

3-4 大容量光リンク技術の研究開発

3-4 Research and Development of High-Capacity Optical Link Technologies

福知 清 畠山意知郎 伊東俊治 蔵田和彦

FUKUCHI Kiyoshi, HATAKEYAMA Ichiro, ITO Toshiharu, and KURATA Kazuhiko

要旨

基幹網での爆発的な伝送容量拡大に対応するため、大容量トラフィックの効率的な長距離伝送や、大容量トラフィックのルーティング処理における LSI の入出力高速化、小型化が重要な研究課題となっている。本稿では、大容量長距離伝送に必要な高密度多重分離や伝送路設計技術の研究開発と、それにより実現した 10.9 Tbps 伝送や 1000 波伝送の結果について述べる。また、低コストで小型な大容量光接続を実現する、光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールの研究開発結果についてもまとめる。

In order to accommodate the explosively increasing Internet traffic into trunk optical fiber network, there are several issues to be solved, such as effective extension of transmission distance with high capacity data stream, and small-sized / low-power LSI interface for high capacity traffic routing chip. In this paper we demonstrate our developed ultra-dense WDM technology and transmission fiber design to enable 10 Tbps and/or thousand-wavelength WDM long-haul transmission system. Result of switch LSI module development with very small optical interface is also summarized that will enable very high capacity optical interconnection.

[キーワード]

光ファイバ通信, 波長多重, テラビット伝送, 光モジュール技術, 光接続

Optical fiber communication, Wavelength division multiplexing, Terabit transmission, Photonic module technology, Optical interconnection

1 まえがき

インターネットに代表されるデータ通信需要の爆発的な拡大に対応するため、バックボーンネットワークとアクセスネットワークの高速・広帯域化が進んでいる。バックボーン伝送では、大容量トラフィックを効率よく多重し長距離伝送することで、伝送コストを下げることに、トラフィック変化へフレキシブルに対応することが期待されている。ここでは、既設、もしくは実用化が容易な伝送を前提とした大容量・長距離伝送技術が求められる。一方、バックボーンとアクセスを結ぶメトロ領域では、ノードとなるルータの処理速度が、ネットワークの広帯域化に対するボトルネックとなる。ルータを構成するスイッチ LSI の内部は CMOS LSI の微細化により高速化されるが、LSI

と外部との接続や、ボード間インターフェースは、高速化、低消費電力、信号線数低減が依然課題であり、高速光接続技術による解決が望まれている。

本稿では、広帯域ネットワーク実現のための基幹網大容量伝送技術と装置内光リンク技術に関して、開発した技術について述べる。超大容量波長多重伝送技術の研究開発では、超大容量 10.9 Tbps 実験、1000 波 WDM 伝送実験、超長距離 40 Gbps-9,000 km 伝送、そしてシンプルな伝送路構成による 5 Tbps 光リンク技術の成果について述べる。これらは、超大容量・超長距離伝送を実現する究極的な成果と、実用化展開を意識した技術展開をした成果で構成される。一方、低コスト光リンクとして進めた光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールでは、1 チャネル当たり速度 10 Gbps の光 I/O を内蔵するスイッチ LSI モジュール

ルを開発した。その中で進めた、低コスト超小型光 I/O と 10 Gbps 光送受信動作、CMOS LSI 上でのスイッチ動作について述べ、チャンネルあたり 10 Gbps クラスの光接続について論じる。

2 超大容量波長多重伝送技術の研究開発

2.1 高密度多重 WDM 伝送技術の開発

基幹伝送系の容量を増大するには、1 ファイバに収容する信号の多重数を増す必要があり、そのためには、時分割多重度を上げる信号の高速化と、WDM での波長数の増大を併用することが有効である。しかし、大容量信号の伝送には、広い伝送帯域が必要となるため、光伝送帯域の広帯域化、もしくは狭変調スペクトルの利用などによる高密度化が求められる。これに対して、本研究では、40 Gbps 信号による 10 Tbps 級 WDM 伝送を目標とし、実現に必要な二つの技術開発を行った。

