

光マイクロマシン技術の展開

板 生 清

1. 光マイクロマシン事始め

「光マイクロマシン」研究グループという組織をつくったのが1989年頃、筆者がNTTの記憶装置研究部長を務めているときであった。光マイクロマシンと命名したその当時は、おそらくまだこのような言葉を使っている人はいなかった。今日、日本光学会で特集記事のタイトルに用いられるまでに認知されたことに深い感慨を覚える。

技術の発展をみると、1970年代後半、マイクロプロセッサの本格導入による機械・電気・情報融合のメカトロニクスがスタートし、1980年代前半には半導体レーザーの実用に伴ってオプトメカトロニクス時代が始まった¹⁾。さらに1980年代後半には、半導体製造技術によるマイクロマシン技術が現れた。このマイクロマシン技術によって、前述のオプトメカトロニクス技術は、さらにマイクロオプトメカトロニクス技術へと進化していった²⁾。光マイクロマシンとは、このような世代の技術ということができる。

筆者の所属していたNTT研究所では、筆者の提案で1990年の11月に10名程度の気鋭の研究者を集めて「マイクロメカフォトニクス研究グループ」を組織した。筆者は研究企画部長とこのグループリーダーを兼務して、光による情報通信とエネルギー伝達の基盤技術の研究を進めた。そのときの研究テーマは表1のようであった。

その後、筆者はNTTから中央大学に移り、後任グループリーダーを浮田氏(現、立命館大学教授)に託し、2年間外部から協力を続けた。

話はさかのぼるが、1985年に精密工学会で新しい分野を開拓する新分野検討委員会が設立された。筆者も委員としてこれに参画し、メカトロニクスの発展型としてのオプトメカトロニクス技術の必要性を提言した。これが承認され

て、1986年から東京大学の園成夫教授を主査として、オプトメカトロニクス研究分科会が発足した。扱う技術は、光情報処理、光デバイス、光応用センシング、光応用情報機器、医療等の広範囲に及び、3年間で計測機器、情報機器、ロボット等の分野における光デバイス計測、機構、制御、アルゴリズム技術の融合による統合化技術の調査と分析を行った。

一方、1987年には将来分野開拓 adhoc 委員会が開かれ、委員として活動していた筆者は、次世代情報記憶技術をインキュベーションテーマとして提案した。これは、1988年から筆者を主査として1年間活動した。その結果、提言として「今後の高密度記憶に向けて、アクセス機構の高帯域化・高速化が不可欠であり、オプトメカトロニクス、マイクロメカトロニクスを包含・融合した新しい技術分野が開拓される必要がある」という見解を残した。

この提案を受けて、精密工学会の新分野推進委員会では、上記インキュベーショングループを専門委員会に格上げして、精密工学会の分野拡大をめざすこととなった。

以上の流れの中で、オプトメカトロニクス研究分科会の提言も取り込んで、光情報システムのオプトメカトロニクス研究専門委員会(委員長:板生、幹事:浮田)が1989年から発足することとなった。この委員会では、通信の分野での光ファイバーの導入、情報分野での光コンピューター、光記憶光センシング、光印刷、光表示などの進展に伴い、光情報システムでのオプト、メカトロニクス技術の役割がますます重要であるととらえた。まさに、部品技術の革新がシステムを革新とするといっても過言ではない状況と考えた。

このような技術認識のもとで、オプトメカトロニクスの役割、および技術分野を表2のように考えた。この分野は技術が急速に発展する可能性を秘めており、関係する範囲

東京大学大学院工学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: itao@pe.u-tokyo.ac.jp

表1 研究開始当時の光マイクロマシンの研究テーマ。

研究テーマ	研究内容
光アクチュエーター素子の研究	光から振動，振動から音への変換または，光からの直接駆動を実現
光エネルギー生成・蓄積の研究	光電池，光合成等によるマイクロエネルギー源の実現
運動体への光エネルギー伝達の研究	レーザービーム追尾制御，光エネルギー蓄積による自走系の実現
マイクロダイナミクスの研究	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー光の作用で物質にはたらく力の観測・測定・制御のツール構築 ・光音響現象のデータ蓄積 ・薄膜共振子等の動特性の解析と運動制御のための基礎データの蓄積
光マイクロ計測制御の研究	光集積センサーによる微小変位，微小力センシング

