

波長多重光通信技術

江 村 克 己

Wavelength Division Multiplexing Optical Transmission Technology

Katsumi EMURA

Wavelength division multiplexing (WDM) is one of the key enabling technologies to support the rapid growth of the Internet, since it enables easy, cost effective capacity growth. As the conventional WDM is approaching its capacity limit, novel technologies are evaluating for next steps in research for further capacity increase with long distance transmission capability.

Key words: wavelength division multiplexing (WDM), spectral efficiency, Tm doped optical fiber amplifier (TDFA), dispersion management, forward error correction

インターネットの進展はネットワークにも大きな変革をもたらしつつある。すでにデータ通信の容量が従来の音声通信の容量を超えたことがひとつの大きなエポックである。これまでの音声（電話）中心のネットワークが、今後はインターネットに代表されるデータ中心のネットワークに変革していくのである。データトラフィックは今後も着実な伸びを示すことが予想され、このデータ通信の容量によりネットワークの総容量が決まるようになってくる。現状、基幹ネットワークにおいて、このようなデータトラフィックの伸びに対応した伝送容量の急増を可能にしているのが波長多重（WDM: wavelength division multiplexing）光通信技術である。最近では、その適用領域が、基幹ネットワークから、アクセス/メトロ領域へと展開する動きもみられ始めている。本稿では、このようなトランスポート光ネットワークを構築する上で、今後もキーとなると考えられる波長多重光通信技術の基礎と現状、今後の展開について解説する。

1. 波長多重光通信システムの概要

光ファイバー通信、特に長距離基幹伝送は、光ファイバーの最も低損失波長域である 1550 nm 帯を用いて行われている。光通信において、光信号の増幅に用いられている EDFA（エルビウム添加光ファイバー増幅器）の増幅波長

域も図 1 に示されるように同じ波長帯にある。この波長帯が、100 nm 弱と非常に広帯域にわたることから、トラフィックの増加に合わせ、順次異なる波長の信号を追加、多重することにより大容量化を行う技術として波長多重光通信技術が注目され、導入されるようになってきた。図 2 に WDM 光通信システムの基本構成を示す。波長多重光通信システムを従来の光通信システムと比較した場合の大きな特長は、複数のチャンネルで光ファイバーと中継器を共有することで、システム構成の簡便化と伝送コストの低減を実現しているところにある。また、伝送容量の拡大が必要な場合、順次波長の異なるチャンネルを追加していくことで対応可能である（アップグレードビリティが高い）、との特長もある。

光通信システムの研究開発、商用化の最近の動向を図 3 にまとめる。1995 年ごろから WDM による急速な大容量化が進展していることがわかる。一方、単位チャンネル当たりの伝送速度は電子回路や光子の高速化の実現の難しさから、5 年で 4 倍程度の速度でしか高速化されていない。電子回路の高性能化は 18 か月で 2 倍という、いわゆる“ムーアの法則”に従って進んでおり、これを上回る速度での高速化を実現することは、事実上不可能である。一方でインターネットの進展に起因するトラフィックは、IT バブル期には年率 2~4 倍のペースで増加した。これに対応する

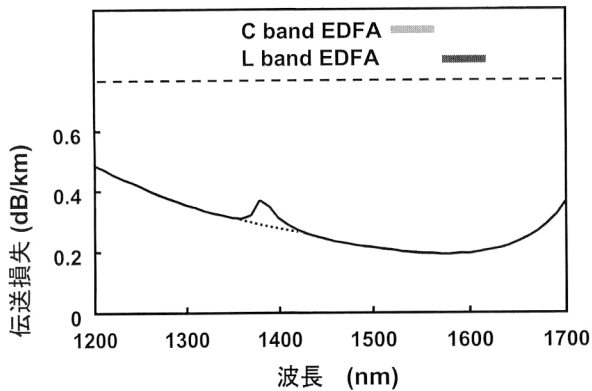


図1 光ファイバーの損失特性と光増幅器の増幅帯域。光ファイバーの最も低損失な波長域にEDFAの増幅帯域があることがわかる。

には、波長数を増やすことで容量増が可能なWDMが最も適していたといえる。使用する光増幅器の帯域の範囲内では、比較的容易に波長を増設することが可能であり、これが研究開発の速度を上回る速度での実用WDMシステムの大容量化の伸びにつながっている。

