

光通信の現状と今後の飛躍のための光ファイバー技術

盛岡敏夫

Present Status of Optical Communication Technologies and Next-Generation Optical Fiber Technologies for Extremely Advanced Optical Transmission

Toshio MORIOKA

The optical communication technologies using optical fibers as a transmission medium have become global communication infrastructures, and at present intensive research activities are underway to realize transmission capacity as large as 100 Tbit/s per fiber. Although they had realized a 4 orders of magnitude increase in transmission capacity over the last 30 years, they have begun to reveal their fundamental physical limits such as maximum input optical powers into the transmission fiber and optical amplifiers' limited bandwidths. In this report, the present status of optical communication technologies and their limitations are firstly summarized, and then novel optical transmission technologies to go beyond these limitations are proposed. Lastly, all-Japan R&D activities named "EXAT Initiatives" towards Pbit/s optical transmission and beyond are also introduced.

Key words: optical fiber communication, optical fiber, optical amplifier, space-division multiplexing, mode-division multiplexing, fiber fuse

光ファイバー通信技術は、その高速広帯域性により、陸上基幹システム、長距離海底システムのみならず、近年では FTTH (fiber-to-the-home) として、アクセス系にも導入され、まさに今日のブロードバンド情報化社会の根幹を支えている。光ファイバー通信技術のこれまでの研究開発の歴史をみると、超低損失で広帯域の光ファイバー、常温で連続発振する低雑音の半導体レーザー、高感度の光検出器 (フォトダイオード)、高速広帯域の電子回路、波長分割多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 信号を一括増幅できる光ファイバー増幅器などの数々の革新的な発明により、過去30年間で約4桁の大容量化を実現してきた。現在、光ファイバー1本あたり1.6 Tbit/s (40 Gbit/s, 40波長) のシステムが国内の陸上基幹系に導入され、実験レベルでは光ファイバー1本あたり100 Tbit/s 級伝送の実現に向けた研究が各国で活発化している¹⁻⁴⁾。

しかし、WDM 技術や高度の変復調技術を駆使した光通信技術も、伝送路である光ファイバーや光増幅器の物理的

限界により、伝送容量の限界がみえてきた。具体的には、光ファイバー中の非線形光学効果による信号劣化と、パワー集中により光ファイバーのコア部が溶融して光源側に伝搬するファイバーフューズ、および光増幅器の増幅帯域制限である。本稿では、今後予想される通信トラフィック需要、光通信技術の現状、ならびにこれらの限界を明らかにし、それらを打破する新たな光ファイバー技術を含む革新的光伝送技術を提言する。あわせて、産官学連携で始動した限界打破への取り組みである EXAT 研究会についても紹介する。

1. 通信トラフィック需要

現在、わが国のインターネットトラフィックは、年率1.2~1.4倍で増加している⁵⁾。今後、タブレット型端末やスマートフォンなどの高度情報端末の普及により、超高精細動画のストリーム配信や各種アプリケーションの利用が拡大することを考えると、トラフィックの増加はさらに続

くと考えられる。また、今後、クラウドサービスの普及により、社会全体でネットワークの利用が急拡大する可能性もある。その意味では、クラウドサービスを支えるCPUの演算処理能力とストレージ量の推移は、今後のトラフィック需要を予測する重要な指標になると考えられる。例えば、スーパーコンピュータ（HPC: high performance computers）のCPU演算処理能力は、この10数年の間、年率2.5 dB以上で増加し続けている⁶⁾。これは、4年で10倍、12年で1000倍、20年で実に5桁の増加に相当し、2020年ごろにはE（エクサ=10¹⁸）FLOPS級のHPCが登場すると予想されている。図1左上に、HPCの上位500機種種の平均演算速度の推移を示す。また、ハードディスクなどの記憶容量も、近年、年率約1.5 dBで増加しており、20年では1000倍の増加に対応する。

