

半導体圧力センサの高精度化に関する研究

昭和60年5月

西原元久

半導体圧力センサの高精度化に関する研究

昭和60年5月

西原元久

DOC
1985
16
電気系

目 次

第1章 緒 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 半導体圧力センサの概要	2
1.3 半導体圧力センサの高精度化に関する問題点と課題	7
1.3.1 半導体圧力センサ研究開発の歴史的展望	7
1.3.2 半導体圧力センサの問題点と課題	9
1.4 本論文の概要	12
第2章 拡散 p 形半導体ゲージ抵抗のピエゾ抵抗特性	14
2.1 はじめに	14
2.2 ピエゾ抵抗特性の従来の表式	15
2.3 ピエゾ抵抗効果の非線形特性に関する実験的考察	17
2.3.1 実験方法	17
2.3.2 実験結果	20
2.3.3 実験結果の考察	26
2.4 非線形性を考慮したピエゾ抵抗特性式	27
2.5 まとめ	29
第3章 半導体圧力センサの非線形特性の解析	31
3.1 はじめに	31
3.2 弾性係数に結晶軸異方性を持つ Si ダイアフラムの変形に関する実験的考察	33
3.3 非線形性を考慮した Si ダイアフラムの応力解析	37
3.4 半導体圧力センサの特性解析シミュレータ	41
3.5 半導体圧力センサの非線形特性	43
3.5.1 理論的解析	43
3.5.2 実験による検証	51
3.6 まとめ	57

第4章 半導体圧力センサのゲージパタンの設計	59
4.1 はじめに	59
4.2 Si面方位とゲージパタンの一般的考察	60
4.3 特性解析の前提条件	64
4.4 ゲージパタンの最適設計	67
4.4.1 室温(基準温度)条件下での特性解析	67
4.4.2 非直線誤差の温度依存性	69
4.4.3 最適ゲージパタンの決定	72
4.5 試作と検証	75
4.6 まとめ	76
第5章 高精度半導体圧力センサの試作	80
5.1 はじめに	80
5.2 半導体圧力センサの詳細設計	81
5.2.1 Siダイアフラムの詳細設計	81
5.2.2 温度補償方式の設計	84
5.3 半導体圧力センサの製造	92
5.4 半導体圧力センサの特性	97
5.4.1 入出力特性	98
5.4.2 温度影響	98
5.5 まとめ	103
第6章 半導体圧力センサの応用	104
6.1 はじめに	104
6.2 圧力伝送器	105
6.2.1 構造と仕様	105
6.2.2 増幅回路	109
6.2.3 圧力伝送器の特性	111
6.3 自動車エンジン制御用センサ	114
6.3.1 構造と仕様	114

6.3.2	Siダイアフラムと周辺回路	114
6.3.3	自動車用圧力センサの特性	120
6.4	まとめ	123
第7章 結 論		124
謝 辞		127
参考文献		128

第 1 章 緒 論

第1章 緒 論

1.1 はじめに

近年、産業のあらゆる分野にエレクトロニクス化が浸透し、これに伴って情報を検出するセンサの役割がとりわけ重要となってきた。数多いセンサの内でも、圧力センサは応用の広い基本的なセンサの1つとして重視され、古くから数多くの研究がすすめられてきた。

圧力センサの研究開発の歴史を概観すると、1950年代までは、ブルドン管、ベローズ、ダイヤフラム等の金属弾性体を用いた機械式圧力計測が中心であったが、1960年代には大規模な石油、化学プラントを始めとするプロセス技術の発展を背景に、メタルストレンゲージや静電容量方式の電子式圧力センサが擡頭して工業計器を中心に発展してきた。さらに1970年代には、半導体集積回路技術の発展を背景として、シリコン(Silicon；以下Siと略記)のピエゾ抵抗効果を利用した拡散形Siダイヤフラム方式の半導体圧力センサが開発され、'70年代後半から'80年代にかけて、圧力、差圧伝送器などの工業計器への実用化が始まり、さらに自動車エンジンの電子制御システムや医用機器の分野へその応用が拡大されてきた。

半導体圧力センサの応用が拡大されてきた理由は、小形、高感度でヒステリシス特性が無く再現性が良いという、圧力センサにとって極めて長所となる特長、利点を持つためである。しかしながら半導体圧力センサは、Siのピエゾ抵抗効果という物性を利用する関係上、その非線形特性や温度影響を受けやすいという欠点があるために、高精度を必要とする分野では、他方式のセンサに比較して優位性がなかった。たとえばプロセス制御分野に用いられる工業用圧力伝送器を例にとれば、'60年代から'70年代前半においては1%~0.5%級の計測精度しか必要でなかったが、'70年代後半から0.2%級の精度が要求されるようになり、また最近では、必要に応じて0.1%級の高精度が必要とされる場合も生じてきた。また測定レンジも1kPaフルスケールの低圧から50MPaフルスケールの高圧まで広い圧力レンジが必要であり、使用環境も-40℃~120℃の広い温度範囲が要求される。したがってこのような分野に適用できるようにするためには、半導体圧力センサの高精度化の研究が極めて重要になってきた。

半導体圧力センサの高精度化をはかるためには、Siのピエゾ抵抗特性の本質的な非線形特性と温度依存性を詳細に把握すると共に、半導体圧力センサの心臓部となるSiダイヤフラムの非線形性を考慮した総合的な特性解析手法を確立することが必要である。そし

てこの手法を活用して、Siダイアフラムの設計技術を確立し、最適なゲージパタンの設計を行ない、特性の優れた新しいSiダイアフラムゲージパターンを探求することが必要である。

本論文は、このような半導体圧力センサの高精度化に関するいくつかの問題点を検討し、その解決策を示したものである。

1.2 半導体圧力センサの概要^{2)~4)}

Si結晶に応力を加えると、ピエゾ抵抗効果によってSiの比抵抗が変化するという基礎的な研究が、1954年にC.S.Smith¹⁾によって発表されて以来、この現象をセンサに利用する試みが数多くなされてきた。半導体圧力センサはこの原理によって圧力を計測するものであり、本節でこの概要を説明する。

半導体圧力センサの基本構造を図1.1で説明する。圧力を検出するエレメントは、図示のようにSi結晶(一般にn形)の中央部分を薄く加工して圧力によりたわみを生じるダイアフラムを形成して、その表面に4個のゲージ抵抗体(一般にp形)を拡散したものである。これをSiダイアフラムという。4個のゲージ抵抗のうち、 R_{R1} 、 R_{R2} はダイアフラムの半径方向に沿って配置し、これを半径ゲージ抵抗(Radial Gauge Resistor)という。また R_{T1} 、 R_{T2} はダイアフラムの接線方向に沿って配置し、これを接線ゲージ抵抗(Tangential Gauge Resistor)という。夫々のゲージ抵抗体は、p-nジャンクションにより電氣的にアイソレーションされている。Siダイアフラムは、Siの熱膨張係数($\alpha \approx 3.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)に等しい材質から成る支持体、例えばS基板やホーケイ酸ガラス($\alpha \approx 3.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)基板に接合され、保持される。

次にこの動作原理を説明する。

Siダイアフラムに圧力が加えられると、Siダイアフラムは上下の圧力差に応じてたわみを生じ、その表面には近似的に図1.2のような応力が発生する。すなわちダイアフラム中心から半径 r の点に発生する応力は、ダイアフラム半径方向に σ_r 、接線方向に σ_θ の2成分の応力から成る。ダイアフラムの変形が微小範囲、すなわち圧力に対しその変形がリニアと見なされる範囲では、周辺固定の円盤の変形理論により、 σ_r と σ_θ はダイアフラム中心から端部に沿って図示のような分布をする。ここに a はSiダイアフラムのアクティブエリアの半径、 r は中心からの距離、 h はダイアフラム板厚、 ν はポアソン比、 P は印加された圧力である。図は、Siダイアフラム上面から圧力が加えられた場合の応力分布を示し

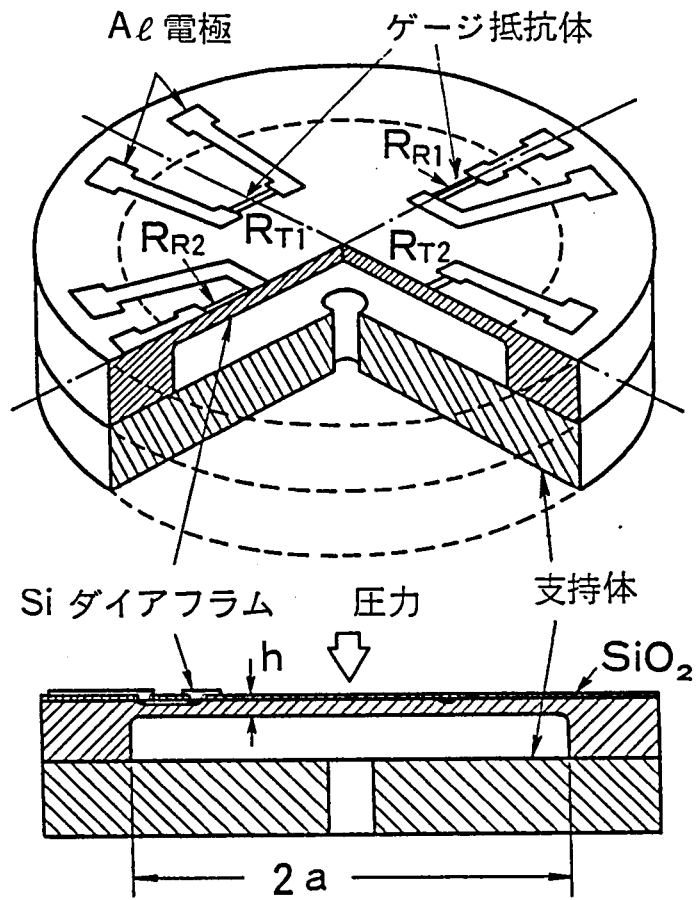


図1.1 Si ダイアフラムの原理構造

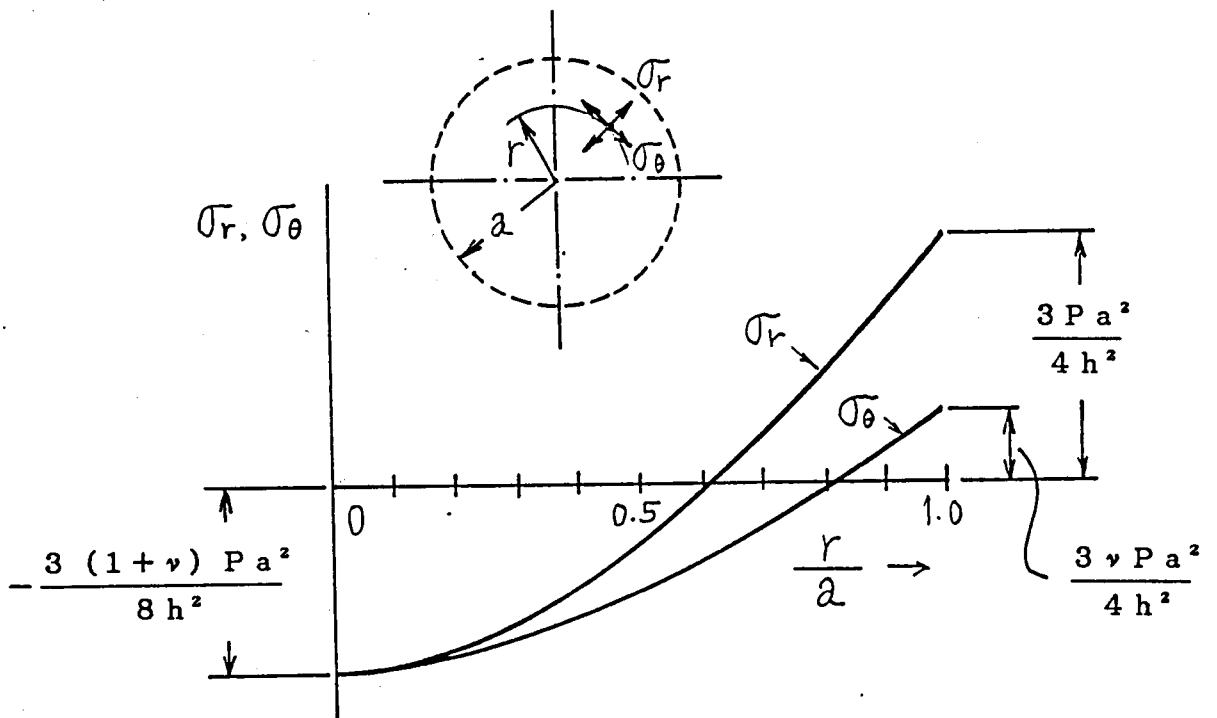


図1.2 Si ダイアフラム上に発生する応力の概要

ているが、ダイアフラム中心付近では σ_r, σ_θ とも負の応力すなわち圧縮応力、ダイアフラム端部付近では σ_r, σ_θ とも正の応力すなわち引張り応力となる。

図 1.1 のようにゲージ抵抗体を配置した Si ダイアフラムの場合には、夫々のゲージ抵抗は σ_r, σ_θ の 2 軸応力を受け、その抵抗体はピエゾ抵抗効果によって近似的に次式のように変化する。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{半径ゲージ抵抗} &: \Delta R_R / R_R \approx \pi_\ell \sigma_r + \pi_t \sigma_\theta \\
 \text{接線ゲージ抵抗} &: \Delta R_T / R_T \approx \pi_\ell \sigma_\theta + \pi_t \sigma_r \\
 \text{ここに } R_R, R_T &: \text{ 応力零時の半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗の抵抗値} \\
 \Delta R_R, \Delta R_T &: \text{ 応力による半径ゲージと接線ゲージの抵抗変化量} \\
 \pi_\ell &: \text{ 縦ピエゾ抵抗係数 (} \ell: \text{ longitudinal), } \pi_\ell > 0 \\
 \pi_t &: \text{ 横ピエゾ抵抗係数 (} t: \text{ transverse), } \pi_t < 0
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.1)$$

ピエゾ抵抗係数は応力に対する抵抗変化の感度を示すもので Si の結晶軸により異なることが知られており、Y.Kanda らによってその大きさの結晶軸異方性が計算されている。⁵⁾ たとえば、半導体圧力センサで良く使用される {100} 面あるいは {110} 面の p 形シリコンのピエゾ抵抗係数の大きさの相対値は図 1.3 のように示される。圧力センサでは、圧力に対する抵抗変化の感度が高いことが望まれるために、ゲージ抵抗体の配置はピエゾ抵抗係数の大きい結晶軸が選ばれる。すなわち {100} 面 Si の場合には、 $\langle 110 \rangle$ 軸に沿ったゲージ抵抗配置が採用され、{110} 面 Si の場合には、 $\langle 111 \rangle$ 軸あるいは $\langle 110 \rangle$ 軸に沿ったゲージ配置が採用されている。

図において、 π_ℓ は正の値、 π_t は負の値であり、また図 1.2 において、 σ_r, σ_θ はダイアフラム中心からの距離 r により正あるいは負の値をとる。したがって半径ゲージ抵抗 R_R と接線ゲージ抵抗 R_T の位置を Si ダイアフラムの上で適切に選べば、圧力に対する R_R と R_T の抵抗値変化を正と負と互いに逆符号にできる。したがって、ゲージ抵抗体 R_R と R_T を図 1.4 に示すようなブリッジ回路に結線することによって、圧力をブリッジ回路の電圧出力 V として検出できる。

半導体圧力センサの製造プロセスの概略を図 1.5 により述べる。両面ミラー仕上げの n 形シリコンウェハ上に p 形のゲージ抵抗を拡散形成する。ゲージ抵抗体は、半導体集積回路製造の場合と同様にリソグラフィ技術によってゲージパタンがシリコン上に形成され、

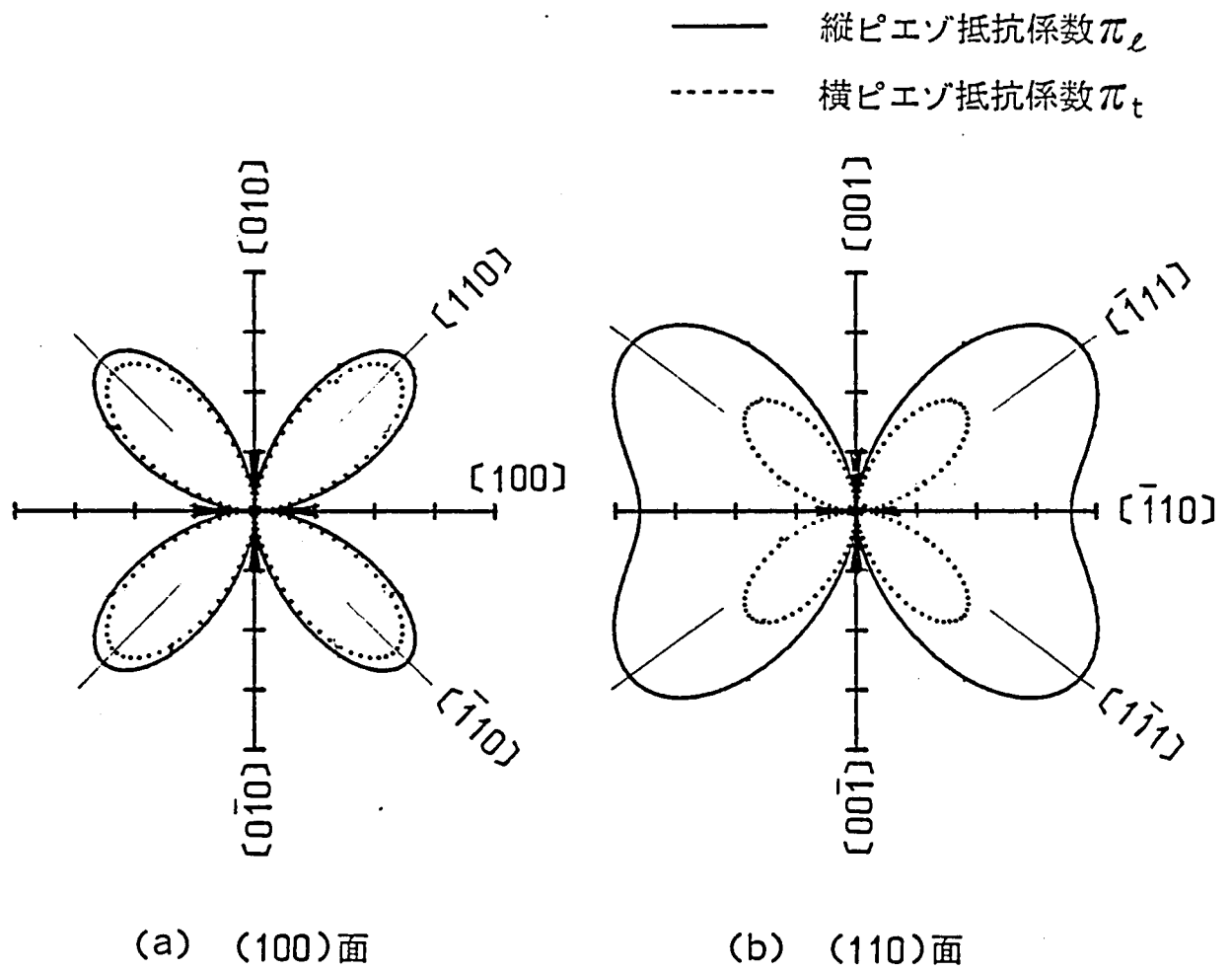


図 1.3 p形Siのピエゾ抵抗係数の結晶軸異方性

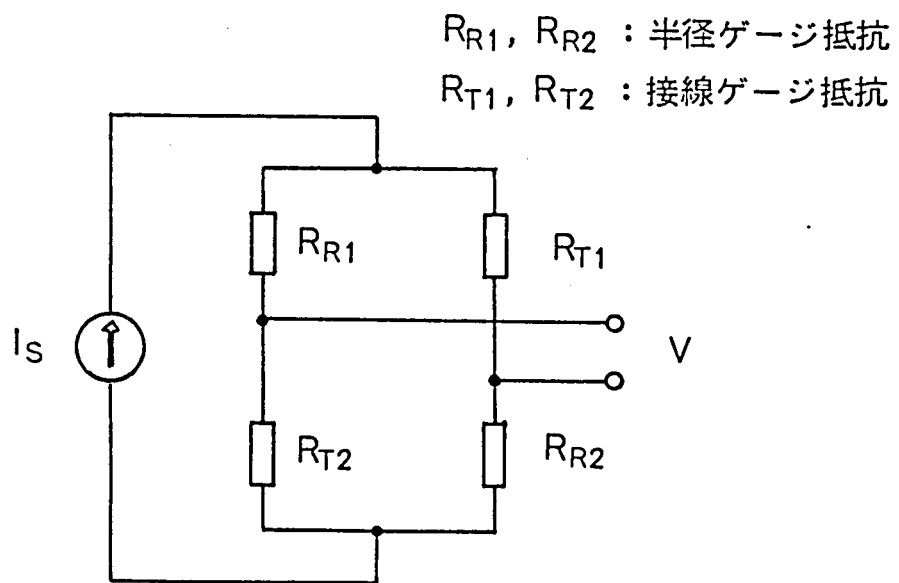


図 1.4 半導体ゲージ抵抗ブリッジ回路

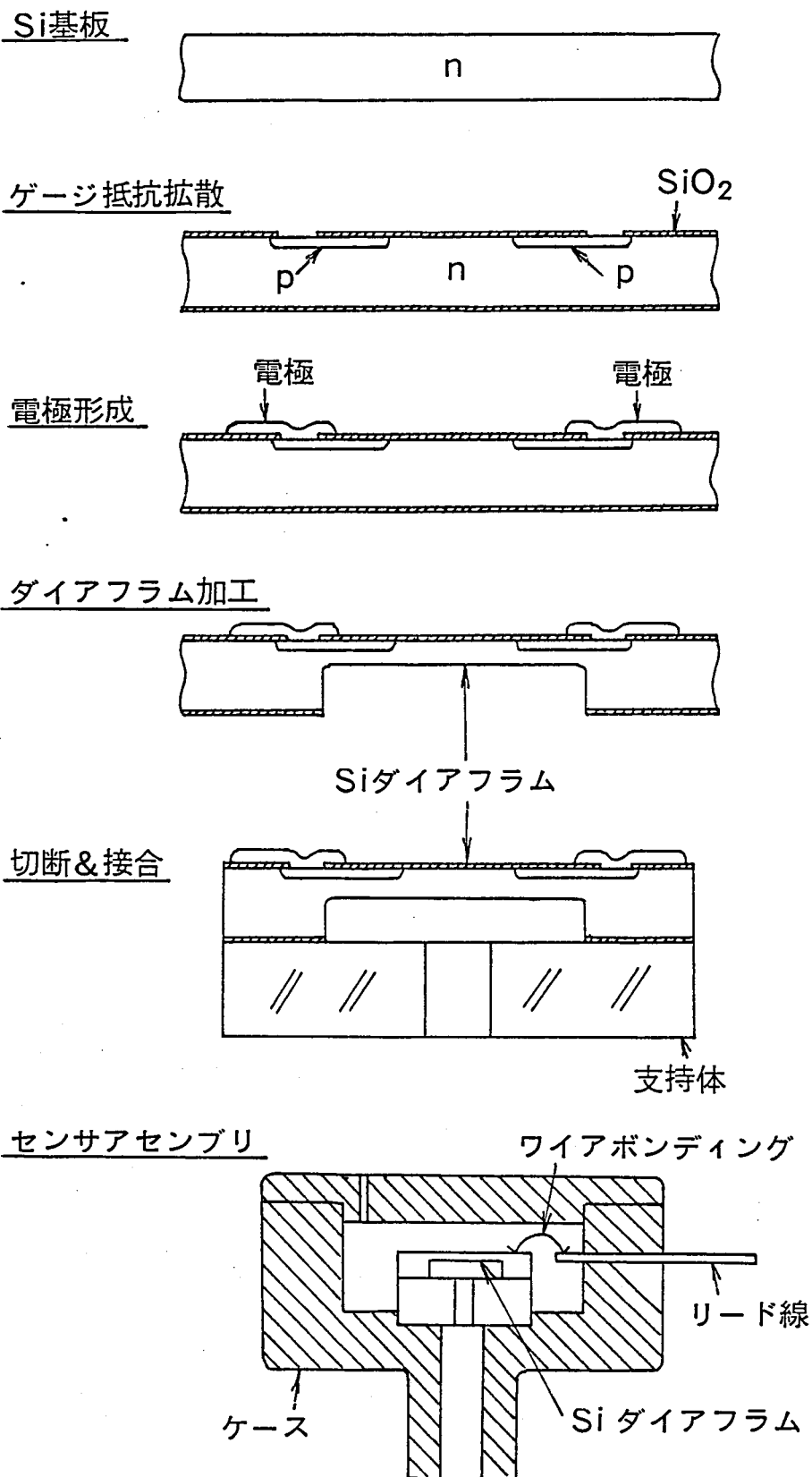


図 1.5 半導体圧力センサの製造法の概要

ボロンなどの p 形不純物をイオン打込みし熱拡散して形成される。抵抗体の両端には Al 等で電極が形成される。その後、化学的エッチングや化学機械研削法によって、Si を凹形加工してダイアフラム部を作る。これを切断して、Si ダイアフラムチップとし、支持体に接合する。これをハウジングに入れて固定し、ワイアボンディングを行ない、圧力センサの基本部分が完成する。これに外部回路を結合して圧力センサが得られる。

このようにして作られる半導体圧力センサは、

- (1) 極めて小形，軽量である。
 - (2) ゲージ抵抗体は，Si 結晶中に一体的に拡散形成され，また Si 結晶自身は理想的な機械的弾性特性を持つため，ヒステリシスやクリープが無く，長期安定性に優れる。
 - (3) Si ダイアフラムの固有振動数は，150kHz 以上であり，振動，衝撃，傾斜の影響をほとんど受けない。
 - (4) 半導体プロセスにより多量生産が可能である。
- 等，圧力センサとして多くの魅力ある特長を有している。^{2)~4)}

1.3 半導体圧力センサの高精度化に関する問題点と課題

1.3.1 半導体圧力センサ研究開発の歴史的展望

Si や Ge におけるピエゾ抵抗効果の基礎的な研究が，1954 年に C.S. Smith ¹⁾ によって発表されて以来，この現象の基礎的研究が数多く行なわれ，^{6)~13)} またこの現象をセンサに利用するために数多くの研究が行なわれてきた。^{14)~20)}

Smith の研究は，低不純物濃度のバルク Si 及びバルク Ge の基本結晶軸 (1, 2, 3) に関するピエゾ抵抗係数 π_{11} , π_{12} , π_{44} を発表したもので，引き続き W.P. Mason ¹⁴⁾ が n 形 Ge のピエゾ抵抗効果を応用し変位，力，トルクセンサの可能性を発表している。そして Morin ⁶⁾ によってバルク Si と Ge のピエゾ抵抗効果の温度依存性が研究され，さらに Phann ⁸⁾ によって基本結晶軸 (1, 2, 3) に関するピエゾ抵抗係数 π_{11} , π_{12} , π_{44} を任意の座標系へ変換する手法が詳論され，ピエゾ抵抗効果をセンサへ応用するための基礎的事項が明らかとなった。

