

# 高密度波長分割多重通信と要素ガラスデバイス

京都大学総合人間学部

田部 勢津久

## Glass Devices for Dense-Wavelength-Division-Multiplexing Telecommunication

Setsuhisa Tanabe

Faculty of Integrated Human Studies, Kyoto University

### 1. 大容量通信へ向けて

図1は、昨年、郵政省（現総務省）が報告した「21世紀の情報通信ビジョン-IT JAPAN for ALL」の中の資料で、日本の通信トラフィックの推移を1年毎に示したものである。急激に普及している移動音声系と比べても、明らかにデータ通信容量がそれ以上に指数関数的に伸びることが予想されている。IT関連産業が牽引車となって好調を続けていた米国経済のスローダウンが囁かれる昨今でも、この鰻登りのトラフィックは衰えることを知らない。とりもなおさずそれは、あらゆることがインターネット時代にネットワーク経由で行われるようになり、ハード面だけでなく、ソフト面でも機会平等、情報公開の原則が広まり、社会通念の変革も徐々にではあるが、変わりつつあることにも対応している。

通信容量の広帯域化を実現する中核技術は通信方式の多重化であり、それは大きく分けて、時間分割（TDM）、符号分割（CDM）、波長分

割多重（WDM）であり、実際にはこれらの複数の組み合わせが行われる。

TDMで実現する多重チャンネルは、変調レートを増やし、それぞれのチャンネルに時間帯を振り当てることにより一つのファイバに伝送できるチャンネルを増やす。しかしながら、システムのビットレートを増やすことは通信リンクの送受信端において、高速な電気回路を必要とするだけでなく、長距離伝送においては、単色分散や偏波モード分散が超短光パルスの広がりを起こし、信号品質に影響を与えてしまう。それに対して、WDMは、1本の光ファイバに複数の波長を使うことによって、通信容量を増やすという、光の並列性を利用した方式であり、様々な理由で魅力ある方法である。もしシステムがTDMだけで通信容量を増やそうとすると、高速で高価な発信器、受信機で置き換えねばならないのに対し、WDMでは、光ファイバの両端にNケの送受信機を加えるだけで、通信システムのバンド幅をN倍にできる。1チャンネルの伝送速度が10 Gbit/sで、100波多重すれば、1 Tbit/sの伝送容量となる。複数の波長……可視域でいえば、虹に相当する。WDMは光ファイバの中の近赤外光の虹である。

〒606-8316 京都府京都市左京区吉田二本松町  
京都大学 総合人間学部自然環境学科  
TEL 075-753-6832  
FAX 075-752-0703  
E-mail: tanabe@chem.h.kyoto-u.ac.jp

## 日本の通信トラフィックの推移

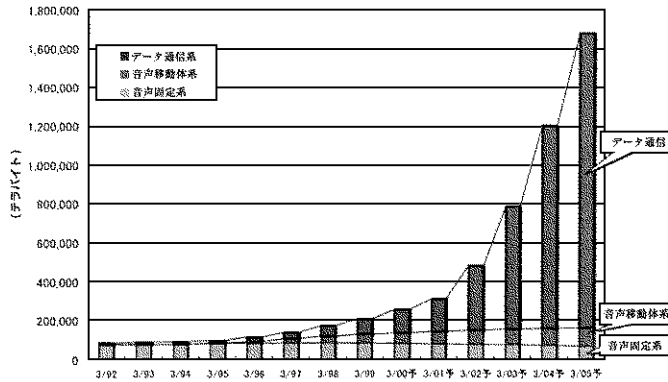


図1 日本の通信トラフィックの推移 (メリルリンチ日本証券より)

