

論文 自動車用半導体圧力センサの高精度・高機能化*

Evolution of Automotive Semiconductor Pressure Sensors

鈴木康利

Yasutoshi SUZUKI

今井正人

Masahito IMAI

水野千昭

Tiaki MIZUNO

横森 巖

Iwao YOKOMORI

Recently, there is a need for a new type of pressure sensor, which can be used for systems like direct fuel injection systems for protecting the environment, or power assisted brake systems for improved driving safety. For these widening areas of application, pressure sensors with higher accuracy, a wider pressure-sensing range, and integration of sensor chip functions are required. This paper discusses our engineering development of automotive semiconductor pressure sensors.

Key words : Pressure Sensor, Direct Fuel Injection Systems, Power Assisted Brake Systems, Higher Accuracy, A Wider Pressure-sensing Range, Integration,

1. はじめに

圧力センサの方式には、セラミック圧電、薄膜ピエゾ抵抗、半導体(Si)ピエゾ抵抗等があるが、我々は信頼性が高く、回路素子との集積化や微細化プロセスの適用が可能である点から、半導体(Si)ピエゾ抵抗を採用している。

1.1 圧力レンジの拡大と高精度化

Fig. 1に我々の半導体式圧力センサの自動車への応用の歴史を時系列で示す。1980年代にエンジン制御に用いられる吸気圧センサから始まった。ついで、サスペンションの油圧やエアコン冷媒圧へと応用が広がり、さらに、OBDの発令により、気化ガソリンのリークを検出する燃料蒸気圧センサへと広がってきた。現在では、ガソリン直噴エンジンやディーゼルコモンレール式燃料噴射システムへ展開により、数kPaから200MPaの広範囲な圧力レンジをカバーする圧力センサ製品群が必要になっている。

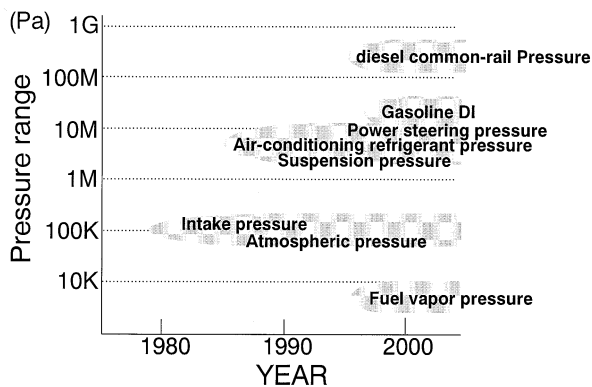


Fig.1 Applications of Pressure Sensors to Automobiles

Table 1に自動車用圧力センサに要求される精度の一例を示す。自動車用では-30 ~ 120の広い温度範囲で1 ~ 2%FSの高精度を要求されている。高精度化を達成するためには、センサデバイスの設計(シリコンチップと台座ガラス)に加え、パッケージを含めた総合構造設計が重要になる。

Table 1 Example of Accuracy Required for Automotive Pressure Sensors

Example for Accuracy Requirements			
Application	F.S.Pressure	Accuracy	Conditions
Common-Rail	200MPa	1%FS	-30 to 120°C
Gasoline DI	20MPa	2%FS	-30 to 120°C
Power Steering	7MPa	2%FS	-30 to 120°C
Air-conditioning	3.5MPa	2%FS	-30 to 135°C
Suspension	2MPa	2%FS	-30 to 120°C
Speed density EFI	100KPa	1%FS	-30 to 120°C
High altitude compensation	100KPa	1%FS	-30 to 90°C
Evapo Monitoring	5KPa	2%FS	-30 to 120°C

1.2 機能集積化

自動車用圧力センサは、圧損の低減や配管の極小化から検出対象部位近くの限られた空間に設置される。このため、小型のセンサが望まれる。

小型化を達成するためには、部品点数をできる限り少なくすることが必要である。半導体回路集積化技術により、信号処理回路がセンサ検出素子と同一のシリコンチップ上に集積化されるシングルチップセンサが実用化された。

本論文では、上記の背景に基づき、我々が開発してきた自動車用半導体圧力センサに関して、以下の順に

* SAE, 2000 Convergence Transportation Electronics Associationの了解を得てSAE 2000-01-C054を和訳し加筆転載