表2 オプトメカトロニクス関連技術。

機能	技術項目	
	システム・制御技術	部品技術
入力/出力	信号処理，高速ビームスキャン，高速用紙走査	高出力LD，短波長LD，CCD，光シャッター，ホログラム素子，LED
伝達	光ファイバー接続技術，インターコネクション，スイッチング技術	光コネクタ，光集積回路，光スイッチ，光双安定素子，光ファイバー
処理	空間フィルタリング，相関ホログラフィー	面発光レーザー，光双安定素子，光導波路，空間光変調器，位相共役鏡，光集積回路
記憶	信号処理，焦点検出・制御，トラッキング検出・制御	高出力LD，短波長LD，非球面レンズ，マルチビームLD，波長可変LD，媒体ホログラム素子，光集積ヘッド

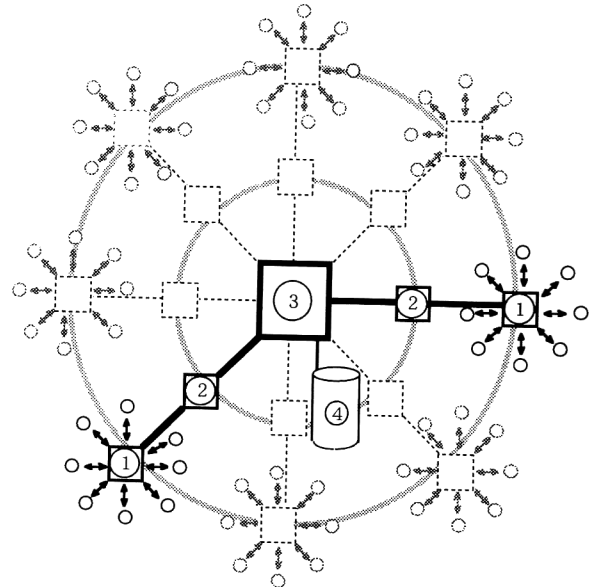


図1 ネットワークの中のマイクロシステム技術。① 情報入出力(携帯電話，環境情報検知，3次元運動センシング，自走センシング，デジタルミラーディスプレイ，バブルジェットプリンター)，② 情報伝達(光インターコネクション，3次元光路接続，ワイヤレスシステム)，③ 情報交換・処理(光交換用スイッチ，主配電盤スイッチ)，④ 情報蓄積(ディスクメモリー，超高密度プローブメモリー)。

もマクロからマイクロまで，ハードからソフトまで広範囲にわたっていると見た。このため従来のオプトメカトロニクス技術を調査・分析して，技術の体系化を深めてゆくこととした。

1995年までの5年間で調査研究した報告書は，浮田幹事の努力により5冊にも及び，今日，1996年の精密工学誌の特集号で5編の解説記事として掲載され，学会のデータベースとなって役立っている³⁻⁵⁾。

2. 情報通信分野での光マイクロマシン技術

2.1 情報マイクロマシンの形態

音声，画像，映像などの多数のメディア(情報媒体)を駆使して情報交換・交流を楽しむマルチメディアの世界が，目の前に現れつつある。このような世界は情報の入力，伝達，処理，記憶，出力などの技術があってはじめて成り立つものであり，人間または自然に親和性の高い技術がつねに要求されている。図1にマルチメディア時代の情報通信ネットワークにおけるマイクロマシン技術の働きを推定する。入力・出力の各端子とこれを結ぶ伝送路，情報の交換システム，情報の蓄積倉庫などからネットワークが構成さ

れる点は従来と同じであるが，ここを通る情報量が100 Mb/s オーダーの大容量になるため，個々のハード・ソフト技術の変革が必然になる。さらに，このような技術の中でもダイナミクスに関わる技術を取り上げると，表3のようになる。すなわち，連続運動，間欠運動，追従運動，衝撃などの作用によって情報のハンドリングに貢献している。

このような技術が高度化してゆくととき，マイクロシステム技術の中でもマイクロダイナミクス技術の力が不可欠となる。

以上のようなマルチメディアの世界を実現するうえで不可欠なキーデバイスは，集積回路と集積機構の融合によって実現される。このようなキーデバイスのもとに極限設計が現実のものとなる。

表3 マルチメディア機器のダイナミクス。

連続運動	直進 (インクジェット) 回転 (ディスク, スキャナー) 共振 (振動子センサー)
間欠運動	位置決め (ヘッド, STM 深針) 位置合わせ (光部品, ステッパー) スイッチング (リレー, 接点) スティックスリップ (光部品, ポジショナー)
追従運動	自然浮上型 (磁気ヘッド) 強制駆動型 (光ヘッド)
衝撃	衝突 (インパクト印字ヘッド, ハンマー) 熱衝撃 (バブルジェット, 搬送)

