自動車業界における MEMS の応用例

竹 内 幸 裕^a

^a(株)デンソー 基礎研究所(〒470-0111 愛知県日進市米野木町 500-1)

Automotive Applications of MEMS Technologies

Yukihiro TAKEUCHI^a

^aResearch Laboratories, DENSO CORPORATION(500-1, Minamiyama, Komenoki-cho, Nisshin-shi, Aichi 470-0111)

Keywords : Acceleration, Pressure, Air Flow, MEMS, Sensor

1. はじめに

ここ数年のハイブリッド車の普及、自動運転のトレンドには、目を見張るものがある。このような自動車の進化を支えるものに制御システムの高性能化が挙げられる。車載の制御システムには、パワートレイン、ボデー、車両(走行・安全)、情報通信系の4つがある。実際にパワートレイン系ではエンジン、トランスミッション、モーターなど、ボデー系ではエアコンなどの空調システム、ワイパー、メータ、ドアロックなど、車両(走行・安全)系ではエアバッグ、アンチロックブレーキ、ヘッドアップディスプレイ、クルーズコントロール、衝突回避・緩和など、情報通信系ではナビゲーション、ETCなどの制御が挙げられる。これらのシステムにより低燃費、低エミッション、安全、快適、利便などが自動車に提供されている。制御システムは、ECU (Electronic Control Unit)、センサ、アクチュエータで構成され、自動車の状況を各種センサが検出してECUに取り込み、取り込まれた情報によりECUは演算処理して最適な状況になるようにアクチュエータを駆動する。センサは自動車の環境面、安全面における制御に不可欠な役割を果たしている。

2. 自動車用センサ

自動車にセンサが搭載され始めたのは1960年代で、それ以降、制御の高精度化、新機能システムの開発により、センサの搭載数は大きく増加してきた。現在、車種によっては100個を超えるセンサが搭載され、様々な物理量、化学量を検出している。センサ自身も大きく変貌を遂げてきており、初期にはメカニカル方式のスイッチであったものが、半導体(MEMS: Micro Electro Mechanical Systems)式となり状態をよりきめ細かくセンシングできるようになってきた。自動車用センサに求められる主たる要件は、

- (1)劣化しにくく、長期間の使用に耐える
- (2)コストがかからない
- (3)小型で、使いやすい
- (4)動特性が良好である(適当な時定数である)

(5)耐衝撃性に優れる

(6)駆動に必要なエネルギーが少ない

(7)故障などの自己診断機能を有する

などである。MEMS技術は、超小型化、超軽量化、省エネルギー化、低コスト化、高集積化などの飛躍的な改善・改良に適し、高速動作、高速反応、自己診断機能などの新機能の具現化に大きく寄与する。自動車用センサの要求に良くマッチングし、必然的に期待が大きかった。このことから1970年代からMEMS型のセンサが開発、1980年代に自動車に搭載され、その後急速に展開されてきた¹⁾。弊社でも年間億を超える生産台数となっている。本稿では弊社の代表例として圧力センサ、加速度センサ、エアフローセンサを取り上げて解説する。

3. 圧力センサ

3.1 概要

車載における圧力センサの用途の一つにエンジン制御が挙げられる。エンジン手前のマニフォールド(吸気管)内の圧力(減圧)を測定することによって、エンジン内に流れ込む空気量を算出している。この空気量に応じて適量の燃料を噴射することで適正な燃焼を実現している。自動車では排ガス中の酸素濃度を測るO₂センサが広く知られているが、現状ではO₂センサによるフィードバック制御と圧力センサによるフィードフォワード制御の両面から、より良い燃費と排ガスの清浄化に向けた制御をしている。

エンジンの空気吸気圧の他に、燃料噴射圧、燃料タンク内圧、エアコン冷媒圧、ブレーキ圧、タイヤ空気圧、衝突検知用など、多種多様な圧力の検出ニーズがある^{1),2)}。これにもなつて圧力の測定範囲も広く、5 kPa から 200 MPa (0.05 気圧 ~ 2000 気圧)までをセンシングしている。

3.2 センサと検出原理

エンジン吸気圧センサを図1に示す。(a)で左に出ているのが信号を取り出すコネクタ部で、下側に小さく出ている円筒部がエンジンの吸気管に挿入される。(b)に示したセンシング素子はシリコンで出来ており、中央部分(薄青色)の部分

