

基調論文 車載半導体センサ技術の動向*

Trend of Automobile Semiconductor Sensor Technology

鈴木 康利

Yasutoshi SUZUKI

Following is a summary of the past, present and future automobile semiconductor sensor technology trend.

Since the early 1980s, semiconductor sensors based on monocrystal Si substrate have been commercialized for use in automobiles, measuring pressure, acceleration, rotation/angle and lighting. Our semiconductor sensor technology, features include: MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology, single chip integration technology, small-sized mounting technology.

We provide key sensors indispensable in automobile systems realizing “friendliness” and “thankfulness” from the present and into the future.

Key words : Semiconductor sensor, MEMS technology, Single chip integration technology, Small-sized mounting technology

1. はじめに

私が参画している電子情報技術産業協会 (JEITA) 主催のセンサ動向・統計専門委員会では、国内のセンサ製造業者を対象にしたアンケート調査により、センサの測定対象、生産数量、応用分野などを集計している。ここでは、センサの定義を「物理的变化を電気的信号として出力できるもの」と考えている。¹⁾ Fig. 1は、車載市場向けセンサの2000年～2002年の生産実績を示す。2002年に3.1億個のセンサが生産され、この年の日本の自動車生産台数が1026万台であることから、車載用センサをすべての自動車に搭載したと仮定すると、車1台あたり約30個のセンサを使用していることになる。

Fig. 1から、以下のことが分かる。

- ① 生産数量、生産金額ともに順調に伸びている。
- ② 測定対象をその他を含め14に分類しているが、溶液・成分センサ以外のすべてのセンサが車載用に用いられている。
- ③ 生産数量の多いセンサは、温度センサと位置・変位・角度センサの二つで、全体の7割を占める。

