

波長多重光伝送技術の全体動向

—光伝送システムからフォトニック伝達網へ—

小口 喜美夫

光ファイバーは波長 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.6\ \mu\text{m}$ の間にきわめて低損失(約 $0.2\ \text{dB/km}$)な領域をもつ。波長域として数十 nm にわたるこの広い波長領域を波長多重(WDM)技術を用いて有効に利用すると、自由度の高い優れたネットワークを実現できる。

波長多重伝送技術の研究は1970年代後半から精力的に進められた光ファイバー通信技術の研究開発のなかで行われた¹⁾。その後、合分波器などの波長多重に必要な新技術の研究開発が進み、1984年に2波長多重システム(F-6 M)が実用化された。それ以来、設備コストの低減化にインパクトを与える新技術として加入者系を中心として研究が積極的に続けられてきた。

一方、近年、光ファイバー増幅器の実用化により、ネットワークのもつ様々な属性を大きく変えた。中でも、光を光のまま増幅できる、いわゆるトランスペアレンシー特性と、他の光デバイスの性能向上の結果、波長を従来の多重技術としてだけでなく、波長ルーチングのようなネットワーク技術として利用できるようになり、新たなネットワーク構成の可能性が生まれた。

本稿では、波長そのものをネットワーク機能に利用したネットワークをフォトニックネットワークと呼ぶこととし、まず、波長多重技術の研究開発の流れを理解するために、基幹系光伝送システムを中心とした光通信システムの現在までの展開を述べる。また、フォトニックネットワークを構築するための要素技術について、その研究課題を整理する。さらに、最近の研究状況を標準化動向を含み紹介する。

なお、アクティブ/パッシブデバイス、ファイバー形デバイス、システム技術の詳細については対応するテーマが本特集で扱われているので参照されたい。

1. 光通信システムの展開

1970年代後半から急速に進展した光通信システムの研究開発は、1981年の基幹伝送系への商用導入を契機として大きく展開しはじめた。それ以後、4~5年あたり4倍のペースで伝送容量が増大し、1996年の、10 Gb/sの超大容量光伝送システムの実用化に至っている。図1にこれまでの光ネットワークの展開の概要を示す。図には、各々の世代の代表的ブレイクスルー技術、ならびにその主要な導入効果をあわせて示した。

第一世代は実用的な光通信システムの歴史的始まりである。それまでの同軸ケーブル伝送方式からマルチモード光ファイバー(MMF)を用いた光伝送方式に移行することにより、100 Mb/s以下の中小容量ではあるが、中継間隔をそれまでの1桁以上延ばすことができ、20 kmと拡大することが可能となった。また、さらに光ファイバー伝送のもつ各種特長(軽量/可撓性に富む、EMI/地電位差の影響がない等)を十分に生かすことが可能となった。初期には波長 $0.85\ \mu\text{m}$ が用いられた。このなかで、WDMシステムとして、波長 $1.2/1.3\ \mu\text{m}$ 、誘電体多層膜フィルターを用いた合分波器から構成される、2波長多重双方向伝送システム(F-6 M)¹⁾が1984年に実用化された。

第二世代はシングルモード光ファイバー(SMF)の導入である。波長分散がゼロとなる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯を使い、帯域のより広いシングルモードファイバーを導入したことにより伝送速度を1.6 Gb/s、最大中継間隔を40 km

NTT光ネットワークシステム研究所(〒239 横須賀市光の丘 1-1)
E-mail: oguchi@exa.onlab.ntt.co.jp

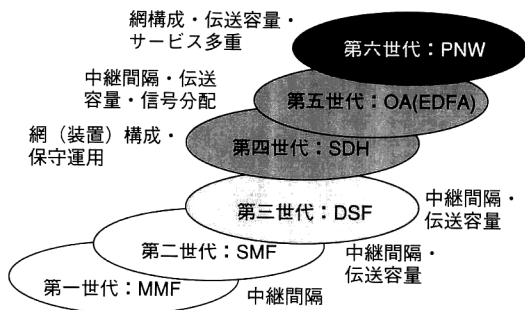


図1 光ネットワークの展開。

まで拡大することが可能となり、大容量伝送が実現された。ここでは、分布帰還型レーザー (DFB-LD)、高感度受光素子、超高速 LSI、シングルモード光ファイバー用モジュール、光コネクタ等の各種デバイス技術の進展によるところも大きい。

第三世代は分散シフトファイバー (DSF) の導入である。ファイバーの損失が最も低くなる 1.55 μm 帯に零分散波長を移行した分散シフトファイバーの開発により、それまでの最大中継間隔をさらに 80 km まで延ばすことが可能となった。その結果、伝送路の経済化に大きくつながった。