バルク Si は，その後半導体ストレングージとして製品化され，一方これを金属ダイアフラムに接合した形の圧力センサが発表された。しかしながらこの形の圧力センサは非直線誤差が大きく，また接合部の影響により温度影響やドリフトの問題があり，金属ストレン

ゲージ等を利用した他方式の圧力センサに比べて、精度、信頼性に不十分な所が多かった。したがって、バルク結晶を利用する段階では、実用的で魅力ある圧力センサは得られなかった。

しかし'60年代初めに到り、O.N.Tufte⁹⁾やD.R.Kerrら¹⁰⁾によってSi結晶に拡散形成した拡散抵抗層のピエゾ抵抗効果の性質が発表され、同時にこれを利用したSiダイアフラム形圧力センサの可能性が発表¹⁵⁾されるに到り、半導体圧力センサの研究開発は新しい段階に入った。Tufteらの研究は、Siの拡散抵抗層の基本ピエゾ抵抗係数について、表面不純物との関連及びその温度影響を実験的に求め、また拡散抵抗体を有するSi結晶自身をダイアフラムとした半導体圧力センサの可能性を発表したもので、今日のSiダイアフラム形圧力センサの基礎を開いたものといえる。

一方この頃、米国におけるアポロ計画の推進によって、人工衛星やロケットに搭載されるセンサは、小形、軽量、高信頼性の要求から半導体センサが採用された。たとえばバイキング衛星に搭載された約8000個のセンサの大半は半導体センサであり、そのうち圧力センサとして採用されたのが、Si結晶にゲージ抵抗体を拡散した半導体圧力センサであったといわれる。²¹⁾

これらの技術を基礎として、'60年代後半から'70年代にかけて、半導体集積回路技術の進歩を背景に半導体圧力センサの工業化のための実用化研究が促進された。拡散形のSiダイアフラム形圧力センサを最初に工業分野で発表したのはN.Zinker²²⁾である。これは薄いSiウェハ上にゲージ抵抗体を拡散し、これを厚い金属リングに接合してSiダイアフラムを形成したもので、{110}面結晶を利用し<110>軸上にゲージ抵抗体を形成したものである。このセンサは非直線誤差が大きくまた温度影響を受けやすいという問題のため、ラボ用として利用されるにとどまったが、初のSiダイアフラム形半導体圧力センサであった。薄い平坦なSi結晶を金属リングに接合した形の圧力センサは、Siと金属の熱膨張係数の違いや接着材の影響で、特に温度変化の影響を受けやすい。すなわち金属リングや接合層の熱変形の影響がそのままSiダイアフラムに伝わり、ゲージ抵抗体に応力を与えるためである。

これに対して1976年にHoneywell社が発表した半導体圧力センサ²³⁾は、この問題に対して1つの解法を与えるものであった。このセンサは、薄いSi結晶を使うかわりに、厚いSi結晶を用いて、その中心部を深い凹形に加工して、カップ形のSiダイアフラムを実現したものである。この構造は図1.1に示すもので、以来このような構造がSiダイアフラ

ム形圧力センサの主流となっている。このようにすると、支持体や接合層の熱膨張の影響が、Siダイアフラムの外辺の厚いリング部分で緩和され、ゲージ抵抗体はその応力が伝わらないために温度影響などが格段に向上した。この半導体圧力センサは、{100}面Siを利用し、 $\langle 110 \rangle$ 軸にゲージ抵抗体を配置したもので、工業計器である圧力、差圧伝送器や航空機高度計などに使用された。この製品は、半導体圧力センサは低い精度しか得られないものというそれまでの概念を打破し、非直線誤差 $\pm 0.25\%$ を実現したもので、半導体圧力センサが金属ストレンゲージや容量検出方式など他の高精度な圧力計測方式に十分競合できるということを実証したものであった。

'70年代後半から'80年代にかけて、半導体圧力センサの研究開発の動向は、次の2つの方向が指向されてきた。1つは高精度化の追求である。半導体集積回路技術によって微細なゲージ抵抗体をSi結晶に、精密かつ均一に拡散する技術や、Si結晶の深い凹形加工技術を確立した結果、半導体圧力センサは実用的センサへ発展する基礎が得られたが、ピエゾ抵抗効果の非線形特性の解明^{25)~27)}や新しいゲージバタンの提案など一層の高精度化の研究^{36)~41)}が活発に進められている。他の1つは半導体プロセス技術を活かした圧力センサの低コスト化と量産技術の追求である。半導体圧力センサは1枚のSiウェハから多量のセンサチップを得ることができ、その量産化技術を改善することによってセンサの多量生産を可能とした。その結果センサの低コスト化がはかれ、'80年代に入って自動車エンジンの電子制御システムの発展と共に半導体圧力センサが採用されるに到っている。^{42)~45)}さらに周辺回路等をセンサチップ上に集積化したIC化圧力センサの開発も進められつつあり⁴⁶⁾⁴⁷⁾マイクロコンピュータの発展を背景に新しい応用分野を開きつつある。

1.3.2 半導体圧力センサの問題点と課題

圧力センサは次のことが要求される。

- (1) 圧力に対して出力が直線的であり、非直線誤差が小さいこと。
- (2) 温度変化に対して出力が変化しないこと。
- (3) 圧力に対して出力が大きく、広いレンジアビリティをとれること。レンジアビリティとは、1台のセンサで測定可能な圧力範囲の可変能力のことで、外部増幅器のゲインを調整することにより測定圧力範囲を任意に変える為に必要とされる。

これに対して半導体圧力センサは、ピエゾ抵抗効果という非線形性が大きくかつ温度に敏感な物性を利用したものであるために、上記要求に対して高精度化をはかる上で大きな問

題がある。まず第1はSiのピエゾ抵抗効果の非線形特性の問題である。この問題について最初にふれた論文は、'61年、D.Longがn形半導体の非線形性を統計的手法を用いて解析したものであり、²⁴⁾ 引続き'63年にD.R.Kerrらによって拡散抵抗層における非線形性が報告された。¹⁰⁾ しかしこれらの発表は、ピエゾ抵抗効果の線形な解析に対し、実際のピエゾ抵抗特性が非線形性を持つという実験的な指摘にとどまっている。その後'76年にJ.Bretchiが拡散形半導体ストレングージの非線形特性を発表しているが、¹⁹⁾ それはp形拡散ストレングージの抵抗変化をひずみの2次式として近似しその係数を実験的に求めている。しかしこれはピエゾ抵抗特性の1面を述べたにとどまり、その特性を詳細に示すまでに到っていない。また'78年にL.B.Wilnerが、 $\langle 110 \rangle$ 軸に拡散したゲージ抵抗において、縦ピエゾ抵抗効果(longitudinal; 応力と電流が並行な場合のピエゾ抵抗効果)と横ピエゾ抵抗効果(transverse; 応力と電流が直交する場合のピエゾ抵抗効果)の非直線誤差が異なることを実験的に発表した。²⁰⁾ この論文はピエゾ抵抗効果の複雑な非線形特性を指摘した重要な実験であるが、しかし定量的な解析に到っておらず、圧力センサの特性を解析できるまでに到らない。

このように、ピエゾ抵抗効果は、大きな非線形性を持つことが実験的に指摘されているにもかかわらず、その挙動が複雑なために定量的な取扱いができず、実際の圧力センサの設計においては、(1.1)式に示したように応力と抵抗変化は線形であると近似した解析しかできないのが実情である。したがって、半導体圧力センサの非線形特性を解析的に予測することができず、最適なゲージパターンは明確にされなかった。したがって高精度な半導体圧力センサを得るためには、ピエゾ抵抗効果の複雑な非線形特性を定量的に扱えるような、非線形性を考慮したピエゾ抵抗特性式を求める必要がある。

第2の問題は、Siダイアフラムに発生する応力の非線形性である。Siダイアフラムに圧力を加えた場合に発生する応力は、通常Siダイアフラムのたわみが微小で線形とみなされる範囲において、周辺固定の円盤の変形理論²⁹⁾から計算される(図1.2参照)。しかしながら圧力センサの出力を大きく得るには、できるだけ大きなひずみをダイアフラムに与える必要があるため、応力は非線形成分を持つ。したがって、従来の計算手法では、Siダイアフラムの応力計算の精度が不十分であった。応力の非線形については、WayのExact Expansion Theory³⁰⁾を用いて解析をした例がある。^{15) 31)} しかしながらこの解析では、Wortmanら³²⁾によって明らかにされたSi結晶の弾性係数の異方性が考慮されていない。Si結晶は、その機械的弾性定数であるヤング率やポアソン比が一様でなく、結晶面、

結晶軸に応じた異方性を持つ。これはSiダイアフラムに特有のものであり、これを考慮しないと正確な応力計算ができない。したがってSi結晶の弾性係数の結晶軸異方性の問題と、ひずみが大きくなった場合の応力の非線形性を考慮したSiダイアフラムの応力解析手法を確立する必要がある。そしてこの応力解析とピエゾ抵抗効果の特性式とを結合して、半導体圧力センサの特性を総合的に解析できる手法の確立が必要である。

第3の問題は、半導体圧力センサの温度影響、特に、非直線誤差が温度によって変化するという現象である。通常のセンサの温度影響は、零点温度変化（入力为零時の出力の温度変化）とスパン温度変化（フルスケールの入力を加えたときの出力の温度変化）の2点が問題とされ、その途中の変化は問題にされない。すなわち零点とスパンの温度影響を外部回路等で補償することにより、全信号範囲が補償される。しかしながら半導体圧力センサの場合には、零点、スパンのみでなく、その途中の出力の温度影響が問題となる。すなわち非直線誤差の大きさが温度により変化するという半導体圧力センサ特有の問題を有する³⁶⁾³⁷⁾。この現象は圧力センサの出力を大きく得る程顕著となる。したがって高精度を要求される場合には、半導体圧力センサのブリッジ出力は、通常20~30mV/V以内におさえて使用される。これ以上の大きな出力を得ようとすれば、非直線誤差の温度依存性の問題が生じ、高精度を保ち得ない。しかしながらこの問題について発表された例はない。したがってこの問題の原因を解明し、非直線誤差の温度依存性を低減するための研究が必要である。これが出来れば高精度かつ高出力な半導体圧力センサが実現できることになる。

第4の問題は、Siダイアフラムにおける最適ゲージパタンの設計手法が確立されていないことである。(1.1)式のように、ゲージ抵抗の特性をリニアな特性として近似計算する手法では、半導体圧力センサの複雑な非線形特性をシミュレーションすることができない。したがって、従来の設計手法では、Siダイアフラムのゲージパタン設計において、その最適設計をすることが不可能であった。このためには、Siダイアフラムの特性を精度良く計算できる特性解析シミュレータの開発が必要である。

第5の問題は、高精度な半導体圧力センサを実現するための新しいゲージパタンの探査である。従来提案されてきたゲージパタンを持つ圧力センサは、非直線誤差の温度依存性が大きく、出力を大きく得る程その影響が顕著になる。したがって、大きな出力が得られ、かつ-40℃~120℃の広い温度環境下で非直線誤差0.1~0.2%級の半導体圧力センサを実現するには、新しいゲージパタンの探査と提案が必要である。

以上の諸問題を解決することが、高精度な半導体圧力センサを実現する上での重要な課

題である。

1.4 本論文の概要

本研究は、半導体圧力センサに関する前記問題点を解決し、半導体圧力センサの高精度化をはかることを目的とする。

第1章では、半導体圧力センサの概要^{2)~4)}と研究開発の歴史的背景を述べ、その基本的事項に対する検討と技術上の問題点をまとめている。

第2章では、p形拡散ゲージ抵抗体のピエゾ抵抗特性の非線形性と温度特性を実験的に明らかにし、非線形性を考慮した新しいピエゾ抵抗特性式を導入している。²⁵⁾²⁷⁾³⁶⁾

第3章では、ピエゾ抵抗効果の非線形特性とSiダイアフラムの応力の非線形性とを総合して半導体圧力センサの非線形特性の解析について述べる。応力解析についてはWortmanらによって明らかにされたSi結晶の弾性係数の結晶軸異方性を考慮し、また大たわみ理論から導かれる非線形性を考慮した応力解析手法を導入した。この特性解析によって、半導体圧力センサの非直線誤差がゲージ抵抗の位置に依存して変化することを定量的に明らかにし、非直線誤差を零とするゲージ抵抗体の位置がSiダイアフラム上に存在することを示した。²⁵⁾

第4章では、さらにこれを発展させて、半導体圧力センサの高精度化の上で支障となる非直線誤差の温度依存性の問題を述べ、{110}面と{100}面のSiダイアフラムを例にとり、これを検討している。その結果、{110}面Siダイアフラム上で<111>軸上のダイアフラム端部近くに半径ゲージ抵抗を配置し、<110>軸から45°方向のダイアフラム中心近傍に接線ゲージを配置することによって、非直線誤差とその温度依存性が極めて小さくなることを発見し、高精度な半導体圧力センサを実現するための新しいゲージパターンを提案している。³⁶⁾³⁷⁾

第5章では、第2章~4章の結果をもとにして高精度な半導体圧力センサを試作した結果を述べる。ここでは、センサの製造プロセスと圧力センサの温度補償方式についても、半導体圧力センサの高精度化の観点からふれている。²⁾³⁸⁾

第6章では、以上の結果をもとにして、半導体圧力センサの応用開発について述べる。応用の1つは、本論文で提案した{110}面Siダイアフラムを利用した工業計測用圧力伝送器の開発である。^{39)~41)3)4)}圧力伝送器は低圧形から超高圧形まで5機種を開発し、いずれも精度0.2%級を実現した。他の応用は、{100}面Siダイアフラムを利用した自動車エンジン

制御用の半導体圧力センサの開発²⁾⁴²⁾⁴³⁾であり、過酷な環境下で高精度化を実現している。

第7章では、本論文の結論を要約している。

第2章 拡散p形半導体ゲージ抵抗のピエゾ抵抗特性

第2章 拡散p形半導体ゲージ抵抗のピエゾ抵抗特性

2.1 はじめに

Siにおけるピエゾ抵抗特性は、現象論的に、応力によってエネルギーバンドの変形を起し、このため夫々の谷 (Valley) にあるキャリアの数が相対的に変化して導電率が変化するものと解釈されている。

Siのピエゾ抵抗効果は、C.S.Smith¹⁾ によって明らかにされて以来、数多くの研究が行われた。Siの基本結晶軸(1,2,3)に関するピエゾ抵抗係数を $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ として、任意の座標系へ変換する手法はPfannら⁸⁾ によって議論され、またY.Kandaら⁵⁾ によって電流と応力が平行な縦ピエゾ抵抗係数 π_l (添字 l : longitudinal) および直角な横ピエゾ抵抗係数 π_t (添字 t : transverse) が計算され、センサ設計面から有効な手法となっている。またTufteらによって拡散抵抗層の基本ピエゾ抵抗係数と表面不純物濃度の関係及びその温度特性が測定され⁹⁾、バルク結晶から拡散ゲージ抵抗の応用へと道を開いた。

これらの論文は、ピエゾ抵抗効果を、応力の微小範囲、すなわち応力と抵抗変化の関係が線形と見なされる範囲で扱っている。しかしながら実際のセンサ設計面においては、ピエゾ抵抗効果の非線形特性を無視することは出来ない。特に半導体圧力センサの高精度化のためには、ピエゾ抵抗特性の非線形性と温度特性を正確に把握し、定量化することが必要である。

ピエゾ抵抗効果の非線形特性についてはBretchi¹⁹⁾, Kerr¹⁰⁾, Wilner²⁰⁾, Long氏ら²⁴⁾ によって指摘され論じられているが定量的な解析に到っていない。またピエゾ抵抗効果の温度依存性については、Morin⁶⁾, Tufte氏ら⁹⁾ によって発表されているが、線形近似の範囲でのみ扱われており、センサ設計の面では不十分である。またピエゾ抵抗効果の非線形特性は、温度によって変化するという複雑な現象を示すが、この問題を明らかにした発表は無い。

そこで本章では、p形拡散抵抗に関するピエゾ抵抗効果の非線形特性とその温度依存性を実験によって明らかにし、この特性を定量的に表現し得る新しいピエゾ抵抗特性式について述べる。^{25)~27)}

2.2 ピエゾ抵抗特性の従来を表式

Siの基本結晶軸(1, 2, 3)に関するピエゾ抵抗係数を $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ として、任意の座標系へ変換する手法は、Pfannらによって検討され⁸⁾、次のように要約される。すなわち基本結晶軸座標系を(1, 2, 3)、任意の直交座標系を(1', 2', 3')とすれば、抵抗体の電流方向を1'としたとき

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11}' \sigma_{11}' + \pi_{12}' \sigma_{22}' + \pi_{13}' \sigma_{33}' + \pi_{14}' \sigma_{23}' + \pi_{15}' \sigma_{13}' + \pi_{16}' \sigma_{12}'$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} \pi_{11}' &= \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[(l_1 m_1)^2 + (m_1 n_1)^2 + (n_1 l_1)^2] \\ \pi_{12}' &= \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[(l_1 l_2)^2 + (m_1 m_2)^2 + (n_1 n_2)^2] \\ \pi_{13}' &= \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[(l_1 l_3)^2 + (m_1 m_3)^2 + (n_1 n_3)^2] \\ \pi_{14}' &= 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[l_1^2 l_2 l_3 + m_1^2 m_2 m_3 + n_1^2 n_2 n_3] \\ \pi_{15}' &= 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[l_1^3 l_3 + m_1^3 m_3 + n_1^3 n_3] \\ \pi_{16}' &= 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})[l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2] \end{aligned} \right\} \dots (2.1)$$

となる。ここに l, m, n は座標間の方向余弦であり、2つの座標軸間の関係を図2.1のよ

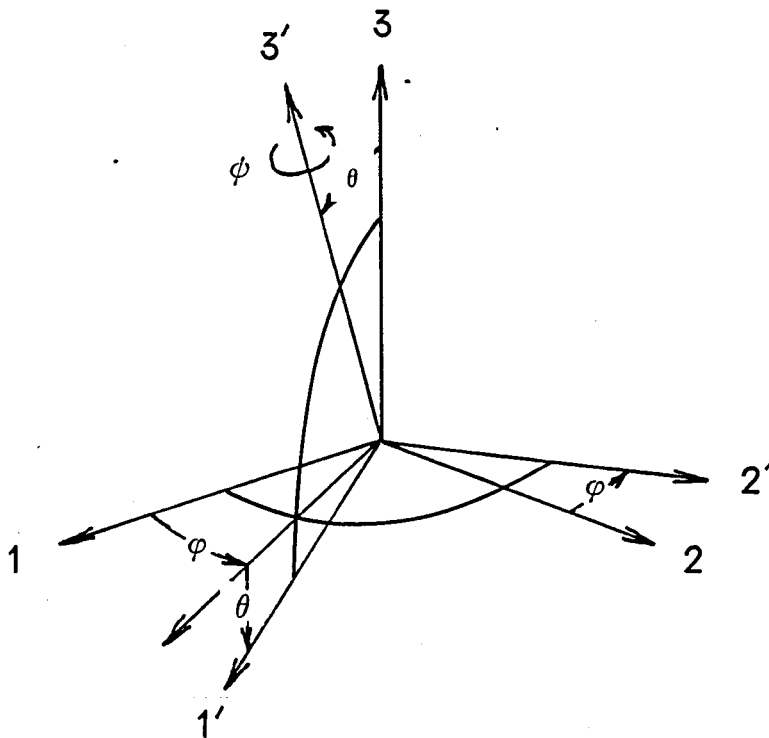


図 2.1

Euler's Angles

うにとれば，次のように計算される。

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi & -s\theta c\psi \\ -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\theta s\psi \\ c\phi s\theta & s\phi s\theta & c\theta \end{bmatrix} \dots (2.2)$$

ここに， $c\phi \equiv \cos\phi$ ， $s\phi \equiv \sin\phi$ 等を示す。

(2.1) 式において， σ_{ij}' は i' 軸に垂直な面に対して j' 方向から働く応力を示す。したがって σ_{11}' ， σ_{22}' ， σ_{33}' は面に垂直な応力， σ_{12}' ， σ_{13}' ， σ_{23}' はせん断応力である。

(2.1) 式をセンサ設計面から整理すると次のようになる。今，図 1.1 のように，ゲージ抵抗を Si ダイアフラムの中心軸対称に配置すれば，ゲージ抵抗は，ダイアフラム半径方向と接線方向に発生する直交した 2 軸応力を受ける。すなわち，図 2.2 のように，抵抗に流れる電流 i と同一方向に応力 σ_ℓ ，（添字 ℓ : longitudinal），直角方向に応力 σ_t （添

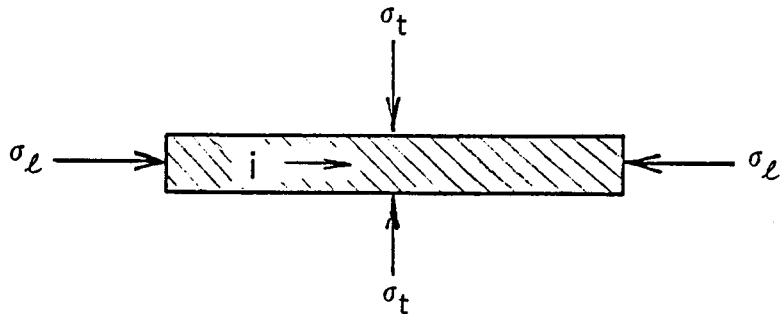


図 2.2 ゲージ抵抗体へ加えられる 2 軸応力

字 t : transverse) を受ける。したがって，Si ダイアフラムの場合，直交座標系を (ℓ, t, z) とし， ℓt 面を Si ダイアフラム面に一致させ，ゲージ抵抗の長手方向を ℓ ，直交方向を t ，垂直方向を z とすれば，(2.1) 式は次式に変換される。

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_\ell \sigma_\ell + \pi_t \sigma_t + \pi_z \sigma_z + \pi_s \sigma_{\ell t} \dots (2.3)$$

(2.3) 式と (2.1) 式との間には，次の対応がある。

$$\left. \begin{aligned} \pi_{\ell} &= \pi_{11}', \pi_t = \pi_{12}', \pi_z = \pi_{13}', \pi_s = \pi_{16}' \\ \sigma_{\ell} &= \sigma_{11}', \sigma_t = \sigma_{22}', \sigma_z = \sigma_{33}', \sigma_{\ell t} = \sigma_{12}', \sigma_{23}' = \sigma_{13}'' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

(2.3)式において、 σ_z はダイアフラム面に垂直に加えられる応力(静水圧)、 $\sigma_{\ell t}$ はせん断応力であり、通常 σ_{ℓ} 、 σ_t に比較して十分小さいので無視され、(2.3)式は一般に次式で近似される。¹⁷⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \pi_{\ell} \sigma_{\ell} + \pi_t \sigma_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、 π_{ℓ} :縦ピエゾ抵抗係数、 π_t :横ピエゾ抵抗係数

π_{ℓ} 、 π_t の結晶軸異方性については、Kandaら⁵⁾により計算されており、{110}面、{100}面、及び{111}面のp形Siにおいては図2.3のようになる。なお図には、 π_s も併記した。

(2.5)式及び図2.3は、圧力センサ設計面から簡易な方法としてよく利用されている。しかしながら(2.5)式では抵抗の近似計算は可能であるが、実際のピエゾ抵抗効果の現象面で問題となる抵抗変化率と応用の非線形な関係やその温度影響については論じることが出来ない。

そこで、以下に述べる実験により、ピエゾ抵抗効果の非線形特性とその温度影響の詳細を明らかにした。

2.3 ピエゾ抵抗効果の非線形特性に関する実験的考察²⁵⁾²⁷⁾

2.3.1 実験方法²⁵⁾

ピエゾ抵抗特性の実験方法を図2.4に示す。実験試料は、拡散ゲージ抵抗を形成したSi結晶を短冊状に切り出してカンチレバーとしたもので、これの1端を固定し、他端に荷重を与えることによって、拡散ゲージ抵抗体に曲げ応力を与え、応力と抵抗変化の関係を測定した。カンチレバの寸法諸元は図中に示した値であり、ゲージ抵抗の中心位置は固定端より3mmとした。カンチレバー先端に加える荷重Wと拡散層に作用する応力 σ の関係は次式から求めている。

- 縦ピエゾ抵抗係数 π_l
- - - 横ピエゾ抵抗係数 π_t
- · - 煎断ピエゾ抵抗係数 π_s

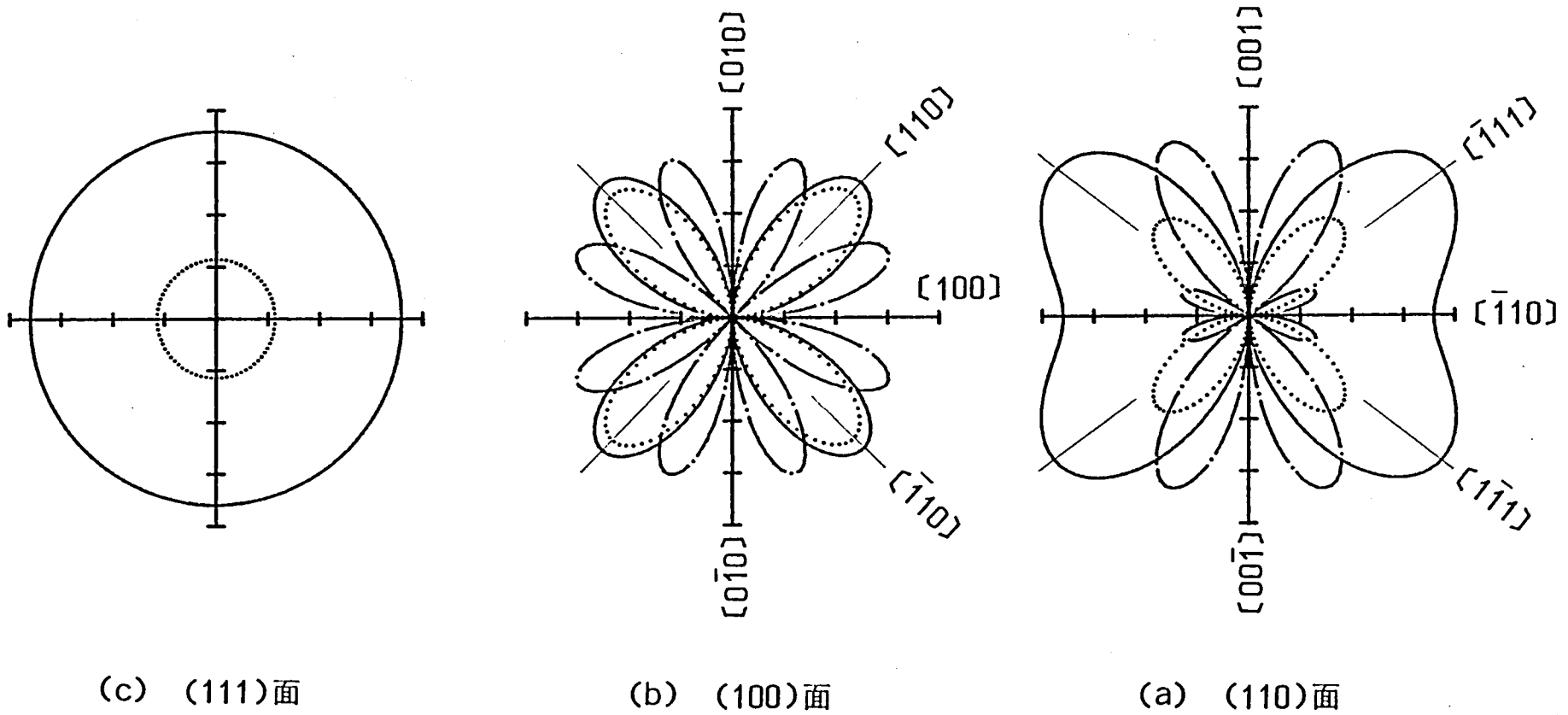


図2.3 p形Siにおけるピエゾ抵抗係数(1次項)

