

Techno
Scope

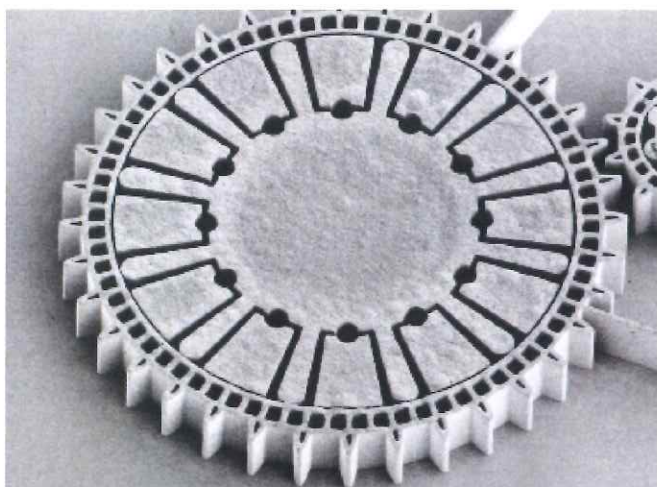
マイクロマシン、MEMSの現在と未来

シンクロトロン・リソグラフィで製作されたレンズアレイ。この方法では、直径 $5\mu\text{m}$ ~ 1mm のレンズを最小 $5\mu\text{m}$ 間隔で並べることができる。レンズアレイの高集積化により、デジタルカメラなどで、従来と同じ大きさでさらに高精細度が可能となる。

100 μm

「人の目・手」が届かない場所で精緻な作業を行う機械として、各種産業施設や機器のメンテナンスやモニタリング、あるいは医療分野、航空宇宙分野などで、MEMS、マイクロマシンの重要性は、今後ますます高まっていくものと思われる。さらには、より大きな機械のデバイスとして、微小部品製造などが必要なあらゆる分野で、まさに基盤技術としての活躍が期待されている。

「モノ作り」を国の基幹に据える我が日本の技術のなかでも、微細加工技術はかねてから得意としてきた分野でもある。「日本の製造業の救世主」とも目されるMEMS、マイクロマシンの現在と今後について紹介したい。



M2-2 1.0 kV X90.0 333 μm
MEMSのメカニカルな部分の要となるモーター（アクチュエーター）。静電気によって、外側の歯車部分が回転するワブル（ころがり）モーターと呼ばれるもので、直径は 1mm 、高さが $100\mu\text{m}$ 。材質はニッケル。

MEMSとは何か

最近、技術分野で、「MEMS（メムス）」という言葉がよく聞かれるようになった。

MEMSとは、「Micro Electro Mechanical Systems = 微小電気機械システム」の略で、1980年代後半、アメリカで生まれた概念である。従来日本で広く使われていた「マイクロマシン」が主に「単に微小な機械」を表すのに対して、MEMSは「半導体微細加工技術を使ってウェハー上にアクチュエーターなどのメカニカルな機能を作成し、回路と一体になったデバイスを作る技術」（マイクロマシンセンター、季刊誌「マイクロマシン」2004/1号、『アメリカの最近のMEMS動向』より）を指す。

電子回路上に機械部品を直接組み上げるので、構造的に簡

略に作ることができ、集積化・知能化も容易に行うことができる。また、急速に進化・発展してきた微細加工技術である半導体製造技術を使うため、高い加工精度と、普及には欠かせない量産性も確保することができる。

そもそも、マイクロマシン活用のキーワードはマイクロ化、マルチ化、マイクロエレクトロニクスの集積化の3つのMである、という（東京大学生産技術研究所第3部、藤田博之教授、『マイクロマシンの現状と今後の活用』より）。そのためには機械工学的な機構と電子工学的な回路とを一体のものとして作り込んでしまうことが有効であるとかねてから指摘されていた。そこで、半導体の微細加工技術を応用することは必然の流れでもあり、このため、現在ではMEMSという言葉が「マイクロマシン」を代表するものとして使われることも多い。

さらに現在では、MEMSの、より微小な発展型としてNEMS（Nano Electro Mechanical Systems＝ナノ電気機械システム）という用語も使われるようになった。

MEMS市場の現状と予測

今後、MEMSはIT関連、通信や化学、医療、バイオなどといった幅広い分野への応用が期待されている。財団法人マイクロマシンセンターでは、学識経験者、MEMS技術研究者からなる委員会を発足させ、MEMSの国内市場の現状と予測を算出している（2004年3月）。