第四世代はネットワークハイアラキーの変革である。それまでのネットワークは日本、北米、欧州と 3 系列の非同期デジタルハイアラキー (PDH) であった。1986 年に日本がハイアラキーの統一を ITU-T (当時 CCITT) に提案し、その後、各国とともに積極的に標準化を推進し、1988 年に同期デジタルハイアラキー (SDH) 勧告が完成した。この世界統一の SDH を導入することにより、網構成/装置構成の簡易化が可能となるだけでなく、監視機能の充実により保守運用性を高めることが可能となった。

第五世代は光ファイバーアンプ (OA) (エルビウムドープ光ファイバーアンプ: EDFA) の導入である。電気変換をせず光信号を直接増幅することを可能とした光ファイバーアンプの研究開発により、ネットワークの自由度を大きく広げることが可能となった。光ファイバーアンプは広帯域、高利得、高出力、低雑音だけでなく、信号形態に依存しないトランスペアレンシーをもつため、従来の光伝送系の中継間隔、伝送容量を改善するだけでなく、映像分配システムのようなポイント・トゥ・マルチポイントシステムの実現にも大きく寄与している。

第六世代は現在研究が活発化しているフォトニックネ

ットワーク (PNW) である。第五世代までの光ネットワークでは、主に光 (波長) はリンク技術としてのみ利用されてきた。また、第二世代から第五世代までは時分割多重技術をベースとして大容量化、低コスト化を実現してきた。しかしながら、各種光デバイス技術の進展により、WDM を大容量化の手段 (リンク機能) として利用するだけでなく、光の波長/周波数を積極的にネットワーク機能 (ルーチング機能やリストレージョン機能) の実現手段としても利用することが可能となり、従来にはない魅力的な新しいネットワークを構成できる。ここで、伝送路中で波長多重され、波長により識別およびルーチングされるパスを光パスと呼ぶ²⁾。このような光パスを利用したフォトニックネットワークは次の特長をもつ。

- (1) 超大容量化：いわゆる多チャネル伝送であるため、ファイバーあたりの伝送容量はチャネルあたりの伝送容量の波長数倍となり、総容量としてテラビット (10 の 12 乗ビット) も可能となる。
- (2) ノード構成の高速化、簡易化：電気的な多重・分岐挿入等のノード処理には速度限界がある。しかしながら、波長ルーチング機能を用いるとパッシブ素子を利用したノード構成が可能であり、処理遅延の低減化、高速化が可能となる。
- (3) 柔軟なサービス多重化：新規ダクトの建設や新ケーブルの敷設工事を行うことなく、既存設備のままで光パスの増設が可能となる。さらに、光パスは各種信号形態やプロトコルにも依存することなく多重化が可能のため、柔軟にサービスを多重でき、いわばフューチャブルなネットワークを構築できる。

図 2 に、これまで研究開発された主な光通信システムの変遷を伝送容量、多重数の観点から表す。

図より明らかなように、これまで多くの単一波長システムが実用化されてきた。WDM システムとしては、上述した、2 波長多重双方向伝送システム (チャンネル速度 6 Mb/s) が実用化されている。また、第一世代に属するシステムではあるが、1980 年代半ばに現在のフォトニックネットワーク概念の原形ともいえる 2 つのシステムが実用化された。それは、閉ループの形成をさけるため 2 波長多重を用いて受動形システムを構成したスター形光 LAN³⁾ と、網の信頼性向上のためにパッシブ素子と光 TDM 技術を用いたループ形光 LAN⁴⁾ である。

現在、チャンネルあたりの伝送速度 40 Gb/s あたりを境として、電気処理+WDM と光処理 (光 TDM) +

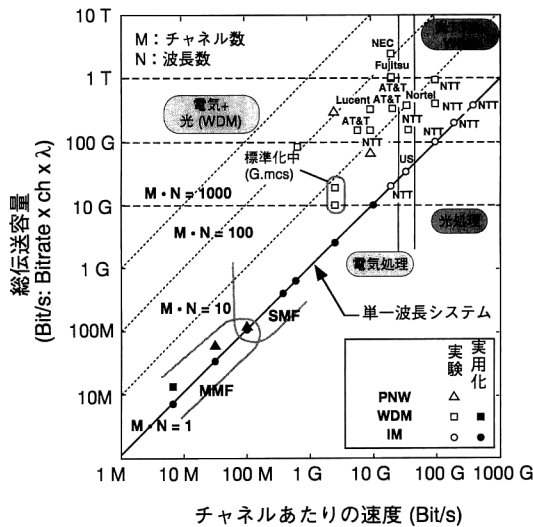


図2 光ネットワークの変遷。

WDMの2つの技術をベースとした大容量光伝送技術の研究が進められている。前者では、20 Gb/s×132 chの伝送実験⁵⁾、後者では、100 Gb/s×10 chの伝送実験⁶⁾の報告がされ、総容量としてTb/sを超える領域に達している。また、伝送速度2.5 Gb/s、8波長までの多チャネルインターフェースの標準化が進行中である(3.2節参照)。