(a) 外観

(b) センシング素子

(c) センシング素子の断面イメージ

図1 エンジン吸気圧センサ

がダイヤフラムで、(c)に示す断面でわかるように圧力で変形しやすくするため薄肉化(数十 μm)されている。その周囲には増幅回路などを配置し、回路集積センサとなっている。圧力の測定には歪ゲージと呼ばれ、半導体の性質の一つである応力による電気抵抗変化を利用している。ダイヤフラムが圧力により変形し、加えられた応力によって歪ゲージの電気抵抗が変化する。高圧測定用では金属ダイヤフラムに歪抵抗を形成した Si チップを接合したものもある³⁾。圧力センサではダイヤフラム厚さが感度に大きく影響するので、異方性エッチング時に電気化学ストップを用いて高精度の厚さを確保している。さらに異方性エッチングに用いる KOH 溶液の不純物濃度を ppb レベルに制御して、良好なエッチング面を実現している⁴⁾。

実装形態においても、CAN パッケージから、モールド IC 化、ベアチップ実装へと小型集積化が行われ、30 年ほどで、図 2 に示すように体積比 0.09 となった。構成する部品点数も 32 個から 4 個となっている。自動車用の広い使用温度範囲と高精度、様々な環境下で高い信頼性を満足させるために実装技術は重要であり、特に圧力センサは原理上センシング部が露出するため、多くの工夫がされている。エンジンの空気吸入量を測定する吸気圧センサなどは、センシングエレメントが直接吸入空気に触れることになり汚れが付着することになる。このためセンシングエレメントチップを保護する必要がある、樹脂ケース側はゴム材で覆い、受圧する表面側はゲル材で覆

図2 圧力センサの小型化(体積比)

う 2 層構造になっている。ゲル材の役割は空気に含まれる汚れなどから受圧面を保護することとで、ダイヤフラムへの応力を最小限に抑えるため低弾性率の材料を採用している。ゴム材はコネクタと樹脂とのすき間から空気が浸入しないようにして、ゲル中に気泡が生じることを防止する役目を持つ。この吸気圧センサの搭載位置はエンジンからの吹き返しなどがあるため、ゴム材、ゲル材ともにガソリンに浸漬されても膨潤しにくい材料となっている。

4. 加速度センサ

4.1 概要

加速度センサは、車両に加わる衝撃、車両の傾き(重力変化)などの検出に使用される。用いられるシステムには、エアバッグ、アンチロックブレーキ、スタビリティコントロール、ナビゲーション、セキュリティシステムなどが挙げられる。エアバッグでは、前方衝突、側方衝突などの位置、またボデー剛性などにより、追突時の加速度(衝撃)が異なるため、数十 G ~ 数百 G の測定範囲が必要となる ($1\text{ G} = 9.8\text{ m/s}^2$)。このためレンジ毎の加速度センサが製品化されている。また車両制御システムとなるスタビリティコントロールシステムではくるまの横方向加速度を捉え、ナビゲーションシステム、セキュリティシステムにおいては、車両の傾きを検出するので、1 G 以下の検出が必要となる。

加速度センサは 90 年代のエアバッグシステムの急展開で、数量が爆発的に増加した。MEMS 型の加速度センサには 2 つの代表的な検出方式があり、歪ゲージ式と静電容量式であるが、ここでは現在の主流である静電容量式を紹介する。

4.2 センサと検出原理

静電容量式の特長は空気の誘電率が温度により変化しないことから、原理的に温度特性を持たない点と、電極間の電圧印加により静電気を発生するアクチュエータ機能を持つことである。静電容量式のセンサを図 3 に示す。(a)に示すようにセラミックパッケージとなっており、これをプリント基板上において表面実装できるようになっている。(b)がセンシング素子の平面写真、1 mm 角程度で中央付近がセンシング部となっているが微細構造のため、(c)にイメージ図を記す。シリコン基板上には、錘とそれを支える梁が形成されており、錘には静電容量を形成するための複数のくし歯電極が設けら

れている。これらが可動電極となる。また基板側にも複数のくし歯電極があり、これらは固定電極となる。可動電極、錘、梁は基板から浮かせてあり、両側にあるアンカー部で基板に固定されている。固定電極も根元で基板に固定されている。可動、固定電極が対向する部分で静電容量を形成している。加速度が水平方向に生じたときに可動電極が変位し、固定電極とのギャップが変化し静電容量の変化となる。加速度による変位は1 G 当たり nm のオーダーである。静電容量としての変化は微量なので電極本数を多くして容量変化を大きくしている。また寄生容量が問題になるので、差動検出をしている事例が多い。具体的には電極の配置を工夫して加速度の発生によるギャップ変化の増減が逆となる部分を設け、双方の容量値を引き算することで寄生容量の影響をなくしている。

