

有限要素法による燃焼圧センサの特性解析

森川健志, 野々村裕

Piezoresistive Finite Element Analysis of the Combustion Pressure Sensor

Takeshi Morikawa, Yutaka Nonomura

要 旨

3次元構造を持つピエゾ抵抗効果デバイスの出力を高精度でシミュレーションするピエゾ抵抗効果シミュレータPREAPS (PiezoResistive Effect Analysis Program System) を作成した。このシミュレータは有限要素法をベースとし、構造解析部と電場解析部、そしてそれらをつなぐ構造解析 - 電場解析結合プログラムPREAPよりなる。PREAPは、ピエゾ抵抗効果デバイスの有限要素モデルの各要素ごとに、ピエゾ抵抗効果により生じた異方性導電率を計算する。これにより、デバイス上に生じた応力と、それに基づき変化したピエゾ抵

抗効果による導電率の分布を取り込むことを可能にし、高精度なデバイス出力解析を可能にした。PREAPSは、任意の幾何学的構造、電極配置、結晶方位を持つピエゾ抵抗効果デバイスの動作解析および設計用のツールである。

またPREAPSを用いて、豊田中研で研究開発した燃焼圧センサの力検知素子部の解析を行った。電極を最も効率の高い配置に設計すると共に、寸法誤差による出力変動幅を小さくする等、生産性を考慮した構造を得た。

Abstract

An FEM-based 3-dimensional piezoresistive effect (PRE) analysis program system, PREAPS, has been developed. The PREAPS consists of three parts; a stress analyzer using crystal compliance anisotropy, a PRE converter which converts stress to conductivity with PRE coefficients, and an electrical analyzer using 3-dimensional anisotropic conductivity. This system enables us to consider the effect of the stress distribution in the device and to analyze the related 3-dimensional PRE. The PREAPS is an analytical tool for

PRE devices which have arbitrary structures, electrode patterns, and crystal orientations. Also, it is applicable to other devices, such as pressure sensors with a diaphragm, acceleration sensors, and thin film devices.

The PREAPS is used for the analysis and design of a force detecting element of an advanced combustion pressure sensor (CPS). The PREAPS has made it possible to achieve the high productivity of the CPS and to design an electrode pattern with the highest efficiency.

キーワード

ピエゾ抵抗効果, 有限要素法, 解析, センサ, 異方性, シリコン

1. はじめに

半導体のピエゾ抵抗効果を用いたデバイスは、これまで豊田中研をはじめ、メーカや大学において、ロードセル、圧力センサ、加速度センサ等の力学量センサとして、歪量の検出に用いられてきている。豊田中研においては、シリコンを用いた自己感度温度補償型ゲージ¹⁾、MSGゲージ (Miniature Strain Gauge)²⁾、高温用ひずみゲージ³⁾、マイクロダイヤフラム型圧力センサ^{4,5)}、加速度センサ、そして燃焼圧センサ^{6,7)}等に応用している。

これら各種センサの研究、開発を行うに際して、センサを構成する各種パラメータに対するセンサの諸特性を数値計算により推定、評価することが非常に重要視されている。この出力例として、例えばセンサ出力と素子構造の関係、温度特性、センサの強度 (耐圧)、寿命などがあげられる。今回はまず、センサの基本となる出力のシミュレーションに焦点を当てた。

ピエゾ抵抗効果を用いたセンサの設計、動作解析、最適化手法に関してこれまでにいくつかの報告がある。これらの報告では、単純式による解法、有限差分法、有限要素法等の手法が採られている⁸⁻¹⁰⁾。しかし、これまでの解析技術では、汎用性に乏しいという問題点があった。なぜならばセンサごとにピエゾ抵抗効果の検出方式、すなわち印加電流、検出電界、印加応力の結晶軸に対する方位が異なる。また、センサ出力の計算に用いる方程式、そしてその中で用いるピエゾ抵抗係数の値も異なるが、これまでは各々のセンサに限定した解析を用いる方法が一般的であったためである。

特に、燃焼圧センサのようにピエゾ抵抗効果が3次元的に用いられ、かつ、ゲージ部分が厚く3次元ゲージ構造となった素子の場合、素子構成部品の組み合わせ、電極位置等により素子出力が大きく変化する。今後、センサの仕様に応じてさらに様々な検出方式のピエゾ抵抗効果デバイスを開発する可能性があることを考えると、汎用性の高い設計、解析システムが必要である。そこで、我々は有限要素法をベースとした、汎用性の高い高精度なピエゾ抵抗効果解析システムを構築した。

