

■5 群(通信・放送) - 3 編(光伝送技術)

---

## 1 章 基幹系光伝送システム

**【本章の構成】**

- 1-1 海底系光伝送システム
- 1-2 陸上系光伝送システム
- 1-3 光伝送規格
- 1-4 基幹系光ネットワークの要素技術

## ■5 群-3 編-1 章

### 1-1 海底系光伝送システム

(執筆著：森田逸郎) [2018 年 10 月 受領]

光海底ケーブルシステムは図 5・1 に示すように、現在では世界中に敷設され、国々を結ぶ社会インフラとして不可欠なものとなっている<sup>1)</sup>。そこで用いられている光ファイバの全長は 100 万 km を超えており、国際間の通信トラフィックのほとんどが光海底ケーブルにより運ばれている。通信トラフィックは継続的に増加しており、光海底ケーブルシステムの役割はますます大きくなると予想される。

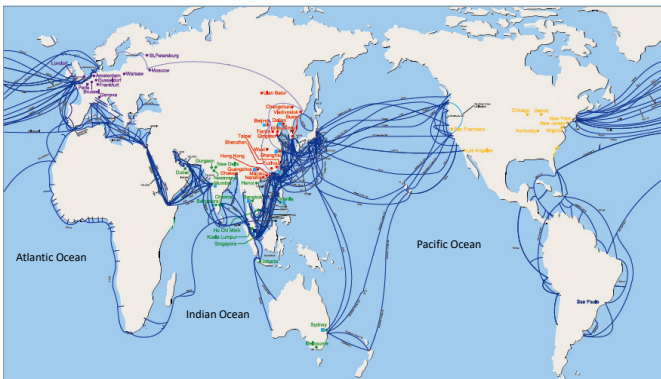


図 5・1 光海底ケーブルシステム

#### 1-1-1 光海底ケーブルシステムの進展

光海底ケーブルシステムは、国際通信需要の高まりを背景に 1990 年代以降急激に成長した。図 5・2 に主要な太平洋横断光海底ケーブルシステムの伝送容量の推移を示す。太平洋横断光海底ケーブルシステムでは、TPC-3 (1989 年サービスイン) で初めて光通信方式が用いられた後、TPC-5CN (1996 年サービスイン) で光増幅技術、China-US ケーブル (1999 年サービスイン) で波長多重 (WDM) 伝送技術が導入された。WDM 伝送技術の導入によって伝送容量の拡大に拍車がかかった。2016 年にサービスインした FASTER<sup>2)</sup> では、デジタルコヒーレント受信技術が導入され、偏波多重した多値変調信号を用いることにより、100 Gbit/s まで高速化された信号を波長多重することにより、ファイバー本当当たりの伝送容量は 10 Tbit/s に達している。

このように最先端の技術を順次導入することにより、太平洋横断光海底ケーブルシステムの伝送容量は、1989 年以降の約 30 年間で 1 万倍以上に拡大されている。表 5・1 に主要な太平洋横断光海底ケーブルシステムで用いられている技術 (変調方式、光ファイバ種別、中継方式) を示す。

