



# 光交換の研究動向

解説

行松健一

行松健一：正員 NTT 交換システム研究所

Photonic Switching—Present and Future—. By Ken-ichi YUKIMATSU, Member (NTT Communication Switching Laboratories, Musahino-shi, 180 Japan).

## あぶすとらくと

21世紀の広帯域 ISDN を実現するためには、現在の千倍以上の情報量を扱える交換システムが必要になるだろうといわれている。それを電子技術だけで実現するのはとうてい不可能であり、光交換に対する期待が次第に高まりつつある。光機能デバイスの研究もこのところ進展が目覚ましく、システム・デバイス両分野で光交換の研究が盛んになってきた。本稿は、本格化し始めた光交換の研究について、システムサイドからその動向を紹介する。幅広い分野の研究者に光交換に対する興味を持って頂くと共に、デバイス研究者にシステムを理解して頂くことを主なねらいとした。

キーワード：光交換，光スイッチ，光 ATM 交換，周波数分割形光交換，フリースペース光交換，広帯域 ISDN

### 1. はじめに

光交換というはまだ遠い先のこと、少数の研究者が可能性を追求しているマイナな研究分野、と考えている人も多いのではなかろうか。確かに光交換のシステムサイドの研究人口は、現在でも国の内外を合せてたかだか 100 人程度である。しかし、こうした光交換に対する認識は、最近少しずつ変わろうとしているように見える<sup>(1)</sup>。

一つには、広帯域 ISDN (B-ISDN) の研究開発が本格化し、目標とするネットワークのイメージが次第に明らかになってくるにつれて、FTTH (Fiber-to-the-Home)<sup>(2)</sup> 完成期には現在の千倍以上の情報量を扱う交換システムが必要になるだろうとの見方が出てきたことである<sup>(3),(4)</sup>。これまで交換システムの高度な発達を支えてきた電子技術は次第に究極に近づきつつあり、交換機のスループットを更に3けたも上げるとなると、相当革新的なブレイクスルーが必要になる。その期待が光交換に向けられようとしている。

もう一つは、光交換に必要なデバイスがようやく電子デバイスと比較できるレベルになってきたことである。これまででは、何とか光の on/off や切換えができるというものがほとんどで、実用にはほど遠い状態であった。まだ光 IC とはいかないが、初期のトランジスタ程度のものでできるようになってきた。

こうしたことから、研究者自身の意識も大き

### 用語解説

**マハツェンダ干渉計** 光を2本の導波路に分岐し、再び合流する形の光回路。片方の導波路の屈折率を変えることで等価的に2本の導波路の光に位相差を生じさせ、その干渉の仕方によってスイッチング機能を実現できる。

**フォトンエコーメモリ** 光情報を媒体の原子の励起状態に対応させて記憶する現象を利用したメモリ。光の時系列信号をコヒーレントに記憶し、読み出すことができる。

く前進し、システム研究者とデバイス研究者の連携がこのところ急速に強まってきている。1990年4月に神戸で開催された第3回光スイッチング国際会議 (PS '90) では、世界各国からシステム・デバイス両分野の研究者 350 名が集まり、発表件数、参加者数、発表内容いずれをとっても光交換研究にとってエポックメイキングな会議となった<sup>6)</sup>。本学会では、「光スイッチング技術時限研究専門委員会」が主催する「光スイッチング技術研究会」が3か月に1回の割で開催されており、毎回、システム・デバイス両分野から 100 名以上の参加者を得て、熱心な議論が行われている。また、デバイス関係、通信関係の国際会議でも、最近はたいてい“Photonic Switching”のセッションが設けられるようになった。

このように、本格化し始めた光交換の研究について、システムサイドからその動向を紹介しようというのが、本稿の目的である。光交換とは何かをできるだけ多くの読者に理解して頂くために、研究のポイントと考えられる事項について、システム研究者の立場から私見を交えて述べていくことにする。途中いくつかの具体的な研究を引用しながら説明を進めるが、個々の研究成果の詳細については、最後に挙げた文献に直接あたって頂きたい。

## 2. 光技術と交換システム

元来、光信号は外部からの影響を受けにくく、またキャパシタンス (C) に相当するものがないため、もとの波形をできるだけひずみなく長距離にわたって伝送する場合などには非常に優れた媒体となる。また、その性質をうまく利用すれば、電子デバイスよりも優れた特性 (特に広帯域性) を持つ機能デバイスを作れる可能性がある。電子デバイスでは、信号の相互干渉やキャパシタンスの影響で 1 Gbit/s 以上の信号を通すマトリックススイッチを作るのは困難といわれているが、光スイッチの場合はそれ自体の特性だけ考える限り、数十 Tbit/s の信号でもスイッチング可能である。また、相互干渉が