本稿では、有限要素法をベースとした、ピエゾ抵抗効果デバイスの高精度な動作解析及び設計のためのシ

ステムについて紹介する。またそれを用いた燃焼圧センサの力検知素子の解析結果から、その特徴について述べる。

2. ピエゾ抵抗効果解析システム

2.1 ピエゾ抵抗効果

ピエゾ抵抗効果とは、半導体シリコンやゲルマニウム等にひずみが増えらるることによるエネルギーバンド構造の変化に起因して、導電率が変化する効果である。この効果は、金属に比べて30~100倍大きく、かつ、異方性が極めて大きい¹⁾。ピエゾ抵抗効果は異方性を有するため、その一般式は少々複雑である。Maisonら¹¹⁾はピエゾ抵抗効果を、電界 E_i を電流密度 J と応力 T の関数として、電流と応力が0という条件でMcLaurin展開することにより以下の式を得た。

$$dE_i = \frac{dE_i}{dJ_j} dJ_j + \frac{\partial E_i}{\partial T_{kl}} dT_{kl} + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 E_i}{\partial J_j \partial J_m} dJ_j dJ_m + \frac{\partial^2 E_i}{\partial T_{kl} \partial T_{no}} dT_{kl} dT_{no} + 2 \frac{\partial^2 E_i}{\partial J_j \partial T_{kl}} dJ_j dT_{kl} \right] + \dots \quad (1)$$

$$(i, j, k, l, n, o = 1, 2, 3)$$

ここで、立方晶を考えると、対称性から奇数階のテンソルは消去されるので、右辺は第1項と第5項のみが残る。残ったそれぞれの偏微分の項を、順に比抵抗 ρ_{ij} 、及びピエゾ抵抗係数 π_{ijkl} とすることにより以下のテンソル形式で表現した。

$$E_i = \rho_0 \sum_{j=1}^3 \delta_{ij} J_j + \sum_{j,k,l=1}^3 \pi_{ijkl} T_{kl} J_j + \dots \quad \dots \dots (2)$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

ρ_0 ; 等方的な比抵抗

π_{ijkl} ; ピエゾ抵抗係数

δ_{ij} ; クロネッカのデルタ

右辺の第1項は等方的な比抵抗を表す項、第2項以降は異方的なピエゾ抵抗効果を表す項である。第3項以降はピエゾ抵抗効果の非直線性を表す項であるが、その効果は通常第2項と比較して2桁以上小さいため省略してある¹²⁻¹⁴⁾。 π 及び T の添字は、電流、電界、力の方向を表現するものであり、例えば π_{ijkl} の添字は、 i は (印加) 電流方向、 j は (検出) 電界方向を、 k は力の加えられる面、 l は面に加えられる力の方向を表す。またこの添字は一般に、11 1, 22 2, 33

3, 23, 4, 31, 5, 12, 6, と略形式で表記される。 T_1, T_2, T_3 は1, 2, 3面の各面に加えらるる垂直応力, T_4, T_5, T_6 は2, 3, 1面の各面に加えらるるせん断応力である。例えば, π_{63} は正式には π_{1233} なので, 印加電流を1方向とし, 3面に加えらるる3方向の力を, 2方向の電解(電圧)変動量として検出する方式のピエゾ抵抗係数である。

ここでシリコン単結晶の<100>, <010>, <001>方向をそれぞれ1, 2, 3方向とした場合, π は式(3)のように6×6の行列で表現される。

$$\pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & \pi_{44} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & \pi_{44} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \quad (3)$$

C. S. Smith¹⁵⁾によれば比抵抗7.8Ω·cmのp型シリコン単結晶のピエゾ抵抗係数は $\pi_{11} = 6.6 \times 10^{-12}$, $\pi_{12} = -1.1 \times 10^{-12}$, $\pi_{44} = 138.1 \times 10^{-12}$ (単位はcm²/dyne)である。

またこのとき式(2)を, 式(3)のピエゾ抵抗係数において0である成分を考慮した上で行列形式に展開すると, 下記の式(4)のように表現される。

なお, 導電率と比抵抗は互いに逆数の関係にある。本文では, 説明の内容に応じてこの両者を使い分けてピエゾ抵抗効果の説明をすることにする。

2.2 有限要素法

有限要素法とは, 解析対象となる領域を, いくつかの節点により形成した多くの多角形要素に分割し, それぞれの要素内のポテンシャルを単純な関数で近似することによりポテンシャル分布を維持したまま全体を解析する方法である。各節点のポテンシャルの数値解析近似解を求めるには, 微分方程式の支配方程式を積分方程式形式に表現し直す必要がある。この手法として, 変分原理や重みつき残差法がある。これらの詳細については, 関連参考書に詳細に記してあり, また本レビューにおいても以前に紹介されているため, 詳

しい説明は省略させていただく¹⁶⁻¹⁸⁾。有限要素法の利点を理論解析法と比較すると, 解析対象をいくつかの有限要素に分割して解析を行うため, 複雑な形状のモデルに対しても解析が可能である点が挙げられる。また, 差分法と比較しても, 分割の汎用性が高いという利点がある。

有限要素法は, 計算機の性能の向上と共にその適用範囲が大きく広がり, 構造解析, 振動解析, 流れの解析等数々の分野で利用され, 成果を挙げている^{18, 19)}。

また, 構造, 熱, 磁気等の分野において, 汎用の有限要素法プログラムも数多く世の中に出ており, そのポテンシャルの高さと共に, プリ・ポストプロセッサの発展に伴う操作性の向上とあわせ, さらにユーザが増大する方向にある。