これによると、2002年現在のMEMS関連市場は4,200億円だが、2010年には、1兆3,500億円にまで拡大すると予測している。このうち、情報通信機器関連分野が約3,600億円、センサー類の活用を中心に拡大する自動車関連分野が約2,500億円、生活文化関連分野が約3,900億円の規模になると予測している。

この試算はあくまでMEMSのみの市場規模を求めたものであり、それがデバイスとして組み込まれる関連製品までも含めると、その規模は十倍から数十倍にもなるという。

これまで日本国内の各社は、どちらかといえば機械そのものの小型化・精密化に注力し

2002年のMEMS技術の国内市場規模

（単位：億円）

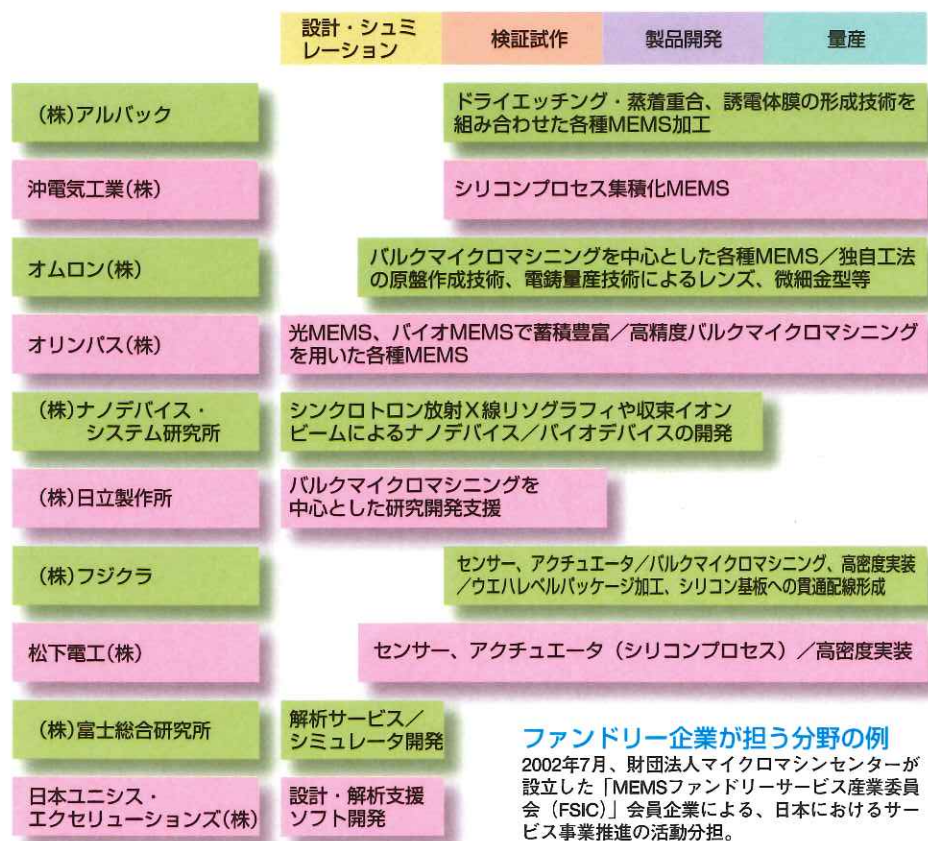
産業分野分類	プロダクト貢献型アプリケーション	MEMS市場規模
情報通信機器関連分野	・磁気ディスク装置・光ディスク装置 ・シリアルプリンター（インクジェット、熱方式） ・ページプリンター・VRT/ビデオカメラ ・DVD-ビデオ・ファクシミリ・複写機 ・磁気ヘッド・超小型モーター・光コネクタ ・携帯電話	1,492
自動車関連分野	・センサ・センサ外システム	1,351
精密機器分野	・カメラ・デジタルカメラ・腕時計	911
バイオテクノロジー関連分野	・バイオセンサー・μTAS適用可能機器 ・コンビナトリアルケミストリ・その他分離分析装置	141
医療福祉関連分野	・生体現象計測/監視システム・画像診断システム ・処置用機器・生体機能人体機能/補助機器 ・治療用および手術用機器・医用検体検査機器	122
生活文化関連分野	・アミューズメント・家電	120
マイクロファクトリ分野	・産業用ロボット・金属工作機械・半導体製造装置	83
計測機器分野	・SPM・クロマトグラフィ・一般科学機器	33
メンテナンス分野	・工業用内視鏡・非破壊検査機器	8
航空宇宙関連分野	・航空機・宇宙(衛星)	0
都市環境整備関連分野	・ITSインフラ	0
農林水産関連分野	・食品機械工業	0
エネルギー関連分野	・ウエアラブル燃料電池	0
環境関連分野	・環境計測機器	0
合計		4,261

