

特別寄稿 | マイクロマシン応用の発展に向けて*

For the Development of Micromachine Application

藤田 博之

Hiroyuki FUJITA

1. はじめに

目に見えないほどの小さな機械を作って、私達の体や手の入らないミクロの世界を自由に探検したり、微小な物体を扱ったりすることは長い間の人類の夢であった。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 μm 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。1987年に導入された表面マイクロマシニング法と呼ばれる画期的な新プロセスにより、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を、多結晶シリコン薄膜でつくれるようになった¹⁾。

これらの機械部品の大きさは、約 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ と、髪の毛の太さと同じ程度である。さらに、静電気や磁気で動かすアクチュエータもいろいろ作られ、安定した動作も確認されている。例えば、写真1は、筆者らの研究室で製作したロータの直径 $120 \mu\text{m}$ 、厚さ $7 \mu\text{m}$ の静電マイクロモータである²⁾。構造は電気メッキしたNiであり、ロータの下のシリコン基板を SF_6 のドライエッチングで削り、回転できるようにした。毎分1万回転で回すことができた。

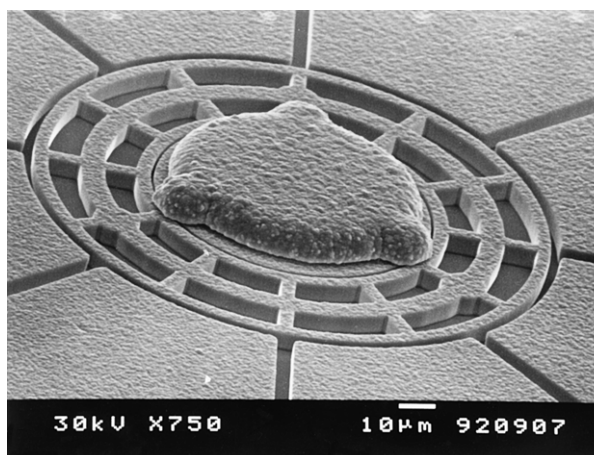


写真1 静電マイクロモータ。ロータ直径 $120 \mu\text{m}$ 、厚さ $7 \mu\text{m}$ のニッケル製²⁾。

2. マイクロマシンは役に立つのか

マイクロギアの発表から10年以上が経過し、複雑な立体形状を持つマイクロ構造(写真2)を作ったり、並進、振動、回転など高速で精密な運動をさせることが可能になった。しかし一般の方からは、こんな小さなものが本当に役に立つのかという質問を受けることがまだ多い。

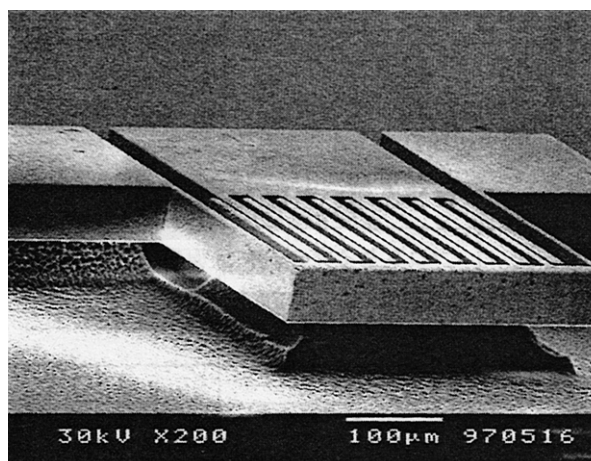


写真2 厚さ $50 \mu\text{m}$ の静電アクチュエータ。磁気ハードディスクのヘッド精密位置決め用いる³⁾

例えば、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、いま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となってしまうこと、運動や作用を外部に取り出すことが難しいこと、3次元形状の加工が難しいこと、などである。それでも、センサ、光応用、流体応用などは可能性がある。」

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

* 2000年5月15日原稿受理

ンは既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、その姿は我々の目に止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（アクチュエータ）、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極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も実用化される見通しで、一層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の一部になっており、マイクロマシンの姿は我々の目から隠されている。

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、正に「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、マクロの機構とミクロの機構の役割をうまく分担している点だ。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、マイクロマシン向け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見られており、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。

インクジェットプリンタの他にも、マイクロマシンの実用化の事例として、圧力センサや加速度センサ、マイクロミラーのアレイを使ったディスプレイなどが商業的な成功を収めている。また数年のうちに、光通信ネットワーク用のマイクロデバイス(例：写真3に示す光スイッチ)や磁気ディスク装置などのデータ記憶装置、DNA分析センサなどにマイクロマシンを応用した製品が市場に登場するであろう。