2.3 システムの構成

前述のように, ピエゾ抵抗効果とはシリコン等に生じるひずみにより導電率が変化する効果であり, その導電率の逆数である比抵抗の変化分はピエゾ抵抗係数 π と応力 T の積で表現される。また, ピエゾ抵抗効果デバイスは, その応力に比例して変化する異方的な導電率を, 外部からの電流印加により, 出力電極端の電位差の変化として検出する。あるいは外部からの電圧印加により, 電流の変化として検出する。従って, ピエゾ抵抗効果を用いた素子のシミュレーションを行うには, 基本的に素子の応力場解析と電場解析がまず必要である。さらには, 解析で最も重要な点である, 応力誘導による異方的な導電率の変化を計算する部分が必要とされる。

Fig. 1にピエゾ抵抗効果解析システムPREAPS (Piezoresistive Effect Analysis Program System)の構成図を示す。従来の解析では, 素子に力, 圧力を加えた場合の応力場解析の部分と, 電流を印加した電場解析の部分それぞれ独立した形で行われていた。しかしピエゾ抵抗効果解析プログラムPREAP (Piezoresistive Effect Analysis Program)を作成したことにより, この部分でこれら両解析を機能的に結合するため, 高精度な解析が可能となった。実際の解析には, 汎用の有限要素法解析プログラムMSC/NASTRANを用いた。

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} = \rho \cdot \begin{pmatrix} 1 + \pi_{11}T_1 + \pi_{12}T_2 + \pi_{12}T_3 & \pi_{44}T_6 & \pi_{44}T_5 \\ \pi_{44}T_6 & 1 + \pi_{12}T_1 + \pi_{11}T_2 + \pi_{12}T_3 & \pi_{44}T_4 \\ \pi_{44}T_5 & \pi_{44}T_4 & 1 + \pi_{12}T_1 + \pi_{12}T_2 + \pi_{11}T_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} \cdots \cdots (4)$$

NASTRANには、シリコン等の単結晶のコンプライアンスの異方性を考慮した3次元の応力場解析（構造解析）機能と、材料定数の3次元異方性を持つ素材の熱解析を具備している。一般的な熱伝導方程式を式(5)に示す。また、一般的な電気伝導の基本式を式(6)に示す。式(5)において右辺と発熱率 Q を0とし、温度 T を電位 V におきかえれば、式(6)と等価になるため、有限要素法解析の電場解析プログラムに読み変えて使用することができる。

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{5}$$

T ; 温度
 k ; 熱伝導率
 Q ; 発熱率
 ρ ; 密度
 c ; 比熱

$$\nabla \cdot (k \nabla V) = 0 \tag{6}$$

V ; 電位
 k ; 導電率

また、プリ・ポスト処理用プログラムとして汎用のソフトウェア (PATRAN) を用いた。

解析の流れについて説明する。まずプリ処理により素子の解析モデルを作成する。そのモデルを基にデバイスの動作時の応力解析を行う。例えば燃焼圧センサの力検知素子の場合には半球の頂部に力を印加する荷重条件での解析となり、ダイヤフラム型圧力センサの場合にはダイヤフラム全体に圧力を、また加速度センサの場合には相当する重力を印加した条件での解析となる。この解析過程において、シリコンの弾性定数の3次元異方性を考慮する。この結果から素子全体に生

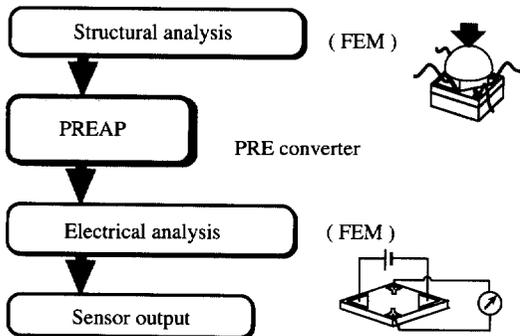
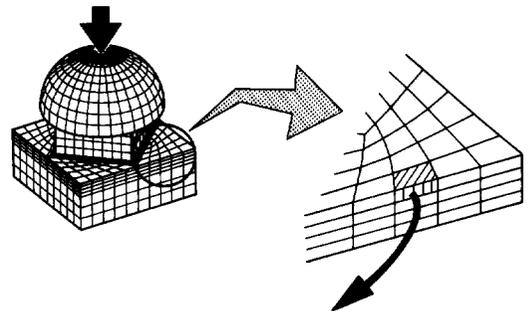


Fig. 1 Piezoresistive analysis flow of PREAPS.

じる応力値が得られる。この結果をPREAPに移行するため、素子中からピエゾ抵抗効果を担うシリコン部分のみのFEM解析モデルとその応力データを抽出する。

この後PREAPにより、シリコン中の異方性を持つ3次元導電率を、式(2)を用いて各要素ごとに計算する。ピエゾ抵抗係数 π の値は、J. C. Sanchez²⁰⁾ が測定した各結晶方向の感度と比抵抗の関係から、実際にセンサに使用するシリコンの比抵抗に応じた π の値を計算して求める。導電率の計算に際して重要な点は、シリコン内部で応力が大きく分布する素子の場合、その影響を無視できないという点である。特に燃焼圧センサの力検知素子のように、広い領域にわたり応力分布が生じ、ピエゾ抵抗効果による導電率の分布が大きいものの正確なシミュレーションを行うには、この応力分布を考慮する必要がある。