2010年のMEMS技術の国内市場予測規模

（単位：億円）

産業分野分類	プロダクト貢献型アプリケーション	MEMS市場規模
生活文化関連分野	・アミューズメント・家電	3,870
情報通信機器関連分野	・磁気ディスク装置・光ディスク装置 ・シリアルプリンター（インクジェット、熱方式） ・ページプリンター・VRT/ビデオカメラ ・DVD-ビデオ・ファクシミリ・複写機 ・磁気ヘッド・超小型モーター・光コネクタ ・携帯電話	3,616
自動車関連分野	・センサ・センサ外システム	2,467
精密機器分野	・カメラ・デジタルカメラ・腕時計	1,242
バイオテクノロジー関連分野	・バイオセンサー・μTAS適用可能機器 ・コンビナトリアルケミストリ・その他分離分析装置	486
航空宇宙関連分野	・航空機・宇宙(衛星)	455
マイクロファクトリ分野	・産業用ロボット・金属工作機械・半導体製造装置	384
医療福祉関連分野	・生体現象計測/監視システム・画像診断システム ・処置用機器・生体機能人体機能/補助機器 ・治療用および手術用機器・医用検体検査機器	371
エネルギー関連分野	・ウエアラブル燃料電池	371
計測機器分野	・SPM・クロマトグラフィ・一般科学機器	191
都市環境整備関連分野	・ITSインフラ	45
メンテナンス分野	・工業用内視鏡・非破壊検査機器	28
環境関連分野	・環境計測機器	13
農林水産関連分野	・食品機械工業	13
合計		13,553

（出典：財団法人マイクロマシンセンター『MEMS関連市場の現状と日本の競争力分析に関する調査研究』（財団法人産業研究所からの委託事業））



ファンドリー企業が担う分野の例

2002年7月、財団法人マイクロマシンセンターが設立した「MEMSファンドリーサービス産業委員会(FSIC)」会員企業による、日本におけるサービス事業推進の活動分担。

てきたため、電子技術を組み合わせたMEMS分野では出遅れ気味と言われてきた。しかし、日本政府としても、MEMSを次世代の産業育成の牽引役と位置付け、平成15年からは3カ年事業としてMEMSプロジェクトを開始している。

特に最近注目されているのは、MEMSのファンドリー(受託加工)サービスと呼ばれる新たなビジネスである。MEMSは半導体製造技術を応用しているとはいえ、その加工は2次元から3次元となり、メカ系や光学系の要素も加わることが、既存のメーカーには参入の障壁となっている。そこで、関連技術を結集して、試作から量産化までを請け負うのがファンドリーサービスである。

日本でも、適切なMEMS供給インフラを整備することを目的に、2002年7月、財団法人マイクロマシンセンターによって「MEMSファンドリーサービス産業委員会(FSIC)」が設立され、関連企業10社がメンバーとなって、日本におけるMEMSファンドリーサービス事業推進のための活動を開始している。

すでに広い分野で活用されるMEMS

まだまだ未来の技術と思われがちなMEMSだが、単体のマイクロマシンではなくデバイスとして考えると、さまざまな、

すでになじみ深い機器の中で活躍している。

その一例が、PC用その他で広く使われているインクジェットプリンター用のヘッドである。

インクジェットプリンターは、数pl(ピコリットル=10億分の1ミリリットル)程度のごく少量のインクを、数十 μ mという微細オーダーのドットで吹き付けて印刷を行っている。

たとえば5plという量を球体にすると、その直径は約0.02mm程度。またドット間隔を同じく0.02mmとすると、1平方mmに2500個の点が並ぶことになる。インクを飛ばすノズルから印刷する紙面までの間隔は1~2mm程度あるのが普通である。また、実際に印刷する際には、当然ながら、ノズルは移動しながらインク滴を飛ばしている。これをスケールアップして考