フォトニックネットワークとしてはテストベッド実験を中心として光クロスコネクタ、分岐挿入ノードの研究が進められている(3.1節参照)。

2. フォトニックネットワークの構成要素と技術課題

2.1 フォトニックネットワークの構成

図3にフォトニックネットワークの機能構成イメージを示す。

フォトニックネットワークでは、特定の波長を割り当てられた光パス(WP: wavelength path; VWP: virtual wavelength path)²⁾により光ノード間を接続する。光ノードには、光クロスコネクタ(O-XC)、光分岐挿入(O-ADM)ノードなどがあり、そこでは波長ルーティング機能によりパス変更/分岐・挿入が行われる。VWPを実現するためには波長変換機能が必要となる。また、信号の分配、信号増幅機能が必要である。光ノード間は波長多重(WDM)/光TDMにより多重され、光増幅器を用いた線形中継器または再生中継器により接続される。さらには、ネットワーク全体、特に波長に関わる監視制御系が必要である。

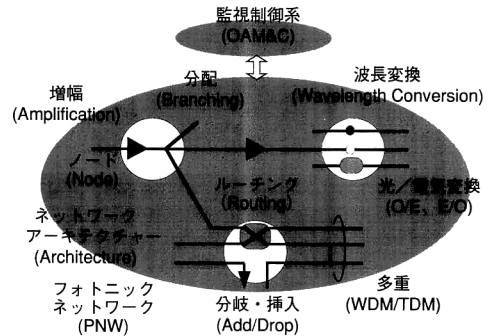


図3 フォトニックネットワークの機能。

表1 フォトニックネットワークの技術課題。

項目	技術課題
ネットワーク構成	<ul style="list-style-type: none"> アーキテクチャー レイヤー機能配備 波長収容設計 網リストレーション法
監視制御系	<ul style="list-style-type: none"> 波長監視/管理法 光パスマネジメント
PNW 構成要素	
伝送系	<ul style="list-style-type: none"> 多重法 非線形効果 分散制御 ファイバーパラメーター
光/電気変換	<ul style="list-style-type: none"> インターフェースパラメーター 電子回路 波長配置 波長監視/制御/安定化 波長可変 基準波長光源
波長変換	<ul style="list-style-type: none"> 構成(LD, 非線形効果) 波長可変
ルーティング/ 分岐・挿入	<ul style="list-style-type: none"> OXC 構成 OADM 構成 光スイッチ構成
波長多重・分離	<ul style="list-style-type: none"> フィルター構成(導波路形, ファイバー形, 誘電体多層膜)
光増幅	<ul style="list-style-type: none"> アンプ構成(ファイバー, 半導体) 広帯域化 高出力化 低雑音化 利得平坦化 OAM&C
信号分配	<ul style="list-style-type: none"> 低損失化 バラツキ
ノード構成	<ul style="list-style-type: none"> 大規模実装 デバイス集積化

