特 集

マイクロマシン

⑤ マイクロアクチュエータと材料*

生 田 幸 士**

Micro Actuator and Material Science*

by Koji Ikuta**

キーワード：マイクロアクチュエータ、マイクロマシン、MEMS、ミニチュアマシン、形状記憶合金、圧電素子、静電モータ

1. は じ め に

昨今マイクロマシンの知名度が上がるにつれて、この分野で仕事をしている我々は、いろいろな人からいろいろな質問を受ける。

まず一番多いのが「本当にそんな夢のような機械ができるのか？」である。

「イエス。できると思うから研究をしているんです」と答えると、畳み込むように「どうやって作るのか？」と聞かれる。

「精密機械加工のマイクロ化と、シリコンをはじめとする半導体加工技術などがありますが、まだまだ発展途上です。他にも新方式のマイクロマシン作製手法が研究されています。私もひとつ考えました」

「へえー。作れそうなんですね。じゃ、どうやって動かすの？」

「静電気や電磁誘導を利用したマイクロモータとか、形状記憶合金、圧電膜、熱膨張などを利用した種々のマイクロアクチュエータが試作されています。これらもまだ研究段階ですが」

「ほっほー、動かせるんですね」

そして最後が、「そんな小さな機械がいったいどんな役に立つのか？」である。

「私個人は医用やバイオテクノロジー、化学分析装置のマイクロ化などに興味があります。ニーズも明

確ですしね。光メカトロニクスや STM などにも期待が持たれています。この分野の研究者はまだそれほど多くはないのですが、各自いろんな考えを持って個性的に研究を進めているんですよ¹⁾

以上がマイクロマシンをめぐる典型的な会話の例である。感の良い読者はこれらの会話から、下記の現在のマイクロマシンが抱える課題が推察できるであろう。

1. 作り方……微細加工技術
2. 動かし方……マイクロアクチュエータ
3. 使い方……適切なアプリケーション

また後述するように、実は各課題の詳細はマイクロマシンの寸法と深い関係にある。

本稿では3つの課題の中でもとりわけ難易度の高いマイクロアクチュエータについて、最新事例全般の紹介²⁾よりも、駆動原理や材料学的側面に重心を置いて解説してゆくことにする。

2. マイクロマシンの分類比較

表1は現在「マイクロマシン」と一口に言われているものを、寸法に応じて「MEMS」(Micro Electro Mechanical Systems)と「ミニチュアマシン」に大別したものである。

この表からわかるように両者は単に寸法が異なるだけでなく、素材、加工法、組立法、駆動法、構造、基本特性、応用分野などに関して多くの相違点を有する。そのため実現に際しての問題点や解決法も微妙に異なる。

主に1ミリ以下のマシンを意味する MEMS は、

*原稿受付 平成6年8月4日

**非 会 員 名古屋大学工学部マイクロシステム工学専攻 Non-member, Nagoya University, School of Engineering Department of Micro System Engineering

IC や LSI など従来半導体の集積化に用いられてきた微細加工技術を用いてマイクロ機械部品を作製する。このため機械要素のマイクロ化は容易であるが、厚みの無い平面的な構造に限定されてしまうことが多い。しかしアクチュエータ、サンサや演算部を組み込んだ複雑で集積度の高いメカトロシステムを大量生産できるため、製造コストの大幅な低減が期待できる。この点がマイクロマシンの忘れてはならない重要な革命的意義の一つでもある。

また、マイクロサイズの世界では各種の「スケール効果」の影響が無視できない場合が多くなる。熱、流体、摩擦、吸着などの表面効果、材料物性、運動制御などについて、機械要素のマイクロ化に起因する特性変化が顕著になってくる。これらについての具体的検討はまだ開始されたばかりである。特に動きのあるマイクロアクチュエータの実用化には不可欠な分野であるため、今後関連理工学分野の専門家による研究に大きな期待が寄せられている。

一方ミニチュアマシンは、基本的には従来の小型メカトロニクスの上二あり、サイズのにもスケール効果が大きく効いてくることは少ない。そのため低コストに小型化できる加工法や従来手法の超精密化が鍵となる。アクチュエータに関しても通常サイズのマシンと同様の電磁方式が利用可能ではあるが、今後はより機構の単純な圧電素子や形状記憶合金などの固体アクチュエータの利用度が増すと考