この統計データからも明らかなように、センサなしでは、現在の高度化した自動車システムを動かすことは不可能であり、年を追うごとに使われるセンサが増えている。

センサ特集号発行にあたり、車載センサ、特に半導体センサに焦点を絞り、その技術動向について述べる。

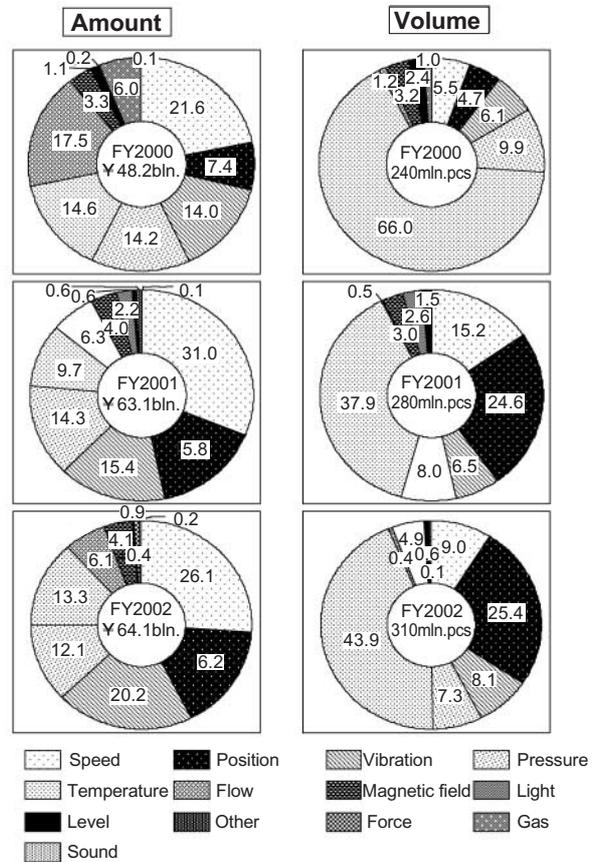


Fig. 1 Automobile market sensor production record

2. カーエレクトロニクスと半導体センサ技術の動向

はじめに、車載センサの歴史について簡単に述べる。Fig. 2はカーエレクトロニクスの変遷と車載用センサの年表を示す。

*2004年9月13日 原稿受理

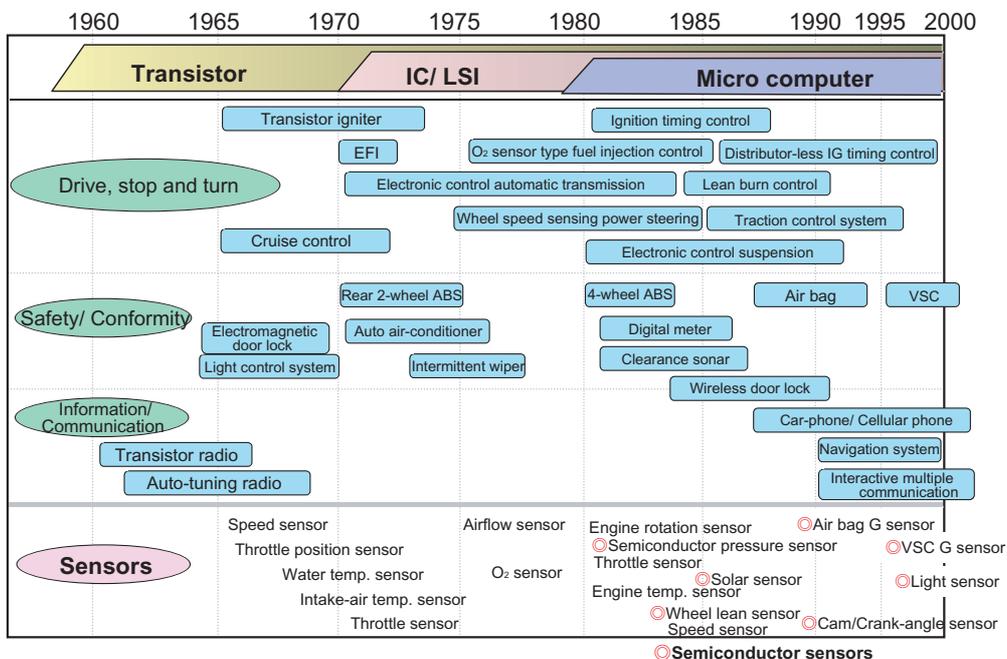


Fig. 2 Car electronics transition and automobile sensor

1960年代後半から機械式センサが自動車に用いられはじめた。車載センサは1980年代になると、従来の機械式センサから半導体センサの時代にはいる。

Table 1に半導体センサの基板材料として用いるシリコン結晶の物理的特性を鉄と比較して示す。シリコンは鋼に匹敵する物理的特性を持ち、かつ、物理的変化を電気的信号に変換できる各種の効果（ピエゾ抵抗効果、光起電力効果、ホール効果等）を持った、優れた材料であることが分かる。

Table 1 Physical property of Si and Fe

	Si	Fe
Density (g · cm ⁻³)	2.33	7.86
Young's modulus(GPa)	190(111) 130(100)	210
Melt point (°C)	1412	1534
Specific heat (J · g ⁻¹ · K ⁻¹)	0.76	0.64
Thermal expansion coefficient (x 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	2.6	11.8
Heat conduction (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	168	48

同じくシリコン結晶を基板材料に用いる、IC・LSIと半導体センサを半導体技術で見た場合、最も異なるのが、半導体センサは3次元構造体を持つことである。

Fig. 3にピエゾ抵抗効果（歪みを受けると電気抵抗が変わる）を用いる圧力センサと加速度センサのセンシングエレメントの構造と原理を示す。ダイアフラムと呼ばれる薄肉部が特徴である。

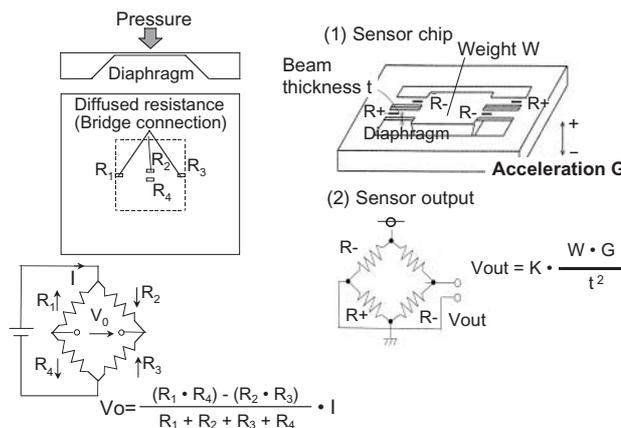


Fig. 3 Structure and principle of pressure sensor and accelerometer

Fig. 3に示すような任意の3次元構造体を作製する技術は、日本ではマイクロマシニング、米国ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、欧州ではMST (Micro System Technology) と呼ばれる。

マイクロマシニング技術は、低コストでシステムを小型にでき、信頼性を向上させ、また新たな機能を実

Table 2 Common automobile sensor

Application Measurement	Drive, stop and turn	Safety, conformity & environment	Information/ Communication
Temperature	Water temperature sensor, Intake air temperature sensor Exhaust temperature sensor	AT oil temperature sensor Room temperature sensor, Air temperature sensor Evaporation blow-off temp. sensor	
Pressure	Intake air pressure sensor, Tank pressure sensor Atmospheric pressure sensor, Combustion pressure sensor	Air-conditioner coolant pressure sensor Brake pressure sensor	
Acceleration		Acceleration sensor for Air bag, ABS, VSC	
Position/Angle	Throttle sensor Steering sensor	Car height sensor	
Rotation	Cam and Crank-angle sensor Vehicle speed sensor	Wheel-speed sensor	
Flow	Airflow sensor		
Level	Fuel sensor Engine oil sensor	Brake oil sensor	
Vibration	Knock sensor		
Gas	O ₂ sensor, A/F sensor	Smoke sensor, CO sensor Humidity sensor	
Light/ Electromagnetic wave		Solar sensor Auto-light sensor Clearance sonar	Laser radar, Millimeter wave radar Satellite communication antenna Infrared ray sensor, Car recognition camera Peripheral recognition camera
Other		Yaw rate sensor	Geomagnetic sensor, Magnetic nail