## 2. WDM システムの特徴

複数チャンネルを使うことのメリットはそれに留まらない。図2に WDM システムの機能と必要デバイスを示す。

光ネットワークの構築において、波長選択可能スイッチで、各波長は個々のネットワークを通るルートが決められる。LAN などにおいては、信号の分配や選択に波長弁別機能を利用することもできるし、中継基地に於ける、分岐挿入も波長区別により可能となる。また、波長変換器を備えれば、再構築可能なネットワークにもなる。これは、ネットワークの回復とリダンダンシーのためでもあり、光ファイバの断線のような事故に際してルート選択を判断する、全体として自己修復可能なフレキシブルなネットワークシステムにもつながる。

このようなシステムを構成するデバイスはそれぞれ、高い光制御能が要求されるわけだが、何よりも多波長一括増幅可能な、光ファイバ増幅器、なかでも EDFA の登場と進歩が WDM の進展に大きく貢献している。昔の再生中継の場合は分岐した光を多重チャンネル数だけの光受信回路と LD を含む送信回路を用意して、合波するという、煩雑さが問題であった。これに

比べて、光ファイバ増幅器は多波長一括増幅ができるため、前述の様な複雑な電気回路、光回路が不要になり、経済効果の観点からも優れている。WDM が特に北米でブレイクした理由の一つは、既設ファイバの分散波長が、 $1.3 \mu\text{m}$  であったため、EDFA の波長域である  $1.55 \mu\text{m}$  では、 $10 \text{ Gbit/s}$  をそのまま通すことが困難になり、 $2.5 \text{ Gbit/s} \times n$  波の WDM を導入しようとする機運が盛り上がったことも大きい。

WDM においてチャンネル数を増やす方法はおおざっぱにいうと2つある。一つはチャンネル間の波長間隔を狭く、高密度 (DENSE) 化することであり、もう一つは文字通り、波長帯域を広げることである。前者の方法ではしかしながら、チャンネル間隔と1波あたりの伝送速度の間にトレードオフの関係があり、限界がある。すなわち、短パルスである光信号を高速変調するとその変調速度に比例して、波長スペクトルが広がる。例えば  $10 \text{ Gbit/s}$  で変調すれば、光周波数で  $10 \text{ GHz}$  の広がりが生じる。この広がりが、隣接する波長の光信号と重なると、干渉を起し、受信側で正確に読みとれなくなる。従って高速変調を施行する際には、予め波長の広がりを考慮に入れて、波長間隔にゆとりを持たせて置かねばならない。

**Relation between Functions and Devices required for Optically Multiplexed Telecommunication System**

Function	Construction	Applic. examp.	Key Device			
			Amp.	Coupl.	tunable LD	$\lambda$ cov.
Simple Multiplex		HCT Subscr. Access	○	○	△	
Distribut. Selection		Image Distribut. LAN	○	○		
Branching Insertion		HCT LAN	○	○	○	△
Exchange Connect		Cross Connect Exchanger	○	○	○	○

HCT: High Capacity Telecommunication  
LAN: Local Area Network

Optical Amplifier  
Optical Coupler  
tunable LD  
 $\lambda$  Converter

図 2 WDM システムの機能と要素デバイス

EDFA の利用が可能な現行の C-バンドと L-バンドの帯域で、これにより試算される可能なチャンネル数は、10 Gbit/s の信号では 320 波、40 Gbit/s では 80 波が限界ということになる。これが、一本の光ファイバの伝送容量は 3.2 Tbit/s とされていた理由である。

これを打ち破るために必要なブレイクスルーとして考えられるのは、偏波多重の併用による、スペクトル利用効率の向上がある。2 番目は S-band (1.45–1.52  $\mu\text{m}$ ) の利用などによる波長域のさらなる広帯域化である。もう一つはスペクトル広がりがない、新たな変調方式の考案であるが、現在のところ目処が立たない。したがって、波長多重を考慮した通信透過窓のスペクトル利用効率を生かす一例としては、各チャンネルは 100 GHz の周波数間隔で、変調速度としては、40 Gb/s が当面の目標であろう。同速度の送受信デバイスの開発と実験室レベルの 100 km を越える長距離通信実証も報告されているが、当面の主流としては、1 チャンネル 10 Gb/s が実装技術と考えられている。