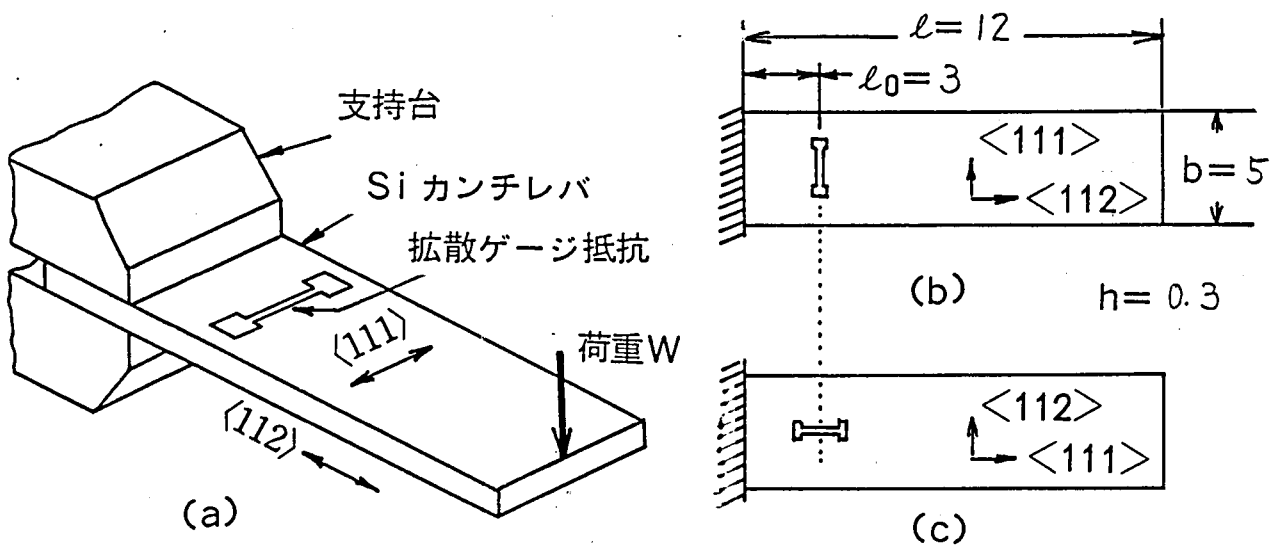


図2.4 Siカンチレバによるピエゾ抵抗効果の測定

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\simeq (Wl/Z) (1 - U^2/15 - l_0/l) \\ U &= 12Wl^2/Ybh^3, Z = bh^2/6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 l はカンチレバの有効長、 l_0 はカンチレバ固定端と拡散ゲージ抵抗層の中心位置間の長さ、 b, h, Z はそれぞれカンチレバの幅、厚さ、及び断面係数、 Y はSiのヤング率である。

ピエゾ抵抗係数を $\{110\}$ 面と $\{100\}$ 面で比較すると、図2.3のように $\{110\}$ 面は $\langle 111 \rangle$ 軸、 $\{100\}$ 面は $\langle 110 \rangle$ 軸方向で π_ℓ が最大となる。両者を比較すると $\pi_\ell | \langle 110 \rangle / \pi_\ell | \langle 111 \rangle \simeq 1.3$ となり、 $\langle 111 \rangle$ 軸が感度の点で有利である。したがって、Siカンチレバは $\{110\}$ 面を用い、図2.4に示すようにゲージ抵抗の長手方向を $\langle 111 \rangle$ 軸とした。このカンチレバを、同図(b)のようにすればゲージ抵抗に直交方向から応力が加わって、いわゆる横ピエゾ抵抗効果 $\pi_t \sigma_t$ の値が測定でき、また同図(c)のようにすればゲージ抵抗の長手方向から応力が加わって、いわゆる縦ピエゾ抵抗効果 $\pi_\ell \sigma_\ell$ の値が測定できる。またゲージ抵抗拡散層を上面にすれば引張り応力が、また逆に下面にすれば圧縮応力がそれぞれゲージ抵抗に与えられる。なお、拡散層の表面不純物濃度は、約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ としている。これはセンサとして温度補償が容易になる理由から定めている。²⁷⁾²⁸⁾

Siカンチレバによる上記実験方法は、次の理由により極めて正確にピエゾ抵抗特性が測定できる。

- (1) Si結晶自身が極めて理想的な弾性特性を示すため、カンチレバーの変形に伴うヒステリシスの発生が皆無である。
- (2) 拡散ゲージ抵抗は、Si結晶中に一体的に形成されるため、カンチレバーとゲージ抵抗の接合層の影響が皆無である。すなわち、金属カンチレバーにゲージ抵抗を接着する場合のような接合層のクリープや温度影響が生じない。
- (3) 図 2.4 (b), (c) のようにゲージ抵抗を配置することによって $\pi_{\ell} \sigma_{\ell}$ と $\pi_t \sigma_t$ の影響を独立して計測できる。

2.3.2 実験結果

- (1) 応力とゲージ抵抗変化率との関係²⁵⁾

まず、応力とゲージ抵抗変化率との関係を、周囲温度 293°K (20°C, 室温) 一定の条件下で測定した結果を図 2.5 に示す。{110} 面 <111> 軸に関するピエゾ抵抗係数は、(2.1) 式～(2.2) 式をもとに近似計算すれば

$$\left. \begin{aligned} \pi_{\ell} &= \frac{1}{3} (\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}) \simeq \frac{2}{3} \pi_{44} \\ \pi_t &= \frac{1}{3} (\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44}) \simeq -\frac{1}{3} \pi_{44} \end{aligned} \right\} \text{-----} (2.7)$$

ここに $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$: 基本ピエゾ抵抗係数

従って、

$$\pi_t / \pi_{\ell} \simeq -\frac{1}{2} \text{-----} (2.8)$$

となり、図 2.5 の結果をほぼ満足していることが分る。

- (2) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差²⁵⁾

図 2.5 に示した応力と抵抗値変化の関係は、かなり大きな非線形特性を示している。非線形特性を定量的に示す指標が非直線誤差である。そこで、図 2.5 に示した応力と抵抗値変化の関係すなわちピエゾ抵抗効果における非直線誤差について以下に検討する。

ここで非直線誤差を次のように定義する。今入力 X と出力 Y の間に、 $Y = Y(X)$ の関係

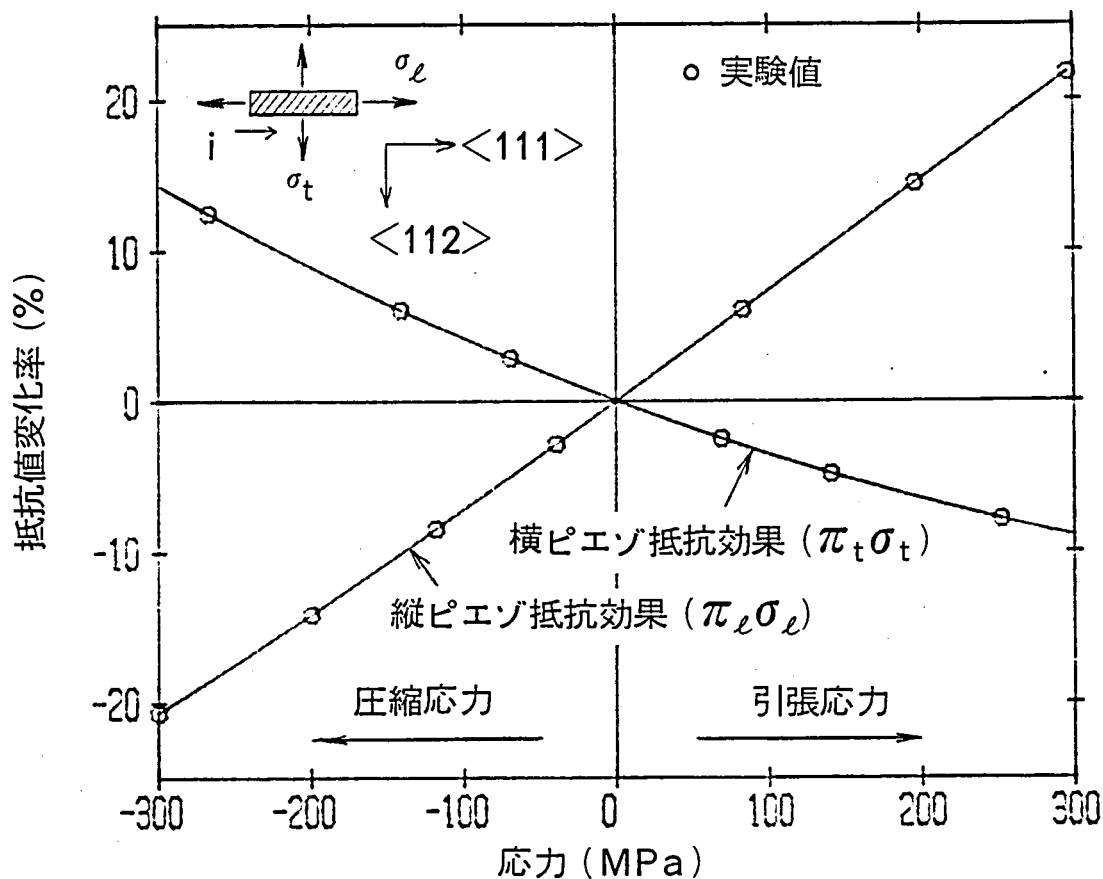


図 2.5 応力とゲージ抵抗値変化率の関係

がある系に，図 2.6 のようにフルスケール X_f の入力を与えた場合， Y の X に対する非直線誤差 $NL(X)$ を

$$\begin{aligned}
 NL(X) &= \frac{\Delta Y(X)}{Y_f} \times 100 \\
 &= \frac{Y(X) - (Y_f/X_f) \cdot X}{Y_f} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (2.9)
 \end{aligned}$$

とする。すなわち零点 0 とフルスケール点 F を結ぶ理想直線からの偏差値 $\Delta Y(X)$ をフルスケールに対し % 表示したものとす。一般にセンサ特性としては， $NL(X)$ の $0 \sim X_f$ 間の最大値を問題とするため，(2.9) 式の最大値を単に非直線誤差と呼ぶものとする。

図 2.5 に示したピエゾ抵抗効果による応力とゲージ抵抗値変化率の関係において， X を応力， Y をゲージ抵抗値変化率に対応させ，上記定義によってその非直線誤差を求めると図 2.7 のようになる。図中の各プロットは，その応力を 100% (フルスケール) として (2.9) 式より非直線誤差を計算している。

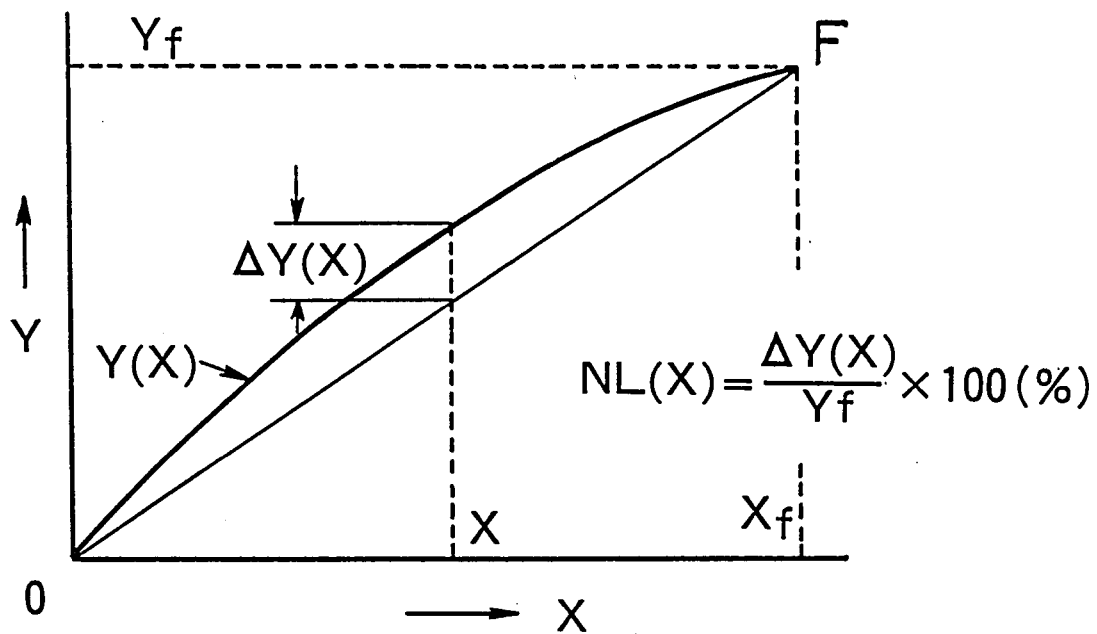


図 2.6 非直線誤差の定義

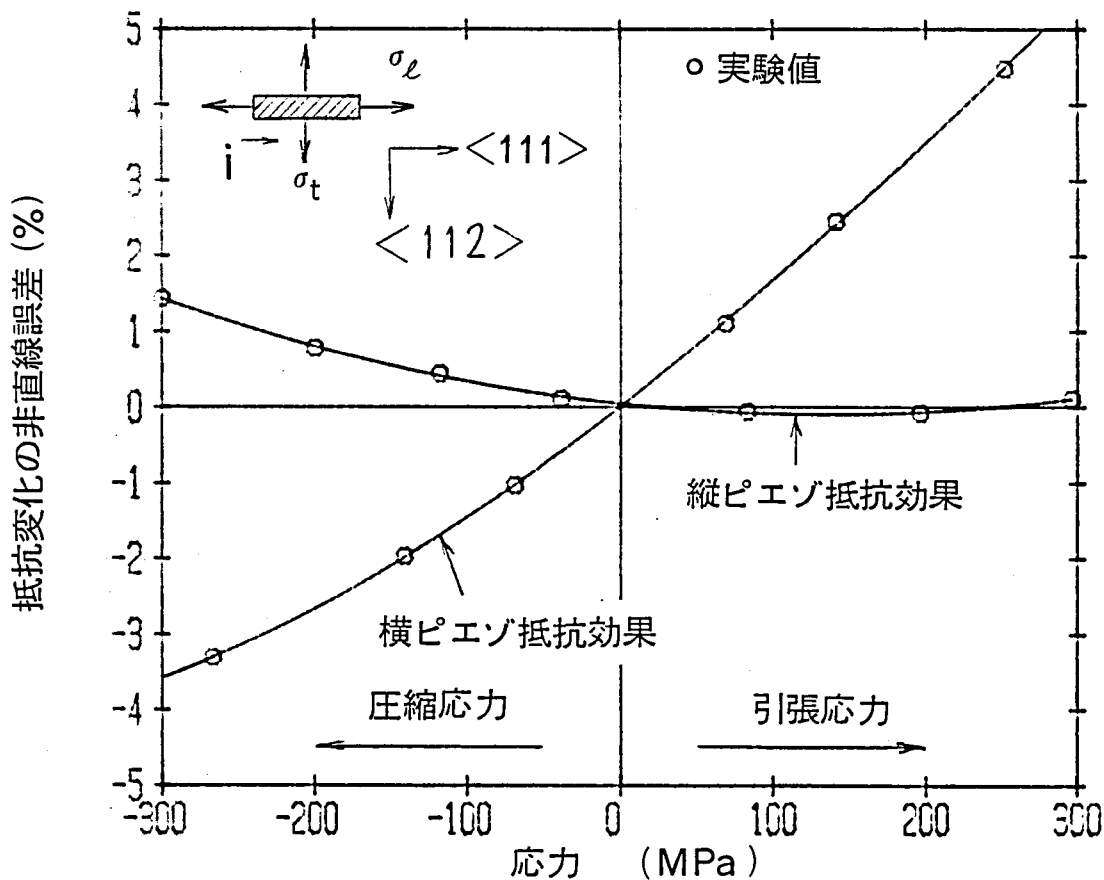


図 2.7 応力に対するゲージ抵抗変化の非直線誤差

図 2.7 の結果から、ピエゾ抵抗効果の非直線誤差の性質として、次の重要な事実が明らかになった。

- (a) 縦ピエゾ抵抗効果 ($\pi_l \sigma_l$) と横ピエゾ抵抗効果 ($\pi_t \sigma_t$) の非直線誤差は大きく異なっている。横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は、縦ピエゾ抵抗効果のそれと比べて格段に大きい。
- (b) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は、応力の方向（引張方向と圧縮方向）により異なる。特に縦ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は、引張応力の場合に非常に小さい値を示す。
- (c) 縦ピエゾ抵抗効果と横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は、極性が相反している。

(3) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差の温度依存性²⁷⁾³⁶⁾³⁷⁾

前述のように、縦及び横ピエゾ抵抗効果は、非直線誤差の様子が大きく異なり、また応力の印加方向によって差異を生じることが分った。これらの結果は、室温 (20°C) において実測した結果である。そこで Si カンチレバーの実験において、周囲温度を変化させてピエゾ抵抗効果の測定をした所、その非直線誤差が温度によって大きく変化するという重要な事実が明らかになった。

測定結果の 1 例を図 2.8, 2.9 に示す。この図は、Si カンチレバーのゲージ抵抗体に、フルスケール応力 230MPa, あるいは 250MPa を与えたときの応力とゲージ抵抗値変化率の関係において、その非直線誤差のプロフィールを図 2.6 の定義によって示したものである。そして周囲温度を 80°C, 26°C, -19°C と変化させて実験したものである。²⁷⁾³⁷⁾

図 2.8 は、縦ピエゾ抵抗効果の非直線誤差の温度変化であり、フルスケール応力を 230 MPa としたとき、その非直線誤差を図 2.6 の定義によって拡大して示している。特徴的なことは、非直線誤差が温度によって変化すると共に、その温度影響は、引張応力時に小さく、圧縮応力時に著しく大きい。なお、圧縮応力時の非直線誤差が正方向であるのは、圧縮応力の増加に伴ない抵抗変化の割合が飽和傾向を示すことを意味するものである。

図 2.9 は、横ピエゾ抵抗効果の場合である。特徴的なことは、図 2.8 に比較して、非直線誤差とその温度依存性は引張応力、圧縮応力のいずれの場合も著しく大きく、かつ非直線誤差は逆符号であることである。この場合、引張応力の増加に伴ない抵抗値変化の割合は飽和傾向となり、圧縮応力の場合には逆に抵抗値変化割合は次第に大きくなる傾向を示している。

以上の結果をより一般的に示すと図 2.10 となる。³⁶⁾ 図は、種々の応力範囲での最大非直線

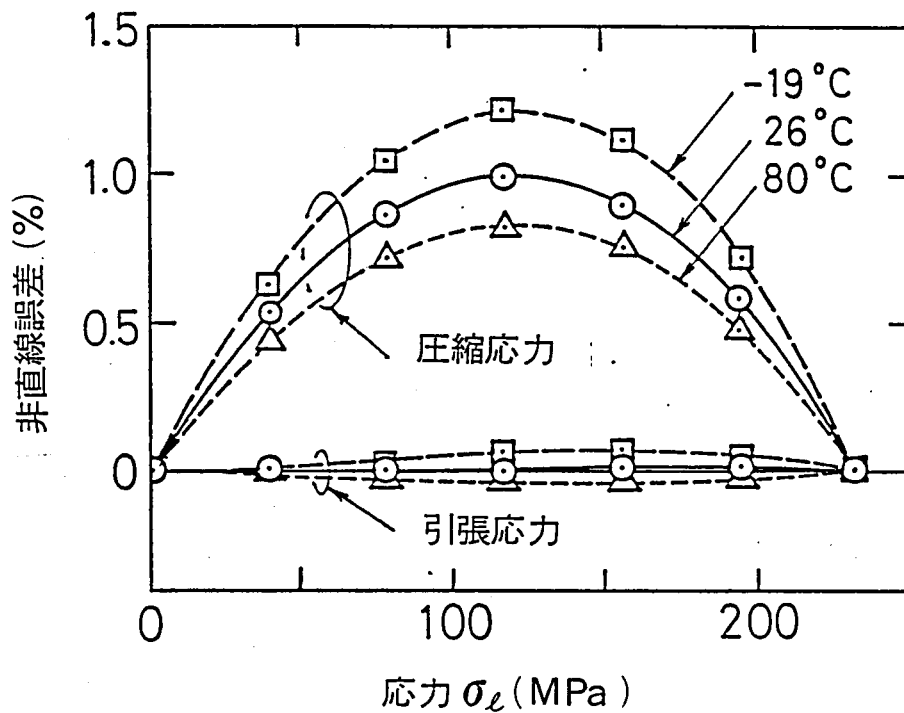


図2.8 縦ピエゾ抵抗効果における非直線誤差の温度変化

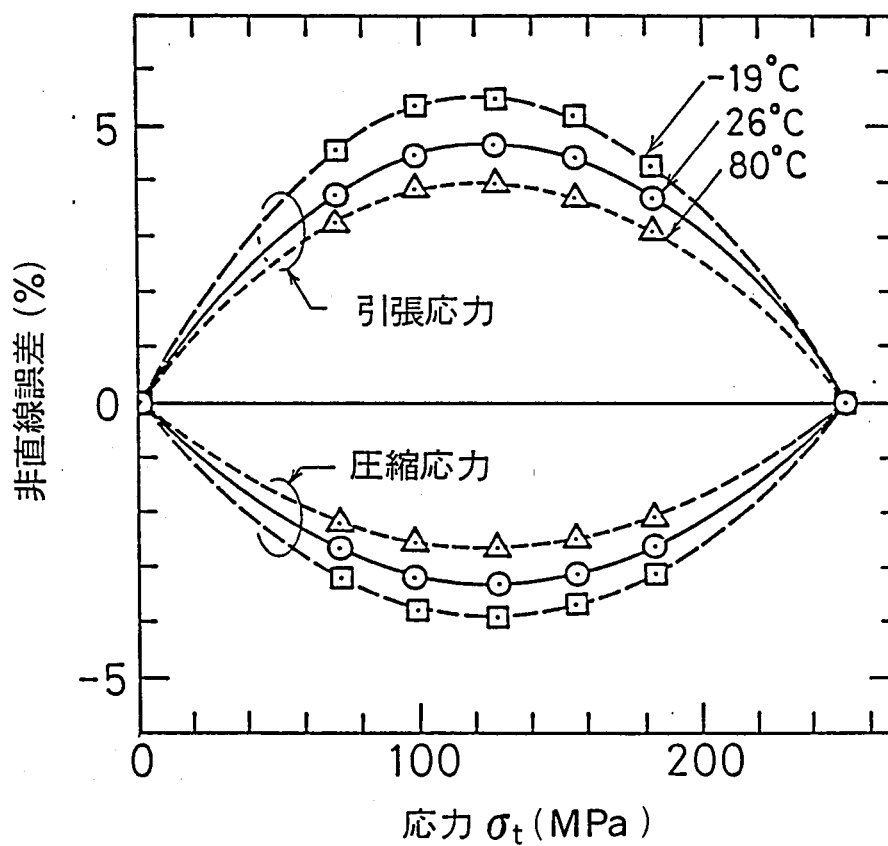


図2.9 横ピエゾ抵抗効果における非直線誤差の温度変化

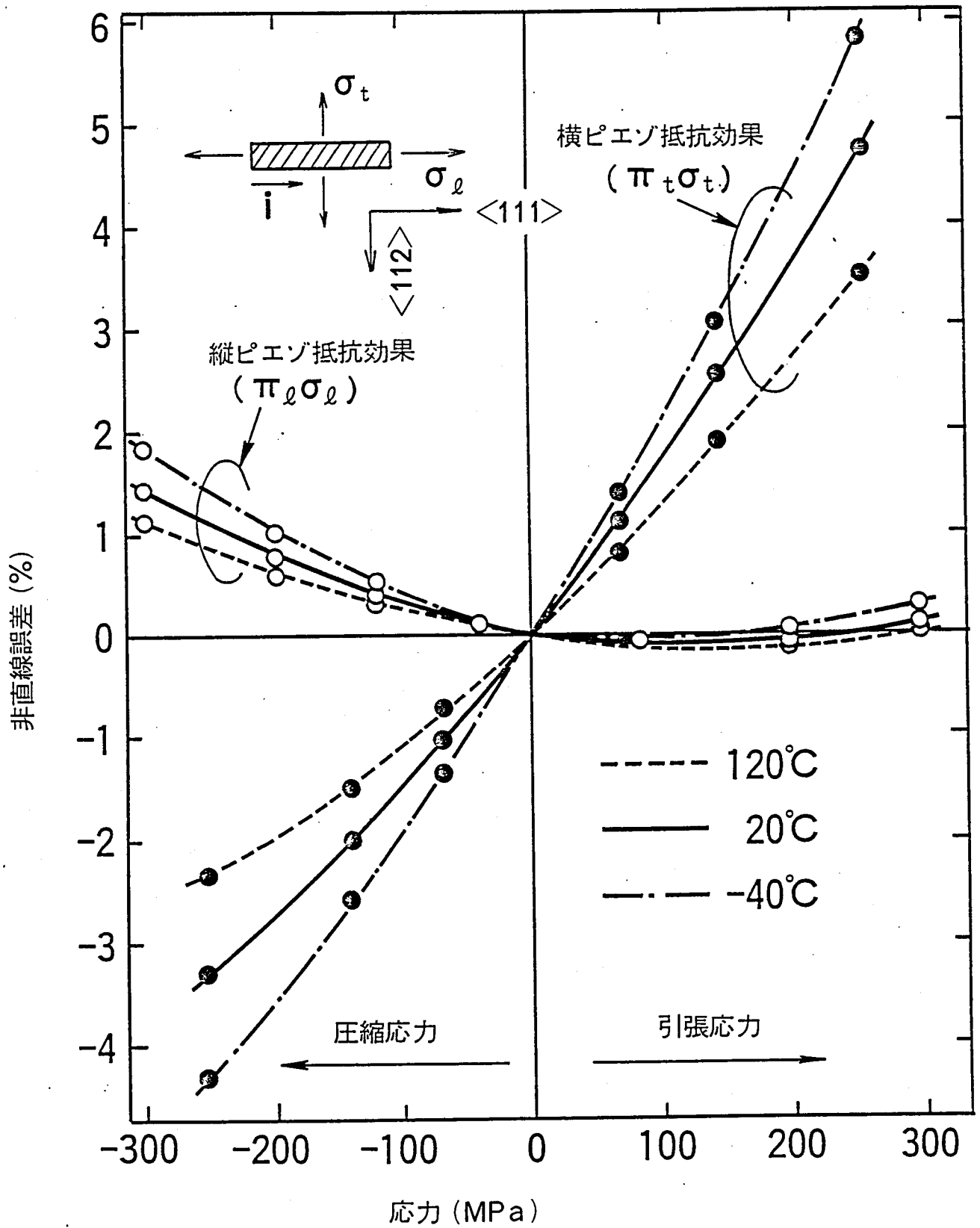


図2.10 ピエゾ抵抗効果の非直線誤差とその温度依存性

誤差値をプロットしたもので、応力は±300MPaの範囲で示している。また周囲温度は、センサの使用温度範囲-40℃～120℃を前提として233°K(-40℃)、293°K(20℃、室温)、393°K(120℃)の各温度条件下で測定した。このデータから縦ピエゾ抵抗効果と横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差とその温度依存性が一目で分る。