実施例を用いて述べる。

- 高精度化のための手法
- 圧力レンジの拡大
- 機能集積化の経緯

2. 高精度化のための手法

理想的なセンサの出力特性は、検出する物理量と線形性がある。圧力センサでは印加圧力を P、センサ出力関数を V(P) のとき、(1) 式が理想関数である。

$$V(P) = A \cdot P + B \quad (1)$$

ここで、A、B は定数である。

しかしながら、実際のセンサでは、温度等他の物理量の影響を受けるため、センサ出力関数は線形にはならず、以下の(2) 式のように表される。

$$\begin{aligned} V(P) = & A_{000} + A_{100} P + A_{010} t + A_{001} \\ & + A_{200} P^2 + A_{020} t^2 + A_{002} t^2 \\ & + A_{110} P t + A_{101} P t + A_{011} t \\ & + A_{300} P^3 + A_{030} t^3 + A_{003} t^3 \\ & + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、P：圧力、t：温度、 ϵ ：構造体の歪み、A_{1mn}：各項の偏微分定数

(1) 式は、(2) 式の右辺第 2 項までに相当し、第 3 項以降が誤差項となる。

誤差項のうち、(オフセット電圧、オフセット電圧の温度特性、感度、感度の温度特性) の 1 次成分誤差は直線性があるため、簡単な回路で調整し、低減できる。

一方、オフセット電圧の温度特性の非直線性 (TNO)、感度の温度特性の非直線性 (TNS)、圧力特性の非直線性 (Nlp) の 2 次成分誤差は、名前のとおり、非直線性があるため、調整に必要な回路規模は大きく、調整工数も多くなり、コストアップとなる。

そこで我々は、2 次成分誤差については、センサデバイスのハードウェア (構造) の最適設計により、調整を必要としないレベルまで高精度化した。これにより、調整は 1 次成分誤差の 4 項目 (室温オフセット、室温感度、高温オフセット、高温感度) の調整のみで実現できた。

すなわち、高精度化のポイントは以下の 2 点である。

- 1) センサデバイス (シリコンチップと台座ガラスからなるセンサチップ) の最適構造設計による高精度化
- 2) 低コストを狙った最適調整方法の実現

調整に関しては、直線性の補正でよいので、一般的手法を用いて十分達成できている。

今回、1) に関して、センサ特性解析と TNS 改善への解析手法の適用事例について述べる。

2.1 センサ特性解析手法

我々はセンサ特性を高精度化するために、独自に開発したセンサデバイスシミュレーションを有効利用した¹⁾。Fig. 2 にその解析手法を示す。

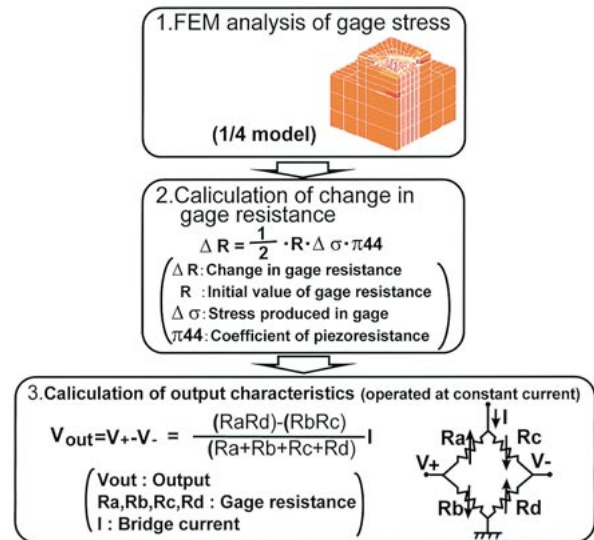


Fig.2 Sensor characteristics analysis method

まず圧力や温度を受けたときの変形状態を FEM により解析する。FEM ツールとしては MARC を用いる。解析にあたっては、薄いダイアフラム上の微小な応力を精度良く解析するため、中間接点を持つ 3 次元ソリッド要素を用い、非線型の解析のため、アップデイトラグランジェ法を採用した。

の解析によって得られたダイアフラム上の拡散ゲージ部に発生する応力値から各ゲージの抵抗値変化 ΔR を計算する。ゲージ抵抗 R、ピエゾ抵抗係数 $\pi 44$ は温度特性を考慮している。

最後に実際のゲージ抵抗の回路構成に基づき出力値を計算する。

2.2 TNS 改善へのセンサ特性解析手法の適用

センサ出力の 2 次成分誤差 (TNS) の原因を、以下に示すゲージ抵抗の変化 ΔR の式から検討する。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \times \dots \times \pi 44 \quad (3)$$

