

マイクロマシーニング

解説

藤田博之*

Micromachining

Hiroyuki FUJITA

1. はじめに

本稿で紹介するマイクロマシーニングとは、半導体製造プロセスを拡張して μm オーダーの機械システムを作る技術である^{1)~5)}。この技術の特長は、

- ①組立てのいらぬプリアSEMBル加工
- ②複雑なシステムの一括製作
- ③センサーやマイクロプロセッサを含めた集積化と智能化

④多数のモジュールを用いた自律分散形の運動システムの実現

など数多くある。一言で言えば、小さく賢い運動システムを、組立てなしに大量に作れる、という可能性があり、最近大きな注目を浴びている。従来、機械のマイクロ化を阻んでいた壁（スケーリングの壁、情報交換の壁、単品生産の壁）を打破しようと種々の研究が行われている^{1)~5)}。まずスケーリングについては、マイクロ領域で有利になる静電力を用いたアクチュエーターや、 piezo 素子・形状記憶合金など新材料を用いたアクチュエーターが試作され、マイクロ化に適したデバイスの開発が行われている。情報交換の壁は、③の特徴を生かし個々のアクチュエーターに、下位の閉ループ制御系や情報処理系を集積化することで解決する。また、①と②の特徴を生かして、バッチプロセスによる大量生産を可能にし、単品生産の壁を撃ち破る。

無論、この方法にも限界がある。平面的なマイクロマシーニングプロセスでは、本当に複雑な三次元構造を作ることは難しいし、外部へ直接力や動きを取り出すことも現状では困難である。そこで、プロセスの制約の範囲内で上述したような特長を生かせるよう、マイクロ運動システムに適したシステムアーキテクチャーを考案する必要がある。このアーキテクチャーは、従来の3次元機械とは全く違った姿になると思われる。このため、単なる小型化した機械と区別して、本稿で述べる新しい運

動システムをマイクロメカトロニクスシステム（まめシステム）と呼んでいる。まめシステムの考え方やそれを支える技術は最近になって研究され始めたため、現在のところ基礎技術やデバイスの研究と、特定の応用分野での製品開発を同時に行う必要がある。

従来の機械の小型化を行うのではなく、まめシステムの特徴を生かす、新たな機構とシステムアーキテク

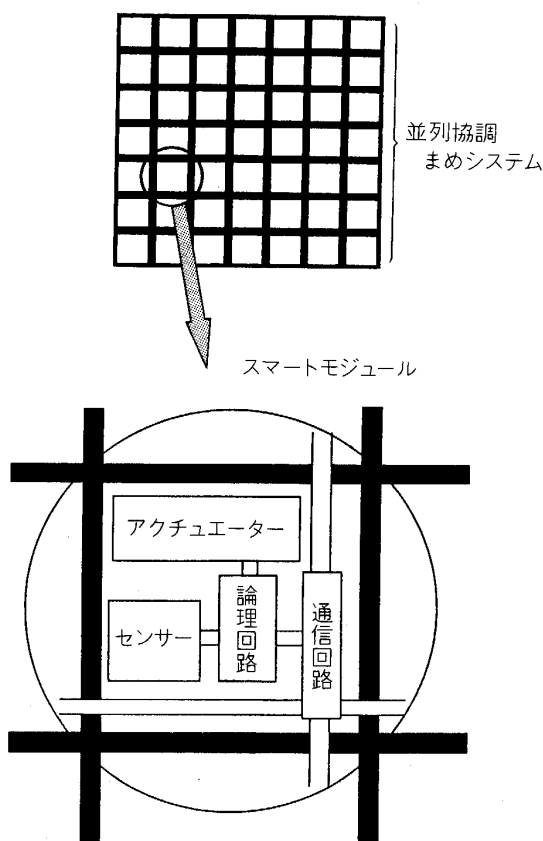


図1 センサー・アクチュエーター・電子回路を含むスマートモジュールから構成される並列協調型システム⁷⁾

平成3年8月9日受付 (Received Aug. 9, 1991) (依頼解説)

* 東京大学生産技術研究所助教授 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi Minato-ku, Tokyo 106)

Key words : micromachining ; micro actuator ; micro electro mechanical systems ; MEMS ; micromachine.