波長多重通信の導入は、各所からのトラフィックが集約される基幹ネットワークから始まった。最近では、テラビット級の大容量伝送が可能なシステムの導入も始まっている。このようなシステムでは、数多くのチャンネルを限られた波長域に高密度に多重することになる。このようなシステムは高密度波長多重(DWDM: dense WDM)通信システムとよばれている。一方で、都市圏や都市内のネットワークへのWDMの導入も進んでいる。こちらは、容量の大きさより、価格や柔軟性(例えばより多くの種類のインターフェイスを収容すること)が重要になる。波長数をそれほど多くせず、低コスト化を優先したcoarse WDMシステムの導入も進められている。(図4参照)。今後は、波長をベースとして光領域でネットワークを行うフォトニックネットワークへの展開も期待されている。

2. 現行のWDM伝送方式とその容量の限界

波長多重光通信システムの展開は、図5に示されるように進んできた。伝送キャパシティを最もコストパフォーマンスよく増大させていくという観点から、波長数の増大とチャンネル当たりの伝送速度の向上の双方が行われてきた。すでに1チャンネルの伝送速度が10 Gb/sで160チャンネルクラスのものの実用化が行われている。実用レベルですでにトータル容量が1 Tb/sを超えていることになる。研究開発レベルではチャンネル容量を40 Gb/s化した波長多重光通信システムの検討が鋭意進められている。

現状の実用システムでの最先端である10 Gb/s-160波シ

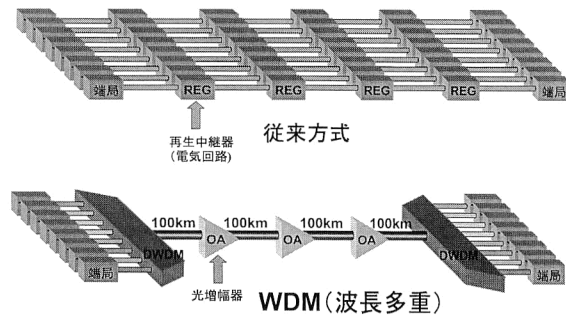


図2 波長多重光通信システムの基本構成。従来の再生中継器による光通信に比べ、光ファイバーと線形中継器である光増幅器を複数のチャンネルで共用することが可能になることから、システムの簡略化と経済化が可能である。

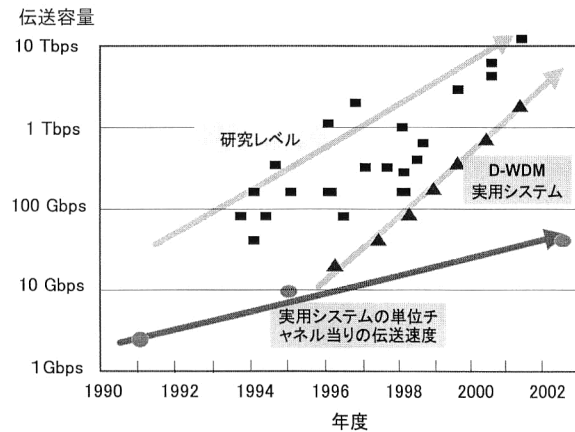


図3 最近の光通信システムの容量増のトレンド。波長数を増やすことで容量の増大が可能なWDMにより、研究の速度を上回る速さで実用システムの大容量化が進んでいる。

システムの場合、チャンネル間隔は50 GHzに設定されている。このときの周波数利用効率は0.2 bit/s/Hz (10 Gbit/s ÷ 50 GHz)である。ここで、さらなる容量増大のため、チャンネル容量を40 Gb/sにアップしたことを想定する。この場合、チャンネル間隔を100 GHzに設定することが考えられ、高速化とともに周波数利用効率を0.4 bit/s/Hzに上げることで総伝送容量のさらなる増大が図られる。ここで伝送符号にNRZ (non-return to zero) 符号を利用すると仮定すると、そのメインローブはキャリアを中心に±40 GHzに広がる。この場合のスペクトルは、図6に示されるようになる。このような配置が、隣接チャンネルのスペクトルと重ならないほぼ限界となる。したがって、周波数利用効率0.4 bit/s/Hzが現行の方式でのひとつの限界と考えることができる。例えばCバンド、Lバンドそれぞれの波長域として32 nmを仮定すると、それぞれのバンドで多重できる波長数はおおの40波(@40 Gb/s)に留まる。したがって、C、L両バンドトータルでの容量は3.2 Tb/sとなる。このように現行の波長多重のアプローチでは3~4