2.3.3 実験結果の考察

以上の実験結果を、半導体圧力センサへの応用面から考察すると、次のような重要な知見が得られる。すなわち、表面不純物濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 近傍のp形拡散ゲージ抵抗において、

- (1) 非直線誤差及びその温度依存性は、縦ピエゾ抵抗効果を利用する方が横ピエゾ抵抗効果を利用する場合に比較して著しく小さくできる。さらに縦ピエゾ抵抗効果を引張応力で利用する場合に誤差は最も小さい(図2.7, 2.10)。<111>は縦ピエゾ抵抗係数が最大となる結晶軸(図2.3参照)であることを考慮すれば、半導体圧力センサの設計面においては、1組のゲージ抵抗はSiダイアフラム上の応力が引張応力となる領域(図1.2参照)において、<111>軸の縦ピエゾ抵抗効果を最大限に活用すべきである。
- (2) Siダイアフラム上のゲージ抵抗は2軸応力を受けるために、かならず横ピエゾ抵抗効果の影響も受ける。横ピエゾ抵抗効果は非直線誤差とその温度依存性が大きいが、応力の方向によって、誤差の符号を正又は負に任意に選ぶことができる(図2.9, 2.10)。したがって、ゲージ抵抗を図1.4のようにブリッジに構成する場合、夫々のゲージ抵抗の誤差がブリッジ出力として打消し合うように、ゲージ抵抗の配置を決定することが可能である。すなわち横ピエゾ抵抗効果は、ブリッジ出力の非直線誤差を積極的に打消すために利用できる。
- (3) 非直線誤差の温度依存性の問題は、高精度圧力センサ開発の上で最大の問題となる。圧力センサの温度影響については、通常、零点の温度影響(圧力零時の出力の温度変化)とスパン温度影響(フルスケール圧力時の出力の温度変化)の2つが問題とされた。事実ワイヤストレンゲージを用いるような他の方式の圧力センサの場合には、非直線誤差の温度影響は無視できる。非直線誤差の温度依存性は、ピエゾ抵抗効果応用の場合の特有な問題である。

以上の3点は、p形拡散ゲージ抵抗体のピエゾ抵抗効果に関する新しい知見であり、高精度半導体圧力センサを設計する場合のポイントの1つとなるものである。

2.4 非線形性を考慮したピエゾ抵抗特性式²⁵⁾²⁷⁾³⁶⁾

半導体圧力センサ設計の面からは，以上述べたピエゾ抵抗効果の非直線誤差とその温度依存性の現象を，数式として定量化する必要がある。そこで次に示すような非線形性と温度依存性を考慮したピエゾ抵抗特性式を導入した。

Siダイアフラム上のゲージ抵抗は σ_ℓ, σ_t の応力を受けるため，抵抗値はこれら応力の関数となり，それぞれの応力の高次項を含む非線形特性を示すはずである。また抵抗値は基準温度からの変化に対してもその関数と見なされる。そこで抵抗値を $R(\sigma_\ell, \sigma_t, t)$ として， $\sigma_\ell = \sigma_t = t = 0$ のまわりでマクローリン展開すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 R(\sigma_\ell, \sigma_t, t) &= R(0, 0, 0) \left[1 + \sum_{j,k} \{ \alpha_k t^k + \pi_{\ell j} (1 + \beta_{\ell kj} \cdot t^k) \sigma_\ell^j \right. \\
 &\quad \left. + \pi_{tj} (1 + \beta_{tkj} \cdot t^k) \sigma_t^j \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m,n} \pi_{\ell t mn} (1 + \beta_{\ell tkj} \cdot t^k) \sigma_\ell^m \sigma_t^n \} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

ここに， t : 基準温度からの差

$m + n = j (\geq 2)$

α_k : 応力が無い時の拡散抵抗の温度係数

$\pi_{\ell j}, \pi_{tj}$: 縦及び横ピエゾ抵抗係数

$\beta_{\ell kj}, \beta_{tkj}$: $\pi_{\ell j}, \pi_{tj}$ の温度係数

$\pi_{\ell t mn}$: 2軸応力が同時に作用したときのピエゾ抵抗係数の相乗項

$\beta_{\ell tkj}$: $\pi_{\ell t mn}$ の温度係数

上式において，縦ピエゾ抵抗効果は $\sum_{j,k} \pi_{\ell j} (1 + \beta_{\ell kj} \cdot t^k) \sigma_\ell^j$ であり，非直線性の現象は応力の高次項によって示され，また非直線誤差が温度依存性を持つ現象は $\pi_{\ell j}$ の温度係数 $\beta_{\ell kj}$ で示される。横ピエゾ抵抗効果は $\sum_{j,k} \pi_{tj} (1 + \beta_{tkj} \cdot t^k) \sigma_t^j$ で，同様に説明される。 $t=0, j=1$ の場合のピエゾ抵抗係数の1次項 $\pi_{\ell 1}, \pi_{t1}$ は，(2.5)式の π_ℓ, π_t に相当する。

また $\pi_{\ell t mn}$ は σ_ℓ, σ_t の2つの応力が同時に加わった場合の $\pi_{\ell j}, \pi_{tj}$ の変調を示す係数と考えられるが，この影響を現象的に分離することは難しく，またこの相乗項は σ_ℓ, σ_t の

共に大きくなるダイアフラム中心近傍を除いては，影響は十分小さいと考えられるので，この項は無視するものとした。したがって上記仮定のもとにピエゾ抵抗特性の表式を

$$R(\sigma_{\ell}, \sigma_t, t) = R(0, 0, 0) \left[1 + \sum_{j,k} \left\{ \alpha_k t^k + \pi_{\ell j} (1 + \beta_{\ell k j} \cdot t^k) \sigma_{\ell}^j + \pi_{t j} (1 + \beta_{t k j} \cdot t^k) \sigma_t^j \right\} \right] \dots\dots\dots(2.11)$$

とした。(2.11)式に示すピエゾ抵抗特性の表式は，筆者の共同研究者である山田の考案によるものであり，²⁶⁾ 本論文ではこの表式を採用する。

上式におけるピエゾ抵抗係数 $\pi_{\ell j}$ ， $\pi_{t j}$ ，温度係数 $\beta_{\ell k j}$ ， $\beta_{t k j}$ ， α_k 等の各係数は，Siカンチレバーを用いて，応力とゲージ抵抗値の関係を温度をパラメータとして実験により求め，この実験値と(2.11)式が合致するように最小自乗法により求めることができる。この方法によって，表面不純物濃度 $N_s = 1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合のゲージ抵抗の各係数が文献²⁷⁾に示されている。しかしながら，半導体圧力センサとして考えた場合の最適な表面不純物濃度 N_s は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。この理由は，ゲージ抵抗値の変化量 ΔR の温度変化が， $N_s \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ において最小となり，²⁷⁾²⁸⁾ブリッジ回路を定電流励起方式とした場合に，ブリッジ出力の温度変化が最も小さくなるためである。したがって， $N_s \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 近傍で， N_s が種々異なるSiカンチレバを作り，この実験結果から， $N_s \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のときのピエゾ抵抗係数と温度係数を内挿により求めた。その値を表2.1に示す。³⁶⁾ 本論文では，この数値を用いて次章以下の解析を進めることにする。

表2.1 {110}面，<111>軸に関するピエゾ抵抗係数及び温度係数

(注) 表面不純物濃度： $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

$\pi_{\ell 1}$ (MPa ⁻¹)	$\beta_{\ell 11}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{\ell 21}$ (°C ⁻²)	$\pi_{\ell 2}$ (MPa ⁻²)	$\beta_{\ell 12}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{\ell 22}$ (°C ⁻²)	$\pi_{\ell 3}$ (MPa ⁻³)	$\beta_{\ell 13}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{\ell 23}$ (°C ⁻²)	α_1 (°C ⁻¹)
7.3 $\times 10^{-4}$	1.4 $\times 10^{-4}$	5.2 $\times 10^{-6}$	6.2 $\times 10^{-8}$	-3.2 $\times 10^{-3}$	-4.3 $\times 10^{-6}$	-1.9 $\times 10^{-10}$	-5.2 $\times 10^{-3}$	3.2 $\times 10^{-5}$	1.9 $\times 10^{-3}$
$\pi_{t 1}$ (MPa ⁻¹)	$\beta_{t 11}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{t 21}$ (°C ⁻²)	$\pi_{t 2}$ (MPa ⁻²)	$\beta_{t 12}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{t 22}$ (°C ⁻²)	$\pi_{t 3}$ (MPa ⁻³)	$\beta_{t 13}$ (°C ⁻¹)	$\beta_{t 23}$ (°C ⁻²)	α_2 (°C ⁻²)
-3.5 $\times 10^{-4}$	-1.2 $\times 10^{-5}$	1.2 $\times 10^{-5}$	2.6 $\times 10^{-7}$	-4.0 $\times 10^{-3}$	2.2 $\times 10^{-5}$	2.9 $\times 10^{-12}$	2.5 $\times 10^{-1}$	-2.1 $\times 10^{-4}$	7.2 $\times 10^{-6}$

2.5 まとめ

本章では，p形Si拡散ゲージ抵抗体におけるピエゾ抵抗効果の非線形特性と，その温度特性を実験によって明らかにし，この特性を定量的に表現し得るピエゾ抵抗特性式を得た。得られた結論を要約すると下記のようになる。

まず，Siカンチレバの実験結果から，ピエゾ抵抗効果の複雑な非線形特性を明らかにした。²⁵⁾ すなわち，

- (1) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，縦ピエゾ抵抗効果と，横ピエゾ抵抗効果とでは大幅に異なる。特に，横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，縦ピエゾ抵抗効果の非直線誤差に比べて格段に大きい。
- (2) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，応力の方向，すなわち引張りと圧縮の場合で大きな差を示す。特に縦ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，引張り応力の場合に非常に小さい値を示す。
- (3) これらの非直線誤差には温度依存性があり，周囲温度が変化すると非直線誤差が変化する。
- (4) 縦ピエゾ抵抗効果と横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，極性が互いに相反している。

次に，このようなピエゾ抵抗効果の非線形特性とその温度依存性の現象を，数式として定量化したピエゾ抵抗特性式

$$R(\sigma_\ell, \sigma_t, t) = R(0, 0, 0) \left[1 + \sum_{j,k} \{ \alpha_k t^k + \pi_{\ell j} (1 + \beta_{\ell k j} \cdot t^k) \sigma_\ell^j + \pi_{t j} (1 + \beta_{t k j} \cdot t^k) \sigma_t^j \} \right]$$

を導入した。ここに $\pi_{\ell j}$, $\pi_{t j}$ は縦及び横ピエゾ抵抗係数， $\beta_{\ell k j}$, $\beta_{t k j}$ はその温度係数， α_k は拡散抵抗温度係数， $R(0, 0, 0)$ は基準温度 ($t=0$)，応力零時のゲージ抵抗値である。そして， $\{110\}$ 面， $\langle 111 \rangle$ 軸に関し，表面不純物濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合のピエゾ抵抗係数とその温度係数を求めた。²⁵⁾²⁷⁾³⁶⁾

以上の結果を，半導体圧力センサの応用面から考察して，次の重要な知見を得た。

- (1) センサの非直線誤差及びその温度依存性は，縦ピエゾ抵抗効果を利用する方が，横ピ

エゾ抵抗効果を利用するよりも著しく小さくできる。さらに、縦ピエゾ抵抗効果を引張応力領域で利用すれば、非直線誤差は最も小さくなる。したがって、半導体圧力センサの設計面においては、ゲージ抵抗体のうち少なくとも半径ゲージ抵抗体の組は、Siダイアフラム上で、その応力が引張応力となる領域に配置して、その縦ピエゾ抵抗効果を最大限に活用すべきである。

(2) ゲージ抵抗は2軸応力を受けるため、横ピエゾ抵抗効果の影響も受ける。横ピエゾ抵抗効果は非線形特性が大きいが、応力の与え方により非直線誤差の符号を正負任意に選び得る。したがって、ゲージ抵抗をブリッジに構成した場合、それぞれのゲージ抵抗の持つ非直線誤差がブリッジ出力として打消し合うように、ゲージ抵抗の配置を行なうことが可能である。すなわち、横ピエゾ抵抗効果は、ブリッジ出力の非直線誤差を積極的に打消すために活用すべきである。

(3) 非直線誤差の温度依存性は、ピエゾ抵抗効果応用の場合の特有な問題であり、高精度圧力センサ開発の上で大きな問題となる。この問題については、個々のゲージ抵抗の持つ非直線誤差の温度依存性を、ブリッジ回路として適切に打消し合わせる必要があり、これがSiダイアフラムセンサのゲージパタンの最適設計のポイントになる。

第3章 半導体圧力センサの非線形特性の解析

第3章 半導体圧力センサの非線形特性の解析

3.1 はじめに

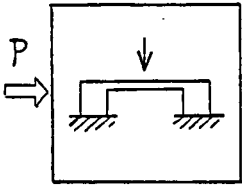
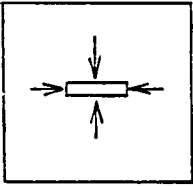
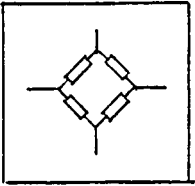
半導体圧力センサの精度を支配する大きな要因は非直線誤差の問題であり，その非線形特性の改善が，センサの高精度化には不可欠の課題である。センサの計測精度が，0.5%級から0.2%級へ，さらに0.1%級へと高精度化が要求されるに伴ない，従来の近似計算による設計手法では，センサの最適設計が不可能になってきた。センサの基本コンポーネントであるSiダイアフラムの最適ゲージパタン設計のためには，Siダイアフラムの特性を，非線形性を含めて精度良くシミュレーション出来るようにすることが，不可欠の課題となっている。

そこで本章では，Siダイアフラム圧力センサの特性を，非線形特性を含めて精度良く解析するための特性解析シミュレータの開発について述べると共に，これを利用してSiダイアフラムの非線形特性を解析し，高精度圧力センサを設計するための基礎的事項を検討する。

Siダイアフラム圧力センサの非直線誤差の要因は，表3.1に示すように

- (1) 圧力を応力に変換する過程におけるSiダイアフラム上に発生する膜応力の非線形特性
- (2) 応力をゲージ抵抗値に変換する過程におけるピエゾ抵抗効果の非線形特性

表3.1 Siダイアフラムにおける非直線誤差の要因

	圧力→応力	応力→抵抗変化	抵抗変化→電圧
変換過程			
非直線誤差の要因	膜応力による非線形特性	ピエゾ抵抗効果の非線形特性	ブリッジによる非直線誤差の相殺

に大別される。そして

- (3) ゲージ抵抗値変化をブリッジ出力電圧に変換する過程において、個々のゲージ抵抗の持つ非直線誤差を、ブリッジの差動出力として適切に打消し合えれば、圧力に対して直線性の優れた出力電圧が得られるようになる。

上記(2)項のピエゾ抵抗効果の非線形特性式については第2章で述べた。そこで本章では、(1)項に対応する非線形性を考慮したSiダイアフラムの応力解析手法を中心に検討し、これを第2章で述べたピエゾ抵抗特性式と結合して、半導体圧力センサの特性解析を定量的に行なう。

Siダイアフラムの応力解析法としては、従来、Si単結晶を均一材質と見なし、周辺固定の等方性円板の変形理論²⁹⁾を用いてきた。また応力の非線形性については、WayのExact Expansion Theory³⁰⁾を用いて解析した報告がある。¹⁵⁾³¹⁾

しかしながら、Siダイアフラムの応力解析においては、Wortman³²⁾らによって明らかにされたSi単結晶の弾性係数の結晶軸異方性を考慮しないと正確な応力解析はできない。Si単結晶の弾性係数が、結晶軸によって異なるという問題は、Siダイアフラムの応力解析に特異な課題である。したがって、従来のように、Siダイアフラムを均一材質とみなした応力解析法ではなく、弾性係数に異方性を持つダイアフラムの応力解析手法を確立する必要がある。

よって本章では、Siダイアフラムを弾性係数に結晶軸依存性のある異方性円板と見なし、また円板の大たわみ理論から応力の非線形性を求め、これによってSiダイアフラムの正確な応力解析を行なう手法を確立した。²⁵⁾ この応力解析手法は、Siダイアフラムを、等圧を受ける異方性材料から成る周辺固定円板とみなし、非線形な膜ひずみと膜応力を、円板の大変形理論から求める手法である。この結果、Siダイアフラム上に発生する応力の非線形性と結晶軸依存性が正確に求められるようになった。

次に、上記応力解析と、第2章で述べたピエゾ抵抗効果の非線形特性式を総合してSiダイアフラムの特性解析シミュレータを開発した。²⁵⁾³⁶⁾ これを用いてSiダイアフラム上のゲージ抵抗体の特性を定量的に解析する。この解析により、ゲージ抵抗体個々の特性及びブリッジ出力の非直線誤差が、Siダイアフラム上でのゲージ抵抗体位置により変化することを

理論的に明らかにする。従来、ゲージ抵抗の配置が圧力センサの精度に重要な関係を持つことが定性的には認められていたが、理論的にこれを明らかにした例はない。この解析によって、高精度な半導体圧力センサの最適ゲージ配置（最適ゲージパターン）を、理論的に求めることができるようになった。

3.2 弾性係数に結晶軸異方性を持つSiダイアフラムの変形に関する実験的考察²⁵⁾

Si単結晶のヤング率 Y とポアソン比 ν が結晶軸によって異方性を持つ問題は、³²⁾ Wortman による詳細な検討があり、図 3.1 のように示される。

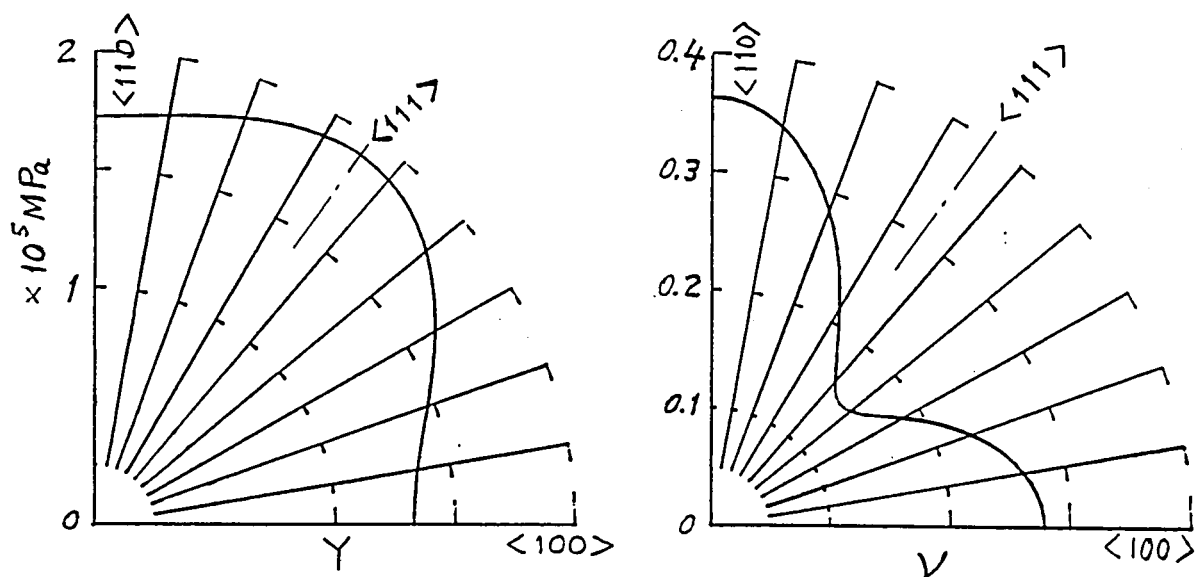
弾性係数の異方性をSiダイアフラムの応力解析面から整理すると次のようになる。

すなわち、Siダイアフラム面を直交座標系の x y 平面にとり、 x 軸と y 軸を弾性係数の対称軸に選べば、Siダイアフラム面に発生する応力とひずみの関係は次式で表わすことができる。²⁹⁾³³⁾

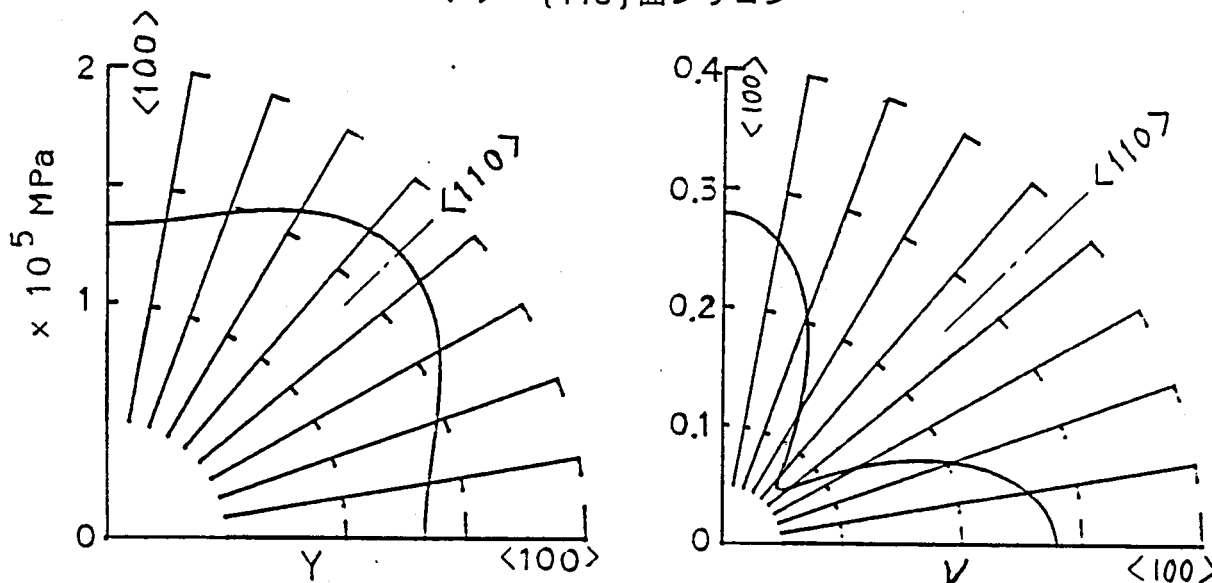
$$\left. \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & 0 \\ E_{xy} & E_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \\ \text{ここに } \sigma_x, \sigma_y : x, y \text{ 方向の応力} \\ \tau_{xy} : \text{ 剪断応力} \\ \epsilon_x, \epsilon_y : x, y \text{ 方向のひずみ} \\ \gamma_{xy} : \text{ 剪断ひずみ} \\ E_{xx}, E_{xy}, E_{yy}, G_{xy} : \text{ 弾性係数} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

$E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, G_{xy}$ について $\{110\}$ 面、 $\{100\}$ 面、 $\{111\}$ 面のSi単結晶について求めると、表 3.2 のようになる。³⁴⁾ ここで、 x 軸方向は、 $\{110\}$ 面Siでは $\langle 110 \rangle$ 軸、 $\{100\}$ 面Siでは $\langle 100 \rangle$ 軸にとって計算してあり、また $\{111\}$ 面Siの場合には異方性が無いため任意でよい。

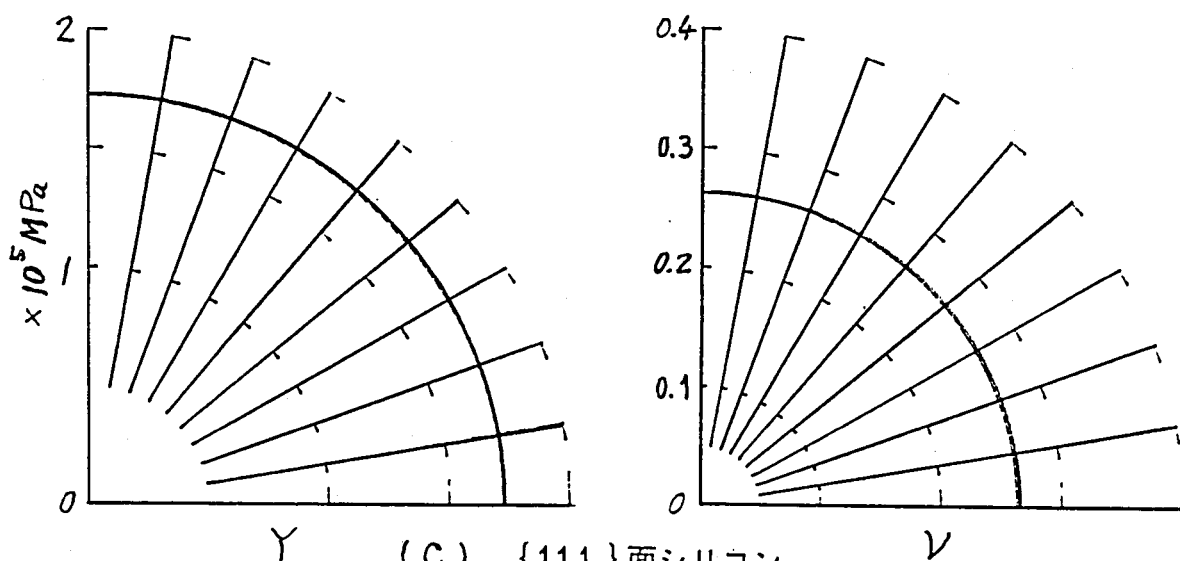
このような弾性係数の結晶軸異方性を持つSi単結晶をSiダイアフラムに加工して圧力を加えた場合に、Siダイアフラム面は同心円状の変形をするのか、それとも弾性係数の結晶軸異方性に応じた複雑な変形をするのか調べるために、以下の実験を行なった。