第 1 は、偏光多重分離技術による高密度多重の実現である。簡易な変調方式である NRZ 方式 40 Gbps 信号の間隔を 50 GHz まで狭めると、隣接チャンネルのクロストークが問題となる。偏光多重分離は、送信側で隣接チャンネルの偏光を直交して多重し、受信側で波長分離後に残存するクロストークを偏光分離により除去する。実験評価の結果、40 Gbps-50 GHz 間隔多重信号の分離を劣化なく行えることを確認した。

第 2 は、1490 nm を中心とする S 帯の光増幅器である、トリウム添加光ファイバ増幅器 (TDF) [1] の開発による広帯域化である。TDF

は、トリウム (Tm^{3+}) を添加した光ファイバを半導体レーザで励起する構造を持ち、励起光効率が 40% 以上得られるなど、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) と同等の実用性を備える。TDF と C 帯及び L 帯の EDFA により、伝送帯域 107 nm が得られた。これらの技術を合わせて、図 1 に示すように、総容量 10.9 Tbps (40 Gbps × 273 ch) という世界最大容量の 100 km WDM 伝送に成功した [2]。

一方、多波長を用いた大容量 WDM 伝送技術も、波長資源を活用するネットワークの実現に必要である。最近、2.7 Gbps-1044 波長多重信号が JGN II 光テストベッドでエラーフリー伝送される [3] など、1000 波長の WDM 伝送研究が進んでいる。このような多波長 WDM 技術が、広域展開する基幹伝送路で用いられるためには、大容量化だけでなく長距離化が求められる。これに対し、本研究では、10 Gbps の 1000 波 WDM 長距離伝送を目標とした。ここで、1000 波長を光ファイバの低損失領域にシームレスに収容するため、帯域 100 nm (約 125 THz) の超広帯域集中ラマン増幅器を中継増幅器に用いた [4]。

多重間隔は 12.5 GHz となり極めて狭いため、本検討でも隣接チャンネルのクロストークが問題となる。今回は、多重分離に偏光分離を行わず、多段インターリーブで構成する矩形光フィルタ (帯域幅 11 GHz、抑圧比 35 dB) での波長分離のみとし、変調方式と多重方式の最適化により劣化を最小化した。検討した変調方式は NRZ とデュオバイナリ、多重方式は同一偏光多重と偏波インターリーブ多重 (直交偏光多重) である。これらの組合