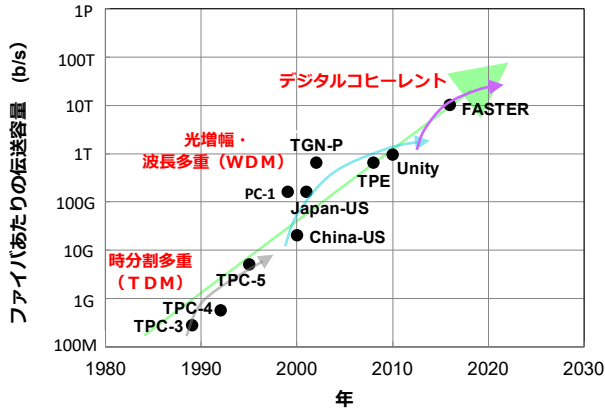


図 5・2 太平洋横断海底ケーブルシステムの発展

表 5・1 主要太平洋横断海底ケーブルシステムの技術概要

ケーブル名称	サービス開始年	設計容量 (bit/s)	変調方式	ファイバ種別	中継方式
TPC-3	1989	280M (280M x 1)	NRZ-OOK	SMF	再生中継
TPC-4	1992	560M (560M x 1)	NRZ-OOK	CSF	再生中継
TPC-5	1996	5G (5G x 1)	NRZ-OOK	DSF	光増幅
China-US	1999	20G (2.5G x 8)	NRZ-OOK	NZDSF	光増幅
PC1	2000	160G (10G x 16)	CRZ-OOK	NZDSF	光増幅
Japan-US	2001	160G (10G x 16)	CRZ-OOK	NZDSF	光増幅
VNSL-P (TGN-P)	2002	960G (10G x 96)	CRZ-OOK	DMF (+D/-D)	光増幅
Unity	2010	960G (10G x 96)	RZ-DPSK	DMF (+D/-D)	光増幅
Faster	2016	10T (100G x 100)	DP-QPSK	+D	光増幅

### 1-1-2 光海底ケーブルシステムの構成

光海底ケーブルシステムは陸上に敷設される端局装置，給電装置と海底に敷設される光ファイバケーブル，中継器で構成される。

端局装置は光信号の送受信やシステム監視などを行う。基本的な光送受信機能は，陸上光

ファイバ伝送システムと同等であるが、光ファイバ線路や中継器の監視機能等は光海底ケーブルシステム特有である。

給電装置は光中継器に電力を供給する。海底に設置される光中継器間を光ケーブル中に設けた給電線を用いて直列接続し、二つの給電装置間に数千ボルト級の高電圧を与えることによって、光中継器に電力を供給する。

光ファイバケーブルは 8~16 ファイバペアを収容する。光ファイバケーブルは、設置される深さによりその構造が異なる。深海用ケーブルは高い水圧に耐える軽量な構造となっており、浅い箇所では用いられるケーブルは船舶活動等によるケーブル切断を防ぐために強度を高めた構造となっている。

光中継器は光ファイバ伝送により減衰した光信号を増幅する。初期の光海底ケーブルシステムでは、伝送された光信号を電気信号に変換し、増幅等を電気回路で行った後、光信号に再変換して次の中継区間に送出する再生中継方式が用いられたが、現在では、光信号を光のまま増幅する光増幅器 (EDFA) が用いられている。光増幅方式の場合、中継器で発生した雑音はシステム全体で累積するため、光増幅器の低雑音化が非常に重要である。

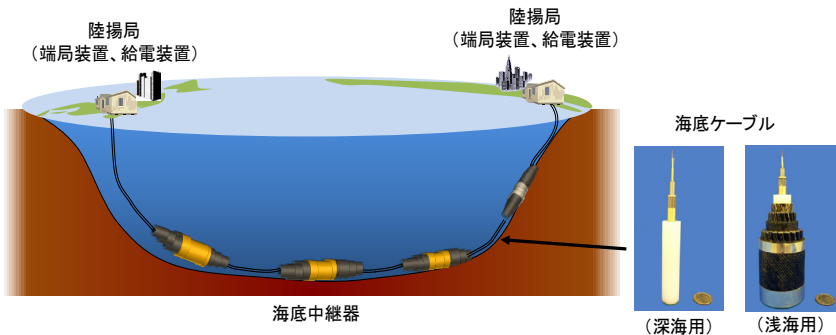


図 5・3 光海底ケーブルシステムの構成

太平洋横断システムのような長距離光海底ケーブルシステムでは、光中継器を用いた光増幅中継伝送方式を用いるが、伝送距離が数 100km 以下の島と島を結ぶような短距離システムでは、光中継器を用いない無中継伝送方式が用いられる。無中継伝送システムでは、海底伝送部分は光ファイバケーブルのみとなり、給電装置や給電線が不要となるため、構成を簡略化できる。

### 1-1-3 陸上システムと比較した海底ケーブルシステムの特徴

光ケーブルや中継器が海底に敷設される海底ケーブルシステムは、その敷設条件の違いにより、陸上基幹系伝送システムと多くの点で異なる。その違いが最も大きくなるのは、日米間を接続するような長距離の大洋横断海底ケーブルシステムであり、システム長は、国内の陸上基幹系システムが 1000 km 以下であるのに対し、日米間を接続する太平洋横断ケーブルシステムでは 10000 km 級に達する。