ないため、多数の信号を高密度に集めて扱うことができるという特徴がある。

しかし、一方で光の持つ性質がかえってマイナスに働くこともある。電子回路のように信号にさまざまな制御を加えようとしても、光の場合はそれほど簡単にはいかない。光メモリや光論理回路がなかなか実現できない所以である。ところが、交換システムは VLSI 技術の進歩に支えられて、ますます高機能化しており、信号の行き先を切り換える空間スイッチと大容量のメモリや複雑な論理回路の組合せでその機能を実現している。従って、いかに高性能な光スイッチが開発されても、それだけではただちに交換機の性能が向上するとは限らない。これまでも、単体としては電子スイッチより優れた特性の光スイッチが作られながら、なかなかシステムの実用化に結びつかないのは、こうしたことも理由の一つになっている。

光交換には後で述べるようにさまざまな方式が考えられるが、まずは、高速性、広帯域性に優れた光スイッチ (空間スイッチ) と、メモリや複雑な論理を実現する電子回路とを組み合わせた形で実用化を考えるのが現実的であろう。むしろ、研究としては光メモリや光論理回路、光周波数交換といった将来の可能性に果敢に挑戦していかなければならないが、今後は近い将来 (21 世紀初頭前後) と更にその先を目指した二つの研究の流れが少しずつ明確になってくるように思われる。

## 3. B-ISDN と光交換

ここで、B-ISDN に必要な交換機の規模について、もう少し具体的に検討してみたい。B-ISDN はその名のとおりに、動画像を含めたさまざまなメディアを介して自由に通信ができることを目指している。当面はビジネスユーザを中心に普及していくと考えられるが、将来は電話網のような狭義の通信メディアとしての性格をはるかに越える情報伝達メディアとして、全家庭に普及していくと予想される。そのためには、現在既に 5,000 万を越えるエンドユーザに 100

Mbit/s以上の帯域を持つインタフェースを提供する必要があり、単純に考えてもネットワークが扱うべき情報量は、現在の千倍から1万倍になる。ここで、1通信当りの情報転送速度を100 Mbit/sとし、端末当りの通信量を0.1アーラン（現在の電話が0.02アーラン程度、マルチメディア化によって通信量が5倍になると仮定した）とすると、1万加入の交換機でも100 Gbit/sのスループットを必要とすることになる。これは、ほぼ電子スイッチによって実現できる限界と考えられる。最大1万加入の交換機では加入者交換機だけでも5,000台以上必要となる上、中継交換機を考えると更に1けた以上のスループットを持つ交換機が必要であろう。通信網の構造を今までと根本的に変えない限り（例えば、超分散交換ネットワーク）、B-ISDNでは数Tbit/sから数十Tbit/sの交換機が必要ということになる。

光スイッチのスイッチング（バスの切換え）速度は電子スイッチと大差なく、1 ns前後（将来、カー効果などを利用した光制御の光スイッチが実用になれば、数psのスイッチングも可能）であるが、光スイッチは電子スイッチの数百倍から千倍程度の広帯域信号を通すことができるため、空間スイッチとしてのスループットはそれだけ向上する。また、広帯域の情報を扱う交換機の規模を拡大するためには、交換機内部のボード間や装置間でも光ファイバで信号転送を行う必要がでてくる。光スイッチを用いることで光・電気変換が不要となり、その分装置規模やコストを削減できるほか、変換に伴う品質の劣化が防げるという利点がある。

既に述べたように、光スイッチのスループットがただちに交換機全体のスループット向上に結びつくとは限らないが、スイッチのアーキテクチャや回路構成、実装法などを工夫することによって、光・電子融合形交換機が電子交換機の限界を打ち破ることは可能と考えられる。

#### 4. 光交換方式と研究の動向

以下、具体的な光交換方式について、その特

徴と研究動向、今後の課題を中心に、光デバイスの動向を踏まえながら紹介していきたい。

##### 4.1 空間分割形光交換

空間分割形は、空間スイッチだけで交換するもので、クロスバ交換機などと同じ方式である。光交換の場合は、光ファイバや光ビームの単位でスイッチングすることになる。多くの場合、スイッチング時間はmsのオーダーでよく、スイッチとしてのメカニズムも簡単なため、既にさまざまな光学材料を使ったスイッチが試作されている<sup>(6)-(9)</sup>。また、交換機としても構造が比較的単純で、空間スイッチの部分と信号処理や呼制御などの独立性が高いため、従来の電子交換機の空間スイッチの部分だけを光スイッチに置き換えた形の実験システムが数多く試作されている。

