

# 特集 コモンレールシステム用超高压センサの開発\*

## High-Pressure Sensors for Common Rail Systems

田中宏明

Hiroaki TANAKA

伊藤 治

Osamu ITO

鈴木康利

Yasutoshi SUZUKI

The direct injection diesel engine system was developed to solve the problems of conventional diesel engine systems: emissions of PM (Particulate Matter) and high emissions of NOx (Nitrogen Oxides). The common rail pressure sensor is a key sensor in the system, which requires high-pressure resistance of 160MPa and accuracy of  $\pm 1\%$ . This paper discusses our development of a new generation of common rail system high-pressure sensors that are structurally simpler than conventional sensors, while meeting the above requirements.

**Key words :** Common rail, Pressure sensor, Diesel engine, Metal-touch-seal

### 1. まえがき

ディーゼルエンジンのコモンレール方式は、高压ポンプにて生成した高压燃料をコモンレール（蓄圧室）に蓄え、インジェクタ内の電磁弁によってノズル背圧を制御し、最適化された噴射を実現するという電子制御燃料噴射システムである。

Fig. 1にコモンレールシステムの構成を示す。

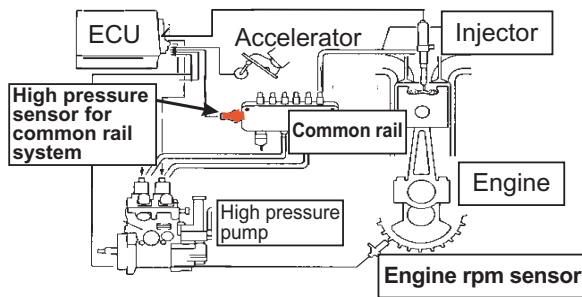


Fig. 1 Direct injection diesel engine system configuration

コモンレール内の燃料圧力は高压ポンプの燃料吐出量を電磁弁によって噴射量を、コンプレッサによって加圧し、コントロールされる。その燃料圧力はコモンレールに設置された圧力センサ（コモンレール圧センサ）により検出され、エンジンの回転速度と負荷に応じて設定された最適値に高压ポンプの電磁弁によりフィードバック制御される<sup>1)</sup>

我々はこれまでハーメチック構造を用い、シールドダイヤフラムで受圧し、封入オイルを圧力媒体として、単結晶シリコン圧力センサデバイスで圧力-電気変換する高压センサを開発してきた<sup>2)</sup>

しかし、一層、低エミッションの実現のために、コモンレール圧センサにはシステム全体での高压力化と

高精度化を実現すべく、160MPaの高耐圧と $\pm 1\%$ の高精度が要求され、従来構造では、耐圧・精度の面で達成が難しいと判断し、全く新しい構造による超高压センサの設計に着手した。

本論文はこの要求を満足する新構造の超高压センサ開発に関するものである。

### 2. 高耐圧設計

Fig. 2に開発したコモンレールシステム用超高压センサの構造図を示す。ハウジングシステム間、ハウジングコモンレール間の超高压媒体の封止には、メタルタッチシール構造を用いている。検出部の歪み伝達部は金属ステムに薄肉のダイヤフラム部を設け、高压の燃料を受圧する。圧力によりダイヤフラム部に発生する応力を、直上に接着された単結晶シリコンピエゾ抵抗素子にて電気変換する。構造上、最も大きくセンサ性能に影響を及ぼす構成部品は、センシング部を成すシリコンセンサチップ及び金属ダイヤフラムである。

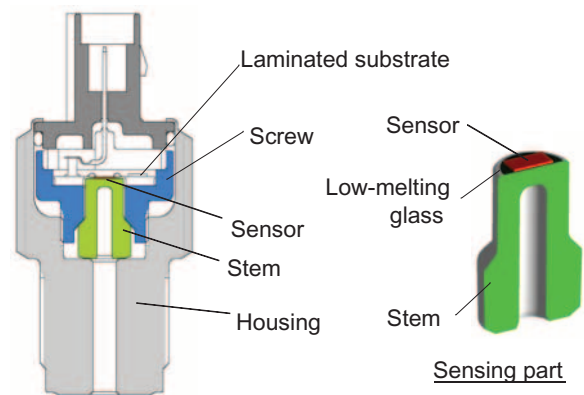


Fig. 2 Sensing part of next-generation high-pressure sensor for common rail systems