太平洋横断海底ケーブルシステムの主な特徴は以下である。

- (1) 既存システムをアップグレードする場合を除いて、システムごとに端局、伝送路のすべてを新規に導入・敷設する。その際、国際標準化が完了していない方式も含めて最新技術を導入し、ファイバ容量の最大化が図られる。また、技術面だけでなく、経済性も考慮して、システム設計値は最適化される。そのため、中継間隔は、一般的にはほぼ一定間隔に設定される。
- (2) 敷設等を考慮すると、中継器筐体を過度に大きくすることはできず、スペース的な余裕は小さい。そのため、光中継器は最小限の簡易な構成とすることが求められる。また、中継器への電力供給は、陸上給電装置からの両端（または片端）給電により行われるため、各光中継器の消費電力の最小化も重要である。  
これらの制限もあり、光ケーブル内に収容される光ファイバ芯線数が制限されるため、芯線当りの伝送容量拡大が非常に重要である。
- (3) 海底に敷設される光ケーブルや光中継器が故障した場合、その修理には多大なコストと日数が必要となるため、光ケーブルや中継器には高い信頼性が要求される（25年間の設計寿命において3回以内の修理）。
- (4) 太平洋横断ケーブルシステムでは最大水深が8000 mに達するため、その水深に耐える高耐圧性、高張力性が光ケーブル及び中継器に要求される。

#### ■参考文献

- 1) <https://www.submarinecablemap.com/>
- 2) <http://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2016/06/29/besshi1887.html>

## ■5群-3編-1章

### 1-2 陸上系光伝送システム

(執筆著：松岡伸治) [2010年6月 受領]

通信が光通信と呼ばれるようになり 30 年弱であるが、この間に光通信技術は目覚ましい発展を遂げてきた。陸上系光伝送システムの研究開発は、このような大容量化・長距離化のための光通信技術をもとに進められてきた。図 1・1 は、光伝送技術の指標となる帯域・再生中継間隔の積を実用システムの進展をもとに示したものである。陸上系光伝送システムの大容量化・長距離化は約 25 年で  $10^6$  倍にもなり、これらの光伝送システムにより通信ネットワークに光化を浸透させ、高速データ通信・ブロードバンドインターネット時代への変遷とともに通信インフラの経済化及びブロードバンドサービスへの即応に大きく貢献してきた。

陸上系光伝送システムの研究開発では、どのような技術を用いて大容量化するか、大容量化した光信号を光変復調技術や光増幅技術を用いていかに長距離に光伝送するかの歴史であった<sup>1)</sup>。大容量の信号を長距離伝送するには、信号対雑音比 (S/N : Signal to Noise ratio) 特性改善や分散や非線形劣化などによる波形歪特性改善が重要な課題であり、それらを様々な技術により解決し進展してきた。

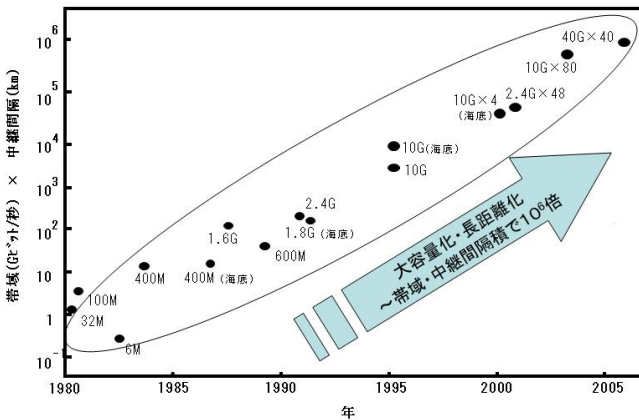


図 1・1 実用光通信システムにおける光伝送技術の進展

#### 1-2-1 ETDM による超高速化光伝送システム

ETDM (Electrical Time Division Multiplexing) 技術により大容量化を実現した初期の時代は、レーザと光ファイバによる伝送技術の革命となった時代である。光ファイバはグレーデッドインデックス形からシングルモード形へ移行し、低損失帯の発見で効率的な伝送の可能性を拡大してきた時代でもある。1981 年に世界初の商用システムである 32Mb/s 方式導入後、100Mb/s 方式、400Mb/s 方式を開発導入した。