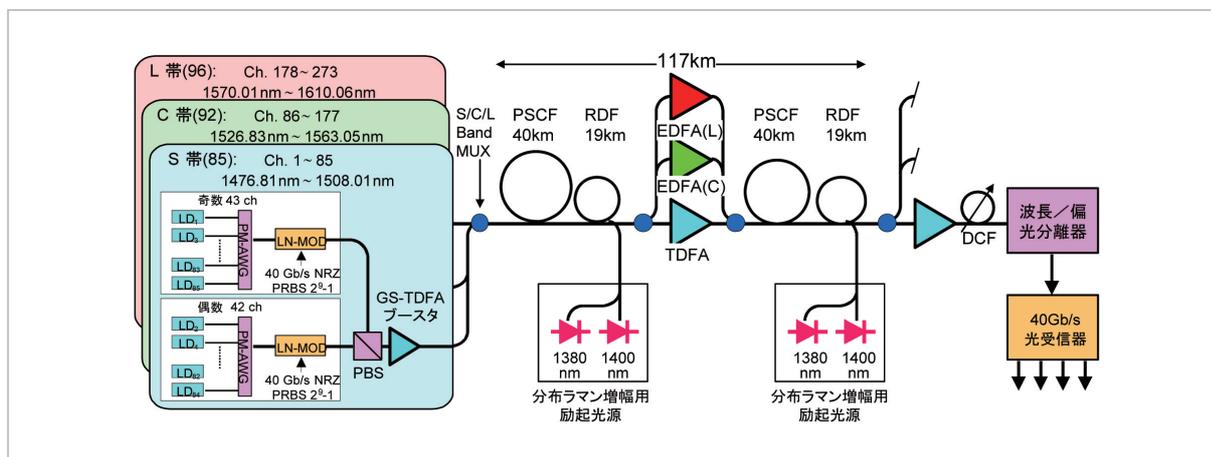


図 1 10Tbps 多重分離伝送実験系の構成

せでの多重分離後の符号誤り率を、図2に示す。デュオバイナリ変調と偏光インターリーブ多重で、劣化を1 dB程度まで抑えられ、長距離伝送に適することが分かった。これらの技術を集大成して、10 Gbps-12.5 GHz 間隔の 100 nm 帯域模擬伝送を行い、1,000 km クラスの伝送が可能であることを、実験的に確認した[5]。

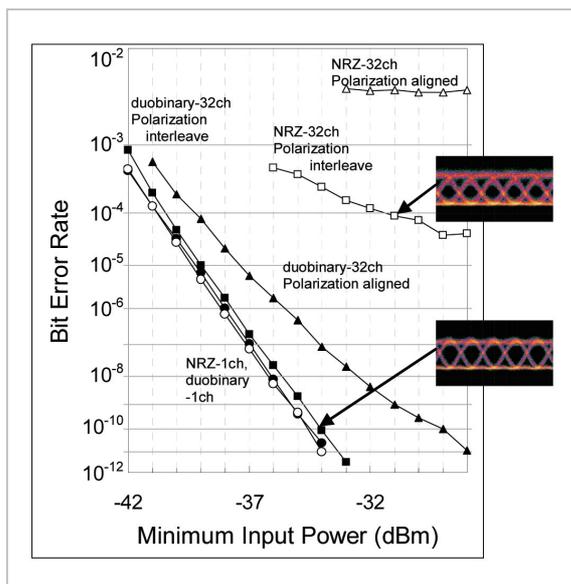


図2 10G-12.5 GHz 間隔での各種高密度多重方式の符号誤り率特性

2.2 超長距離光ファイバ伝送技術

大容量伝送に必要なとなる 40 Gbps 伝送は、高い信号光パワーが必要で、かつ高速化に伴う光ファイバの非線形歪による劣化が顕著となる。これに対して、本研究では、純シリカコアファイバの実効コア断面積 (A_{eff}) を $195\mu\text{m}^2$ まで拡大した大口径純シリカコアファイバ ($195\text{-}\mu\text{m}^2\text{-}A_{eff}$ PSCF と略す)を開発し[6]、分布ラマン増幅技術を併用することにより、極めて非線形性の小さな伝送路を構築することに成功した。図3(a)に伝送路の構成を示す。低ロスでラマンゲインが小さい $195\text{-}\mu\text{m}^2\text{-}A_{eff}$ PSCF をスパン後半に、DCF を前半に配置する「逆2回交番接続伝送路」構成とすることで、図3(b)に示すようにロスとゲインをほぼつりあわせた。この構成により、スパン内のパワー変動を 3.5 dB にまで抑えることができ、伝送路入力パワーを大幅に低減することができた。