\* (社)自動車技術会の了解を得て、「2002年秋季大会学術講演会前刷集」No.87-02, 62より一部加筆して転載

Fig. 2に示すセンシング部の課題の第1は高耐圧設計である。以下にその詳細を述べる。

Fig. 2の金属ステムには二つの役割がある。一つは160MPaの超高压に耐えること、もう一つは金属ステム上の単結晶シリコンピエゾ抵抗素子に十分な応力を伝えることである。有限要素法(FEM)を用いた応力解析により、金属ステムの最適形状設計を行った。

Fig. 3にスクリューと金属ステムのFEM応力解析結果の1例を示す。スクリューにて金属ステムをハウジングに押しつけ160MPaに耐える封止を実現している。スクリューに与える軸力により、金属ステムの図中A部に応力集中が発生する。このため、金属ステムの材料強度を考慮した形状設計が必要になる。

A部の発生応力に影響を及ぼす形状パラメータはステム長さLと軸力受け面角度 $\theta$ である。Fig. 4に軸力受け面角度 $\theta$ とA部発生応力の関係を示す。 $\theta$ が45°

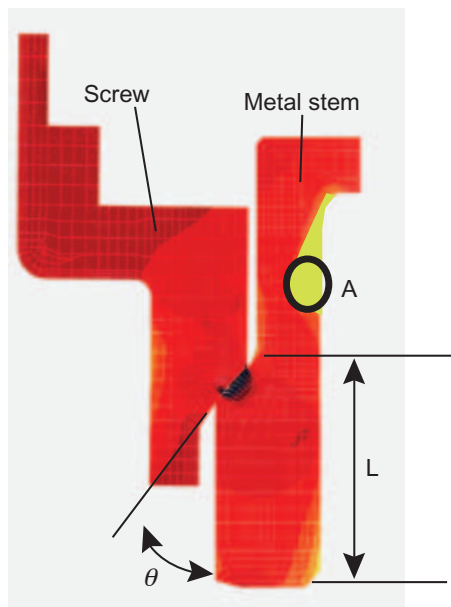


Fig. 3 Screw and metal stem FEM analysis results

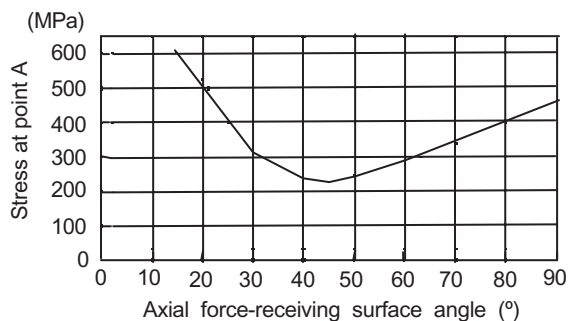


Fig. 4 Relation between stress at point A and axial force receiving surface angle  $\theta$

のとき、A部最大発生応力が最小になることが分かる。なお、LはA部発生応力とアセンブリ形状の制約からその寸法を決定している。

次に、金属ダイアフラム上のSiピエゾ抵抗素子に必要な応力を与えるダイアフラム形状の設計を行なった。

Fig. 5に金属ダイアフラム部のFEM応力解析結果の1例を示す。解析より、金属ダイアフラムに発生する応力は、ダイアフラム厚とダイアフラムR部の曲率に関係することが明らかになった。接着層である低融点ガラスの材料強度以下で、かつシリコンピエゾ抵抗素子に必要とされる応力を確保できる寸法として、ダイアフラム厚1.4mm、ダイアフラムR部の曲率半径0.9mmを採用した。

