

## 光マイクロマシンの現状

藤田博之

電子機器の小型化により携帯用の情報機器が広く実用化されているが、機械の小型化はそれに十分対応できているとはいえない。さらに超小型の機械があれば、医療分野で治療や検査時の患者の負担を軽減したり、ホームオートメーションのための情報収集や空調などの各種制御をきめ細かく行うのに有用である。このような機械の小型化の要求に対応して、半導体製造技術を利用してマイクロメートルオーダーの機械を作る、マイクロマシンの研究が最近盛んに行われている。

本稿では、まずマイクロマシンの特徴をまとめ、それが光技術ときわめて適合性が良いことを示す。次に光マイクロマシンの活躍が期待される応用分野を概観し、その中から通信ネットワークへの応用が期待されるマイクロ光スイッチなど、特に有望と思われるデバイスの例を紹介する。最後に、1997年の終わりから98年のはじめにかけて開催されたマイクロマシンの国際会議から、光技術への応用の最新動向を述べる。最近の研究では、シリコン薄膜で作ったマイクロ構造をマイクロアクチュエーターの力で3次的に組み上げることも可能である。上記会議の発表の中から、半導体マイクロマシニングで複雑で立体的なマイクロマシンを作った例も示すことにする。

### 1. マイクロマシンの特徴と光応用

ある雑誌にマイクロマシンに関する文章が掲載されていた。この文章を要約すると、次のようになる。「マイクロマシンは指先ほどの自動車などが実現されているが、未だにおもちゃの域を出ず、いかに社会的インパクトのある製品として世に出すかで悪戦苦闘している。理由は、軸受け部などの相対的精度をマクロの機械並みに良くすることが難

しいこと、摩擦力と慣性力の比などスケール則の問題でマクロの機械と様子の異なる機械になってしまうこと、運動や作用を外部に取り出すことが難しいこと、3次的形状の加工が難しいこと、などである。それでも、センサー、光応用、流体応用などは可能性がある。」この内容は、一般の方がマイクロマシンと聞いたとき抱きがちな懸念だと思われる。そこで、この懸念を解消するところから、本稿を始めてみたい。

指先ほどの自動車はデモとしては秀逸であったが、確かにおもちゃの域を出ず、マイクロマシンの工業的意味を論ずる対象としては適当でない。マイクロマシンはすでに社会的インパクトのある製品として実用化されているけれども、その姿はわれわれの目に留まらぬ形になっているからである。例えば、熱駆動式のインクジェットプリンターのヘッドは、微細加工したノズルとインク流路、薄膜技術で一体製作するマイクロヒーター（アクチュエーター）、アレイ構造による並列処理など、マイクロマシン技術の利点をきわめてよく生かしている。外界にも立派に作用を及ぼしているし、商業的にもすばらしい成功を収めている。今後、静電駆動式や薄膜ピエゾ素子駆動式のインクジェットプリンターも実用化される見通しで、いっそうの発展をするだろう。しかしマシン自体は大きなプリンターの一部になっており、我こそマイクロマシンと自己主張していないが、立派に仲間に入れていいと思われる。

ではこれが成功した理由は何だろう。第1に、マクロの世界では吹けば飛ぶような存在である、泡の力を利用したことだろう。ミクロの世界にマッチした機械は、まさに「マクロの機械と様子の異なる機械」であったのだ。マイクロマシンの難題として指摘されている、モーターや歯車などお互いに擦れ合って動く構造を使っていない点も、ミクロの機械の望ましい姿と考えられる。第2は、マクロの機構

東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)  
E-mail: h.fujita@ieece.org.

表1 マイクロマシンの光応用.