光伝送技術としては、S/N 特性改善や分散や非線形劣化等による波形歪特性改善が重要となり、特に、光ファイバ伝搬過程で発生する波長分散による波形歪みは、高速化に伴って厳

しく（伝送距離制限）なるため解決すべき大きな課題であった。400Mb/s 方式の 4 倍の容量を伝送可能な 1.6Gb/s 方式では、長距離伝送のための様々な工夫が施された。高速多重化信号を、DSF(Dispersion Shifted fiber)、DFB-LD(Distributed Feedback Laser Diode)、APD(Avalanche Photo Detector) を用いて強度変調・直接検波 (IM-DD : Intensity Modulation-Direct Detection) することで、光ファイバの低損失領域 (1.55  $\mu\text{m}$  帯) を有効に活用し、群速度分散の影響を抑え高速化・長距離化を実現した。また、発光・受光・周辺回路用の素子、光ファイバ、回路技術など、盛んに技術開拓が行われ、特に、発光素子である半導体レーザは長寿命、高信頼性の実現が商用化のポイントであった。

### 1-2-2 光増幅技術の到来と DWDM 光伝送システム

1.6Gb/s 方式導入後、エルビウムドープファイバ増幅 (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier) 技術の到来により超高速・大容量伝送を経済的に実現する陸上系光伝送システムの開発が進められた。大容量のデータ伝送を行うマルチメディアサービスに対応する目的で 1996 年に実用化された SDH 準拠の 10Gb/s 方式は、端局装置 (送信部・受信部) と中間中継装置に光増幅器による光 Booster/Pre-Amp を実現することで光出力の増大と中継間隔の延長を図り、経済的に超大容量化を実現した。光増幅器を用いて長距離化が可能となるとそれまでの S/N リミットから波長分散リミットが主要な課題となるため、外部変調器の活用により波長分散の影響を低減し長距離化を実現している。

光増幅技術は、長距離伝送だけでなく簡単な構成で複数の超高速信号を一括増幅できる大きなメリットがある。アレイ導波路型回折格子 (AWG : Arrayed Waveguide Grating) による光合分波器や Tunable-LD などの光デバイス技術、更に誤り訂正技術 (FEC : Forward Error Correction) の進展に伴い、複数の波長を一括して多重伝送する波長多重システム (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) が開発され、飛躍的に大容量化・長距離化を実現した。2003 年には EDFA 光増幅技術と分布ラマン光増幅技術とを駆使することで 10Gb/s の 80 チャネル (波) を波長多重する光伝送システムを実用化し光通信基幹網の主要システムとして運用した。

### 1-2-3 SDH 光伝送システム

多重化端局技術については、非同期のスタック多重方式から同期多重である新同期インタフェース (SDH : Synchronous Digital Hierarchy) 方式へと移り変わり、光伝送システムの運用・管理が飛躍的に向上した。同期多重は、データ、映像など多様なサービスのために不可欠である。デジタル多重の階層構成では、日本、北米、欧州で異なる基準があった。このため、ユーザ網間インタフェースとともに伝送路と交換機の間にも世界統一インタフェースを協議し、1988 年に新同期インタフェース SDH が標準化された<sup>2)</sup>。SDH 多重では、バイト構造を有する STM フレーム、仮想コンテナ (VC) による各種高速サービス信号や既存速度信号など多様なデジタル信号の柔軟な収容、ポインタ技術による非同期多重、監視制御用バイトによる保守・運用性の向上、など様々な取組みがなされた。多重技術としては、遅延時間の短縮やメモリ容量の抑制が可能となり世界水準の高速同期多重を実現した。

