

大容量ネットワークを支える基幹光通信技術

— 国家プロジェクトにおける超高速・大容量・長距離伝送への取り組み —

藤井 浩三

近年、インターネット上で、電子メール、WWW、コンテンツ配信、動画・音楽配信、電子商取引など、多種多様な大容量通信（ブロードバンド）サービスが提供されるようになってきた。加入者線の高速インターネットサービスとしてAsymmetric Digital Subscriber Line（ADSL;非対称デジタル加入者線）が急速に伸びてきており、伝送速度として24Mbit/sや40Mbit/sがまもなくサービス提供されるようになってきた。また、さらなる大容量化のために、通信事業者は加入者線の光ファイバー回線（FTTH）サービスを開始しており、この1~2年で普及し始めている。これらの需要拡大に応えるために、世界的な規模での超高速大容量通信ネットワークの構築が急務となっている。

本稿では、このような社会情勢に対する国家施策として委託研究「トータル光通信技術の研究開発」を中心に示し、この委託研究の中で取り組んでいる最近の技術動向を述べる。さらに、将来の事業／技術開発へ向けての当社の取り組みを述べる。

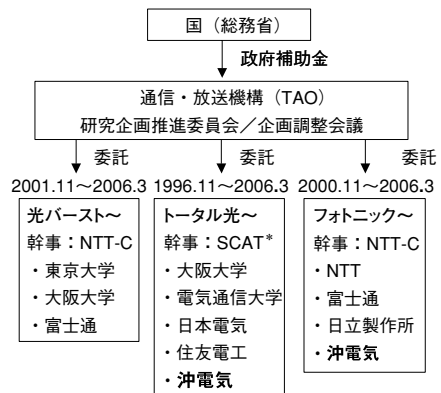
委託研究「トータル光通信技術の研究開発」

平成8年5月27日に、郵政大臣からの諮問を受けて、電気通信技術審議会から「情報通信新世紀の構築に向けて—情報通信技術に関する研究開発基本計画—」と題する答申が提出された。この中で、日本全体の情報通信高度化、および知的資産形成のために、研究開発ポテンシャルの引上げが不可欠との提案が行われた。この提案の実施策として、平成8年度から、総務省の外郭団体である、通信・放送機構により5件の委託研究開発プロジェクトが開始された。その中の一つが委託研究「トータル光通信技術の研究開発」（以下、「トータル光」と記す）である。この研究は、超高速光ネットワーク技術の研究開発に位置付けられている。

さらに、政府は、平成14年6月に策定した「e-Japan重点計画-2002」において、高度情報通信ネットワーク社会を実現するために5つの目標を設定した。その中の具体的施策の一つとして、現インターネットの1万倍の処理速度と、3万倍の接続規模を有するスーパーインターネッ

トの実現に向けた「研究開発の推進」を挙げた。この施策により、伝送速度の高速化、インターネット基盤技術の高度化等の観点から超高速光ネットワーク技術の開発を戦略的に推進して行くこととした。

このような政府施策を反映し、通信・放送機構は、図1に示すように、平成13年度に設置した『フォトニックネットワークに係わる研究企画推進委員会』で、3つのフォトニック関連の委託研究をまとめて、フォトニック全体の研究施策を議論して行くこととした。この委員会では、統一的なコンセプトでプロトタイプを出すための議論が行われている。この中で「トータル光」は、平成8年に掲げた当初目標の見直しを行い、高速技術、広帯域技術、高密度技術、および超長距離伝送技術に新たな目標を掲げて取り組むこととなった。



SCAT* : (財)テレコム先端技術研究支援センター
フォトニック〜 : フォトニックネットワークに関する光アクセス網高速広帯域通信技術の研究開発
光バースト〜 : 光バーストスイッチングを用いたフォトニックネットワーク技術の研究開発

図1 フォトニック関連委託研究の全体図

ここに「トータル光」プロジェクトの最終目標を記す。「超広帯域（100nm以上）・超高速（単一波長当り160Gbit/s以上）の効率率・超テラビット（Tbit/s ;1Mの100万倍）長距離光ファイバー通信システム技術の実現（平成17年度末）」