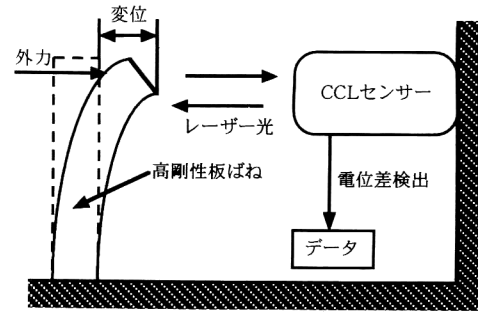


図3 微小力センサーの構成。

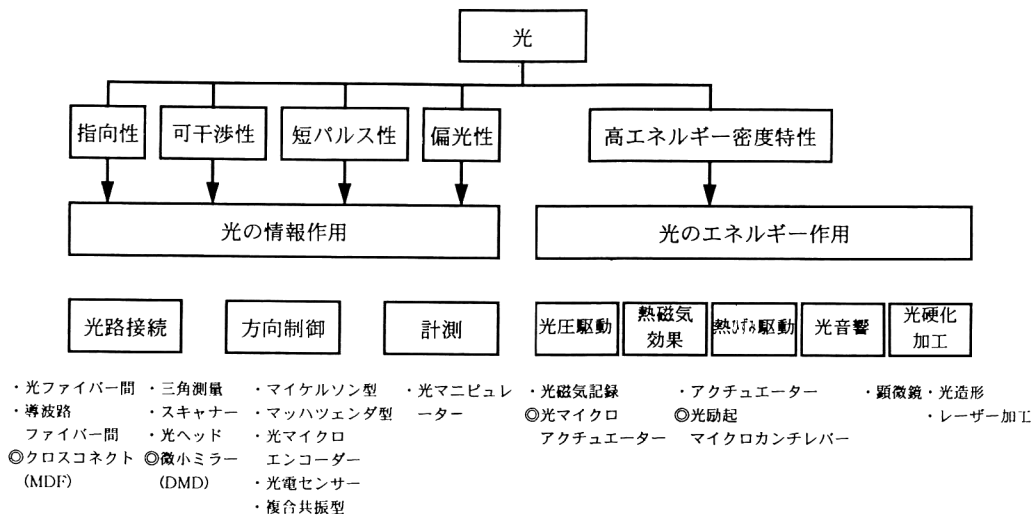


図2 マイクロシステム技術と融合するオプトメカトロニクス技術 (“マイクロメカフォトニクス”)

2.2 マイクロメカフォトニクス技術への発展

機械、電気と情報の複合による初期のメカトロニクスに光技術が導入され、技術融合が起こりつつある。これをオプトメカトロニクス技術とすれば、最近のオプトメカトロニクス技術はマイクロシステム技術の導入により、その融合度をますます高めつつあるといっても過言ではない。筆者は、これをマイクロメカフォトニクス技術と呼び、図2にその概略を示す。

光のもつ指向性、可干渉性、短パルス性、偏光性という特性に基づく情報の入力・伝達・記憶・処理・表示作用が、光情報システム構築の大きな原動力となっている。一方、光のもつ高エネルギー密度特性が光のエネルギー作用として働き、新しい応用分野を次々に切り開きつつある。このように光のもつ情報とエネルギーの特性を巧妙に組み合わせることで、次世代オプトメカトロニクスが開花してきた。

図2に示したように、オプトメカトロニクス技術の最前線はマイクロシステム技術の強い影響を受けて進展してい

る。3次元の位置合わせを伴う光路接続技術、光の直進性と同位相性の特徴を生かす方向制御技術、各種の計測、センシングがまず考えられる。次に、フォトン力(レーザー出力300mWで0.1μg重)を利用して、比重1.5、直径50μmの球を重力に抗して浮上させることができる光圧駆動、さらには光を熱に変換することにより熱磁気、熱歪、光音響、光硬化、レーザー加工などへの応用が光のエネルギー作用として、脚光を浴びつつある。これらのうち基本となる光マイクロセンサー、および光励起のマイクロアクチュエーターを取り上げ、次項で紹介する。

3. 光マイクロマシンの微小力センサーへの応用例

ここでは、圧力→光変換の一例として、レーザー複合共振による微小力センシングについて説明する⁶⁾。

3.1 微小力センサーの構造

高分解能(1nm)を有する複合共振型光センサー(CCL: coupled cavity laser diode sensor)と、高剛性の平板形板ばねを組み合わせることにより、小型で簡易なセンサー