したがってFig. 2に示すように、導電率を有限要素ごとに計算して、その結果を解析モデルの各要素に組み込み、電場解析に移行することにより、シリコン中でのピエゾ抵抗効果の分布を考慮した高精度な解析が可能となる。また応力解析と電場解析の間では、応力、電流の集中領域がそれぞれ異なる等の理由から、両者の要素分割が異なる場合が多い。このような場合にも対応できるように、PREAPにおける導電率の計算組み込み過程において、応力解析用要素分割モデルと電場解析用要素分割モデル間での応力、変位、導電率等のデータの変換組み込み演算も同時に行えるようにした。



$$E_i = \rho_0 \left(\sum_{j=1}^3 \delta_{ij} J_j + \sum_{j,k,l=1}^3 \pi_{ijkl} T_{kl} J_j + \dots \right)$$

Calculation at every finite element

Fig. 2 Calculation of resistivity at every finite element.

最後に、PREAPにおいて各有限要素ごとに計算された3次元導電率を基に、シリコンでの電場解析を行う。各有限要素ごとに、応力分布に基づく導電率を配し、素子の入力電極間に定電流あるいは定電圧を印加した条件下で、電位及び電流の分布を求める。そして素子の出力を両出力電極間の電位差として求める。なお、ピエゾ抵抗効果は通常1~2%の非直線性を有するが、このシステムにおける計算ではこの効果の導入は省略している。

2.4 システムの特徴

ピエゾ抵抗効果解析システムPREAPSの特徴は、ピエゾ抵抗効果デバイスの解析、設計という観点から考えて、以下の5点が挙げられる。

1. 有限要素法の応力場解析と電場解析の結合によるピエゾ抵抗効果の導入
2. 導電率テンソルの有限要素毎演算（応力分布の考慮）
3. 電極配置、力印加形態等、任意形状のデバイスの解析が可能
4. 任意の結晶方位デバイスに対応
5. 基本定数を与えることにより、p, nタイプ、及び各不純物濃度デバイスの解析が可能

これまでのピエゾ抵抗効果デバイスの設計、解析には、FEMを用いた応力解析結果から、シリコン上に形成したゲージ付近の平均応力値あるいはいくつかの代表値を用いて、簡易式により出力を予測するのが通常であった。PREAPSは、応力とそれに基づくピエゾ抵抗効果による導電率変化量の分布を考慮した解析が可能であるため、燃焼圧センサの力検知素子のように広範囲にゲージを形成した構造の素子に関しても、高精度に素子出力の解析が可能である。

以下にシステムの解析の流れに沿って、代表的例として燃焼圧センサの力検知素子の解析結果を示す。

2.4.1 応力解析

Fig. 3に燃焼圧センサの力検知素子部を示す。ピエゾ抵抗効果を担うp型シリコン(110)面の両面に結晶化ガラス製のブロックを陽極接合技術により接合し、その上部には鋼製の半球がつけられている。電極は(110)面の上面に形成され、入力電極は<110>方向から<001>方向に45°回転した方向に一对、そして出力電極はそれから90°回転した方向に一对形成されており、シリコン全体を電流が流れる構造である。

Fig. 4は、力検知素子の応力分布から得られた、<110>方向の応力 $T_{<110>}$ の分布である。素子の縦断面の応力分布を示している。解析条件として、素子の最下面を全方向拘束し、素子の半球頂部近傍の一定面積の領域に圧力を印加した。解析に際しては単結晶シリコンの弾性定数の異方性を考慮し、6面体要素を用いた3次元解析を行っている。解析条件として、シリコンの弾性定数は以下の式(7)の値を用いた^{2,1)}。

$$c = \begin{pmatrix} 1.657 & 0.639 & 0.639 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.639 & 1.657 & 0.639 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.639 & 0.639 & 1.657 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.796 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.796 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.796 \end{pmatrix} \times 10^{12} \text{ (dyne/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

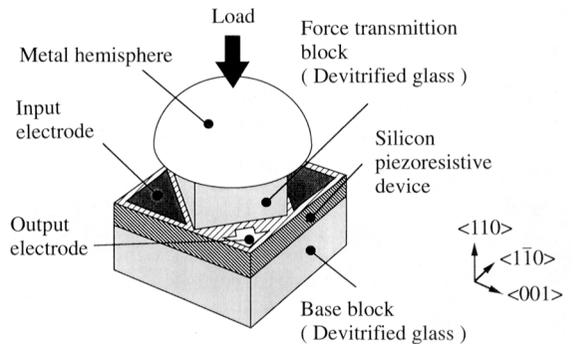


Fig. 3 Force detecting element of combustion pressure sensor.

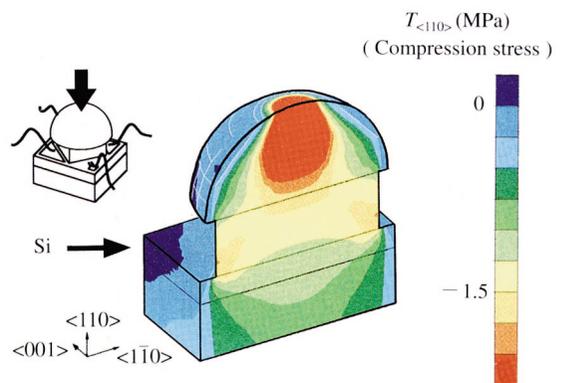


Fig. 4 Stress distribution in force detecting element (half model).