2.2 技術課題

フォトニックネットワークを実現するためには、解決すべき多くの技術課題がある。

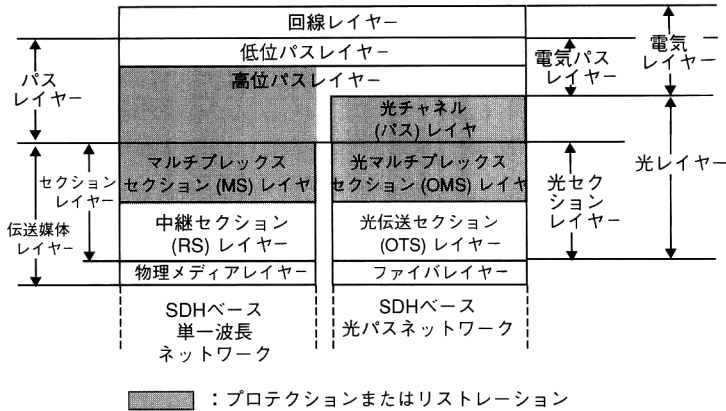


図4 光レイヤーを導入した伝達網のレイヤー構造。

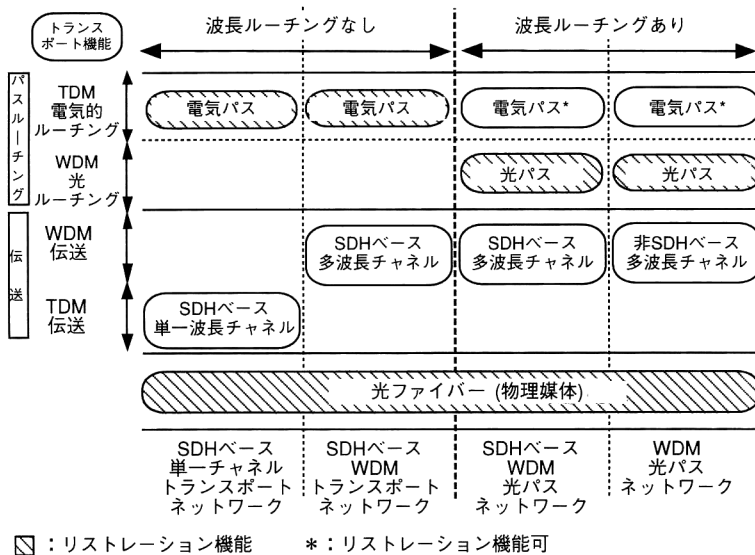


図5 ネットワーク機能から整理した各ネットワークの関係。

表1に、図3に示したフォトニックネットワークを構成する機能と検討技術課題をまとめる。

光パスを導入した新たなネットワーク構成法（アーキテクチャー、レイヤー間の機能配備等）は、光技術のポテンシャルを十分に生かす上で重要な課題である。図4に光レイヤーを導入したレイヤー構造（図面の右半分）を従来のSDHネットワークのそれ（図面の左半分）と比較して示す⁷⁾。パスレイヤー機能として光技術（波長）を利用することにより効率よい網構成が可能となる。図5に各々のネットワークの関係を、ルーチング機能の実現法（電気/波長、有/無）、伝送法（WDM/TDM）、網リストレーション機能の点から整理した⁸⁾。この分野は

3.2節で述べるように、現在標準化議論が活発に進められている。

監視制御系/各構成要素の中で、特に従来のネットワークにはない波長に関する課題が重要である。波長そのものや偏差、波長間隔といったパラメーター、さらにその監視制御法などの物理的属性だけでなく、パスとしての論理的属性、物理的属性との関係などの検討課題がある⁹⁾。

各種デバイスはそれぞれともその特性の改善だけでなく、構成法やネットワーク内で使用することを前提とした制御性等の検討課題がある。さらに、大規模化にむけた集積化、実装法もまた課題である。

3. 研究開発動向

3.1 テストベッド

欧州/北米/日本において現在進められているフォトニックネットワーク関連の実験システムの動向を示す。

欧州では EC を中心として 1988 年から 1995 年まで進められた RACE (R & D in Advanced Communication in Europe) プロジェクトの成功をうけ、1995 年 9 月から ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) プロジェクトが開始された^{10,11)}。4 年間の予算は約 8 億 6 千万ドルである。豪、加、日、米等の非 EC 諸国も含み 1000 を超す機関が参加し、計 155 プロジェクトが進行中である。24 ある光関連プロジェクトの中から表 2 に光ネットワーク関連プロジェクトの名称、参加組織、主要課題を示す。また、表 3 に光デバイス関連プロジェクトを示す。24 プロジェクト全体では約 1 億ドルの予算である。

図 6 に OPEN プロジェクトのネットワークレイヤー概念図とフィールド試験構成を示す¹⁰⁾。主要目的は、G.652/G.653 ファイバー網でのトランスペアレントルーチングとトランスペアレンシー限界の追及である。16×10 Gb/s 伝送実験、4×4 XC による接続実験、網リストラクション実験等が欧州規模で実施されている。

一方、米国では、政府機関の ARPA (Advanced Research Projects Agency) を中心として、大学、通信メーカー、コンピューターメーカーがコンソーシアムを組織し、将来の光ネットワークに関する各種研究を進めている。表 4 に、ARPA が支援するコンソーシアムの名称、参加組織、主要課題を示す¹²⁾。1994 年より 5 年間で 1 億ドルの援助が予定されており、内訳は、56% が光コンポーネント、27% がフィールドトライアル、17% がネットワークアーキテクチャー・マネージメントとのことである。各々のコンソーシアムでは多くがテ