### 3. 要素ガラスデバイス

DWDM システムで重要な要素ガラスデバイスを順不同で列挙紹介させていただく。

#### 3. a. DWDM 用光ファイバ

長距離伝送システムにおいては、従来の伝送方式に比べて、入力信号レベルが高い、伝送距離が長い、等の要因により、光ファイバ中の非線形光学 (NLO) 効果や波長分散特性の影響が無視できない。更に多チャンネルとなると、信号チャンネル間の非線形相互作用や、チャンネル毎の波長分散のずれも重要となり、究極的な伝送容量の増大を目指すために、伝送媒体の光ファイバ自体にも、WDM に適した特性設計が進んでいる。代表的な NLO 効果としては 4 波混合と相互位相変調であり、信号品質劣化の原因となる。ガラスの非線形屈折率はガラス組成に依存する材料物性であるが、この NLO 効果を低減するために、ファイバコアの実効断面積を広げる試みがなされ、Corning 社の

LEAF ファイバなどが北米の WDM システムにおいて、既に大きな市場を形成している。

**3. b. ノンゼロ分散シフトファイバ (NZ-DSF)**  
 通常のシングルモードファイバに対して、分散シフトファイバ (DSF) は 1.55  $\mu\text{m}$  帯での光伝送用に特化したものであるが、WDM 伝送を行う際には、その波長帯域での波長分散が小さいために、各チャンネルの群速度が等しくなり、却って非線形光学効果の影響を受けやすい。そこで、DSF のゼロ分散波長をあえて信号光波長域の外にずらした NZ-DSF が開発された。NZ-DSF は、4 波混合を抑制する効果を示すが、実効コア径を増すことにより、更に非線形性を低減する工夫もなされている。この場合、特に 1.6  $\mu\text{m}$  以上の長波長域において、従来の光ファイバと同等の曲げ損失を維持するための、屈折率構造の提案がなされており、伝送損失、分散スロープ、接続損失なども含めた検討が課題である。また、NZ-DSF は信号波長域では有限の波長分散を有しているため、長距離高速伝送においては、システム全域にわたって蓄積された波長分散が問題となる。このため、逆符号の分散を有するファイバを組み合わせる、分散補償ファイバ (DCF) で補償するなどの手段がとられている。分散マネジメントにとって重要な DCF についても、分けて解説すべきであるが、ページの制限のため他の解説に譲りたい。

### 3. c. プレーナ光波回路

WDM システムには異なる波長の光信号を分波、合波する光合分波回路が必要であるが、現在石英系プレーナ光回路 (PLC) が安定性や量産性で優れている。作成法は火炎堆積法 (FHD) と反応性イオンエッチング (RIE) との組み合わせにより精密な回路パターンを形成する。1.3  $\mu\text{m}$ /1.55  $\mu\text{m}$  の波長を用いる WDM システムは FTTH 等の光加入者用システムとして開発されており、小型化が図れるフィルタ

反射型光合分波回路が代表である。1.3  $\mu\text{m}$  反射 1.55  $\mu\text{m}$  透過の誘電体多層膜フィルタを PLC 上に形成された溝に挿入して合分波回路を構成している。アレイ型導波路格子型 (AWG) 分波回路は、128 波の合分波が完成しており、0.2 nm (25 GHz) の波長間隔が実現できる。しかし、石英系 PLC による AWG でも、 $\text{SiO}_2$  の屈折率の温度依存性により、透過波長が温度によって変化してしまう。これを解消するために、逆符号の屈折率温度係数を有するポリマーを用いて回路全体の温度依存特性を解消した、アサーマル AWG も報告されており、安定した DWDM システムへの応用が期待される。