応用分野	特徴など
(1) 光信号制御用マイクロマシン 波長可変フィルター 波長可変レーザー 変調器 ディスプレイ 光スイッチ スキャナー チョッパーとシャッター コネクタと光軸合わせ 分光計 マイクロレンズ 可変焦点レンズ, ミラー	ファブリー・ペロー型, 導波路型など. WDM 用 面発光型, 端発光型など. WDM 用 10 MHz 級の高速応答 可動のミラーや回折格子などのアレイ 高消光比, 波長や偏波に無依存, 低価格 プリンター, ディスプレイ, バーコードリーダー用 焦電センサー, ビームの制御用 V 溝や LIGA 構造のモールド利用 回折格子を利用. 化学分析センサー部に使用 レジストリフローやグレイトーン露光利用 マイクロアクチュエーターで駆動
(2) 光センシング用マイクロマシン 近接場光顕微鏡 光エンコーダーと変位センサー (光) データ記録 光導波路センサー 光ファイバーセンサー	プローブのマイクロ加工 レーザー, レンズ, 導波路, 検出器など集積化 トラッキング, 焦点合わせなどに利用 干渉計による物理量や化学量センサー 物理量や化学量センサー
(3) 光によるマイクロ構造の駆動, 製作 レーザーマニピュレーション レーザーアシスト成膜, パターニング, エッチング 光造形法 光歪アクチュエーター レーザー励起振動子	微細物体の操作 曲面等への加工, 特殊加工 3次元構造の製作 材料研究の段階 非接触駆動, 高速駆動 (1 MHz)

とミクロの機構の役割をうまく分担している点である。マイクロマシン技術を利用したヘッドは、精密にそろったインク滴を同時に多数吐出するのを高速で繰り返し、マクロの機構はヘッド全体を大きく動かす役目をする。第3にマイクロマシン向きの応用分野が特定できたことである。上に要約したように、流体への応用は有望とみられており、さらに情報機器は重さのない情報を取り扱う点でマイクロマシンの応用に最適である。

さて、本稿で扱っている光マイクロマシン<sup>1,2)</sup>も、ほぼ同様の特徴がある。重さのない光子を扱うにはミラーなどを動かせば十分なため大きな力がいらぬし、非接触で作用を取り出せる。また、干渉や回折現象などには、ミクロな動きやパターンが有効に生かせる。さらに光マイクロマシンは、通信、データ記録、センシングなど情報機器への応用が主体となる。このため、社会的インパクトの大きな製品が生まれる期待が大きい分野である。

マイクロマシンの光応用を分類して表1に示す。大別して、光信号を制御するためにマイクロマシンを用いる応用、マイクロマシンを用いて光センシングを行う応用、光自体を用いてマイクロマシンを動かしたり作ったりする技術の3つに分けられる。表に示した応用のうち、光ネットワーク用のデバイスである、ファイバーのアライナー、光スイッチ、波長可変レーザーやフィルターが有望である。これに加え、また情報機器への応用である、ディスプレイやデ

ータ記録装置、各種センサーも早期の実用化が期待できる。

## 2. マイクロマシン応用光スイッチ

### 2.1 マイクロ光スイッチの分類

上述したように、マイクロマシン技術で作る機械式の光スイッチはこれからの光通信ネットワークの家庭への普及に有用なデバイスとして大きな期待が寄せられている。すなわち、大規模な光通信ネットワークの再構成、保守、保安などにたくさんの光スイッチが必要である。基幹線路では、超高速のスイッチが必須であるが、加入者側のネットワークでは速度よりも低価格を重視したスイッチが大量に要求される。さらにこのスイッチの性能として、大きな消光比、小さな漏話、波長や偏波への無依存性、小型で回路基板上に容易に実装できること、などが望まれる。さまざまの光スイッチの比較を表2に示すが、マイクロマシン技術で作る機械式の光スイッチ（以下、マイクロ光スイッチと呼ぶ）は、このような要求に最適の特性を備えている。

マイクロ光スイッチにはさまざまな構造のものが提案されている。表3に示すように、大別して光ファイバーを用いるものと、平面光導波路を用いるものがある。また、動かすものが光ファイバーや光導波路自身であるか、ミラーやシャッターなどであるかも、分類の目安になる。現在どの構造が一番すぐれているのかを述べることは難しい。例えば、光ファイバーは直径が125 μmとマイクロマシンの

表2 光スイッチの性能比較.

スイッチ形式	媒体	挿入損失	波長依存性	扁波面依存性	自己保存	価格
ファイバリーボン切り替え	光ファイバー	良好	依存せず	依存せず	可	高
マイクロメカニカルスイッチ	光導波路	良好	依存性小	依存性小	可	低
マイクロメカニカルスイッチ	光ファイバー	良好	依存せず	依存せず	可	低
電気光学効果	光導波路	可	依存する	依存する	バッテリー必要	高
熱光学効果	光導波路	良好	依存性小	依存性小	バッテリー必要	中
レーザーダイオードゲート	光導波路	良好	依存する	依存する	不可	高
液晶	自由空間	可	依存する	依存する	バッテリー必要	高
ホログラム	自由空間	不良	依存する	依存する	バッテリー必要	高

表3 マイクロメカニカル光スイッチの分類.