一方、ユーザーのアクセス速度の推移も、バックボーンの通信トラフィックを予測する重要な指標となる。まず、モバイルアクセスでは、2010年に導入が始まった下り最大300 Mbpsの高速データ通信仕様であるLTE（long term evolution）や、2010代中期以降に導入が予想される、下り最大1 Gbpsの高速仕様のLTE-Advancedにより、アクセス速度は最大1 Gbps程度となり、今後10年では2桁以上の速度上昇が予想される。また、光アクセスも、基幹系に用いられる超広帯域の石英シングルモードファイバーが各家庭に敷設され、今後10年～20年を考えれば、現在より4桁増のTbit/sアクセスも十分予想される。

このように、今後20年のトラフィック需要に対応するには、現在に比べて3桁～5桁高い伝送能力を有する光通

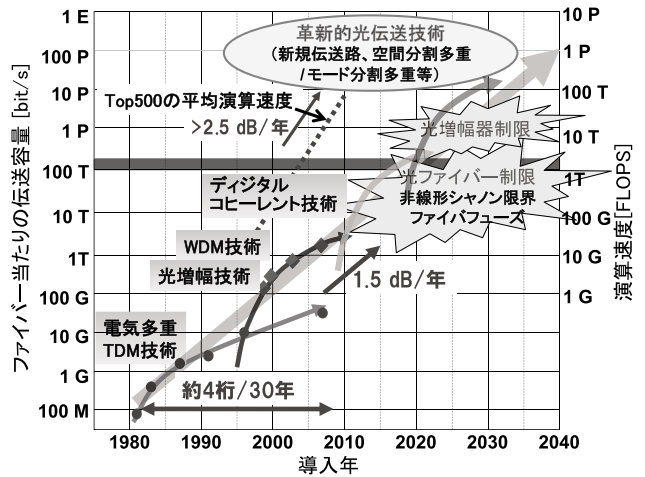


図1 基幹系光伝送システムの変遷と限界要因。

信技術を確立する必要がある。これは、ファイバー1本あたりP bit/s（ペタビット毎秒）をはるかに超える伝送能力に相当する。

2. 光ファイバー通信技術の現状と限界

わが国の基幹系光伝送システムにおけるファイバー1本あたりの伝送容量の変遷と今後の容量拡大を阻む限界要因を図1にまとめる。これまで、高速電子回路による電気多重TDM（time division multiplexing, 時分割多重）技術、光増幅器を用いたWDM技術の2つの大きな技術革新により、過去30年で約4桁（年率で約1.5 dB/年）の大容量化を実現している。現在、多値変復調技術とデジタル信号処理を組み合わせたデジタルコヒーレント技術により、

$$[\text{総伝送容量}] = \frac{[\text{信号光周波数利用効率}]}{[\text{信号光占有帯域}]} \times [\text{信号光占有帯域}]$$

$\frac{\text{bit/s}}{\text{bit/s/Hz}} \times \text{Hz}$

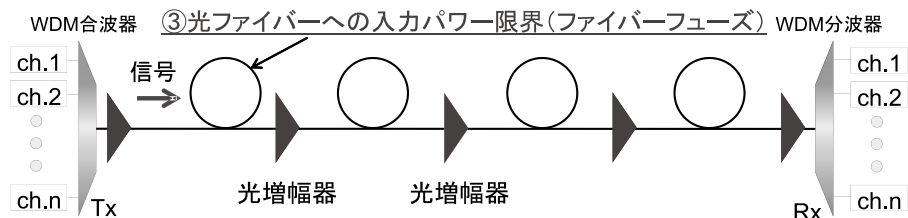
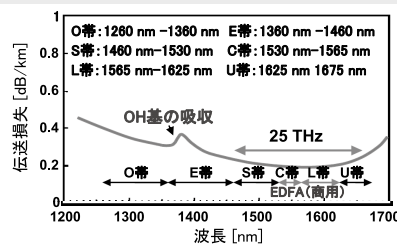
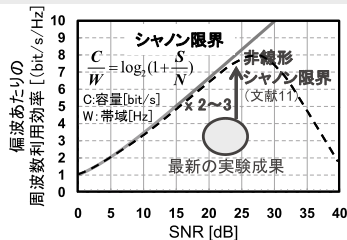


