

環境と安全・安心に寄与する MEMS と今後の取組み

友高 正嗣 (ともたか まさつぐ)

山下 悟 (やました さとる)

特集2

1 まえがき

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は、シリコンやガラスなどの素材にきわめて精巧な加工を行うものづくり技術である。主な製品分野は、さまざまな自然現象をとらえるセンサとインクジェットに代表されるアクチュエータに分類できる。

小型化できることにより、設置する場所を選ばないこと、微小な現象をセンシングできること、一般的に小電力で動作する利点があることから、私たちの身の回りにも広く普及している。また、安全・安心な社会実現へのものづくり技術として大きな期待を担っている。

MEMS は、日本の得意分野であり、大学ベンチャーを中心とする米国と急迫するアジアに対する差別化技術である。富士電機も参加している産業競争力懇談会 (COCON: Council On Competitiveness-Nippon) は、国の持続的発展の基盤となる産業競争力を高めるために産官学協力のもと、政策提言をしている。交通、環境などのテーマとともに“MEMS フロンティア・未来デバイス技術プロジェクト”の提言がされており、“環境・エネルギー”、“健康・医療”、“快適・安全・安心”の三つの主要テーマに対し、開発がスタートしている。

表1にMEMSの産業技術ロードマップを示す。第1世代の現状MEMSの用途は、自動車を例にとると燃料系の制御用の流量・圧力センサ、エアバッグ用の加速度センサ、タイヤ空気圧用の圧力センサなど単機能ではあるが、快適

表1 MEMSの産業技術ロードマップ

世代	MEMSの機能	市場規模 (億円)
第1世代 (現状)	単機能デバイス ○既存機能の小型化など	5,000
第2世代 (2010年～)	多機能デバイス ○機能の複合化 ○半導体回路との一体化 ○高集積化	11,700
第3世代 (2015年～)	自律分散デバイス ○バイオとの融合	24,000

さと安全に大きく寄与しており、情報通信機器やアミューズメントをはじめ多くの分野への適用が拡大されている。富士電機は主にプラント計測分野を中心に、自動車用圧力センサを含め、MEMS 開発を長年実施してきている。

2 富士電機の MEMS への取組み

2.1 富士電機の MEMS

富士電機においては表2に示すように、産業、環境、電力などのプラントシステムを提供している。プラントにおけるさまざまな事象変化をセンシングするMEMSを適用したセンサを、四半世紀以上にわたり開発生産してきている。

これらのMEMSセンサは、シリコン、ガラスなどを素材とし、基本的に三つの製造技術(①深掘り加工技術、②成膜技術、③接合技術)により、高精度に加工されており、機械加工によるセンシング機器に比べ、2桁程度の精度向上を果たしている。これらのMEMS応用センサはいわば、第1世代の単機能デバイスである。

表2 富士電機のMEMSセンサ

MEMSセンサ	用途
圧力センサ ○深掘りエッチング	化学プラント 水環境プラント
ガスセンサ ○めっき技術	環境プラント
放射線センサ ○CVD成膜技術	放射線プラント
ひずみセンサ ○不純物拡散技術	各種プラント保守
バイオセンサ ○陽極接合技術	水環境プラント
パーティクルセンサ ○レーザー技術	水環境プラント 環境監視
車両検知センサ ○超音波技術	交通プラント
自動車用圧力センサ ○ダイヤフラム形成	自動車



友高 正嗣

MEMS および無線応用製品の開発、製造技術、生産に従事。現在、富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部東京工場長。電気学会会員。



山下 悟

MEMSの製造技術開発、製造に従事。現在、富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部東京工場ファインテック機器部課長。

富士電機では、大学をはじめとする各研究機関との共同開発を活発にし、第2世代、第3世代 MEMS の応用開発を積極的に進めている。

2.2 富士電機の第2世代 MEMS 開発

(1) 半導体回路との一体化 (シリコンインターポーザ)⁽¹⁾

一般的にセンサ回路は、プリント配線板により形成する。通常 MEMS 技術応用センサは図1に示すように、微細な物理現象を検知するため最小線幅が5μm レベルの場合であれば1μm 以下の精度で加工できる。そこで検知する電気的信号もきわめて微小なものである。配線幅が100μm レベルの場合であれば、プリント配線板の配線加工精度は数十μm である。加工精度が MEMS センサの検出精度に大きな影響を及ぼす場合が多い。

