

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) の最新技術動向

池上 尚克

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) は近年急速に発展してきた半導体微細加工技術等を用いて、微小な機械部品と電子回路を集積した高性能且つ省エネルギー性に優れたシステムである。機械・電子・光・化学等に関わる異分野技術をチップ上で融合する事で新たな応用分野を切り開く事が可能なことから、製品差別化のキーテクノロジーとして今後の発展が期待されている。本稿ではMEMS技術の進展を、日本と欧米の比較の中で概観した後、今後のMEMS市場と開発の動向、技術課題およびその中で当社の取組みを述べる。

MEMS技術の現在迄の進展

表1に、現在研究開発および実用化されている各種MEMSの技術別分類とその代表的なコンポーネントを示す。多くは単体製品というよりはむしろ、最終製品(システム)の一部として、その機能を高め、差別化するためのキーデバイスと位置付けられている。この中で日本企業は初期の頃からマイクロマシンと呼ばれる微小なメカトロニクス部品の開発に取り組んできた。日本が先行開発した代表的なものにインクジェットプリンタのヘッドや各種センサがある。前者はインクを噴出するノズルをシリコン加工技術で高密度化(従来の4倍)し、極微量で正確なインクの噴出を可能とした。これにより画質の向上と印刷スピードの高速化が可能となった。最近ではCMOSとの集積化¹⁾が報告されており、システム全体の小型化が図られている。後者では特に自動車分野において、80年代半ばから開発されてきたエアバックシステム用の加速度センサ、エンジン制御システム用圧力センサ、燃料噴射システム用エアフローセンサ等が実用化されている。

一方欧米では80年代後半からLSIと微小な可動部品を半導体微細加工技術を利用してシリコンチップ上で集積化する事でシステムそのものを小型化する研究が活発化した。近年特にIT(情報技術)、バイオ、医療の分野でその実用化研究が進み、新規参入するベンチャー企業も増加している。MEMS Industry Group²⁾の調査によると、米国

には現在150社以上のMEMS関連企業があり、その70%以上が1995年から2001年の設立とされている。この背景には1992年からの米国防省の国防先端研究プロジェクトによる支援体制がある。システムの小型化が国防上重要技術と位置付けられているためである。

欧米が先行開発した代用的なMEMSにTexas Instrument社のDigital Mirror Device(DMD[®])が挙げられる。図1にその断面構造³⁾を示す。DMD[®]は50万個から130万個のマイクロミラーで構成され、それぞれが画素に対応している。1つのミラーは一辺16 μ mで、傾きを変えられるようにねじれヒンジで支持されている。ミラーの下には2つの駆動電極があり、静電気力でミラーを吸引

表1 各種MEMSの分野別分類

各種MEMS分類	用途	代表的なコンポーネント
センサ/メカトロニクス部品	各種物理量(加速度、力、圧力、温度、振動、等)を測定する微小なセンサ。	加速度センサ(2、3次元)、圧力センサ、マイクロジャイロ、流量センサ、赤外線イメージャ
	各種運動機能を有する微小機械システム。	マイクロアクチュエータ、マイクロモータ
	体内の局所的な治療を行う微小医療用機器。	能動カテーテル
	各種IT機器用微小メカトロニクス部品。	インクジェットプリンタヘッド、ハードディスクヘッド、マイクロプロローバ
RF MEMS	高周波部品及びそれをLSIと集積化した微小無線送受信システム。	RFスイッチ、RFフィルタ、RF共振器、マイクロリレー
光MEMS	光通信素子及びそれをSiチップ上で集積化した高機能光コンポーネント。ディスプレイへの応用。	光スイッチ、マイクロレンズ、光導波路、波長可変フィルタ、光スキャナ、DMD [®] 、光センサ
バイオMEMS	ゲノム情報に関連した物質の検出。医療、生物、製薬にわたり、分析、診断に用いられる微小システム。	DNAチップ、タンパクチップ、バイオセンサ
μ -TAS (Lab. on Chip)	微細流路・マイクロポンプ等を集積したマイクロ化学分析システム。血糖値、病原菌の測定、抗原抗体反応分析、環境化学分析。	マイクロリアクタ、環境化学分析チップ、ヘルスケアチップ、免疫分析チップ
Power MEMS	携帯情報機器やロボット向け小型発電機。	小型燃料電池、小型燃焼発電機