(3) 式のうち、R と $\pi 44$ はゲージ抵抗の拡散濃度で決まる値で、すでに温度特性への影響を考慮している。そこで、温度特性に影響を及ぼす $\pi 44$ に関して、センサデバイス構造の発生箇所を考察した。

Fig. 3 に圧力センサデバイスの作製プロセスを示す。ダイアフラムを形成した Si チップは台座ガラス

に陽極接合されている。陽極接合工程で高温から室温に戻されると、Siと台座ガラスの熱膨張係数の違いにより熱歪みを生じ、ダイヤフラムをたわませ、が変化する。

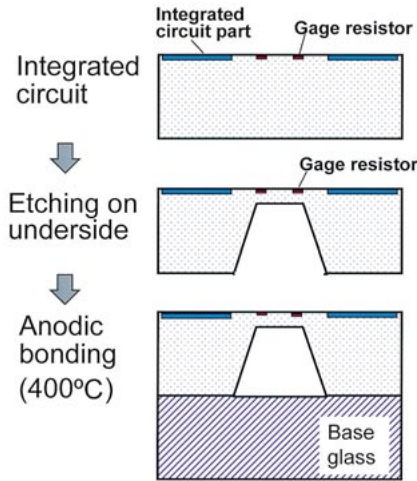


Fig.3 Process of Manufacturing Pressure Sensor Devices

これから はSiと台座ガラスの接合部分に発生する。そこで、接合部分のシミュレーションを行った。解析結果をFig. 4に示す。台座ガラスが、膨張した時は感度が低下し、収縮したときは感度が上昇することが明らかになった。

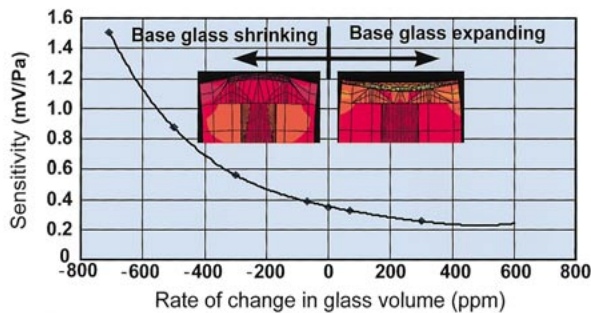


Fig.4 Sensitivity Characteristics when Base is Expanded and Shrunk

解析結果を実際のセンサデバイス構造設計に適用した。Siと台座ガラスは400 程度の高温で陽極接合される。従って、室温(25)では、

$$\int_{60}^{400} [\alpha_G(T) - \alpha_{Si}(T)] dT = 250 \text{ppm}$$

の歪みが生じている。同様に温度=60 では、

$$\int_{60}^{400} [\alpha_G(T) - \alpha_{Si}(T)] dT = 230 \text{ppm}$$

の歪が生じている。この結果、室温と60 では20ppm歪み量が変化する。

この値を解析に反映させ、感度の温度特性を解析した結果をFig. 5に示す。解析結果は実測値と良く一致しており、構造設計に適用できることを実証できた。なお、この解析ではパッシベーション膜の膜応力とSiのヤング率の温度の影響も考慮している。

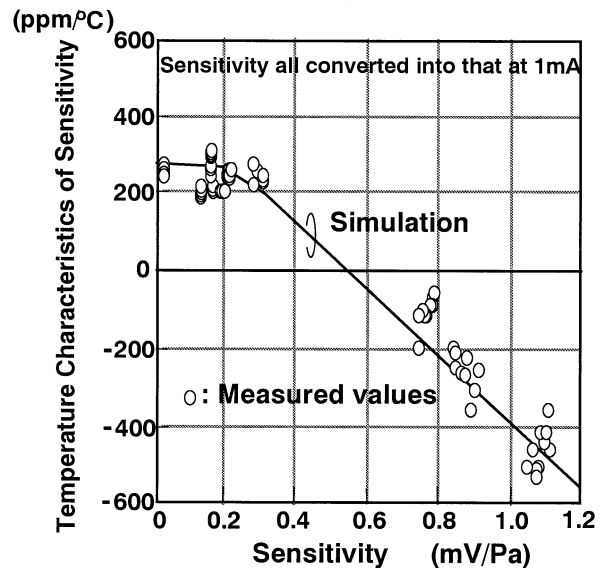


Fig.5 Device Structure Design in Consideration of Strain due to Anodic Bonding

従来、使用温度域での台座ガラスの熱膨張係数の温度特性に注目してきたが、TNSの改善には、陽極接合温度から室温までの台座ガラスの熱膨張係数の温度特性が重要であり、シリコンに近づけることにより、TNS 0を実現させた。