「トータル光」では、技術立国、日本を象徴するような先端技術開発を行う一方で、国内産業活性化を目的に、

より実用化に近い技術開発を並行して行っている。委託研究でプロトタイプを制作し、引き続き、商用化のための技術開発を各社が積極的に行うことで、早い時機に超高速・大容量光通信のビジネスを展開できると考えている。

光ネットワークの最近の技術開発動向

インターネットでは、データ量当たりの通信料金が極めて安価であることが期待されているので、新たな設備投資は、極力低コストで行わなければならない。伝送速度を高速化すれば、データ量当たりのコストは下がると考えられているが、設備投資の観点から40G-WDMシステムの市場は、未だ見えてこない。とはいえ、現在のインターネット利用者数は、北米、欧州、韓国、および日本で、すでに全世帯数の30%を上回る数となっている。将来、アクセス網がFTTHに置き換わり、端末での伝送速度が100Mbit/s、1Gbit/sへと上昇していけば、桁違いの総伝送容量が必要となるのは明らかである。

一方、超高速・大容量光通信技術を基幹伝送システム以外に適用する動きも始まっている。たとえば、2002年12月に開かれた光関連のシンポジウムでは、デジタルシネマのデモや、ユビキタスネットワークに向けた、マイクロチップの講演が行われた。遠隔医療、グリッドコンピューティング、地球シミュレータ、天体観測など、大容量のデータを扱う場合にも、超高速・大容量光通信技術が適用されていくものと考えられる。

これらの次世代通信を実現させるための技術開発動向を技術項目に分けて、以下に示す。

(1) 光ネットワークシステム技術の動向

ブロードバンド化を実現する近未来の光ネットワーク構成の概念図を図2に示す。全体は3階層で構成され、第一層は、広帯域アクセス網、それを收容する第二層は、リング型光地域網（メトロリング）および地域網、第三層は、全国、あるいは地球規模に接続するメッシュ型光基幹網からなる。

アクセス網では、ADSLやFTTHを用いて、低料金でのブロードバンド化が進んでいる。メトロ網では、各ノードで、波長によって分岐、または通過の選択機能を持たせるOptical Add/Drop Multiplex (OADM) 技術を用いた、比較的規模の小さいネットワークを構成している。一方、対地数が多い大規模なネットワークでは、波長多重された光波長パス相互を任意に切換えて接続する機能を持つOptical Cross Connect (OXC) 技術の研究開発が行われている。

光ネットワーク上でIPネットワークを実現させる手法

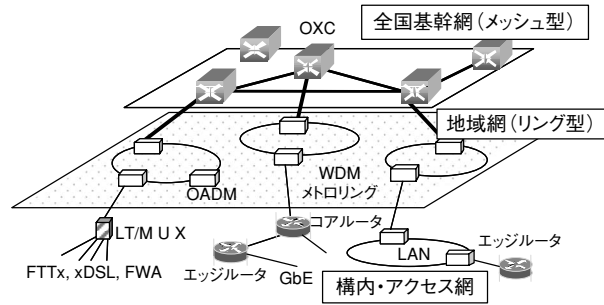


図2 光ネットワーク階層概念図

として、ノードをOADM、OXCなどの光レイヤスイッチとIPルータの組み合わせで構成し、大束のパスは光レイヤスイッチで処理することが考えられている。光レイヤスイッチとIPルータ両方を同時に制御するために、Multi Protocol Label Switch (MPLS) を光レイヤスイッチにも拡張したGeneralized MPLS (GMPLS) のプロトコルの検討¹⁾が急速に進んでいる。

「トータル光」の中で、電気通信大学は、日本全国を80地域ネットワークで構成すると想定して、光ネットワークの3階層でWDMと光時分割多重（OTDM）をどのように使い分ければ実用的かを検討した²⁾。所要波長数と所要伝送速度の両方が現実的な値となり得る組み合わせを選び出し、メトロリング網では1チャンネルのOTDMを用い、メッシュ型光基幹網ではWDMを用いる方法が、実現性が高いという結果が示されている。