チャーの一例として、筆者らは並列協調型マイクロ運動システムを提案してきた⁶⁾。筆者らの提案する並列協調型マイクロ運動システムとはセンサー、アクチュエーター、ロジック回路を同一のプロセスで一体化したモジュールを作り、その同一モジュールを多数、直並列に結合したシステムである(図1)。各モジュールは互いに協調動作をして、全体として一つの仕事をする。このようなシステムの例を、生物をモデルにして考えた。すなわち、搬送機能を持つ繊毛運動システムと自走機能を持つ蠕動運動システムである。これらのシステムのためのアクチュエーターを半導体マイクロマシーニングで作している⁷⁾。

2. 半導体マイクロマシーニング

2.1 概要

半導体マイクロマシーニングは、薄膜の形成・フォトリソグラフィによるパターンニング・エッチングによる材料の選択的除去の三つの工程を繰り返して行われる。薄膜の形成には、真空蒸着法・スパッタリング法・CVD法・プラズマCVD法・MBE法などがあり、エピタキシャル成長した単結晶膜・多結晶膜・アモルファス膜が形成できる。もちろんこのような膜の結晶構造は、製膜後の熱処理によって変えることができる。フォトリソグラフィは、マスクパターンを光やX線で投影したり、電子ビームやイオンビームなどで直接描画したりすることで、感光膜(レジスト)を望みの形の微細パターンで表面に残すことができる。このレジストパターンを、ウェットとドライのエッチング法で基板に転写する。エッチングの時、数 μm 程度の膜厚にわたって微細な形状が保たれるよう、表面と垂直にエッチングが進む、異方性エッチングを行う必要がある。

2.2 マイクロマシーニングの発展の歴史

半導体マイクロマシーニングの発展の歴史をたどってみよう。シリコンをエッチングやリソグラフィで微細加工して、3次元的な機械部品を作る研究は、70年代に始まった⁸⁾。微細な流路をSi基板上に作ったり、片持ち梁やダイヤフラム構造を静電気力等で弾性変形させた例がある。後者の弾性変形する構造は、現在、圧力センサー・加速度センサー・振動形センサー等に広く実用化されている。これらの構造は、主としてウェットプロセスによる異方性及び等方性エッチングで作られ、基板の厚み全体を対象とするためバルクマイクロマシーニングとよばれている。

1987年に画期的な新プロセスが導入された。表面マイクロマシーニング法と呼ばれる手法により、中心軸の回りを自由に回るギアや、ガイドの下を左右に動くスライダ等々を、多結晶Si薄膜で作れるようになった⁹⁾。これらの機械部品の大きさは、約10~100 μm と、髪の毛の太さと同じ程度である。

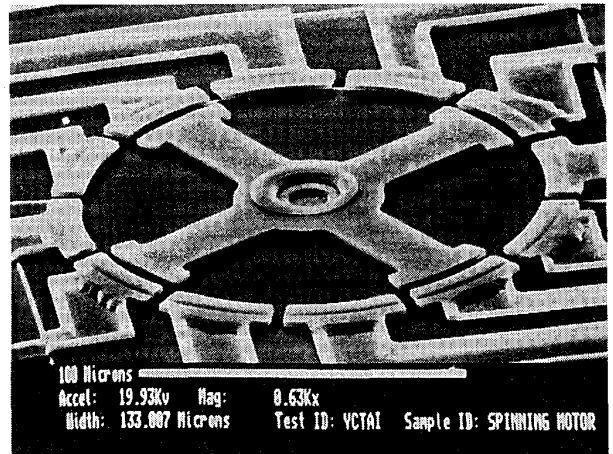


写真1 直径120 μm の静電同期式マイクロモーター¹⁰⁾

表面マイクロマシーニング法の要点は、多結晶シリコンに比べりん珪素ガラス(PSG)が容易にエッチングされる性質を利用し、間にPSGの層を挟みながら、いろいろな形が多結晶シリコンの部品を次々に重ねていって、最後にふっ酸でPSG層を溶かして多結晶シリコンの部品を可動にする点にある。このように、構造部品の間に挿入しておき後でエッチングしてしまう層のことを、分離層(Sacrificial layer)と呼んでいる。構造部品になる材料と分離層になる材料には、いろいろな組合せができる。構造材料/分離層材料/エッチング液の順で例を示すと、ポリイミド/アルミニウム/アルミエッチャント、シリコン窒化膜/ポリシリコン/KOH, TiNi/ポリイミド/酸素プラズマ、等が用いられている。