図2 光増幅中継 WDM システムにおける物理限界。

さらに1~2桁の容量増加を目指して、1波長あたり100 Gbit/s以上、ファイバー1本あたり100 Tbit/s級の伝送システムの研究開発が活発に進められている⁷⁾。

しかし、伝送路である光ファイバーへの入力パワー制限や中継器を構成する光増幅器の帯域制限により、いよいよ伝送容量の限界が見えてきた。光ファイバーへの入力パワー制限には、(1)非線形シャノン限界(周波数利用効率の限界)と(2)ファイバーフェーズ限界(熱破壊限界)の2つがあり、それぞれ、高パワーの信号光により光ファイバー中に誘起される非線形光学効果と、光ファイバー自体の熱破壊現象に由来する。これらの限界を超え、Pbit/s以上の伝送を実現するには、第4の革新的な光伝送技術が必要とされており、これに対応して現在、新規光ファイバー伝送路やTDMやWDMに加えて、空間分割多重(SDM: space-division multiplexing)やモード分割多重(MDM: mode-division multiplexing)などの新たな多重化技術の検討が始まっている⁸⁻¹¹⁾。

図2に現状の光増幅中継WDMシステムにおける物理限界を模式的に示す。図に示すように、総伝送容量[bit/s]は、信号光の周波数利用効率[bit/s/Hz]とその占有帯域[Hz]の積で与えられ、総伝送容量を拡大するには、周波数利用効率を向上させ、増幅帯域を拡大すればよい。ここで、信号光の周波数利用効率の上限であるシャノン限界は、シャノンの定理¹²⁾により与えられ、信号SNR(信号パワー)を増加させれば、周波数利用効率も増大させることができる。しかし光ファイバーを伝送路とする場合、光ファイバー中の非線形光学効果により信号品質が劣化し、図に示すように、周波数利用効率は最大値をもち、ある一定以上の光信号パワーを入力しても、周波数利用効率は逆に減少する。この現象は、「非線形シャノン限界」とよばれ^{13,14)}、帯域あたりの伝送容量を制限する。伝送距離(再生中継距離)1000 km程度の場合、1偏波あたりの最大の周波数利用効率は8 bit/s/Hz、偏波多重を用いても16 bit/s/Hz程度であり、最新の伝送実験では、この限界まで数dB(2~3倍)まで迫っている^{13,14)}。

また、光増幅中継システムの場合、信号光の占有帯域は、中継器を構成する光増幅器の増幅帯域に等しい。現在、基幹系の商用システムに用いられている光増幅器はC帯(1530~1565 nm)とL帯(1565~1625 nm)の2種類のEDFA(erbium-doped fiber amplifier, エルビウム添加光ファイバー増幅器)であり、合わせて約10 THzの帯域を有している。図2に示すように、光ファイバーの低伝送損失の領域は約25 THz(S帯, C帯, L帯, U帯)である。両偏波合わせた周波数利用効率16 bit/s/Hzが実現したと

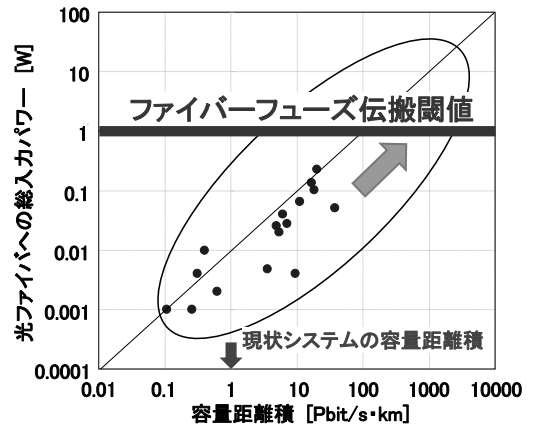


図3 最近の光伝送実験における容量距離積 [Pbit/s・km] と光ファイバーへの総入力パワーの関係。

しても、C帯, L帯に、S帯(1460~1530 nm)を加えた約15 THzの増幅帯域で、総伝送容量は240 Tbit/s程度にとどまる。今後は、O帯(1260~1360 nm), E帯(1360~1460 nm), U帯(1625~1675 nm)の光増幅技術も必要となろう。

