

光符号分割多重と超高速光信号処理

外 林 秀 之

Optical Code Division Multiplexing and Ultrafast Photonic Processing

Hideyuki SOTOBAYASHI

This paper reviews the applications of optical code division multiplexing (OCDM) technique to ultrafast photonic networks based on ultrafast photonic processing. OCDM has unique attributes such as asynchronous transmission, a potential of communication security, soft capacity on demand, and a high degree of scalability. Therefore, the application areas of OCDM evolve into multiple access, point-to-point transmission, optical path networks, and label switching routing. Experimental demonstrations of three applications are described: (1) photonic transport system with high spectral density, (2) virtual optical code/wavelength path network, (3) photonic gateway for multiplexing format conversions between OCDM and wavelength division multiplexing (WDM).

Key words: optical code division multiplexing, photonic processing, photonic network, photonic link, photonic node

近年のネットワーク技術の進展はめざましいものがある。インターネットをはじめとするさまざまな通信形態の普及に加え規制緩和の社会的潮流もあり、バックボーンネットワーク、アクセス回線、ローカルエリアネットワークなどあらゆる部分において急速に進化を続けている。このような背景のもと、近い将来ユビキタスネットワーク社会が到来しようとしている。ユビキタスネットワーク社会においてはあらゆるところにネットワークが遍在し、誰もがいつでも空間的地理的制約から解放されたうえで、さまざまな情報やコンテンツを利用できる。これは情報通信ネットワークの目指すべきひとつの理想像を示している。ユビキタスネットワーク社会の利便性を享受するためには多様な面での技術革新が必要であるが、フォトニックネットワークの実現はそのような社会を支える重要な研究課題となっている¹⁾。フォトニックネットワークでは、光ファイバーの広帯域性、光部品の高速度など、光の特性を最大限に生かした、エンド-エンド間での大容量かつ超高速の情報転

送技術を実現し、ユーザーの要求に応じた柔軟性、信頼性の高いネットワークを提供可能とするものである。

光技術はこれまで、ポイントツーポイントの伝送技術としてネットワークに大きな革新をもたらしてきた。しかしながら、そこで用いられている機能は、光増幅・光ファイバー伝送などのごく限られたものでしかなく、光のもつポテンシャルの一部が活用されているにすぎなかった。本誌の総合報告²⁾で議論されているように、フォトニックネットワークにおける全光化は挑戦すべき課題であり、その基盤となるのが超高速光信号処理技術である。

一方、多重化技術としては、これまで光時分割多重 (optical time domain multiplexing: OTDM) と波長分割多重 (wavelength division multiplexing: WDM) が主に用いられている。光符号分割多重 (optical code division multiplexing: OCDM) は、これらとは異なる特有の性質を示すこと³⁻⁵⁾ から、1970年代以降研究がなされ、光デバイスの進歩、光技術の進展に伴い、近年ではシステム実験も可能

通信総合研究所超高速フォトニックネットワークグループ (〒184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1) E-mail: hideyuki@mit.edu

となりさまざまな試みが行われている。OCDMは、各チャネルに固有の光符号を割り当てることにより、多数の信号が同一波長・同一時間スロット・同一伝送ファイバーを共有でき、非同期のアクセスが可能、通信セキュリティーの向上、柔軟な多重の拡張性などの特徴を有する。このため、応用分野としては、光アクセス^{6,7)}、光リンク^{8,9)}、光パズネットワーク^{10,11)}、ラベルスイッチングルーティング¹²⁻¹⁴⁾などへの応用が検討されている。

1. 高周波数利用効率 OCDM/WDM 伝送

通信容量増大に関しては、従来はOTDMとWDMの組み合わせにより、波長数を増やすことで容量拡大が図られてきた。今後、通信容量需要のさらなる加速が予想されるが、光ファイバーの伝送損失を補うための光増幅が可能な波長帯域は限られており、波長数増大による容量拡大もやがて波長資源の不足が顕在化すると考えられる。限られた波長帯域で容量を増大するには、波長資源の有効活用化が不可欠で、周波数利用効率の向上が期待される。OCDMでは、各チャネルごとに固有の符号化を行い、多数のチャネル信号を同じ波長帯で同時に送ることができるため、WDMシステムにオーバーレイすることにより、これまで困難とされてきた周波数利用効率のいちじるしい向上が可能となった。

図1にOCDMの原理を示す。この特徴は、まず光符号方式として4相位相シフトキーイング(QPSK: quaternary phase shift keying)を用いて、同一波長に多重できる光符号数の増大を可能にし、効率的な光符号分割多重を行った