表面マイクロマシーニング法で作られた、マイクロ静電モーター¹⁰⁾を写真1に示す。UCパークレーで試作されたもので、ローターとステーターの端部(2 μm 厚)の間に働く力を利用するため、エッジ駆動形と呼ばれる。材質は、多結晶のシリコン薄膜(厚さ2 μm)である。円周上に配置されたステーター電極は三つ目ごとに並列に接続されており、三つの入力端がある。電圧をこれらの入力端に順次切り替えて印加することで、ローターを吸い付けて回転させる。印加電圧は、1~2 μm のギャップに対し、300V程度である。駆動トルクは、数pNmの程度と見積もられている。回転数は、500rpm程度と報告されているが、これはトルクとローターの質量から考えると、かなり遅い速度である。原因は、ローター内側に窒化シリコン膜を付けて滑らかにしているにもかかわらず、まだローターとシャフトの間の摩擦が大きいためである。

2.3 LIGA プロセス

表面マイクロマシーニングで作る機構は、プロセスの性質上、3次元とはいっても基板の表面に作られた平面的なものに限定されている。平面的機構だけでは極めて

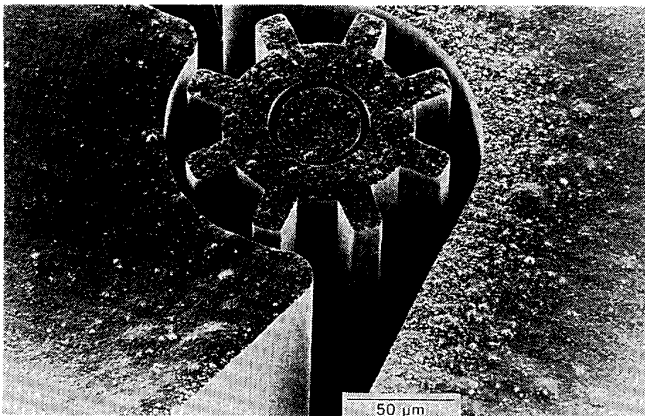


写真 2 LIGA プロセスによるマイクロ空気タービン¹¹⁾

限定された動作しか行えないため、どうしても3次元的な微小機構が必要となる。3次元的な構造を得るための一つの手段が、LIGA プロセスと呼ぶ製法である。LIGA プロセスは、X線リソグラフィーを利用して、幅は0.1 μm以下の精密さで高さ1 mmにも達する微細構造を作り、電鋳や射出成形を利用して金属やプラスチックにその構造を転写する技術である。材料の多様性や構造の堅牢さと、半導体技術との整合性を兼ね備えている点が注目される。また、低コストの大量生産のためにも大きな意味がある。この技術は、ドイツで10年以上前から開発されており、これまでも発表があったが、構造は微細でも固定のものが多く、ギアのようにシャフトの回りを自由に回転するような構造は作れなかった。これを可能にするため、上述した分離層の技術をLIGAプロセスにも取り入れたプロセスも開発された¹¹⁾。写真2は固定したシャフトにはめた可動の空気タービンの試作例であり、顕微鏡下で細いノズルから空気を当てて回転する様子を見学したことがある。さらに、シリコン基板上に微細構造を転写する可能性もあるという¹²⁾。これができれば、シリコン基板に作った電子回路で、LIGA プロセスによるマイクロ構造を駆動したり制御したりできることになる。

2.4 接合技術¹³⁾

マイクロマシーニングによって得られた微細構造を更に立体的に積み重ねて行くには、シリコンやガラス基板の接合技術は、大層重要である。接合により、微細な流路の形成、駆動の封止、マイクロメカニズムの重層化などが可能となる。接着剤、はんだ、溶接などの方法も用いられるが、半導体マイクロマシーニングと適合性の良いのが、シリコンとガラスの陽極接合とシリコンの直接接合である。