Bold face : Semiconductor sensors

現できる技術として期待されている。マイクロマシニング技術には、バルクマイクロマシニング技術と表面マイクロマシニング技術がある。前者はフォトリソグラフィで形成した平面パターンを種々のエッチング技術で掘り3次元構造体を形成するのに対して、後者は、犠牲層や接合技術を用い、表面から積み上げて3次元構造体を形成している。我々のマイクロマシニング技術は、Si基板やSOI基板を用い、各種のエッチング技術で微細な3次元構造体を形成している。

Table 2は、現在用いられている代表的な車載センサを示す。すべてのシステム制御にセンサが使われていること、上記の半導体センサの特長から、半導体センサの割合が多いことが分かる。

3. 当社での取組み

Fig. 4に当社の半導体センサの製品・技術開発の経緯を示す。

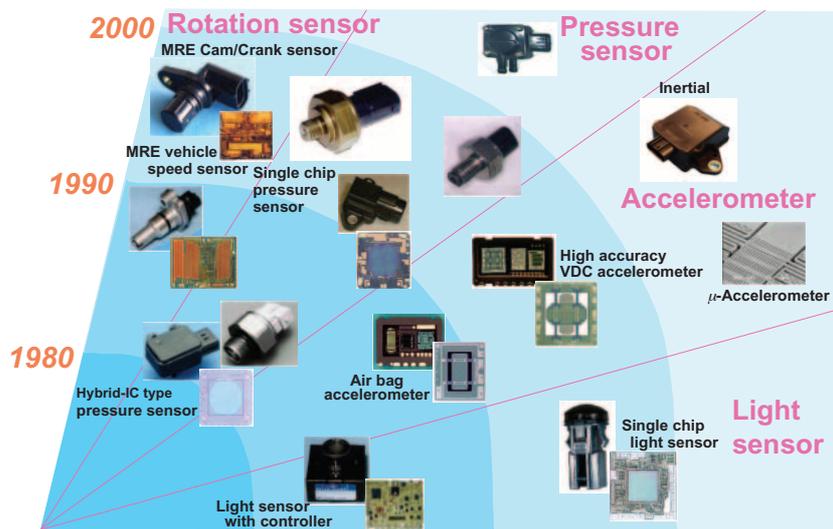


Fig. 4 History of semiconductor sensor & technology development

当社の半導体センサの主な測定対象は、圧力、加速度、回転・角度、光の4種類である。

(1) 圧力センサ

1970年代後半からピエゾ抵抗式の圧力センサの開発に着手し、1981年半導体ピエゾ抵抗式で世界初の量産化を行った。その後、当社のIC技術と融合させ、増幅回路や調整回路とセンシングエレメントを1チップ化した集積化圧力センサを1991年に量産化した。現在は、ガソリン配管の微小な漏れを検出するのに用いるガソリン蒸気圧センサ（5kPa）からコモンレールシステム用のコモンレール圧センサ（160MPa）まで、圧力レンジで言うと40,000倍の広範囲の圧力センサを製品化している²⁾

(2) 加速度センサ

圧力センサで培ったピエゾ抵抗式集積化技術を加速度センサに適用し、1989年にエアバック用加速度センサを製品化した。その後、高感度のVSC用ピエゾ抵抗式加速度センサをマイクロマシン技術を使い、1996年に製品化した。さらに、システム要求（DC検出等）から、容量式の加速度センサをマイクロマシニング加工技術とスタック（積層）実装技術を使い、2000年に製品化した。容量式の加速度センサでは、世界最小の小型化を実現している。

(3) 回転・角度センサ

回転・角度センサの当社の特徴は、強磁性磁気抵抗素子（MRE）を用いていることにある。1984年に車速センサ用のディスクリットセンサを世界に先駆けて製品化し、その後、IC技術と融合させた1チップ集積化センサを1989年に製品化している。

現在は、MREの高感度の長所を生かし、カム・クランク角用のMREセンサを量産している。

(4) 光センサ

日射センサ用のフォトダイオードの製品化は1994年から行っている。さらに、IC技術と融合させ、日射センサとライトコントロールの両機能を有するライトセンサを1997年に製品化している。

当社の半導体センサの特長を示すセンサ技術は、①マイクロマシン（MEMS）技術、②1チップ集積化技術、③小型実装技術の三つと言える。以下に具体的な例を挙げて説明する。

3.1 マイクロマシン（MEMS）技術

圧力センサに用いるマイクロマシン技術として、異方性エッチングとガラス台座接合を紹介する。40,000倍の広範囲レンジの圧力センサの製品化には、ダイアフラム構造と呼ばれるシリコン薄肉部の構造設計が重要になる。ダイアフラム構造は、KOHをエッチング液として用い、ポットエッチングと呼ぶ独自の枚様式エッチング装置で行っている。シリコンの種々の面方位のエッチングレートをデータベース化し、異方性エッチングで形成されるシリコンの形状を解析した例をFig. 5に示す²⁾