先に述べたアクチュエータ機能を図3(c)で説明する。静電容量式ではその構造から固定電極と可動電極間に電圧をかけることにより、静電気力で錘を変位させることができる。この変位を同じ電極を使って瞬時に静電容量検出に切り替えて測定することで、故障の自己診断を行っている。梁の破損、電極の欠落などがあれば、電圧印加に対して静電容量の変化が通常と異なる値となり、故障を判定できる。故障の場合はメータ内のランプが点灯しドライバーに伝え、ディーラーで

処置してもらう。人の命を守るエアバッグのような安全システムではセンサの故障は致命的な問題であり、自己診断機能を持てる静電容量式がスタンダードになっている。

加速度センサのくし歯電極部の写真を図4に示す。可動電極と固定電極の間隔は数ミクロンである。加工寸法は従来のウエットプロセスが10 ミクロンレベルであったのに対し、ドライプロセスの採用により数 μm と大幅に微細化が進んだ。梁、錘、可動電極、固定電極は単結晶シリコン、もしくは多結晶シリコンで一体形成されている。これらシリコンは機械的な構造体と電気的な配線を兼ねている。

静電容量式では容量を大きくすると感度が向上し、感度が同じであればチップサイズを小さくでき、コストを下げることができる。静電容量増大には電極の面積を広げる必要があることから、シリコンの深掘りにより基板深さ方向に電極面積を稼ぐことが重要なポイントになる。これを実現したのがシリコンを高アスペクト比に加工するドライエッチング技術で、DRIE (Deep Reactive Ion Etching) と呼ばれる。本装置はMEMS 加工の中核的な設備になっている。高アスペクト比に加工できる理由は、深掘り時にシリコンの側壁をポリマー膜で保護し垂直方向にのみイオンで掘って行くためである⁵⁾。本装置の登場により10 μm 以上のシリコンの深掘が可能になり、加速度センサだけでなくジャイロなどの静電容量型センサの小型化、量産に大きく貢献している。このエッチング方法には更なる改良が進められ、ポリマーに加えてより耐久性に優れたシリコン酸化膜を側壁保護膜とし、深さ100 μm に迫る加工が可能になってきた⁶⁾。

数mmサイズ

(a) 外観

□ ~1mm

(b) センシング素子

(c) センシング素子の断面イメージ

図3 加速度センサ

図4 加速度センサのくし歯電極部拡大写真

図5 加速度センサの小型化(体積比)

加速度センサの小型化での進化を図5に示す。89年当時の加速度センサは歪ゲージ式エレメントでCANパッケージを採用していた。サイズは横幅が40mmもあり、部品点数は35個もあった。これが現在ではセラミックパッケージとなりサイズは数mm角で、部品点数は4個となっている。内訳は、センシングエレメント、回路チップ、セラミックパッケージとその蓋である。体積比でいうと1/250という超小型化を実現している。センサの進化にはセンシングエレメントの発展に加え、回路、集積化、実装の発展が不可欠となっていることがわかる。

加速度センサにおける初期の実装ポイントは耐衝撃性の確保であった。本来加速度センサは自動車の衝突時の衝撃をセンシングするものであるが、自動車には衝突時よりも高い周波数で大きな加速度が発生する場合がある。この場合90年代採用されていた歪ゲージ式では、センシングエレメントが破損するという問題があった。そこで高い周波数での耐衝撃性向上のためにオイルを用いた。オイルのダンピングによってセンシングエレメントの変形を抑制し破損を防止していた。オイルをパッケージ内に封入するために金属のCANパッケージを採用した。この後センシングエレメントの構造において、重りを支持する梁構造の工夫などで耐衝撃性を向上させオイルフリーとし、セラミックパッケージへ移り、低コスト、小型化を達成していった。現在の静電容量式では固定・可動電極間の挟隙を利用したエアダンピングで、高周波数の耐衝撃性を確保している。

5. エアフローセンサ

5.1 概要

エンジンの吸入空気量を測定するには前述の圧力方式と流速を測定する方式がある。流速の測定には放熱量変化を利用する方法が用いられており、気圧に影響受けず原理的に質量流量を測定することができる。従来は数ミリサイズのセラミック円筒体にPt線を巻いたボビンを用いていた。近年エンジン制御の高度化により、吸入空気の流量変化が高速になりさらには逆流が起きるようになった。ここで課題となったのはボビン式では、熱容量が大きく応答が間に合わない、また逆流検出ができないことである。一方MEMSは元々小さくすることが得意であり、半導体加工技術を利用してヒータ配線、温度計を小さく作り込むことができる。これにより応答性、逆流検出を可能とした。