富士電機では、この MEMS とプリント配線板とのギャップゾーンを埋める技術として、シリコンインターポーザを製品化している。シリコンインターポーザとは、シリコン基板上にベアチップが搭載できる微細な配線基板のことである。シリコンインターポーザの特徴として、以下の機能があり MEMS の性能を高めている。富士電機ではこれを IMM (Intelligent Micro Module) の名称で自社製品だけでなく、さまざまな分野の顧客にも活用いただき、低価格かつ重要回路のブラックボックス化などのメリットを享受していただいている。

IMM の特徴として、表3に示すように多層形成による抵抗、コンデンサを内蔵している。5mm 角の IMM には数百の抵抗およびコンデンサの内蔵が可能であり、小型化とともにコストダウン効果も大きい (図2)。

IMM の MEMS を生かす特徴としては、一般的なプリント基板と比較して、SN 比の向上により、MEMS センサの微小な電気信号のデジタル変換が可能である。また、同一シリコン材料であることから、回路と IMM との一体形成により、熱膨張をはじめとする物理特性が完全に整合され、熱ストレスに対する耐性も優れている。

最大の効果は多品種少量生産対応である。一般的に

MEMS 技術センサは、初期費用による経済的な要求から、数十万単位の物量が必要とされる。一方、IMM 回路は1ウェーハからの量産化が可能であり、月産数百個の顧客への提供を実施している。

さらに昨今の顧客の要求は、重要回路ノウハウの流出防止である。製品の輸出は必須であるが、違法コピーへの対応は困難になる。シリコンインターポーザの内層回路形成とコーティングを実施することにより、重要回路のブラックボックス化ができ、効果はきわめて大きい。

(2) 半導体回路との一体化 (CMOS との1チップ化)

多品種少量 (開発試作段階含む) への MEMS と回路との適応技術として、IMM を紹介したが、量産機種においては MEMS と回路との複合化手法として、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) との1チップ化を、富士電機では世界に先駆け量産化している。量産時におけるコストダウン効果と性能向上効果はきわめて大きく、その適用も情報端末機器や車載機器などに大きな可能性がある。CMOS と MEMS を同一素子上に製作すると図3のような利点がある。CMOS はサーフェイス (表面) 加工技術であり、MEMS はバルク (三次元) 加工技術のため、通常1チップ化は困難とされてきた。CMOS 回路を保護しつつ、高アスペクト加工を実現したことにより、1チップ化を可能にした。

富士電機は、6インチ量産ラインで MEMS を生産している。8インチプロセスも可能であり、従来のプラントシステム向けだけでなく、広く MEMS 分野への拡大を着実に実施している。そのためフォトリソプロセス、エッチング、成膜、接合、実装、パッケージングの各工程の1フロアクリーンルームを東京工場 (東京都日野市) 内に整備し、開発・量産を実施している。