(2) 超高速光通信技術の動向

1波長当たりの信号速度を高速化すれば、一定の総伝送容量を実現するのに必要な波長数を減らすことができる。超高速光通信は、信号全体の処理を考えると、①ノードにおける波長制御が少なくなる、②保守部品の削減や波長管理・オペレーション簡易化、省スペース化・省電力化が実現できる、さらに、③大容量の信号を相互に一括して取り扱う場合にデータ間の時間遅延が生じない、などの優位性がある。これらの優位性を受けて、最近の国際学会（ECOC、OFC）報告でも、一時のWDM一辺倒の報告から、超高速伝送に関する基礎的な報告が多くなってきている。

電子回路による時分割多重（ETDM）技術の進展により、通信速度40Gbit/sは、比較的簡単に実現できることとなった。一方、OTDM技術は、電子回路動作速度限界を超えた通信速度を実現できる技術として注目されている。これまでのOTDM技術を用いた最速速度としては、2000年に中沢らによる1.28Tbit/s-70km伝送³⁾の報告がある。この報告では、10Gbit/sで変調したひとつの光

信号を原信号として、光の状態でも重／分離を行い、OTDM技術の可能性を示している。

一方、実際に市場投入を目指した通信速度としては、40Gbit/sの4倍に当たる、160Gbit/sの研究開発が盛んに行われている。「トータル光」の中で、日本電気は、OTDMの分離技術に関して、半導体光増幅器（SOA）ベースのTransient 相互位相変調（T-XPM）型スイッチを用いて、168Gbit/s光信号から10.5Gbit/sの光信号を取り出す技術⁴⁾に成功している。

(3) 大容量光信号生成技術の動向

光ネットワークの大容量化は、図3に示すように複数の多重方式を階層的に用いて実現する。まずTDMにより、1波長当たりの光信号の高速化を行う。次にWDMを用いて、波長数を増やし、さらに増幅帯域の異なる複数の光増幅器を用いて光バンドで多重する。最後に光空間分割多重（光SDM：Space Division Multiplex，一般には光ファイバー芯線を複数利用すること）により、ファイバケーブル当たりの大容量化が行われる。

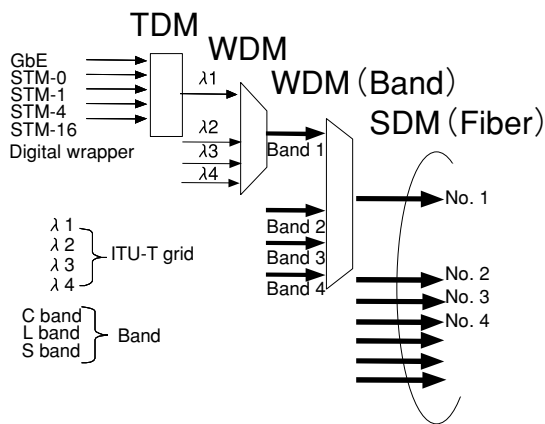


図3 光ネットワークの大容量多重化方式

WDMを用いた伝送路の大容量化は、1995年頃から導入が始まり、近年のインターネットの爆発的な普及に伴い、伝送路の新增設の需要に応える最も現実的な解として発展してきた。帯域利用効率を上げる方式として、隣接波長ごとに偏波を直交させる偏波多重、変調帯域自体を狭帯域化するSingle Side Band (SSB) 変調やVestigial Side Band (VSB) 変調、Differential Phase Shift Keyed (DPSK) 変調等が実現している。

「トータル光」の中でも、帯域利用効率の向上、波長帯域幅の拡大について研究開発を行ってきた。日本電気は、上記の高効率化技術を組み込むことによって0.8bit/s/Hz⁵⁾を実現した。波長帯域幅の拡大については、従来のCバンド（1525～1565nm）用光増幅器（EDFA；

Erbium Doped Fiber Amplifier）に加えて、Lバンド（1570～1610nm）用EDFAの実用化を進め、さらには、ドープ材としてTmを用いたSバンド（1475～1510nm）光増幅器⁵⁾も実現してきた。最近では、ラマン散乱を用いた光増幅器⁶⁾の実用化によって、100nmを超える波長帯域の一括増幅が可能となっている。