ことにある。さらに、受信部において超高速光時間ゲート検波および光閾値処理を適用し、復号処理における干渉雑音を大幅に抑制した点が挙げられる。これにより、超高速光符号・復号化が可能になり、1.6 bit/s/Hzの周波数利用効率での長距離伝送が実証された⁹⁾。

図2に、1.6 bit/s/Hz周波数利用効率、6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×4 WDM×40 Gbit/s) 伝送の実験系を示す⁹⁾。超テラビットのOCDMネットワーク実現には、光信号送信部、光伝送部、信号受信部において超高速光信号処理技術が不可欠である。光ファイバーの非線形性を利用したスーパーコンティニューム(SC)光は、簡便な大容量OTDM/WDM光源として研究されている¹⁵⁻¹⁷⁾が、

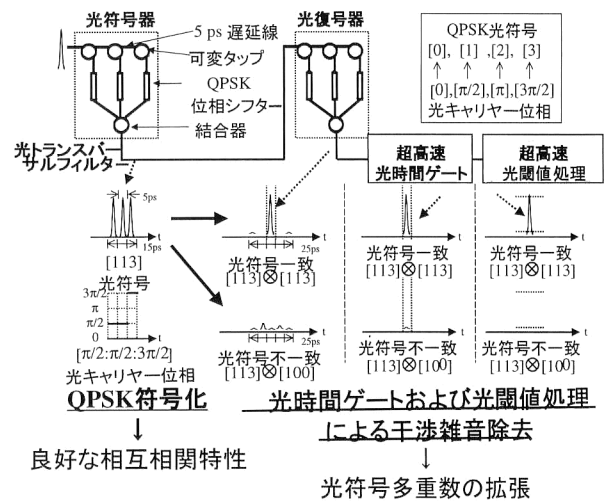


図1 光時間ゲートおよび光閾値処理による干渉雑音除去機能を有するQPSK-OCDMの動作原理。

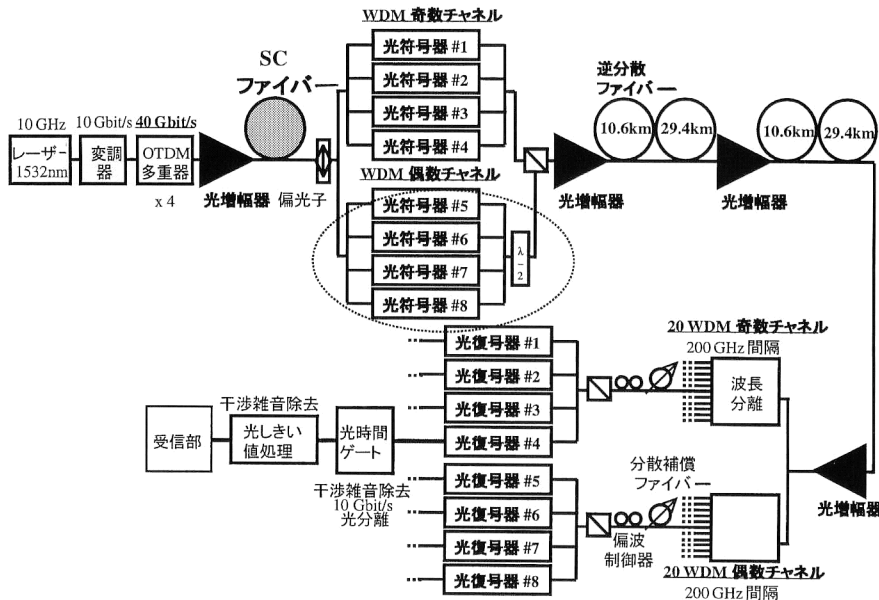


図2 周波数利用効率1.6 bit/s/Hz、6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) 伝送実験。

これを OCDM/WDM 光源として光信号送信部に応用した。光符号器はそれ自体が波長特性の周期性をもっている¹⁸⁾ので、超広帯域光を利用することで多波長信号の光符号化が同時に行える^{8,9)}。また、光受信部においては、超高速光時間ゲートの導入により、光ゲート窓外の雑音を除去することができ⁹⁾、また光閾値処理の導入により、光時間ゲート窓内に残存する干渉雑音によるデジタル信号「0」および信号「1」のパワー変動を抑圧することができる。これらにより他符号からの干渉雑音を大幅に抑圧することが可能となり、光符号分割多重数を増加することができ、周波数利用効率の向上が図れる。また、これらを波長多重した場合は、広帯域にわたって超高速な時間ゲート特性・光閾