表 2 光ネットワーク関連の ACTS プロジェクト。

名称	参加組織	主要課題
WOTAN (AC 029)	GPT, BTL, Cambridge Univ., CSELT 他 6	・光トランスポート/アクセスネットワーク
KEOPS (AC 043)	Alcatel, CSELT, ETH, CNET 他 5	・光パケットスイッチング
HORIZON (AC 058)	IMEC, ENST, Tech. Univ. Denmark, Univ. Essex	・ロードマップ作成
OPEN (AC 066)	Alcatel, Belgacom, CSELT, ETH 他 10	・OXC をベースとしたパン欧州光ネットワーク
COBNET (AC 069)	IBM, BT, Ecole Polytech, GEC 他 8	・WDM と SDM をベースとした WAN
METON (AC 073)	Ericsson, CSELT, DT, CNET 他 7	・WDM とリング網による MAN
PHOTON (AC 084)	Siemens, AT&T, BBC, LET 他 8	・OXC をベースとしたパン欧州オーバーレイネットワーク
MEPHISTO (AC 209)	Alcatel, CNET, IMEC, NOKIA 他 6	・フォトニックシステムとネットワークのマネージメント
MOON (AC 231)	Siemens, CSELT, DT, TUW 他 5	・光ネットワークマネージメント

表 3 光デバイス関連の ACTS プロジェクト。

名称	参加組織	主要課題
VERTICAL (AC 024)	Alcatel, Ecole Polytech., CNET, RIT 他 4	・長波長 VC-LD
PLATO (AC 041)	Alcatel, Belgacom, Framatome, IMEC 他 3	・ATM-SW 用高速光インターコネクション
PHOTOS (AC 046)	Alcatel, Aston Univ., BT, CSELT 他 5	・ファイバグレーティング
CAPITAL (AC 047)	Imperial Coll., Alenia, CNR, Gee 0 他 4	・低コスト用集積化技術
FAST (AC 059)	Pirelli, Brunel Univ., Leeds Univ., Merck 他 2	・1.3 μm 帯ファイバーアンプ
BLISS (AC 065)	Gayton, Delft Univ., CNET, GAP 他 16	・既存デバイスの低コスト化 ・光 SW/インターコネクション用新デバイス

表4 米国内の主要光関連コンソーシアム。

名称	参加組織	主要課題
AON	AT & T, DEC, MIT	<ul style="list-style-type: none"> ・パッシブルーチング ・T-LD/RX ・ソリトン
ONTC	BCR, NT, Hughes, Columbia Univ., LLNL, Rockwell, United Tech.	<ul style="list-style-type: none"> ・アクティブネットワーク
Rainbow	IBM	<ul style="list-style-type: none"> ・ブロードキャスト ・T-LD/RX
CORD	Stanford Univ., GTE, Univ. of Mass.	<ul style="list-style-type: none"> ・競合制御
100 GBS	Georgia Tech. Univ., Bell South, NT	<ul style="list-style-type: none"> ・全光 TDM ・超高速 MUX/DMUX
MONET	AT&T, Lucent, BCR, Bell Atlantic, Bell South, Pacific Telesis, Ameritech, Southern Bell, US West, NRL, NSA	<ul style="list-style-type: none"> ・多波長光ネットワーク
NTONC	NT, Huges, LLNL, Columbia, United Tech., Pacific Bell, US Sprint, Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ・トランスペアレント光ネットワーク
ICON	IBM, Corning	<ul style="list-style-type: none"> ・光ネットワークング
WEST	Rockwell, Ortel, CALTECH, UCSB, UCSD, UCLA	<ul style="list-style-type: none"> ・電気スイッチング

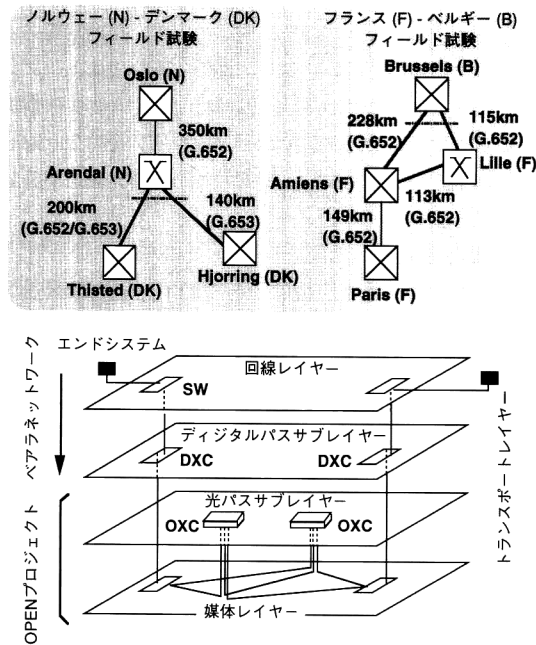


図6 OPEN プロジェクトのネットワークレイヤー概念図とフィールド試験構成。

ストベッドを構築し、ネットワークアーキテクチャから、各種デバイス等の要素技術までネットワーク実験やデモンストレーションを通して幅広い検討を進めている。

図7にニュージャージーで行われている MONET プロジェクトのネットワーク実験構成図を示す¹³⁾。主要目的は、最適な全国規模の多波長光ネットワークを確立することである。ここでは、14 EDFA と True Wave ファ