なかでも最も多いのが $8 \times 8$ 程度のLN ( $\text{LiNbO}_3$ ) スwitchを使ったもので、スイッチを2段ないし3段構成にした数十端子規模のシステムが既に試作されている<sup>(10)</sup>。更にこれと光アンプを組み合わせてスイッチの損失を補償する方式が提案され、その有効性が報告されている<sup>(11)</sup>。LNは低損失（偏波無依存の $8 \times 8$ スイッチで7~8 dB程度）でスイッチング時間もnsオーダーが達成されており、比較的小規模なスイッチであれば、特性的には十分実用になるものである。

スイッチング時間は1.5 ms程度であるが、LNに比べて更に安定性、信頼性に優れたスイッチとして、石英導波路形TO (Thermo-optic) スwitchがある。シリコン基板上に石英導波路を形成し、マッハツェンダ干渉計<sup>(12)</sup>の状態を熱によって変化させるもので、①導波路がファイバと同じ組成であるためファイバとの接続損が小さい、②LNよりコアとクラッドの屈折率差が大きく、かつ境界の屈折率変化を急しゅんにできるため、数mmの半径で導波路を曲げられるなどの特徴がある。図1は、 $8 \times 8$  スwitchを用いた8端子の交換機の試作例である<sup>(12)</sup>。

長期間の使用に耐える信頼性・安定性の検証、製造技術の確立などいくつかの残された課

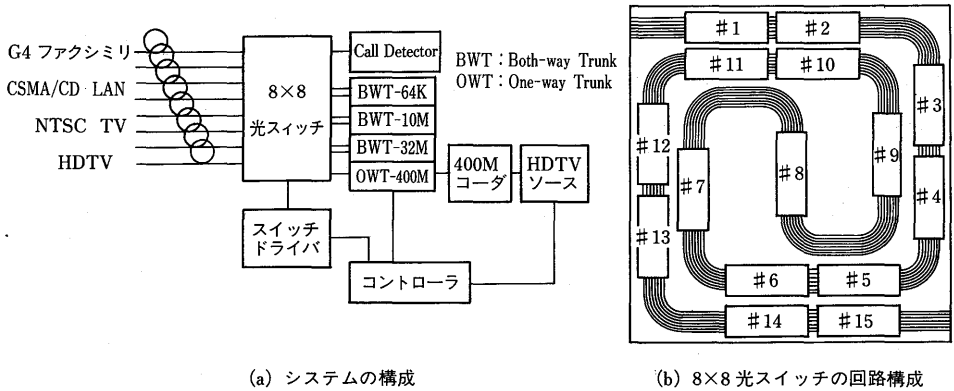


図1 石英導波路形 TO 光スイッチを用いた空間分割光交換システム 8 回線のマルチメディア交換システムであり、64 k bit/s (G4 ファクス) から 400 Mbit/s (HDTV) までの端末を同一の光スイッチに収容している。

題はあるが、LN や石英スイッチを使った数十端子規模のシステムは、比較的早い時期（10 年以内）に実用化されるだろう。

用途として考えられるのは、まず、加入者線、中継伝送路、LAN などにおける光ファイバ伝送路の切換え（クロスコネク）である。また、高速大容量電子交換機や大規模分散コンピュータシステムのモジュール（装置）間接続切換えスイッチとしての用途も考えられる。但し、数 Gbit/s 以上の速度の情報が流れているパスを擾乱を与えずに切り換えるのは、LN などの高速スイッチを用いても難しい。そのほか、数百 Mbit/s の超広帯域情報（例えば帯域圧縮を施さない高精細動画像）を交換する専用交換機（もちろんそれ以下の帯域の情報も通せるため、広帯域情報パイプを用いたマルチメディア通信も可能）などへの適用も考えられる。

#### 4.2 時分割形光交換

時間的に多重された情報をそれぞれ独立に交換する時分割形交換には、STM（回線交換）と ATM の 2 方式がある。前者の場合は時間変換のために、後者の場合はセルの衝突回避用バッファとして、メモリが不可欠である。光メモリ（特に RAM）の実現の見通しは今のところ立っていないが、時分割形光交換の研究自体は盛んに行われており、さまざまな方式の提案や試作結果が報告されている<sup>(13),(14)</sup>。特に、最近発表されるものは ATM 方式が多い。ATM