解析結果をみると、力が加えられた半球の頂部に応力が集中しているが、その応力は半球内で分散、平均化され、結晶化ガラス性の力伝達ブロックを通して単結晶シリコンの(110)面に伝達されていることがわかる。この半球と力伝達ブロックの効果により、エンジン気筒内の燃焼圧力により生じた力は、ほぼ均一化された形で、シリコン中の、力伝達ブロックとシリコンが接する面（受圧面と呼ぶ）に伝達されていることがわかる。受圧面内部及びその厚さ方向には大きな応力が発生しているが、その一方、受圧面の外部では応力値は零に近い値である。また受圧面内部に注目してみると、その端部に若干の応力集中が発生し応力値が大きくなっている。

2.4.2 PREAPによる導電率計算

この結果を基に、PREAPにより各有限要素ごとに導電率成分を計算する。燃焼圧センサの力検出に用いた方式は、 π_{63} 型と言われる、電流、電圧、力直交型検出である。これは、単結晶シリコンの(110)面内で考えると、等価的にはホイートストンブリッジ構成と考えることができる。この場合、(110)面への圧縮応力印加に伴い、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向の導電率は減少するが、それに対して $\langle 001 \rangle$ 方向の導電率はほとんど変化しない。そこで、ブリッジの出力を示す以下の式(8)をもとに、各要素ごとにピエゾ抵抗効果による導電率変化量、すなわちピエゾ抵抗効果の寄与度を表現した。

$$V_{\text{output}} = \Delta R / (2R + \Delta R) \cdot V_{\text{supply}} \quad (8)$$

この式の抵抗比の部分から、本検出方式を用いた場合のピエゾ抵抗効果の寄与度の分布を表示したものがFig. 5である。受圧面内部領域は赤色で示されており、

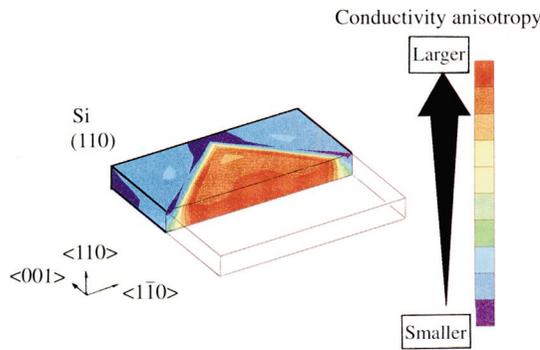


Fig. 5 Magnitude of conductivity anisotropy (half model).

ピエゾ抵抗効果の寄与が大きく、逆に外部領域は青色で示されており寄与が小さい。この結果から、本力検知素子はシリコン単結晶全体に駆動電流を流すタイプの素子であるが、受圧面内部の領域のピエゾ抵抗効果の寄与が大きく出力に影響する素子であることが明らかである。また、さらに詳細に効果の分布に関して見ると、受圧面の内部領域においても、寄与度の分布が見られる。特に受圧面の端部において寄与度が大きく、中心部に向かうにつれ小さくなる。この分布はFig. 3に示した応力 $T_{\langle 110 \rangle}$ 分布と類似するが、詳細を見ると若干異なる。その理由は、本力検知素子は基本的にシリコン単結晶(110)面に垂直な圧縮応力成分 $T_{\langle 110 \rangle}$ を検出する目的で作られた π_{63} 型検出素子であるが、力印加にともない、例えば $T_{\langle 1\bar{1}0 \rangle}$ や $T_{\langle 001 \rangle}$ 等の、面に平行な圧縮応力成分も発生するため、この影響による π_{61} 、 π_{62} 、そしてせん断 π_{66} 型検出出力の重畳により分布形態に差異が生じるのである。このように、PREAPSを用いて従来不可能であった3次元的なピエゾ抵抗効果を統合的に解析することができる。

2.4.3 電場解析

この項では、シリコン中での電流分布、電位分布に関して述べる。

Fig. 6は、素子に力が印加された場合のシリコン中での電流分布である。入力電極の左側が高電位側であ

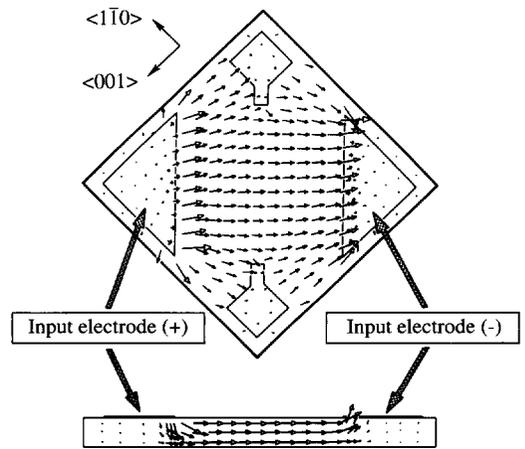


Fig. 6 Three dimensional distribution of electric current flow in silicon chip.