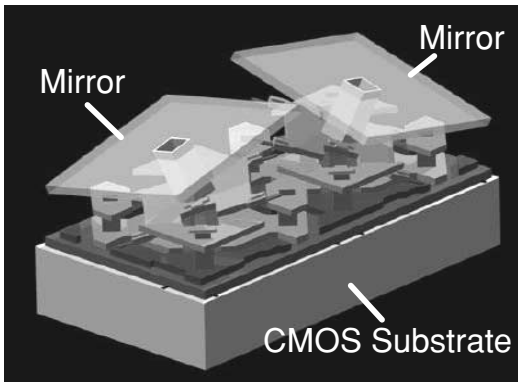


図1 Texas Instrument 社のDigital Mirror Device (DMD[®]) の断面構造

して傾きを制御する。パルス幅変調されたデジタル信号でオン・オフ制御する事で毎秒5000回以上オン・オフを切り替える事ができる。シリコンの機械特性が良い事から、ヒンジ疲労ライフタイムは1.7兆サイクルに及ぶ。光源からの光をカラーフィルタに通した後、必要な画素にだけ光を反射して画像を作る投影システムとして既に実用化されている。DMD[®]はMicro Electronics, Micro Mechanics, Micro Opticsの3つの異種技術が融合され、Optical MEMS (光MEMS) という新たな技術分野を形成している。またマイクロミラーをアレイ化する事で、単一のメカトロニクス部品では得ることのできない機能(動画制御)、付加価値(システムの小型化)を生み出している。これは他の高付加価値MEMSを開発する際に共通する、重要なコンセプトを提示している。

このような異分野技術を融合した高付加価値製品は市場で高い競争力を持つが、一方で多品種少量品であるため、開発に当っては高い投資リスクを伴う。欧米では比較的早い段階から投資リスクを最小限に抑え且つ効率的に技術開発を行うため、情報ネットワークを利用したMEMSファンドリーサービス(試作品の加工や製品の受託生産)の体制が整備された。また特に米国では前述の国防省の支援体制に加え、大学と外部との連携が非常に強く、量産を考慮に入れた研究・試作が行われ、実用化迄のスピードが非常に早い。これが新規分野に多くのベンチャー企業が積極的に参入してくる一つの要因にもなっている。同様に台湾では工業技術研究院 (Industrial Technology Research Institute of Taiwan: ITRI) に共同試作設備が設置されており、Walsin Lihwa Corp.等の民間ファンドリーがその研究成果を基に多品種少量生産を行う体制が整っている。一方、日本ではマイクロマシンセンタを中心にMEMSファンドリー事業を展開する体制が整ってきたのは比較的最近になってからである。これらの外部環境要因が現在の日欧米のMEMS産業の競争

力の差に現れている。今後日本企業が異分野技術を融合した付加価値の高い応用分野を開拓し、結果として国際競争力をつけていくためには、国内企業間のネットワークの強化と、それを有効利用できる体制の整備が重要になってくる。

今後のMEMS市場と開発の動向

MEMSの市場規模推計は調査機関によって差がある。多種多様な機能が最終製品へ応用されているためと考えられる。欧州の代表的なMEMSネットワーク組織NEXUSによると、MEMSの世界市場は2000年の300億ドルから2005年には680億ドルに成長すると予測されている⁴⁾。その中で既存市場として大きいのが、各種センサ、インクジェットプリンタのヘッド、ハードディスク用磁気ヘッド等のメカトロニクス部品であり、全体の80%以上を占めている。これらの製品は既に成熟期にあるが、今後新規応用分野の市場が立ち上り、MEMS産業全体の成長が見込まれている。図2に今後成長が期待される分野と、その年度別世界市場予測を示す⁴⁾。