値処理特性が要求される。今回は、従来の光ファイバーに比べて非線形性が大きい特殊なファイバーを利用することに非線形ループミラーを構成し、広帯域にわたってテラビット級の時間ゲートおよび光閾値処理を実現することができた^{19,20)}。超高速光信号処理技術を導入することにより、周波数利用効率 1.6 bit/s/Hz の伝送が可能となり、C バンド波長帯 (1530~1565 nm) のみを使用した 6.4 Tbit/s の OCDM の長距離伝送を実証した⁹⁾。

2. バーチャル光符号/波長パス (VOCP/VWP) ネットワーク

OCDM の技術は、多元接続のみならず光パスネットワークにも適用が可能である。OCDM/WDM ネットワークにおいては、光パスへの光符号と波長の割り当て方は 2 通りある。すなわち、ノードにおいて、光符号および波長変換を行う場合と行わない場合である。図 3(a) に示すように、光符号および波長変換を行わない場合、各光パスは全長にわたりそれぞれ固有の光符号および波長が割り当てられる。これとは反対に、図 3(b) に示すように、ノードにおいて光符号および波長変換を行うことにより、各リンクごとに光符号・波長を割り当てることでバーチャルパスを設定する方式も考えられる^{10,11)}。これを VOCP/VWP ネット

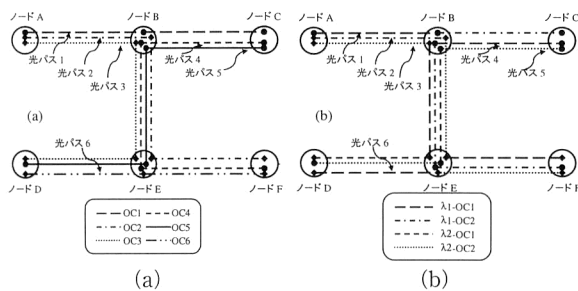


図 3 光パスネットワーク。(a) OCP ネットワークおよび (b) VOCP/VWP ネットワークにおける光パスネットワーク。

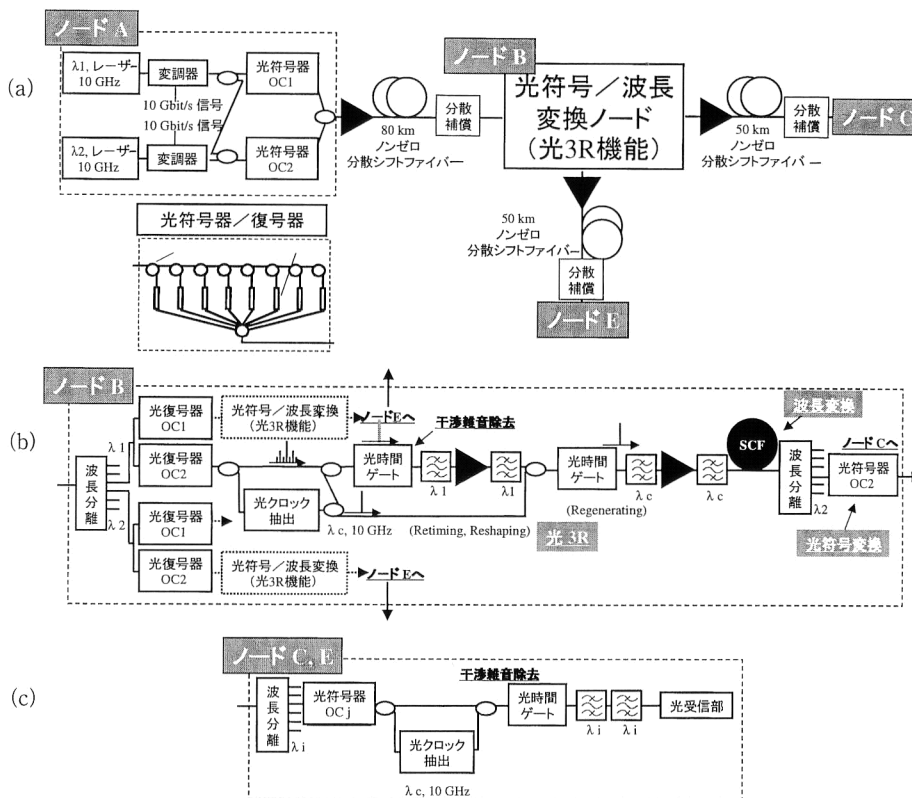


図 4 実験系。(a) 全長 180 km の光符号および波長変換可能な VOCP/VWP ネットワーク実験系、(b) 光 3R 機能を有する超広帯域光符号および波長変換可能なノード：ノード B、(c) 干渉雑音除去のための時間ゲートを有するノード C およびノード E。