(a) {110}面シリコン



(b) {100}面シリコン



(c) {111}面シリコン

図3.1 シリコン単結晶のヤング率，ポアソン比の結晶軸異方性

表 3.2 シリコン単結晶の弾性係数

結晶面	X軸方向	E_{xx} (MPa)	E_{yy} (MPa)	E_{xy} (MPa)	G_{xy} (MPa)
{110}	$\langle 110 \rangle$	1.891×10^5	1.457×10^5	0.531×10^5	0.796×10^5
{100}	$\langle 100 \rangle$	1.420×10^5	1.420×10^5	0.398×10^5	0.796×10^5
{111}	任意	1.826×10^5	1.826×10^5	0.483×10^5	0.672×10^5

実験方法は、レーザー干渉形を用いた方法³⁵⁾で、その測定原理を図 3.2 に示す。

図において、He-Neレーザーから出た光線は、ハーフミラーで下方に反射され、オプティカルフラットを通してダイアフラム表面に照射される。ダイアフラム表面から反射された光線とオプティカルフラット下面で反射する光線は、両面間の距離に応じて干渉し、レーザー光の波長(632.8 nm)の $\frac{1}{2}$ 波長毎に強弱の縞模様を生じる。初めに、両面を平行に調整して干渉縞を無くし、次にダイアフラムの裏側を真空に引くと、ダイアフラムは破線のように変形するので、面間の距離すなわち光路差が半波長の偶数倍か奇数倍かに応じて同心円状の干渉縞を生じる。この干渉縞を、ハーフミラーを通して上方のカメラに結像させ、撮影する。

実験の結果得られたSiダイアフラムの変形パタンの干渉縞の測定結果を図 3.3 に示す。²⁵⁾

図において、干渉縞の1ピッチは、ダイアフラムの上下方向の変位316.4 nmを示している。図は{110}面Siダイアフラムの変形パタンの干渉縞であるが、{100}面Siダイアフラムも同様であり、図示のように、ダイアフラム中心軸に対して同心円状の変形が観測された。

この結果、Siダイアフラムの応力解析の進め方において、次の重要な結果が得られた。

- (1) Siダイアフラムは、弾性係数に結晶軸異方性があっても、均一材質から成る円板と同じく軸対称の変形をする。したがってSiダイアフラム面上のひずみは周方向に均一と見なして良い。
- (2) そしてSiダイアフラム面上の応力は弾性係数の異方性に応じて、それぞれの結晶軸で異なっていると考えられる。

この結論から、Siダイアフラムの応力解析を行なう場合には、Siダイアフラムを均一材

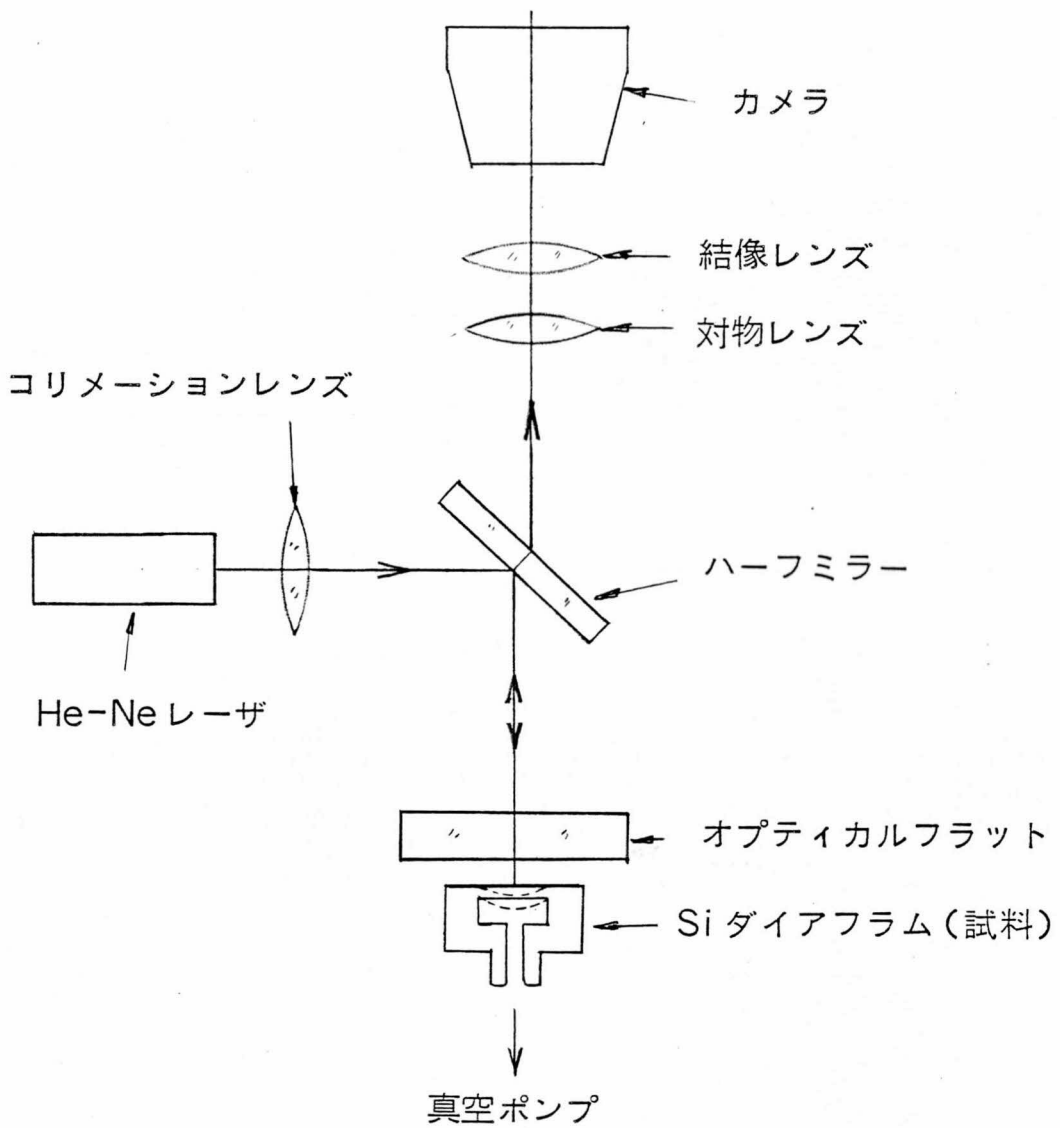


図 3.2 Siダイアフラムの変形測定方法

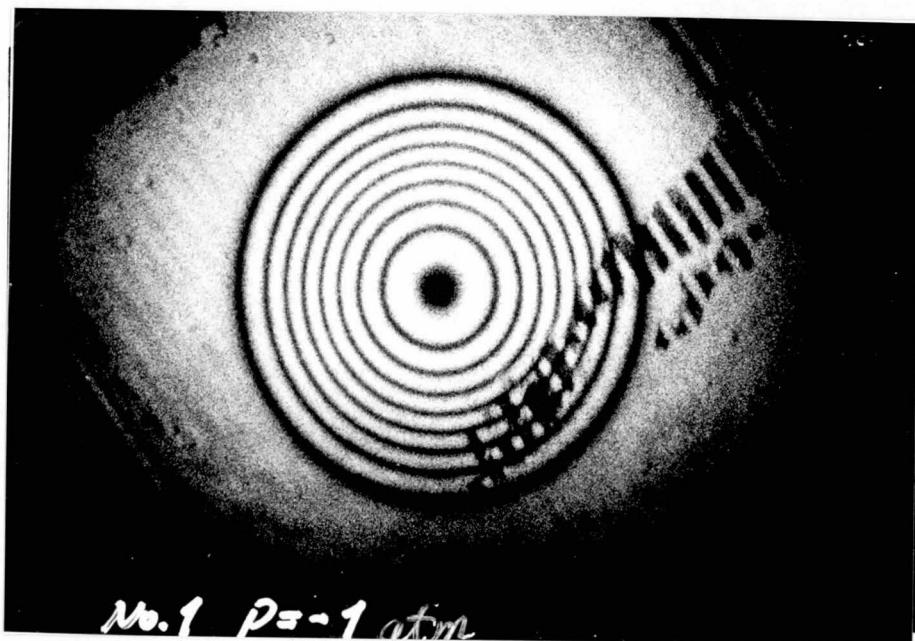


図 3.3 レーザ干渉計による {110} 面 Siダイアフラムの変形

質からなる円板と見なして、まずひずみの計算をし、しかる後、弾性係数の異方性を考慮して、(3.1)式に基づく応力の計算をすべきであるという指針が得られた。

3.3 非線形性を考慮したSiダイアフラムの応力解析²⁵⁾

圧力と応力の関係における非線形性の原因には、ダイアフラム変形の幾何学的性質から生じる非線形性(大変形による非線形性)と、材料自身の弾性特性に支配されるひずみ-応力関係の非線形性とがある。Siダイアフラムの場合には、Si単結晶が理想的な弾性特性を示すために、材料の特性に支配される要因は考えなくてよく、ここでは大変形による非線形性のみを考える。

Siダイアフラムを周辺完全固定の円板と見なして圧力を加えた場合、微小たわみの範囲では、円板表面に発生するひずみ(応力)は、圧力に対し線形と見なしてよい。この線形なひずみや応力を、それぞれ曲げひずみ、曲げ応力という。しかし、大きな出力を得るためには、できるだけ大きなひずみ(応力)をゲージ抵抗に加える必要がある。大きなひずみ(応力)は圧力に対して非線形となる。この非線形なひずみや応力を、それぞれ膜ひずみ、膜応力という。したがって、Siダイアフラムの応力解析においては、この膜ひずみ、膜応力を考慮せねばならない。そこで、以下に述べるように、Si単結晶における弾性係数の結晶軸異方性の問題と、円板の大変形理論から導かれる非線形性を考慮した応力解析手法を、Siダイアフラムの応力解析に導入した。²⁵⁾

今、Siダイアフラムの形状モデルを、図3.4のように考える。起歪部の厚み h に対して、ダイアフラム周辺の固定部厚みが十分大きいとすれば、Siダイアフラムは、周辺固定の円板として考えることができる。この等圧を受ける異方性材質の周辺固定円板に関して、まず、微小変形の場合の厳密解から線形な曲げひずみを求め、次にこの解を参考にして、大変形の場合の近似解から非線形な膜ひずみを求める。

さて、(3.1)式の応力-ひずみ関係を有する異方性円板に圧力 P が印加されたとき、微小たわみの範囲で、円板のたわみ ω に関して次の微分方程式が成立する。²⁹⁾

$$D_x \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2(D_1 + 2D_{xy}) \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = P$$

ここに $D_x = E_{xx} h^3 / 12$, $D_y = E_{yy} h^3 / 12$ } (3.2)

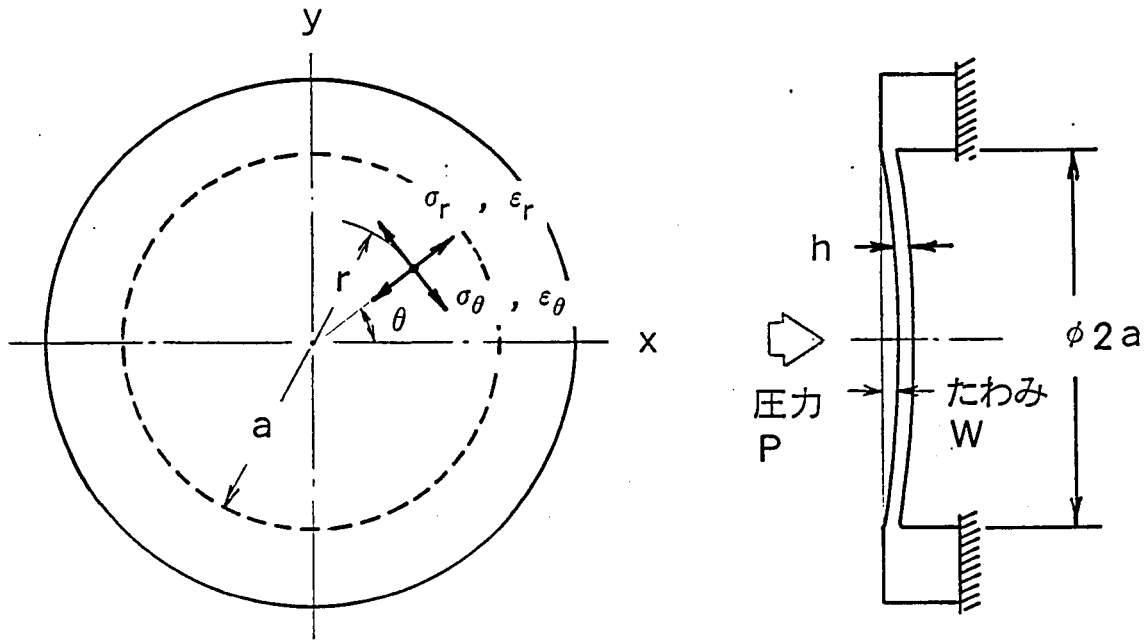


図 3.4 Si ダイアフラムの解析モデル (I)

$$D_{xy} = G_{xy} h^3 / 12, \quad D_1 = E_{xy} h^3 / 12$$

h : 円板 (ダイアフラム) の厚み

この解は, $\sqrt{x^2 + y^2} = r$ とすれば

$$\omega = \omega_p \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2$$

ここに $\omega_p = \frac{P a^4}{64 D'}$: 円板中心のたわみ

$$D' = \frac{1}{8} \{ 3 D_x + 2 (D_1 + 2 D_{xy}) + 3 D_y \}$$

r : 円板中心からの距離, a : 円板の半径

(3.3)

となる。すなわち、微小たわみ範囲では、(3.3)式から、たわみ ω は圧力 P に対し線形であることが分る。このたわみ式から、円板表面の曲げひずみ ϵ_{rb} , $\epsilon_{\theta b}$ は次式により計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rb} &= -\frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 \omega}{dr^2} \\ \varepsilon_{\theta b} &= -\frac{h}{2r} \cdot \frac{d\omega}{dr} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

次に異方性材料の大変形の場合を考える。大変形の場合、微分方程式は非線形となり、その厳密解を求めることは困難なので、ここではエネルギー法による近似解法を用いた大たわみ理論²⁹⁾からこれを求めた。

3.2節に述べたように、弾性係数に異方性のあるSiダイアフラムの変形は軸対称であったことから、異方性円板の場合も、等方性円板の大変形理論により、円板中心から r の位置における垂直方向のたわみ ω と半径方向の変位 u は、

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \\ u &= r(a-r)(C_0 + C_1 r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

で近似出来ると仮定する。ここに ω_0 は円板中心のたわみ、 C_0, C_1 は結晶方位及び a, ω_0 によって決まる定数である。

等分布荷重を受ける周辺固定の異方性円板のひずみエネルギー式は、等方性円板の場合のひずみエネルギー式、すなわちヤング率 E 、ポアソン比 ν を用いたひずみエネルギー式において、

$$\left. \begin{aligned} \bar{E} &= \frac{1}{8} (3E_{xx} + 2E_{xy} + 4G_{xy} + 3E_{yy}) \\ \bar{\nu} &= \frac{E_{xx} + 6E_{xy} - 4G_{xy} + E_{yy}}{3E_{xx} + 2E_{xy} + 4G_{xy} + 3E_{yy}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

とし、 $E/(1-\nu^2)$ を \bar{E} に、 ν を $\bar{\nu}$ に置き換えたものと同形になること³⁴⁾を考慮して、エネルギー最小原理²⁹⁾により(3.5)式における ω_0, C_0, C_1 の値を求めることができる。たとえば $\{110\}$ 面 Si の場合、表 3.2 の弾性定数を利用して(3.6)式の $\bar{E}, \bar{\nu}$ を求めれば、 $\bar{E} = 1.789 \times 10^5$ MPa、 $\bar{\nu} = 0.233$ であるので、この数値を用いて計算すると

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= 1.256 \frac{\omega_0^2}{a^3}, \quad C_1 = -1.725 \frac{\omega_0^2}{a^4} \\ \omega_0 &= \frac{Pa^4}{64 D'} \cdot \frac{1}{1 + 0.475 \left(\frac{\omega_0}{h}\right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.7)$$

となる。²⁵⁾したがって非線形な膜ひずみは、(3.5), (3.7)式を用いて、次式から計算できる。²⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{rm} &= \frac{du}{dr} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2 \\ \epsilon_{\theta m} &= \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.8)$$

Siダイアフラム上に生じるひずみ $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ は、(3.4)式で得られる曲げひずみと、(3.8)式で得られる膜ひずみを重畳したものであるから、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \epsilon_{rb} + \epsilon_{rm} \\ \epsilon_\theta &= \epsilon_{\theta b} + \epsilon_{\theta m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

で求められる。ここに添字 r はダイアフラム半径方向、 θ は接線方向、b は曲げ (bending)、m は膜 (membrane) を意味する。

ひずみと応力の関係は (3.1) 式からも計算できるが、Siダイアフラム面上では、ダイアフラム中心を原点とする極座標系 (r, θ) で考えると便利である。極座標系におけるひずみと応力の関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{r\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E_{rr} & E_{r\theta} & E_{rs} \\ E_{r\theta} & E_{\theta\theta} & E_{\theta s} \\ E_{rs} & E_{\theta s} & G_{r\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

ここに σ_r, σ_θ : ダイアフラム半径方向及び接線方向応力
 $\tau_{r\theta}, \gamma_{r\theta}$: 剪断応力及び剪断ひずみ

ここで、 $E_{rr}, E_{r\theta}$ ……等は極座標系に関する弾性係数であり、これらは (3.1) 式の x, y 座標系に関する弾性係数 E_{xx}, E_{xy} ……等をテンソル変換することにより求められる。³³⁾

3.4 Siダイアフラムの特性解析シミュレータ

前節で述べたSiダイアフラムの応力解析式と第2章で述べたピエゾ抵抗効果の非線形特性式を結合し、Siダイアフラム圧力センサの特性を総合的に計算する特性解析シミュレータを開発した。

特性解析シミュレータのフローチャートを図3.5に示す。この解析は計算機を利用して計算されるが、その要点は下記のようなものである。

(1) Siダイアフラムひずみ計算：

入力信号を圧力 P として、まずダイアフラム表面に生じるひずみ $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ を計算する。この計算では、ダイアフラム形状定数(半径 a 、板厚 h 等)とSiの結晶面に応じた弾性定数($E_{xx}, E_{xy}, E_{yy}, G_{xy}$)を入力して、(3.2)～(3.9)式により計算される。ひずみの大きさは、結晶軸異方性の無い値で計算される。

(2) Siダイアフラム応力計算：

ひずみ $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ が求められると、これをもとに(3.10)式により、Siダイアフラム表面の応力を計算する。この応力は、結晶軸により異方性を持つ。したがって、 σ_r, σ_θ は、ゲージ抵抗の配置された結晶軸を指定し、その結晶軸上の応力として計算する必要がある。

なお(3.10)式において、剪断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ は、 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ に比べて十分小さいため、これを無視している。したがって剪断応力 $\tau_{r\theta}$ は計算しない。

(3) ゲージ抵抗体に加わる応力計算：

ダイアフラム表面の応力 σ_r, σ_θ が計算されると、次にゲージ抵抗体に加わる応力 σ_ℓ, σ_t を計算する。 σ_r, σ_θ はそれぞれダイアフラム半径方向と接線方向に発生する応力であり、 σ_ℓ, σ_t はそれぞれゲージ抵抗の長手方向と直交方向に作用する応力を表示するものであるから、ゲージ抵抗の配置方向に応じて応力を変換する必要がある。

また、ゲージ抵抗体の寸法が大きくて、ダイアフラム半径に比較して無視できない場合には、ゲージ抵抗体を小さな要素抵抗に適度に分割し、それぞれの要素抵抗毎に応力を計算するようにしている。

(4) ゲージ抵抗値の計算：

σ_ℓ, σ_t が求められると、(2.11)式のピエゾ抵抗特性式により、それぞれのゲージ抵抗

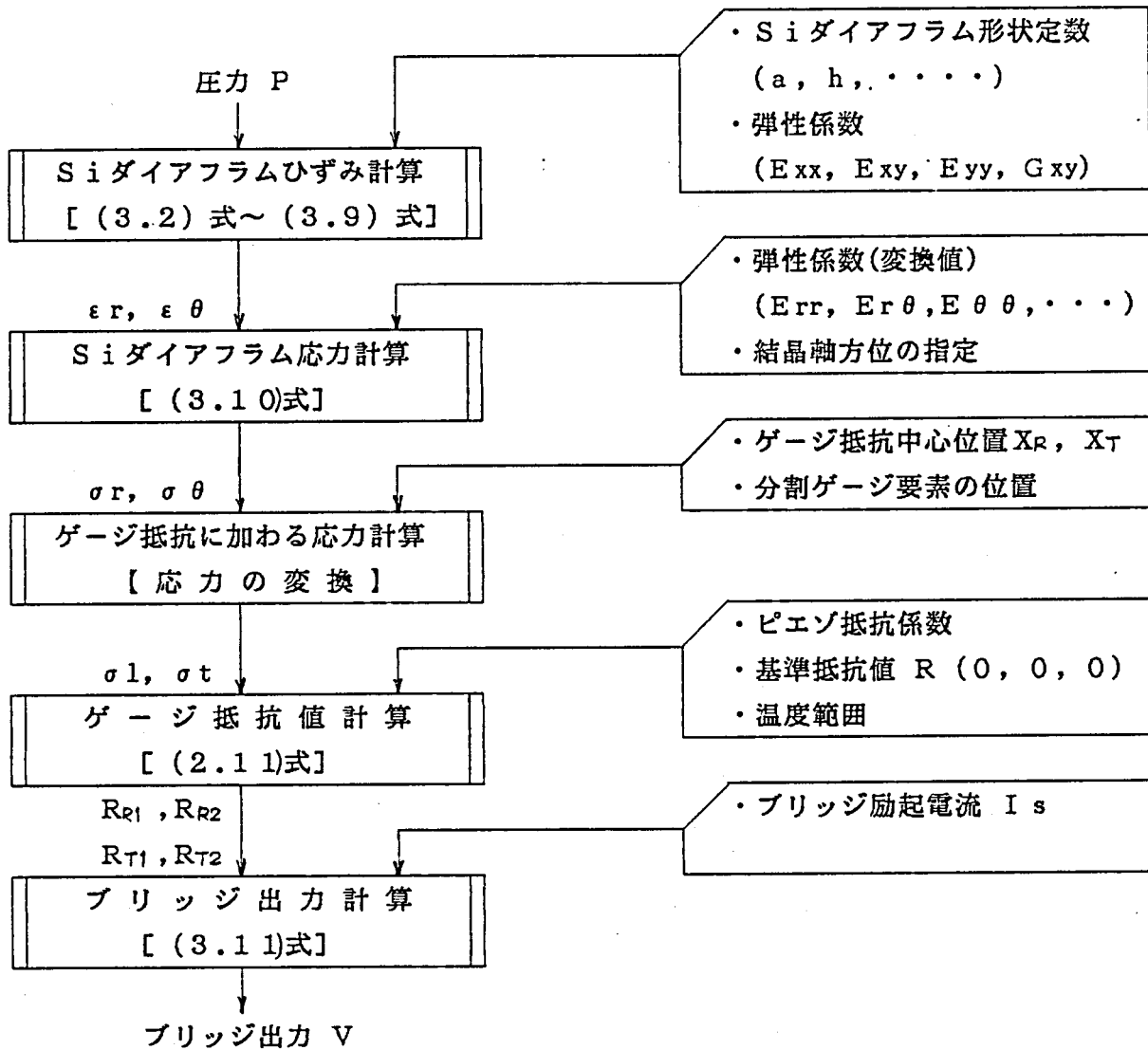


図 3.5 Siダイアフラムの特性計算フローチャート

値が計算される。この場合、ピエゾ抵抗係数は、 $\{110\}$ 面、 $\langle 111 \rangle$ 軸に関しては第2章、表2.1の値がそのまま利用できるが、他の結晶軸に関しては、これを2.2節で述べたように座標変換せねばならない。ここでは、次のような仮定のもとにこれを変換している。すなわち、ピエゾ抵抗効果の非線形特性及び温度特性は、表面不純物濃度が一定であれば、他の結晶軸に関しても相対的に同一であると仮定し、ピエゾ抵抗係数の2次及び3次係数の1次係数に対する比は結晶軸によらず同一であると見なして変換している。この仮定は理論的に証明されたものではないが、後述(第4章)のように実験結果と良く一致するので、ここではこの仮定を採用している。この変換は、シミュレータ内部で自動的に行なっている。またゲージ抵抗体を、前述のように要素抵抗に分割した場合には、要素抵抗毎に

ゲージ抵抗値を計算し、これを加算して全体の抵抗値を求める。この計算では、温度条件を任意に設定でき、必要とする温度条件下でのゲージ抵抗値が計算できるようになっている。

(5) ブリッジ出力計算：

圧力センサは、図 1.4 のように R_{R1} 、 R_{R2} 、 R_{T1} 、 R_{T2} でブリッジを構成し、ブリッジ出力 V をセンサ出力とする。ブリッジの励起法には、定電流励起法と定電圧励起法があり、いずれの場合の計算もできる。

定電流励起の場合のブリッジ出力は

$$V = \frac{R_{R1} \cdot R_{R2} - R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{R1} + R_{R2} + R_{T1} + R_{T2}} \cdot I_s \quad \left. \vphantom{\frac{R_{R1} \cdot R_{R2} - R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{R1} + R_{R2} + R_{T1} + R_{T2}}} \right\} \dots\dots\dots (3.11)$$

ここに I_s : ブリッジ励起電流

で計算でき、定電圧励起の場合のブリッジ出力は

$$V = \frac{R_{R1} \cdot R_{R2} - R_{T1} \cdot R_{T2}}{(R_{R1} + R_{T2})(R_{R2} + R_{T1})} \cdot V_s \quad \left. \vphantom{\frac{R_{R1} \cdot R_{R2} - R_{T1} \cdot R_{T2}}{(R_{R1} + R_{T2})(R_{R2} + R_{T1})}}} \right\} \dots\dots\dots (3.12)$$