ただし、上記の総伝送容量に対応する光ファイバーへの総入力パワーは、光ファイバーのコア部分が溶融して光源側に向って伝搬し、伝送路を熱損傷させる「ファイバーフェーズ」現象により大きく制限される。既存ファイバーのファイバーフェーズの伝搬閾値(ファイバーフェーズがいったん起こった場合に停止する光パワー)は1.2 W~1.5 Wであり¹⁵⁾、実用上は既存の光ファイバーへの許容入力パワーは1 W程度と考えられ、これ以上の光パワーを入力することは、安全上好ましくない¹⁶⁾。

さて、それでは、上述の1 Wの信号光パワーで、最大どれぐらいの容量が既存の光ファイバーで伝送できるのだろうか。ひとつの目安として、図3に、最近の光伝送実験における容量距離積 [Pbit/s・km] と光ファイバーへの総入力信号パワーの関係を示す。単位容量距離積あたりの信号パワーは数~10 mW/[Pbit/s・km]程度である。実線は10 mW/[Pbit/s・km]を示しており、総入力パワーは次第に上述のファイバーフェーズの伝搬閾値に近づいている。例えば、現在の商用システムの数百倍の容量を有する1 Pbit/sで1000 km(1000 Pbit/s・km=Ebit/s・km)の光伝送システムを実現するには、数W程度の光信号パワーが必要となることが予想される。さらに、すでに商用システムで用いられている分布ラマン増幅の励起光パワーも考慮すると、現状の光ファイバーを用いる場合、ファイバーフェーズの観点からは、伝送距離1000 kmに対しては、100 Tbit/s程度が限界となると考えられる。逆に、4~5桁程度の大容量化には、100 W程度の光パワーを伝送する必要がある¹⁷⁾。

3. 限界を超える革新的光伝送技術

これまで述べてきたように、伝送容量を3~5桁の規模で飛躍的に拡大するには、上述の限界を克服する新規光ファイバー伝送路や新たな多重化技術、光増幅技術の開発が必要である。大きな研究の方向性としては、次の3つが考えられる。

- ・伝送用光ファイバーと光コネクタ、融着部の耐パワー化 (~100 W 級) による容量拡大
- ・空間分割多重・モード分割多重によるパワーの分散と容量拡大
- ・光ファイバー・光部品の低損失化, 光増幅器・光検出器の低雑音化による高パワー化抑制

ここでは、おもに前2つの観点から、新規光ファイバー伝送路と新規多重化技術についての研究の方向性、動向をまとめる。

3.1 新規光ファイバー伝送路

前述したように、新規伝送路としては、非線形光学効果を抑制して周波数利用効率を高め、ファイバーフェーズを抑制して増幅帯域を拡大することにより、伝送容量を飛躍的に増大できる新規光ファイバーの開発が望まれる。これら耐非線形性、耐パワー性を高める取り組みは、現在のところ、フォトニック結晶ファイバー、空孔アシストファイバー (HAF: hole-assisted fiber) などの単一コアファイバーで検討が進んでおり、その高い耐ファイバーフェーズ特性が報告されている¹⁸⁻²¹⁾。これらに加えて、SDM用、MDM用のマルチコアファイバーやマルチモードファイバーの検討も進んでいる。複数のコアやモードを一括で増幅できれば、消費電力や装置コストの削減、省スペース化が実現でき、空間多重化によるメリットは大きい。さらに、将来必要とされるであろうペタビット以上の光インターフェースも構築しやすい。このような中長期的な観点から、耐非線形性、耐パワー性を高めた上で、コアの数を複数にしたマルチコアファイバー²²⁻²⁴⁾ や個々の空間モードを独立の信号チャネルとして利用するマルチモードファイバー²⁵⁾ の検討が活発化してきた。最近、7コア程度のマルチコアファイバーを用いた伝送実験も報告され^{4, 26-28)}、今後、コア数と伝送距離の拡大等の検討が進むものと考えられる。また、マルチコアファイバーに関連して、国家プロジェクト「革新的光ファイバー技術の研究開発」が2010年度から始動した²⁹⁾。