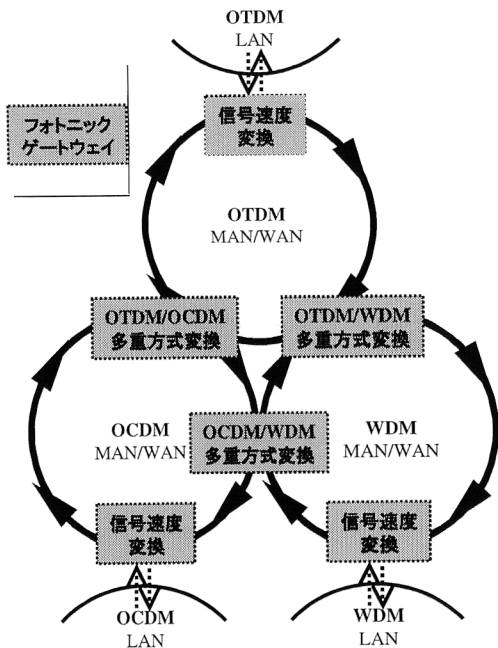


図5 フォトニックゲートウェイ。

ワークという。両者を比較すると、バーチャルパスを形成することにより、後者の場合はネットワーク全体に必要な光符号数および波長数を減らすことができる。VOCP/VWPを導入することにより、ネットワーク需要や光パス数の増大に伴い懸念される、光符号や波長割り当て問題の解決が期待されるが、そのためには光符号および波長の同時変換がキー技術となる。

図4にVOCP/VWPネットワーク実験系を示す¹¹⁾。ここでは、原理確認のため、図3(b)における3つの光パス、つまり光パス1におけるノードAからノードC、光パス2および光パス3におけるノードAからノードEへの信号伝送を行う。ノードBにおいては3種類の信号変換が必要となる。つまり、 λ_1 -OC1から λ_1 -OC2への光符号のみの変換(光パス1)、 λ_1 -OC2から λ_2 -OC2への波長のみの変換(光パス2)、 λ_2 -OC2から λ_1 -OC1への光符号および波長の同時変換(光パス3)である。ノードBにおいては、受信信号はまず波長分波、光復号され、その後光3R機能で信号再生された後に、波長変換および光符号変換が行われる。光3Rは次のように実現される^{11,21,22)}。復号後の信号は二分岐され、一方は注入同期モード時レーザーに入射されて10GHzでクロック抽出され、retimingとreshapingが行われる^{21,22)}。クロック抽出光は二分岐され、一方は半導体過飽和吸収体時間ゲートデバイス^{21,22)}のポンプパルスとして利用され、復号信号の干渉雑音を除去する³⁾。時間ゲートされた復号信号は、今度は逆に2つ目の時間ゲートデバイスのポンプパルスとして働き、抽出されたクロックパル