今後短期的に高い市場成長性が予測されている分野は、RF MEMS、センサMEMS、光MEMSである。特にRF MEMS、センサMEMSはここ1~2年での立ち上りが予想されるユビキタスネットワーク社会で重要な役割を果たす可能性を秘めている。これは街中いたるところにセンサーを配置して人や物の位置情報や環境情報を検知し、その情報を基に状態や動きを分析し高度に活用していく社会である。そこではRF-ID(無線認証) タグや、通信機能を軸とした微小なセンサが必要とされ、またそれらセンサのネットワークインフラが整備される。通信機能や信号処理機能、高精度位置特定機能等、複数の機能を集積

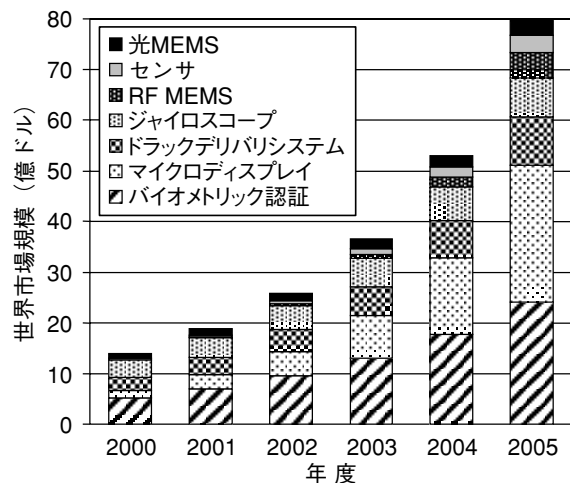


図2 今後成長が予測されるMEMS分野と、その年度別世界市場規模予測 (NEXUSデータ)

化したデバイスを微小サイズで作り込む技術としてMEMSは非常に有望である。またセンサMEMSは今後、ロボット産業への用途が期待されている。センサ技術を基に検知、判断、動作を一元化する上でMEMS技術は有効である。光MEMSは、現在研究が進められている光センサ・ディスプレイ用素子、光スキャナー等の製品応用が加速されると予想される。また、光通信市場の回復が予想される2004年頃（RHK予想）から、次世代光波長多重（WDM）通信用の光スイッチやレンズ、光導波路、波長可変フィルタ等の光学素子やそれらをシリコンチップ上で集積・実装したコンポーネントのニーズが増し、実用化が進むと予想される。そこでは半導体製造技術を利用した技術の差別化と低コスト化が鍵を握ると考えられる。

一方、中長期的には、バイオMEMS（ μ -TAS；Micro Total Analysis System）、Power MEMSの市場成長が期待されている。バイオMEMSとはDNAチップやタンパク質チップ⁵⁾等ゲノム情報に直接関係した物質を検出するチップ（ゲノムチップ）や、血糖値や病原菌などを測るバイオセンサ⁶⁾を含むMEMSデバイスである。検出対象となるのはDNA（デオキシリボ核酸）やタンパク質、生体分子や化学物質である。特許庁の市場規模予測⁷⁾ではDNAチップ、タンパク質チップ、バイオセンサを合わせた国内市場は、2000年の490億円から2010年には2兆3000億円に達すると予想されている。これは今後の少子高齢化社会の進展に伴って医療費の抑制のため、検査・診断による予防に重点を置いた医療に移行するようになるためである。最近の研究で注目されている技術は μ -TAS⁸⁾ 或いはLab. on Chip（集積化実験室）と呼ばれるマイクロ化学分析チップである。これはガラス基板に微細な溝（マイクロ流路）を形成し、その流路中で化学合成や抗原抗体反応等の分析を行う。システムを微小化すると相対的に面積の効果が大きくなる事から反応、分離の高速化が実現できる。また、試薬の量の節約、精密な温度制御が可能であり、複数の反応を並列に観察・分析できる。これらマイクロ流路と、微小なポンプやバルブ等の部品をMEMS技術を用いて集積化する事で、たとえば血液等から必要成分の分離抽出を行い、同じチップ上に集積化した各種センサで検出し、健康に関する情報を入力する事ができる⁹⁾。さらに情報処理と通信機能を有するLSIと融合する事で、ネットワーク上のデータベースにアクセスし、データを照合する事も可能である。