伝搬媒体	文献
光ファイバー	可動ファイバー 3), 4), 5), 6), 7) マイクロミラー挿入 8), 9), 10), 11), 20) シャッター挿入
光導波路	可動光導波路 12), 13), 14), 15) マッチング液の出し入れ 16) マイクロミラー挿入 エバネセント光による結合

大きさからすると太いため、これ自体を駆動する構造はどうしても大きくなり、すべてマイクロマシン技術で作ることは難しい。このため、性能はいいが高価になりがちである。光導波路を動かす場合は、曲率半径の制限からやや寸法が大きくなる傾向がある。光ファイバーや光導波路の一部を切り、その空間を伝搬する光ビームに対して、ミラーやシャッターを挿入する光スイッチは小型化でき、マイクロマシン加工にも向くが損失がやや大きい傾向にある。

## 2.2 光ファイバーを用いるマイクロ光スイッチ

一端を片持ち梁のように支持した可動光ファイバーを、2つ並べて固定した光ファイバーと対向して設置し、可動光ファイバーを動かしてそのどちらかと結合すると、1×2のマイクロ光スイッチができる。駆動に形状記憶合金の細線を用いるもの<sup>3)</sup>、永久磁石と電磁石を組み合わせる磁性体チューブをかぶせた光ファイバーを動かすもの<sup>4,5)</sup>、電気メッキしたニッケル製の熱膨張式マイクロアクチュエーターを用いるものなどがある<sup>6)</sup>。このうち電磁力で駆動する型は、機械加工と組み立て工程が必要である反面、性能としては、自己保持性がある、低挿入損失(0.34 dB)、2 msの切り替え速度、低漏話(-70 dB)などきわめてすぐれており、製品として市販されている。最近の国際会議でも、このスイッチを波長多重通信の波長選択器へ応用した論文があった<sup>7)</sup>。光ファイバーの端部をT字もしくはX字に付き合わせ、その交点にミラーを出し入れすることで、光ビームを直進させたり、反射して方向を変えたりして光路の結合を変化させられる。鏡は光軸と垂直に数百 $\mu\text{m}$ の大きさで平滑な必要がある。普通光軸は基板と平