ここに V_s : ブリッジ励起電圧

ここでは、定電流励起方式を採用するので、(3.11)式によりブリッジ出力の計算をする。

3.5 半導体圧力センサの非線形特性²⁵⁾

3.5.1 理論的解析²⁵⁾

前節で述べた特性解析シミュレータを用いて、Siダイアフラムセンサの基本的な特性について理論的に解析する。

理論解析に当り、解析の例題とするSiダイアフラムモデルを図 3.6 に示す。

図のモデルは、{110}面Si結晶を用いた例であり、縦ビエゾ抵抗係数 π_l が最大となる<111>軸に沿って半径ゲージ R_{R1} 、 R_{R2} を配し、横ビエゾ抵抗係数 π_t が最大となる<110>軸から45°方向に沿って接線ゲージ R_{T1} 、 R_{T2} を配置している。このゲージパターンについて

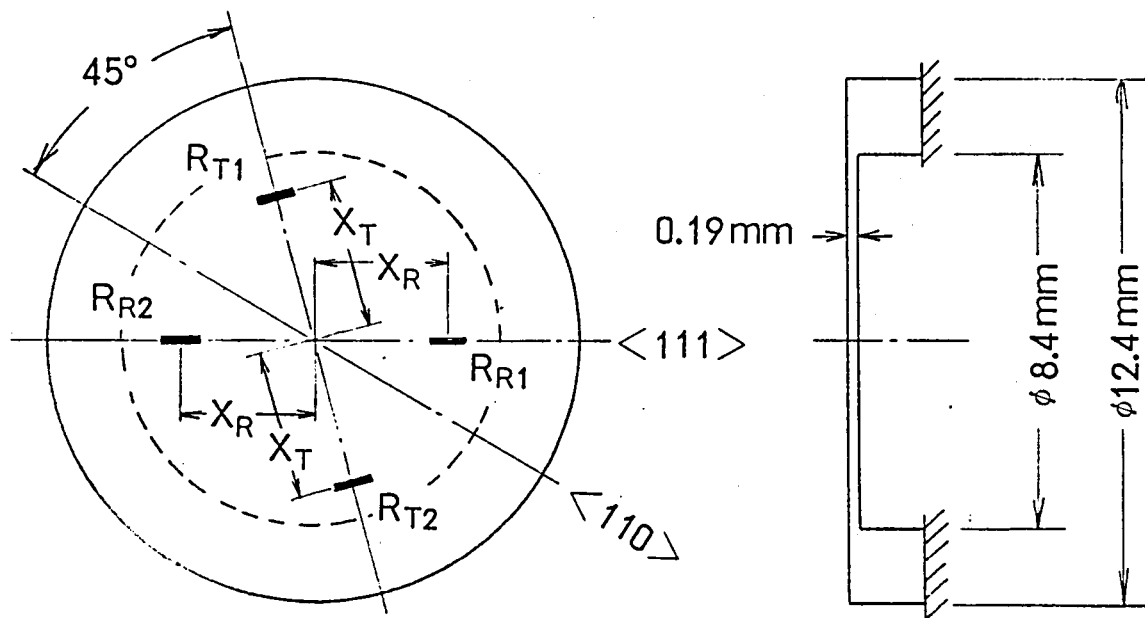


図 3.6 Siダイアフラムの解析モデル(Ⅱ)

の詳細な考察は第4章で述べるので、ここでは省略するが、{110}面Si単結晶は、ピエゾ抵抗係数並びに機械的弾性係数が、共に複雑な結晶軸異方性を持つため、特性解析シミュレータによる理論解析の例題として好適なサンプルである。

Siダイアフラムへ加える圧力は0.5MPaとし、これに適するようにSiダイアフラムの形状を決め、図示のようにダイアフラム直径 $2a=8.4\text{mm}$ 、板厚 $h=0.19\text{mm}$ とした。なお圧力は、Siダイアフラム表面(ゲージ抵抗の形成面)から印加するものとする。

(1) Siダイアフラムのひずみ分布

まず、図3.6のSiダイアフラムモデルに、0.5MPaの圧力を印加したときのひずみを特性解析シミュレータによって求めた。計算結果を図3.7に示す。ひずみ ϵ_{rb} 、 $\epsilon_{\theta b}$ は圧力に対して線形な曲げひずみであり、ダイアフラム中心($r/a=0$)で 465×10^{-6} の圧縮ひずみが発生している。ダイアフラム端部($r/a=1$)で ϵ_{rb} は最大となり、 930×10^{-6} の引張りひずみが生じる。Si結晶は、通常 6000×10^{-6} 以下のひずみでは破壊しないので、最大ひずみ量 930×10^{-6} はセンサとして $1/6$ 以上の安全率をみた妥当な値といえる。この状況で非線形な膜ひずみ ϵ_{rm} 、 $\epsilon_{\theta m}$ はほぼSiダイアフラム全面にわたって最大 50×10^{-6} 程度発生しており、これがセンサの非線形特性の1つの原因となる。この膜ひず

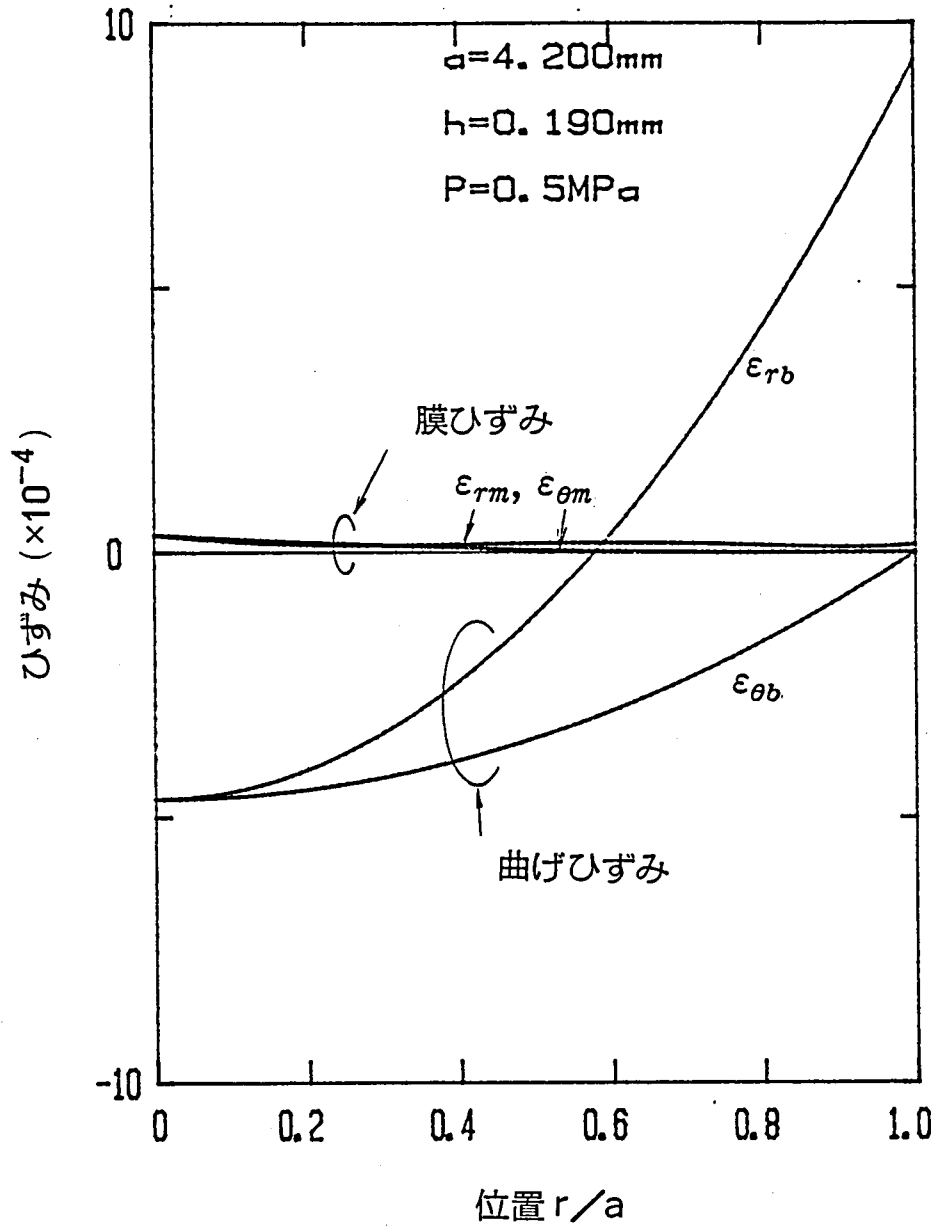


図3.7 Siダイアフラム表面のひずみ分布(計算値)

みについては、従来の線形近似の応力解析手法では定量的に得られない。

なお、このひずみには、結晶軸による異方性はなく、Siダイアフラムの全円周方向とも、半径方向に沿って図示のように分布する。

(2) Siダイアフラムの応力分布

Siダイアフラム上のひずみ分布が分ったので、次に応力分布をシミュレータにより計算した。

先に述べたように、応力はSiの結晶軸に応じた異方性を持って分布するはずである。そこで図 3.6 にて、半径ゲージ抵抗を配置している $\langle 111 \rangle$ 軸、及び接線ゲージ抵抗を配置している $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向の軸に沿って応力分布を計算した。図 3.8 は $\langle 111 \rangle$ 軸に沿った応力分布、図 3.9 は $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に沿った応力分布の計算値である。

両者を比較すると、明らかに異なった応力分布となっている。すなわち、同一なSiダイアフラムでありながら、弾性係数の結晶軸異方性のために、 $\langle 111 \rangle$ 軸と $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向では応力が異なっている。特に、ダイアフラム中心 ($r/a=0$) において、ひずみ ϵ_{rb} , $\epsilon_{\theta b}$ は図 3.7 のように同一値をとるにもかかわらず、図 3.8 の場合には、応力 σ_{rb} , $\sigma_{\theta b}$ は異なった値をとることが特徴的である。この理由は、図 3.1 (a) において、 $\langle 111 \rangle$ 軸の Y と ν の値が、 $\langle 111 \rangle$ 軸と 90° 回転した軸方向の Y と ν の値と異なることから理解できよう。ダイアフラム中心で σ_{rb} と $\sigma_{\theta b}$ が一致するのは、 $\{110\}$ 面 Si の場合、図 3.9 の $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向の軸上のみである。

従来のようにSiダイアフラムを均一材料とみなした応力解析、すなわち弾性係数の平均値を用いた応力解析では、このような応力分布の解析は不可能であった(第1章、図 1.2 と比較のこと)。本解析手法によってSiダイアフラムの応力分布が正確に計算できるようになった。

(3) ゲージ抵抗の特性

以上、Siダイアフラム表面の応力分布が明らかになったので、次にピエゾ抵抗効果によるゲージ抵抗の挙動を、シミュレータにより解析する。

ゲージ抵抗体は、図 3.6 のように、 $\{110\}$ 面 $\langle 111 \rangle$ 軸及び $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に配置されている。そこで、ダイアフラム中心から半径ゲージ抵抗 R_{R1} , R_{R2} の距離を X_R 、接線ゲージ抵抗 R_{T1} , R_{T2} の距離を X_T とし、 X_R , X_T をパラメータとして個々のゲージ抵

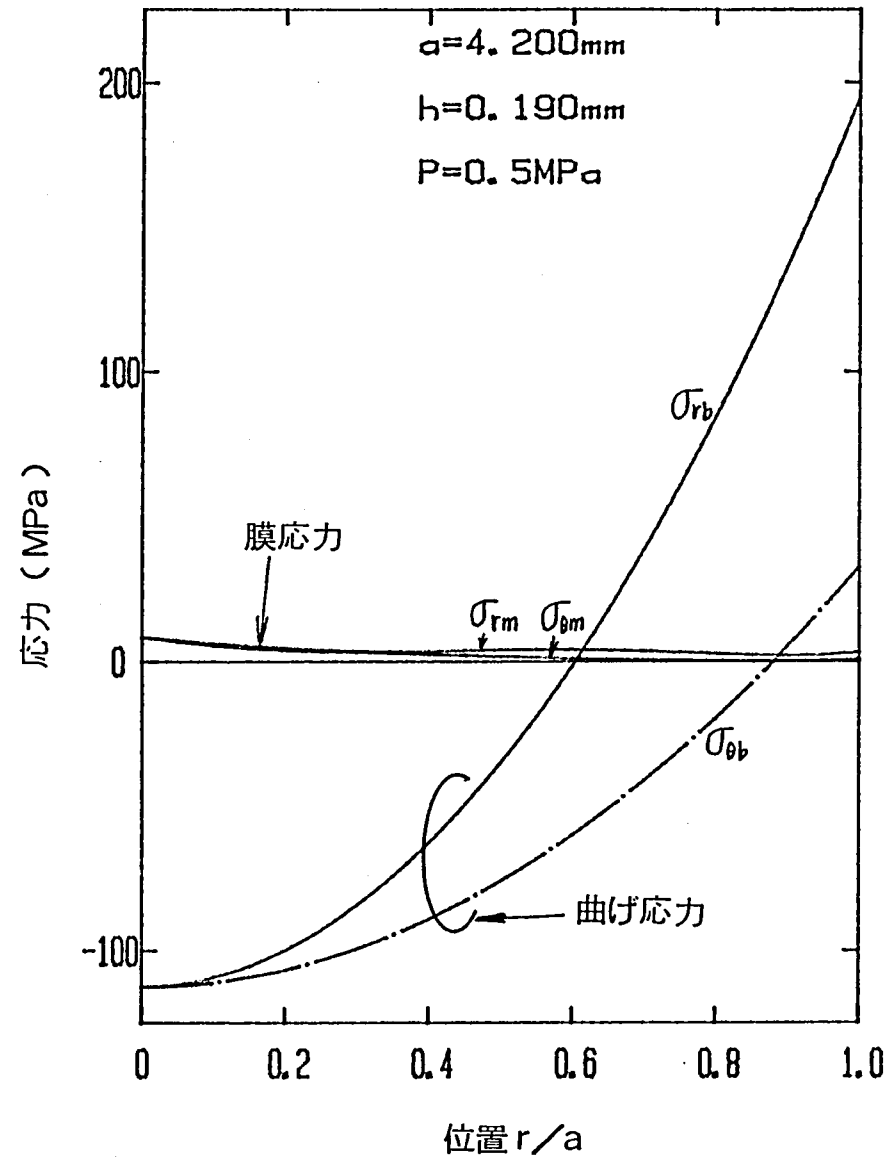
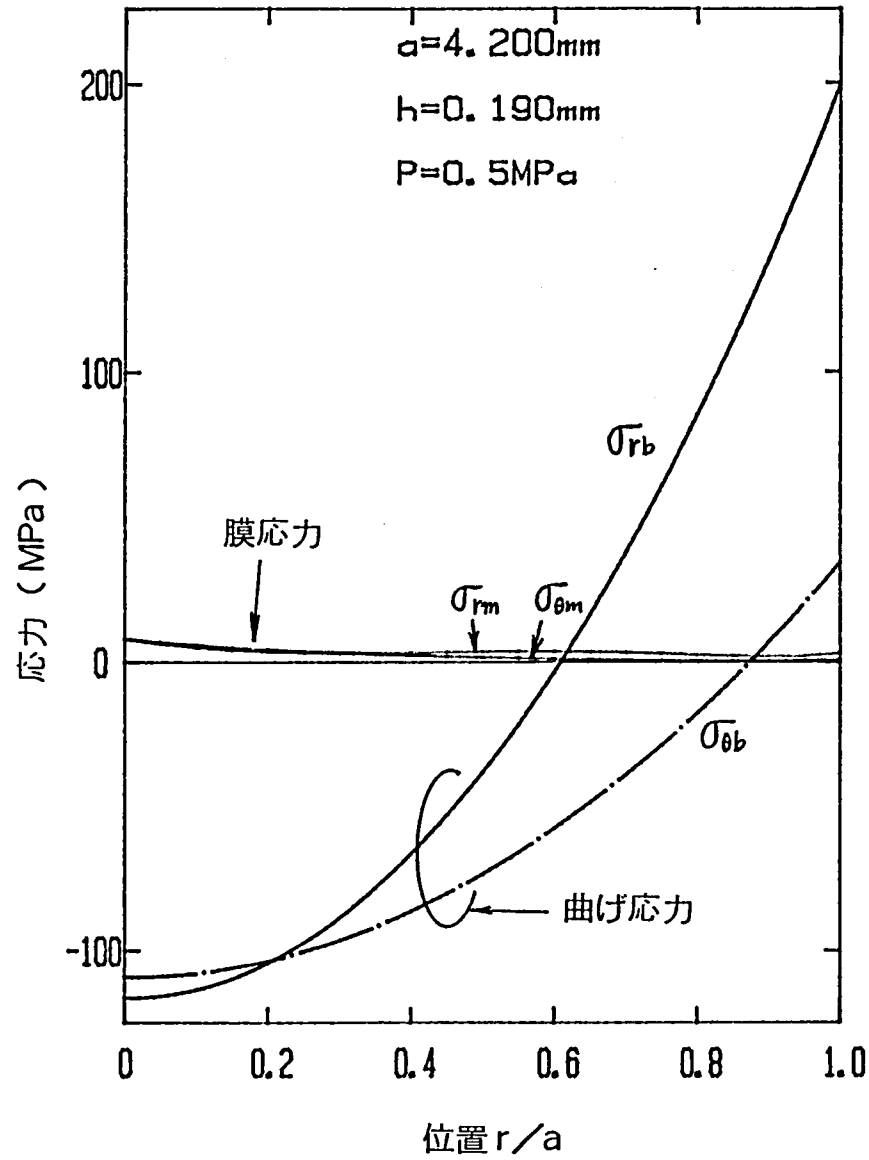


図 3.8 {110} 面 Si ダイアフラム $\langle 111 \rangle$ 軸の応力分布 (計算値)

図 3.9 {110} 面 Si ダイアフラム $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向の応力分布 (計算値)

抗の特性を計算する。なお温度条件は、基準温度 20°C ($t=0$) とし、印加圧力は 0.5MPa とする。

まず、個々のゲージ抵抗の抵抗変化率の位置依存性の計算結果を図 3.10 に示す。

特徴的なことは、半径ゲージ抵抗の抵抗変化率は、図 3.8 の応力分布曲線に比較的強い相関を示しているのに対し、接線ゲージ抵抗の抵抗変化率は、負でほぼ一定の値を示すことである。

次に、この抵抗変化がどのような非直線誤差を示すか計算した結果を図 3.11 に示す。

半径ゲージ抵抗の抵抗変化率は図 3.10 のように $X_R/a=0.48$ の位置で零となるので、非直線誤差は相対的に $X_R/a=0.48$ の点で無限大となる。また $X_R/a=0.48$ を境として、半径ゲージ抵抗の非直線誤差の符号が反転していることが分る。

(4) ブリッジ出力の非直線誤差

次に、半径ゲージ抵抗 R_{R1} , R_{R2} と接線ゲージ抵抗 R_{T1} , R_{T2} でブリッジを構成した場合の特性を解析する。

ブリッジ出力は感度が大きい程良い。したがって図 3.10 において、半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗の抵抗変化率が互に逆符号であり、かつ夫々の抵抗変化率が大きくなる位置にゲージ抵抗を配置すれば有利であることになる。したがって半径ゲージ抵抗の位置は、 $X_R/a \rightarrow 1$ 、すなわちダイアフラム端部に近い程望ましい。一方接線ゲージ抵抗の位置は、ブリッジ出力に大きな影響は与えないことが分る。

そこで、半径ゲージ抵抗の位置をダイアフラム端部の $X_R/a=0.9$ に固定して、 X_T/a を変化させたときのブリッジ出力の非直線誤差をシミュレータにより計算すると図 3.12 のようになる。この結果、非直線誤差が零となる最適な接線ゲージ位置 X_T/a が、 $X_T/a=0.26$ 近傍と 0.8 近傍の 2 点に存在することが明らかになった。

このような理論解析によりゲージ抵抗の最適位置を求めるということは、従来の近似計算では不可能であったことであり、このシミュレータにより Si ダイアフラムの最適ゲージパタンの設計が可能となることを示している。最適ゲージパタンの詳細な考察については、第 4 章で行なうので、ここでは、以上の解析までにとどめておく。

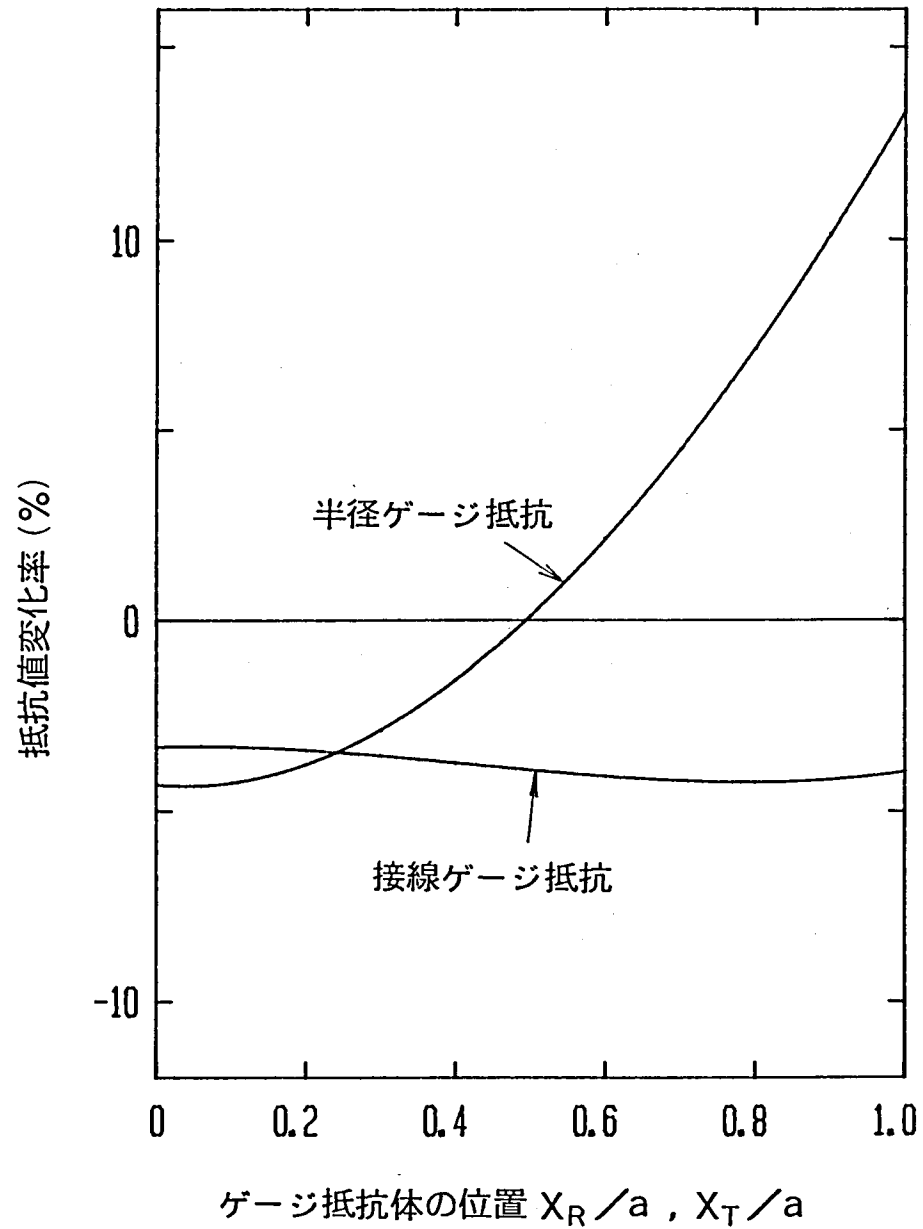


図 3.10 ゲージ抵抗変化率の位置依存性 (計算値)

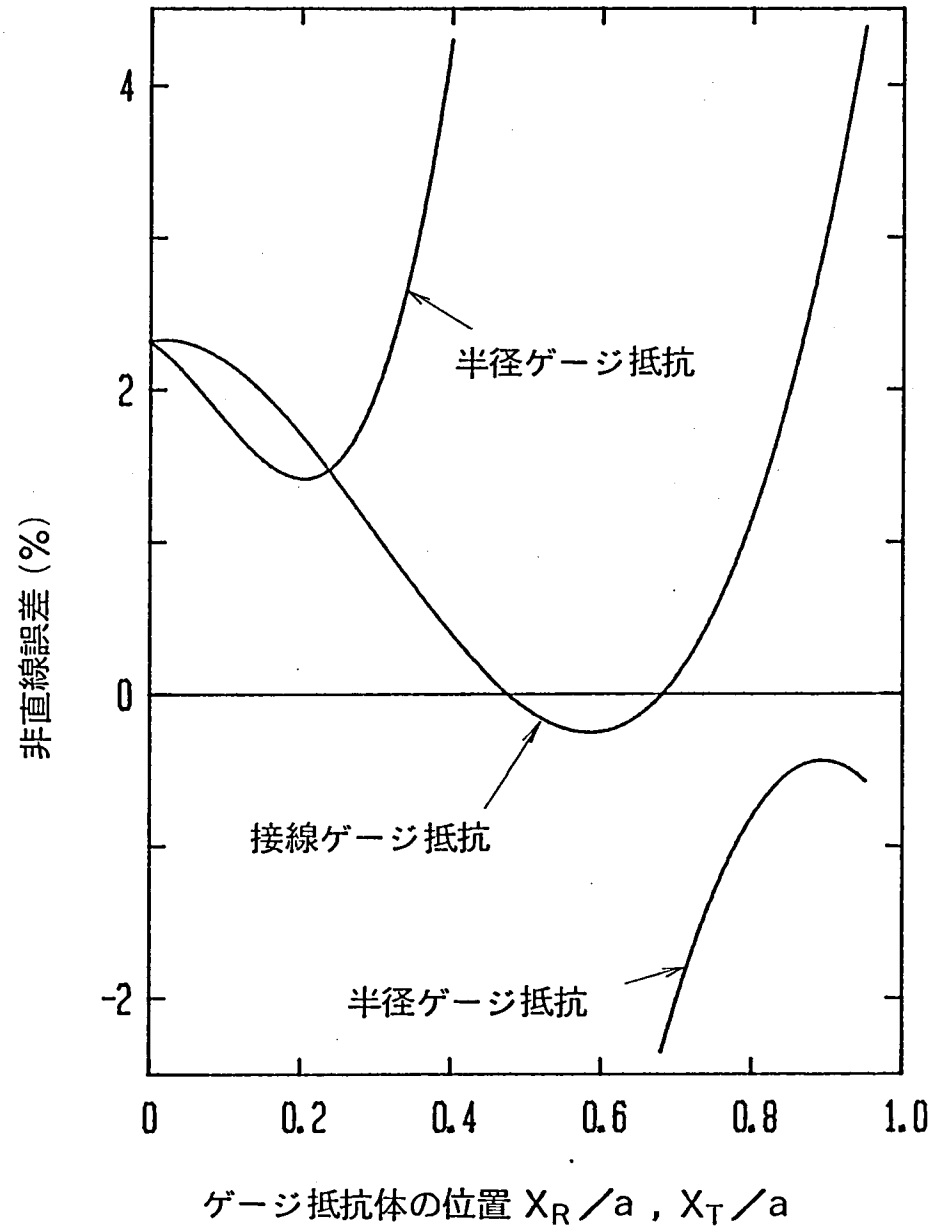


図 3.11 ゲージ抵抗変化の非直線誤差の位置依存性 (計算値)