$195\text{-}\mu\text{m}^2\text{-}A_{eff}$ PSCF を用いた逆2回交番接続伝

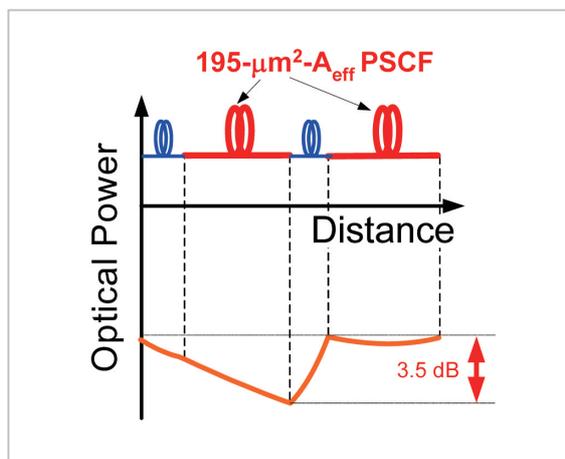


図3 低非線形伝送路の構成

送路の非線形低減効果を確認するため伝送特性を評価した。32 波長 (1539.0 nm~1563.0 nm、100 GHz 間隔) の DFB-LD 光源を 42.7 Gbps で CS-RZ 変調し、偏光インターリーブ多重して伝送した。50 km スパン伝送路での分布ラマン増幅には、波長 1424, 1437, 1449, 1465 nm の 4 波 WDM の励起光源を用いた。全パワーは 650 mW とした。図4に 9,000 km 伝送後の光スペクトルを示す。光信号対雑音比はそろっており、信号スペクトル拡がり小さいことから非線形効果が抑えられたことが分かる。32 波長すべてにおいて、誤り訂正後でエラーフリーを確認し、当時世界初の太平洋横断距離での 40 Gbps-WDM 伝送を実証した。

上記伝送路は、極めて低い非線形性という高性能であるが、1 スパンを 4 ファイバで構成する、スパン長が 50 km と短いという、実用化に向けた課題を有する。これに対して、よりシンプルかつ長スパン伝送を可能とする伝送路実現に向け、局所分散が 14 ps 前後の中分散を持つ正負ファイ

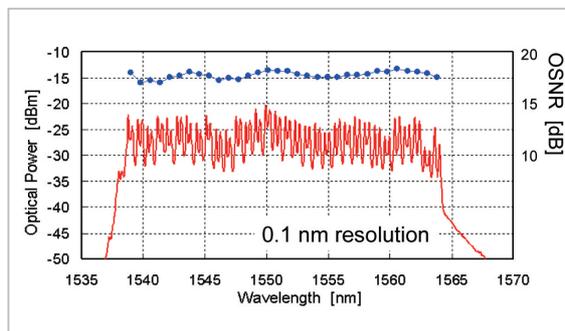


図4 9000 km 伝送後の光スペクトル

バ1種ずつで構成する、中分散・分散マネージメント伝送路(MD-DMF)の開発を行った[7]。正分散ファイバと負分散ファイバを約 51 km と約 29 km とし、正分散ファイバの A_{eff} を $120\mu\text{m}^2$ と大きくすることで、非線形性の抑圧、低損失性、分散フラット性を得ている。開発した 80 km MD-DMF の各 5 スパンの損失特性及び波長分散(スパン 3 及び全 5 スパントータル)の測定結果を、図 5 に示す。C 帯から L 帯にかけて損失 19 dB が得られている。本伝送路を用いて、40 Gbps の 100 GHz 間隔-C 帯 32 ch を用いた伝送評価を行った。変調方式は RZ-DPSK 方式とし、最適化された信号出力パワー 0 dBm/ch において図 6 に示す伝送後の Q 値を得た。MD-DMF 伝送路によって、80 km という長スパンにおいても 6,000 km 級の伝送が可能であることが確認され、伝送路設計技術の有効性が示された。