### 3. d. ファイバグレーティング (FG)

FG は紫外線を用いて光ファイバのコア中に周期的な屈折率変化を形成することで、特定の波長を選択的に阻止、あるいは反射させることができるファイバ型デバイスである。屈折率変化の原理は Ge-ドーピング  $\text{SiO}_2$  の 240 nm 光誘起欠陥生成構造変化である。波長選択性は誘電体多層膜フィルタと同じであり、最も古い「フォトリソニックバンドギャップ」材料である。波長選択フィルタとしては阻止波長域での損失は 40 dB 以上、反射特性においては、-30 dB 以下の特性が得られている。反射透過スペクトルにおいても阻止域から透過域への変化も急峻であり、変化率は 100 dB/nm 以上の高い波長選択性が得られている。FG の問題点として中心波長の温度依存性が挙げられるが、ファイバにかかる張力の温度依存性を利用して、材料温度係数を補償するなどの方法が採用されている。また、ホウ素 B をコアにドーピングすることにより、Ge-シリカの中心波長シフトの温度係数を低減することにも成功している。

### 3. e. 利得平坦化フィルタ

光増幅器を WDM に適用する際には増幅度の違いにより、チャンネル間の信号強度

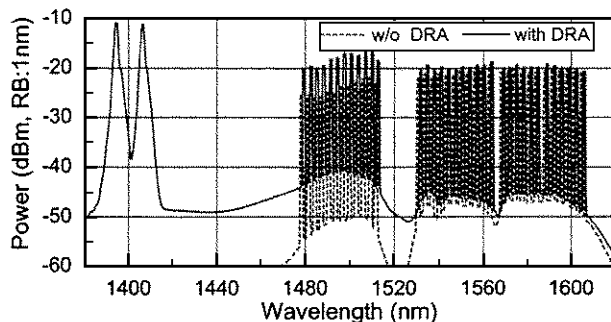


図3 NECによるS+C+Lバンド10テラビット伝送スペクトル(OAA'01より)  
(DRA:分布型Raman増幅)

が異なると、多段階増幅後には、その利得偏差が増幅されるため、クロストークや非線形光学効果、検出器限界などの制限を受ける。C-bandにおけるEDFAは、利得スペクトルが、 $Er:4I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$  遷移のスペクトル形状を反映して、フラットではない。利得平坦化フィルタは、損失スペクトルを光増幅器のものに対応させることにより、利得の平坦化を実現させるもので、大部分のものは長周期型ファイバグレーティングの1種である。

一方L-band EDFAでは、元々平坦な利得スペクトルを有するため、フィルタなしでも50 nmの帯域にわたり1 dB以下の平坦性を有している。こうして、C+LバンドではEDFAはDWDMに適した光増幅器として完成した。

#### 4. ストレージャ会議に参加して

2001年7月、イタリア北部のストレージャという湖畔の町で、21世紀を迎えての初めての「光増幅器とその応用」国際会議が、「ガラス導波路におけるブラッググレーティング、感光性とポーリング」会議とのジョイントで開催され、筆者も参加する機会を得た。両者とも年々参加者数が伸びて、その会議の熱気はまさに「産業革命」に相応しい、ビジネスの嵐の時代の到来、ブロードバンド技術の未来を反映している。両テーマ共に、DWDM通信技術の中核

を支えるデバイスであり、今年ジョイントで開催されたのも偶然ではないだろう。ただし、時期がピッタリICG(於スコットランド)とも重なってしまったことは残念であるが。本会議で最も印象に残った、NECの招待講演論文を紹介する。