図1 MEMS とプリント配線板との加工精度

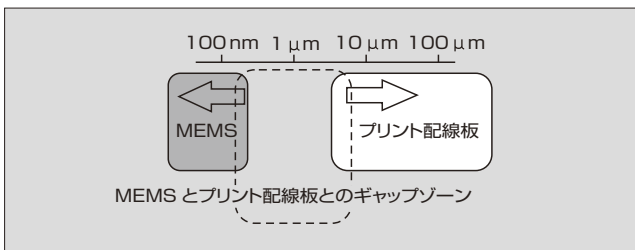


表3 IMM (シリコンインターポーザ) の機能

機能	内容
高精度配線	1~5 μm配線
多層配線機能	1~4層
複合機能	抵抗内蔵形成 コンデンサ内蔵形成

図2 IMM の外観

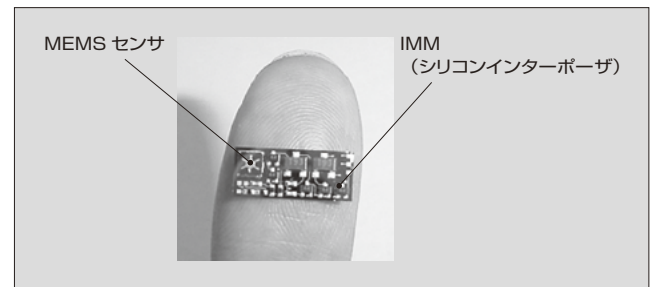


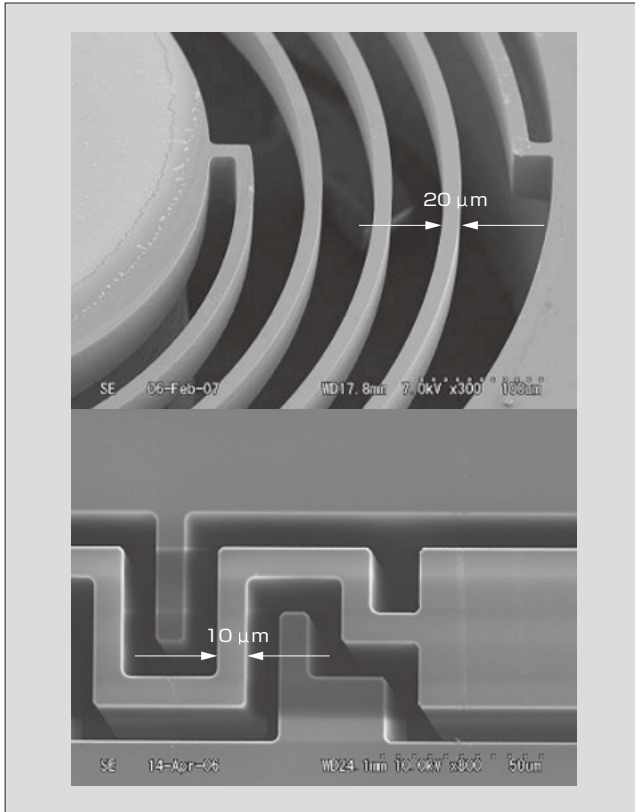
図3 CMOS+MEMS の利点

模式図	利点 (比較)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ プロセスの制約が少ない。 ○ 設計的な制約が少ない。 ○ 組合せが容易である。
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 小型化が可能である。 ○ チップ内でデジタル変換まで可能である。 ○ 後工程が安くなる。

表 4 高集積技術への要素技術

技術	現状	2008年度目標
深堀り技術	高アスペクト比加工 アスペクト比 30	超高アスペクト比加工 アスペクト比 50
成膜技術	段差成膜 20 μm	高段差成膜 100 μm
接合技術	陽極接合 異種金属接合	低温接合化 ~140℃

図 4 加工の一例（加速度センサ）



(3) 高集積化

複数のセンサを1チップに集約するため、MEMS 形成技術の高度化が必要となる。特に三次元形成が MEMS によるセンサへの性能向上に重要な技術であり、富士電機では、その高度化技術を表 4 に示す 3 テーマに絞り推進している。さらに、MEMS の要素技術開発を行っている。三次元加工を主体として図 4 に示すように、物理的な微小変動に対し、高感度化と集積化をねらいとしている。

これらの MEMS 要素技術は、センシング用途だけでなく、アクチュエータ（機械的動作）にも応用可能である。微小なプロービング技術は、触覚センサとしても機能し、視覚障害者への情報伝達に有効な手段である。本来、点字機能は固定情報であるが、マイクロプロービング技術と情報端末との複合化技術によりリアルタイムに変化する点字情報にも応用可能である。現在、東京大学先端技術研究所と共同開発を実施しており、近い将来、情報端末機器と MEMS アクチュエータとの複合化により、視覚障害者に対して、健常者と変わらぬ情報を提供できるようになる可