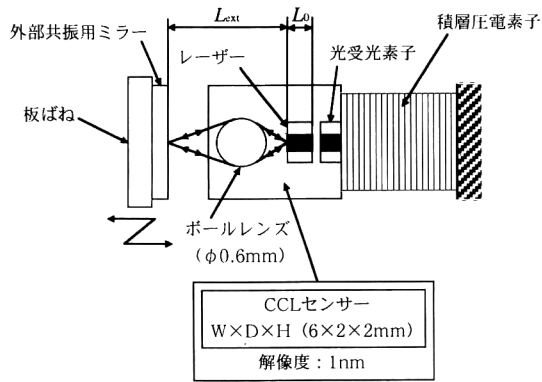


図4 複合共振器センサーのしくみ.

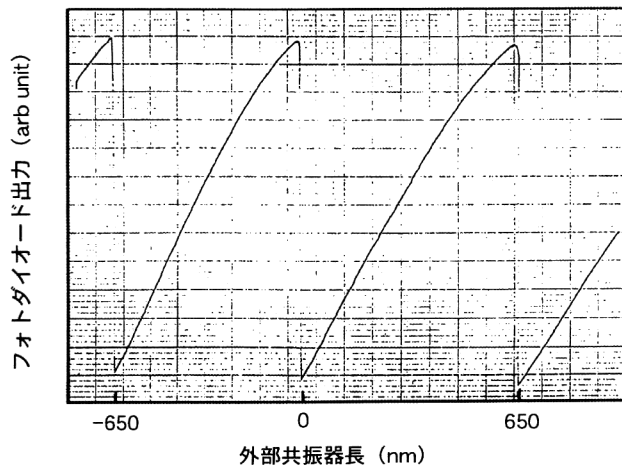


図5 外部共振波長とフォトダイオード出力 ($L_{\text{ext}}=2.1$ mm).

を実現している例である。微小力センサーの構造を図3に示す。先端に負荷点を設けた平板形ばね(幅 10 nm×長さ 12 nm×厚さ 1.2 nm)を一体化したブロック上にCCLセンサーを固定している。フィードバック制御用のアクチュエーターは、圧電素子を用いている。図4に示すとおり、CCLセンサーは、フォトダイオード(PD)が集積化されたInP系ファブリー・ペロー・InP(波長 1.3 μm)本体の共振器と、その端面と弾性体に取り付けられた外部ミラー間で形成される外部共振器内によって複合共振器を形成し、光帰還効率の向上と長作動距離の実現のために、外部共振器内に直径 0.6 mm の TaF₃ 製ボールレンズを挿入した構造である。LD, PD, ボールレンズは1枚の金属ヒートシンク基板上に固着されており、基板を含めた本体の大きさは、幅 6 mm×奥行 2 mm×高さ 2 mm と小型である。

3.2 センシング原理

外力による外部共振器の変位がCCLセンサーにより変位として出力され、微小力が測定される。CCLセンサーでは、外部共振長 L_{ext} がLD本体の光学的共振器長(内部共

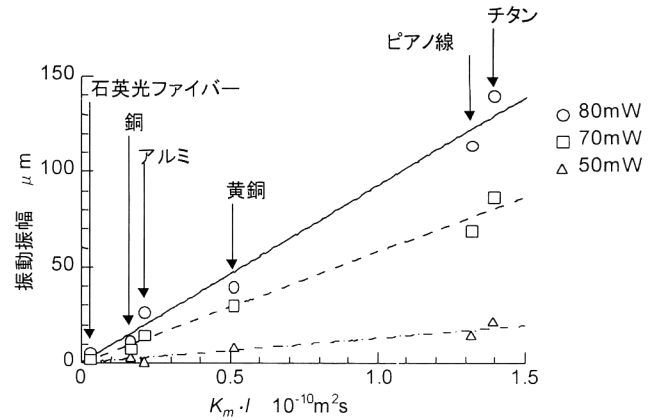


図6 光熱駆動における振動子の材質特性.