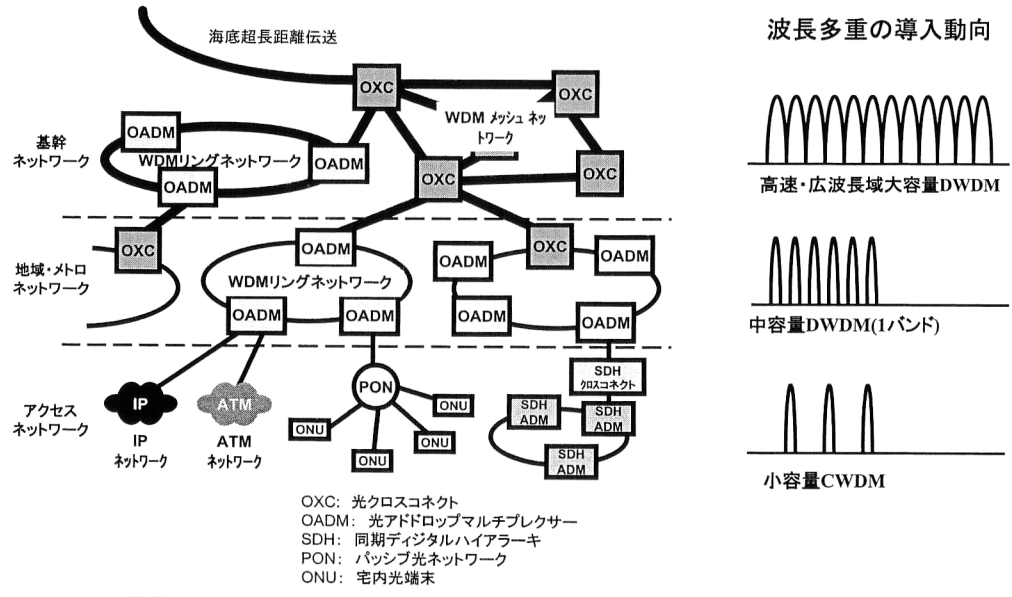


図4 トランスポート光ネットワークの構成と波長多重光通信技術の導入状況。

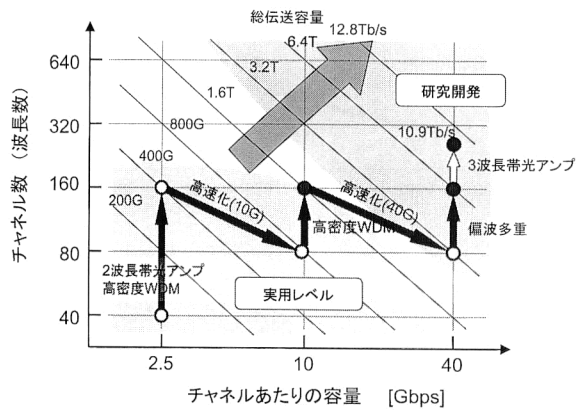


図5 波長多重光通信システムの展開。図中の総伝送容量一定の線は、ビットレート・チャンネル数の積が一定の、等価なシステムが存在することを示しており、現行の技術の場合、その限界は3.2 Tb/sのラインにあたる。