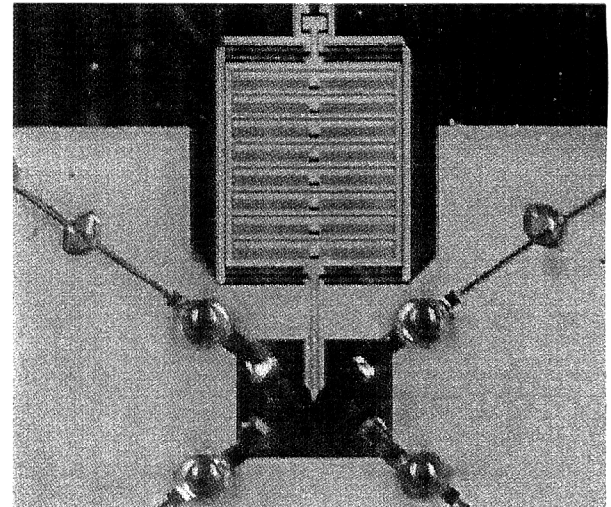


図1 LIGAプロセスによる光バイパススイッチの写真<sup>8)</sup>。

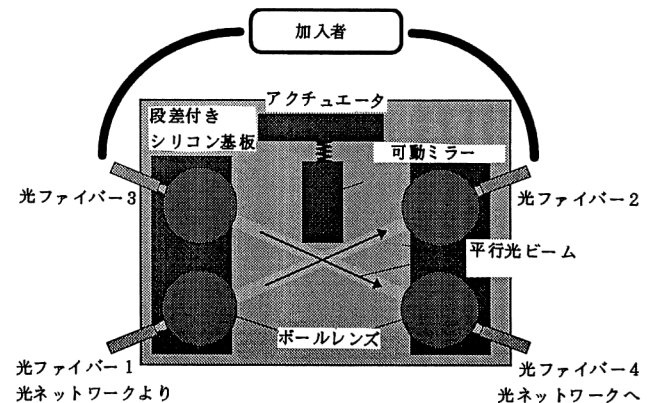


図2 マイクロ光バイパススイッチの原理図<sup>8)</sup>。

行なので、鏡を作るにはLIGAプロセスや反応性イオンエッチングによる垂直な異方性エッチングなど高アスペクト比の加工技術が用いられる。図1はLIGAプロセスで作ったバイパススイッチ<sup>8)</sup>で、4本の光ファイバーとその先端のボールレンズの位置決め用溝、ミラー面とそれを動かす静電アクチュエーターが、X線リソグラフィとニッケルの電気メッキを組み合わせで作ってある。図2にその動作原理図を示す。ミラー面が上がっているとき、ネットワー

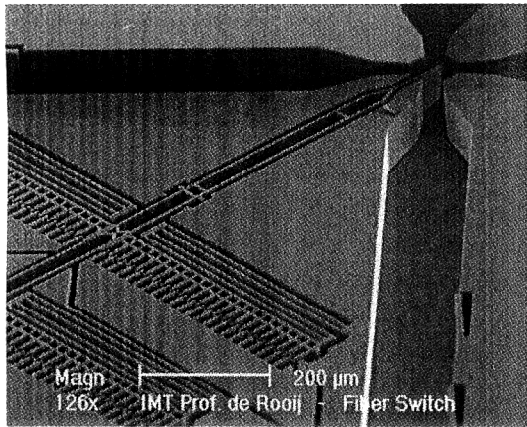


図3 反応性イオンエッチングで作った光スイッチ<sup>9)</sup>.

表4 マイクロクロスバースイッチの性能.

スイッチ時間	0.2 ms
立ち上がり	0.08 ms
損失 (バー状態)	<1 dB
損失 (クロス状態 1)	<2 dB
損失 (クロス状態 2)	<4 dB
反射戻り光	-16 dB
駆動電圧	<50 V

クからの光信号は光ファイバー1より光ファイバー2に結合され、加入者の端末を経て光ファイバー3より光ファイバー4に伝わりネットワークに帰る。マイクロアクチュエーターでミラー面を押下げた状態では、光ファイバー1からの信号は反射されて光ファイバー4に直接戻り、加入者はネットワークから切り放される。マイクロアクチュエーターは $100\ \mu\text{m}$ の変位を印加電圧50 V以下で発生し、その共振周波数は100 Hzである。透過モードでの損失は1.7 dBであり、反射モードでは5 dBであった。反射モードでの損失は、ニッケルのミラーの表面粗さを低減し、金をスパッター成膜することで3 dBまで減らせるという。また、消光比は40 dBであった。

図3は、シリコンの反応性イオンエッチングで類似のデバイスを作ったものである<sup>9)</sup>。ただしこの場合は、 $2\times 2$ のクロスバースイッチとして使っている点と、光ファイバーの先端を $90^\circ$ の円錐状に削ったものを接近させて結合損を減らしている点が異なっている。このスイッチの性能を表4に示す。パッケージを含めたデバイスが試作されている。

基板と水平にミラーを動かすのではなく、基板と平行に作ったミラーを $90^\circ$ 回転させて光ファイバー間に挿入し、光ビームの方向を切り替えることもできる。図4に示すように、この原理に基づいた超小型の光マトリクススイッチを試作した<sup>10)</sup>。静電力で動くマイクロミラーのアレイで、自由空間を伝搬する光ビームの方向を変え、複数の入出力間

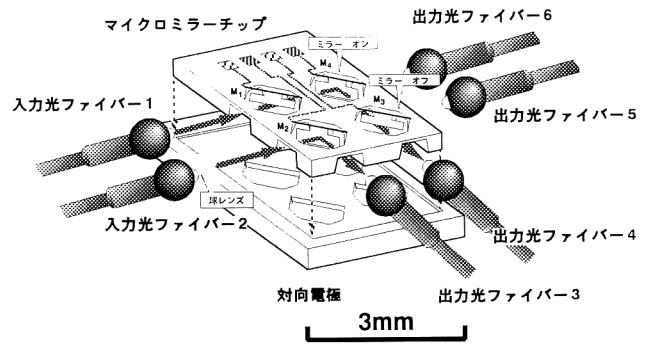


図4 光マトリクススイッチの原理.

