

feature article

日立グループにおける車載用MEMSセンサーの動向

Hitachi's Trend of MEMS Sensor for Automobiles

林 雅秀 Masahide Hayashi

後藤 康 Yasushi Goto

半沢 恵二 Keiji Hanzawa

松本 昌大 Masahiro Matsumoto

小出 晃 Akira Koide

鄭 希元 Hee-Won Jeong

自動車のエンジンパワートレイン制御, 車体姿勢制御, ブレーキ制御などの電子化, 電子制御技術が年々進化し, 制御に必要な各種情報を得るためのセンシング技術の確立が不可欠になっている。

これを支えるコア技術がMEMS技術であり, 現在, 多種多様なMEMSセンサーが自動車に搭載されている。

日立グループは, 1980年に半導体式圧力センサーを製品化して以来,

加速度センサー, エアフローセンサーなどにMEMS技術の適用を図ってきた。

さらに2009年, 自動車の前後左右の2軸加速度と回転(角速度)を計測する複合化センサーを開発し,

2011年から順次, 北米, 欧州で搭載が義務化される車両横滑り防止システムへの適用をめざしている。

1. はじめに

日立グループは, 1970年からシリコン基板を立体的に加工するバルクMEMS (Micro-electro Mechanical System) 加工技術を用いた半導体式圧力センサーの開発に着手して以来, MEMS微細加工技術, MEMSと信号処理回路の一体化などの技術開発を行い, 製品化を図ってきた。現在, より複雑なMEMSセンサーの複合化にも着手している(図1参照)。

ここでは, 日立グループにおける車載用MEMSセン

サーの開発動向として, 空気流量を計測するMEMS式エアフローセンサー, MEMSと信号処理回路を一体化した1チップ圧力センサー, 2軸加速度と1軸角速度を計測可能とした車両制御用複合化センサーについて述べる。