### 1-2-4 ADM リングシステムと ROADM 光伝送システム

コアネットワーク（全国面）ではポイント・ポイントを経済的にトランスポートする超高速大容量の DWDM 光伝送システムの開発・導入が進む一方、メトロネットワーク（県内面・幹線面）においてはトラフィック需要変動に柔軟に対応でき、かつ障害発生時の信頼性が高いリングシステムの開発・導入が進んだ。1999年にはSDHインタフェースを有する10Gb/s ADM（Add/Drop Multiplexer）リングシステムが導入され、ブロードバンド化に即応可能なネットワーク構造へ改革した。その後、先に述べた波長多重技術が進むと、光レベルでのリングシステムの検討が進み、2004年には最初の光リングシステムが開発・導入された。図1・2は、小型・高信頼・低損失な光スイッチを内蔵し、電気・光変換を行うことなく光信号を波長単位でアドドロップするROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer）リングシステムの概要を示したものである。2007年には一つの波長に10Gb/sの信号を收容し、ROADMリングシステム総伝送容量としてサブテラビット（数百 Gb/s）級、リング長として数百 kmに及ぶリング面が可能となり、NGN（Next Generation Network）基盤網として活躍している。

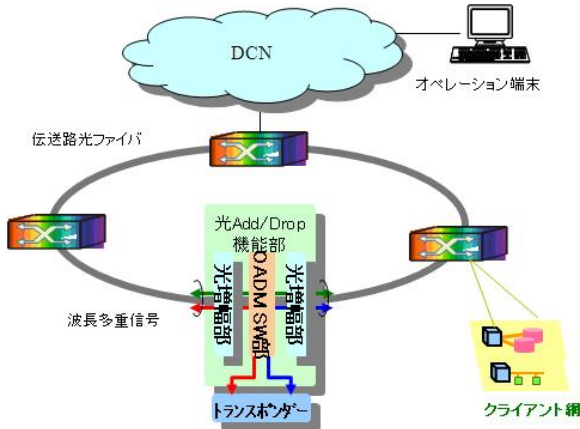


図1・2 ROADM リングシステムの概要

### 1-2-5 OTN 光伝送規格

一方、波長多重システムが普及するにつれ、ブロードバンドサービスを光コアネットワークで効率的に転送する方式として OTN（Optical Transport Network）規格が ITU-T により 2000 年に勧告された<sup>3)</sup>。OTN は、1 対 1（ポイント・ツー・ポイント）の伝送に限られていた波長多重技術を、網での利用に広げることを目的に開発され、電話サービスだけではなく IP やイーサネット系サービスの信号も統一的に扱えるようにした点も、OTN の目的の一つです。また SDH 同様に豊富な管理用信号や誤り訂正符号（FEC：Forward Error Correction）などをもち、ROADM リングシステムをはじめ、将来へ向けた光コアネットワークの基本プラットフォームとなっている。



### 1-2-6 強度変調・直接検波からコヒーレント通信へ

本格的なブロードバンド化を迎え、更なる大容量化を目的に 40Gb/s 信号の 40 チャンネル(波長)を多重する DWDM システムを 2007 年に実用開発した。40Gb/s 光信号伝送実現への最大の課題は偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) の克服である。このため、従来の IM-DD に代わり光の位相情報を利用した DPSK (Differential Phase Shift Keying) や DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) 方式が用いられるようになった。40 Gb/s DWDM システムで採用した DQPSK 方式は、低シンボルレート化による PMD 耐力向上だけでなく高感度化や非線形光学効果である相互位相変調による品質劣化をも低減することが可能である。

さらに現在では、受信側に局発光を備え、信号光と干渉させて位相情報を取出すコヒーレント受信技術が信号処理技術の進展とともに実現可能となりつつあり、コヒーレント通信時代への幕開けが近い。

#### ■参考文献

- 3) K. Hagimoto: "Photonic Challenges and Present Status of Networks in Japan", OFC/NFOEC2008, OWS6 (2008)
- 4) ITU-T 勧告: G. 707, G. 708, G. 709 (1988)
- 5) ITU-T 勧告: G. 709 (2000)

## ■5 群-3 編-1 章

### 1-3 光伝送規格

(執筆者：塩入智美) [2010年6月 受領]

近年、インターネット上で様々なデジタル情報（テキスト情報、静止画像、動画像、テレビジョン放送データ、一般データ）が流通しており、通信ネットワークのさらなる大容量化が進んでいる。通信ネットワークの大容量化・高速化、そしてサービスの多様化に対応するためには、信頼性の高い光通信技術と共通の伝送規格が必須である。ここでは、光ファイバを伝送媒体とする通信方式である