「トータル光」グループは、テラビットを超える総伝送容量として、ECOC1999で初めて1.1Tbit/sの大容量化⁷⁾に成功した報告を行い、OFC2001では、日本電気が10.92Tbit/sの大容量化⁵⁾を報告した。この報告での40Gbit/s×273波長の伝送実験は、上記3つの帯域の光増幅器を用いており、Sバンドの光増幅器を実用に供した点でも、世界的に注目されるものであった。

(4) 長距離伝送技術の動向

光通信は、高速信号伝達特性に優れ、光ファイバの伝送損失が少ない（<0.2dB/km）ので、大容量・長距離伝送に適している。さらに、光増幅器の開発により、光電気変換回路（OEO）を通さずに伝送距離を飛躍的に延ばすことが可能となった。大陸間を結ぶ海底ケーブルで1万km、大陸横断伝送網で3,000km、東京～大阪間で500kmなどが、実用的伝送距離の基準と考えられている。現在、10G-WDM光通信は、既に海底ケーブルを用いた大陸間通信に適用されている。

したがって、長距離伝送技術の開発は、40Gbit/s以上の高速・大容量光通信に向けられている。高速化が進めば、光ファイバの波長分散により、パルス幅が広がり、伝送距離は制限される。また、波長数を増やした大容量化が進めば、光強度が増加し、光ファイバの非線形光学効果により、波形歪みが生じ、伝送距離は制限される。

「トータル光」では、当初より、大阪大学が、分散マネジメント・ソリトン技術⁸⁾を用いた長距離伝送技術に取り組んできた。これは、波長分散によるパルス広がり、光ファイバの非線形光学効果によるパルス圧縮を有効に活用した技術である。この技術を発展させ、日本電気は、平成14年にラマン増幅を適用した40Gbit/s×32波長、6,050km伝送実験⁹⁾に成功した。さらに、コア面積を拡大した光ファイバと、複数回交差接続伝送路（分散マネジメント伝送路）の設計により、40G-WDM伝送で世界最長伝送距離となる9,000kmの伝送実験¹⁰⁾に成功した。

もうひとつの超長距離伝送に対するアプローチとして、光の3R（Reshaping, Retiming, Reamplifying）技術がある。これは、OEO回路を通さずに、光の状態でも光信号を再生する試みであり、理想的には、伝送距離に制限はない。この光の3Rへの取り組みとして、日本電気は、

Mode Locked Laser Diode (MLLD) を用いたクロック抽出部と、超高速な光ゲートデバイスの光識別部で構成される、光信号再生中継器を開発し、中継間隔400kmで40Gbit/s、12,000km伝送¹¹⁾に成功した。

光ネットワークへの当社の取り組み

当社は、「トータル光」中で、通信速度の高速化を目指し、個別変調したデータを多重する、実用性の高いOTDM技術を開発してきた。平成8年度の2×10Gbit/s⇔20Gbit/sを皮切りに、平成11年度には、4×20Gbit/s⇔80Gbit/s、平成14年度には、4×40Gbit/s⇔160Gbit/sのOTDM技術開発¹²⁾に成功した。

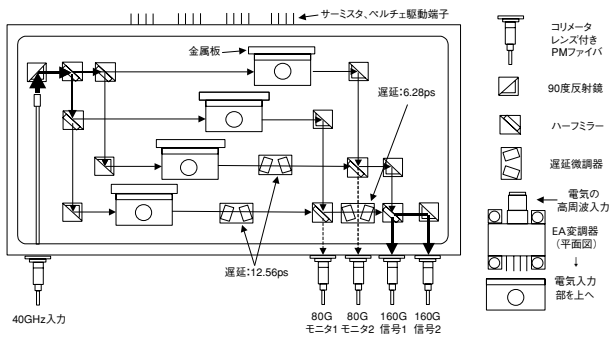


図4 4×40Gbit/s→160Gbit/s OTDMモジュール

図4には、平成14年度に開発した、OTDMモジュールの概観図を示す。パルス幅3ps程度の40GHz光クロック信号を入力し、ハーフミラーを用いて4分岐後、それぞれの変調器により40Gbit/sの光信号に変調する。これらの光信号を、空間遅延器によりタイミングを合わせてビットインタリーブすることにより、160Gbit/s光信号を生成する。出力端で光SN比 (OSNR) 28dB以上の非常に安定な光信号生成に成功している。このように個別変調の光信号を多重した160Gbit/s光信号生成は、世界にも例がなく、当社の特出した成果である。