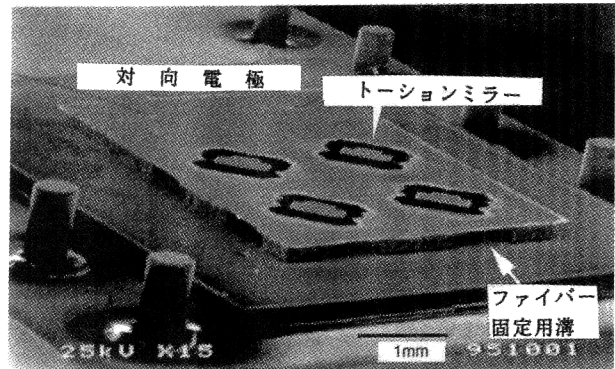


図5 試作デバイスの電子顕微鏡写真.

の切り替えを行う。これまであった非線形光学効果に基づくソリッドステート式の光スイッチに比べ、寸法が縦横とも $1/10$ 以下に小さくなった点と、高い消光比やクロストークの低減が特徴である。光ファイバー通信ネットワークの伝送路の切り替えや、回線試験用のスイッチングマトリクスに応用が期待できる。また、計算機の光インターコネクションにも、展開が可能である。

今回製作したのは、2入力、4出力のスイッチで、 $3\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ のシリコン基板の上に、 $0.6\ \text{mm}\times 0.3\ \text{mm}$ のマイクロミラーを4つ、正方形の各頂点に置いたデバイスである(図5)。このミラーは、幅 $16\ \mu\text{m}$ 、長さ $320\ \mu\text{m}$ 、厚さ $0.4\ \mu\text{m}$ の細い梁で支えてあり、静電力を加えると $90^\circ$ 下方に回転する。先端に球レンズをつけた光ファイバーを6本用意して、このスイッチとアライメントをとる。切り替え速度は、1秒間に100回程度で、その他、挿入損失は7.7 dB以下、消光比は60 dB以上、クロストークは $-60\ \text{dB}$ 以下の性能である。挿入損失を減らすため、さらにスイッチを小型化する研究を進めている。4千万回の連続動作でも性能は変わらず、寿命も十分長いことを確かめた。ミラーの数を増減することで、単一の素子で切り替える人力と出力の数を変えることができる。また、ミラーを1つだけ用いて、 $2\times 2$ のバイパススイッチを試作した例もある<sup>11)</sup>。

