用いた伝送方式については、2010年代に は、ファイバ1心当たりのコア数の向上とコア間のクロストー ク抑圧を両立するための長距離大容量伝送方式の限界追 及が、精力的に検討されてきた。特に、屈折率分布とコア 配置を制御することで、クロストークを抑圧可能な単一モー ドコアによる弱結合MCFは、既存のSMF用のデジタル・ コヒーレント伝送技術をそのまま適用できる利点がある。 機械的信頼性を保ちつつファイバケーブル化可能なクラッド 外径として、現在の光ファイバの2倍の250µmまで許容した MCF条件下で、2012年には、1心で各コアが同じ屈折率分 布をもつ弱結合ホモジニアスMCFにより、12コアまでの高 密度化が図れられた。この12コアファイバにおいて、光増 幅帯域としてC帯と拡張L帯の11THz帯域を用いたマルチバ ンドWDM技術を併用することで、世界初の1Pbit/s無中継伝 送実験(50km)が報告された⁵⁵。さらに、2017年には、同 じMCFの制約条件にて、日欧連携総務省受託研究 (SAFARI) において、2種類の屈折率をもつ32コアヘテロジニアスコア 構造MCFによりコア間クロストークを抑圧し、光増幅器の 低電力・小型化を考慮し、光増幅帯域をC帯のみとするこ とで、世界初の単一方向伝送による1Pbit/s光増幅中継実験 (200km)^[6]、さらに、多値符号化変調方式を併用すること で0.75Pbit/s光増幅中継(1,200km)の実現性が示された。 超大容量化に関しては、クラッド外径250µmの制限を外し た条件下で、モード多重技術とマルチバンド伝送技術を併 用した更なる限界追及が進められ、空間多重数(モード数 xコア数)100以上で2017年には世界初の10Pbit/s(1京: 10¹⁶) を超える伝送実験(11.3km)^[7]、2023年には世界最 大容量22.9Pbit/s伝送実験(13km)が報告された^[8]。

最近では、陸上光ネットワークでSDM技術の実用化に向 けて、特にMCFの量産性や国際標準化の観点で、既存の SMFと同じ標準クラッド外径125µmで、コア間クロストー クを抑えた4コア弱結合MCFの検討が進んでいる。2017年 には、NICT委託研究(#170、#188)において、共通仕 様で複数のファイバベンダで試作した4コアファイバ及びマ ルチコアファイバ増幅器、マルチコアコネクタを適用した、 マルチベンダ相互接続実験が実施され、118Tbps光増幅 中継(3 x 100km)伝送実験が報告された^[9]。その後、そ れらの知見を踏まえつつ、NICT委託研究(#203)にて、 陸上光ネットワークに向けた標準クラッド外径4コアファイ バケーブル設計・量産化技術の検討^[10]が進んだ。現在で は、ITU-TおいてはSDM技術レポート発効を含む標準化 推進、IECにおいてはMCコネクタ評価測定方法に関する 国際標準化が活発化している。

また、将来のPbit/s級光通信システムの実用化を見据え た際には、媒体としての空間多重ファイバの空間利用効率 のみならず、光送受信機や光増幅中継器、光スイッチノー ド等の光ネットワークノード装置の小型集積化・低電力化 が必須となる。例えば、WDMシステム導入経緯を振り返る と、図1の1996年の世界初の1Tbit/s級WDM伝送実験実証 から、国内で経済的な1Tbit/s級WDMシステムが本格的に 導入実用化される2003年までに約10年を要している。その 理由は、その10年間で、シリコン集積回路技術や10Gbit/s クラスの光送受信回路実装技術の進化、多方路Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM) ノー ドの導入により、10Gbit/s級送受信装置や光スイッチング ノード装置の小型化・低電力化が進んだことによる。Pbit/s 級のSDMシステムの実用化においても、MCF等のSDM伝 送媒体の性能を引き出しつつ経済化を図るには、SDM光 ネットワークノード装置の小型集積化・低電力化の検討が 極めて重要であると考えられる。NICT委託研究(#188、 #170) では、Pbit/s超級ノードスループットの空間多重フォ トニックノード実現に向け、SDM技術による光スイッチノー ド集積技術やクラッド励起MC光増幅器等、光増幅中継器 の小型・低電力化が検討された。標準クラッド外径4コアファ イバと集積化波長選択光スイッチノード等を用いた3ノード 構成実験ネットワークを構成し、Pbit/s超のノードスループット実証実験が報告された^[11]。