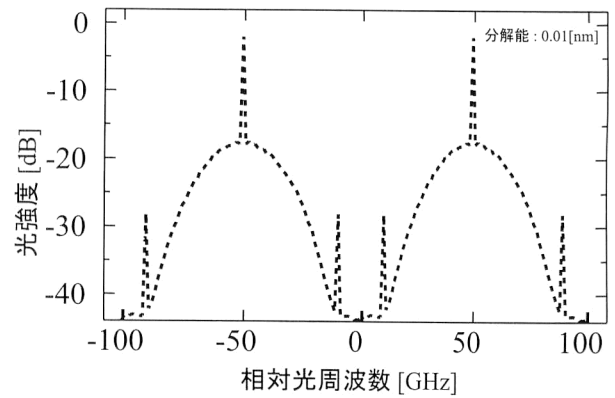


図6 40 Gb/s NRZ 信号のスペクトル、100 GHz 間隔で WDM 多重した場合に相当。

Tb/s 付近にひとつの限界があるといえる。さらなる大容量化を実現するためには何らかの新しい技術を導入することが不可欠になる。

3. 容量を増大するためのアプローチ

現状の WDM の限界を打破し、さらなる大容量化を可能にするためのアプローチとしては、以下の2つが考えられる。1つは使える帯域をこれまで以上に拡大することであり、新しい波長域の開拓が課題となる。もう1つはこれまで以上に効率的に信号を多重することで、周波数利用効率の向上を図ることである。本章ではそれぞれのアプローチについて説明する。

3.1 新しい波長域の開拓

新しい波長域としては、EDFA の増幅帯域のすぐ短波長側、長波長側双方が考えられる。これらの波長域で使える光増幅器としてはトリウム添加光ファイバー増幅器 (TDFA: Tm doped optical fiber amplifier) あるいはラマン増幅器が候補として考えられている。特に 1490 nm 帯の増幅を可能にする利得シフト TDFA (GS-TDFA) は半導体 LD 励起が可能であり、40% 以上の高変換効率も達成されている。したがって利得シフト TDFA は、実用性の面でも EDFA に次ぐ光増幅器としての期待が高まっている¹⁾。

3.2 周波数利用効率の向上

限られた帯域内により多くの信号を多重するためには、偏波多重・分離を利用することにより周波数利用効率を2倍に高めること、狭スペクトル符号を用いることによりチャンネル間隔をさらに狭めること等が考えられる。狭スペク

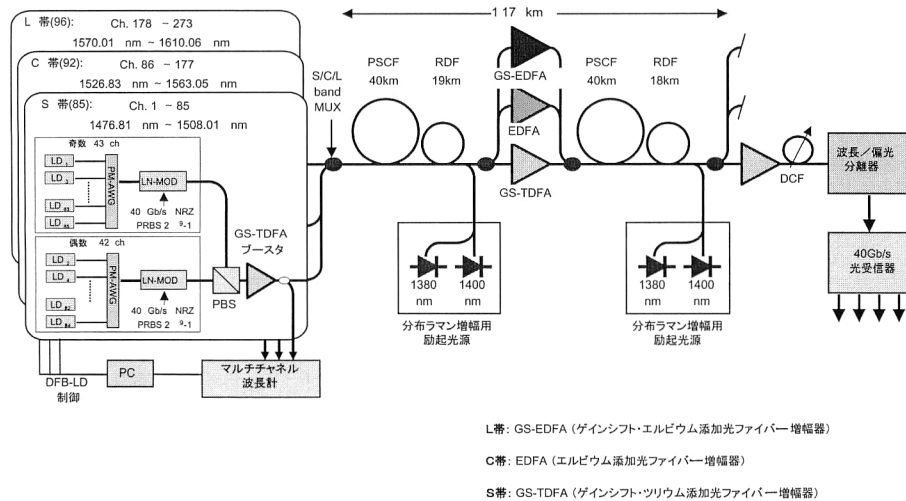


図7 10.9 Tb/s 超大容量波長多重伝送実験系の構成。

トル符号としては、デュオバイナリー符号²⁾、VSB/SSB (残留側波帯/単側波帯) 変調、多値変調等が考えられる³⁾。これまでの光通信は光の on/off にのみ信号を乗せる、いわゆる「のろしの通信」であった。周波数利用効率を上げる変復調技術は、無線通信では普通に使われてきた技術であるが、これまで強度にのみ依存してきた光通信にとっては、いずれもチャレンジングな技術といえる。特に新しい方式を採用し、周波数利用効率を上げた場合に、伝送距離を現状考えられているものと同レベルにできるかどうか重要なポイントであり、研究開発上のチャレンジでもある。