2. MEMS式エアフローセンサー

地球環境保全の観点から, 自動車の排気低減に関する規制は年々厳しくなっている。この厳しい排気規制をクリアするためには空燃比制御の高精度化が必須であり, 広い測

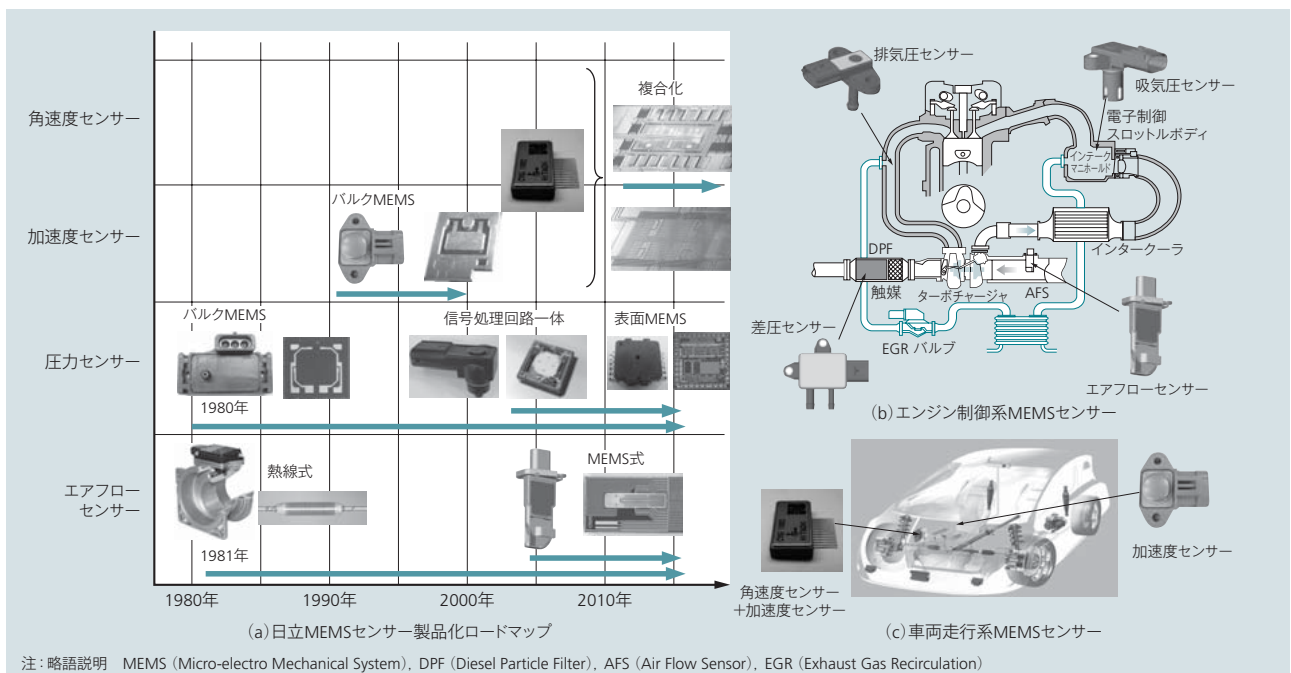


図1 日立グループのMEMSセンサーロードマップと各種センサーの車両搭載位置

MEMS技術を適用したセンサーの日立グループにおける開発の歴史と, 自動車の制御に使用される車載センサーの搭載位置を示す。MEMSの技術開発, 採用により, 車載用センサーの用途が拡大している。

定範囲での吸入空気量を高精度かつ高信頼に計測することが要求されている。

近年の排気規制強化と燃費向上の要求に対応して、燃料をシリンダ内部に直接噴射するDI (Direct Injection) やディーゼルエンジン、燃費向上のための気筒停止機能などの採用により、吸入される空気の圧力脈動も大きくなり、いったん吸入された空気が吸入側に逆流するエンジンが増えてきている。この変動の激しい脈動流に対し、シリンダに流入する空気量を正確に計測する必要があるが、従来の熱線式エアフローセンサーでは、空気の流れの方向を的確に検出できない。このため、逆流や、激しい脈動流に対して吸入空気量を正確に測定することを目的にMEMS式エアフローセンサーを開発し、2005年に製品化した(図2参照)¹⁾。

MEMS式エアフローセンサーは、シリコン基板の裏面をエッチングしてダイヤフラム構造を形成し、ダイヤフラム上にヒータ抵抗とその両隣に二つの温度センサー抵抗を配置したものである。ヒータに電流を供給して一定温度に加熱制御し、空気への熱伝達量が空気流速に依存して両隣の温度センサーに分配されることを利用する。ヒータ抵抗と温度センサー抵抗を数マイクロメートルときわめて薄いダイヤフラム上に加工し、熱容量を小さくして数ミリ秒の高速応答を実現している。

空気流量検出原理を図3に示す。空気の流れがないときのシリコンダイヤフラム上の温度分布は、ヒータを中心に対称である。空気の流れがあるときは、その方向と流量に応じて下流側の温度センサーの温度が ΔT だけ高くなる。逆流発生時は上流側の温度センサーの温度が ΔT だけ高くなる。ヒータの両隣に形成した二つの温度センサーの抵抗差から温度差 ΔT を検出して流量と流れの方向を求める。

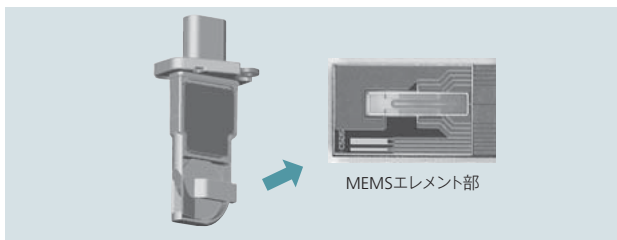


図2 MEMS式エアフローセンサー外観
MEMSエレメントの採用により、高速応答も可能である。

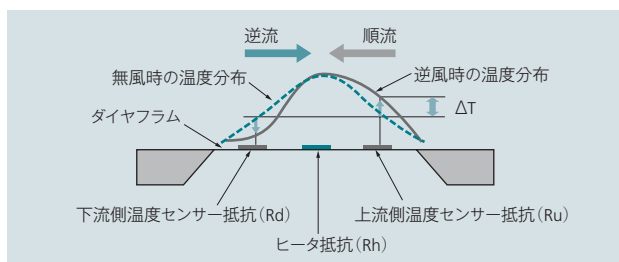


図3 MEMS式エアフローセンサー検出原理
ダイヤフラム上に形成された検出素子の配置設定により、順流、逆流を計測することが可能となる。

この温度差 ΔT を、定温度差ブリッジ回路と温度差検出回路の組み合わせにより、流量に応じた出力特性として信号に変換する。MEMSエレメントは、応答性が速く、逆流検知機能を持つため、脈動流での逆流誤差補正も可能である。加えて、半導体プロセスを用いて製造できるため、小型化が可能で量産性が高いという利点もある。