3. 光海底ケーブルの進展と将来展望

本章では、光海底ケーブルの進展と現状技術、さらに、 海底ケーブル特有のスペース及び電力制限の観点から空間 多重技術による光海底ケーブルの将来展望を述べる。

3.1 ファイバ当たりの容量の推移

光海底ケーブルシステムは、陸上システムと同様に光信 号速度の高速化、帯域幅拡大による並列化及び多値化の 順で進展してきた。図2に主要太平洋横断光海底ケーブルの ファイバ容量並びにケーブル容量の推移を示す。単一波長 の光海底ケーブルでは、1989年に商用化された280Mbit/s の信号速度が1995年の光増幅中継システムTPC-5では約 18倍の5Gbit/sまで高速化された。続いて、光増幅器の帯 域幅を拡大しWDM技術と分散補型非線形光伝送路の定 常解であるチャープドガウシャンRZ信号を用いる分散マネー ジドソリトン伝送技術^[12]により、10Gbit/s、100WDMが 実現され総容量は一気に200倍の1Tbit/sまで大容量化さ れ、1990年代末から2010年半ばまで世界中で商用化され た^[13]。続くデジタル・コヒーレント方式では、偏波多重と QAMによる多値変調により周波数利用効率が向上し、現 在、ファイバ伝送容量は約20倍の20Tbit/sまで拡大されて いる。

3.2 空間多重によるケーブル容量の拡大

1本の光ファイバが伝送できる商用光海底ケーブルの容



■図2. 主要太平洋横断光海底ケーブルのファイバ容量とケーブル容量の推移

量は既にほぼ飽和しており、次世代に必要とされる数十倍 の容量拡大には、SDMによる並列化が有効である。SDM では、S/N拡大のために光パワの増加を要する高速化や多 値化と異なり、多重数に応じて容量拡大が可能である。図2 のケーブル容量の推移をみると、ファイバ容量がほぼ飽和 した2020年代以降もファイバ心線数を増やして総容量が増 加していることが分かる。1995年から現在までに心線数 は10倍まで拡大されており、単一コア光ファイバによる空間 多重技術はSDM1.0と呼ばれている。しかしながら、外形 2cm以下の海底ケーブルのスペース制限により、ケーブル へ収容可能な心線数は50心(25FP:ファイバペア)程度 に制限されるため、空間利用効率の高いMCFによるSDM2.0 の研究開発が世界中で進められている。

SDMによる大洋横断伝送の可能性は、2012年に初めて 7コアファイバと7コアEDFAを用いる伝送実験にて報告さ れ^[14]、翌年にはファイバ容量140Tbit/s以上で容量・距離 積1エクサbit/s・kmを超える光海底ケーブルの可能性が実 証された^[15]。現在は、上述したように標準クラッド径125µm の4コアファイバの研究開発^[13]や標準化が精力的に進めら れ、光海底ケーブルでのSDM2.0の早期実用化を目指した 総務省受託プロジェクト(OCEANS)において、1.7cm径 の光海底ケーブル(4コアファイバを含む16FP)の試作や 62.9Tbit/s-9,150kmの太平洋横断伝送試験等^[16]が実施さ れた。2025年に商用予定の太平洋横断伝送試験等^[16]が実施さ れた。2025年に商用予定の太平洋横断海底ケーブルTPU においては、OCEANSの成果の一部として、MCFの最初 の商用システムとして台湾-海中分岐-フィリピン間の約 840kmの区間に2コアファイバの導入が計画されている。