図 5 水質安全モニタ用のバイオセンサ

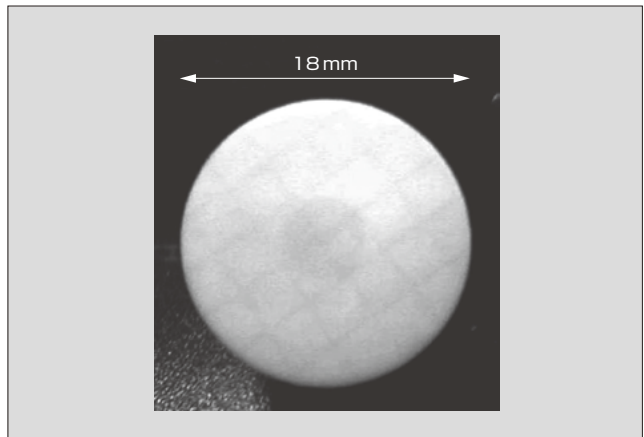
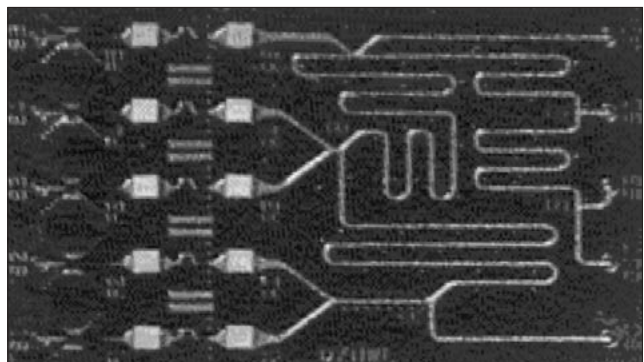


図 6 μTAS（ダイオキシン検出センサ）



能性がある。

2.3 富士電機の第 3 世代 MEMS への取組み

富士電機は水環境プラントに対し長い歴史を保有し、水質の安全センシングに対し多くの独創的なセンサを開発・量産してきた。光センサの応用として微小なパーティクルを検出するセンサ、トリハロメタンなどの化学物質の検出センサなどがある。

なかでも図 5 に示すように、バイオ技術の応用である水質安全モニタのバイオセンサは、生化学反応技術で、市場にて高い評価を得ている。このバイオセンサは、検出する菌の培養、調整、成膜の工程を経て生産する。安定的な品質を確保するため、東京工場内にバイオルームを設置するとともに複数のシーズ（菌株）を確保し、変異への対応に備えている。このようなバイオ技術と MEMS 技術を融合した μTAS (Micro Total Analysis Systems) 技術に取り組んでいる。生化学反応は、反応速度が反応領域の体積に反比例することから、通常の試験管を MEMS の微細反応とすることで、1,000 ~ 100,000 倍の速度で生化学反応が加速できる。

富士電機は産学官との共同研究により、図 6 に示すダイオキシンの μTAS での検出に取り組み、検量性を確認してきた。検出には、従来、高度な分析装置と数日単位の検出時間が必要であった分析に対し、μTAS のダイオキシン検出センサは、10 分以内での分析を可能にしている。こ

の μ TASでは抗体反応により、特定物質の検出を行うセンサを使用している。微細加工で形成された微小領域に抗体の固定を特殊な方法で行うことにより検出する。しかしながら、微小な流路によるための円滑なサンプルの液搬送やサンプリング精度に課題を残している。

現在、インクジェット技術を応用した検出精度の高度化を進めており、装置の小型化とともに生化学検出のオンサイト化が近い将来実現可能である。

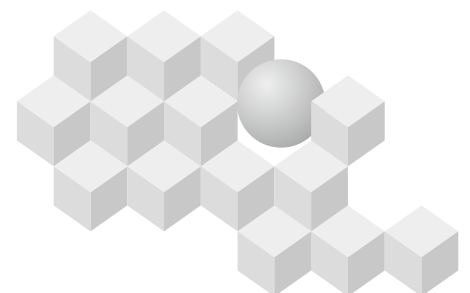
生態系における農薬などの影響による環境ホルモンの検出や化学物質の検出、血液や唾液などの状態変化の検出などが高速に可能となることは、広く安全・安心な社会への貢献につながるものであり、 μ TASはこれらを支える重要な技術の一つであるといえる。

③ あとがき

本稿では、富士電機のMEMSの要素技術、製品への適用、また今後の取組みについて紹介してきた。MEMSは新規性を持ち、高機能化の可能性から高いニーズのある技術であるため、さまざまな製品への適用が予想される。富士電機は、MEMSの要素技術を高め、無線技術や計測技術を複合化することによって、社会が求める環境保護と安全・安心な社会のために貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Sakata, K. et al. シリコンインターポーザ基板を用いたMEMSセンサシステムの開発. Technical Meeting on Sensors and Micromachines 2007. p.39-42.





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。