振器長 L_0 と実効屈折率の積)の自然数倍となる特定の位置において、PD出力は、外部共振器長に存在して1/2波長(650 nm)周期の線形性の高いアンデューションとなるので、この範囲で変位センサーとして利用できる。一例として、 $L_{\text{ext}}=2.1$ mm 近傍において L_{ext} を変化させたときのPD出力を図5に示す。

しかしこの場合、外部共振器長の測定範囲は約 650 nm しかなく、外力に伴う変化がアンデューションの線形範囲からずれやすく、安定した測定を行うことが困難である。そこで、アクチュエーターを用いて、外部共振器長が一定になるようにフィードバック系を構成し、アクチュエーターの制御信号から外部共振器の変位を検出する。これより、測定範囲をアクチュエーターの最大変位まで伸ばすことができ、さらに外部共振器が変化しても常に一定のアンデューションのため、安定して測定が可能となる。

4. 光熱駆動アクチュエーター

光エネルギーが与えられたときに、これが変換される形態として電気、化学、熱、力学の各エネルギーが考えられる。現在までのこの分野の研究としては、光圧による微小球の光マニピュレーションの研究、光から変換された熱エネルギーを音に変換して光スピーカーとする実験や、圧力センサー、接続不良の非接触検査への応用例など多数報告されている^{7,8)}。

4.1 光熱駆動の原理

光照射により発生した温度分布の不均一が熱膨張の差を生じ、振動子は円弧状に変形する。しかし、振動子の振動となる変形は振動子の厚さ方向の温度分布のみによるものである。そこで、厚さ方向に対して照射面および対面の温度をそれぞれ T_1 , T_2 ($T_2 < T_1$) とおき、この変形が曲げモーメント M_0 により生じる変形と等価と仮定すると、曲げモーメントは次式で表される。

$$\frac{M_0}{EI} = \frac{\beta(T_1 - T_2)}{h/2} = \frac{\beta I_0}{\kappa} \quad (1)$$

h : 振動子の厚さ, E : 縦弾性係数, I : 断面2次モーメント, β : 線膨張係数, κ : 熱伝導率, I_0 : 振動子に照射する光パワー.

ここで材質に固有の値として $K_m = E\beta/\kappa$ を導入すると,

$$M_0 = K_m \cdot I \cdot I_0 \quad (2)$$

と表せる.

また, 振動子の振動振幅 W は M_0 に比例するので,

$$W \propto K_m \cdot I \cdot I_0 \quad (3)$$

と表すことができる.

したがって, 同一の光パワーのもとでも振動子の材質によって発生する曲げモーメントは異なることが導かれる. しかし式(2)が示すように, 材料に依存するパラメータをすべてパラメータ $K_m = E\beta/\kappa$ に包含させることができる. このため材料パラメータが事前にわかっているならば照射パワー I_0 から発生する曲げモーメントを予測することが可能である. この比例関係は, 言いかえれば, 材料に依存しない光熱駆動の普遍的法則である⁹⁾. 図6にその比例関係を示す.

5. 次世代光マイクロマシンへの期待—腕時計サイズ光ナノメモリー

マルチメディア社会の進展に伴い, 高精細動画をデジタル記録できる, 大容量メモリーへの要求が高まっている. 現在, 4.7GBクラスのデジタルビデオディスク(DVD)が実用期に入り, ここ数年は画像メモリーの主流になるとされる. 図7に光メモリーの記録密度のトレンドを示すが, 10~30 Gbit/in²を超える領域では, ほどほどの知恵が求められる. そのうちひとつの可能性がマイクロカ

ンチレバーによる近接場光の読み書きである. 図8は, 5~10年後にはウェアラブルコンピューターが普及し, 高精細動画や3次元画像を扱うために腕時計サイズでテラビット級メモリーが必要になると考えた場合の光メモリーの概念図である. サイズは2×3cmとしている. 1980年代後半から出現したマイクロマシン技術が, 微小機構部分の製造に貢献する. 本提案は記憶容量1Tbit級, 大きさ腕時計型の光メモリーである¹⁰⁾. 開発の第1ステップはCDクラスの記憶容量(650MB)の腕時計サイズ化, 第2ステップは