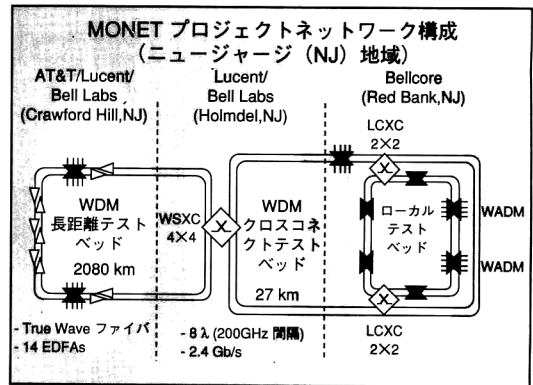


図7 MONET プロジェクト実験のネットワーク構成。

イバーで構成された 2000 km を超す長距離テストベッドと WADM と 2×2 液晶型 XC から構成したリング網のローカルテストベッドを、4×4 XC から構成されるクロスコネクテストベッドで接続している。ここでは、2290 km 長の全国規模 WDM ネットワーク実験、監視制御プラットフォームのセットアップ実験、FM アナログビデオ信号と 2.4 Gb/s データ信号のトランスペアレント伝送実験が行われ、良好な結果を示している。

国内では、NTT において将来のフォトリックネットワークを実現するために、光バスを導入したシステム検討/フィールド試験が進められている。

図8にこれまで伝達実験が行われた光クロスコネクシステムの中で、最大規模のシステム構成を示す¹⁴⁾。16×16 ポート、8 波長/ポート、2.5 Gb/s、システム容量として 320 Gb/s が実現されている。OS 部分の交換

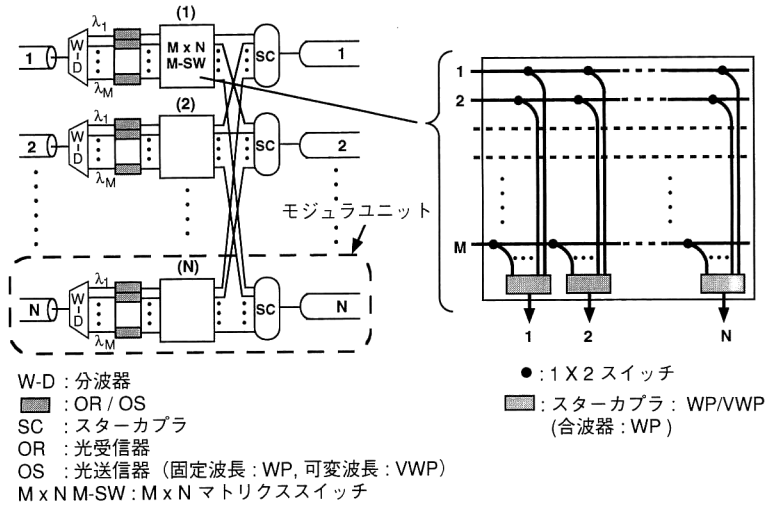


図8 WP/VWPクロスコネクタ構成。

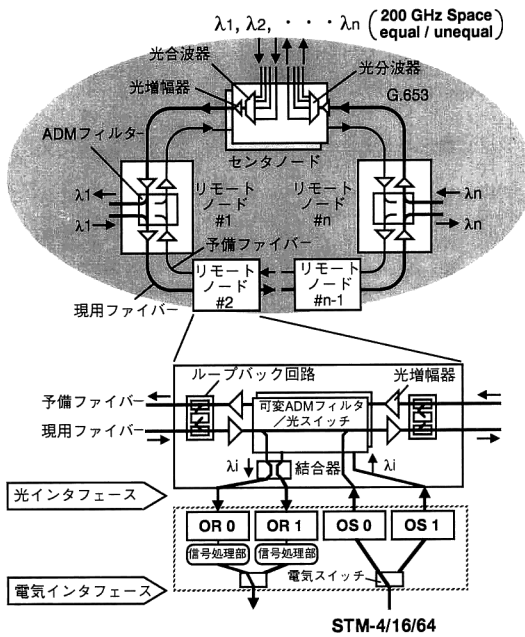


図9 OADMリング網とノード構成。

(固定波長/可変波長)によりWP/VWP構成のどちらにも適用可能で、また増設性にすぐれたアーキテクチャをもつ。

WDM技術を利用したリング網は、ノード構成が簡易で、網の故障時に高速に予備伝送路に切り替えることができ、トラフィック増加にも柔軟に対応できる等の特長をもつ。

図9にOADMリング網とノード構成例を示す。波長

多重により論理スター網を構成している。監視制御用にインバンド波長を用いており、網の故障時にはループバック動作により復旧を図っている。1996年より神奈川県において現場敷設ファイバー(総ループ長約200km)を用いたフィールド試験が実施され、各種光技術が確認されている¹⁵⁾。