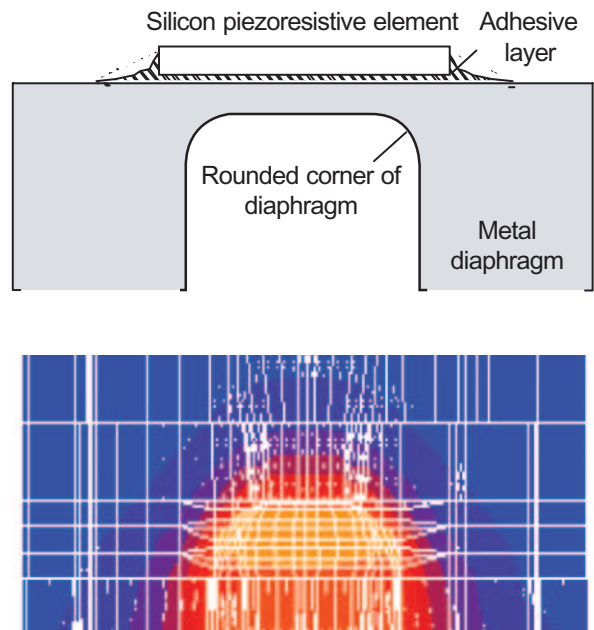


Fig. 5 Metal diaphragm FEM analysis result

### 3. 高精度設計

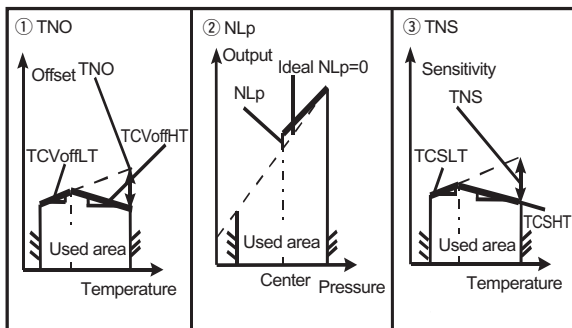
金属ステム直上に接着されるシリコン単結晶ピエゾ抵抗素子は、薄膜シリコン多結晶ピエゾ抵抗素子に比べ3~10倍のゲージファクタを持つため<sup>3)</sup>、感度を3~10倍にすることができ、センサ特性の高精度化に有利となる。今回、-30~120°Cの使用温度範囲で±1%F.S.の高精度を達成するために、以下の素子構造及び設計手法を採用した。

- ① (100) 単結晶Si基板採用
- ② 最適ゲージ配置設計

### 3.1 圧力センサの出力誤差成分

理想的な圧力センサの出力特性は、印加圧力に比例して出力が増加する。しかし、実際には種々の誤差成分が存在している。特にシリコンピエゾ抵抗素子使用時には、誤差成分として、オフセット電圧とその温度特性、感度とその温度特性がある。さらに、圧力に関する非直線性誤差がある。Fig. 6に半導体式圧力センサの非直線性誤差について、詳しく説明する。

Fig. 6①にオフセット電圧（圧力無印加時出力）の温度特性の非直線性誤差（TNO）を示す。TNOは1次成分の差（TCVoff(HT:高温側)−TCVoff(LT:低温側))で表される。Fig. 6②に圧力特性の非直線性(NLp)を示す。NLpは、使用圧力範囲の中心での圧力の理想直線からのずれをいう。Fig. 6③は感度(F.S.圧力印加時出力)の温度特性の非直線性を示す。TNSも1次成分の差(TCS(HT:高温側)−TCS(LT:低温側))で表される。



① TNO: non-linearity of offset voltage temperature characteristics  
 ② NLp: non-linearity of offset voltage pressure characteristics  
 ③ TNS: non-linearity of sensitivity temperature characteristics

Fig. 6 Non-linearity characteristic of semiconductor pressure sensor

直線性誤差は、出力回路で調整し、低減可能であるが、非直線性誤差は、簡単な回路での調整は困難である。

今回、高精度化を達成するためには、この非直線性誤差を、センサデバイス構造を最適設計することにより、ほぼ0にすることを試みた。

最適設計に用いたのは、我々が独自に構築したセンサデバイスシミュレーションである<sup>4)</sup>。シミュレーションの精度を決定する主要因の一つは構造材料の使用温度範囲での材料物性値（線膨張係数、ヤング率、ポアソン比）の正確さである。今回金属ステムの材料物性を評価するには、超音波法（超音波の反射波強度の差から物性値を測定する方法<sup>5)</sup>を用い、−50~500℃で