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) と OTN (Optical Transport Network) をとりあげ、その概要を説明する。さらに、通信ネットワークのより柔軟な運用・制御のために検討されている GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) 技術についても概説する。

#### 1-3-1 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

SDH は、ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector) の勧告<sup>り</sup>として 1988 年に制定された。SDH は、光ファイバによる伝送を前提としたデジタル信号の同期多重化方式である。SDH の登場以前は PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) という非同期多重化方式が用いられていたが、国際的な統一化は図られていなかった。今日では、世界統一された相互接続性のある多重化方式として、SDH が全世界の通信インフラで用いられている。

SDH は、ビットレート 155.52Mb/s の STM-1 を基本としており、STM-1 を N 多重した STM-N は 155.52Mb/s の N 倍のビットレートになる。N の値としては、4, 16, 64, 256 が定義されている。STM-N の構造を図 1・3 に示す。

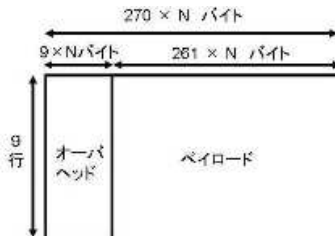


図 1・3 STM-N フレーム構成

SDH が検討されていた 1980 年代後半においては、21 世紀の今日におけるインターネットの爆発的な広がりとは予測されておらず、SDH はむしろ音声（電話）網を最適化することを想定していた。しかし今日では、Ethernet などの IP (Internet Protocol) 通信に広く使われているフォーマットを収容できるように SDH の仕様が拡張され、より効率的かつ柔軟な網運用が可能となっている。これらの拡張仕様には以下のものがある。

- ・ GFP (Generic Framing Procedure, ITU-T G.7041) : Ethernet 収容等に用いるフレーミング
- ・ VCAT (Virtual Concatenation, ITU-T G.707 及び G.783) : 複数パスの逆多重手段

・ LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme, ITU-T G.7042) : VCAT のパス追加削除手順  
 なお, SDH とほぼ同時期に SONET (Synchronous Optical NETwork) が北米標準として定められた. SDH は SONET をベースにして規格を決めたという経緯があり, 厳密には SDH と SONET は細部で異なるが, ほぼ共通と考えてよい.

### 1-3-2 OTN (Optical Transport Network)

OTN は, 波長分割多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 伝送技術の進展を背景に, 光レイヤにおける多重化技術, クロスコネクタ技術の標準化を目指し, 2001 年 ITU-T (International Telecommunication Union—Telecommunication Standardization Sector) により国際標準として勧告化<sup>り</sup>された.

OTN は, OTS/OMS/OCh の三つの光レイヤから構成され, OCh はさらに OTU/ODU/OPU の三つの電気レイヤから構成される (図 1・4). このレイヤ構成により, WDM 伝送における波長 ( $\lambda$ ) の管理とクライアント信号の収容管理を両立させている. また, OTN では FEC (Forward Error Correction) を適用できるようになっており, ビットレートの高速化に伴う信号誤り率特性劣化の補償により長距離伝送を可能としている.

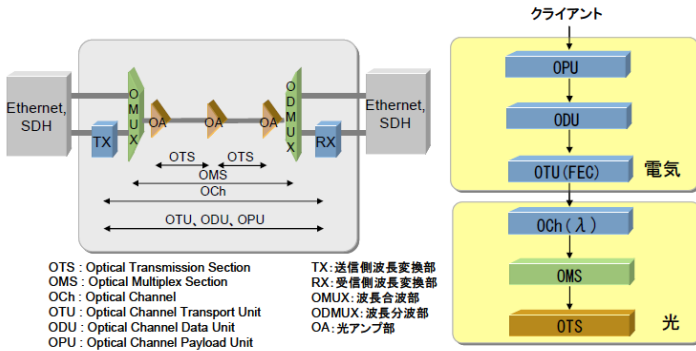


図 1・4 OTN の全体構成

ITU-T 勧告 G.709 の第一版 (2001 年 2 月) では, SDH 信号の伝送を主としてその多重化構造が規定されていたが, 第三版 (2009 年 12 月改訂) では, IEEE 802.3ba に規定される 40G/100G Ethernet や, Fiber Channel などのサーバ間の信号伝送にも柔軟に適用できるよう多重化構造が改訂された (図 1・5). OTN は, これまでは WDM の高機能化に適用されてきたが, 今後はクロスコネクタ機能を背景にネットワーク全体の高機能化を実現していくと考えられる.