方式は B-ISDN のベースとなるものでそれとの親和性が高いことも理由の一つには違いないが、技術的に見ても、以下に述べるような点から、ATM 方式の方が光スイッチの特徴を生かしやすいと考えられる。

(1) STM の場合、任意のタイムスロット間の入換えを行う時間スイッチは、電子的な RAM を使わざるをえないが、光ファイバ上を運ばれるビット列の速度に比例して高速の動作が要求されるため、メモリのアクセス速度がボトルネックになる。ATM ではセル単位に一定時間の遅延を与えられることができればよく、例えば光ファイバ遅延線で実現することも可能である。光パルス列を一定時間蓄積可能なフォトンエコーメモリ<sup>15)</sup>などが使える可能性もある<sup>(15)</sup>。

(2) 時分割交換では多重された情報の行き先を高速で振り分ける空間スイッチが必要であるが、LN 等の高速デバイスを使ったとしても数 Gbit/s 以上のパルス列に擾乱を与えずにスイッチングするのは難しい。従って、スイッチング時間に相当するガードタイムを設けることになるが、STM の場合、通常は 1 バイト単位で多重化するため、カードタイムを設けることによるオーバーヘッドが大きく、実質的な転送速度が低下してしまう。一方、ATM の場合は 53 バイト単位でスイッチングすればよいので、相対的にオーバーヘッドは小さく抑えることができ

る。STMでも多重化する単位を大きくすればよいように思われるが、多重化単位の大きさに比例して(1)に述べた所要メモリ量が大きくなるという問題がある。

(3) 比較的論理の簡単なSTMの場合でも空間スイッチやメモリのアドレスを指示する回路などを光回路で実現するのは当分困難で、しよせんこれらは電子的に実現せざるをえない。ATMの場合も、ヘッダ部(5バイト)と情報部(48バイト)をスイッチの入口で分け、ヘッダの処理は電子回路で、その結果に基づいた情報部のルート選択は光回路で行うようにすれば、光スイッチの特性を生かした高スループットのATMスイッチが可能である。

光ATMに関する研究は、現在のところ、基本的なスイッチ構成法の提案や部分的な回路実験レベルのものが多いが、ATM交換方式そのものの研究の進ちょくとも相まって、光スイッチを前提にした新たなアーキテクチャや回路構成法の提案もいくつか見られるようになってきた<sup>(16)~(18)</sup>。今後、光スイッチの広帯域性を有効に利用し、電子回路との連携動作を図ればスループット1~10Tbit/s程度の光ATM交換機が実現する可能性はあるだろう。

システムの試作例としては、高速の半導体光スイッチ(4×4マトリックス)を用いた光ATM交換機などが報告されている<sup>(19)</sup>。また、セルの優先制御<sup>(20)</sup>やアドレスの判定<sup>(21)</sup>(図2)

といったATMに不可欠の論理演算を、光回路で実現しようという試みもいくつか報告されている。

### 4.3 周波数分割形光交換

光技術を用いることによって飛躍的に交換機のスループットを向上できる可能性を持っているのが、周波数分割形光交換である。周波数の異なる光を1本のファイバに多重することで、数百Gbit/sの情報運ぶことのできる光伝送方式が研究されている。そこで、任意の周波数間の変換や特定の周波数の選択が自由に行えれば、周波数分割多重交換が実現できる。但し、それぞれ周波数の異なる信号を特定の方路へスイッチングするためには、周波数選択性のある空間スイッチが必要になる。空間スイッチと周波数スイッチを組み合わせれば、数十Tbit/s以上のスループットをもつ交換機も夢ではない。更に時分割多重交換と組み合わせれば、チャンネル数を大幅に増やすことができるが、そのためには変換周波数や選択周波数を高速に切り換えられるデバイスが必要となる。

一方、周波数分割形光交換の実験に使えるデバイスは、まだ少なく、特性としても満足できるレベルにはない。例えば、チューナブルな周波数変換素子で変換可能な周波数はたかだか10程度というのが、現状である。従って、システムサイドの研究は、さまざまな機能の組合せや配置によってスイッチ全体の所要デバイス