3.3 電力制限に伴うケーブル容量制限

スペース制限に加えて、光海底ケーブル特有の制約条件 は電力制限である。海底ケーブル内の導体の電気抵抗は 約0.8Ω/kmであるため、給電電流1Aを仮定すると1万km で8kVが熱として失われる。陸上げ局の給電装置の電力は 現在16~18kVであり、ケーブル抵抗による消費電力を除く 電力を100台以上の中継器に分配する必要があり、電力制 限がシステム総容量を決定すると言っても過言ではない。 SDM1.0では、EDFAのポンプLDを冗長化し、1台のポン プLDで2台のEDFAを励起するポンプシェアリングを導入し 消費電力を抑制しつつ心線数を増加させたが、更なる容 量拡大にはシェアリング数を増加する必要がある。図3に、 4コアファイバを用いる大西洋(7,000km)及び太平洋 (9,000km) 横断システムにおける、ポンプシェア数に対する



最大ケーブル容量の基準値からの拡大率を示す。基準容量 としては、大西洋横断光海底ケーブルで500Tbit/s (24FP)、 太平洋横断光海底ケーブルで350Tbit/s (20FP) とした。 その他のパラメータは給電電圧18kV、給電電流1A、ケー ブル抵抗0.8Ω/km、ポンプLD電圧2.5Vとして、超低損失 光ファイバ(損失 a = 0.15dB/km) によりスパン長を80km に拡大し中継器数を削減している。現在のポンプシェア数 では、大西洋横断システムでは2コアファイバにより 基準 容量の2.4倍(1.18Pbit/s)、太平洋横断1.9倍(670Tbit/s) が実現可能である。注意すべき点は、大洋横断光海底ケー ブルでは4コアファイバでも電力制限により有効コア数は増 加できず容量増加が困難であることである。更にケーブル 容量を増加するためには、図3に示すように4コアファイバと ポンプシェア数を3~4に拡大する必要があり、大西洋横断 で4.7倍 (2.4Pbit/s)、太平洋横断で3.8倍 (1.3Pbit/s)の 容量拡大が見込まれる。将来コア数の多いランダム結合型 MCFにより、更にコア数を拡大し大容量化を図るには、給 電電力の増加や、ケーブル・中継器の高耐圧化などの抜 本的な変更が必要となり、経済性と大容量性のトレードオ フの関係になる。

4. おわりに

本稿では、陸上・海底の光通信システムの大容量化の変 遷と空間多重による超大容量化の展望を述べた。これまで、 日本がリードした空間多重光通信技術により既存のSMFの 物理限界を超えたペタビット超級のリンク容量の実現にむ け、様々な研究開発が活発に推進されてきた。空間多重光 通信技術を用いた大容量光通信システムの実用化に向け て、標準クラッド外径の4コアファイバの国際標準化が進め られ、光海底ケーブルでは2コアファイバの2025年の商用 導入が計画されている。2008年に発足したEXAT研究会 が掲げた「25年後の光通信の飛躍的高度化」に向けた開 発目標は大幅に前倒しされており、今後、関連技術の更な る進展による大容量光通信インフラの継続的実現が期待さ れる。