えると、地表数メートルの高さを、マッハ3程度で飛ぶジェット機から、地面の上に正確に4センチおきにピンポン玉を当てていくのとはほぼ同じことになるという。

ノズルは、初期にはガラス基板、現在ではシリコン基板上に各種の樹脂や金属を積層し、これに微細な加工を施して作られている。インク滴をいかに正確に飛ばすかの鍵となるのがノズル孔の精度だが、その精密な加工が実現できたのも、MEMS技術があればこそだという。

デジタルビデオカメラの手振れ防止用小型センサーなどのマイクロセンサー、そしてHDD(ハードディスク駆動装置)用磁気ヘッドのアクチュエーター(精密位置決め装置)なども、すでに実用化・普及しているMEMSの例である。

今後の活用が期待される分野

今後、MEMS技術を利用した多様なセンサーやアクチュエーターが開発されることによって、光通信・モバイル機器、コンピュータ周辺機器、バイオ分析など、より広い製品分野での活用が大きく進むものと思われる。また、インテリジェント家電やアミューズメントなどの「生活文化関連分野」には、現在すでに実用化・普及が始まっている情報通信機器関連分野、自動車関連分野を上回る、大きな成長が期待されて

いる。

また、MEMS製造に使用される素材の市場の伸びも期待できる。

MEMSは半導体製造技術を出発点としたものだけに、素材はシリコンが主に使われてきたが、今後、さらに複雑な構造が実現されるにつれて、より多くの素材が使われるようになると思われる。現在大きな注目を集めているカーボンナノチューブなどの新素材については言うまでもなく、既存の材料に対しても、よりMEMSに適した素材の研究への期待が大きいのという。

MEMSでの加工精度や素材の特性には、マクロの世界では問題にならない素材中の介在物のばらつきなどが、大きな影響を与える。そのため、鉄その他の既存の素材でも、ナノの単位で組織や成分を制御することが、今後ますます必要になる。

個々の応用技術について考えると、MEMSは、情報機器、流体、光学、化学分析、細胞や生体高分子の解析・操作など、機械としての「力」は大きなものが要求されないもの、そして小型化や電子・光部品との集積化のメリットがあるものに、その本領を発揮する。

これらの条件にあてはまる応用分野として高い関心を集めているものに、マイクロ光学技術と組み合わせた、「光MEMS」(Micro Opto Electro Mechanical Systems, MOEMS)がある。光MEMSは、光通信、光電子機器、画像処理系技術での活用が期待されている。このなかでも、光通信用の光ス