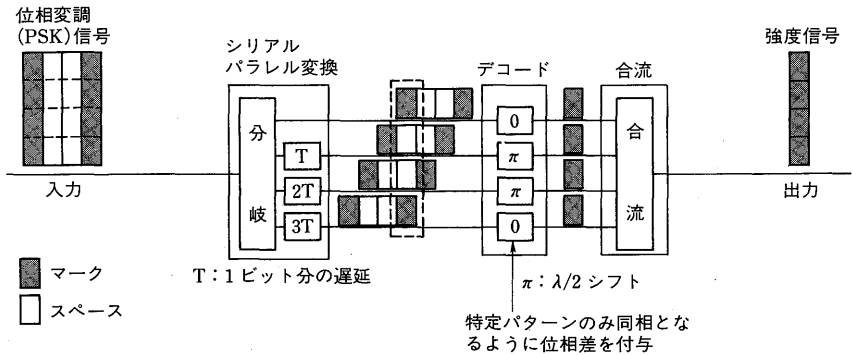


図2 光パターンマッチング回路を用いたアドレス判定回路 位相変調(PSK)された光信号中から、特定の時系列信号パターンを検出することが可能である。回路は受動素子によって構成されているため、超高速動作が可能である。

数やスループットがどう変わるかといった検討が中心である<sup>(22), (23)</sup>。周波数分割形については、デバイスがどこまで進展するかが鍵とってよからう。

ループやバスなどの放送的伝送媒体に複数の波長の光を多重し、受信側で所望の波長を選択するタイプの光ネットワークは10年前ごろから数多く提案されている。また、高速動作できる光フィルタを用いたATMスイッチの提案もある<sup>(24)</sup>。この方式は、送信側に固定の波長を割り当てれば、波長変換機能が不要（発信波長の異なるLDを配置すればよい）で、TDMAなどに比べて1チャンネル当りの帯域を広くとれるという利点があるが、多重化できる波長の数で端末の最大数が決まるなど、限られた規模のネットワークにしか適用できない。

複数の光周波数をATMセルの異なるアドレス情報に対応させたり<sup>(25)</sup>、時分割形交換の時間スイッチとして波長分散特性のあるデバイスを用いるといったアイデアも提案されている<sup>(26)</sup>。

#### 4.4 フリースペース光交換

これまで述べてきたのは、光スイッチなどの機能デバイスを、光ファイバや光導波路で接続してシステムを構成するタイプであるが、光の直進性や非干渉性を利用して、3次元空間を伝搬する光ビームを制御（光路の切り換え、on/offなど）して交換するフリースペース形の光交換

方式も研究されている<sup>(27)</sup>。入出力端子をそれぞれ2次元アレー状に並べ、面形のアレーデバイスでそれぞれの光路を切り換える。隣接する光ビームは互いに干渉しないので、デバイスさえ小さくできれば、多端子のスイッチをコンパクトに実現できる。

図3は液晶と方解石によって光路を切り換える並列光スイッチで<sup>(28)</sup>、アレー状の単位スイッチ（隣接する2本の光ビームの位置を入れ換える機能を持つ）群を多段に縦続接続してスイッチを構成する。同一平面上の各单位スイッチは独立に同時動作が可能である。この種のスイッチは、前段の出力ビームが直接次段の入力ビームとなるため、各段の位置関係を厳密に合わせ、その状態を維持しなければならない。こうした系全体のアラインメントを容易にする方法として、光ビームを自由空間ではなく厚みを持った板状の固体内を全反射を繰り返しながら伝搬させる方式も提案されている<sup>(29)</sup>。

多段並列光スイッチの規模を拡大するには、各スイッチアレーの単位スイッチ数を増やすだけでなく、段数も増やす必要がある。それに対して、ホログラムを用いた並列光スイッチは、書き込むホログラムのパターンによって1段でビームをさまざまな方向へ偏向できるため、少ない段数で同じ端子数のスイッチが構成できる。図4は、液晶に書き込んだパターンによって生じる回折現象を利用したホログラム形光ス