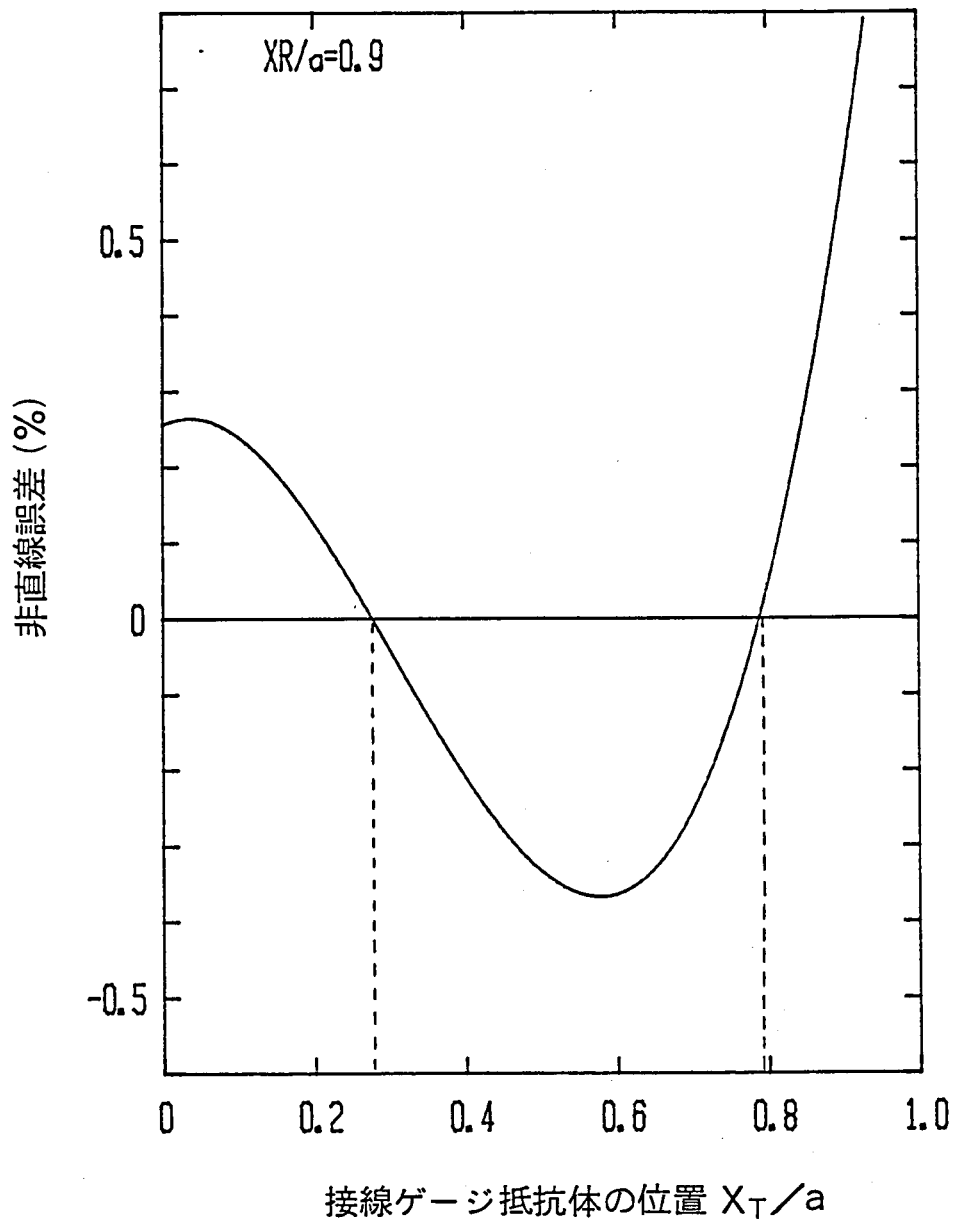


図 3.12 ブリッジ出力非直線誤差のゲージ位置依存性（計算値）

この解析の結果は、従来Siダイヤフラム設計において明らかにし得なかった重要な2つの知見を与えるものである。すなわち、

- (1) Siダイヤフラムセンサの非直線誤差は、ゲージ抵抗の位置に依存して変化すること。
- (2) 非直線誤差が零となる最適なゲージ位置が存在し得ること。

である。

3.5.2 実験による検証

以上特性解析シミュレータによる理論解析を行なったので、この解析精度を確認するため、以下の実験を行なった。

(1) 実験方法：

実験のために試作したSiダイアフラムのモデルを図 3.13(a), (b)に示す。

同図(a)は、 $\{110\}$ 面Siの $\langle 111 \rangle$ 軸に沿って、ダイアフラム中央線上にゲージ抵抗体を連結して形成したものであり、ゲージ抵抗体成分は図中の拡大図のように0.4mmの長さで、ダイアフラム半径方向に連続して配置したものである。各抵抗成分は、Al電極によって、ダイアフラム周辺に引き出され、ワイアボンディングにより外部に取り出せるようにしてある。このモデルの目的は、 $\langle 111 \rangle$ 軸上に配置したゲージ抵抗特性が、ダイアフラムの半径方向の位置にどのように依存するのか、これを確認するためのものである。

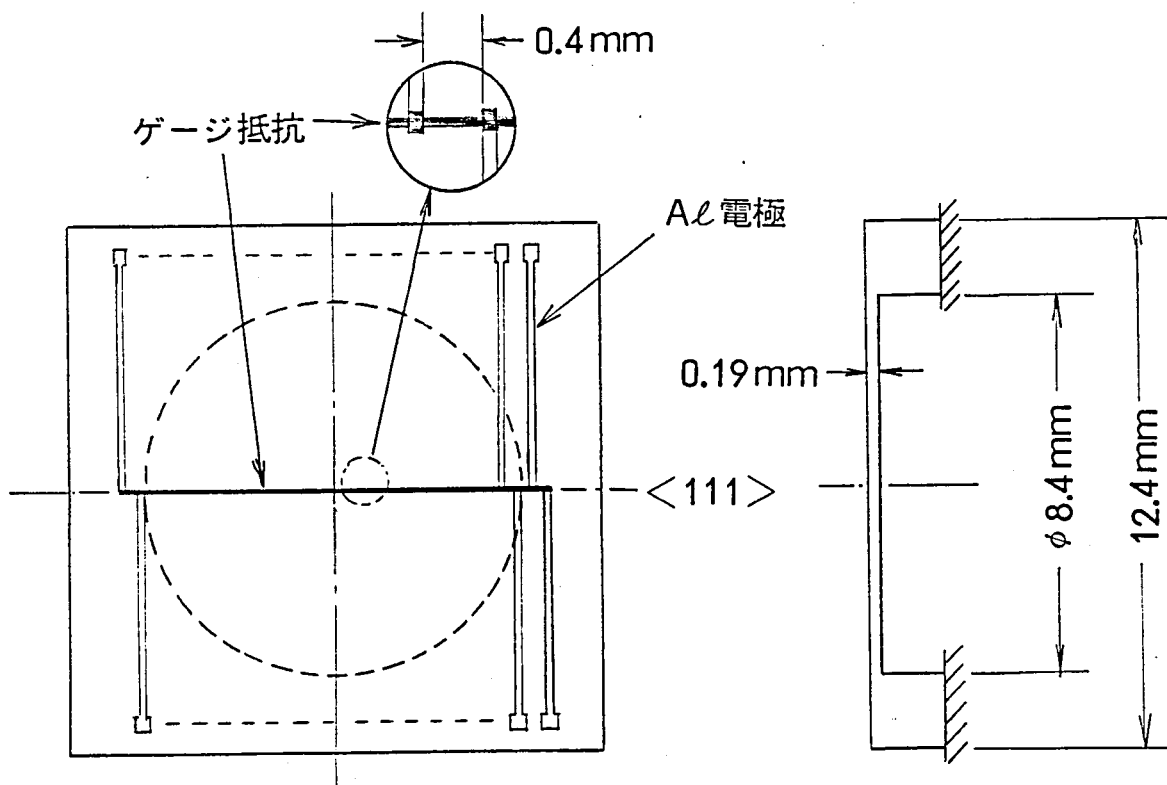
これに対して同図(b)は、特性解析の例題として取り上げたSiダイアフラムの完全なサンプルとして試作したものである。このサンプルは $\{110\}$ 面Siを利用し、 R_{R1} と R_{R2} を $\langle 111 \rangle$ 軸に沿って配置し、 R_{T1} 、 R_{T2} を $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に沿って配置したものである。ゲージ抵抗位置 X_R 、 X_T は、図中に示すように4通りのものを試作した。

いずれのSiダイアフラムも、半径 $a=4.2\text{mm}$ 、板厚 $h=0.19\text{mm}$ とし、理論解析の条件と同一とした。

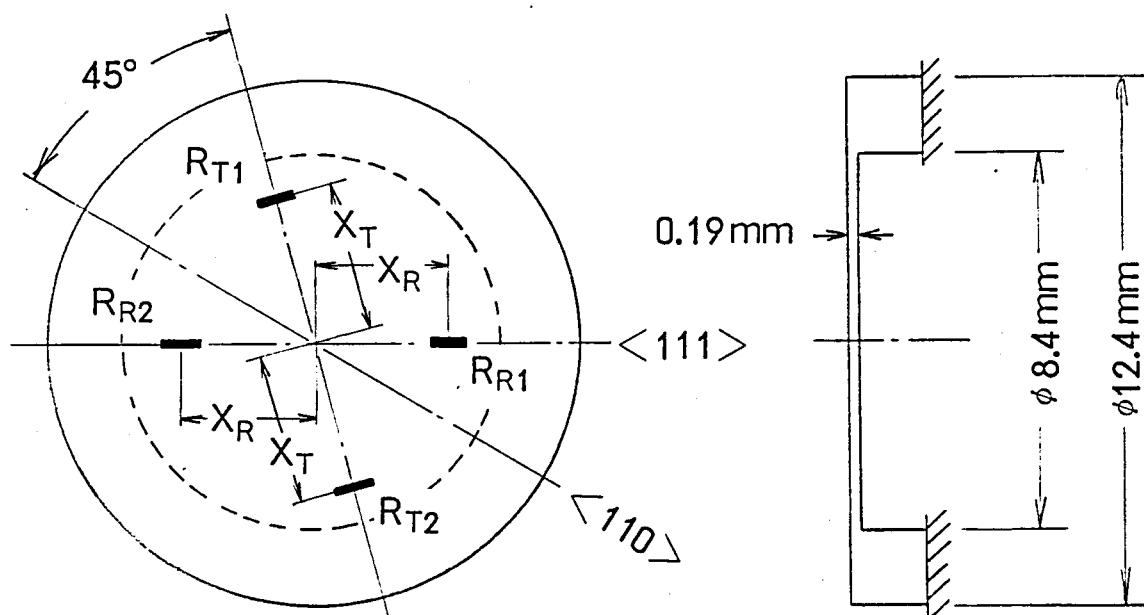
図 3.14 は実験方法の概要を示す図である。

Siダイアフラムを支持体に接合し、これを測定治具内に固定し、ゲージ抵抗体をワイアボンディングによりリード線に接続して計測装置に導びく。重錘式の圧力基準器によって、圧力をSiダイアフラム上面から印加する。重錘を取りかえることによって0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5MPaの圧力が $\pm 0.01\%$ 以内の精度で印加できる。

また測定治具は精密恒温槽に入れ、センサ温度を $20^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ に保持した条件で測定した。ゲージ抵抗値の温度変化は $0.25\%/^\circ\text{C}$ もあるので、前記条件で測定精度 $\pm 0.025\%$ が期待できる。また測定治具自身は、写真のような銅製であるため、熱容量が十分に大き



(a) ゲージ抵抗単体特性評価用サンプル



#	1	2	3	4
X_T/a	0.1	0.25	0.45	0.75
X_R/a	0.9	0.9	0.9	0.9

(b) ブリッジ特性評価用サンプル

図 3.13 Si ダイアフラムの形状とゲージパターン (実験用)

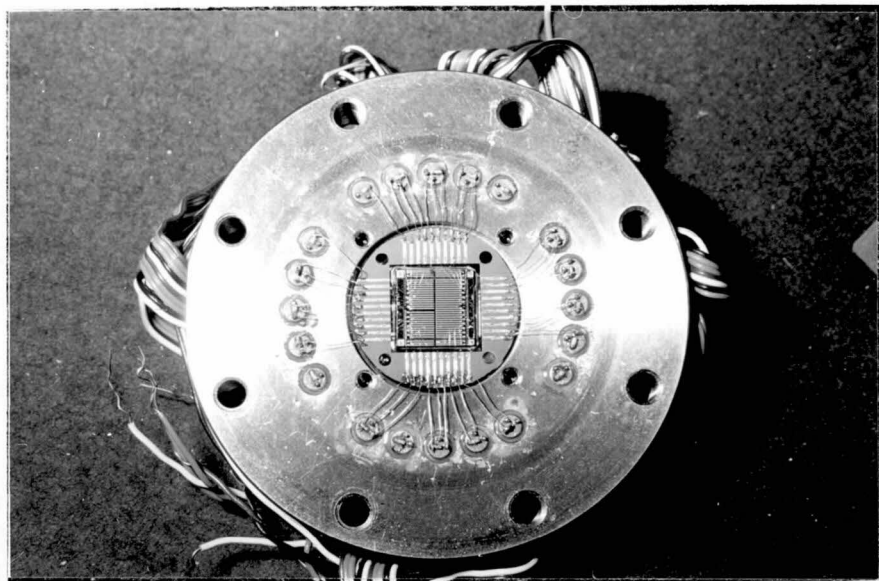
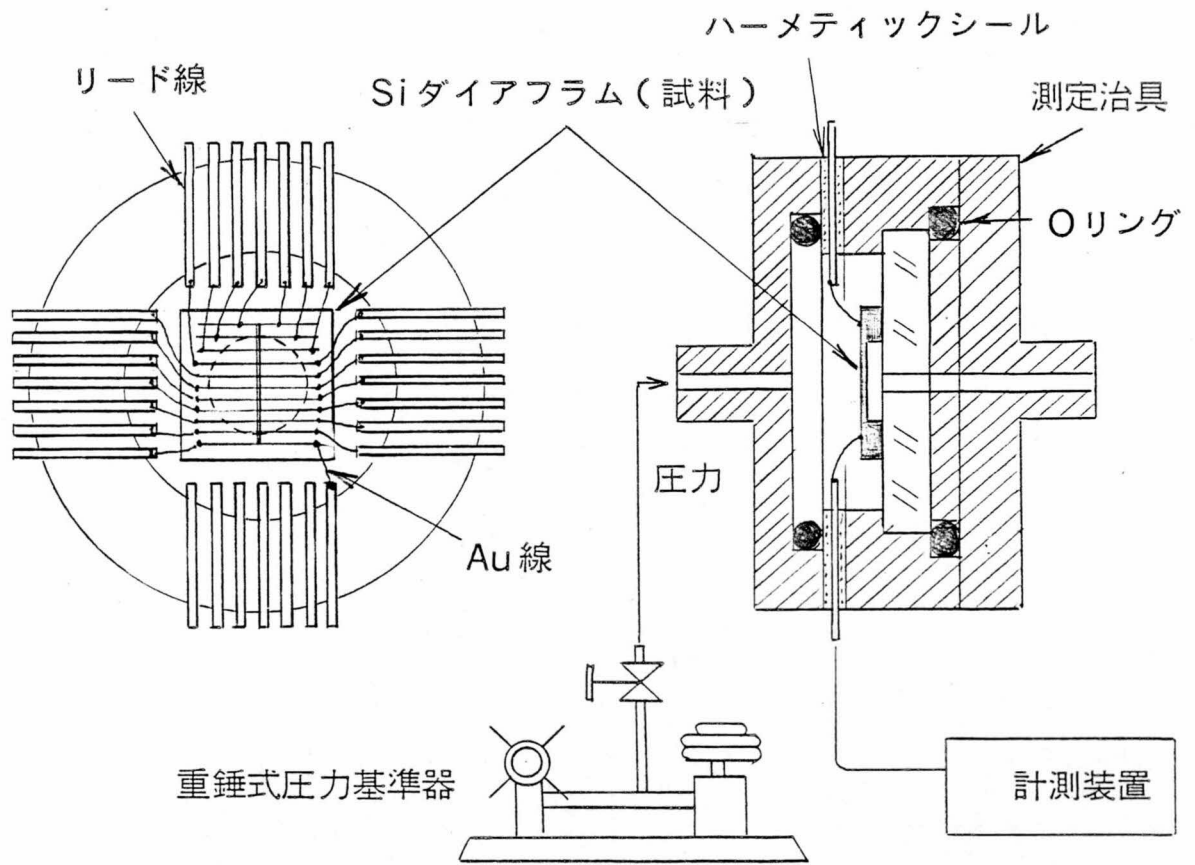


図 3.14 特性の測定方法と測定治具

い。このため、測定治具に内蔵したSiダイアフラムが受ける温度変化は、測定時間（約1分）内でさらに小さいと考えてよい。

(2) 実験結果：

図 3.13 (a) の Si ダイアフラムの実験から、 $\langle 111 \rangle$ 軸に沿った半径ゲージ抵抗の特性が、ダイアフラム中心から端部に至るまで、0.4mm ピッチで求められる。又同図(b)の実験からは、 $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に沿った接線ゲージ抵抗の特性が、 $X_T = 0.1, 0.25, 0.45, 0.75$ の 4 点で求められる。

したがって、まず、圧力に対するゲージ抵抗値変化を、各ゲージ抵抗について測定した。図 3.15 は、圧力 0.5MPa を印加したときのゲージ抵抗の変化率をプロットした図である。

Si ダイアフラム上に発生するひずみ及び応力の分布は、ゲージ抵抗の抵抗変化として間接的に測定できるので、この測定値は、理論解析の図 3.10 を直接求めたものであると同時に、図 3.7 ~ 3.9 のひずみと応力の計算結果の精度を間接的に実験で求めたものといえる。図 3.15 から分かるように、実験値と理論解析値は十分良い一致を示しており、圧力に対するゲージ抵抗変化率は正しく計算されていると考えられる。

次に、このゲージ抵抗値変化の非直線誤差を図 3.16 に示す。非直線誤差は、0.5MPa の圧力印加時の抵抗変化率をそれぞれフルスケール値として、これに対する%値で示している。このデータは、図 3.11 の理論解析に対する実験結果を示すものである。

実験値と理論計算値は、ダイアフラム端部に近いゲージ抵抗体では極めて良く一致しているが、ダイアフラム中心部に近づくにつれ、若干差が生じている。

この理由としては、第 2 章のビエゾ抵抗効果の特性式 (2.10) 式における $\pi_{\ell t m n}$ の影響ではないかと思われる。すなわち $\pi_{\ell t m n}$ は σ_{ℓ}, σ_t が同時に加わった場合の $\pi_{\ell j}, \pi_{t j}$ の変調を示す係数と考えられるが、現象論的に、これを分離して求めることはできないため、これを省略して (2.11) 式により計算している。この相乗項は、 σ_{ℓ}, σ_t の共に大きくなるダイアフラム中心近傍で影響を与えるであろうと第 2 章で述べてあるが、上記実験データはこれを実証するものと考えられる。 $\pi_{\ell t m n}$ が非直線誤差に及ぼす影響を詳細

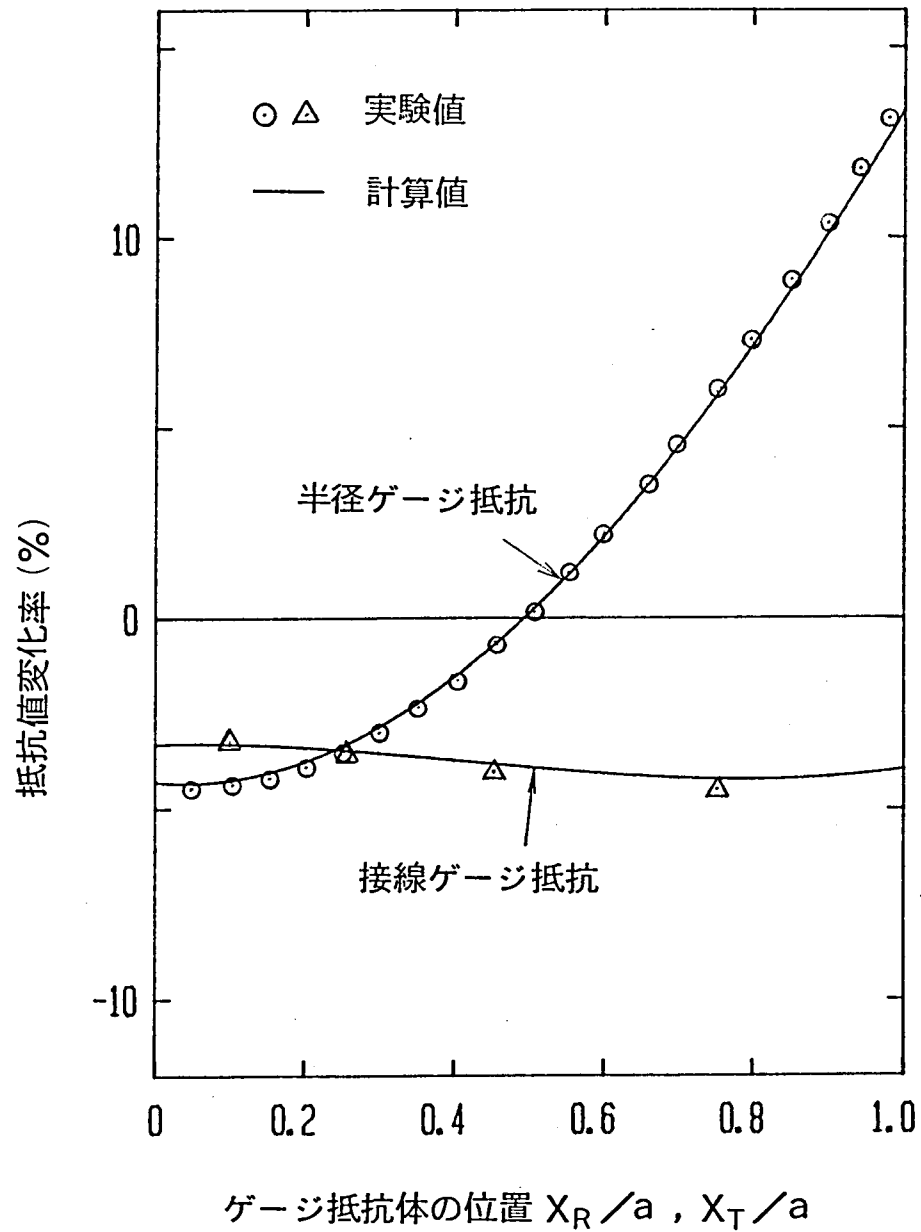


図 3.15 ゲージ抵抗変化率の位置依存性

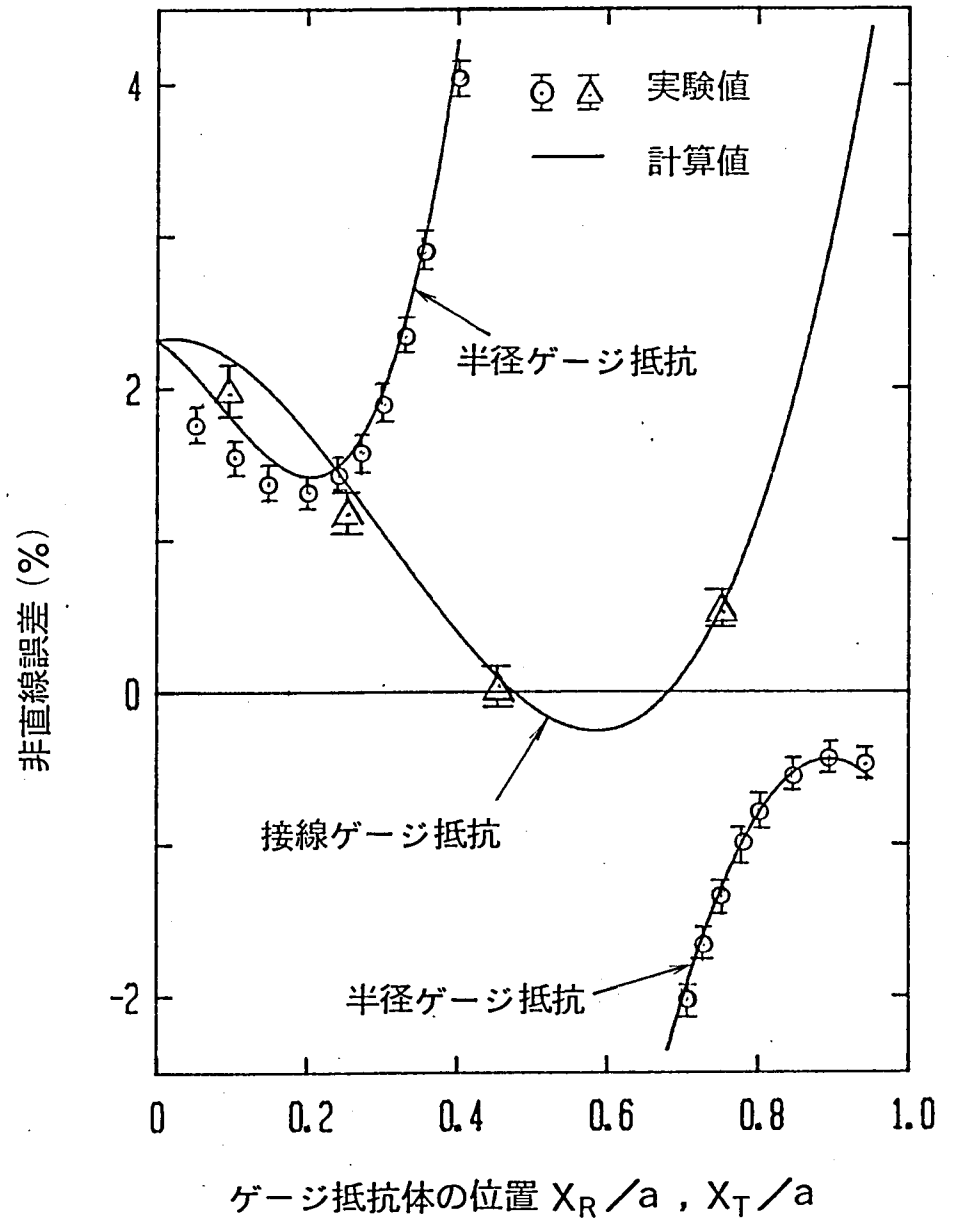


図 3.16 ゲージ抵抗変化の非直線誤差の位置依存性

に求めるのは今後の課題であるが、工学的に見た場合、この程度の解析誤差は許容してさしつかえないと考えられる。

以上の実験によって、ゲージ抵抗体個々の特性が把握できたので、図 3.13(b)のSiダイアフラムを用いて、ブリッジ特性の非直線誤差を測定した実験結果を図 3.17に示す。