表1 現在のマイクロマシンの分類

	MEMS	ミニチュアマシン
サイズ	1 μm ~ 1 mm	100 μm ~ 10 mm
素材	シリコン、金属 高分子、セラミック	金属、高分子 セラミック
加工法	異方性エッチング θ-プロセス(θプロセス) LIGAプロセス マイクロ光造形法 (IH ² etal等)	各種機械加工の超精密化 放電加工 レーザ加工 光造形法
組立法	大量パッチ処理(7t ² リ不要)	個別精密アセンブリ
駆動法	静電気、熱膨張 圧電素子、電磁誘導モータ 圧電薄膜	電磁モータの小型化 ケーブル、圧電、SMA 超磁導、高分子アクチュエータ
構造	多層平面的(2.5次元)	立体的
特徴	大量一括製造可能 立体加工困難 集積化、機能化容易 強度、発生エネルギーは極小 スケール効果の影響が大	組立困難、小量生産 立体加工容易 配線、調整必要 強度、発生エネルギーは中 スケール効果の影響は小
実用化	未解決課題多い(長期的)	比較的实现容易(短中期的)
期待される 応用分野	知能化マイクロセンサ 細胞操作用機器 マイクロバルブ、ポンプ トンネル顕微鏡用ヘッド 光磁気ヘッド マイクロ光素子 体内薬物投与	マイクロサージャリー 能動内視鏡、能動カテーテル バイオテクノロジー装置 小型精密分析機器 各種人工臓器 検査診断ロボット バーチャルリアリティ

えられる。

MEMS、ミニチュア両者の応用に際しては、当然各々の長所を生かした物が考えられる。特に医療分野など、ある程度の大きさの力とパワーを必要とする場合にはMEMSよりミニチュアマシンの有用性が高いケースも多いであろう。

ただし、表1の内容はあくまで現在の技術レベルでの分類比較であることに注意する必要がある。将来MEMSの立体加工や、ミニチュアマシンの大量生産と低コスト化が可能になることもありえるだろう。筆者はむしろそれらを可能にすることにこそ挑戦すべき重要課題の一つであると考えている。MEMSとミニチュアマシンはそれぞれ独立に進歩するだけでなく、両者が融合したマイクロマシンが望まれている。

3. マイクロアクチュエータの開発

表2はマイクロマシンのキーコンポーネントの一つである各種マイクロアクチュエータの駆動原理、駆動形態、駆動範囲、発生力、応答速度、駆動電圧、IC等半導体との同時集積化の難易度、およびマイクロ化の際の注意点についてまとめたものである。

この表からも分かるように各アクチュエータとも一長一短があり、万能な物はまだ存在しない。マイクロマシンに依じて最適なアクチュエータを選択してゆくことが重要となる。また、表2には入れなかったが、機能性高分子を用いたマイクロアクチュエータの開発も行なわれている。

今後マイクロアクチュエータに適した機能材料や新素材の開発が実用化の鍵であり、材料研究者・技術者との共同研究の重要性が増す。

表3は現在までに試作されたマイクロアクチュエータと構成材料、応用分野を整理したものである。アクチュエータの駆動原理に応じて素材が決まる。中でも圧電や形状記憶合金などの固体マイクロアクチュエータでは、材料自身の物性が変化して機能するため、シリコン以上に高精度な作製プロセスの管理が必要となる。

静電アクチュエータではシリコンプロセスを用いるため主にシリコンが利用されてきた。しかし最近ドイツや米国ではLIGAプロセスや、厚いポリイミドとメッキを組み合わせたプロセスを用いた静電モータの試作駆動に成功し、ニッケルなど金属の利用も行なわれ始めている^{3,4)}。