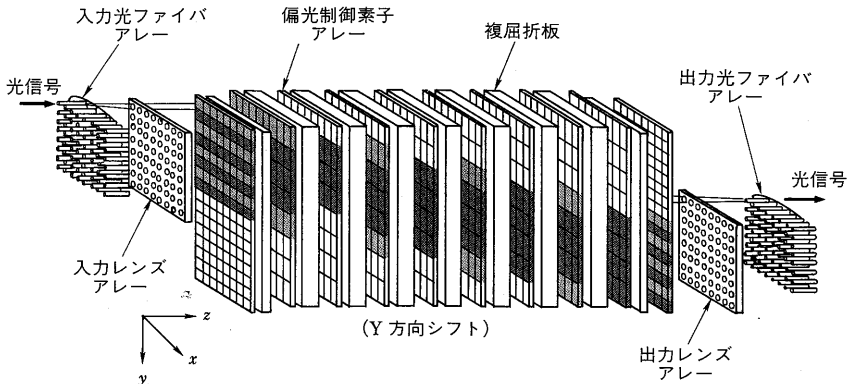


図3 液晶ビームシフタを用いた $N \times N$ スイッチ フリースペース光交換の具体例であり、液晶と複屈折性を有する方解石で構成される光ビームシフタを用いて $N \times N$ スイッチを実現している。

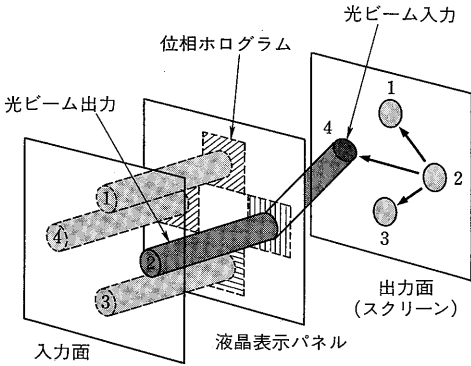


図4 液晶表示パネルを用いたホログラム形光スイッチリアルタイムで書換え可能なホログラム媒体を用いて、4入力4出力のスイッチを1段で実現している。

イチで、4入力4出力のスイッチを1段で実現している<sup>(30)</sup>。

また、2次元アレーデバイスの研究もこのところ盛んで、64素子程度のものから数十K素子程度のものまで、数多くのデバイスが試作されている<sup>(31)~(34)</sup>。

並列光スイッチの具体的な適用領域としては、大量の光ファイバを扱う光加入者集線系、光MDF、多数のニューロン間の接続状態を切り換える光ニューラルネットワーク<sup>(35)</sup>、などが考えられる。

#### 4.5 光処理

交換機はスイッチ部だけに限っても単なる空間スイッチや時間・周波数変換スイッチだけで構成できるわけではなく、アドレスデコーダやATMセルのルート判定回路、優先制御回路などが必要になる。これらの回路を実現するには、論理ゲートやフリップフロップなどに相当する機能素子が必要であるが、光論理回路についての研究はまだごく初歩的な段階にあり、電子回路のように複雑な処理を1チップでこなすレベルに達するまでには、相当の年月を要すると思われる。光の場合は、高速の信号を多数並列に入出力することが容易なため、複雑な演算回路を一つのデバイスに集積化するよりむしろ比較的単純な論理をアレー状に集積し、並列演算によって処理のスループットをあげる方法が有効と考えられる<sup>(36)</sup>。

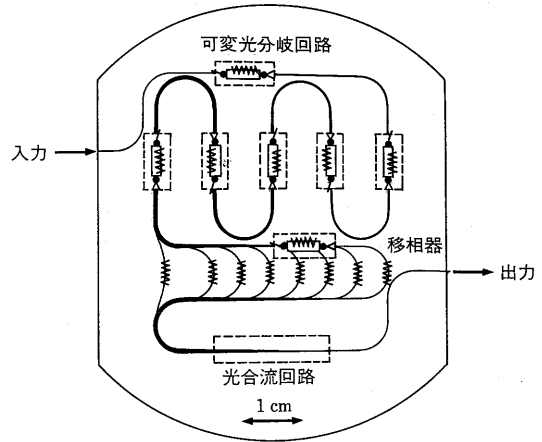


図5 コヒーレント光トランスバースフィルタ 光の位相干渉を利用した8タップのトランスバースフィルタであり、複素タップ係数の設定が可能ことから、任意の周波数特性を持つ光フィルタを実現できる。

光信号のアナログ演算の研究も行われている。図5は、導波路の屈折率変化によって信号の振幅や位相を制御し、トランスバース形のフィルタを実現したものであり、タップ数を増やすことで遮断特性のよい高周波フィルタが実現できる<sup>(37)</sup>。また、周期的な周波数特性を実現することによって、周波数交換用の選択回路への応用も考えられる。