4. 10.9 Tb/s 超大容量 WDM 伝送実験⁴⁾

ここでは、前章で紹介した大容量化技術を導入することで達成した超大容量 WDM 伝送実験の例について報告する。この実験では、新たに開発した利得シフト TDFA を用いることで3つの波長帯の利用を可能にしている。その3つの波長帯に 40 Gb/s の信号をトータル 273 波多重して 10 Tb/s を超える超大容量伝送を実現した。図7にその伝送実験系の構成を示す。信号光源には DFB-LD を用い、S バンド (1476.81 ~ 1508.01 nm) に 85 波、C バンド (1526.83 ~ 1563.05 nm) に 92 波、L バンド (1570.01 ~ 1610.06 nm) に 96 波を配置した。波長間隔は 50 GHz とした。各バンドにおいて、奇数チャンネルと偶数チャンネルがまずそれぞれ多重され、LN 強度変調器によって 40 Gb/s の NRZ 信号で一括変調される。変調後に、偶数チャンネル、奇数チャンネルが偏波インターリーブ多重される。これにより隣接チャンネルの偏波状態は直交状態になる。これにより従来の倍の周波数利用効率 0.8 bit/s/Hz を実現している。3 バンドの信号は、誘電体多層膜フィルターのバンド多重器によって合波され、伝送される。伝送後の特性を均一にするため、フ

ィバー送信出力は S バンド信号で -2 dBm/ch, C バンドで -3 dBm/ch, L バンドで -4 dBm/ch とした。伝送路は、光強度が強い前半部分には非線形効果を抑えるためにピュアシリカコアファイバー (PSCF) を用い、後半部分はその分散を補償するための逆分散ファイバー (RDF) を用いた。1 スパン中の PSCF の長さは 40 km とし、RDF の長さは 1 スパン目を 19 km, 2 スパン目を 18 km とした。S, C, L, 3 バンドを同時に伝送する場合、バンド間ラマン散乱により S バンドから L バンドにパワーがシフトすることもあり、S バンドの信号の損失が大きくなる。そこで S バンド信号に対し分布ラマン増幅を適用し、全バンドでほぼ均一な伝送特性が得られるようにした。S バンドラマン増幅用の励起光には高出力半導体 LD を用い、波長 1490 nm においてラマンゲイン 5.5 dB を得た。伝送後の信号は、3 バンドにそれぞれ分離され光プリアンプで増幅された後、分散補償が施された。そして、波長・偏波分離装置により測定の対象となる 40 Gb/s チャンネルを分離して、40 Gb/s 高速光受信器によって受信した。偏波分離を行うことで、大きな干渉をもたらす隣接チャンネルをカットすることができ、良好な受信が可能になる。このような実験系で、全 273 チャンネルの WDM 信号を 117 km 伝送した後において、符号誤り率の測定を行った。全波長域で 10^{-9} 以下の符号誤り率を達成することができた。これは伝送路の最適化設計によって3バンドのすべてにわたって同等の伝送特性を実現することができたことによる。

5. 超長距離伝送技術

前章までは、大容量化という視点で WDM の動向について述べてきた。インターネットの進展は、通信における距離の意識をなくしつつある。それに伴って長距離伝送のト

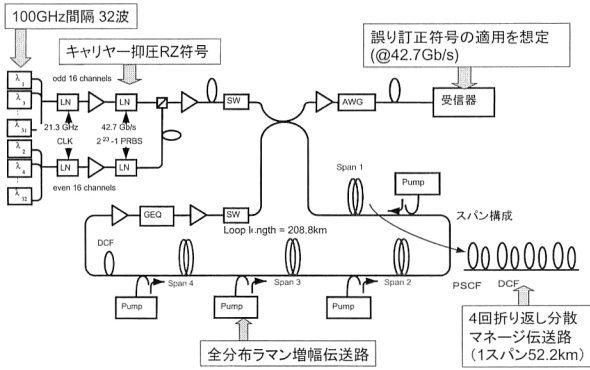


図8 40 Gb/s×32 ch ループ伝送実験系の構成。

ラフィックがこれまで以上に伸びている。陸上系のシステムでは北米や中国、ロシアといった国土の大きな国で超長距離伝送システム (1000 ~ 3000 km) の導入が検討されている。また海洋通信システムでは全世界をカバーするネットワークが構築されようとしている。海洋通信システムの8割方は3000 km レベルの伝送でカバーできるといわれているが、太平洋横断では10000 km 以上の光中継伝送 (非再生中継) も必要となる。これらの長距離伝送を想定すると WDM 伝送システムにおいて伝送距離を伸ばすための技術開発も重要である。特に超長距離伝送を実現する場合には複数の長距離化技術を導入することにより、必要な伝送距離をカバーするシステムを実現することになる。その技術の代表的な例を列記すると以下のようになる。