超高速光信号を用いた大容量化の要素技術としては、

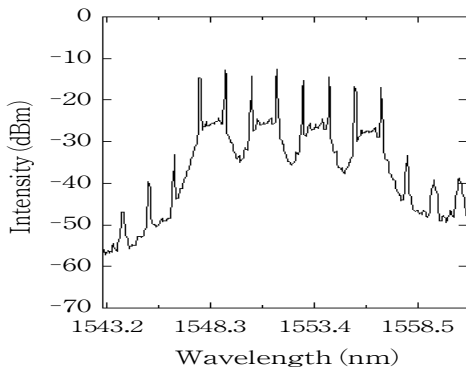


図5 160Gbit/s 4波WDM送信信号スペクトル

160G-WDM伝送に取り組んでいる。図5には、平成14年度に開発した、160bit/s 4波WDM光信号¹²⁾の光スペクトルを示す。ここでは、帯域利用効率を上げるために、隣り合うビット間位相差が π 異なることを特徴とする、搬送波抑圧Return to Zero (CS-RZ) 変調¹³⁾を用い、波長帯域10nmで総伝送容量640Gbit/sを実現している。

もうひとつの大容量化技術として、平成11年度には、Lバンド用EDFAの開発を行った。図6に20Gbit/s、70波WDM光信号の4000km (中継段数80段) 伝送後の光スペクトルを示す。伝送後でも利得偏差が2.5dB以下といった、非常に利得平坦性に優れた特性を得ている。このLバンドEDFAは、前述の1.1Tbit/s⁷⁾ 伝送実験に用いられた。

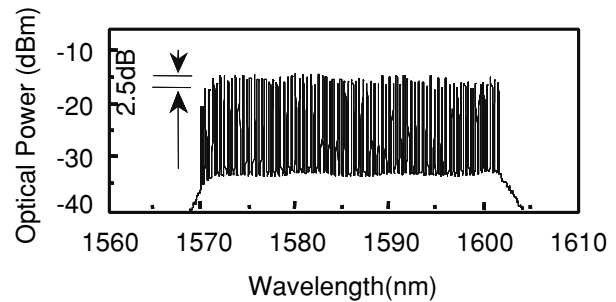


図6 Lバンド用EDFA伝送特性
20Gbit/s、70波長、80段伝送後の光スペクトル

これら超高速・大容量の光信号を基幹伝送に適用すべく、伝送距離の長距離化へ向けた検討も行っている。「トータル光」グループで特長となっている、分散マネジメント・ソリトン技術を基盤技術として、160G-1波では、640km伝送¹²⁾に成功しており、世界でもトップレベルにある。さらに、Electro Absorption (EA) デバイスを可飽和吸収素子として用い、MLLDと組み合わせる80Gbit/s光信号の3R基礎実験¹⁴⁾も行っている。図7には、OSNRを劣化させた信号a)と、光の3R回路を通した信号b)の符号誤り率測定結果を示す。簡単な構成で超高速光信号の再生が行われており、枠内に示した光信号のアイパターンからも時間ジッタが改善されていることが分かる。

この光の3R実験には、入力光信号を他の波長へ乗せ替

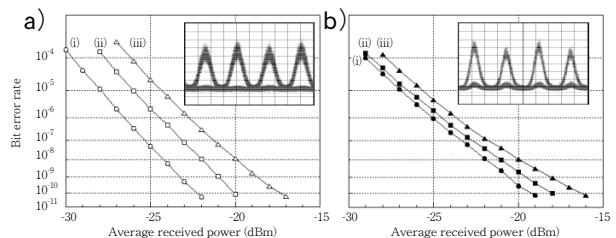


図7 80Gbit/s 光の3R実験

え、波形整形を行う波長変換技術を用いている。この技術は、OTDM信号とWDM信号を自在に変換する、光信号変換技術¹⁰⁾に転用できる。したがってこの技術開発は、各ルータで、すべての光信号を光の状態ルーティングすることを想定した、近未来の光ネットワークに適用できるものと考えている。