参考文献

- 宮本裕、森田逸郎;創立100周年記念特集通信技術の進化と未来への展望, 3-2 大容量光増幅中継技術, 電子情報通信学会会誌, Vol.100, No.8, pp.789-793, 2017.
- [2] F. Hamaoka, M. Nakamura, T. Sasai, S. Sugawara, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, E. Yamazaki, "110.7-Tb/s Single-Mode-Fiber Transmission over 1040 km with High-Symbol-Rate 144-GBaud PDM-PCS-QAM Signals," Proc. OFC2024, Tu3E.2, 2024.
- [3] T. Kobayashi, S. Shimizul, A. Kawail, M. Nakamura, M. Abe, T. Kazama, T. Umeki, M. Nagatani, K. Kimura, H. Wakita, Y. Shiratori, F. Hamaokal, H. Yamazaki, H. Takahashi, and Yutaka Miyamoto, "C+L+U-Band 14.85-THz WDM Transmission Over 80-km-Span G.654.E Fiber with Hybrid PPLN-OPA/EDFA U-Band Lumped Repeater Using 144-Gbaud PCS-QAM Signals," Proc. OFC2024, Th4A.1, 2024.
- [4] T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies; 'EXAT initiative toward 2020 and beyond," Proc. OECC2009, FT4, 2009.
- [5] H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222WDM/456 Gb//s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," Proc. ECOC2012, Th3.C.1, 2012.
- [6] T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, K. Shibahara, T. Mizuno, A.Sano, H. Kawakami, A. Isoda, M. Nagatani, H. Yamazaki, Y. Miyamoto, Y. Amma, Y. Sasaki, K. Takenaga, K. Aikawa, K. Saitho, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, M. Nooruzzaman, and T. Morioka, "1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band Dense SDM Transmission over 205.6-km of Single-mode Heterogeneous Multi-core Fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM Channels," Proc. OFC2027, Th5B-1, 2017.
- [7] D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, H. Takahashi, K. Igarasgi, I. Morita, M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s dense SDM/WDM transmission over low-DMD 6-mode 19-core fibre across C+L band," Proc. ECOC2017, Th.PDP.A.1, 2017.
- [8] B. J. Puttnam, M. van den Hout, G. Di Sciullo, R. S.

Luis, G. Rademacher, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "22.9 Pb/s Data-Rate by Extreme Space-Wavelength Multiplexing", Proc. ECOC2023, Th.C.2.1, 2023.

- [9] T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. De Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Abe, S. Aozasa, Y. Wakayama, T. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto, K. Nakajima," Proc. OECC2017 postdeadline paper 2, 2017.
- [10] T. Mori, Y. Yamada, K. Shibahara, T. Matsui, M. Kikuchi, Y. Sagae, D. Soma, S. Beppu, T. Nagashima, T. Morishima, T. Hayashi, M. Ohzeki, K. Takenaga, M. Takahashi, T. Sasaki, R.Sugizaki, Y. Miyamoto, and K. Nakajima, "Applicability of Standard Cladding Diameter Multi-Core Fiber Cables for Terrestrial Field," IEEE J. Lightwave Technol, vol. 42, no. 3, pp. 1044-1055, 2024.
- [11] F. Inuzuka, H. Hasegawa, K. Shibahara, H. Takahashi, T. Tsuritani, K. Seno, N. Nemoto, Emmanuel Le Taillandier de Gabory, S. Yanagimachi, T. Sakamoto, K. Nakajima, M. Takahashi, R. Sugizaki, R. Nagase, K-I Sato and Y. Miyamoto, "Power-saving Aware SDM Photonic Node with the Throughput Scalable to over Peta bit per second," OECCPSC2022, Invited paper TuF4-1, 2022.
- [12] M. Suzuki, "Dispersion managed solitons and their application to high-capacity optical submarine cable systems", Journal of Optik, Special Issue of Golden Jubelli of Optical Solitons, 280, 170771, Elsevier, 2023.
- [13] 鈴木、森田、秋葉;長距離光ファイバ通信システム〜大 洋横断伝送に焦点をあてた高速・大容量化技術の進化と 将来展望〜、オプトロニクス社、2019.
- [14] H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, Y. Mimura, K. Maeda, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "First demonstration of MC-EDFA-repeatered SDM transmission of 40 × 128-Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160-km 7-core MCF," Proc. ECOC2012, Th.3.C.3 2012.
- [15] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s× km super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km sevencore fiber," Proc. ECOC2013, PD3.E.3, 2013.
- [16] D. Soma, S. Beppu, Y. Wakayama, S. Sumita, H. Takahashi, N. Yoshikane, I. Morita, T. Tsuritani, M. Suzuki. "Trans-pacific class transmission over standard cladding ultralow-loss 4-core fibers", Optics Express, Vol. 30, pp.9482-9493, 2022.