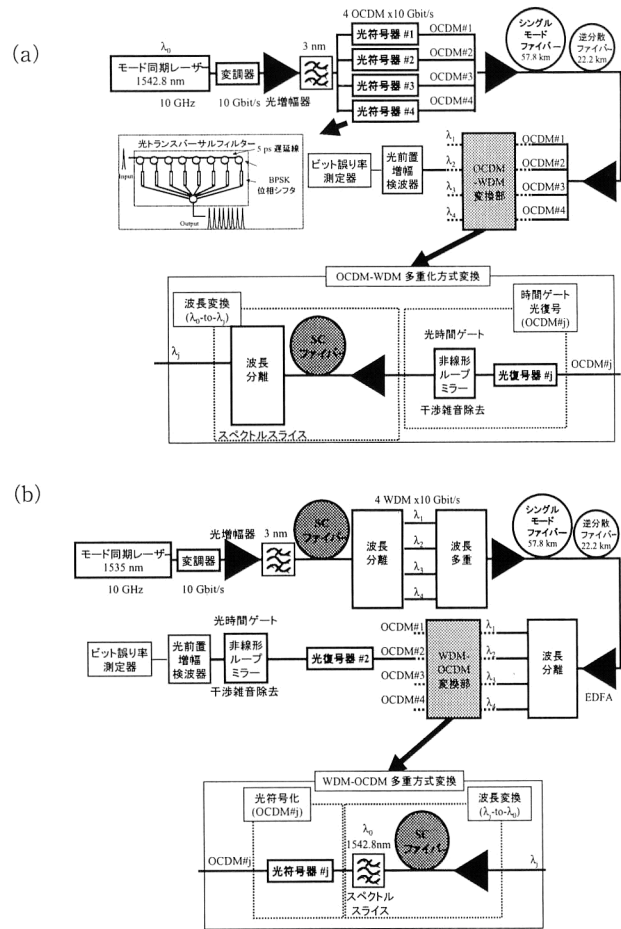


図6 (a) 4×10 Gbit/s OADM-WDM 変換実験系、(b) 4×10 Gbit/s WDM-OCDM 変換実験系。

スをゲートする。これにより、抽出クロックパルス列は、復号データによりデータ変調され、信号再生が行われる(regeneration)。以上により、クロック抽出および2段の時間ゲートデバイスにより光3Rが達成される。波長変換は、3R再生された信号をポンプ光としてSC光を生成し、そのSC光を変換すべき所望の波長においてスペクトルスライスすることにより行われる¹⁷⁾。波長変換後の信号は、光符号器により変換すべき新しい符号が付加され、符号変換が行われる。

光符号および波長変換された信号は、その光符号・波長に応じたノードCもしくはノードEにおいて送信され、そこで信号誤り率が測定される。ノードCおよびノードEにおいては、ノードBにおける処理と同じく、波長分波され光復号後、抽出されたクロックにより時間ゲートが行われ、干渉雑音が除去された信号が受信される。実験においては、ノードBの機能として、1524.9~1590.0 nmの動作帯域幅8 THzの光符号・波長同時変換が確認された。VOCP/VWPネットワークとしては、光符号および波長変換が可能なノードをリンクする、全長180 kmの信号伝送が符号

誤りなく実験的に実証された¹¹⁾.

3. フォトニックゲートウェイ

フォトニックゲートウェイは、図5に示すように、信号形式や信号速度の異なるネットワーク間を相互接続するために用いる、信号速度や多重方式を変換する装置または機能として提案されている²³⁻²⁵⁾。その機能のひとつとして、OCDM-WDM間の多重化方式変換を40 Gbit/sにて実証した²⁵⁾。

図6に実験系を示す。まず、図6(a)に示すように、OCDMからWDMへの変換では、OCDM信号を前述の時間ゲートを伴う復号処理を行う。そして、復号信号を用いてSC光を発生し、変換する波長でスペクトルスライスを行うことにより波長変換を行う。一方、WDMからOCDMへの変換の実験系を図6(b)に示す。WDM信号は、波長分波された後、SC光生成と光フィルターによるスペクトルスライスで、変換するOCDM信号の中心波長に波長変換される。波長変換後の光パルスは光符号器で光符号化することにより、多重化方式変換が行われる。この実験においても、波長領域および時間領域における光信号処理がキー技術となっている。つまり、光復号処理のための超高速光時間ゲート、および波長変換のためのSC光生成である。実験では、10 Gbit/s、4チャンネル信号間の変換を行ったが、さらなる高速化への対応も可能である²⁵⁾。

本稿では、光符号分割多重技術のフォトニックネットワークへの応用と、それを支える超高速光信号処理に焦点を当てて解説をした。本稿では紹介できなかったが、光符号を用いたルーティング¹²⁻¹⁴⁾やadd/drop⁷⁾など、興味深い試みもなされているので、あわせて参照いただきたい。超高速光信号処理を活用することにより、ネットワークの全光化の試みがさらに進展することを期待する。

文 献

- 1) 超高速フォトニックネットワーク開発協議会編：フォトニックネットワーク革命 (SCAT, 2002)。
- 2) 北山研一：“フォトニックネットワーク—全光化へ向けて—”, 光学, **32** (2003) 2-9。
- 3) N. Karafolas and D. Uttamchandani: “Optical fiber code division multiple access networks: A review,” *Oit. Fib. Technol.*, **2** (1996) 149-168。
- 4) D. D. Sampson, G. J. Pendock and R. A. Griffin: “Photonic code-division multiple-access communications,” *Fiber Integr. Opt.*, **16** (1997) 129-157。
- 5) K. Kitayama, H. Sotobayashi and N. Wada: “Optical code division multiplexing (OCDM) and its application to photonic networks,” *IEICE Trans. Fundam.*, **E82-A** (1999)