上記の先端技術を、実用化に近い形とするために、プロトタイプ装置化技術と、送受信の安定化技術にも取り組んでいる。平成14年度には、160Gbit/s光送受信テストセットを開発した。このテストセットを用いて、平成15年7月に、インターオプト2003で初めて動態展示を行った。図8には、展示したテストセットを示す。機能ブロックごとにユニット化し、高さ125cmのコンパクトな19インチラックに収容した。4日間に渡り、安定送受信を実現し、160Gbit/s光通信の実用化の可能性を示したと、関連各位から好評を博した。

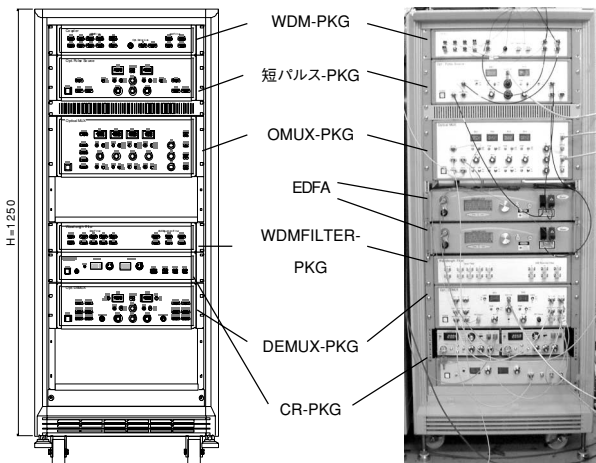


図8 160Gbit/s光送受信テストセット

一方、耐環境性能向上に対し、光信号の光位相レベルでの安定化技術に取り組んでいる。図9には、平成14年度に開発した、40Gbit/s、CS-RZ信号のモニタデバイス構成と外観を示す。非常にコンパクトなモジュールで、ビットインターリーブされた光信号の位相差を検出できている。

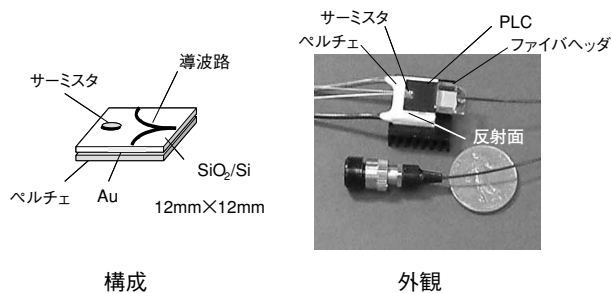


図9 光の位相モニタモジュール

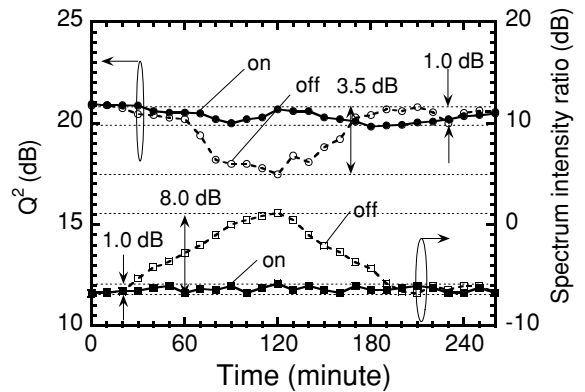


図10 位相フィードバック制御技術による、位相安定化実験

図10には、実験室の温度を2時間かけて10℃変化させたときの、光位相の安定性評価結果¹⁵⁾を示している。位相差検出結果をEA変調器の温度制御へフィードバックすることにより、Q値変動、スペクトル強度変動をそれぞれ、1dB以下に抑えることに成功した。今後は、4多重の160Gbit/s光送信号への適用を検討していく。

これらの技術開発を如何にビジネス展開につなげていくかについては、以下のように考えている。委託研究で開発した技術をプロトタイプ装置として作り込み、その有効性、安定性を示す。並行して、実用化への課題となる、低コスト化、耐環境性能向上へ向けた技術開発を行う。ニッチな市場からビジネスを始めることで、160Gbit/sシステムを認知して頂き、基幹伝送システムへ適用する機会が訪れた時に素早く対応していきたい。