今後、さらに多くの分野でマイクロマシンの実用化を推進していくために、プロセスの標準化とインフラストラクチャの充実が不可欠であると思われる。現在マイクロマシンの実用化を阻害している要因と、マイクロマシン産業が発展するために望ましい環境とにつ

いて考察し、プロセスの標準化とインフラストラクチャの充実の必要性を以下に論じてみたい。

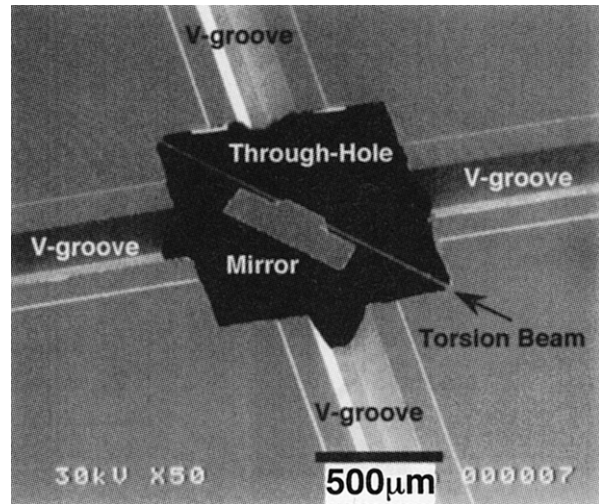


写真3 静電駆動ミラーによるマイクロ光スイッチ。静電気力でミラーを90度回転してバイパススイッチとして使う。ミラーの周りの4つの溝は光ファイバーのアライメントに用いる⁴⁾。

3. 次世代の産業や社会とマイクロマシン

今から10年、20年後の産業や社会を考えると、人工物に対し知能化、分散化、モバイル化など様々な技術潮流があるが、マイクロマシンはそれらの潮流に次のように貢献する。

まず、知能化の流れがある。人間のオペレータに頼らず、より賢く、多様な動きができる機械が求められている。古来からの「からくり」を越えて、いわゆるメカトロニクス技術が発展してきた。しかし、これも、機械部分とコンピュータをケーブルでつなぎ、コンピュータのソフトウェアによって多様な動きをさせたにすぎない。マイクロマシン技術は、半導体電子回路やセンサを、機械の中に融合することを可能にする。つまり、知覚・判断・動作の機能が一カ所に集まり、その場で感じた情報をすばやく処理し、適切な動きをすることができる。これによって、機械本体に知能を組み込むことが可能になる。

次にダウンサイジングと分散化の流れがある。大型コンピュータからワークステーションのネットワークへと情報処理の形態が変化したように、知能化した超小型の機械要素を集めて、一つの作業を行う機械が作られるようになる。このような機械は、動きの自由度が多く柔軟な動きができ、いくつかの要素の故障があっても作業が行え(耐故障性)、また作業に応じて要素

の追加や変更が容易になる(拡張性)。すなわち、自立分散システムの機械版が実現する⁵⁾。

モバイル化は、ダウンサイジングと分散化の一つの帰結である。いつでもどこでも情報ネットワークとつながるコンピュータのあるべき姿として、ウェアラブルコンピュータが考えられているが、マイクロマシンを応用した超小型入出力装置により、装着感なしにネットワークと情報をやりとりすることが可能になる。また、人体の生理情報をモニタするマイクロマシンができれば、24時間の健康管理ができるだろう。

またこれを、生物に迫ろうとする流れの中で考えると、ヘビの動きやアリの群を機械で実現しようとするものと見られる。マイクロマシンの寸法は1から10 μm と生物の細胞と同じレベルであり、細胞や生体高分子を自由に操ったり、手を加えたりできる。これは、バイオテクノロジーの飛躍的發展を可能にする。神経繊維と同程度の微小なプローブで、神経を伝わる電気信号を詳細に検出することも可能であり、脳神経系の解明や身体障害者の補助機器の制御などに役立つ。無論、医用への応用として、低侵襲手術、埋め込み型人工臓器などの期待も大きい。

さらに、情報化の流れにも深く関係する。そもそも情報には大きさがないので、それを蓄えたり送ったりする装置は、小型であるほど望ましい。マイクロマシンは、超小型サイズと内蔵する情報処理能力により、光情報通信ネットワークのような高度情報化社会のインフラストラクチャに不可欠である。また、情報の表示や提供の質もマイクロマシンにより格段にきめ細かさが増す。情報の収集においても、分散したマイクロセンサ群により、住む人の要求をすぐ理解する知能化住宅や、気が効くコンピュータ⁶⁾が可能になる。