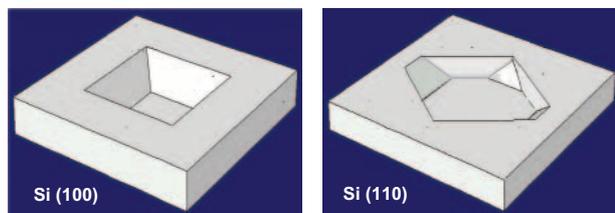


Fig. 5 Diaphragm shape of Si (100) and Si (110)

我々はダイアフラムの形状を8角形にできるSi(110)基板を採用している。8角形のダイアフラムでは、ピエゾ抵抗ゲージとダイアフラム上の熱応力分布のバランスが良く、センサのオフセット電圧の温度特性曲りを小さくすることができる。

圧力センサ素子を樹脂パッケージに実装する場合、シリコン素子を1~2mm程度の厚さのガラス台座に陽極接合し、パッケージからの応力の影響を低減している。

Fig. 6は、ガラス台座を接合した圧力センサ素子の感度を変えた場合の感度と感度の温度特性の関係を示している。解析には陽極接合温度から室温までの温度域での台座ガラスの熱膨張係数を用いている³⁾

解析結果と実験値が一致していることが分かる。このように、圧力センサの温度特性を含めた構造設計を解析で行えるようにするためには、陽極接合の熱履歴も考慮し、幅広い温度域でのガラス台座の物性を知る必要がある。さらに、温度特性向上には、ガラス台座の材料選定が重要となる。

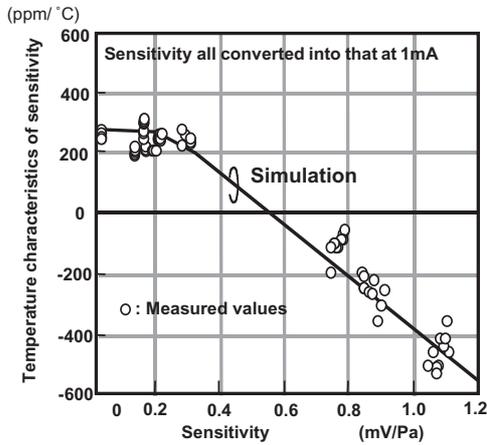


Fig. 6 Analysis results

容量式加速度センサのマイクロマシン技術では、電極や梁を形成するための深堀エッチング技術が重要である。Fig. 7にエッチングのアスペクト比（深さ/幅）の年次推移及び加速度センサの電極部のSEM写真を示す。

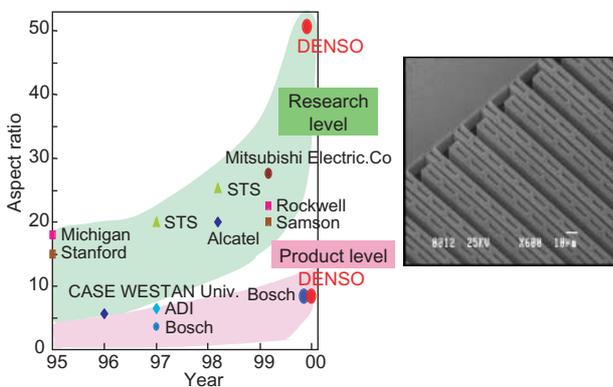


Fig. 7 Annual transition of deep groove etching aspect ratio

我々の深堀エッチング技術は、量産化レベルでは、アスペクト比は5（ $15\mu\text{m}/3\mu\text{m}$ ）、研究レベルでもアスペクト比が50（ $50\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ ）と世界のトップレベルにある。アスペクト比50を達成した方法は、New DRIE(Dep Reactive Ion Etching)と呼ぶ方法である。Fig. 8にプロセスフローを、Table 3に従来のDRIEと比較したエッチング写真を示す⁴⁾。O₂プラズマ照射によりSiO₂膜を再形成することを繰り返しエッチングすることにより、側壁面上では常にSiO₂膜とDRIE工程自体によるフロロカーボン膜で2重に保護されるため、エッチング異方性が向上している。