Tmドープファイバアンプは、通常1.45~1.49  $\mu\text{m}$  (S<sup>+</sup>-band) に利得を持つが、現時点ではC-band EDFAの利得帯域の短波長側(1490~1520 nm)を有効利用していない。この波長域は通信用ファイバがより低損失であり、最も身近な未使用波長資源である。近年、NECの笠松氏らは、2波長励起の方式を採用することにより、 $Tm:3H_1 \rightarrow 3F_4$  遷移の反転分布係数を低減する事により、利得の長波長シフト(Gain Shift, GS)に成功した。主励起光源として、1.4  $\mu\text{m}$  のLDを、補助励起光源として、1.56  $\mu\text{m}$  のLDを用いている。これにより、利得帯域が、1.47~1.51  $\mu\text{m}$  にシフトさせることに成功した。本会議初日の同社の小野氏による招待講演では、これまでの1チャンネル40 Gb/s、C+L-bandの2バンド利用による、6.4 Tbit/s通信システムに、S-bandを含めることで、世界初の10 Tb/s DWDM通信に成功した(図3)。誘導Raman散乱による利得不均等化を防ぐために分布型Ramanアンプの補助光源を用いているが、このブレークスルーの主役は同社のGS-TDFAであり、これにより、

波長域は 100 nm を越え、完全な S/C/L バンド DWDM が完成したことになる。

同社の用いているのは ZBLAN 系 TDF であり、Tm イオンの発光幅は他のガラス系に比べて狭い。私見では、今後より長波長側に帯域を有する酸化物 TDF の開発により、現在の GS-TDFA と C-EDFA のギャップを埋めきることが波長資源の有効利用のための重要課題である。Tm<sup>3+</sup> イオンの 1.5  $\mu\text{m}$  遷移は多くの酸化物ガラス中でも高い量子効率を有するので、1.3  $\mu\text{m}$  帯 PDFA のように低フォノンエネルギー非酸化物ファイバを利用する必要は全くないのである。材料メーカーを始め関係者の奮起を期待したい。

## 5. 終わりに

現在、スーパー DWDM (Dense-WDM) の研究開発の緊急性が叫ばれている。2000 年 7 月に発表された「フォトニックネットワークの研究開発の在り方に関する調査研究会」報告書によると、2005 年 (あと 4 年!!) には、1000 波、2010 年には 3000 波多重が必要であり、そのためには、1  $\mu\text{m}$ -1.65  $\mu\text{m}$  の広帯域をカバーできる新しい通信用ファイバの開発、超広帯域な光増幅器、超高速変調方式、光レイヤでのネットワーク管理技術の緊急開発が指摘されている。

材料側の課題としては、特に前者 2 点が当てはまり、その実現のためには、ファイバの波長分散制御、特に長短波長域での低損失化や 4 波混合などの非線形性の抑制などを踏まえた、設計が重要であろう。他の要素デバイスとしては、狭帯域フィルタや、隣接信号光を分岐する

「スーパープリズム」の開発もフォトニック結晶の技術を生かして行っていく必要があるといえる。

大容量化の一途をたどる光伝送システムであるが、光ファイバの潜在波長帯域である 1-1.65  $\mu\text{m}$  は、100 THz に相当するため、現在最高の 10 Tb/s 伝送も、波長資源の 10% を利用しているに過ぎない。多波長一括増幅が可能な EDFA の実用化がスタートして、10 年になろうとしているが、まさに WDM のためにある、光増幅器の更なる広帯域化、低雑音化、ダイナミックな利得平坦化、高出力化と、伝送用ファイバなどにおける分散マネージメント、非線形性抑制などの要求はますます厳しくなると思われる。ガラス研究者の課題は尽きない。

日に当たると 7 色に染まるペールをまとい、背に翼を持つ……。ギリシャ神話に登場する虹の女神「イリス」は天と地、さらには神々と人との絆を象徴しているという。光ファイバ網を駆けめぐる近赤外の虹を司る、DWDM システムが早く花開き、今世紀のすばらしい高度情報化社会実現への架け橋となることを願っている。

## 参考文献

- 1) 「光通信技術の最新資料集 N」オプトロニクス社 (1999)。
- 2) Technical Digest, "Optical Amplifiers and Their Applications" (2001), OSA (Washington, DC)。
- 3) 田部勢津久, 「テレコムフロンティア」25 (1999) 26。
- 4) 田部勢津久, Materials Integration 13[9], (2000) 39。