3.2 新規多重化技術

多重化技術については、これらの新規の光ファイバーを用いたSDM技術やMDM技術の検討が活発化している。図4(a)にSDM技術、(b)にMDM技術をそれぞれ模式

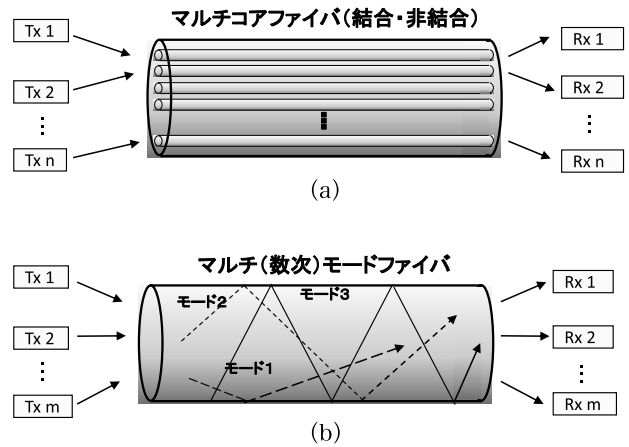


図4 (a) SDM (空間分割多重) 技術と (b) MDM (モード分割多重) 技術。

的に示す。MDM技術自体は、1980年代よりマルチモードファイバーを用いた短距離伝送の提案、実験が報告されており^{30, 31)}、近年では、MIMO (multiple-input multiple-output) 処理 (2×2 ~ 6×6) を用いた実験も報告されている³²⁻³⁶⁾。耐非線形性、耐パワー性を高めた新規伝送路とSDM技術、MDM技術を組み合わせて、今後、3桁以上の伝送容量の拡大を目指している。もちろん、上述したように、これらの多重化技術には、マルチコアやマルチモード増幅などの新規光増幅技術とそれに付随した光コネクタ、融着の新規のインターフェース技術がキーとなり、これらの研究を一体で進める必要がある。

4. 産官学連携による限界打破への取り組み

2008年1月に、独立行政法人情報通信研究機構において「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会」(EXAT研究会, EXAT: extremely advanced transmission) が産官学連携で発足し、約2年間にわたり活動した^{9-11, 37)}。光パワー限界を打破し、3~5桁の伝送容量拡大(毎秒ペタビットを超える光伝送)を実現しうる革新的光通信インフラ技術について、限界や萌芽技術や今後の具体的な技術課題を集中的に議論し、2008年11月には、その報告会を兼ねて国際シンポジウムEXAT 2008³⁸⁾を東京で開催した。図5に、同研究会で検討した基本技術である「3つのマルチ(3M)技術」を示す。なお、2010年4月からは、電子情報通信学会通信ソサイエティ「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する時限研究専門委員会」³⁹⁾として、検討を続けている。以下に、EXAT研究会での提言内容を簡単に紹介する。

4.1 新規光ファイバー伝送路技術

毎秒ペタビットを超える情報量を伝送できる新規光ファ



図5 EXAT研究会の3つのマルチ技術。

イバー伝送路のみならず、光コネクタ技術、融着技術、ケーブル化技術等の研究開発が必要となる。新規光ファイバーとしては、従来のシングルコア・シングルモードファイバーのみならず、SDM, MDMを可能にする耐光パワー性にすぐれ、非線形定数が小さいマルチコアファイバーやマルチモードファイバーの検討が必要である。また、ファイバーフェーズのメカニズムの解明・解析、伝搬停止技術や遠隔検知技術についても研究を進める必要がある。

4.2 新規光伝送技術

TDMやWDMを超える「空間モードや空間コヒーレンス」も活用したSDM, MDMなどの新たな多重化伝送技術や処理技術の検討が必要である。具体的には、高い周波数利用率を有する多値変調技術に加え、マルチコアファイバーやマルチモードファイバーを用いたSDM/MDM伝送技術やMIMO処理技術ならびにそれらを実現する光合分波技術、マルチコア光増幅技術や空間処理を含む光信号処理技術、ノード部におけるエクサビット級の光スイッチ技術についての検討を急ぐ必要がある。