TiPO【基本用語解説】

MPLS

パケットの高速転送を可能にするレイヤ3スイッチングの技術。パケットのラベルを参照するだけで次のホップ先へ転送できるので、パケットごとにルーティングを行う必要がない。

ECOC: European Conference on Optical Communication

毎年、秋口に開催される欧州最大の光関連国際学会。

OFC: Optical Fiber Communication

毎年、春先に米国で開催されている、光関連国際学会。ECOCと並んで先端技術報告の場として注目を集めている。

Q値

データ信号のONレベル、OFFレベルのばらつきを定量的に示した値。数値の大きい方が、符号誤り率は小さい。たとえば、16dB程度のQ値が得られた光信号の符号誤り率は10⁻⁹程度である。

ま と め

世界規模の超高速大容量通信ネットワークを構築するための国家施策を、委託研究「トータル光」を中心に述べた。最近の技術開発動向を、光ネットワークシステム、超高速光通信、大容量光通信、および超長距離光伝送技術に分けて、「トータル光」のアクティビティも加えて解説した。最後に当社のアクティビティを詳細に示し、ビジネス展開へ向けての考えを述べた。

ADSLがFTTHに置き換わり、端末での伝送容量が飛躍的に向上した時に、インフラとしての超高速・大容量・長距離伝送技術が必要となり、必ずや、大きなビジネスチャンスが訪れるものと確信する。

謝 辞

本報告で述べた研究成果の一部は、平成8年度～平成14年度通信・放送機構「トータル光通信技術の研究開発」によって行われた。関係者各位に感謝する。◆◆

参考文献

- 1) Y.NAKAHIRA: "OKI's R&D activities for IP photonic harmonized network", Global Newsletter Vol.5, pp.13-15, 2003
- 2) T.Miki: "DWDM and OTDM Technologies toward photonic networks", Symposium on DWDM Photonic Networks, Taipei, 2002
- 3) M.Nakazawa *et al.*: "1.28Tbit/s-70km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", Electron. Lett., Vol.36, No.24, pp.2027-2029, 2000
- 4) 中村滋, 田島一人: 第63回応用物理学会学術講演会 24p-B-10, 2002年9月
- 5) K.Fukuchi *et al.*: "10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment", OFC2001, PD24, 2001
- 6) T.Miyamoto *et al.*: "Raman amplification over 100nm-bandwidth with dispersion and dispersion slope compensation for conventional single mode fiber", OFC2003, 2002
- 7) K.Fukuchi *et al.*: "1.1Tb/s (55×20Gbps) Dense WDM Soliton Transmission over 3020km Widely-Dispersion-Managed Transmission Line Employing 1.55/1.58 μm Hybrid Repeaters", ECOC99, PD2-10, 1999
- 8) T.Hirooka and A.Hasegawa: "Chirped soliton interaction in strongly dispersion-managed wavelength-division-multiplexing system", Optics Lett., vo.23, No10, pp.183-185, 1998
- 9) H. Sugahara *et al.*: "6,050km transmission of 32 × 42.7Gb/s DWDM signals using Raman-amplified

quadruple-hybrid span configuration," Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. 2002, no. FC6, Anaheim, USA, March.2002.

10) 平成14年度トータル光通信技術の研究開発成果報告書(発行前) 2003年

11) Y. Hashimoto *et al.*: "Transmission at 40 Gbps with a Semiconductor-Based Optical 3R Regenerator" ECOC03, Mo4.3.3, 2003

12) H.Murai: "Ultra fast optical transmission with EAM-based OTDM techniques", The 10th International Workshop on Femtosecond Technology (FST03)

13) Y. Miyamoto *et al.*: OAA'99, Nara, Japan, Paper PDP4, 1999

14) H.Murai *et al.*: "All-optical 3R-signal regeneration at 80Gbit/s using high-speed electro-absorption modulator", MD11, pp.94, OAA2003, 2003

15) 賀川昌俊他: 40Gbit/s OTDM CS-RZ信号のビット間搬送波位相差制御に関する検討, OCS 40G-6, pp.25-28, 2002年

筆者紹介

藤井浩三: Kozo Fujii. IPソリューションカンパニー ネットワークインキュベーション本部 先端技術開発チームリーダー