2616-2626。

- 6) H. Sotobayashi and K. Kitayama: “10 Gb/s OCDM/WDM multiple access using spectrum-sliced supercontinuum BPSK pulse code sequences,” *Proc. Optical Amplifiers and Their Applications (OAA '99)*, PD7 (Nara, 1999) pp. Pdp7-1-Pdp7-3。
- 7) K. Kitayama and M. Murata: “Photonic access node using optical code-based label processing and its applications to optical data networking,” *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **19** (2001) 1401-1415。
- 8) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: “1.52 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×19 WDM×20 Gbit/s) transmission experiment,” *IEE Electron. Lett.*, **37** (2001) 700-701。
- 9) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: “1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s QPSK-OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) transmission experiment using optical hard thresholding,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14** (2002) 555-557。
- 10) K. Kitayama: “Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion,” *IEEE Sel. Areas Commun.*, **16** (1998) 1309-1319。
- 11) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: “Transparent virtual optical code/wavelength path network,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **8** (2002) 699-704。
- 12) K. Kitayama, N. Wada and H. Sotobayashi: “Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, **18** (2000) 1834-1844。
- 13) H. Sotobayashi and K. Kitayama: “Optical code based label swapping for photonic routing,” *IEICE Trans. Commun.*, **E83-B** (2000) 2341-2347。
- 14) M. Murata and K. Kitayama: “A perspective on photonic multiprotocol label switching,” *IEEE Network*, **15** (2001) 56-63。
- 15) T. Morioka, K. Mori, S. Kawanishi and M. Saruwatari: “Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6** (1994) 365-367。
- 16) Y. Takushima, F. Futami and K. Kikuchi: “Generation of over 140-nm-wide super-continuum from a normal dispersion fiber by using a mode-locked semiconductor laser source,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10** (1998) 1560-1562。
- 17) H. Sotobayashi and K. Kitayama: “325 nm bandwidth supercontinuum generation at 10 Gbit/s using dispersion-flattened and non-decreasing normal dispersion fibre with pulse compression technique,” *IEE Electron. Lett.*, **34** (1998) 1336-1337。
- 18) H. Sotobayashi and K. Kitayama: “Transfer response measurements of a programmable bipolar optical transversal filter by using the ASE noise of an EDFA,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1999) 871-873。
- 19) T. Sakamoto, F. Futami, K. Kikuchi, S. Takeda, Y. Sugaya and S. Watanabe: “All-optical wavelength conversion of 500-fs pulse trains by using a nonlinear-optical loop mirror composed of a highly nonlinear DSF,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13** (2001) 502-504。
- 20) H. Sotobayashi, C. Sawaguchi, Y. Koyamada and W. Chujo: “Ultrafast walk-off-free nonlinear optical loop mirror by a simplified configuration for 320-Gbit/s time-division multiplexing signal demultiplexing,” *OSA Opt.*

- Lett., **27** (2002) 1555-1557.
- 21) H. Kurita, I. Ogura and H. Yokoyama: "Ultrafast all-optical signal processing with mode-locked semiconductor lasers," *IEICE Trans. Electron.*, **E81-C** (1998) 129-139.
- 22) H. Kurita, Y. Hashimoto, I. Ogura, H. Yamada and H. Yokoyama: "All-optical 3R regeneration based on optical clock recovery with mode-locked LDs," *25th European Conference on Optical Communication (ECOC 1999)*, PD3-6 (Nice, 1999) pp. 56-57.
- 23) H. Sotobayashi, K. Kitayama and W. Chujo: "40 Gbit/s photonic packet compression and decompression by super-continuum generation," *IEE Electron. Lett.*, **37** (2001) 110-111.
- 24) H. Sotobayashi, K. Kitayama and W. Chujo: "Photonic gateway: TDM-to-WDM-to-TDM conversion and reconversion at 40 Gbit/s (4 channels \times 10 Gbit/s)," *OSA J. Opt. Soc. Am. B*, **19** (2002) 2810-2816.
- 25) H. Sotobayashi, K. Kitayama and W. Chujo: "Photonic gateway: Multiplexing format conversions of OCDM-to-WDM and WDM-to-OCDM at 40 Gbit/s (4×10 Gbit/s)," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **20** (2002) in press.

(2002年9月27日受理)