3.2 標準化動向

ここでは、国連の一機関であるITU(国際電気通信連合:International Telecommunication Union)において公衆通信の標準化を扱うITU-T(電気通信標準化部門:-Telecommunication Standardazation Sector)と、ISO(国際標準化機構)の電気専門部会であるIEC(International Electro-technical Commission)の2機関で進められている光ネットワーク関連の標準化活動の概要を示す。

図10にITU-Tにおける光ネットワーク関連動向の検討の流れを示す。

1993年から始まったITU-T第一研究会期においては、主にポイント・ツウ・ポイント伝送を念頭においた勧告化がSG15・WP4において進められた。これまでに、光アンプと光多重装置を含む局間および長距離システムの機能特性(G.681)、光ファイバーアンプ関連(G.661, G.662, G.663)、多波長用光素子の特性を含むパッシブ光コンポーネント特性(G.671)の各々の勧告が完成した。また、STM-16, 8チャンネル(波長)までのインターフェースパラメーターを規定する多チャンネルインターフェース特性(G.mcs)については、本年4月のSG15本会合において最初のバージョンが完成し、

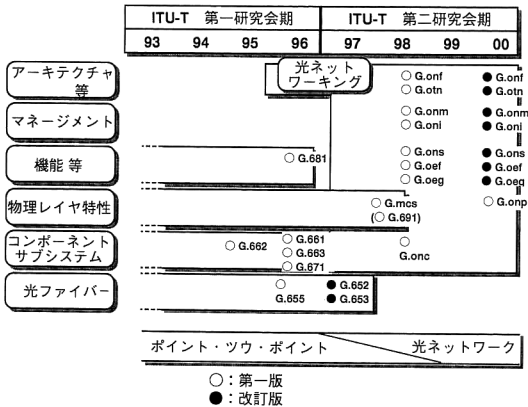


図 10 ITU-T における光ネットワーク関連研究の流れ。

1998 年に勧告化の予定である¹⁶⁾。

このような流れと並行して各国で行われている波長多重システムの研究/テストベッド等の進展により、1995 年頃から、ITU-T SG 13・WP 3 および SG 15・WP 4 において光ネットワークに関する研究/標準化の必要性が叫ばれてきた。

光レイヤーを導入したネットワークアーキテクチャーとして、勧告草案 G. otn (Optical Transport Network Architecture) の検討が 1996 年後半から SG 13・WP 3 において開始され、その後、光ネットワークのインパクトが大きいことから、アーキテクチャーからデバイスまでの広い範囲での検討の必要性が認識された。その結果、ITU-T 第二研究会期の最初の会合である本年 4 月の SG 15 本会合において、光ネットワーク関連の研究を積極的に進め、一連の勧告セット (図 10 参照) を今会期中に勧告化することが合意された¹⁷⁾。検討のステップ 1 は、ポイント・ツー・ポイント中心、ステップ 2 は OXC/OADM への展開、ステップ 3 は光レイヤーのサブパイバビリティへの展開を考慮している。

一方、IEC TC 86 においても光ファイバーアンプの試験法を中心として国際標準化が進められている¹⁸⁾。これまで、光ファイバーアンプのゲイン、パワーに関する試験法などの勧告が完成した。さらに雑音に関する研究も進行中である。一般的には、IEC で規定した測定法等を ITU が参照することにより検討の重複や内容の矛盾がおこらないよう協調して検討が進められている。

4. 今後の進展

WDM 技術は上述したようにネットワークを変革できるキー技術であるが、現状では、光ファイバーアンプ

(EDFA) のもつ帯域により、そのポテンシャルが制限されている。しかしながら、最近、これまで利用されていなかった 1.58 μm 帯で使用可能な光ファイバーアンプの実現¹⁹⁾ や、最初の伝送実験²⁰⁾ が報告された。今後、さらに波長域の広帯域化が予想され、その結果、真の意味の波長多重ネットワークの実現につながるであろう。

さらに、ノード内の光インターコネクション等の検討の延長として、光信号処理技術が注目されている。現状の光信号処理技術は各種素子特性の制限をうけているため、本来期待されているほどシステム化されている例は少ない。しかしながら、光の波長/周波数を利用した多重・処理はそのポテンシャルを十分発揮できる領域として認識されている。今後、例えば、2 次元/3 次元素子を用いた新たな光信号処理方式や光ノード構成が活発に研究されることになるであろう。