陽極接合は、ガラスとシリコンもしくは、ガラスと金属の接合を行うもので、通常300~500°C程度に加熱した状態で、両者の間に電圧を加えて接合する。この時、

ガラスが陰極になるように電圧の極性を選ぶ。この技術の変形として、シリコン基板上に薄膜ガラスや酸化膜をつけ、その膜を介してシリコンとシリコンの接合を行う場合もある。東北大学の江刺らは、低融点ガラスをスパッタリングで付け、ほぼ常温に近い温度で接合を行うことに成功している。

シリコンの直接接合は、清浄で平坦なシリコン基板同士を、間にゴミや空気が入らぬようにして密着し、温度を1000°C程度に上げて数時間おくと、完全に接合してしまうという方法である。基板の表面にはシリコン酸化物の膜があっても良い。また結晶方位をそろえて、p形とn形の基板を接合すれば、pn接合を形成することができる。また、接合した後一方の基板を研磨で薄くすることで、ダイヤモンド構造を得ることができる。このダイヤモンドは、薄膜形成技術で作られたものと違って、機械的性質の良く分かった単結晶シリコンでできているので、使用が容易である。

また、直接接合を利用した「ロストウェーハプロセス」も考えられている。シリコン基板の表面にマイクロ構造や回路等を加工しておき、それを反転して、他の基板(ガラスやシリコン)に接合する。もとの基板のうち構造の作られていない部分を上面から削摩やエッチングで無くしてしまうと、下の基板上に複雑な可動構造をとり付けることができる¹⁴⁾。上の基板のほとんどの部分を取り除いてしまうため、ロストウェーハ法と呼ぶのである。

2.5 その他のマイクロメカトロニクス用材料

微小機械部品の素材として、主にシリコンが使われてきた。しかし、ポリイミドなどの高分子材料⁷⁾、水晶¹⁵⁾やZnO薄膜、PZTピエゾ厚膜¹⁶⁾等の圧電材料、形状記憶合金¹⁷⁾やタングステン¹⁸⁾¹⁹⁾のような金属材料も利用されるようになってきた。窒化シリコン膜による摩擦の低減の試み¹⁰⁾も含めて、シリコン以外の多様な材料が用途に応じて次々と用いられるであろう。しかしこのとき気を付けなくてはいけないのが、マイクロマシーニング技術との適合性である。最初に述べた、マイクロマシーニングのさまざまな利点があるまま生かせる素材と加工法を開発する必要がある。

2.6 材料特性の測定

マイクロマシーニングプロセスは開発されて間がなく、あるプロセスのある条件で部品を作った時、機械的強度や表面状態がどうなるかはほとんど知られていない。写真1のマイクロモーターの写真だけを見ると簡単にできそうであるが、分離層を溶かした直後は自由に動いていたものが、1週間後には基板にくっついてしまって動かなくなったり、薄膜の成長時に生ずる残留応力のため、分離層を除き去ると部品が反ってしまって困ったり、といろいろの困難がある。また絶縁耐力が大きく、摩擦に強い膜はどう付けたら良いとか、ある重さを支えるにはどれだけの厚みの片持ち梁が必要か、といった

質問に答えるには、プロセスと被生産物の機械的性質とを関係付けるデータベースが必要である²⁰⁾²¹⁾。

現在広く使われている多結晶シリコンを筆頭とする各種薄膜の、機械的特性を明らかにする必要がある。特にこの特性は、製造プロセスの各種条件に大きく依存するため、データベースの形で蓄積することが大切だ。米国では各大学にノウハウの形で、このような蓄積がされていると推測される。いくつかの研究機関が、基礎的な特性を測定した結果について報告している²⁰⁾。わが国においては、一機関ですべてのデータを収集する能力も時間も無いであろうから、多くの機関が協力してこの事業に当たるべきである。

3. マイクロトライボロジー

3.1 マイクロ領域における摩擦とスケーリング則

スケーリングとは、物体の寸法を変えていった時に、種々の物理量が寸法の何乗に比例して変わるかを示す法則である。ミクロの世界では、寸法の3乗に比例する体積の効果(例、重さ、慣性)が相対的に弱くなり、寸法の2乗に比例する面積の効果(例、放熱、表面摩擦)が卓越する。このため「空中で物体を手から離せば落下する」というマクロの世界の常識は、目に見えないくらいの小さなほりについては成立しない。ほりは極めて軽く、表面に働く空気の摩擦により、いつまでも空中に浮遊する。このため、マクロの世界でうまく動く機械も、そのまま小さくしたのでは全く動かないか、極めて効率が悪くなって実用化できない。