の金属ステムの物性値を求め、実際の工程での温度変動も考慮に入れ、使用範囲内の発生応力である−30~120℃での温度依存性、0~200MPaでの圧力依存性を詳細に検討を行い、ピエゾ抵抗の設置範囲及び位置を決定した。

### 3.2 Si基板面方位

半導体ピエゾ抵抗素子の抵抗配置は、面方位により配置が異なる。今回はステム形状から、最適化を行った。

Si (100)ピエゾ抵抗素子のNLpは、次式で表される。

$$NLp \approx -0.25 \eta_{44} / \pi_{44} \cdot \{(\sigma_{xx'} - \sigma_{yy'}) + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\} \times 100 (\%FS) \quad (1)$$

ここで、 $\eta_{44}$ :  $\pi_{44}$ の2次係数

(1)式からNLpを0にするには、 $\sigma_{xx'} - \sigma_{yy}' = 0$ かつ $\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = 0$ となるようにすればよいと言える。Fig. 7にセンサデバイスシミュレーションを用いて解析したFEM応力解析結果を示す。

図から金属ダイヤフラム部の内径に対して、ピエゾ抵抗ゲージを同心円状に配置することにより、直径方向の応力成分 $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、かつ接線方向の応力成分 $\sigma_{xx'}$ 、 $\sigma_{yy}'$ を両立できるため、NLpを0にすることができる。

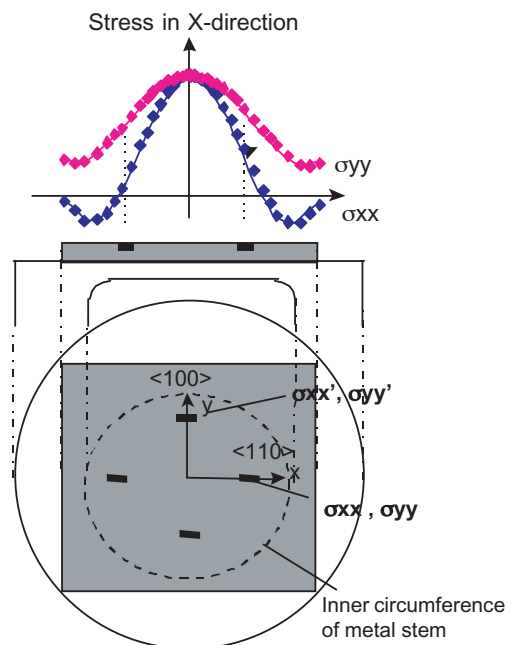


Fig. 7 FEM stress analysis result for (100) silicon

また、TNSは、 $(\sigma_{xx'} - \sigma_{yy'}) + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$  の温度特性に比例するので、 $(\sigma_{xx'} - \sigma_{yy'}) + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$  を0にできる配置にピエゾ抵抗ゲージを配置すれば、TNSを0に近づけることができる。

### 3.3 最適ゲージ配置

オフセット電圧の温度特性は下式で求められる。

$$e = 1/2 \times i \times R_{\pi 44} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (2)$$

ここで、 $i$  : ゲージ電流

$R_{\pi 44}$  : 温度依存性を含む係数

(2)式より、TNOを0にするためには、印加圧力=0の時に、温度が変化してもピエゾ抵抗ゲージに発生する応力の直径と接線成分を等しくする必要がある。

そこで、FEM解析を用いて最適ゲージ配置を調査した。その方法はSiチップ上の低温側と高温側の応力値の差を分布として求めることである。応力=0となる領域にピエゾ抵抗ゲージを配置すれば、理論上、TNO=0とすることができる。

## 4. 試作評価結果

Si (100)面でのピエゾ抵抗ゲージの配置を最適化した圧力センサのN<sub>lp</sub>, TNO, TNSの試作評価結果をFig. 8に示す。図からN<sub>lp</sub>, TNO, TNSが予想どおりほぼ0となること分かる。