#### 4.6 光インタコネクションと実装技術

交換システム内部において、数百Mbit/s以上の高速信号を装置間にわたって数メートル以上伝送するには、光ファイバを使った接続(光インタコネクション)が必要になってくる。これまでは主として細心同軸ケーブルを用いた接続が行われてきたが、伝送特性のみならず、ケーブルやコネクタの物理的な大きさの制約などからも光化は不可避と考えられる。いまのところ、国際的に標準化が進んでいるSDHインタフェースの光モジュールが使われようとしているが、今後OEICのアレー化、高密度光コネクタなど、よりコンパクトで安価な接続方式の実現をめざした検討が進められるであろう。

これまでに述べたような光交換システムを実現しようとする、光デバイスと電子デバイス

を混載した回路の構成法, 実装法が重要な技術課題になってくる。たとえ単体のデバイスは高速で動作するとしても, デバイス間を接続する回路の特性が悪ければ, システムとして所要のスループットを実現することはできない。最近, 高速の回路を実装する方式として, 複数のベアチップ(ウェーハから切り出したままのICチップでケースに納められていないもの)を高周波特性の優れたプリント基板に直接搭載し配線するマルチチップモジュールの技術が使われている<sup>(38)</sup>。これを発展させた光・電気混載型のマルチチップモジュール, 現在のプリント配線板と同程度のコストで実現できる光導波路基板, 光バックボード, 3次元光実装など実装方式に関する検討をデバイスやシステムの研究と併行して進めていく必要がある。

## 5. おわりに

光技術を導入していくことによって, 新しい交換システムはいったい何をもたらそうとしているのだろうか。これまでに比べて3けた以上広い帯域がふんだんに使えるようになるということは, 単に高速の端末を使って通信ができるということではなく, 実質的な「帯域」制限からの解放を意味する。すなわち, 帯域の概念を超越するネットワーク(ハイパーバンドネットワーク)が光技術によって実現する。「帯域」の制限がなくなれば, さまざまな「メディア」を自由に使って情報伝達ができるわけで, 「距離」, 「時間」, 「メディア」の三つの制約を克服したとき, 通信網は人間にとってまさに空気と同じものになるだろう。

## 文 献

- (1) 多田, 安井: “光交換技術の動向”, 信学誌, 71, p.1023 (1988).
- (2) 三木: “広帯域サービスを目指した加入者網の全光化”, O plus E, 1月号, p.88 (1991).
- (3) Aoki T.: “Trends in Electronic Communication Switching Technologies”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '90, 12C-3, p.1 (1990).
- (4) Yukimatsu K. and Aoki T.: “Advanced Switching Technologies toward Tera-Bit Communications Networks”, in Proc. ICCS '90, p.397 (1990).
- (5) Tada K. and Hinton H.S. (Eds.): “Photonic Switching II”, Springer-Verlag, Berlin (1990).
- (6) Himeno A., et al.: “Experimental Optical Switching System using Space-Division Matrix Switches Gated by Laser Diodes”, in Proc. Globecom '88, 29-1, p.928 (1988).
- (7) Inoue H., et al.: “An 8 mm Length Nonblocking 4×4 Optical Switch Array”, IEEE J. Selected Areas in Commun., 6, p.1262 (1988).
- (8) Nishimoto H., et al.: “Polarization Independent 8×8 LiNbO<sub>3</sub> Optical Switch Matrix”, IEEE Photon. Technol. Lett., 2, p.634 (1990).
- (9) Sugita A., et al.: “Strictly Nonblocking 8×8 Integrated Optical Matrix Switch with Silica-Based Waveguides on Silicon Substrate”, in Proc ECOC '90, WEG 4.1 (1990).
- (10) Suzuki S., et al.: “Thirty-Two Line Optical Space-Division Switching System”, in Proc. OFC/IOOC '87, WB 4 (1987).
- (11) Fujiwara M., et al.: “Studies on Semiconductor Amplifiers for Line Capacity Expansion in Photonic Space-Division Switching System”, IEEE J. Light-wave Technol., 9, p.155 (1991).
- (12) Yamaguchi M., Matsunaga T. and Okuno M.: “Experimental Photonic Switching System using Integrated 8×8 Silica-Based Guided-Wave Crossbar Switch”, in Proc. Globecom '90, 706 B-2, p.1301 (1990).
- (13) Goto H., et al.: “An Experiment on Optical Time-Division Digital Switching using Bistable Laser Diodes and Optical Switches”, in Proc. Globecom '84, 26.4, p.880 (1984).
- (14) 黒柳, ほか: “光交換システムの試作”, 信学技報, SSE 88-64 (1988).
- (15) Mitsunaga M. et al.: “cw Photon Echo”, Phys. Rev. Lett., 63, p.756 (1989).
- (16) Tsukada M. and Shimazu Y.: “40 Gbps Optical Time-Division Cell Multiplexer for a Photonic ATM Switch”, Electron. Lett., 25, p.1895 (1990).
- (17) Matsunaga T.: “Photonic Switching for ATM Networks”, in Proc. ISS '90, 3, p.105 (1990).
- (18) 行松, 島津, 平松: “光スイッチを用いた超高速 ATM セル転送網”, 1991 信学春季全大, SB-9-5.
- (19) Amada E., Takahashi Y. and Inoue H.: “A Photonic Approach to ATM Switching”, in Proc. Globecom '89, 50.2, p.1810 (1989).
- (20) 西尾, ほか: “VSTEPを用いた光 ATM スwitchの検討と基礎実験”, 信学技報, SSE 91-82 (1991).
- (21) Nishikido J., Okuno M. and Himeno A.: “Coherent Optical Pattern Matching Circuit Fabricated with Silica-Based Waveguides: Application to Photonic Switching”, in Proc. CLEO '91, CTuD 3, p.84 (1991).
- (22) 葉原: “光スイッチングシステムにおける多重度の検討”, 昭 63 信学秋季全大, B-175.
- (23) 黒柳, 下江, 村上: “波長分割型光交換の構成法の検討”, 光スイッチング時限研究会, OSW 89-5 (1989).
- (24) Brackett C.A.: “On the Capacity of Multiwavelength