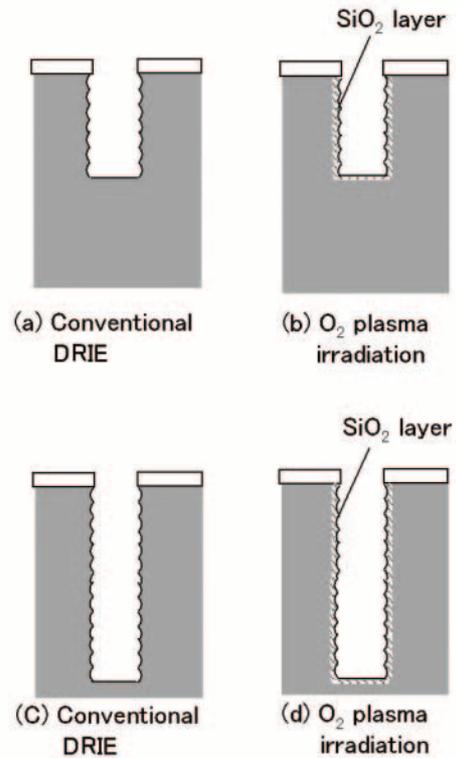


Fig. 8 The New DRIE process

Table 3 Etching results of new and conventional process

	Conventional DRIE	New DRIE
Trench profile		
Depth	51.2 μm	50.6 μm
Width	2.21 μm	1.10 μm
Aspect ratio	23	46

3.2 1チップ集積化技術

小型化、部品点数の削減の重要技術に1チップ集積化技術がある。我々の特長的な集積化技術を三つ紹介する。

(1) 集積化MREセンサ

Fig. 9に集積化MREセンサのチップ写真と断面構造図を示す⁵⁾

回路部は、増幅と電気雑音保護の機能を持つバイポーラ素子回路からなる。磁気検出部のMRE薄膜にはパーマロイ薄膜を用いている。集積化構造の特長は、断面構造に示すように、配線材料のAl薄膜（約1 μ m）をテーパ状にし、その上に形成するNiFe薄膜（数十nm）をステップカバレッジよく堆積していることにある。これにより、ウエハプロセスを簡略化できている。

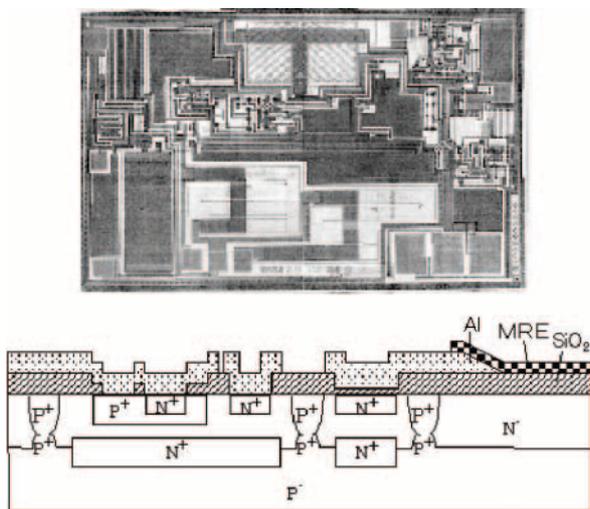


Fig. 9 Chip photograph and cross section of MRE

(2) ライトセンサ

Fig. 10にライトセンサデバイスの写真を示す⁶⁾

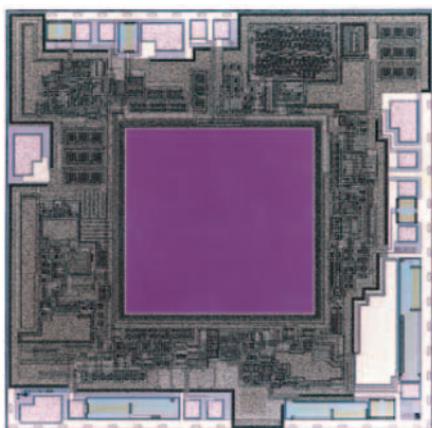


Fig. 10 Light sensor device photograph

ライトセンサの回路部は、薄暮から太陽の直射光までの幅広い強度の入射光（数10lx～10万lx）を処理するため、バイポーラ素子回路で作製している。写真で分かるように、回路部には太陽光照射時のトランジスタなどの誤作動を防ぐために、Alの遮光膜を設けている。

(3) オンチップEMC

従来は、チップコンデンサと抵抗の外付け回路で作製してきた電気雑音保護回路を集積化している。

Fig. 11にEMC回路の集積化の経緯を示す³⁾

		First generation	Second generation	Third generation
		Shielding case	Shielding case	Integrated sensor
		Hyb. IC signal conditioner Sensor Amplifier	Integrated sensor •Sensor •Amplifier •Signal conditioner	Integrated sensor •Sensor •Amplifier •Signal conditioner
		Feedthrough capacitor	Feedthrough capacitor	Low pass filter
EMC measure	Radiated noise	Shielding case	Minimal wiring by integration	
	Induced noise	Feedthrough capacitor (discrete)	Low pass filter (integrated)	

Fig. 11 Integration of circuit elements for EMC (Electromagnetic compatibility)

現在（第3世代）は、シールドケースの廃止のみならず、薄膜コンデンサと薄膜抵抗からなるローパスフィルタ（L.P.F.）を集積化し、貫通コンデンサも廃止している。

3.3 小型実装技術

最後に小型実装技術の例を示す。

吸入空気量を検出するために、吸気管負圧を吸気圧センサで検出している。このセンサは、近年エンジンに直接取り付けられるため、汚れ等の使用環境が厳しくなっている。Fig.12に表面受圧の吸気圧センサのアセンブリ構造を示す。