摩擦力は物体間に働く垂直抗力に比例する。ミクロの世界では、静電引力や表面の分子間力などが、重力に替わる垂直抗力の源となる。これらの力は寸法の2乗で決まるため、摩擦力もミクロの世界で支配的となる。しかし、質量に比例する慣性力は極めて小さいため、マイクロ運動システムの性能は、加減速特性でなく、摩擦に打ち勝つ特性で決まる。

3.2 摩擦の測定

ローターとステーター間の摩擦特性を知るため、このモーターを用いて、ステーター電極に印加する電圧を1相分回転方向に進めた時のローターの追従する動きを調べた²²⁾。この動きはローターのステップ応答とみなせるが、オーバーシュートが一つかまったく無い形であった。これから減衰定数を求め、それを摩擦係数に換算すると0.21~0.38の間になった。また、AT & Tのベル研究所では、ローターを微小流路中に作り、気流で回す実験を行った²³⁾。気流を送ると、可動部と固定部の間に気体層が生じて、速い回転が可能になる。気流を突然遮断すると、ローターは徐々に回転を止めるので、この減衰定数により摩擦係数を推定した。この結果、0.25~0.35と上述のバークレー校と同程度の値が得られた。また彼らは、摩擦特性も調べた。10⁶回転した後にロー

ター内径は4 μm 大きくなり、1~2 μm の摩耗粒子が多数観察された。

また UC バークレーのハウ助教教授らのグループは、多結晶シリコン同士の摩擦係数および、多結晶シリコンとシリコン窒化膜との摩擦係数を測定した²⁴⁾。

この結果、多結晶シリコン同士の摩擦係数は4.9 \pm 1.0、多結晶シリコンとシリコン窒化膜との摩擦係数は2.5 \pm 0.5であった。このように1より大きな摩擦係数が得られた理由は、俗にスティクションと呼ばれる固着現象が生じているためと思われる。

3.3 摩擦との戦い

マイクロアクチュエーターの性能向上には、摩擦の軽減が必要である。摩擦を軽減するには次のような手段が有効である。

- ① 支持の弾性変形範囲で本体を動かす
- ② ころがり運動を使う
- ③ 可動部を浮上する

さらに、材料に対し期待されているのは、潤滑性の改善である。NTTの金子氏は、「マイクロトライボロジーとMEMS」と題した論文で、ミクロな表面現象の理解が摩擦の解明に不可欠なことを示した²⁵⁾。逆に、まめシステム(MEMS)はこの理解を助ける測定ツールを供給できるので、トライボロジーとまめシステムは相互に助け合う関係にある。このため今後は、両方の専門家が協力してこの研究を進めなければいけない。また、別の発表では、さまざまな材料についての摩擦係数を測った実験データも示された²⁶⁾²⁷⁾。静電マイクロモーターで生ずるような負荷条件で実験したところ、ダイヤモンド状炭素膜が、0.22程度の低い摩擦係数となることが分かった²⁶⁾。このような測定を積み上げ、摩擦や摩耗の少ない材料の組合せを見いだせば、適当な成膜技術によってマイクロ構造の表面改質が可能である。

4. おわりに—他の工学分野との関係—

ロボティクスと同様に、マイクロメカトロニクスも境界領域にある分野であるから、他の工学研究分野との関係を明らかにしておく必要がある。こうすることによって、上に述べたようなマイクロメカトロニクスの抱える研究課題を、どの分野の専門家に相談して解いたらいいのかわかる。ひいては、その専門家が本分野に参加してくれるきっかけにもなろう。微小化にあたり重大と考えられる問題と、それに関係する分野をいくつか例示してみる。

- ① 表面粗さと物体の大きさが同程度になったことによる、微小潤滑の問題(トライボロジー)
- ② 材料強度がプロセスや表面状態に大きく影響されることによる、微小材料力学の問題(材料科学)
- ③ 流路が極端に小さくなり、境界層や分子運動が支配的になる微小流体力学の問題(フルイディクス)

④自律自走マイクロシステムに必須の微小エネルギーの問題 (化学・電気工学)

⑤質量が減り, 表面の影響 (例えば摩擦) が大きくなったことによる, 非線形制御の問題 (制御工学)