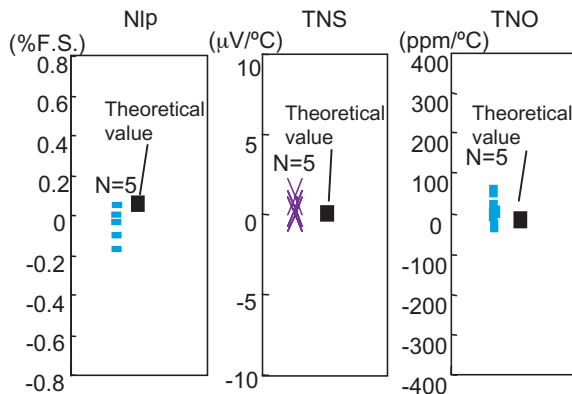


Fig. 8 Results of prototype evaluations for N<sub>lp</sub>, TNO, and TNS

Fig. 9はアセンブリの写真を示す。アセンブリの寸法は27mm×63mmである。



Fig. 9 Photograph of sensor assembly

Fig. 10にアセンブリの温度特性の1例として、印加圧力80MPa時の温度特性を示す。ほぼ±1%F.S.の高精度を満足していることが分かる。

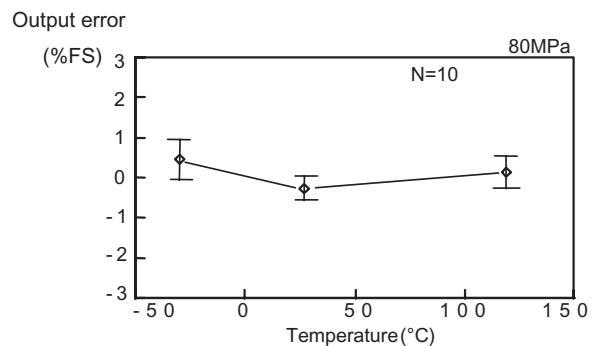


Fig. 10 Assembly temperature characteristics

20~169MPaでの圧力サイクル耐久試験結果をFig. 11に示す。耐久変動は見られず、コモンレール圧力下で十分に使用可能であることが明らかになった。

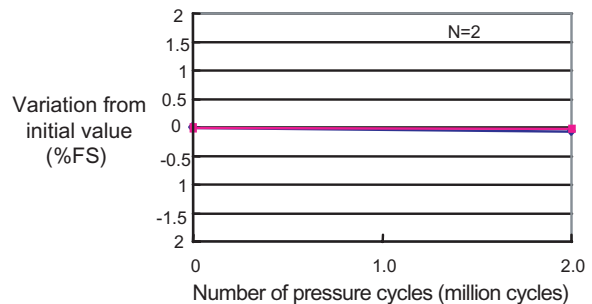


Fig. 11 Pressure cycle test results

## 5. おわりに

160MPaの高耐圧と±1%の高精度を満足するコモンレールシステム用超高压センサの開発に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) 高耐圧化に関して、メタルタッチシール構造を採用し、センシング部の金属ステムの耐圧設計を行った。FEM解析により、ステム長さや軸力受け面角度の最適形状を明らかにした。
- (2) 高精度化に関して、センサデバイスシミュレーションを用いて、センサ特性の非直線性を低減する構造設計を行い、温度特性を使用範囲内でほぼ0にすることができた。

- (3) (100) 単結晶シリコン基板を用い、ゲージ配置を最適化することにより、圧力の非直線性をほぼ0にすることができた。
- (4) 開発したコモンレール圧センサは圧力特性精度±1%を達成し、160MPaまでの圧力サイクル耐久試験を満足することを確認した。

### <参考文献>

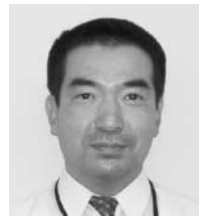
- 1) 伊藤昇平：日本エネルギー学会誌，VOL.80，No.3 (2001)
- 2) 大竹精一郎他：SAE980271
- 3) 深沢剛他：SAE860473
- 4) 横森巖他：CONVERGENCE2000 2000-01-C054
- 5) 桜井裕：金属臨時増刊号 94/04 pp.187-191.



### <著 者>



田中 宏明  
(たなか ひろあき)  
半導体圧力センサデバイスの  
開発・設計に従事



伊藤 治  
(いとう おさむ)  
半導体圧力センサの開発・設計に  
従事



鈴木 康利  
(すずき やすとし)  
半導体センサの開発に従事