MEMS式エアフローセンサーの逆流領域での特性を図4に示す。逆流を検出する条件においても、従来の熱線式に比べ、実際の空気脈動を正確に検出できていることがわかる。

現在、空気流量に加えてEGR (Exhaust Gas Recirculation：排気ガス再循環) 流量も計測し、圧力センサーやスロットル開度センサーなど複数のセンサー情報を活用した精密な空燃比制御技術の開発も進めている。

今後、これらを達成するために、センサーの小型化、デジタル信号処理によるスマート化に加えて、さらなる高精度化、多機能化の開発も進めていく。

3. MEMS, 信号処理回路一体1チップ圧力センサー

車載用の圧力センサーは、エンジン制御、燃料圧、ブレーキ油圧などの計測に用いられてきた。日立グループは、半導体式圧力センサーを世界に先駆けて1980年に生産開始した。このセンサーはピエゾ抵抗をシリコンダイヤフラム上に形成したもので、圧力によるダイヤフラムの変形を抵抗変化として計測するものである²⁾。

近年、上記の計測に加え、TPMS (Tire Pressure Monitoring System：タイヤ空気圧モニタリングシステム) と衝突検知システムの市場が拡大している。TPMSは、北米で2003年に施行されたTREAD (Transportation Recall Enhancement Accountability and Document Act) 法により、2005年から段階的に義務化され、2008年における米国の新車にはすべて装着されている。衝突検知については、2008年に米国の側面衝突基準が改定され、カーテン、サイドエアバッグの重要性が高くなっている。衝突を衝撃で検知するよりも、ドア内の圧力を検知するほうが、正確

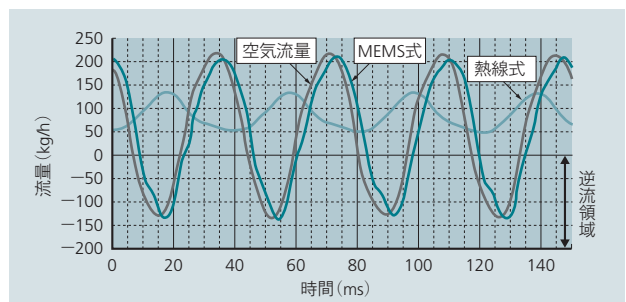


図4 熱線式、MEMS式センサーの流量特性
空気流量に対してMEMS式センサーの特性は、逆流領域でも正確に流量を計測できている。

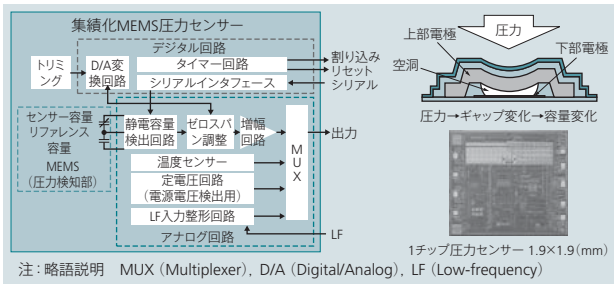


図5 MEMS圧力センサー原理とチップ構成・外観
MEMS素子, 回路を一体化し, 1チップ化を実現している。

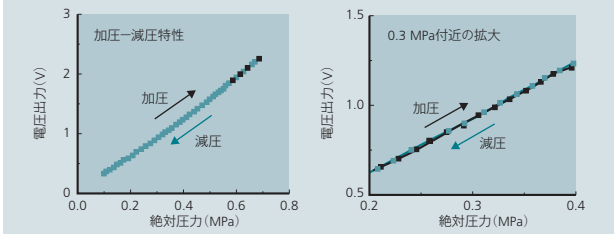


図6 MEMS圧力センサーの特性
0.1~1 MPaの範囲で, ヒステリシスのない計測が可能である。

かつ高速であるとして優位性が示されたため, 圧力センサーの採用が進んでいるものである。

タイヤ圧センサーは0.3~1 MPa, 側面衝突用センサーは0.1 MPa近傍の圧力を計測するもので, どちらも, 小型化, 高感度化, および低消費電力化が要求される。この要求に対し, LSI (Large-scale Integration) とMEMSダイヤフラムを1チップに混載した圧力センサーを開発した。

開発した圧力センサーの構成とチップの外観を図5に示す。圧力検出手段として静電容量式を採用し, LSI上の配線層にセンサーを作り込む構造とした。半導体技術により, 狭ギャップ (0.3 μm) のダイヤフラムを形成した。外部の圧力が変化するとダイヤフラムのギャップが変化し, それを静電容量変化として計測する。