る。受圧面内部での電流ベクトルは、Fig. 5で示したようにピエゾ抵抗効果の寄与が大きいため、両入力電極を直線で結んだ方向からやや傾いている。入力電極の高電位側から零電位側に向かって素子全体に電流が流れていることがわかる。しかし、電流の大きさに注目してこの分布を見ると、ピエゾ抵抗効果の大きな、素子の受圧面内に特に電流が流れている。このように、電極配置により電流分布を変化させて効率向上を行っていることがわかる。

Fig. 7は、素子の電位分布を示したものである。上側は素子に力が印加される前の電位分布である。印加電圧は5Vである。その半分にあたる2.5Vの等電位線は両出力電極の上部を通り、両出力電極電位は等電位であるために、無荷重時の素子出力電位差は0Vとなっている。これは燃焼圧センサの力検出方式（ π_{63} 型）の特徴である。これに対し、下側に示した素子に力が印加されたときの等電位線分布を見ると、等電位線が傾き、両出力電極間には2.5V電位を挟んで電位差、すなわち素子出力が生じる。この素子の場合、素子出力の解析値が1V入力換算で0.13mV/Nであり、この値は実験値の97%に相当する。

このように、PREAPSを用いると、燃焼圧センサのように3次元構造を持つピエゾ抵抗効果デバイスについて解析が可能である。PREAPSの解析性能としては、

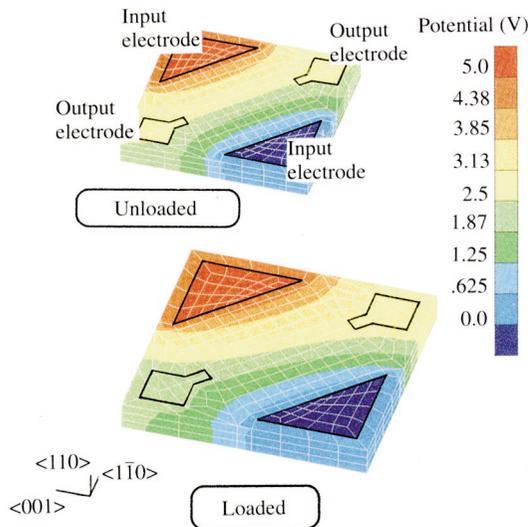


Fig. 7 Three dimensional equipotential surface plot.

計算で求められた値が実験値の85～97%であり、かなり良い結果と考えられる。

3. 力検知部の解析

3.1 出力の素子形状依存性

前述のように、FEM解析をベースとしたピエゾ抵抗効果解析システムPREAPSを用いることにより、力伝達、及び台座ブロックの形状等の素子構造、電極配置、電極形状などの要因と素子出力との相関が解析的に求められ、ピエゾ抵抗効果デバイスの設計指針が得られる。ここでは、その一例として、燃焼圧センサの力検知素子の素子形状に対する出力変化についての解析例を示す。

Fig. 8は解析結果の一例であり、素子構造と素子感度の関係である。横軸は素子の台座ブロックの水平断面を正方形とした場合の一辺の長さ、縦軸は素子の感度である。実験値とPREAPSによる計算値の両方を示してある。また、この図の場合、力伝達ブロックが、図中に示した車載品と比較して45°回転した試料を用いているが、これに基づく構造的要因による素子の感度差はほとんどないことを確認してある。

素子形状を変化させた場合、シリコン中での、(110)面に垂直な応力 $T_{\langle 110 \rangle}$ の分布が大きく変化すると共に、他の応力成分、すなわちシリコン面に平行な主応力やせん断応力成分値が大きく変化し、素子出力に影響することが考えられる。まず、変化の傾向から見

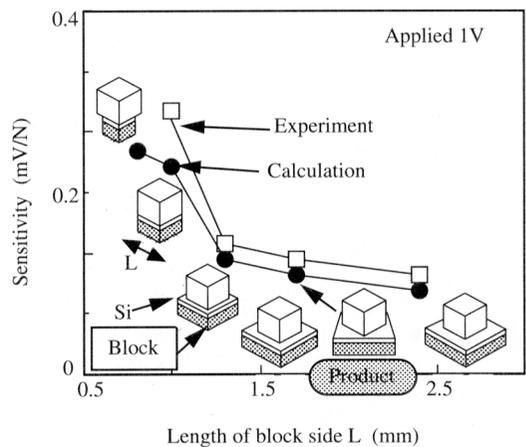


Fig. 8 Element sensitivity versus base block size.