また最近筆者らは導電性が従来に比べ格段に高い

表 2 マイクロアクチュエータの特性比較

駆動原理	アクチュエータ	駆動形態	駆動範囲	発生力	応答速度	駆動電圧	IC集積化	小型化の際の注意点
静電	回転型	回転	大	小 (数gf)	中～高	高 (5～500V)	◎	出力の取り出しが問題
	リニア型	直動	小	中	高	高 (5～500V)	◎	振動運動に適する
圧電	積層・縦効果型	直動	小 ($\varepsilon < 0.1\%$)	大 (4kgf/mm ²)	高 (~ 100 kHz)	高 (10～200V)	○	ヒステリシス・クリープあり
	バイモルフ型	直動 (曲げ)	中	小 (数gf)	中 (~ 1 kHz)	高 (10～200V)	○	ヒステリシス・クリープあり
	超音波モータ	回転	大	大	中～高	高 (5～100V)	△	共振周波数の上昇による 小型化の制限, 放熱必要
熱	形状記憶合金	直動	大 ($\varepsilon < 6\%$)	大 (40kgf/mm ²)	中	低 (~ 5 V)	○	放熱必要・小型化容易
	熱膨張	直動	小 ($\varepsilon < 0.5\%$)	大	中	低 (~ 5 V)	○	同上
	バイメタル	直動 (曲げ)	中	小	中	低 (~ 5 V)	○	同上
電磁誘導	通常モータ型	回転直動	大	小～中	中～高	低	△	磁束密度の低下による 小型化の制限あり
	超電導型	回転直動	大	小	中～高	低	△	低温冷却必要 摩擦の問題はない)

表 3 マイクロアクチュエータ材料の分類

アクチュエータ	利用材料	応用分野	主要研究機関
静電モータ(回転型)	多結晶 Si	—	MIT, カリフォルニア大など
静電リニア(直動型)	単結晶	—	東大
同上(くし型)	多結晶 Si	—	カリフォルニア大
静電グリッパ	導電性UV樹脂	—	九工大
圧電(バイモルフ型)	ZnO	STM プローブ	スタンフォード大
圧電(超音波型)	—	—	MIT
形状記憶合金	TiNi	マイクロバルブ	TiNi-Alloy 社, Bell 研 九工大, 山口大など
熱膨張	単結晶 Si + 液体	マイクロバルブ マイクロポンプ	スタンフォード大 東大
バイメタル	単結晶 Si + 金 ポリイミド	— 繊毛運動	フラウンホーファー研究所 東大
熱+空気圧	単結晶 Si	マイクロポンプ	トウェンテ大
電磁誘導(通常モータ型)	多結晶 Si + (FeNi, Ni)	—	ジョージア工大, ウィスコンシン大等
同上(超伝導型)	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	浮上リニア	東大

紫外線硬化樹脂を開発し、マイクロ光造形法 (IH プロセス)^{5,6)} の利用によって 1mm 以下のサイズで開閉運動ができるポリマー製の静電マイクログリッパの試作駆動に成功している。(図 1 参照)⁷⁾

圧電アクチュエータのマイクロ化には ZnO や

PZT などが利用されているが、今後はより多様な各種の誘電材料のマイクロ化も行なわれると思われる。

形状記憶合金アクチュエータのマイクロ化にはバルク材の場合と同様 TiNi 合金のみが試みられてい

る。この理由は TiNi が他の Cu 基形状記憶合金に比べ格段に良好な形状記憶特性を持っているからである。出力や形状回復ひずみの大きさや繰り返し疲労の点で群を抜いている TiNi をマイクロ化できれば、マイクロバルブをはじめとする多種多様な応用が進展する可能性を秘めている。

熱膨張やパイメタルは原理は新しくはないが、マイクロマシンの分野では金属よりも単結晶シリコンや高分子のポリイミドなど材料選択範囲が広い。製作も比較的容易であることから多くの研究機関で試作されている。

電磁誘導を利用したマイクロモータの研究も最近行われ、多結晶 Si の基盤上に Fe-Ni や Ni 製のロータを作製したマイクロステッピングモータの試作駆動がなされている⁸⁾。磁性体に関しては YBa₂Cu₃O_{7-x} などの超伝導磁石を用いたリニアモータの試作も行われている⁹⁾。

4. マイクロアクチュエータ用材料研究の重要性

マイクロアクチュエータにとって材料研究が不可欠な理由は、従来と異なる素材を用いたり、同じ素材であっても異なる使われ方をするため、基本特性すら十分知られていないからである。