またPower MEMSは携帯用エネルギー源の用途として研究が進められている。たとえば空気圧駆動で130万回/分のガスタービン発電機の報告がある。また長時間利用が可能なマイクロ燃料電池の研究が進められており¹⁰⁾、ノー

トパソコン等の携帯機器用電源としての用途が期待されている。

今後の技術開発課題

(1) 技術面からの課題

技術面の課題は各種MEMSに固有なものが多く、大別すると

①設計・解析支援技術（シミュレーション等）の構築②加工プロセスの高精度化③実装プロセスの高機能化、低コスト化④LSIとの融合⑤高信頼性の確保⑥多種材料の活用、の6項目に分類できる。

①は、要求機能に基づいた構造体の最適設計、動作・機能解析を行う上で不可欠な技術である。特に設計・解析に付随する材料特性、加工特性、各種設計知識に関するデータベースをIP（Intellectual Property）として蓄積し、他のMEMS構造体の設計にも活用していく事が競争力ある製品を短期間で開発していく上で重要である。②は、シリコン基板の貫通等、深堀り（ $\sim 600\text{mm}$ ）加工が必要な場合、高エッチング速度（ $> 10\text{mm}/\text{min}$ ）や対マスク高選択比（ > 150 ）、高精度な垂直加工が課題である。また光スイッチのミラー製造では、加工表面の平坦化が課題として挙げられる。③は、RF MEMSでは高周波対応実装技術開発、センサMEMSでは低衝撃ダイシング・実装技術が課題として挙げられる。④は、LSIと可動部を融合する方法として、同一製造プロセスで1チップ内に同時に造り込む方法、別チップで製造した後、チップ間再配線技術で1チップ化する方法、一つのパッケージ内で実装する方法がある。チップ間再配線技術としては、フェムト秒レーザを用いたシリコンやガラスの貫通と貫通孔への銅埋込み配線技術、シリコンとガラスやシリコン同士の低温接合技術等が研究されている。⑤は、RF共振器や光スイッチ等、可動部品の動作寿命や、加速度センサの耐高衝撃性等が挙げられる。また各分野に共通して、信頼性規格の標準化が課題である。⑥は、最適材料の選択とそれを用いた最適設計が挙げられる。その他共通課題として、ゴミ対策や洗浄時の梁構造体の付着対策、ウェハ裏面にパターンを形成する際の表面の保護（傷対策）等が挙げられる。上述した以外にも各MEMSに特徴的な技術課題が多々あるが、これら課題の解決によって獲得した技術をノウハウとして蓄積し、他のMEMS製品に適応していく事が重要である。

(2) 開発体制の課題

MEMSは、最終製品（システム）の機能を高め、或い

は新たな機能を生み出し、高付加価値化するための鍵となる超小型機械システムである。したがって製品（顧客）からの多種多様な機能要求があり、これに柔軟に対応できる設計、解析、製造、評価技術が要求される。また各製品に特有な機能ニーズを的確に捉え予測するための情報ネットワークが重要である。これを実現する鍵は社内に保有する特徴ある技術を整備し、スピーディーに融合していく体制と技術力にあると考えられる。また一社が単独で保有・育成できる要素技術や製造設備には限界があるため、外部機関の設計・製造技術やノウハウ、更には異分野技術を積極的に取り込んでいく体制が必要である。そのためには、国内外のネットワークの有効活用がますます重要になってくる。また大学やベンチャー企業等外部機関との積極的な連携（オープンコラボレーション）¹¹⁾がビジネス成功の鍵を握ると考えられる。