- 高性能光増幅器 (低雑音特性) : 雑音指数を低減することにより中継可能段数・距離を伸ばす。また (動的) 利得等化器を内蔵することで平坦な帯域特性を実現し、長距離多段中継時にも、WDM チャネル間で均一な伝送特性を実現する。
- 分布ラマン増幅 : 伝送路の光ファイバーをラマン増幅媒体として利用することで、等価的に伝送路損失を低減し、伝送可能距離を延伸する。
- 長距離伝送に適した伝送符号の検討 (RZ, CS-RZ 等) : 非線形効果に強い符号を採用することで、信号レベルを高く設定し、光 S/N を確保し、長距離化を実現する。
- 分散アレンジ (あるいはマネジメント) 伝送路 : 非線形効果が最も起きづらい構成を実現する。また伝送路中で分散補償を同時に行うことで、中継器で分散補償を行う場合に比べ中継器における S/N 劣化を低減し、全体で高い光 S/N を実現する。
- 誤り訂正符号 : 誤り訂正利得を得ることができるため、システム所要を緩和することができ、総伝送距離

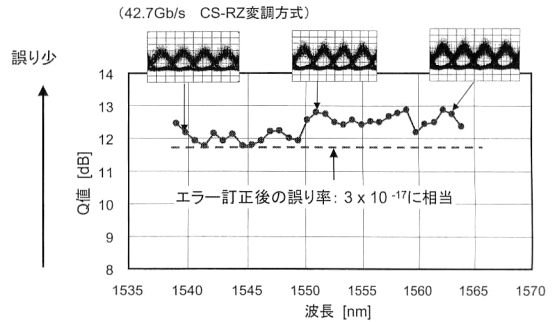


図9 6050 km 伝送後の波形と符号誤り率特性。32 チャネルすべてに対して、十分低い誤り率が実現されていることがわかる。

を伸ばすことが可能になる⁵⁾。

長距離光伝送システムを実現するにあたっては、調整できるシステムパラメーターが多いことと、光中継伝送がアナログ的な伝送であり、かつそのシステム規模が大きくなってしまいうから実験的な実証は容易ではない。したがってシステム設計にあたっては、伝送シミュレーションを活用することが重要になる。この伝送シミュレーションを、実際のシステムの特性に合わせ精度よく行う技術の確立が重要である。また長距離の伝送特性について実験実証を行う場合でも、ある程度 (500 km 程度) の距離の伝送ラインを用意し、そこに信号を周回伝送させることによって特性を確認するループ伝送実験を行えば、実験に必要な装置数を減らしての実証が可能になる。最近では、このループ実験が初期的な性能実証のフェーズでは広く利用されている。

6. 40 Gb/s×32 ch, 6050 km 伝送実験⁶⁾

10 Gb/s ベースの DWDM 伝送では、10000 km レベルのものの実用化の議論が進んでいる。ここでは次世代の長距離伝送の可能性を探る意味で行われた 40 Gb/s ベースの DWDM 長距離伝送の検討結果について紹介する。長距離伝送の伝送距離を制限する要因は光中継の際の雑音蓄積と非線形効果による波形劣化である。そのため非線形効果をいかに抑えることができるかが、伝送特性を改善する上では大きな課題になる。この実験では、非線形効果に起因する伝送波形の歪みの低減をめざし、全ラマン増幅伝送技術を適用した。

全ラマン増幅は、伝送路ファイバーを増幅媒体とする分布増幅であるため、従来の集中増幅タイプの EDFA での光増幅中継と比較して、伝送路中での信号レベルの低下を等価的に抑えることができる。このため同じ信号の光 S/N を実現することを想定した場合、より低いファイバー入力パワーでシステムを構築することができるようになる。こ