従来の「マクロサイズ」(マイクロに対して通常の大きさのものを意味するもの)のメカトロニクス機械の場合は、溶解凝固されたインゴットを加工成形した「バルク素材」を用いて構造、機構、アクチュエータ、センサ等の構成要素を個別に作製し、その後、個々を組み合わせ全体として高機能なシステムを構築する手法がとられてきた。

さらに各々の市販部品は製造メーカーが異なっても規格化、標準化されているものが大半であるため、機械システム全体の整合性や強度などは設計上重要視されてきたが、各要素の物性はブラックボックスとして深く立ち入った注意を払う必要は少なかった。

一方 1 ミリ以下のサブ・ミリサイズの MEMS では事情が大きく異なる。機械システムは一般に各種の薄膜によって構成され、構造部、アクチュエータ部、機構部、センサ部、信号処理部などの要素が相互に混在同居する。そのため設計者はすべての構成要素の電気的かつ機械的材料特性に注意を払わなければならない。特にアクチュエータ材料やセンサ材料などデリケートな特性を持つものが構造材料をも兼ねるようなケースでは、材料特性の精密制御の重

要度は格段に大きくなる。また、特性の製造法や製造条件への依存も無視できない。

以上の議論は下記の 3 つのケースに整理できる。

4.1 素材自体が新しい場合

シリコンや GaAs など本来電子材料を構造材や可動機械部品として用いる場合、ごく最近では LIGA プロセスと組み合わせたマイクロポンプのダイヤフラムにこれまでは犠牲層など非機械部品として用いられてきたポリイミドが流用されている¹⁰⁾。またシリコンや酸化膜を主としたサーフェスマイクロマシニングでも、薄膜を折曲げて立体構造を作る際の可動ヒンジ部はポリイミド製である。マイクロ光造形法でも紫外線硬化樹脂など各種の機能性ポリマーが多用されている¹¹⁾。さらにセンサやアクチュエータなどに新機能材料の利用が中心となっている。

4.2 製造プロセスが新しい場合

ニッケル、鉄合金、形状記憶合金などは従来からの材料ではあるが、真空蒸着、スパッタなどの半導体プロセスや、電鍍(メッキ)などの手法によって作製され薄膜形態で用いられる。そのため密度や結晶構造が従来のマクロスケールでのバルク材と一致するとは限らない。特に製造条件への依存性が技術の一般化の際に大きな壁となる。

4.3 スケール効果が顕著になる場合

マイクロマシンに TiNi 合金や多結晶金属薄膜を用いる場合、部品自体のサイズが結晶粒のサイズに近くなってくる。マクロな機械の場合、多結晶では均一な等方性材料と見せたものが、マイクロスケールの世界では単結晶に近い異方性を示す。さらに、3次元空間における結晶粒同士の境界面を意味する結晶粒界の電気的機械的影響も無視できなくなる。結晶粒界のサイズは金属によって異なるが、通常数 μm 程度であるため、固体マイクロアクチュエータが、数個以下の単結晶粒の集合によって構成される場合もありえる。このようなケースでは疲労特性に深く関わる結晶内の転位(ディスロケーション)の移動、集積もバルク材とはかなり異なってくるため、マイクロメカニックス的な検討が必要となる。

以上の理由から、マイクロマシンは従来のメカトロニクス機器に比べれば格段に材料依存性が高いことが理解できる。

5. マイクロ材料学への期待

前章までの議論をまとめると、通常サイズの機械

とは違ったマイクロスケールの機械システムを前提とした材料学の構築が必要なのである。これがマイクロ理工学の主要研究分野の一つとしての「マイクロ材料学」である。

5.1 マイクロ材料学の具体的研究課題

マイクロ材料学では以下の薄膜特性に関する知見を獲得し、マイクロマシンを単に設計レベルに留まらず、材料レベルから抜本的に改善してゆくことをめざす研究分野である。当然薄膜の素材はシリコンなど半導体に限定されず、広く金属やポリマー、セラミックなど材料全般にわたる。