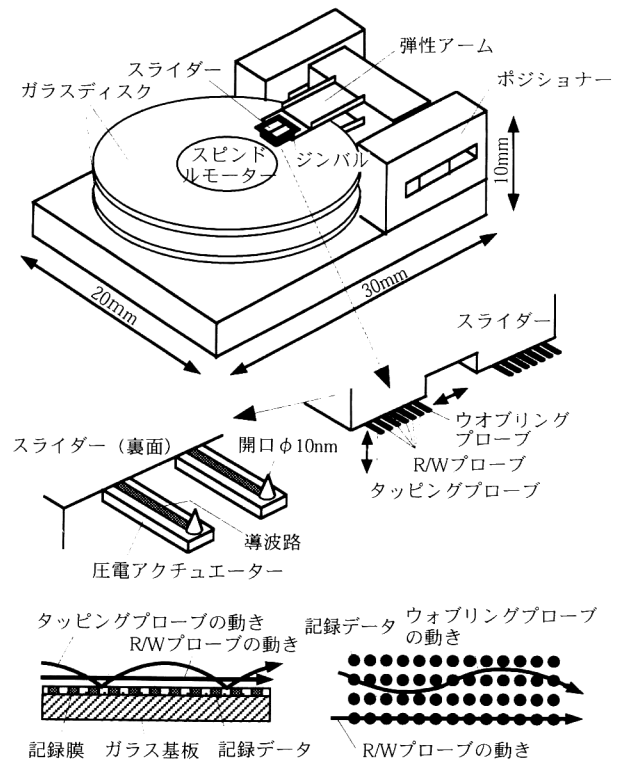


図8 腕時計型次世代ナノ光メモリーの概念図.

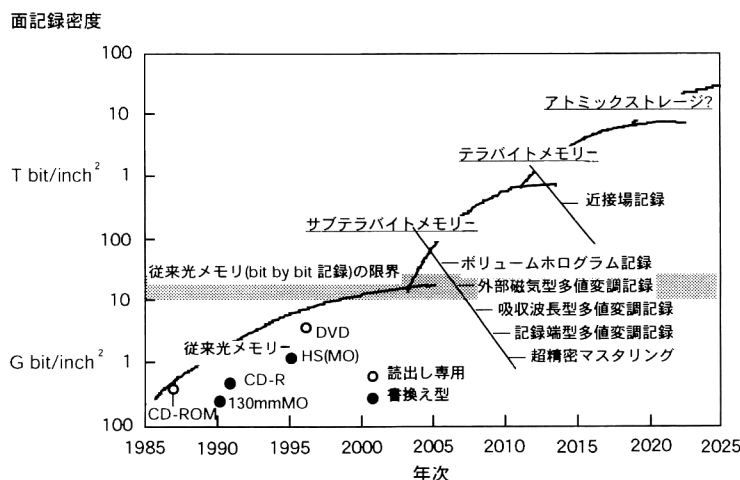


図7 光メモリーの記録原理と面記録密度の動向.

DVDクラスの容量の腕時計サイズ化である。これには、直径10 nm、速度10 m/sで移動するビットの3次元位置を非接触またはタッピング状態で計測し、ナノメートルの精度でヘッドを追従させる技術が必要である。このため、高速ナノトラッキング、精密回転系、光学的read/write(読み書き)技術が必須技術となる。まさに光マイクロマシン技術そのものであり、本技術への期待は大きい。

文 献

- 1) 板生 清, 西田安秀: “光情報技術と精密工学”, 精密工学会誌, **54** (1988) 2217.
- 2) 板生 清: “マイクロオプトメカトロニクス技術とその応用”, マイクロオプトメカトロニクス事典, 五十嵐伊勢美ほか編 (朝倉書店, 1997).
- 3) 板生 清: “オプトメカトロニクス技術展望”, 精密工学会誌, **58** (1992) 401.
- 4) 霜田光一: “レーザー光の力学作用”, 精密工学会誌, **58** (1992) 406.
- 5) 大津元一: “光による単一原子の運動制御”, 精密工学会誌, **58** (1992) 410.
- 6) 伊与木誠人, 河田慶三郎, 鈴木哲也, 片桐祥雅, 原 臣司, 板生 清: “複合共振形光センサによる微小機構の力センシング”, 日本機械学会論文集 (C編), **62** (1996) 3879.
- 7) 羽根一博: “フォトサーマル振動の非破壊光計測への応用”, 光学, **19** (1990) 85.
- 8) 浮田宏生, 上西祐司, 田中秀尚, 板生 清: “GaAs マイクロマシニングによるレーザー集積化振動子の諸特性”, 精密工学会誌, **59** (1993) 1560.
- 9) 鈴木陽子, 近藤由憲, 花田武尚, 片桐祥雅, 板生 清: “光熱駆動式光ファイバ振動子の設計法”, 精密工学会誌, **63** (1997) 1101.
- 10) 板生 清: “腕時計サイズ次世代情報機器の構成”, 日本時計学会秋季講演論文集 (1997) p. 19.

(1998年3月12日受理)