最後に、環境へ配慮する流れについても、環境の監視や汚染除去に用いられる。一つのチップで環境からのサンプル収集、前処理、化学分析、データ処理まで行うマイクロ化学分析システムが活発に研究されている。また、構造物などの高度なメンテナンスにより、安全に使用する期間を延ばすことも省資源に有効である。マイクロマシンを用いて、複雑な構造物を分解することなくその細部まで保守点検することが望まれる。

4. マイクロマシン産業の発展に向けて

最後にやや専門家向けの話になるが、今後マイクロマシン産業が発展するための望ましい環境を考察し、

プロセスの標準化とインフラストラクチャの充実の必要性を論じてみたい。

4.1 マイクロマシン産業が発展するために望ましい環境

4.1.1 ファブレス企業を可能にする環境

電子回路(例えば増幅器)やマイクロプロセッサは、同じ素子であっても、結線やソフトウェアを変えることで様々な用途に利用できる。しかしマシンは形が機能を規定するため、用途に応じて形の異なるデバイスを用意する必要がある。このため、マイクロマシンは少量多品種生産になる場合が多い。

また、電子回路の製作プロセスとは別の特殊なプロセスを使用したり、様々な機能を発揮するための特殊な材料を用いる必要もある。マイクロマシニングプロセスへの設備投資は巨額で、基本的には少品種大量生産に向いているため、ミスマッチが生じる。実用化事例はいずれも同一のデバイスが大量に売れる製品である。

小規模なベンチャー企業等がニッチ市場向けのマイクロマシンを実用化できるようにするには、製造設備を外部に依存して事業計画が立てられることが望ましい。さらに、あるマイクロシステムのアイデアがある企業に対し、マイクロマシン技術によるソリューションを提案し、製造を引き受けるサービスがあれば有効であろう。

4.1.2 設計と製作の分離

現在、マイクロマシニングプロセスは発展途上であるため、設計したデバイスが果たして本当に実現できる構造であるかどうかを判断するためには、最新のプロセス技術の詳細を知っている必要がある。また、試作したデバイスの性能が十分でないときには、新規プロセスの導入や開発を行い最適構造を実現する場合もある。これからは、設計、解析、プロセス、評価の各過程を分離し、機械技術者は実際の加工工程の詳細を意識することなしに、設計図を引くだけで、望みの完成品を得られることが必要である。

VLSIの設計でも、論理レベルから、実際のレイアウトまで様々な階層があるとはいえ、機能レベルを設計するとき、CMOSラインを知っている必要はない。マイクロマシンにおいても、機械部分の形状と回路部分の機能を設計すれば、ある決まったプロセスで望みのマイクロマシンが製作できる環境を整えることが望まれる。

4.1.3 後工程と品質管理法の確立

各種センサデバイスについても従来から指摘されているが、センサ・マイクロマシンデバイスの多くは外界との物理的な結合を確保することが必須である。このようなことが可能な標準的パッケージを安く提供することが必要である。

また、上述の多様なプロセス混在の問題の一つの解決として、アセンブル技術などを開発する必要もある。ただしこの時、マイクロマシンの利点である「リアセンブルによる精度確保」、「高機能システムの超小型化」などを失わないように留意することが重要である。また、信頼性の試験、品質管理のための試験法と装置を準備することが望まれる。

4.2 プロセス標準化とインフラストラクチャの役割

プロセスの標準化により、設計者は製作技術に精通しなくてもマイクロマシンの設計を行うことが可能になる。現状を考えると、CMOSプロセスに準拠した表面マイクロマシニングプロセスを中心に、ウェットやドライのバルクマイクロマシニングと接合技術を提供する程度までであれば、ある程度標準化が可能であろう。

更に特殊なポストプロセスは、各企業に任せる方が能率的であるし、また逆に製品を差別化する点でも有利ではないだろうか。つまり、標準プロセスを階層化し、第一レベルとしてコアになる表面マイクロマシニング、第二レベルにバルクマイクロマシニングと接合、第三レベルにその他オプションなプロセスを準備するといった仕組みが考えられよう。

このような標準プロセスに基づくインフラストラクチャとして、種々のデバイスやマイクロシステムを製造するサービスを提供するファウンダリーサービスが最も重要である。ファウンダリーサービスを行う過程で、プロセスの充実や最適化を計るとともに、種々のIPを蓄積することが戦略的に重要である。IPとしてセンサ要素、アクチュエータ要素などが豊富に提供されれば、これらを組み合わせるだけでマイクロマシンが設計できることになり、さらに、マイクロマシン実用化へのバリアが下がることになる。