当社のMEMS開発への取り組み

当社は上記観点から、国内ファンドリーネットワークの情報チャンネルを介したMEMSファンドリーサービスを手掛けている。これにより前述したMEMS固有技術やノウハウを社内に蓄積すると共に、他のMEMS製品への応用展開を図っている。一方、当社は長年に渡って蓄積してきたCMOS技術と通信技術を保有しており、それらをシリコンチップ上で融合する事によって新たな応用分野を切り開くポテンシャルを持っている。また市場面では、モバイル/パーソナル、デジタル情報家電分野を指向しており、この分野は来るべくユビキタスネットワーク社会で必要とされる通信技術やセンサを軸としたシステムとの技術的接点の高い領域である。この観点から、上記ファンドリー事業の次のステップとして、通信機能や信号処理機能等をもったLSIとセンサを融合したセンサMEMSの独自開発に取り組んでいる。その第一ステップとして3軸加速度センサ単体デバイスを開発した。本センサの用途の一つとしてGPS（Global Positioning

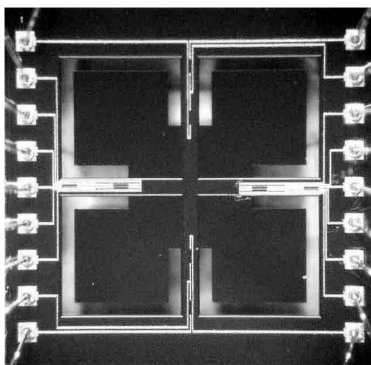


写真1 開発した3軸加速度センサ単体デバイスのチップ写真

System) 搭載携帯端末機器における方位センサの傾斜補正がある。写真1に、そのチップ写真を示す。本センサはバルクマイクロマシン技術とSOI（Silicon on Insulator）基板を用いて製造した。従来品は耐衝撃性が1000G迄であったが、衝撃耐性を向上させる当社独自の構造を採用することにより、耐衝撃性4000Gを初めて達成した。これは1.5mの高さからコンクリート上に落下させた時の衝撃力に相当するものであり、一般消費者向け用途に十分耐え得る構造である事が確認された。今後LSIとの集積化を進めると共に、ゲーム機器、産業用機器、セキュリティ機器等他の分野への応用を目指して開発を進めている。

あ と が き

MEMSは製品差別化のキーデバイスとして今後情報技術や半導体技術、ナノテクノロジー等と一段と融合を深めながら、新たな応用分野を切り開いていくと考えられる。今後、市場で競争力のある高付加価値製品を提供していくためには、技術分野の枠を超えて市場にある多種多様な機能ニーズを的確に把握、選択し、柔軟に対応していく事がますます重要になってくると考えられる。◆◆

参考文献

- 1) R. Nayve *et. al.*: High resolution long array thermal ink jet printhead fabricated by anisotropic wet etching and deep Si RIE, proceedings of MEMS 2003, pp.456-461, 2003
- 2) <http://www.memindustrygroup.org>
- 3) http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/117_Digital_Light_Processing_MEMS_display_technology.pdf
- 4) <http://www.nexus-emsto.com/>
- 5) 木内洋介他編集：小特集「マイクロテクノロジーの開花に向けて」、電子情報通信学会誌、Vol85、No10、pp.715-727、2002年
- 6) 軽部正夫征夫他：バイオセンサの現状と今後の展開、応用物理第70巻、第12号、pp.1407-1413、2001年
- 7) http://www.jpo.go.jp/techno/1304-095_trend.htm
- 8) 馬場嘉信：マイクロ・ナノバイオチップテクノロジー、応用物理、第70巻、第12号、pp.1407-1413、2001年
- 9) 堀池靖浩：優れた微細加工技術 医療分野に展開を、日経先端技術、No9、pp.35-38、2002年3月11日号
- 10) <http://www.casio.co.jp/release/fuelcell.html>
- 11) 江刺正樹：MEMSの本質を半導体技術者はどう理解すれば良いか、日経マイクロデバイス5月号、pp.108-113、2003年

● 筆者紹介

池上尚克：Naokatsu Ikegami.シリコンソリューションカンパニー 研究本部 新技術研究開発部 主任技術者 工学博士 MEMSプロジェクトチーム サブチームリーダー