1) マイクロ化技術………薄膜作製技術

2) マイクロサイズでの材料特性………

材料におけるスケール効果

3) 物性測定評価法………微小薄膜の機械・

電気特性

4) 加工成形法 …………マイクロシステム化

5) 応用 …………新分野への適用

五十嵐(豊田中研)らはシリコンセンサ等に関する豊富な研究経験をふまえ、マイクロアクチュエータのみならずマイクロマシン全般にとっての材料研究の重要性を再三言及している。筆者も 1990 年の日本金属学会等をはじめ、形状記憶合金薄膜マイクロアクチュエータの理論と薄膜についての材料研究の必要性を強調してきた。

幸いなことに元来専門家である金属材料学者による形状記憶合金などのマイクロ化研究が徐々に活発化しつつある。まだ研究層は薄いため十分な研究成果が出ているとはいいがたい状況ではあるが、今後コンピュータやメカトロニクスにも強い新しいタイプの若手材料研究者の活躍が期待されている。

5.2 マイクロ物性評価手法の確立

従来の材料試験と比べると、測定対象の形態が薄膜状であり試料サイズが格段に小さいなど本質的な相違点があるため、従来のマクロな測定装置がそのまま適用できないケースが多い。これには以下の 2 種類のアプローチが考えられる。

1. マイクロ材料専門の通常サイズの測定装置を開発する

2. マイクロマシンの技術を用いたマイクロサイズの測定系を構成する

筆者は測定対象や測定パラメータによって、両者のアプローチを使い分けていくことになると考えている。特に実用上のポイントとなるのは、作製手法・作製条件とアクチュエータ材料の特性との関係

解明である。

これまで以上のような認識の基に組織的な研究が進められてきたアクチュエータ材料としては、形状記憶合金と圧電材料がある。特に形状記憶合金はミニチュアサイズアクチュエータとして 10 年以上も前から脚光を浴びてきた経緯があるため、アクチュエータへの応用を念頭に置いた材料研究が進展してきた。筆者らも形状記憶合金薄膜の成膜条件と結晶状態の関係を調べている¹²⁾。

次章では筆者の研究室で遂行している研究を中心に、マイクロアクチュエータを最終目標としたマイクロ材料学分野における最近の研究例を紹介しよう。

6. 新たな試み

この 2~3 年のマイクロマシンまたは MEMS の分野における材料に関する研究の最大の変化は、シリコン一辺倒から電鍍金属や形状記憶合金、圧電セラミック、磁性膜、ポリイミド、紫外線硬化樹脂などと、素材のパラエティが拡大しつつあることであろう。その結果、マイクロマシンの機能の向上と、多様化が見えてきた。将来の応用についても、加速度センサ、光学機器などの産業応用から医用、バイオテクノロジー、化学機器まで幅広いアプリケーションが現実味を帯びて語れるようになってきた。

図 1 は、導電性を持った紫外線硬化樹脂を開発し、図 2 に示すマイクロ光造形法 (IH プロセス: 液体状の紫外線硬化樹脂を紫外線ビームによって一層づつ硬化させ、望みの 3 次元マイクロ構造物を短時間に作製する手法)^{5,6)} によって高さ 700 μm 幅 120 m の 1 対のカンチレバー状のマイクログリップを試作した例である⁷⁾。250 v の電圧で約 50 μm の

図 1 導電性紫外線硬化樹脂を用いた静電マイクロアクチュエータ

ギャップの開閉を行う事ができる。

この樹脂を用いればマイクロ光造形法によって単に3次元的なマイクロ構造を作製できるだけでなく、マイクロアクチュエータをも同時に組み込むことが初めて可能になった。シリコンベースのマイクロファブリケーションの長所を1つ導入できたことになる。

図3は「熱弾性型マルテンサイト変態」という、温度だけでなく外部応力によっても相変態が進行し、ヤング率が約2倍も変化するTiNi合金形状記憶合金(SMA)の応用デバイス設計用のCADである¹³⁾。相変態を含むSMA特性の数学モデルの定式化と非線形有限要素法への展開、プログラミングによって、高度の非線形材料である任意形状SMAの、任意拘束条件下での挙動を定量的に推定できるようになった。

これによりマイクロアクチュエータなど、事前実

図2 マイクロ光造形法 (IH プロセス) 装置図

図3 形状記憶合金デバイス設計用「SMA-CAD」(人口歯根のシミュレーション例)