3. 圧力レンジの拡大

我々は、圧力センサの自動車への応用展開の中で、Fig. 6に示すように、5 kPa ~ 200MPaの圧力センサをそろえてきた。

圧力レンジの拡大は、MAPSの100kPaから始まり高圧側・低圧側へと両側に拡大してきた。高圧側への圧力レンジ拡大は、受圧部にメタルダイヤフラムを設け、オイル室中のセンサデバイスと圧力媒体を分離する構造を用いることで達成した²⁾。一方、低圧側への

圧力レンジ拡大は高感度、かつ高精度のセンサ特性が要求されるため、独自の取組みが必要となったので、以下に述べる。





Classification	Low	Medium	High		
Pressure to be detected	5kPa	100kPa	5~10MPa	20MPa	200MPa
Product	OBD2	MAPS(EMS)	A/C,CVT	GDI	Commonrail
					
Thickness of diaphragm	14μm	35μm	60μm	100μm	350μm
Material of diaphragm	Single crystal silicon				

Fig.6 The Application of Pressure Sensors

3.1 低圧側への圧力レンジ拡大

低圧レンジの圧力センサの高精度化の課題は、以下の2点にある。

- 1) 圧力感度向上のためのダイアフラム厚み設計
- 2) パッケージからセンサデバイスに伝わる機械的歪みの低減

Fig. 7に5kPa用の燃料蒸気圧センサ (Fuel Vapor Pressure Sensor) の構造を示す。5kPa用に圧力感度を向上させるために、シリコンダイアフラム厚さをMAPS (100kPa) 用の35 μmから14 μmとした。しかし、これにより樹脂パッケージからの機械的歪みがセンシング部に伝わる影響が大きくなった。このため、先に述べた解析手法を用い、樹脂パッケージからの歪みの影響を解析した。

Fig. 8に台座ガラスと樹脂パッケージ間にステムのある場合とない場合の解析結果を示す。ステムを挿入することにより、シリコンダイアフラムに発生する熱応力が約1/4に低減されることがわかる。

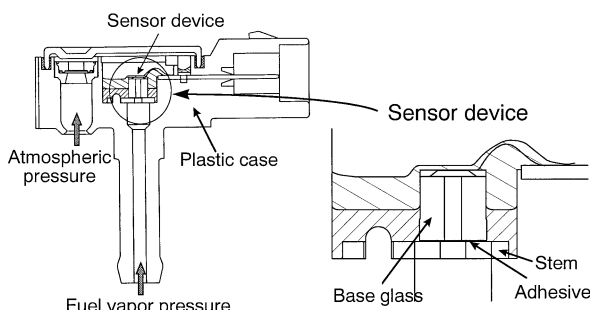


Fig.7 Structure of Fuel Vapor Pressure Sensor

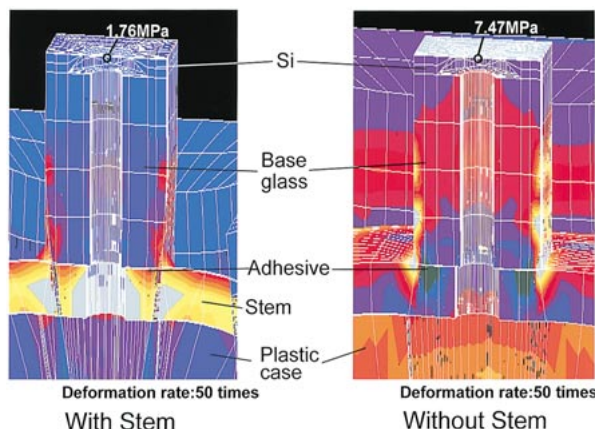


Fig.8 Simulation of Fuel Vapor Pressure Sensor Devices

以上より、5kPaの低圧センサの高精度化のポイントは以下の2点である。

- a) パッケージと台座ガラス間に両者の中間の熱膨張係数を持つ部品 (ステム) の追加
- b) 台座ガラス接着に低ヤング率でガソリンに対して耐性の高いフッ素系接着剤の適用

