

■10 群（集積回路）－ 8 編（集積化センサとマイクロマシン）

1 章 MEMS 技術の基礎

（執筆者：鈴木健一郎）〔2018 年 8 月 受領〕

システムの小型化の要求は技術史の大きな底流をなしている。マイクロエレクトロニクスは集積化技術によってこの要求に応えるものであった。集積化はシステムを構成するコンポーネントを集積化することであるが、特に電気回路と集積化したものを集積化センサと呼んでいる。

(1) システムの小型化

システム小型化の強い要求は第二次世界大戦の時代にさかのぼる¹⁾。20 世紀前半に開発された真空管技術は増幅器を生み出したが、消費電力の増大と脆弱さという課題を持っていた。この真空管技術の課題を 20 世紀後半に開発された固体半導体技術により克服することができ、今日まで続く集積回路とデジタル回路技術が生み出された（なお、物理学者のファインマンはナノメートル以下の微小な世界に大きな可能性があることを指摘したが²⁾、当時の製作技術の壁が厚かったためにナノテクノロジー技術に関心が集まる 90 年頃まで注目されることがなかった）。60 年代にはエレクトロニクス技術革新が開花し、やがて 70 年代にはマイクロプロセッサ（MP）の技術進歩に合わせて MP に接続するインタフェース機器（センサとディスプレイ）に注目が集まるようになった^{3),4)}。最近 50 年間のセンサを含むマイクロデバイスの集積化技術の発展を図 1・1 に示す。

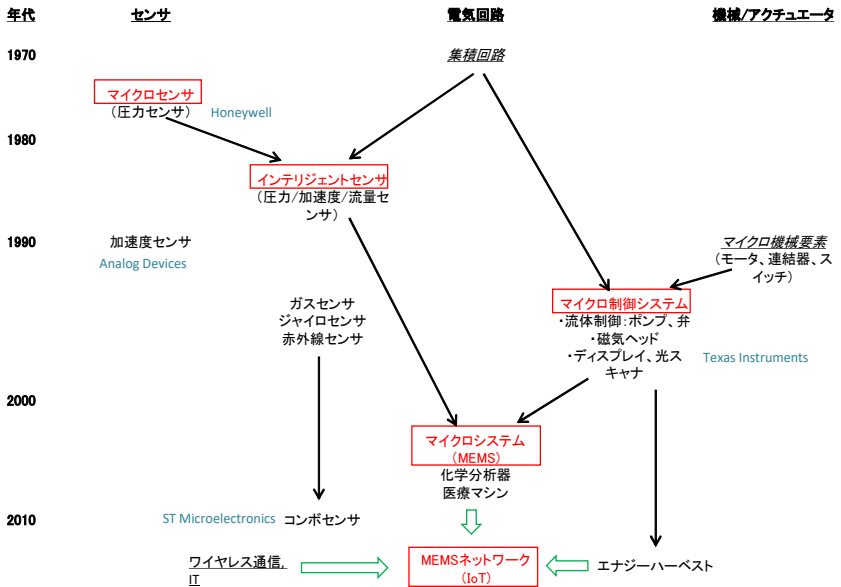


図 1・1 システム小型化を目指した集積化デバイス開発の流れ

マイクロシステムの製作技術に関して、60～70 年代にシリコン半導体プロセスの中で数多くの技術革新があった。続いてこの半導体プロセスで開発された作製技術を利用して機械構造を持つセンサの小型化に役立てるための研究が積極的に行われるようになった。この技術をマイクロマシニング技術と呼ぶ⁴⁾。マイクロマシニング技術を利用して種々の機械構造体を利用したデバイス（光学ミラー、電気スイッチなど）の研究が行われた。80 年代末に、マイクロマシニング技術を使って動く機械構造体を作製する研究に注目があつまった。90 年代には流体や光の経路を制御するマイクロ機械デバイスが開発されるようになった。21 世紀になると、化学分析や医療用のマイクロデバイスの研究が活発に行われるようになり、今日、マイクロシステム（MEMS）と呼ばれる技術分野が広く一般に通用するようになった。現在、MEMS 技術は、エナジーハーベストと IT 技術と複合して IoT（Internet on Things：モノのネットワーク）社会を目指したネットワークインフラの実現のための重要な技術となっている。

集積化デバイスの大きな利点として、①小型化、②高性能化（高感度化）、③多機能化がある。以下にシリコンマイクロマシニング技術を利用した集積化システムの 3 つの代表的な初期事例を述べる。

- ① 2 インチシリコン基板上に 1.5 m のガス流路を形成したガスクロマトグラフィーが 1975 年に発表された⁵⁾。幾重にも折り返した 1.5 m のガス流路、ガスの注入バルブ、更にガス成分検出部を直径 50 mm のシリコン基板の上に集積化したデバイスであり、システム小型化を最初に明確に示したものとして注目される。
- ② ある流量センサは、流路の一部に作製された発熱体による温度分布が流量に関係することを検出原理として利用する。センサシステムを構成する流路、発熱体、温度センサをマイクロマシニング技術を利用して小型化することによってセンサの応答速度を従来の 100 倍以上も高速にすることが可能になった。集積化センサがシステムを高感度化することの明確な例である。
- ③ 集積化デバイスは同じ機能を持つものを多量に製作するほかに、異なる機能を持つデバイスを同一基板上に製作することを可能にする（この場合、種々の異なるデバイスを同一の方法で製作できるようにすることが必要である）。この例は、集積化センサが多機能化に適していることの例である。