4.3 光海底ケーブルシステム技術

光海底ケーブルシステムは、Ebit/s・km (100 Tbit/s/ファイバー×10000 km：ケーブルあたりPbit/s以上)が当面の目標となる。送受信技術、光伝送路技術(極低損失・低非線形光ファイバー、低雑音光増幅器)、ケーブル化技術、中継器技術、海底ケーブル敷設技術等において抜本的かつ大胆な取り組みが必要となる。

今後、急増するトラフィックに対応するためには、光通信技術の飛躍的な高度化が必須である⁴⁰⁻⁴¹⁾。そのためには、現状技術の限界を打破する新規光ファイバー技術を含む革新的な光伝送技術の研究開発が急務であり、特に、耐非線形性、耐パワー性を高めた新規ファイバーやSDMや

MDMなどの新たな多重化方法に対応した新規光ファイバーの開発が望まれる。また、マルチコアやマルチモード増幅などの新規光増幅技術とそれに付随した光コネクタ、融着等の新規のインターフェース技術や新規多重化方法の研究も一体で進める必要がある。

文 献

- 1) A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki and H. Ishii: "69.1-Tb/s (432×171-Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection," *OFC/NFOEC 2010*, PDPB7 (2010).
- 2) A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida and Y. Miyamoto: "Ultra-high capacity optical transmission technologies for 100 Tbit/s optical transport networks," *IEICE Trans. Commun.*, **E94-B** (2011) 400-408.
- 3) D. Qian, M-F. Huang, E. Ip, Y-K Huang, Y. Shao, J. Hu and T. Wang: "101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3×55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB5 (2011).
- 4) J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi and M. Watanabe: "109-Tb/s (7×97×172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multicore fiber," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB6 (2011).
- 5) 総務省: 我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算 (平成22年9月9日). http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_01000001.html
- 6) Top 500: <http://www.top500.org/>
- 7) Y. Miyamoto and S. Suzuki: "Advanced optical modulation and multiplexing technologies for high-capacity OTN based on 100 Gb/s channel and beyond," *IEEE Comm. Mag.*, **48**, No. 3. (2010) S65-S71.
- 8) M. Nakazawa: "Giant leaps in optical communication technologies towards 2030 and beyond," *ECOC 2010*, Plenary Talk (2010).
- 9) "我が国基礎・基盤研究の現状—NICT EXAT研究会", *ITUジャーナル* 5月号 (2009) 3-25.
- 10) T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," *OECC 2009*, FT4 (2009).
- 11) 盛岡敏夫: "光通信インフラの飛躍的な高度化に向けて", 2009年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, BS-7-1 (2009).
- 12) C. E. Shannon: "A mathematical theory of communication," *The Bell System Tech. J.*, **27** (1948) 379-423, 623-656.
- 13) P. J. Winzer: "Challenges and evolution of optical transport networks," *ECOC 2010*, We.8. D.1 (2010).
- 14) R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini and B. Goebel: "Capacity limits of optical fiber networks," *IEEE J. Lightw. Technol.*, **28** (2010) 662-701.
- 15) IEC Technical Report IEC 61292-4: "Optical amplifiers-Part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers," (2004).
- 16) ITU-T Recommendation G.664: Optical safety procedures and requirements for optical transport systems (2006).
- 17) 盛岡敏夫, 高良秀彦, 久保田寛和: "ハイパワー光伝送の現状と課題", 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-6-1 (2010).