れにより伝送路中での非線形効果が抑えられ、従来に比べ伝送可能距離が伸延される。さらにこの実験では、通常分散ファイバーと逆分散ファイバーを、伝送路内にそれぞれ複数配置した、4回折り返し分散マネージ伝送路を採用している。4回折り返し分散マネージ伝送路は、ラマン増幅の効率を高めるとともに、伝送路での蓄積分散を低く抑えることで波形歪みを低減する。この結果、以下で述べるように40 Gb/s ベースの DWDM 信号での長距離伝送が可能になった。

図8に伝送実験系の構成を示す。光源はCバンドの32波長で、波長範囲は1539.0～1563.9 nmを用い、チャンネル間隔は100 GHzとした。変調信号フォーマットはCS-RZで、データ信号には誤り訂正符号使用を仮定した42.7 Gb/sの23段の擬似ランダム符号を用いた。ループ伝送路は、52.2 km×4スパン(計208.8 km)の4回折り返し伝送路である。ラマン増幅は後方励起にて行い、ラマン励起パワー450 mW、励起波長は1424, 1437, 1449, 1465 nmとした。ファイバー入力信号パワーは、平均-5.3 dBm/chに最適化した。

6050 km 伝送後の32チャンネルの平均光 S/N は20.8 dB (0.1 nm 雑音帯域)であった。このときの各チャンネルの Q 値(信号、雑音特性と符号誤りを結びつけるパラメータ)を図9に示す。32チャンネルの平均 Q 値は12.4 dB、最悪 Q 値は11.7 dBであった。誤り訂正を施す場合、 $Q=11.7$ dBの信号を訂正して得られる符号誤り率は 3×10^{-17} と見積もられる(ITUで標準化が行われているG.975規定の誤り訂正の場合)。また、6050 km 伝送後の波形では顕著な波形歪みは観測されず、全ラマン増幅と4回折り返し伝送路が非線形波形歪みを効果的に抑えていることが確認された。6050 kmでの符号誤り率が十分に低いことから、40 Gb/s ベースのWDM伝送でも7000 km以上の超長距離伝送を実現できる可能性が示されたといえる。今回の実験で用いた系は、ラマン増幅を含め、新しい伝送路構成であり、実

導入を考える上では、コストを含め検討すべき点が多々残されているのも事実であるが、今後のさらなる展開を期待させるには十分なデータであるといえる。

ITバブルの崩壊に伴い、通信不況が喧伝されてはいるが、一方でデータトラフィックは着実な伸びを続けていることも事実である。今後も増え続けるトラフィックに対応して、大容量・超長距離基幹ネットワークを実現する上では、WDM光伝送の果たす役割が今後も拡大していくものと考えられる。本稿で述べたように、技術面では高速化(40 Gb/s化)、大容量化(>10 Tb/s)、大洋横断レベルの長距離化に向け、着実な技術開発が進められている。これらの技術進展を実用につなげる活動をあわせて進めることが、今後はますます重要になると考えられる。フォトニックネットワークへの展開とあわせ⁷⁾、WDM光伝送技術が活きるネットワークの構築のさらなる進展を期待してまとめとする。

文 献

- 1) 笠松直史：“利得シフト・トリウム添加ファイバー増幅器”，レーザー研究，**29** (2001) 582-589.
- 2) 金子尚志：PCM通信の技術(産報出版，1976)。
- 3) R. W. Lucky, J. Salz and E. J. Weldon, Jr.: データ通信の原理，星子幸男，砂川 博，木村英俊，松岡 毅，曾根信義，吉田忠則訳(ラテイス社，1973)。
- 4) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono: “10.92-Tb/s (273×40 Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment,” *OFC 2001*, PD24 (2001)。
- 5) 今井秀樹監修：誤り訂正符号化技術の要点(日本工業技術センター，1986)。
- 6) H. Sugahara, K. Fukuchi, A. Tanaka, Y. Inada and T. Ono: “6,050 km transmission of 32×42.7 Gb/s DWDM signals using Raman-amplified quadruple-hybrid span configuration,” *Technical Digest of OFC 2002*, FC6 (2002)。
- 7) 超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会編：フォトニックネットワーク革命(2002)。

(2002年6月3日受理)