また、標準プロセスが定まることにより、材料データベースの構築やCADパッケージの開発も加速される。原理を実証するレベルではあまり必要性のなかったCADも、製品の要求仕様に合わせて最適化したデバイスを短時間かつ低コストで開発するために必須の

ツールとなる。図1と図2は、現在のマイクロマシンの設計の流れと構造化した設計の流れを示したものである(G.K.Fedder⁷⁾による提案)。今後は、このような考え方でスムーズにマイクロマシン応用製品の開発ができることが期待される。

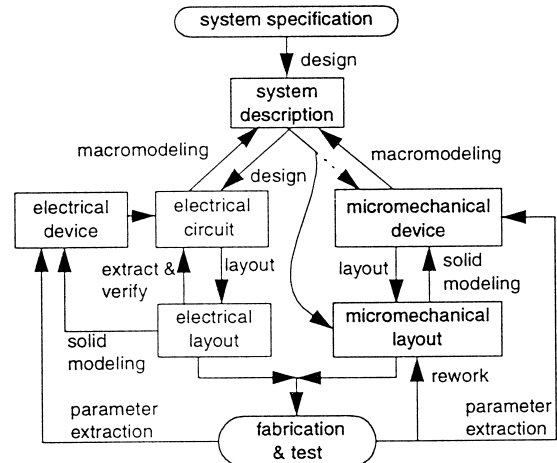


図1 現在のマイクロマシン設計の流れ。各ステップが複雑に結びついている³⁾。

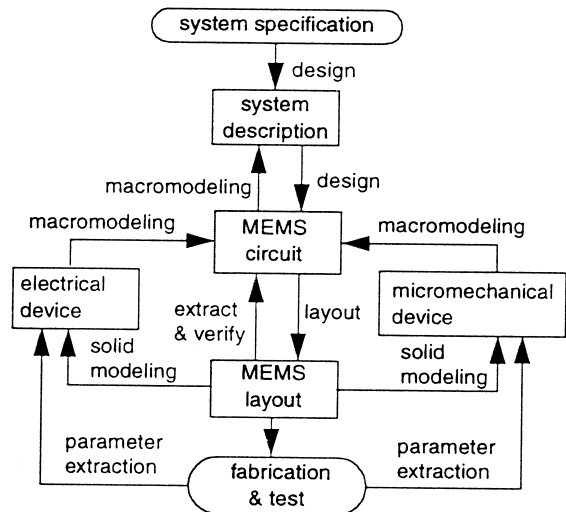


図2 構造化したマイクロマシン設計の流れ。下線部が主要な流れを示す³⁾。

5. おわりに

マイクロマシンの研究も10年を越え、「ミクロのモータが回って、すごい」といった驚きの時代から、要望な応用を特定し要求仕様にてらして性能を吟味する時代になっている。このため、マイクロマシンを最も有効に生かせる応用分野を考え、生産性やコストを加味して、デバイスとパッケージを含めたシステムにまとめ上げることが必要である。このためには、一企業の枠を越えて社会的なインフラストラクチャを構築していくことも課題となる。

<参考文献>

- 1) L. S. Fan, Y. C. Tai, and R. S. Muller: " Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators ", IEEE Trans. Electron Devices, ED-35, 6, pp.724-730(1988)
- 2) T. Hirano and T. Furuhashi: " Dry Released Nickel Micromotors and Their Friction Characteristics ", Digest of Technical Papers International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, Japan, pp.80-83 (1993.6)
- 3) S. Nakamura, K. Suzuki, M. Ataka, H. Fujita, S. basrouf, V. Soumann, M. de Labachellerie, W. Daniau, " An Electrostatic Microactuator using LIGA Process for a Magnetic Head Tracking System of hard Disk Drives " Microsystem Technologies, 5(1998)69-71.
- 4) D. Miyauchi, H. Toshiyoshi, H. Fujita " Self-Alignment Technique of Surface-micromachined Optical Switches to Bulk-Micromachined V-Grooves " Trans. IEE of Japan, 119-E(1999)108-112.
- 5) 特集：自律分散システムの新たなる展開，計測と制御，32-10 pp.769-862(1993)
- 6) (財)機械システム振興会：「マイクロロボットに関する調査研究報告書」，pp. 5(平2-3)
- 7) G.K.Fedder " Structured Design of Integrated MEMS ", Tech. Digest IEEE MEMS ' 99, Jan.17-21, 1999, Orlando, FL, USA, pp.1-8.

<著者>



藤田 博之

(ふじた ひろゆき)

東京大学

生産技術研究所

マイクロメカトロニクス国際研究
センター教授

工学博士

半導体技術に基づくマイクロマシ
ン設計・製作・評価と応用

マイクロマシ技術のナノテクノロ
ジーへの応用など