- 18) K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki and H. Tsuchiya: "Characteristics of hole-assisted fiber for high power optical transmission systems," *ECOC 2008*, P.1.14 (2008).
- 19) 半澤信智, 黒河賢二, 辻川恭三, 松井 隆, 黒河賢二, 富田茂: "空孔アシストファイバにおけるファイバヒューズ伝搬特性", 2009年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-13-18 (2009).
- 20) H. Takara, H. Masuda, H. Kanbara, Y. Abe, Y. Miyamoto, R. Nagase, T. Morioka, S. Matsuoka, M. Shimizu and K. Hagimoto: "Evaluation of fiber fuse characteristics of hole-assisted fiber for high power optical transmission systems," *ECOC 2009*, P.1.12 (2009).
- 21) 半澤信智, 辻川恭三, 坂本康志, 松井 隆, 黒河賢二, 富田茂: "フォトリック結晶ファイバにおける入力パワー拡大の基礎検討", 電子情報通信学会技術研究報告, **OFT109** (59) (2009) 25-30.
- 22) M. Koshiha, K. Saitoh and Y. Kokubun: "Heterogeneous multi-core fibers: Proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, **6** (2009) 98-103.
- 23) K. Imamura, K. Mukasa, Y. Mimura and T. Yagi: "Multi-core holey fibers for the long-distance (>100 km) ultra large capacity transmission," *OFC 2009*, OTuC3 (2009).
- 24) Y. Kokubun and M. Koshiha: "Novel multi-core fibers for mode division multiplexing: Proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, **6** (2009) 522-528.
- 25) H. Kubota, H. Takara, T. Nakagawa, M. Matsui and T. Morioka: "Intermodal group velocity dispersion of few-mode fiber," *IEICE Electron. Express*, **7** (2010) 1552-1556.
- 26) T. F. Taunay, B. Zhu, M. F. Yan, G. E. Oulundsen, D. S. Vaidya, W. Luo and N. Li: "120-Gb/s 100-m Transmission in a single multicore multimode fiber containing six cores interfaced with a matching VCSEL array," *IEEE Summer Topicals*, TuD4.4 (2010).
- 27) B. Zhu, T. F. Taunay, M. F. Yan, J. M. Fini, M. Fishteyn, E. M. Monberg and F. V. Dimarcello: "Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network," *Opt. Express*, **18** (2010) 11117-11122.
- 28) B. Zhu, T. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. Yan, J. Fini, E. Monberg and F. Dimarcello: "Space-, wavelength-, polarization-division multiplexed transmission of 56-Tb/s over a 76.8-km seven-core fiber," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB7 (2011).
- 29) NICT 高度通信・放送研究開発委託研究: "革新的光ファイバ技術の研究開発", <http://www.nict-itaku.jp/project/detail.php?pid=146>
- 30) S. Berdaque and P. Facq: "Mode division multiplexing in optical fibers," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1950-1955.
- 31) N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Tomita and M. Koshiha: "Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler," *OFC/NFOEC 2011*, OWA4 (2011).
- 32) R. C. J. Hsu, A. Shah and B. Jalali: "Coherent optical multiple-input multiple-output communication," *IEICE Electron. Express*, **1** (2004) 392-397.
- 33) S. Schöllmann, N. Schrammar and W. Rosenkranz: "Experimental realisation of 3×3 MIMO system with mode group diversity multiplexing limited by modal noise," *OFC/NFOEC 2008*, JWA68 (2008).
- 34) A. Li, A. A. Amin, X. Chen and W. Shieh: "Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM signal over a Two-Mode Fiber," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB8 (2011).
- 35) M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Bigot-Astruc, L. Provost, F. Cerou and G. Charlet: "Transmission at 2×100Gb/s, over two modes of 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS based mode multiplexer and demultiplexer," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB9 (2011).
- 36) R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, R.-J. Essiambre, P. Winzer, D. W. Peckham, A. McCurdy and R. Lingle: "Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing," *OFC/NFOEC 2011*, PDPB10 (2011).
- 37) 盛岡敏夫: "光ファイバ通信技術の飛躍的な高度化に向けた今後の展開", レーザー学会学術講演会第30回年次大会ミニシンポジウム「将来の極超大容量光ファイバ伝送技術」3aVII-1 (2010).
- 38) 光通信インフラの飛躍的な高度化技術に関する国際シンポジウム: 光通信の新たな挑戦 (2008, 東京).
- 39) 電子情報通信学会通信ソサイエティ: 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する時限研究専門委員会 (EXAT) <http://www.ieice.org/~exat/>
- 40) "New horizons in optical communication technologies: Towards 2030 and beyond," *15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010) Symposium* (2010).
- 41) Special section on "extremely advanced optical transmission technologies and transmission optical fiber technologies towards exabit era," *IEICE Trans. Commun.*, **E94-B** (2011) 376-436.

(2011年4月12日受理)