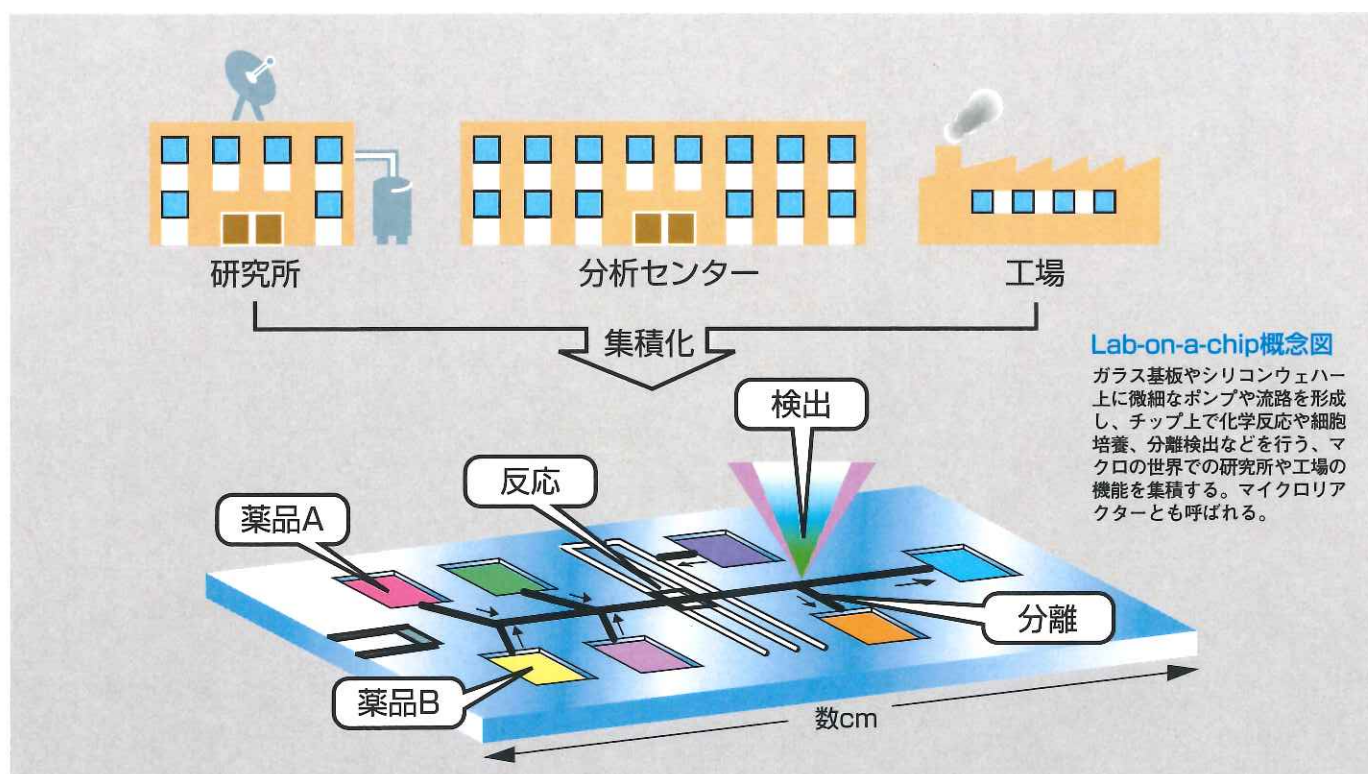
イッチなどは光MEMSの代表的な例として、現在、盛んに開発が行われている。

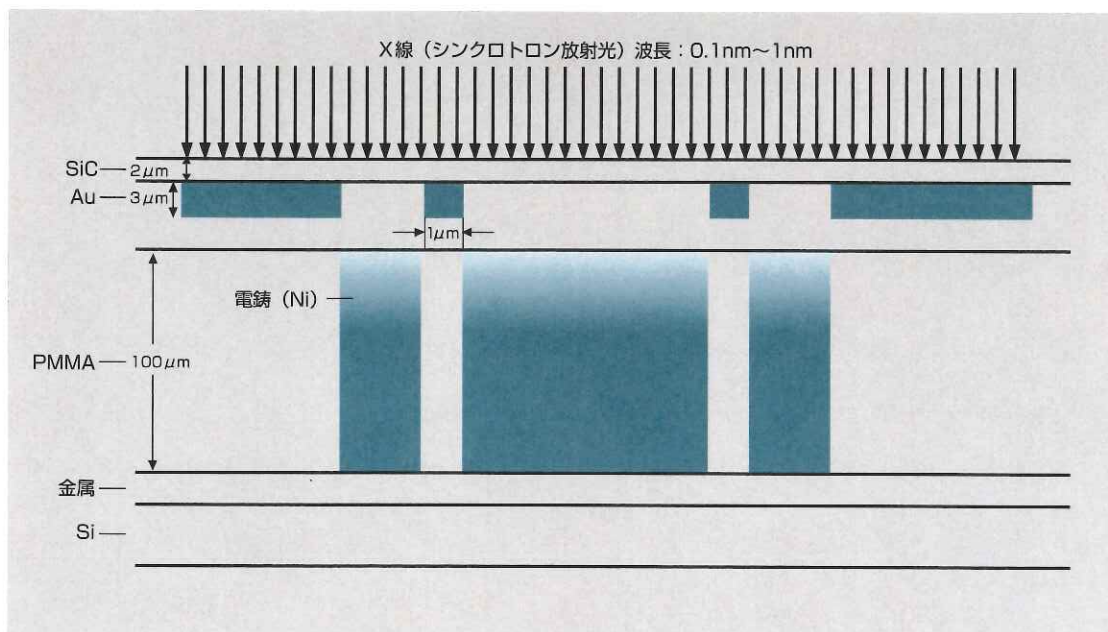
化学、バイオメディカル分野では、ガラス基板やシリコンウェハー上に微細なポンプや流路を形成し、チップ上で化学反応や細胞培養、分離検出などを行うラボプロセスを集積化、DNA、RNA、タンパク質などを分析できる「Lab-on-a-chip」と呼ばれる技術の開発、実用化も進んでいる。

今後の課題・研究開発テーマ

立命館大学マイクロシステム技術センター長の杉山進教授の研究室では、MEMS技術を用い、0.5mm角程度のチップに、温度、湿度、振動、ガス、光など、さまざまなセンサーを搭載し、さらに無線通信機能も組み込む研究開発を進めている。将来的には、センシングユニットとしては $150\mu\text{m}$ 以下、個々のエレメントは 100nm ($0.1\mu\text{m}$) 以下を目指しているという。埃のような大きさだが、たとえばこれが人体の表面に付いていれば、加速度センサーで動作の状態を、振動センサーで脈拍を、というふうに、その人に関する多くの情報を収集することができる。