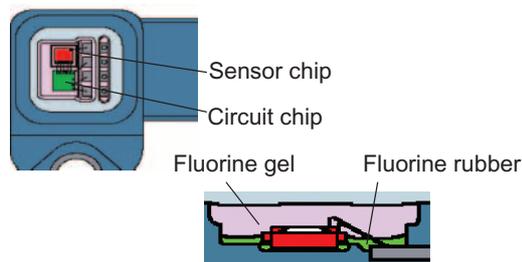


Fig. 12 Surface sensing air pressure sensor structure

小型化を実現するために、ベアチップ実装を採用している。さらに汚れ等の耐環境性を向上するため、回路チップとセンシングエレメント上は、独自の2重保護構造（フッ素ゲル/フッ素ゴム）を取っている。これにより、エンジンルーム内の厳しい環境に耐える実装構造となっている。

加速度センサは、センシングエレメントと回路デバイスを積層したスタック構造を持ち、セラミックパッケージと金属のリッドで封止する構造を持つ。

Fig. 13にスタック構造の概略図を示す。^{7,8)}

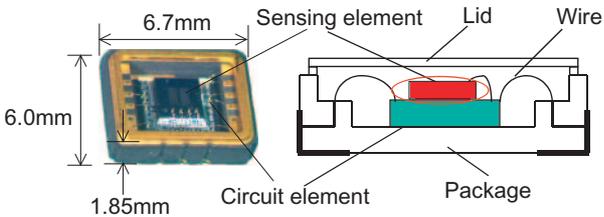


Fig. 13 Accelerometer stack structure

パッケージのサイズは、5.0 mm×6.7mm×1.85mmと世界一小型化を実現している。スタック構造では、センサの温度特性は、センサチップへの熱応力が支配

要因であるため、回路素子とセンシングエレメントを接着する接着剤が重要となる。Fig.14にスタック構造での熱歪みの影響を模式的に示す。

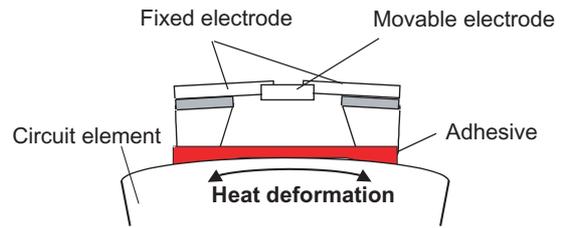


Fig. 14 Effect by heat deformation of stack structure

接着剤のヤング率と厚みがセンサの0G出力特性に影響を及ぼすことを解析により求めた。ヤング率が100MPa以下の接着剤を用いれば、0G出力が小さくなることが明らかになっている。

4. 将来動向

2000年以降の自動車のシステム動向を考える。システムの目指す姿として、地球環境保全、衝突安全から予防安全、人にやさしいシステムがある。Fig.15に2010年までのシステム動向を示す。