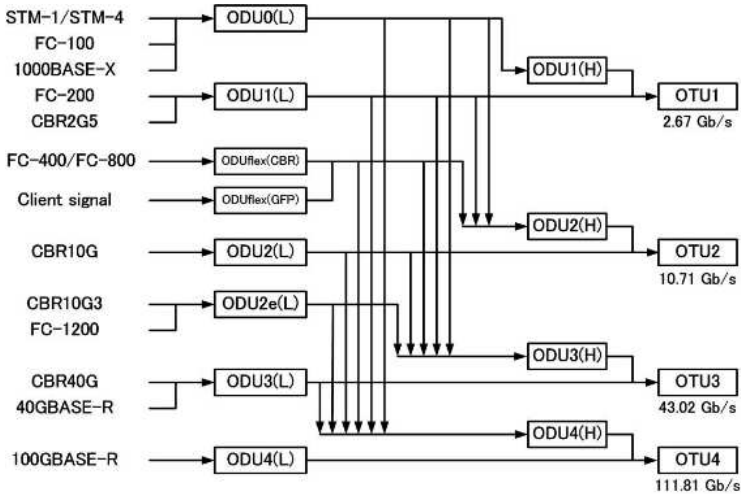


図 1・5 OTN の多重化構造

### 1-3-3 ASON/GMPLS

SONET/SDH や OTN などの光ネットワークを制御する仕組みとして、ASON (Automatic Switched Optical Network) と GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) が規格化されている。ASON は、光ネットワークの制御アーキテクチャ、ドメイン間接続の制御プロトコルの規格であり、ITU-T の勧告<sup>3)</sup>として策定されている。一方、GMPLS は、ドメイン内接続の制御アーキテクチャと制御プロトコルの規格であり IETF (Internet Engineering Task Force) の複数の RFC<sup>3)</sup> (Request for Comments) として策定されている。ASON と GMPLS は、厳密には異なる仕様となっているが、ITU-T と IETF は仕様差異をなくすよう互いに連携しながら規格化を進めており、一般的に ASON/GMPLS と一括りにしたかたちで呼ばれる。

ASON/GMPLS の制御プロトコルは、トポロジ構成の収集と経路決定するルーティング機能、経路に沿って通信帯域を確保するシグナリング機能、通信リンクを管理するリンク管理機能の三つの機能から構成される。これらの機能は、SONET/SDH や OTN といった異なる光ネットワークに共通に適用できるようにプロトコル設計されている。ASON/GMPLS を用いることにより、異なる光ネットワークを共通の概念で制御できるようになるため、通信事業者のネットワーク運用コストを低減することが期待される。また、障害回復機能<sup>5)</sup>による耐障害性の向上や、BoD (Bandwidth on Demand) サービスの提供<sup>6,7)</sup>も ASON/GMPLS の特徴としてあげられる。

#### ■参考文献■

- 1) “Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)”, ITU-T Recommendation (G.707/Y.1332) (Jan. 2007)
- 2) “Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)”, ITU-T Recommendation (G.709/Y.1331) (Dec. 2009)
- 3) “Architecture for the automatically switched optical network (ASON)”, ITU-T Recommendation (G.8080/Y.1304) (March, 2008)

- 4) IETF Common Control and Measurement (ccamp) Working Group, <http://datatracker.ietf.org/wg/ccamp/>
- 5) J. Lang, et. al. "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Recovery Functional Specification", IETF RFC4426, (March 2006).
- 6) S. Liu, et. al. "Deployment of Carrier-Grade Bandwidth-on-Demand Services over Optical Transport Networks: A Verizon Experience", OFC2007 NThC3, (2007)
- 7) S. Urushidani, et. al. "Overview of SINET3 . Next-generation Science Information Network", Progress in Informatics, No.4 pp.51-61, (2007)