(2) 集積化センサ

センサは電気回路に機械・化学分野などの外界を検出するシステムを組み合わせで構成されるため、センサシステムの小型化は、エレクトロニクスで成功した集積回路技術を機械と化学応用を含む電気回路よりも広いシステムに応用することによって実現できると考えられた。80 年代には、自動車産業からのコスト削減に対する強い要望に応じて、集積化圧力センサが製品化された。2 種類の代表的な圧力センサがある。半導体のピエゾ抵抗効果を利用したピエゾ抵抗型圧力センサは、従来の方式に比較してセンサ感度を数十倍増大させることができた。静電容量型センサは、静電駆動力を利用してセンサの自己診断を可能にすることに成功した。これら集積化センサは量産化に適しており、またこれを使用するコンポーネントの実装を容易にすることから徐々に使用され始め、今日では、安価な集積化センサが多量に使用されている。

図 1・2 にピエゾ抵抗型圧力センサの構造を示す。この圧力センサは、上下の圧力差に比例して変位するダイアフラム薄膜とダイアフラム端部に形成されたピエゾ抵抗からなっている。また、ダイアフラム周辺には集積回路が作製されている。このセンサは以下に述べるように幾つ

ものの非常に優れた特徴を同時に兼ね備えたものであるために、集積化センサを最もよく代表するデバイスである。

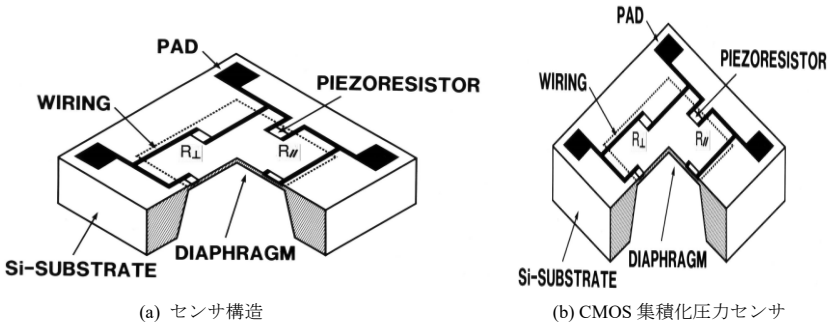


図 1・2 ピエゾ抵抗型圧力センサ

このシリコン圧力センサの優れた特徴の一つは、シリコンは疲労が少ない材料であり、またダイアフラムの作製を容易にする加工技術があることである。第二に、歪みに応答して抵抗が変化するピエゾ抵抗効果は、金属の抵抗変化率に比べて約 100 倍もの大きな変化率を持っていることである。このため、センサ感度を大きくすることができる。最後に、センサの補償処理回路を集積化することができることである。ここで第 2 番目に示した優れた物理法則をセンシング原理として利用したことが、ほかの方式を利用するデバイスに比べてこの圧力センサが製品として使用されるのに大いに役立ったことが注目される。その後、圧力センサにおいて、ダイアフラムの密封実装技術が開発されて、今日、ダイアフラムをシリコン基板の中に形成した圧力センサが製品として使用されている。

80 年代初めに開発された集積化センサは主にパイボラ技術を利用して電気回路を作製した。パイボラ回路は外界変動の影響を受けにくいことから、センサの電気回路に適している。1984 年、著者のグループは世界の潮流に先駆けて CMOS 技術を利用した集積化圧力センサを発表したが⁶⁾、今日では CMOS 技術が主流となっている。これは、集積回路の主流が CMOS に移ったためにセンサ回路もこの流れにそって作製することが必要となったからである。一方、センサの機械構造体の作製ではサーフェスマイクロマシニング加工技術が集積回路を同時に集積化するのに最も適している。この加工技術は機械構造体を厚く形成することが困難であるという課題があったが、今日、SOI 基板やポリシリコンエピタキシャル技術を利用することによって厚い機械構造を集積回路基板の上に作製することが可能になった。

電気回路をセンサと集積化する利点は、①小型化、②寄生容量の抑制、③消費電力の削減、更に④(多量に生産されたとき)コスト削減が期待できることである。一方、センサと電気回路の作製について両方の最適化が困難、また、集積回路を搭載させたセンサは応用が制限される(特殊性)、という課題がある。これら課題を考慮して、集積化機能の規模としてインピーダンス変換機能のみを集積化することが最適であるという興味深い指摘がある⁷⁾。

(3) まとめ

今日おおいに注目が集まっている体内挿入医療システムでは小型化が決定的に重要である。

また，社会に広く普及する情報インフラ（IoT）応用では低消費電力化が非常に大切である．これらの要求を満足することを目指して，今後，集積化技術が更に進展していくと期待される．

■参考文献

- 1) J. Millman and A. Grabel : “Microelectronics,” McGraw-Hill, N.Y., 1987.
- 2) R.P. Feynman : “There’s plenty of room at the bottom,” Caltech’s Engineering Science, 1960.
- 3) K.S. Wise : “Integrated sensors: Interfacing electronics to a non-electronic world,” Sensors and Actuators, vol.2, pp.229-237, 1982.
- 4) K.E. Petersen : “Silicon as a mechanical material,” Proc. IEEE, vol.70, no.5, pp.420, 1982.
- 5) S.C. Terry, J.J. Jerman, and J.B. Angell : “A gas chromatograph air analyzer fabricated on a silicon wafer,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, pp.1880, 1979.
- 6) K. Suzuki, T. Ishihara, M. Hirata, and H. Tanigawa : “Nonlinear analysis of a CMOS integrated silicon pressure sensor,” IEEE Trans. on E.D., vol.ED-34, no.6, pp.1360-1367, 1987.
- 7) S.D. Senturia : “Microsystem design,” Kluwer Academic Publisher, Boston, 2001.