ると、実験値と計算値は良く一致している。台座の寸法が小さくなるに従い素子出力は増加し、台座の一边が1.0mm 長の場合に最大値を示す。この原因として、先程述べた項目を含め、3つ挙げられる。

1. シリコン受圧面内での応力分布が小さくなり、平均化される
2. 面に平行な応力値が負から正に転じるため、その正出力が重畳する
3. 無効電流成分が減少する

これらの項目はすべて、PREAPSの解析の流れの中で確認できたものである。

車載化した素子のブロック寸法は、一边の長さ1.7mmであり、解析の中では比較的小さな素子出力（感度）をとる寸法を用いている。この素子は、出力を若干押さえても生産性を重視し、電極形成、及び電極へのワイヤボンディングの容易さ、そして寸法誤差に基づく感度ばらつきを低減させる安定な形状となっている。

3. 2 出力の電極配置依存性

前項では素子の台座ブロック寸法の変化に基づく出力変化について紹介した。ここでは、電極配置及び寸法の変化に起因する素子出力変化について述べる。燃焼圧センサの力検知素子は、前述のように単結晶シリコン全体をピエゾ抵抗ゲージとして用いるため、シリコン全体に電流が流れる。入出力電極配置及び寸法が異なれば、シリコン中での電流分布も異なる。その影響について解析した。

Fig. 9は、素子感度の入力電極長さ l_{in} 依存である。出力電極を $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ で一定とし、入力電極は幅

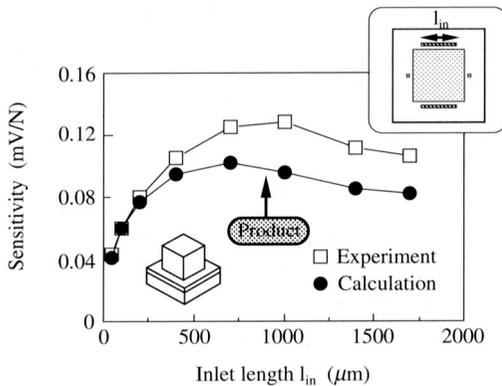


Fig. 9 Sensitivity versus inlet length.

$50\mu\text{m}$ 一定で、その長さ l_{in} を変化させた。 l_{in} が最小の時に素子感度も最小となり、 $l_{in} = 900\mu\text{m}$ 付近で極大値を取る。この理由は、この長さの時に、一边 $1000\mu\text{m}$ の正方形である受圧面内全域に電流を高効率に流せるためと考えられる。車載化した素子の入力電極は $l_{in} = 900\mu\text{m}$ であり、最も効率の高い長さに設定してある。

Fig. 10は、素子感度の出力電極長さ l_{out} 依存である。入力電極を $50\mu\text{m} \times 900\mu\text{m}$ で一定とし、出力電極は幅 $50\mu\text{m}$ 一定で、その長さ l_{out} を変化させた。 l_{out} が最小に近い領域の長さの時に素子感度は最大値を取り、 l_{out} が長くなるにつれ素子感度が減少する。この理由は、 l_{out} が長くなるにつれ、出力電極がピエゾ抵抗効果により傾いた等電位線を広範囲にまたぐため、生じた電位差の効果を平均化、低減する形で電位検出するためと考えられる。車載化した素子の出力電極は $l_{out} = 50\mu\text{m}$ であり、最も効率の高い長さに設定してある。

この他にも、力が半球へ当たる角度の垂直方向からのずれ、力伝達ブロックの接合位置の移動、シリコン及び台座ブロックの形状変化の影響などの解析も行った。これらの解析は、素子開発段階で有効なデータを与えた。

4. 応用

これまで、PREAPSの利用例として燃焼圧センサの力検知素子の解析例を挙げてきた。

PREAPSはピエゾ抵抗効果デバイスの素子形状や結晶方向の変化に対応し、かつそれを3次元的にも考慮

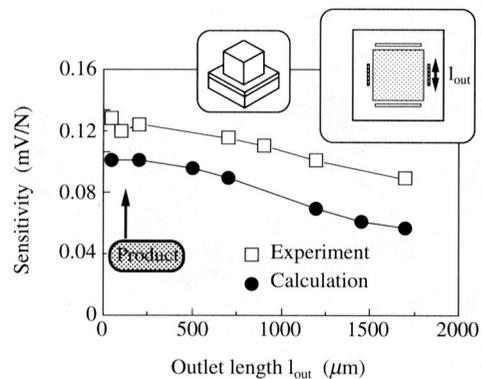


Fig. 10 Sensitivity versus outlet length.

できる汎用性の高さを有する。したがって、応力分布、電流分布を考慮にいれ、かつ新規な検出方式を取り入れ、効果的に重畳させた素子の考案とその検証が容易となった。燃焼圧センサ関連以外では、シリコンの最表面にゲージを形成した力変換素子、シリコンのカンチレバービームを用いた加速度センサの解析も確認している。また新検出方式のロードセル、力変換素子の考案にも有効である。この他にも、ゲージ部分にゲージ率の高い等方性金属膜をパターニングした圧力センサの解析にも展開が可能である。また、シリコンの薄膜、微小デバイスになると、応力の発生とその分布によるピエゾ抵抗効果がデバイスに与える影響が無視できなくなるが、この解析にも展開可能であると考えられる。

第1章で述べたように、ピエゾ抵抗効果を用いたデバイスはこれまで数多く開発、研究がされており、今後も、スタティックな力、圧力センサ、またダイナミックな振動型のセンサの歪検出等に数多く利用される可能性が高い。PREAPSは、半導体のプロセス技術を用いて形成したこれらの各種センサの設計、開発に適用できる有効なシステムである。