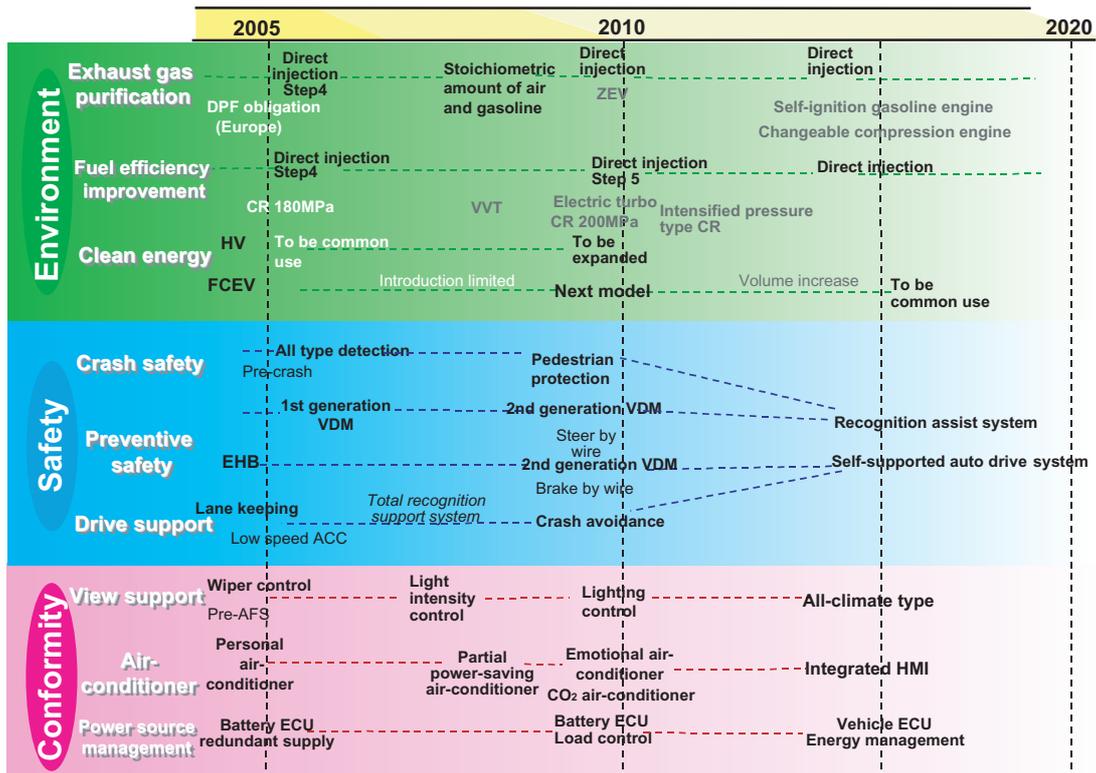


Fig. 15 Automobile system trend

社会情勢や消費者から求められる車を考えると、2010年を見据えても、環境分野、安全分野が重要なシステムになると考えられる。車載センサは自動車システムと切っても切れない関係にあるので、環境や安全の先進システムを先取りしたセンサが必要になる。

(1) 環境センサ

環境改善には、燃費を限りなく向上させることが求められる。既存のガソリンやディーゼル燃焼エンジンで、燃費を最大限向上させるには、エンジンの各気筒毎の燃焼状態を制御することが必要となる。気筒ごとの燃焼状態を知るセンシング技術としては、筒内圧センサがある。筒内圧センサには、φ5mm以下の小型、高い固有振動数、高強度、高感度・高S/N比が求められる。現在開発されている筒内圧センサには、①圧電式、②光ファイバ圧力式、③歪みゲージ式がある⁹⁾。今後、さらなる性能向上のための技術開発と低コスト化が期待される。

クリーンエネルギーとして、将来需要が伸びると予想されるものに、燃料電池車がある。水素を用いるこのシステムでは、従来エネルギー車とは異なり、水素を検出するセンサ技術が必要になる。

Fig. 16に燃料電池車の水素系部品と高圧系部品の系統図を示す¹⁰⁾

フロント、リア、サイドには衝突検知センサが設置され、衝突を検知した瞬間、高圧水素タンクのバルブを閉じ、水素の漏れを防いでいる。また、FCスタックとフロントフード上部、高圧水素タンクとキャビン上部の水素センサで、水素漏れを検知した場合も、高圧水素タンクのバルブを閉じ、安全を確保している。

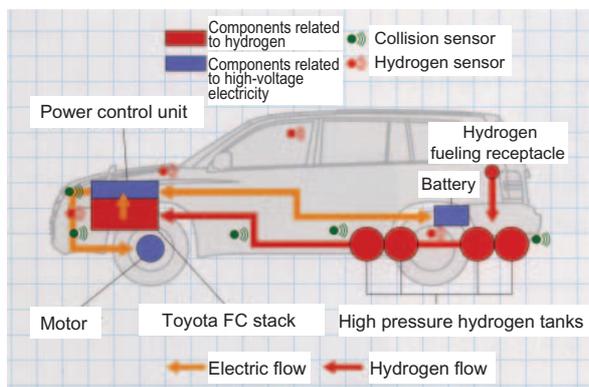


Fig. 16 Component & system of fuel cell vehicle

(2) 安全センサ

これまでの安全システムは、衝突時に搭乗者の安全

を確保するものであった。今後は、さらに一歩進み、予防安全へと進化していく。予防安全では、運転手が見たり、聞いたりして得ている情報を、何らかのセンシング手段で、正確に捕まえる必要がある。最近、ナビにCCDが付き、バンパーの前方や後方の情報を、運転手が確認するシステムが出ている。これをさらに進化させた周辺監視システムが求められる。Fig.17は最新のマジェスタに搭載された周辺監視システムである¹¹⁾

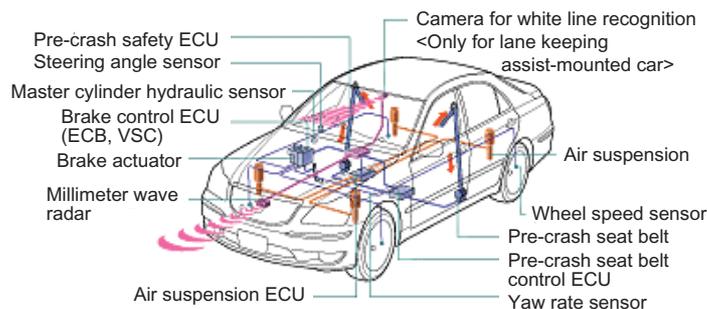


Fig. 17 Peripheral monitoring system mounted in new model Majesta

Fig.17に示すとおり、合計六つの周辺監視システムを搭載している。周辺監視のセンシング方式として、ミリ波レーダ、レーザーレーダ、カメラ認識、超音波センサ、赤外線センサ、侵入センサを用いている。一つのセンシング方式で、すべての機能を持つのが理想だが、それぞれに一長一短がある。今後、それぞれの方式の弱点克服により、搭載されるセンシング方式は、淘汰・整理されていくと思われる。