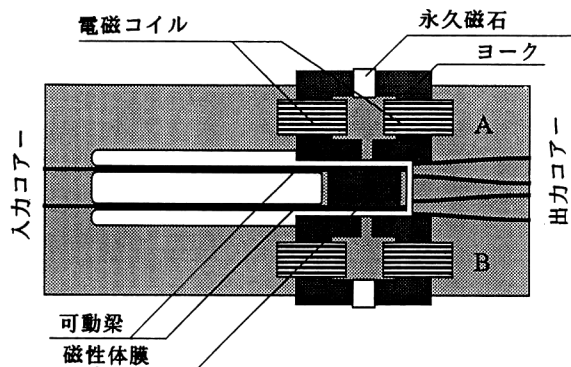


図6 光導波路を磁力で動かす光スイッチの原理図<sup>15)</sup>。

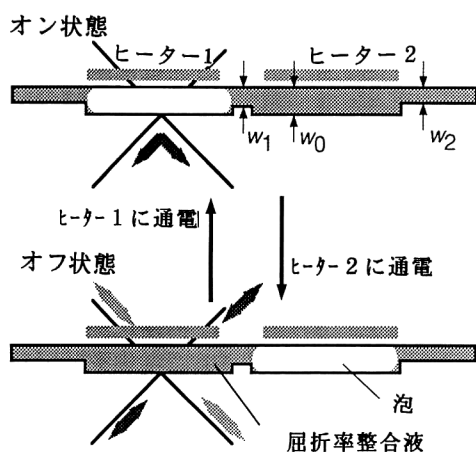


図7 熱により流体を動かす光スイッチの原理図<sup>16)</sup>。

### 2.3 光導波路を用いたマイクロ光スイッチ

シリカ系の光導波路は、マイクロマシン技術で加工することが容易なため、マイクロ光スイッチに広く用いられる。光導波路の一部を片持ち梁のように基板から分離し、それを動かしてスイッチが作れる。10 V の電圧で片持ち梁上の光導波路を上下に曲げ、12 dB の消光比のオンオフスイッチを作った例<sup>12)</sup>がある。また、静電アクチュエーターで可動の光導波路を基板と平行に動かし、2つの光導波路のどちらかと結合させる1×2のスイッチも試作されている<sup>13,14)</sup>。また自己保持機能をもたせるため、永久磁石と電磁石を組み合わせたアクチュエーターで、光導波路と磁性体を付加した片持ち梁を水平方向に動かし、1×2のスイッチを同時に2つ駆動するデバイスも試作された<sup>15)</sup>。このスイッチの原理図を図6に示す。挿入損失4.4 dB、漏話-40 dB、スイッチ時間40 msの性能が得られた。

液体の移動を利用した光スイッチもある。十字に交差する光導波路の交差点に溝を切り、液体を出し入れして光スイッチとする。図7に原理を示すように、マイクロヒーターの熱によって流体を動かす<sup>16)</sup>。1×3のマトリクススイッチを試作したところ、スイッチ時間は0.1 s程度、透過モ

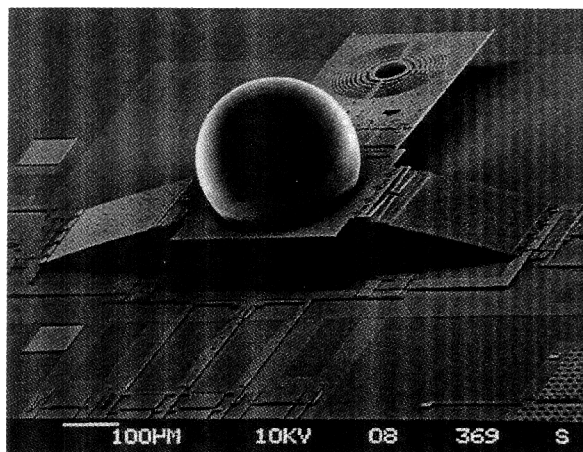


図8 自己組立したマイクロXYZステージの電子顕微鏡写真。3軸方向に独立した動きができる<sup>17)</sup>。

ードで0.5 dBの損失、反射モードで4.3 dBの損失などの性能を示した。

## 3. 最近の国際会議における光マイクロマシンの動向

### 3.1 マイクロマシンの光技術への応用国際会議

光技術のニーズとマイクロマシンのシーズを、両分野の研究者が一堂に会して討議するため、第1回マイクロマシンの光技術への応用国際会議(MOEMS 97)が開催された。IEEEのLEOS(レーザーと光電子部会)と電気学会センサー・マイクロマシン部門の主催で、1997年11月18日から21日まで奈良で開かれ、海外8カ国からの45名を含む192名の参加者があった。

本会議の大きな話題は、マイクロマシン技術の光通信ネットワークへの応用可能性であった。特別講演でも、集積型の光実装部品への要望が述べられたことに加え、光ファイバー実装部品をマイクロマシン技術で実現することに関する論文が3編あった。また、さまざまな原理に基づくマイクロメカニカル光スイッチが8件発表された。さらに、波長多重通信方式のための可変波長光ディテクターを化合物半導体のマイクロマシンングで作る発表や、可変波長のレーザーとディテクターをアレイ化してチップ間のインターコネクションを行う提案があった。

その他の光デバイスでは、マイクロマシン技術を用いたディスプレイの発表が目立った。ピクセルの表示原理は、マイクロミラー、マイクロ回折格子、微小なカラー反射板などをマイクロアクチュエーターで動かすもので、いずれもマイクロマシンングによるアレイ化を行う。