LSIとMEMSが直結しているため, 微小な容量を計測でき, 高感度化に優れている³⁾。出力特性を図6に示す。ヒステリシスのない加減圧特性が得られた。

また, LSIの共通化を進めており, ダイヤフラム径を変更することで, 0.1~1 MPaの測定範囲を選択できるようにした。今後, 実装技術開発と信頼性の評価を通し, 応用検討を進めていく。

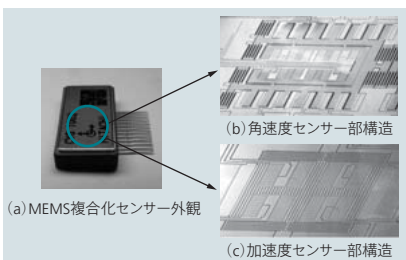


図7 MEMS複合化センサー
角速度, 加速度素子をそれぞれシリコン基板上に形成し, 1パッケージ内に搭載している。

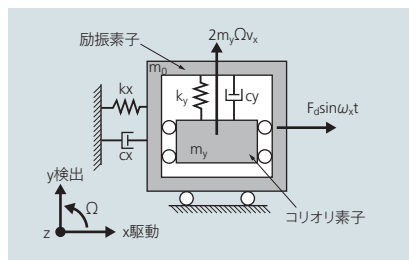


図8 角速度センサーの検出原理
励振素子をx軸方向に加振させ, z軸周りの角速度が印加されるとコリオリ素子がy軸方向に変位する。

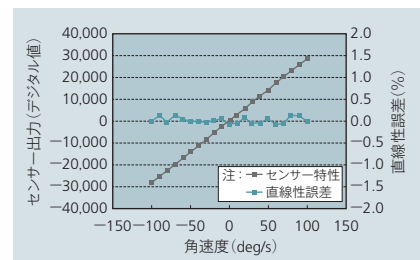


図9 角速度センサーの入出力特性
角速度センサー出力特性の直線性誤差は, 0.3%以下である。

4. 車両制御用複合化センサー

現在, 車両横滑り防止システム向けに, 車両制御用複合化センサーの開発を進めている。車両横滑り防止システムは, 操舵(だ)角情報と自動車にかかる角速度(回転), 加速度などの情報を比較することで車の横滑りを判定し, その結果から, 主に四輪それぞれの制動力を制御することで車両を適正な走行状態に保つシステムである。この制御に必要な角速度と前後左右の2軸の加速度を計測するセンサーを統合したものが複合化センサーである。

米国運輸省道路交通安全局 (NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration) が⁵⁾, MY (Model Year) 2012年までに段階的に4.5 t未満の全車両に車両横滑り防止システムの装着を義務化した。北米に続き, EUでも義務化の動きがあり, いずれアジア地域でも標準化されると推測される。小型車を含めた全車種に適用するためには, システムコストの低減や設置方法の簡易化が必要である。従来, 車室内に搭載されていた複合化センサーをエンジンルーム内油圧制御ユニットに搭載する要求が高くなり, 小型, 複合化, 耐環境性能の向上が必要となっている。

今回, エンジンルームの温度環境 (-40~+125℃) に対応した1パッケージ小型複合化センサーを開発した(図7参照)。広温度範囲に対応するため, 温度や実装ひずみによる変動にロバスト性を持つ構造⁴⁾を採用し, 半導体の微細加工技術を用いて, SOI (Silicon on Insulator) 基板上に各センサー構造を形成した。

角速度センサーの動作原理を図8に示す。静電引力により発生する駆動力 F_d によって励振素子が駆動方向 (x方向) に加振される。このとき励振素子とばねで固定されているコリオリ素子も励振素子の動きに追従して振動する。この状態でz軸周りの角速度が印加されると, 振動している励振素子とコリオリ素子には, 駆動方向 (x軸) と角速度が印加された軸 (z軸) それぞれに直交する検出方向 (y軸) にコリオリ力が発生する。これにより, コリオリ素子は印加された角速度の大きさに比例して検出方向 (y軸) に変位する。その変位量を静電容量の変化として検出し, 出力することで印加された角速度が検出できる。