杉山教授らが設立したベンチャー企業、株式会社ナノデバイス・システム研究所では、シンクロトロン放射光に含まれる極短波長(オングストロームサイズ)のX線を用いたデバイス加工(シンクロトロン・リソグラフィ)で型を作り、数





シンクロトロン・リソグラフィ

シリコン基板上に金属膜とアクリル層を重ね、これにマスクを施して、シンクロトロン放射光によってアクリル層を彫り込む。その後、ニッケルなどの金属を電鍍によって生成させ、アクリルを溶解させると、アスペクト比の高い加工物を得ることができる。

μm の太さの無痛針を製造する技術も開発している。金属や樹脂で作った無痛針は、薬剤の注射や採血などに用いることができる。また、針自体を糖で作れば、その中に薬品を入れて、体内で溶かす使い方もできる。今後医療や化粧品分野での応用が期待できるという。

このマイクロニードルの製品化・実用化が好例だが、今後のMEMSの発展、活用のため重要なことの1つは、MEMSを製造するためのミクロ、ナノ領域での加工技術のいっそうの進化である。

特に、基板上で立体構造を組み上げるMEMSでは、これま

での半導体製造よりも、縦方向にも高い精度を持つ製造装置が必要になってくる。

前出のシンクロトロン放射光によるリソグラフィは、シリコン基板上に金属膜を介して樹脂の層を重ね、これにマスクングをしてパターンを彫り込み、ニッケルなどの金属を電鍍した後に樹脂層を除去することで高アスペクト比（平面方向の精度に対する高さの比）の構造物を作る技術である。その他にも、電子ビームやイオンビームを用いて素材を直接彫り込む方法など、さまざまな加工法の研究が進められている。

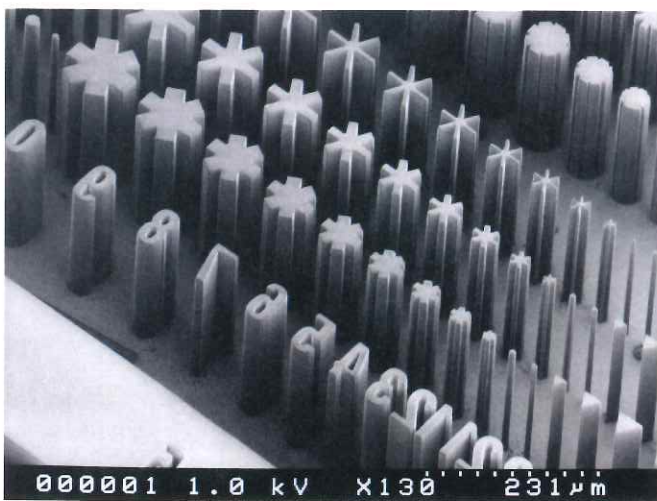
また、構造がナノの領域に近づくほど、我々が実際に目にすることができるマクロの領域では問題にならない空気粘性など、極小領域での物質の挙動が問題となる。 μm 単位での「製品」の信頼性を確保するための計測・品質管理技術の確立も欠かせない。

杉山教授によれば、「現在はさまざまな部分技術が登場してきているが、機械としての成熟度は、まだこれからというところです。単に『小さくなる』というだけではなく、そこには新しい設計コンセプト、設計パラダイムが必要になる。そのことをまず理解しなくてはいけない」という。

この21世紀、競争力を維持するための「他に真似のできない技術力・開発力」を持つことは、日本にとって非常に大きなテーマである。そのなかでも、日本が得意としてきた微細技術であり、かつ、広い産業分野の今後に大きなインパクトを持つMEMSの研究開発は、ますます重要な課題となってくるに違いない。

[取材・文＝川畑英毅]

取材協力＝財団法人マイクロマシンセンター、
立命館大学理工学部杉山研究室



高アスペクト比マイクロ、ナノ構造体

MEMS技術では、従来ほぼ2次元であった半導体微細加工技術に対し、3次元での加工が大きな課題になる。シンクロトロン・リソグラフィを用いて、平面方向の精度に対する高さの比（アスペクト比）100でPMMA（アクリル樹脂）、ニッケルを加工した例（高さ：200 μm ）。