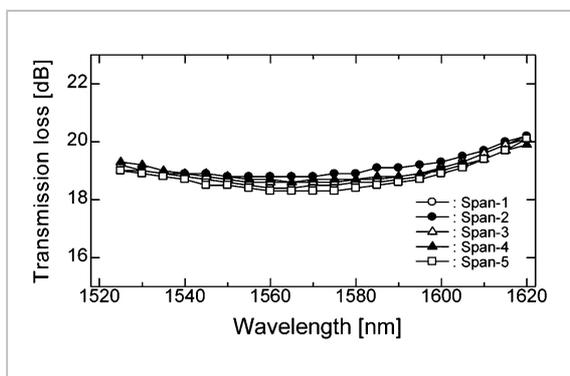


図5 MD-DMFの損失特性

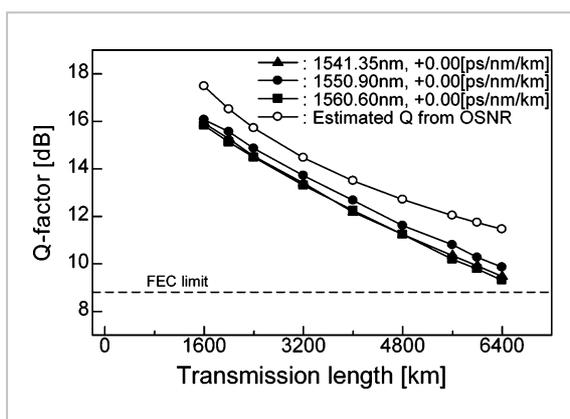


図6 MD-DMFの伝送特性

3 光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールの研究開発

ネットワーク全体のブロードバンド化を図る上でボトルネックとなっているルータの処理速度を向上するためには、スイッチ LSI 内部の高速化とともに、LSI、ボード、装置間インターフェースの高速化による信号線数増大回避と低消費電力化が課題である。この課題に対して、1 チャネル当たり 10 Gbps のポート速度の光入出力インターフェース(以降で「光 I/O」と略す。)をパッケージに内蔵した、光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールの実現に取り組んだ。

図 7 に、光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールの概念図を示す。光-電気変換を行う超小型、送受各 4 ch 一体型の光 I/O (PETIT: Photonic/Electronic Tied InTerface) と CMOS LSI が、BGA 基板に実装される。PETIT 内の光素子である、波長 850 nm の VCSEL と受光素子である PIN-PD は、専用のファイバコネクタで結合される。本モジュールにより入出力信号が光ファイバとなるため、安価なプリント配線板へ実装が可能となる。また、光 I/O が小型なため、LSI までの電気伝送が短く波形劣化補正回路が不要となり、消費電力が低減される。

本光 I/O 内蔵システム LSI モジュールの具体設計を進めた。光 I/O の実装プラットフォームに低コスト、低誘電率、低損失の樹脂基板[8]を用い、簡易かつ高効率となる樹脂基板を基準面とする光結合系を用いた。光素子の実装には、高精度フリップチップ実装技術[9]を適用する構成とした。小型かつ多チャンネル化に必要な送受信チャンネル間

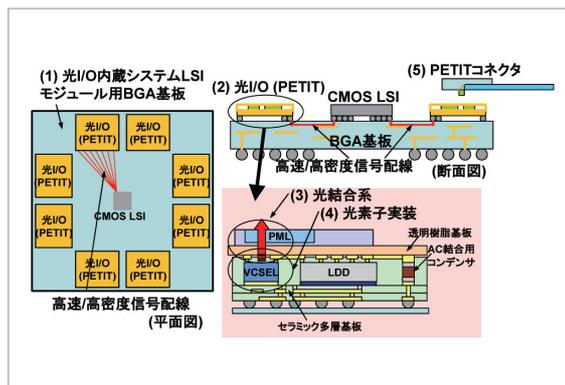


図7 光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールの概念図

のクロストーク抑制のため、電磁遮へいをする完全箱型構造を形成し、結合線路を用いた。光 I/O である PETIT とファイバの結合には、PETIT コネクタ [10] を用いた。開発した超小型光 I/O の構成を、図 8 に示す。PETIT 全体の体積はわずか 294 mm^3 ($14 \times 14 \times 1.5 \text{ mm}$) である。