⑥外界と情報や力をやり取りするためのインターフェースの問題 (通信工学・機械工学)

⑦信頼性を評価するための, 劣化・破壊モデルや加速度試験法の開発の問題 (材料科学)

以上7例を挙げたが, これにとどまらず工学のほとんどすべての分野に対応して固有の問題点がある. このように多くの技術移転を必要とする場合, 情報の流通のよいことと, 皆が共同研究に積極的なことが必要である. マイクロメカトロニクスの研究をいっそう推進するには, 多くの分野の研究者が一同に会して, 十分なプロセス設備を使いこなしながら研究のできる環境づくりが大切である.

文 献

- 1) 電気学会論文誌 D, **108** (1988)3, p. 205
- 2) 精密工学会誌, **54** (1988)9, p. 1625
- 3) 計測と制御, **28** (1989)6, p. 479
- 4) 日本機械学会誌, **92** (1989)853, p. 1024
- 5) 機械設計, **35** (1991)6, p. 26
- 6) N. TAKESHIMA and H. FUJITA: Recent Advances in Motion Control, ed. by K. OHNISHI, G. BUJA and H. FUJITA (1990), p. 125 [Nikkankogyo Publ.]
- 7) 竹島尚弘, 小林 大, 藤田博之: 平成3年電気学会全国大会講演論文集第7分冊 (平成3年), p. 107
- 8) K. E. PETERSEN: Proc. IEEE, **70** (1982)5, p. 420
- 9) L. S. FAN, Y. C. TAI and R. S. MULLER: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-35** (1988)6, p. 724
- 10) Y. C. TAI and R. S. MULLER: Sensors & Actuators, **20** (1989), p. 49
- 11) W. EHRFELD: "The LIGA process for microsystems", in Micro System Technologies 90—Proc. 1st International Conf. on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, ed. by H. REICHL, Berlin (1990年9月), p. 521 [Springer-Verlag]
- 12) W. MENZ, W. BACHER, H. HERMENING and A. MICHEL: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月), p. 69
- 13) 江刺正喜: 日経エレクトロニクス, 1989年8月21日号, p. 150
- 14) K. SUZUKI and T. TANIGAWA: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月), p. 15
- 15) G. DELAPIERRE: Integrated Micro-Motion Systems—Micro Machining Control and Applications, ed. by F. HARASHIMA (1990), p. 117 [Elsevier Scien. Publ.]
- 16) K. R. UDAYAKUMAR, S. F. BART, A. M. FLYNN, J. CHEN, L. S. TAVRAN, L. E. CROSS, R. A. BROOKS and D. J. EHRlich: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月) p. 109
- 17) J. A. WALKER and M. MEHREGANY: Sensors & Actuators, **A21-A23** (1990), p. 243
- 18) L. Y. CHEN and N. C. MACDONALD: Proc. 3rd IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Salt Lake City, USA (1989年2月), p. 82
- 19) L. Y. CHEN and N. C. MACDONALD: "A Selective CVD Tungsten Process for Micro Motors", Tech. Digest of 6th Internatl Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'91), San Francisco, USA (1991年6月), p. 739
- 20) 日経エレクトロニクス, 1989年8月21日号, p. 125
- 21) S. D. SENTURIA: Intergrated Micro-Motion Systems—Micro Machining Control and Applications, ed. by F. HARASHIMA (1990), p. 95 [Elsevier Scien. Publ.]
- 22) Y. C. TAI and R. S. MULLER: Sensors & Actuators, **A21-A23** (1990), p. 180
- 23) K. J. GABRIEL, R. BEHI and R. MAHADEVAN: Sensors & Actuators, **A21-A23** (1990), p. 184
- 24) M. G. LIM, J. C. CHANG, D. P. SCHULTZ, R. T. HOWE and R. M. WHITE: Proc. 3rd IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Napa Valley, USA (1990年2月), p. 82
- 25) R. KANEKO: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月), p. 1
- 26) S. SUZUKI, T. MATUURA, M. UCHIZAWA, S. YURA, H. SHIBATA and H. FUJITA: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月), p. 143
- 27) K. NOGUCHI, H. FUJITA, M. SUZUKI and N. YOSHIMURA: Proc. 4th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991年1月), p. 148