また、シリコン薄膜で作ったマイクロ構造を、マイクロアクチュエーターの力で立体的に組み上げたり、立体構造を駆動するデバイスも関心を集めた。ボールレンズをX-

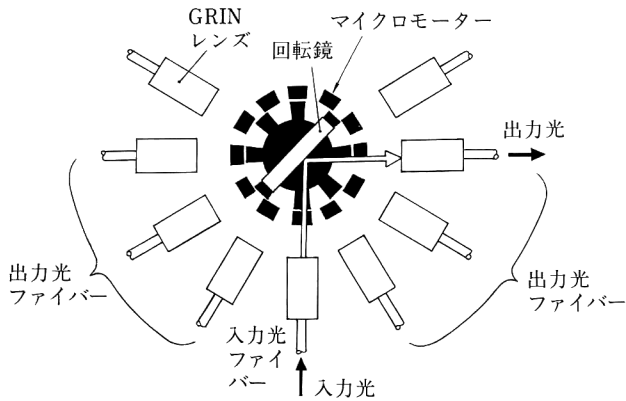


図9 マイクロモーターを利用した光スイッチの原理図<sup>20)</sup>.

Y-Z 方向に動かすマイクロマシン機構や、2次元スキャナーなどが発表された。図8は、マイクロXYZステージの電子顕微鏡写真である<sup>17)</sup>。300  $\mu\text{m}$  の直径のボールレンズを乗せたステージを、マイクロアクチュエーターで垂直方向・水平方向ともに100  $\mu\text{m}$  動かした。静電アクチュエーターは $\pm 90\text{ V}$  のパルス電圧で駆動され、1パルスあたり27 nm 動く。

光計測ではSNOM(走査型近接場光顕微鏡)とAFM(原子間力顕微鏡)の両者を兼用するプローブのマイクロ加工法が斬新であった。マイクロマシニングで作ったセンサーの検出に光を利用し、加速度センサー、歪みセンサー、化学分析機器などを作る試みもあった。DNA分子などバイオ関係の応用も含め、微小物体のレーザーマニピュレーションも進歩している。製作技術では、LIGAプロセスや反応性イオンエッチングによる深溝加工など高アスペクト比の加工技術や、光材料のマイクロ加工技術が発表された。

### 3.2 マイクロマシン国際ワークショップ

1998年1月25日から29日にドイツのハイデルベルグでIEEE主催の第11回マイクロマシン国際ワークショップ(MEMS 98)が開催された。参加者は約600人、発表数は117件と、いずれもこれまでの最大であった。全体を通じ一番強く感じたのは、マイクロマシンが単に動いたというだけでなく、その性能が研究や討議の対象となってきた点である。探索研究から、実用化を強く意識した研究開発へと志向が変わった。応用分野では、環境計測や医療用の化学分析マイクロシステムや光学への関心が高かった。

マイクロマシンの光応用に関して、10件程度の発表があった。レーザーディスプレイ関係の発表が2件<sup>18,19)</sup>あった。このうちひとつはX走査用とY走査用の2つの振動ミラーを外部のピエゾアクチュエーターで共振させ、そこにレーザー光を導入してXY走査する眼鏡型ディスプレイの発表であった<sup>19)</sup>。光はファイバーで外から導入している

が、170 g と軽く、400 $\times$ 400ドットの解像度である。目に直接ビームを投射して表示するが、レーザーは10  $\mu\text{W}$  以下と きわめて弱く安全であるという。

光スイッチに関しては、マイクロモーターで反射鏡を回転させ、光ファイバーからのビームを反射して他のファイバーに結合する1対nのスイッチ(図9)がケースウェスタン大から発表された<sup>20)</sup>。実験結果として、シングルモードで2.3 dB以下の損失に抑えていたのは立派である。スイッチング時間も18.4 msであり、クロストークも-45 dB以下であり、実用的なレベルに達している。フランスのLETIからは、円筒状レンズを静電アクチュエーターで動かし、ファイバーからの光ビームを走査するデバイスの発表があった。厚さ40  $\mu\text{m}$  のSiO<sub>2</sub>を反応性イオンエッチングで垂直に加工して、レンズとアクチュエーターを一体で作るプロセスはすばらしい。

光技術とマイクロマシン技術はきわめて相性が良い。応用分野も、データストレージ、プリンター、光センサーや分析器などさまざまなものが考えられるが、市場規模などから考え光通信ネットワークへの応用に大きな期待が寄せられている。本稿では、光通信ネットワークへの応用が期待されるマイクロ光スイッチを中心に研究成果を紹介するとともに、国際会議での最新情報を含め光マイクロマシンに関する国内外の動向を概観した。今後、この分野での実用化を目指して、デバイスの開発とシステムへの応用のいっそうの発展が切望されている。