- Optical-Star Packet Switch”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '91, WB 4, p.24 (1991).
- (25) Kuroyanagi S., Shimoe T. and Murakami K.: “Photonic ATM Switching Network”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '90, 14 B-2, p.223 (1990).
- (26) 葉原: “周波数, 遅延変換による時間スイッチを用いた高速光通話路構成法”, 信学技報, SE 88-32 (1988).
- (27) McCormic F.B., et al.: “S-SEED-based Photonic Switching Network Demonstration”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '91, WE 1, p.44 (1991).
- (28) 山口, 松永: “多段ビームシフト型  $N \times N$  光スイッチ構成法”, 1991 秋大, B-284 (1991).
- (29) Parker J.W.: “Progress in Optical Interconnection Technologies and Demonstrators under ESPRIT II OLIVE Programme”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '91, WC 1, p.32 (1991).
- (30) 山崎, 山口: “ホログラム型  $4 \times 4$  空間光スイッチングの実験”, 1991 秋大, B-286 (1991).
- (31) Numai T., et al.: “Surface-Emitting Laser Operation in Vertical to Surface Transmission Electrophotonic Devices with a Vertical Cavity”, Appl. Phys. Lett., 58, p.1250 (1991).
- (32) Matsuda K., et al.: “Integration of InGaAsP/InP Optoelectronic Bistable Switches with a Function of Optical Erasing”, IEEE Electron. Device Lett., 11, p.442 (1990).
- (33) Chirovsky L.M.F., et al.: “Large Arrays of Symmetric Self Electro-optic Effect Devices”, in Proc. Topical Meeting on Photonic Switching '91, ThB 3, p.150 (1991).
- (34) 天野, 松尾, 黒川: “QCSE 効果を利用した面型光スイッチング素子 (EARS)”, 信学技報, OQE 91-54 (1991).
- (35) Ohta J., et al.: “The GaAs/AlGaAs Optical Neurochip with Variable Synaptic Interconnections”, in Proc. CLEO '91, CTuD 2, (1991).
- (36) Yamazaki H. and Yamaguchi Y.: “Liquid-Crystal-Based Optoelectronic Hybrid Structure for Optical Parallel Processing Devices”, Jpn. J. Appl. Phys., 29, p.L 1244 (1990).
- (37) Sasayama K., Okuno M. and Habara K.: “Coherent Optical Transversal Filter using Silica-Based Waveguides for High-Speed Signal Processing”, J. Light-wave Technol., 9, p.1225 (1991).
- (38) Yamanaka N., et al.: “Multichip 1.8-Gb/s High-Speed Space-Division Switching Module using Copper-Polyimide Multilayer Substrate”, in Proc. IEEE 40 th, ECTC, p.562 (1990).



ゆきまつ けんいち  
行松 健一 (正員)

昭46東大・工・電気卒。昭48同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社武蔵野通研入社。以来、デジタルデータ交換の研究開発、高速パケット交換、光交換の研究に従事。現在、NTT交換システム研究所主幹研究員(光交換研究グループ)。