5.2 センシングエレメントと検出原理

図6にセンサ構造を示す。シリコン基板に薄膜を形成、発熱ヒータとその両側に二つの温度センサを配置した後に基板裏面からエッチングして、メンブレン構造としたものである。発熱ヒータが一定温度となるように電流を制御し、空気の熱伝達量が空気流速に依存して両側の温度計に分配されることを利用する。メンブレン厚さは数 μm と極めて薄く、熱容量を小さくして高応答性を実現している。ヒータ及び温度計には通常のIC製造ラインが流用できるよう汚染の心配のない単結晶シリコンを用いている。

空気流量検出原理を図(b)で説明する。空気流れが無い時のメンブレン上の温度分布は、発熱ヒータを対称であ

る。左右の温度計は同じ値を示す。空気の流れがある時は、その方向と流速に応じて発生する左右の温度計の温度差 ΔT を検知して流速と流れ方向を求める。右からの空気の流れがあれば、ヒータで暖められた空気が左側に流れるので左側の温度が高くなる。逆に左から流れれば右側の温度が高くなる。そして左右の温度差が大きいほど流速が速いことになる。ボビンからメンブレンにすることで、構造体を桁違いに小型化して熱容量を低減、またヒータ、温度計をミクロンレベルの加工で近接して作り込むことで温度分布を測定可能としている。これにより流量変化の応答性を向上させ、また逆流検知機能を持たせて、正確に吸入空気流量を検出できる。

5.3 メンブレン(薄膜)での課題解決

良いことばかりのメンブレン方式に思われるが、致命的な課題もあった。ボビンでは問題とならなかったくるま特有の信頼性の問題である。エアフローセンサの上流にはエアクリーナが配置される。エアクリーナは大気中粉塵の約99%をろ過できるが、通過してしまう数十 μm のダストが膜厚数 μm のメンブレンに衝突すると破損する恐れがあり、対策する必要があった。これには2つの取組みを行った。1つ目はメンブレンの強度向上で、半導体プロセス材料で耐摩耗強度が高いシリコン窒化膜(以降、SiN膜)の活用である。SiN膜を表面に配置すれば強度向上を図れるが、膜応力が高く0.3 μm 程度しかまでしか形成できない。そこでシリコンと窒素の組成比を変化させ、シリコンリッチのSiN膜とすることで、低応力化し所望の厚さまで成膜を可能とした。もうひとつの対策は流路改良の改良である。バイパス流路を曲げ遠心力、慣性力を利用してダストを排除し、空気だけがセンサに当たるように工夫している⁷⁾。

(a) センシング部

(b) センシング部の断面イメージ

図6 エアフロセンサ

6. おわりに

MEMS は車載用のセンサにおいて、大きな革新をもたらした。単に小型化するだけでなく、故障の自己診断機能、流れの逆流検出など、新機能も具現化しており、車の進化に多大な貢献をしている。また低コスト化も進み、環境、安全、快適が高級車だけでなく大衆車にも広く展開されてきた。

今後もくるまは、環境、安全の2方向で進化が進むと思われる。特に自動運転では周辺監視などにおいて、小型化、高機能化、新機能が求められており、MEMS 技術への期待は引き続き大きいものがある。

(Received April 25, 2017)

文 献

- 1) J. Marek, H-P. Trah, Y. Suzuki, I. Yokomori ; Sensors for Automotive Technology (WILEY-VCH, 2003).
- 2) Y. Suzuki, M. Imai, T. Mizuno, I. Yokomori ; *DENSO Technical Review*, **6**, (1),96 (2001).
- 3) H. Tanaka, O. Ito, Y. Suzuki ; *DENSO Technical Review*, **6**, (2), 19 (2004).
- 4) H. Tanaka ; Proc. of Transducers '99, p.539 (1999).
- 5) F. Larmer, A. Schip, K. Funk, M. Offenberger ; Technical Digest MEMS 99, p.211 (1999).
- 6) J. Ohara, K. Kano, Y. Takeuchi, Y. Otsuka ; Technical Digest MEMS 2001, p.76 (2001).
- 7) 河野 泰, 海部輝明 ; 自動車技術会 学術講演会前刷集, 82-14, p.9 (2014).

~~~~~