### 文 献

- 1) H. Fujita and H. Toshiyoshi: "Micro-optical devices," *SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, vol. 2*, ed. P. Rai-Choudhury (SPIE, Washington, USA, 1997) pp. 435-515.
- 2) 五十嵐伊勢美, 江刺正喜, 藤田博之編: マイクロオプトメカトロニクスハンドブック(朝倉書店, 1997).
- 3) R. Jebens, W. Trimmer and J. Walker: "Microactuators for aligning optical fibers," *Sens. Actuators*, **20** (1989) 65-73.
- 4) S. Nagaoka: "Micro-magnetic alloy tubes for switching and splicing single-mode fibers," *Proceedings 4th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 91)*, Nara (1991) pp. 86-91.
- 5) S. Nagaoka: "Optomechanical switches for fiber-optic communication systems," *Proc. SPIE International Conf. on Optical Fabrication and Testing, vol. 2576* (1995) pp. 383-394.
- 6) L. A. Field, D. L. Burriesci, P. R. Robrish and R. C. Ruby: "Micromachined 1 $\times$ 2 optical-fiber switch," *Sens. Actuators*, **A 53** (1996) 311-315.
- 7) S. Nagaoka, Y. Suzuki and H. Nakada: "Compact wavelength selector using a single-mode fiber switch equipped

- with micro-optical filter chips," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 165-170.
- 8) J. Mohr: "MOEMS fabricated by the LIGA technique—An overview," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 221-226.
  - 9) C. Marxer, C. Thio, N. F. de Rooij, O. Anthamatten, R. Battig, B. Valk and P. Vogel: "Micro-opto-mechanical  $2 \times 2$  switch for single mode fibers based on plasma-etched silicon mirror and electrostatic actuation," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 233-237.
  - 10) H. Toshiyoshi and H. Fujita: "Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix," *IEEE J. Microelectromech. Syst.*, **5** (1996) 231-237.
  - 11) D. Miyauchi, H. Toshiyoshi and H. Fujita: "Optical cross-connect switch by silicon micromachining," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 253-258.
  - 12) T. T. H. Eng, S. Y. S. Sin, S. C. Kan and G. K. L. Wong: "Micromechanical optical switching with voltage control using SOI movable integrated optical waveguides," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **7** (1995) 1297-1299.
  - 13) E. Ollier, P. Labeye and F. Revol: "Micro-opto mechanical switch integrated on silicon," *Electron. Lett.*, **31** (1997) 2003-2005.
  - 14) E. Ollier, P. Labeye and F. Revol: "A micro-opto mechanical switch integrated silicon for optical fiber network," *Digest IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings*, Keystone, Colorado (1996) pp. 71-72.
  - 15) D. Kobayashi, H. Okano, M. Horie, H. Otsuki, K. Sato and M. Horino: "PLC-based micromechanical optical switch with magnetic drive," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 243-246.
  - 16) M. Sato, F. Shimokawa, M. Makihara and Y. Nishida: "Two types of thermo-capillary optical switches," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 238-242.
  - 17) L. Fan and M. C. Wu: "Self-assembled micro-XYZ stage with micro-ball lens for optical scanning and alignment," *Technical Digest of International Conference on Optical MEMS and Their Applications (MOEMS 97)*, Nara (1997) pp. 45-49.
  - 18) J. Kranert, C. Deter, T. Gessner and W. Dotzel: "Laser display technology," *Proceedings IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 98)*, Heidelberg, Germany (1998) pp. 99-104.
  - 19) K. Yamada and T. Kuriyama: "A novel asymmetric silicon micro-mirror for optical beam scanning display," *Proceedings IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 98)*, Heidelberg, Germany (1998) pp. 110-115.
  - 20) A. A. Yasseen, J. Mitchell, T. Streit, D. A. Smith and M. Mehregany: "A rotary electrostatic micromotor  $1 \times 8$  optical switch," *Proceedings IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 98)*, Heidelberg, Germany (1998) pp. 116-120.

(1998年2月23日受理)