5. まとめ

有限要素法解析をベースとしたピエゾ抵抗効果解析システムPREAPSを作成した。これは、デバイスの解析、設計の観点から見て以下の5つの特徴を有する。

1. 有限要素法の応力場解析と電場解析の結合によるピエゾ抵抗効果の導入
2. 導電率テンソルの有限要素法演算（応力分布の考慮）
3. 電極配置、力印加形態等、任意形状のデバイスの解析が可能
4. 任意の結晶方位デバイスに対応
5. 基本定数を与えることにより、 p 、 n タイプ、及び各不純物濃度デバイスの解析が可能

これにより、ピエゾ抵抗効果デバイスの動作および出力の高精度解析が可能となった。

また、燃焼圧センサの力検知素子の出力解析を行い、以下の最適化を行った。

1. 最大電流効率を持つ電極寸法と配置を採用
2. 生産性と安定性を兼ね備えた素子寸法

謝辞

本研究の進行にあたり協力頂いた、トヨタ自動車第2電子技術部、電子生技部、第4電子技術部の関連部署の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 五十嵐伊勢美：“半導体ひずみ計とその応用”，豊田研究報告，(1970)，34
- 2) 島岡敬一，塚田厚志，五十嵐伊勢美：“超小型ひずみゲージの開発”，非破壊検査協会秋季大会講演集，(1981)，456～457
- 3) Yagi, Y., et al. : "Thermal Stress Measurement During Die Bonding of Silicon Chips with High Temperature Diffused-Type Strain gauges", Proc. Jt. ASME/JSME Adv. in Electr. Packaging, (1992), 925～929
- 4) Sugiyama, S., et al. : "Tactile Image Detection Using a 1k-element Silicon Pressure Sensor Array", Sens. and Actuators, A22-1/3(1990), 397～400
- 5) Shimaoka, K., Tabata, O. and Sugiyama, S. : "Micro Pressure Sensor", Tech. Dig. 9th Sens. Symp., (1990), 47～50
- 6) Takeuchi, M., et al. : "A Combustion Pressure Sensor Utilizing Silicon Piezoresistive Effect", SAE Tech. Pap. Ser., No. 930351, (1993), 8p.
- 7) Sugitani, N., et al. : "Combustion Pressure Sensor for Toyota Lean Burn Engine Control", SAE Tech. Pap. Ser., No. 930882, (1993), 8p.
- 8) Yasukawa, A., et al. : "Design Consideration for Silicon Circular Pressure Sensors", Jpn. J. Appl. Phys., 21-7 (1982), 1049～1052
- 9) Kanda, Y. : "Optimum Design Considerations for Silicon Pressure Sensors Using a Four-Terminal Gauge", Sens. and Actuators, 4(1983), 199～206
- 10) Saigusa, T., et al. : "Silicon Pressure Sensor - Output Voltage Simulation of a Sensing Element", Tech. Dig. 7th Sens. Symp., (1988), 189～192
- 11) Maison, W. P. and Thurston, R. N. : "Use of Piezoresistive Materials in the Measurement of Displacement, Force, and Torque", J. Acoust. Soc. Am., 29(1957), 1096
- 12) Yamada, K., et al. : "Nonlinearity of the Piezoresistance Effect of p-Type Silicon Layers", IEEE Trans. Electron Devices, ED-29-1(1982), 71～77
- 13) Suzuki, K., et al. : "Origin of the Linear and Nonlinear Piezoresistance Effect in p-Type Silicon", Jpn. J. Appl. Phys., 23-11(1984), L871～L874
- 14) Matsuda, K., et al. : "Nonlinearity of Piezoresistance Effect in p- and n- Type Silicon", Sens. and Actuators ", A21-1/3 (1990), 45～48
- 15) Smith, C. S. : Phys. Rev., 94(1954), 42～49
- 16) 中田高義，高橋則雄：電気工学の有限要素法（第2版），

- (1986), 282p., 森北出版
- 17) 矢川元基 : 流れと熱伝導の有限要素法入門 (初版), (1983), 342p., 培風館
- 18) 大立泰治, 稲熊幸雄 : "電磁アクチュエータ設計のための磁界解析", 豊田中央研究所R&Dレビュー, 25-3 (1990), 1 ~ 19
- 19) 松岡孝明 : "熱可塑性プラスチックの射出成型プロセス解析", 豊田中央研究所R&Dレビュー, 26-3(1991), 37 ~ 50
- 20) Sanchez, J. C. and Wright, W. V. : ISA, (1961), 37-SL-61
- 21) Wortman, J. J. and Evans, R. A. : "Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium", J. Appl. Phys., 36-1(1965), 153 ~ 156

著者紹介



森川健志 Takeshi Morikawa
 生年：1964年。
 所属：物理センサ研究室。
 分野：センサデバイスの研究・開発。
 学会等：日本応用磁気学会会員。
 1993年R&D100受賞。



野々村裕 Yutaka Nonomura
 生年：1954年。
 所属：物理センサ研究室。
 分野：自動車用センサデバイスに関する研究開発。
 学会等：IEEE，応用物理学会，日本応用磁気学会会員。
 1993年R&D100受賞。
 工学博士。