(3) 快適・利便センサ

環境や安全センサは“やさしさ”を提供するセンサと言えるが、“うれしさ”を提供する快適・利便センサも求められる。

利便では、ナビゲーションシステムをベースにし、自動車システムと情報通信システムとの融合が始まる。HMI(Human Machine Interface), AHS(Advanced cruise-assist Highway System), ASV(Advanced Safety Vehicle)の相互協調システムである。これらのシステムには、高度なセンシング技術が必須になる。Fig. 18に将来の集積化MEMSデバイスの例を示す¹²⁾

車室内の騒音環境下で、運転者が満足する機能を持つナビゲーションシステムを提供して行くには、超小型・超低消費電力・センサフュージョンを可能とする将来型の集積化MEMS技術が必要になる。

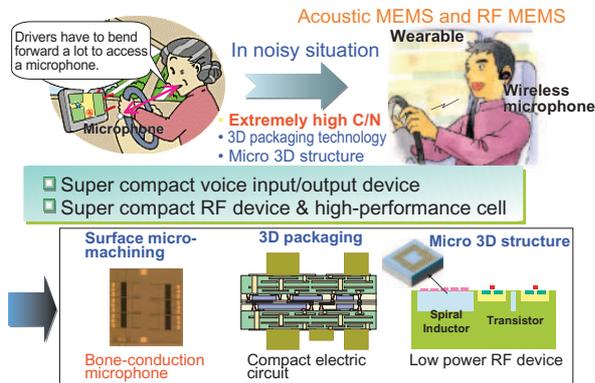


Fig. 18 Example of integrated MEMS

5. おわりに

自動車システムと自動車に搭載される半導体センサの技術動向について、過去・現在・将来にわたり概要を述べてきた。2000年以降の半導体センシング技術を牽引している製品は、イナーシャセンサ・VSC用加速度センサに代表される安全分野と燃料圧センサ・DPF用圧力センサに代表される環境分野である。これらは、自動車産業に携わる我々の長年の夢である、事故のない安全な車や自然環境を保つ車を実現するものであり、2010年頃までには大きな成果を達しうると思われる。2010年以降は、安全・環境以外に、自動車のうれしさ・楽しさを追求するシステムが数多く現れることを期待する。運転手の個性に合わせたパーソナルなシステムが要求され、個人情報をいかに取りこみ、自動車の運転や車室環境に反映させるかが重要になる。ネットワークセンシング時代の到来である。

センサは人間の目、耳、皮膚等の感覚の代りをなすもので、将来ともに車載システムに必須のアイテムである。DENSO VISION 2015の目指す、世界の人々に最高の“やさしさ”と“うれしさ”を届けるために、

最高のセンシング技術を提供しつづけていきたいものである。

<参考文献>

- 1) 電子情報技術産業協会：センサ生産実績に関する調査研究報告書ⅩⅦ(2004年3月), p.72.
- 2) J.Marek, H.-P.Trah, Y.Suzuki, I.Yokomori : Sensors for Automotive Technology, WILEY-VCH (2003), p.314.
- 3) 鈴木康利, 今井正人, 水野千昭, 横森巖：デンソーテクニカルレビュー, Vol.6, No.1 (2001), p.96.
- 4) 大原淳士, 加納一彦, 竹内幸裕：電気学会論文誌E, Vol.123, No.12 (2003), p.541.
- 5) J.Marek, H.-P.Trah, Y.Suzuki, I.Yokomori : Sensors for Automotive Technology, WILEY-VCH (2003), p.416.
- 6) J.Marek, H.-P.Trah, Y.Suzuki, I.Yokomori : Sensors for Automotive Technology, WILEY-VCH (2003), p.462.
- 7) Mark Harrison, Yuzuru Otuka, Minekazu Sakai: 2004SAE, 04ANNUAL-392 (2004)
- 8) Thomas Kramer, Wolfgang Foltin, Keisuke Goto Minekazu Sakai:FISITA2004, F2004I055(2004)
- 9) 賀羽常道, 青柳友三, 皆川友宏, 柳原茂：自動車技術, Vol.58, No.4(2004), p.31.
- 10) TOYOTA FCHV BOOK：トヨタ自動車株式会社広報部 (2004年1月)
- 11) トヨタ自動車株式会社ホームページ (2004年7月)
- 12) 原邦彦：“The Expectations on Integrated MEMS Devices in ITS Vehicle”, Micro-machine Summit 2004, Grenoble France (2004)

<著者>



鈴木 康利
(すずき やすとし)

IC技術2部
車載用半導体センサの製品および
要素技術開発に従事