1980 年代から基幹伝送系に導入された光ファイバー通信技術は、1990 年代には加入者系に導入されるに至った。その後、伝送技術やデバイス技術の進歩により、従来のポイント・ツー・ポイントのリンク技術だけでなく、ネットワーク技術として使うことが研究されている。現在、各国では近い将来の実用化にむけたテストベッド実験が進められており、さらなる研究の進歩により光技術のもつポテンシャルを十分に生かしたネットワークが期待される。

しかしながら、技術的な検討課題は多く残されており、コスト的にも十分に満足できる段階まで到達するには、各種光デバイスをはじめとして今後のブレイクスルーが期待される。

文 献

- 1) H. Ishio, J. Minowa and K. Nosu: "Review and status of wavelength-division-multiplexing technology and its application," J. Lightwave Technol., **LT-2** (1984) 448-463.
- 2) K. Sato, S. Okamoto and H. Hadama: "Network performance and integrity enhancement with optical path layer technologies," IEEE J. Sel. Areas Commun., **12** (1994) 159-170.
- 3) K. Oguchi, Y. Hakamata and J. Minowa: "Optical design and performance of wavelength-division-multiplexing optical repeater for fiber-optic passive star networks connection," J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 665-671.
- 4) N. Tokura, K. Oguchi, Y. Kimura and Y. Oikawa: "100 Mb/s optical fiber loop network for on-premises use," Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) '84 (1984) Paper 2.6.
- 5) Y. Yano, T. Ono, K. Fukuchi, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi and K. Emura: "2.6 Terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding,"

- European Conference on Optical Communication (ECOC) '96* (1996) PD ThB.3.1.
- 6) T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M. Saruwatari, H. Takahashi, M. Yamada and T. Kanamori: "100 Gbit/s×10 channel OTDM/WDM transmission using a single super-continuum WDM source," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96* (1996) PD21-1-21-5.
 - 7) S. Okamoto, K. Oguchi and K. Sato: "Layered architecture of WDM network employing optical paths," *International Conference on Communications (ICC) '96 IEEE Workshop on WDM Network Management and Control* (1996).
 - 8) K. Sato: "Photonic transport network OAM technologies," *IEEE Commun. Mag.*, **34** (1996) 86-94.
 - 9) K. Oguchi, M. Jinno, K. Shimano and K. Noguchi: "Wavelength-related channel administration and wavelength dilation in photonic networks," *Optoelectronics and Communications Conference (OECC) '97* (1997) Paper 10B4-4 to be presented.
 - 10) European Commission, DG XIII: "ACTS 1996 Project summaries," 1996.
 - 11) B. Fabianek, K. Fitchew, S. Myken and A. Houghton: "Optical network research and development in European community programs: From RACE to ACTS," *IEEE Commun. Mag.*, **35** (1997) 50-56.
 - 12) R. F. Leheny: "Advanced optical networks," *21st European Conference on Optical Communication (ECOC) '95* (1995) p. 849.
 - 13) R. S. Vodhanel, *et al.*: "National-scale WDM networking demonstration by the MONET consortium," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97* (1997) PD27-1-PD27-4.
 - 14) M. Koga, A. Watanabe, S. Okamoto, K. Sato, H. Takahashi and M. Okuno: "Optical path cross-connect system demonstrator designed to achieve 320 Gbit/s," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96* (1996) PD ThC.3.1.
 - 15) K. Shimano, K. Oda, A. Umeda, T. Sakamoto, M. Fukutoku, M. Fukui, H. Toba and T. Matsumoto: "Field test results of all-optical WDM ring network employing commercially installed dispersion shifted fiber cables," *First Optoelectronics and Communications Conference (OECC) '96* (1996) PD 1-1.
 - 16) M. Soulliere: "Standards activities for WDM line systems and optical networks," *ICC '97 Third IEEE COMSOC Workshop on WDM Network Management and Control* (1997)
 - 17) "Report of Question 20/15 Experts Group Meeting," ITU-T SG 15 Geneva Meeting (1997) TD 39-E (WP4/15).
 - 18) 岡村治男: "光通信システム/アンプの国際標準化動向", *信学技報*, **9** (1996) 21-27.
 - 19) H. Ono, M. Yamada and Y. Ohishi: "Gain-flattened Er³⁺-doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57 to 1.60 μm wavelength region," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 596-598.
 - 20) M. Jinno, T. Sakamoto, J. Kani, S. Aisawa, K. Oda, M. Fukui, H. Ono and K. Oguchi: "First demonstration of 1580 nm wavelength band WDM transmission for doubling usable bandwidth and suppressing FMW in DSF," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 882-883.

(1997年5月30日受理)