試作した低コスト化光 I/O について、送信のみ、受信のみ、送受信同時に動作させた場合の符号誤り率測定を行い、最小受信感度とクロストーク量を評価した。試験信号には、10.3125 Gbps の 2^7-1 PRBS 信号を用いた。図 9 に四つのチャンネルでの送信光出力波形と受信電気出力波形を示す。すべてのチャンネルで良好なアイパターンを確認した。図 10 に光 I/O の受信特性を示す。1 チャンネル動作時では、符号誤り率 10^{-12} となる最小受信感度は -9 dBm を得た。また、4 チャンネル全動作時のクロストークペナルティは、送信側で 1.0 dB 、受信側で 1.0 dB 、送受間で 0.6 dB と小さく抑えられた。

超小型 10 Gbps 光 I/O と 20×20 クロスポイントスイッチ LSI を用いて、光 I/O 内蔵型スイッチ

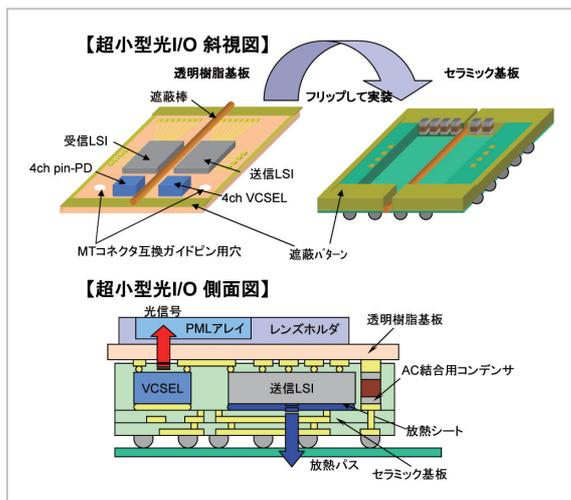


図8 超小型光 I/O の構成

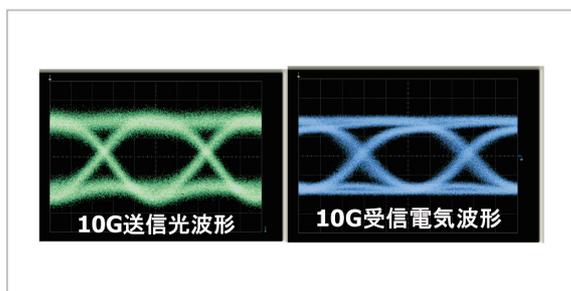


図9 光 I/O の送受信波形

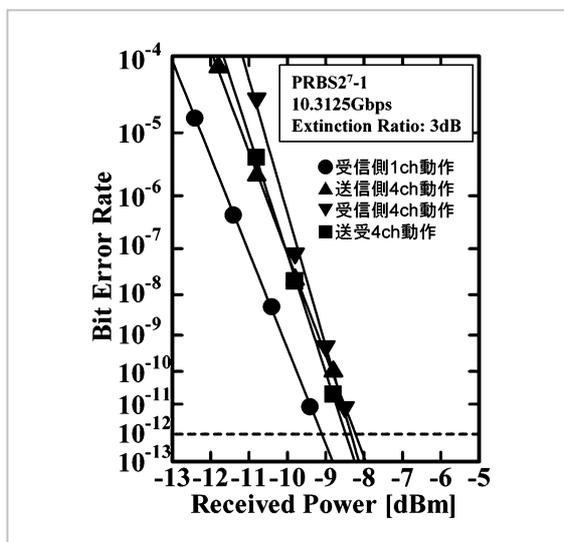


図10 光 I/O 受信特性

LSI モジュールを試作した。試作したモジュールに、10.3125 Gbps の 2^7-1 PRBS 信号 (消光比 3 dB) を通して、各出力信号をスイッチを切り替えて確認したところ、4 チャンネルいずれの出力からも良好な波形を得た。さらに、Advanced TCA 標準ラックを使用し、バックプレーンには、ATCA 標準ラックに対応したファイバシートを用い、開発したモジュールを搭載するスイッチカード、カード接続用の光直角コネクタを搭載する簡易スイッチ装置を試作した(図 11)。評価の結果、バックプレーンの光接続を確認し、低コスト、小型光リンクの有効性を確認した。