これにより、センシング部への機械的な歪みの影響を低減でき、5kPaの低圧で2%FSの高精度のセンサを実現した。

4. 機能集積化の経緯

Fig. 9にMAPSセンサの集積化の歩みを示す。

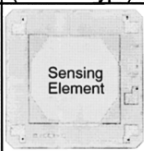
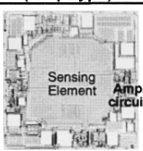
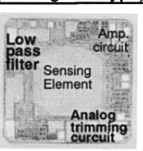
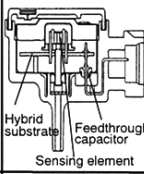
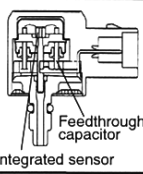
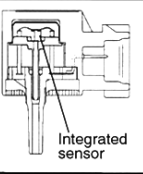
	1st. MAP (Discrete type)	2nd. MAP (Amp type)	3rd. MAP (Analog trim type)
Photograph of chips			
Process	Sensor	Sensor+Bipolar	Sensor+Bipolar
Structure			
Number of parts	17	12	6

Fig.9 History of integrated Sensors

半導体回路集積化技術を半導体圧力センサに適用した集積化圧力センサを開発することにより、部品点数を低減し、小型化・低コスト化を達成してきた。

第1世代センサは、ディスクリートセンサデバイス

と回路部品のハイブリット構成であった。EMC対策はパッケージ全体をシールドケースに入れ、輻射ノイズを低減し、ハーネスからの誘導ノイズは貫通コンデンサを介してシールドケースに導き、渦電流で消失させる方法で実現させた。

Fig. 10にEMC回路の集積化について示す。

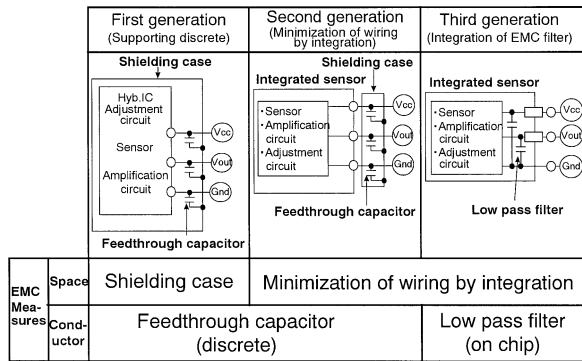


Fig.10 Integration of EMC Circuit

第2世代のEMC対策は、回路部を集積化し配線長を極小化することで輻射ノイズを低減し、シールドケースを廃止した。

第3世代のEMC対策は、さらに、コンデンサと抵抗からなるローパスフィルタ(L.P.F.)を集積化することにより、誘導ノイズを低減し、貫通コンデンサを廃止した。これにより、EMCノイズ対策機能を1チップに集積化した非常にシンプルな圧力センサデバイスを実現させた。

5. おわりに

(1)高精度化に対し、以下の方法を取り、コストパフォーマンス最適を実現させた。

- 1次成分誤差を4項目で調整。センサデバイスシュミレーション技術を構築し、2次成分誤差を低減できる最適センサ構造を採用。

(2)低圧側への圧力レンジ拡大に対し、最適厚にしたSiダイアフラムと樹脂パッケージを用いたアセンブリの最適構造設計により、高精度低圧センサを実現させた。

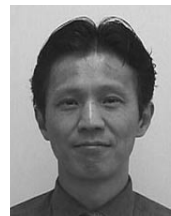
(3)機能集積化に対し、EMC・ESDのノイズ対策回路を圧力センサデバイスに集積化し、部品点数を大幅に低減させた。この技術により、1チップ実装が可能となり、高性能・小型・低コストの圧力センサを実現させた。

今後も、環境保護・安全性向上の社会要求から、自動車システムはさらに高度化して行く。このシステム要求に対して、我々は、小型・高精度・高機能の自動車用半導体圧力センサをタイムリーに供給して行く所存である。

<参考文献>

- 1) 豊田, 他: 電気学会全国大会, '98.3.24.
- 2) S.Otake, et al: SAE 980271

<著者>



鈴木 康利
(すずき やすとし)

IC技術2部
半導体センサ関連の要素技術開発に従事。



今井 正人
(いまい まさひと)

IC技術2部
車載用半導体センサの開発・設計に従事。



水野 千昭
(みずの ちあき)

IC技術2部
車載用半導体センサの開発・設計に従事。



横森 巖
(よこもり いわお)

IC技術2部
車載用半導体センサの開発・設計に従事。