図4 形状記憶合金薄膜のレーザーアブレーション装置

験が困難な場合にも定量的設計が容易に行えるようになった。特にアクチュエータなどのSMAデバイス内部の相変態分布を解析し、可視化できる唯一のツールである。これにより疲労部位の予測なども容易になった。

図4はTiNiSMA薄膜を不純物無しで高精度に組成制御できるレーザーアブレーション装置の概略図である¹⁴⁾。高真空内でしかもあらかじめ組成を合わせ込んだターゲットを用い、比較的低温で光化学反応的に蒸着を行える特徴を持つ。このプロセスによって、従来のスパッタ法で得られたTiNi薄膜よりも約20 Kも相変態温度が高いマイクロアクチュエータに適した薄膜が作製できた。

7. 展 望

マイクロアクチュエータの現状と、その基礎研究分野としての「マイクロ材料学」についての考えを述べた。これは単にマイクロマシン分野への貢献だけに終わらず、材料学にとっても新たな挑戦の場を得ることになると筆者は確信している。若い材料研究者の参入と活躍を期待したい。

お 知 ら せ

本稿の観点から筆者や藤田(東大生研)らが呼びかけ、従来の学会の壁を越えてマイクロマシンの研

究を議論する場として「マイクロマシン若手勉強会」なる会合を年 2 回程度開催している。安宿に一泊し、夜ふけまで研究発表や熱論を戦わすことが恒例となっている。興味のある読者は筆者までご連絡下さい。

参 考 文 献

- 1) 月刊先端人, 三田出版会, No. 5, 1994
- 2) 藤田博之: マイクロアクチュエータと駆動原理, 日本ロボット学界誌, Vol. 12, No. 4, pp. 19-24, 1994
- 3) H. Guckel, et al: A First Functional Current Excited Planar Rotational Magnetic Micromotor, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-93), pp. 7-11, 1993
- 4) A. Chong, Y. Kim, M. Allen: A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-93), pp. 1-6, 1993
- 5) 生田幸士, 広渡 憲, “光創製 3 次元マイクロファブリケーション”, 日本機械学会ロボットメカトロニクス部門学術講演会予稿集, pp. 545-546, 1992
- 6) K. Ikuta, K. Hirowatari, “Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-93), pp. 42-47, 1993
- 7) K. Ikuta, K. Hirowatari, T. Ogata, “Three Dimensional Micro Integrated Fluid Systems Fabricated by Micro Stereo Lithography”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-94), pp. 1-6, 1994
- 8) C. Ahn, M. Allen, “A Fully Integrated Micromagnetic Actuator with a Multilevel Magnetic Core”, Digest, IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, pp. 14-18, Hilton Head, SC, June, (1992)
- 9) Y. Kim, M. Katsurai, H. Fujita, “Fabrication and Testing of a Micro Superconducting Actuator Using the Meissner Effect”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-90), pp. 61-66, 1990
- 10) B. Bustgens, W. Bacher, W. Menz, W. S. Schomburg, “Micro pump Manufactured by Thermoplastic Molding”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-94), pp. 18-23, 1994
- 11) K. Suzuki, I. Shimoyama, H. Miura, Y. Ezura, “Creation of Insect-Based Microrobot with External Skeleton and Plastic Joints”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-92), pp. 190-195, 1992
- 12) K. Ikuta, H. Fujita, M. Ikeda, S. Yamashita, “Crystallographic Analysis of TiNi Shape Memory Thin Film for Micro Actuator”, Proc. of IEEE Micro Electro-mechanical system International Workshop (MEMS-90), Napa valley, USA, pp. 38-39, 1990
- 13) K. Ikuta, H. Shimizu, “Two Dimensional Mathematical Model of Shape Memory Alloy and Intelligent SMA-CAD”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-93), pp. 87-92, 1993
- 14) K. Ikuta, M. Hayashi, T. Matsuura, H. Fujishiro, “Shape Memory Alloy Thin Film Fabricated by Laser Ablation”, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS-94), pp. 355-360, 1994

「マイクロマシン若手勉強会」 幹事連絡先

名古屋大学工学部 マイクロシステム専攻

生田 幸士

Tel. 052-789-3927

Fax. 052-789-3909