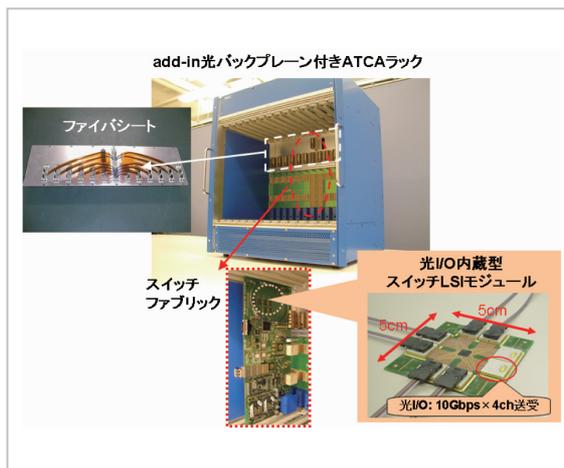


図11 ATCA 標準ラックを使用した簡易スイッチ装置

4 むすび

広帯域光ネットワーク実現に必要となる、大容量伝送技術と低コスト光リンク技術の研究開発結果について述べた。10.9 Tbps 伝送や 40 Gbps-9,000 km、1000 波 WDM 伝送で得られた究極技術や、5 Tbps 光リンク向け伝送路開発で行った実用化展開技術、そして光 I/O 内蔵型スイッチ LSI モジュールで進めた低コスト小型光技術は、今後期待される高信頼でフレキシブルな光ネット

ワーク実現に向け、更に高度化されることが期待される。

謝辞

本研究成果は、情報通信研究機構委託「トータル光通信技術の研究開発」、「テラビットルータに向けた高速信号処理用光モジュールの開発」で行われたものである。

参考文献

- 1 T.Kasamatsu, et al, "Laser-diode-pumped highly-efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band", Optical Fiber Communication Conference OFC2001, TuQ4, 2001.
- 2 K.Fukuchi, et al., "10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment", Optical Fiber Communication Conference OFC2001, PD24, 2001.
- 3 高良ほか, "JGN II を用いた 1000 波 WDM 伝送及び波長パスルーティング実証実験", 情報通信研究機構季報, Vol.51, Nos.3/4, p.33, 2005.
- 4 M.Kakui, et al., "Highly Nonlinear Fibers and Their Application to Discrete Raman amplifiers", OAA2003, paper MC1, 2003.
- 5 K.Fukuchi, et al, accepted for presentation to Opto-Electronic Communication Conference 2006.
- 6 M.Tsukitani et al., "Ultra low nonlinearity fiber with improved microbending performance", Opto-Electronic Communication Conference, OECC2002, 11D1-3.
- 7 K.Mukasa et al., "Dispersion Management Line consisted of Medial Dispersion Fiber (MDF)", ECOC2004, paper We.3.3.3, 2004.
- 8 加美ほか, "10Gb/s 小型光電気集積実装プラットフォーム", 電子情報通信学会 2002 年総合大会, C-3-42.
- 9 山本ほか, "光 I/O 内蔵システム LSI モジュール (4) 光素子実装", 電子情報通信学会 2003 年ソサイエティ大会, C-3-126.
- 10 佐々木ほか, "光 I/O 内蔵システム LSI モジュール (5) 基板実装型コネクタの開発", 電子情報通信学会 2003 信学会ソサイエティ大会, C-3-127.

ふくち きよし
福知 清

NEC システムプラットフォーム研究所
 大容量光ファイバ通信

はたけやま い ちろう
畠山意知郎

NEC システムプラットフォーム研究所
 高速光サブシステム

いとうとしはる
伊東俊治

NEC システムプラットフォーム研究所
 大容量光ファイバ通信

くらた かずひこ
蔵田和彦

NEC システムプラットフォーム研究所
 高速光サブシステム