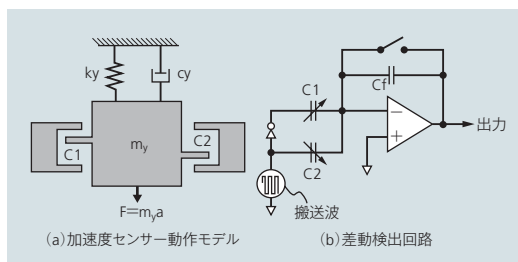


図10 加速度センサーの検出原理

二つの差動容量 (C1, C2) の変化により、加速度を検出 (x軸, y軸とも) する。

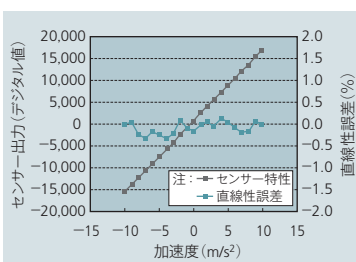


図11 加速度センサーの入出力特性

加速度センサー出力特性の直線性誤差は、0.5%以下である。

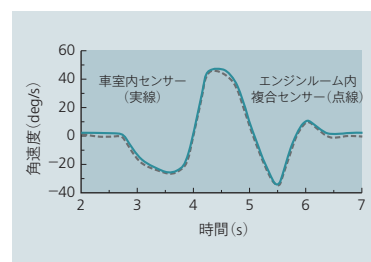


図12 複合化センサーの寒地実車試験

車室内センサーと複合化センサーの角速度は同期しており、車両挙動を正確に計測できている。

角速度センサーの入出力特性評価結果を図9に示す。入力角速度に対し直線性誤差 $\pm 0.2\%$ F.S. (Full Scale) 以下の優れた性能が得られていることがわかる。

角速度センサーとともに複合化センサーを構成する2軸加速度センサーの検出原理を図10に示す。印加された加速度に対し可動部 m_y が変位し、検出方向に配置した二つの差動容量検出電極C1, C2の容量変化により、加速度を電気信号として出力するものである。

加速度センサーにおいても、図11に示す入出力特性評価結果から直線性誤差は $\pm 0.4\%$ F.S.以下に抑えられていることがわかる。

2009年2月に日立オートモティブシステムズ株式会社の十勝テストコースで実施した複合化センサーの寒地実車試験結果を図12に示す。

エンジンルーム内に設置した複合化センサーと従来の車室内センサーの挙動が一致しており、車両挙動が適切に検出できることを確認した。

今後、複合化センサーの製品化に向けた量産化設計を進めていく。

5. おわりに

ここでは、日立グループにおける車載用MEMSセンサーの開発動向として、空気流量を計測するMEMS式エアフローセンサー、MEMSと信号処理回路を一体化した1チップ圧力センサー、2軸加速度と1軸角速度を計測可能とした車両制御用複合化センサーについて述べた。

MEMS技術を適用することで、車載用センサーの小型化、集積化、複合化などが実現し、自動車の電子化、低排出ガス化、安全性向上に寄与してきた。今後も、MEMS適用製品の拡大を図り、さらなる自動車の環境性、安全性向上に貢献していきたいと考える。

なお、この開発の一部は、NEDO (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 国家プロジェクト「高集積・複合MEMS製造技術開発事業」の助成を受けて開発したものである。

参考文献

- 1) 石川：自動車用センサの最新動向、シーエムシー出版 (2008)
- 2) T. Inui: High Reliability Semiconductor Pressure Sensor for Automobiles, SAE 820515 (1982)
- 3) T. Fujimori, et al.: Tiny (0.72 mm²) Pressure Sensor Integrating MEMS and CMOS LSI with Back-End-Of-Line MEMS Platform, the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators & Microsystems Transducers 2009, June 21-25, pp.1924-1927 (2009)
- 4) M. Degawa, et al.: Laterally Driven Deformation-Robust MEMS Gyroscopes with Three Sets of Symmetrically Arranged Folded Beam Suspensions, the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators & Microsystems Transducers 2009, June 21-25, pp.664-667 (2009)

執筆者紹介



林 雅秀

1986年日立製作所入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 センサ設計部 所属
現在、車載用センサーの開発に従事
自動車技術会会員



後藤 康

1990年日立製作所入社、中央研究所 ナノエレクトロニクス研究部 所属
現在、MEMSセンサーの開発に従事
電気学会会員、応用物理学会会員



半沢 恵二

1988年日立オートモティブエンジニアリング株式会社 (現 株式会社日立カーエンジニアリング) 入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 センサ設計部 所属
現在、車載用センサーの開発に従事



松本 昌大

1983年日立製作所入社、日立研究所 情報制御第三研究部 所属
現在、車載用センサーの開発に従事
計測自動制御学会会員



小出 晃

1987年日立製作所入社、機械研究所 第二部 所属
現在、MEMSプロセス開発に従事
電気学会会員、精密工学会会員



鄭 希元

2004年日立製作所入社、中央研究所 ナノエレクトロニクス研究部 所属
現在、MEMSセンサー構造設計に従事
日本機械学会会員、電気学会会員、精密工学会会員