ブリッジ出力は、半径ゲージ抵抗の位置を $X_R/a=0.9$ に固定し、接線ゲージ抵抗の位

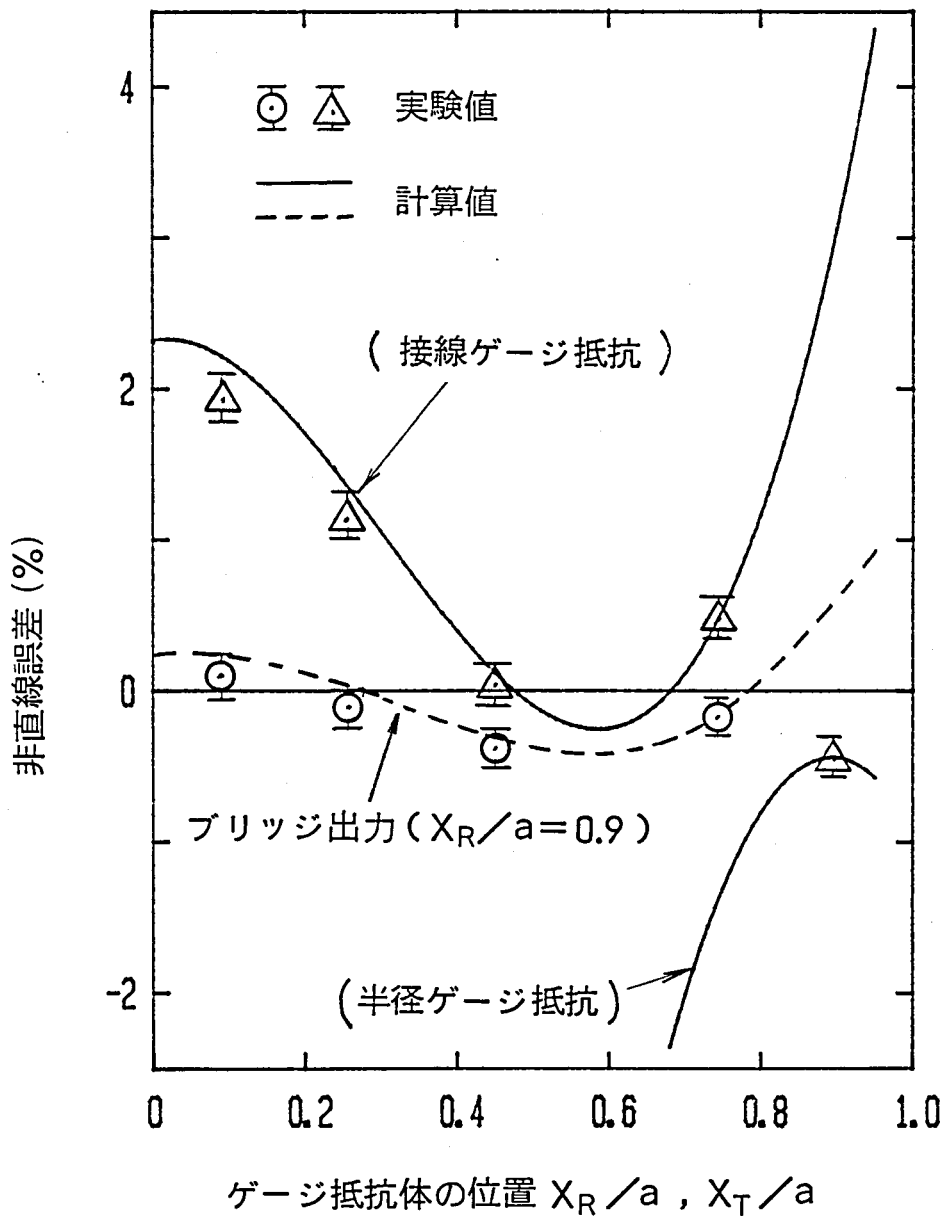


図 3.17 ブリッジ出力非直線誤差のゲージ位置依存性

置を $X_R/a=0.1, 0.25, 0.45, 0.75$ の 4 通りに変えて測定しており，その非直線誤差は，理論計算と良く一致している。ただし， X_T/a がダイアフラム中心に近づくにつれ，理論計算値と実験値の間に差が生じているが，これは前述した理由と考えるとよい。

なお図中には，参考のため，半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗個々の非直線誤差もプロットしてある。このように個々のゲージ抵抗体の持つ比較的大きな非直線誤差は，ブリッジ出力としては相殺され，高い精度が得られることが分る。

以上の実験により，Siダイアフラムの特性解析シミュレータの解析精度は十分高いことが分り，Siダイアフラムのゲージパタンの設計が理論的に可能であることが実証された。

3.6 まとめ

本章では，高精度な半導体圧力センサを設計するために必要とする，特性解析シミュレータの導入と，これを利用して，Siダイアフラムの非線形な特性を解析した結果について述べた。これを要約すると次のようになる。

- (1) 特性解析シミュレータは，Siダイアフラムの応力解析とピエゾ抵抗効果の非線形特性式を結合したものである。応力解析には，Si単結晶における弾性係数の結晶軸異方性を考慮し，またダイアフラムの非線形な膜ひずみと，膜応力を，円板の大変形理論から求める手法を導入した。この手法を用いて， $\{110\}$ 面 Si ダイアフラムに発生するひずみ²⁵⁾と応力の正確な分布を求めた。
- (2) Siダイアフラムの変形の実験的考察から，弾性係数の結晶軸異方性を持つダイアフラムも，均一材質からなる円板と同じく軸対称の変形をすることを明らかにした。したがって，Siダイアフラム表面のひずみには結晶軸異方性がなく，応力に結晶軸異方性があることを明らかにした。²⁵⁾
- (3) 特性解析シミュレータにより，Siダイアフラム上のゲージ抵抗体の特性を解析した結果，圧力に対するゲージ抵抗変化の非直線誤差は，ゲージ抵抗体の配置によって，大きく変化することが明らかになった。また非直線誤差は定量的に解析でき，計算値と実験値は極めて良く一致し，特性解析シミュレータの精度が十分高いことを実証できた。²⁵⁾

(4) ブリッジ出力の非直線誤差は，Siダイアフラム上に配置する半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗のそれぞれの位置に大きく依存することを明らかにした。そして非直線誤差を零とし得る最適なゲージ位置が，Siダイアフラム上に存在し，かつ，その位置を定量的に求め得ることを明らかにした。すなわち，Siダイアフラムのゲージ配置（ゲージパターン）の最適化によって，直線性の優れた高精度な圧力センサを設計し得る可能性があることを定量的に示した。²⁵⁾このような理論解析によりゲージ抵抗の最適配置を求める方法は，従来の近似計算では不可能であったことである。

以上，Siダイアフラム圧力センサの複雑な非線形特性を解析する新しい特性解析手法を確立すると共に，Siダイアフラムのひずみ，応力，ゲージ抵抗体の挙動，及びブリッジ回路出力の非線形な特性を解析し，高精度な半導体圧力センサを設計するための基礎的事項を明らかにした。

第4章 半導体圧力センサのゲージパタンの設計

第4章 半導体圧力センサのゲージパタンの設計

4.1 はじめに

本章では、第3章で述べた半導体圧力センサの特性解析シミュレータを利用して、高精度圧力センサを開発するための基本となるSiダイアフラムの最適ゲージパタンの設計について述べる。

第1章にて、Siダイアフラム形の半導体圧力センサは、高感度でヒステリシス特性が無いという圧力センサにとって本質的な長所を有する半面、Siのピエゾ抵抗効果という物性を利用する関係上、その大きな非線形特性のために非直線誤差が大きく、しかも温度に敏感なために温度影響を受けやすいという欠点があることを述べた。また、Siダイアフラム形半導体圧力センサは、工業計器^{39)~41)}、自動車エンジン制御⁴²⁾⁴³⁾の分野を始めとして応用分野が拡大かつ多様化し、これに伴って計測精度も0.5%級から0.2%級へ、さらに近年0.1%級の高精度化が要求されるようになってきており、同時に、センサのレンジアビリティの拡大のためにセンサ出力の高出力化、120℃～-40℃に到る広い温度範囲での使用など、半導体圧力センサの高性能化が必要とされてきていることを述べた。^{2)~4)}

しかしながら半導体圧力センサの場合、センサの高精度化と高出力化は相反する問題を含む。すなわち、センサの高出力化に伴ってその非直線誤差が増加し、さらに非直線誤差が温度によって変化する現象が生じるためである。非直線誤差の温度依存性は、ダイアフラムに加えられるひずみ量が大きくなるに従って顕著になるが、これはピエゾ抵抗効果を利用したセンサ特有の現象である。この現象は、広い温度範囲にわたって高精度かつ高出力な圧力センサを開発する上で障害となっている。しかし従来、非直線誤差の温度変化が生じる原因やその大きさについて明確にされていない。さらにまた高精度で高出力な半導体圧力センサを設計するための理論的裏付けは明確でなかった。

そこで本章では、第2章で述べたp形拡散ゲージ抵抗におけるピエゾ抵抗効果の非線形特性を現象論的に厳密に表現したピエゾ抵抗特性式と、第3章で述べたSiダイアフラムの非線形特性の解析手法を用いて、半導体圧力センサの非直線誤差とその温度依存性を定量的に解析することによって、高精度な半導体圧力センサを設計するための理論的裏付けを明らかにする。³⁶⁾³⁷⁾そして{110}面、{100}面Siダイアフラムに対して特性の比較を行い、Siダイアフラムの最適ゲージパターンについて考察する。この結果、非直線誤差とその

温度依存性を極めて小さくし得る最適ゲージボタンが{110}面Siダイアフラム上に存在することを明らかにできた。³⁶⁾ この結果をもとに設計したセンサは、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ の温度範囲にて非直線誤差 $\pm 0.1\%$ 以内であり、また出力は $65\text{mV}/\text{V}$ の高出力が得られている。

4.2 Si面方位とゲージボタンの一般的考察³⁶⁾

Siダイアフラムの概要については、第1章、1.2節で述べたが、ここでその原理構造図を再度図4.1に示す。その構造は図示のように、Si結晶の中央部を円形に薄く加工して圧

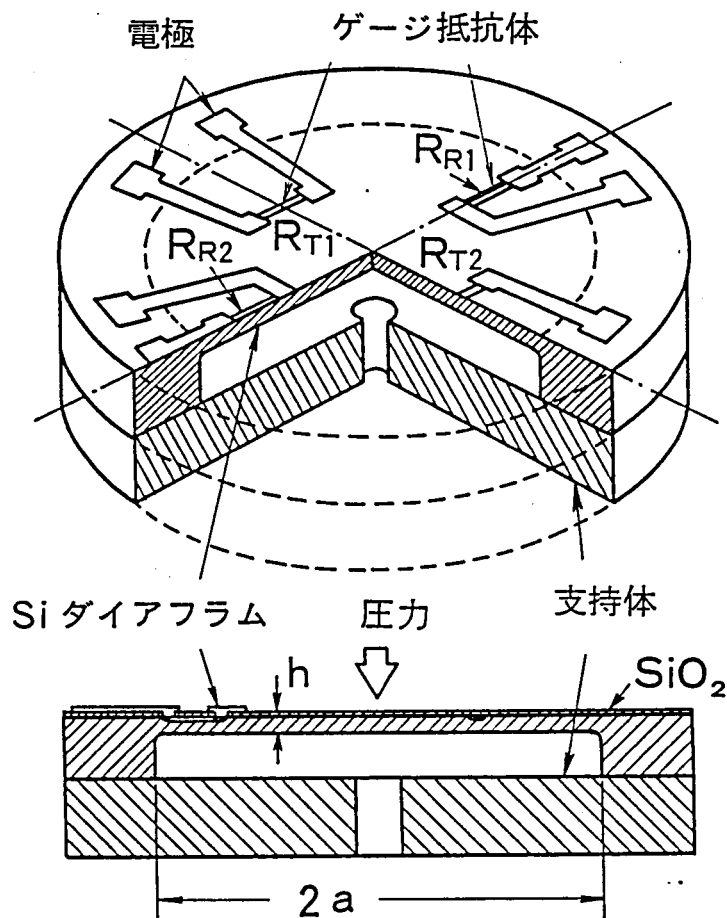


図4.1 Siダイアフラムの原理構造

力によりたわみを生じるダイアフラムを形成し、表面に4個のゲージ抵抗体 R_{R1} , R_{R2} , R_{T1} , R_{T2} を拡散形成したものである。ゲージ抵抗体 R_{R1} , R_{R2} はダイアフラム半径方向に沿って配置し、また R_{T1} , R_{T2} は接線方向に沿って配置し、前者を半径ゲージ抵抗 (Radial Gauge Resistors)、後者を接線ゲージ抵抗 (Tangential Gauge Resistors)と呼ぶ。

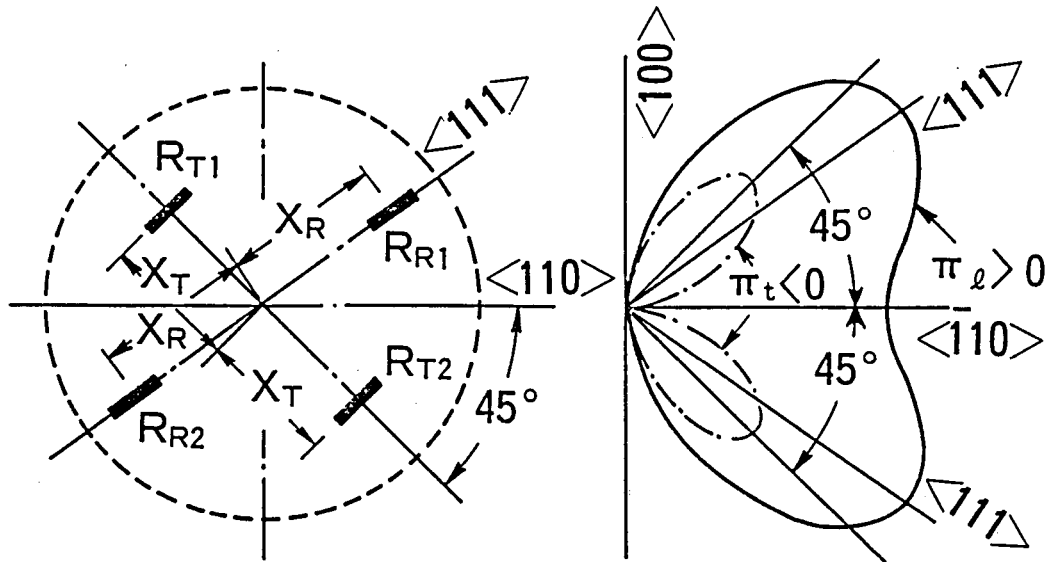
このゲージ抵抗体の配置パターンは，Si単結晶の面方位により異なる。すなわち，Si面方位によってピエゾ抵抗係数の結晶軸異方性のパターンが異なるため，使用するSi単結晶の面方位に応じて，ゲージ抵抗体を配置する結晶軸が異なってくる。また第3章で述べたように，Siダイアフラムセンサの非直線誤差と出力の大きさは，ゲージ抵抗体の配置位置に依存して大きく変化する。このように，Siダイアフラム上に配置する個々のゲージ抵抗体の位置及びその結晶軸の関係をゲージパターンと呼ぶ。したがって，Siダイアフラムセンサの設計では，高精度，高出力化を可能とする最適ゲージパターンの設計が最も重要な問題となる。

Siの結晶面と結晶軸の選び方によって，種々のゲージパターンが考えられる。一般によく利用されるSiウェハの結晶面は， $\{110\}$ ， $\{100\}$ ， $\{111\}$ であるので，これらの結晶面について，ゲージパターンを考えると，図4.2のようになる。同図(a)は， $\{110\}$ 面，(b)は $\{100\}$ 面，(c)は $\{111\}$ 面のゲージパターンであり，図中にそれぞれの結晶面における縦ピエゾ抵抗係数 π_{ℓ} と横ピエゾ抵抗係数 π_t の結晶軸異方性の相対値を示している。以下これらのゲージパターンに対する考え方を述べる。

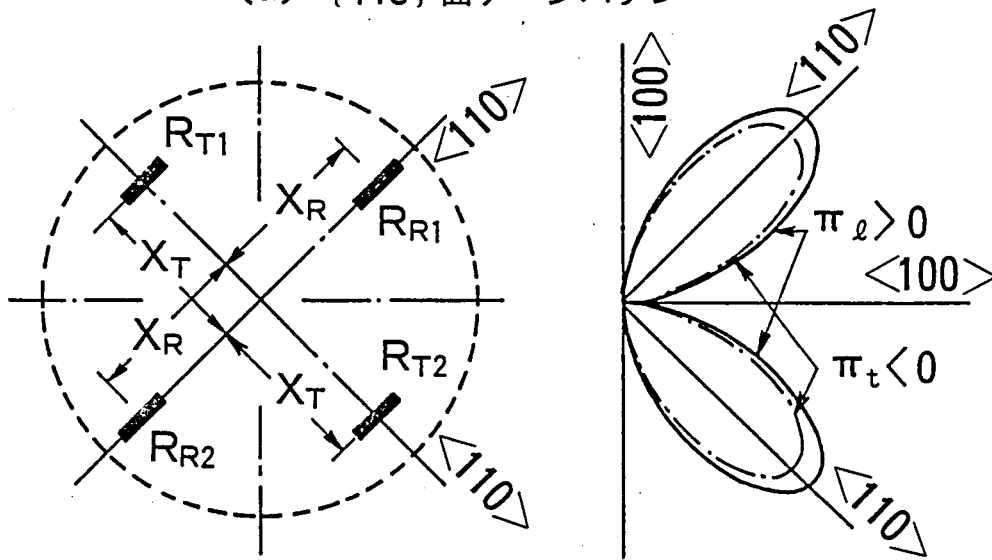
同図(a)は $\{110\}$ 面ゲージパターンで， π_{ℓ} が最大となる $\langle 111 \rangle$ 軸に半径ゲージ抵抗 R_R を配置し， π_t が最大となる $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に接線ゲージ抵抗 R_T を配置している。²⁵⁾³⁶⁾
p形Siでは $\langle 111 \rangle$ 軸の π_{ℓ} は他の結晶軸に比べて最大の値をとるため，これを半径ゲージ抵抗 R_R に有効に利用して高感度を得ること，また接線ゲージ R_T では，第2章，2.3節で述べたような π_t に帰因する大きな非直線誤差を積極的に利用して， R_R ， R_T の個々の非直線誤差がブリッジ出力として互いに打消し合い，直線性の優れた特性を得るようになることが狙いである。

同図(b)は $\{100\}$ 面Siを利用したゲージパターンであり，このパターンは従来から圧力センサに非常に多く利用されている。²⁾²³⁾⁴²⁾特に $\{100\}$ 面では $\langle 110 \rangle$ 軸に沿ってアルカリ性溶液による化学的エッチングが正確にできるため，Siダイアフラムの製造が容易であるという利点があるためである。 $\{100\}$ 面は π_{ℓ} ， π_t 共に $\langle 110 \rangle$ 軸で最大となるため，ゲージ配置は一義的に図示のようになる。

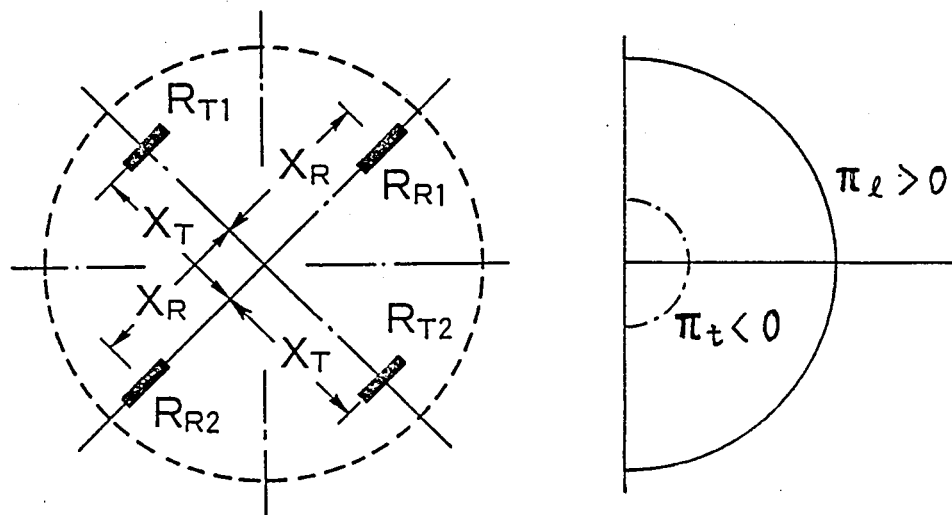
同図(c)は $\{111\}$ 面Siを利用したもので，この面は π_{ℓ} ， π_t の結晶軸異方性がない。したがって R_R ， R_T は任意の位置に配置できる。しかしながら， $\{111\}$ 面では π_{ℓ} ， π_t 共に，他の結晶面に比べて小さいため，センサとしての感度が小さいという欠点がある。したが



(a) $\{110\}$ 面ゲージパターン



(b) $\{100\}$ 面ゲージパターン



(c) $\{111\}$ 面ゲージパターン

図 4.2 Si ダイアフラムの面方位とゲージパタンの代表例

ってセンサの実用面から考えると、あまり意味がなく、従来利用された例がない。

なお、 $\{110\}$ 面については、 π_l, π_t の結晶軸異方性が複雑なために、同図(a)以外にも、
 図 4.3 のようなゲージパターンが考えられる。

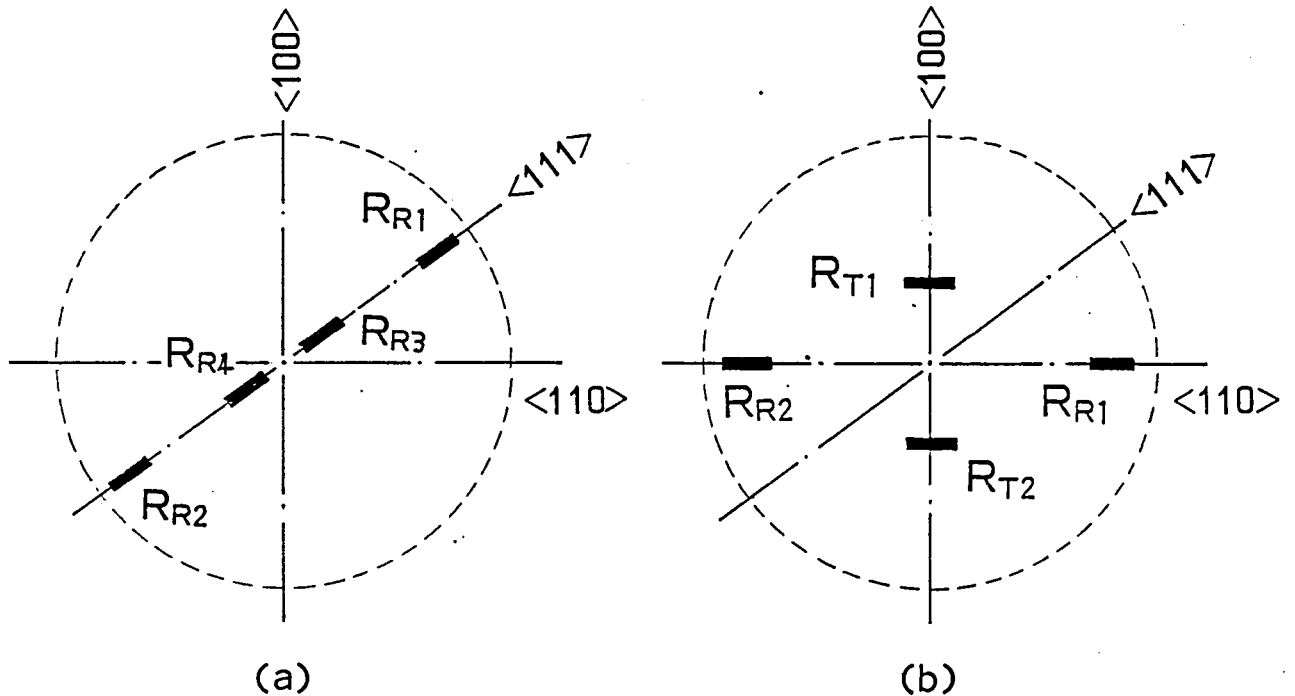


図 4.3 $\{110\}$ 面ゲージパタンの他の例

同図(a)は、 π_l の大きい $\langle 111 \rangle$ 軸に沿って半径ゲージ抵抗のみを配置し、接線ゲージ抵抗を用いないものである。²²⁾これはダイアフラム端部と中心部で応力が引張りと圧縮と逆になる(第1章, 図 1.2 参照)ことを利用し、半径ゲージ抵抗のみでブリッジ回路を構成するものである。しかしこのパターンは、第2章, 図 2.7で述べたように、 π_l の非直線誤差が引張り応力と圧縮応力で異なるために、ダイアフラム端部に配置したゲージ抵抗 R_{R1}, R_{R2} と、中心部に配置した R_{R3}, R_{R4} の非直線誤差がそれぞれ異なって、ブリッジ出力として誤差を打消しにくいという問題がある。

また同図(b)は、 $\langle 110 \rangle$ 軸で非直線誤差の大きい横ピエゾ抵抗係数 π_t が零であることに着目し、 $\langle 110 \rangle$ 軸に沿って半径ゲージ抵抗 R_R と接線ゲージ抵抗 R_T を配置したものである。しかし、 $\langle 110 \rangle$ 軸の π_l の値は、 $\langle 111 \rangle$ 軸の π_l に比較して、 $\pi_l \langle 110 \rangle / \pi_l \langle 111 \rangle \approx 0.76$ であるために感度が小さくなる欠点がある。

以上，図 4.2，図 4.3 に示した各ゲージボタンを比較考察すると，図 4.2 (a)，(b) が感度の点で定性的に優れていると考えられ，またこれらは，{110} 面と {100} 面を利用した場合の代表的なゲージボタンといえる。したがって，以下この 2 つを代表例としてとり上げ，ゲージボタンの最適設計について検討する。

4.3 特性解析の前提条件

最適ゲージボタンの検討を行うに当たり，特性解析の前提条件について以下に述べる。

(1) ゲージ抵抗体の設計諸元：

図 4.2 において，ゲージ抵抗体は単純な長方形で表示したが，実際のセンサ設計を考慮して，抵抗体形状の設計諸元を決めておく。

ゲージ抵抗体の基準抵抗値（印加応力 = 0，温度 = 20°C）の大きさ $R(0,0,0)$ は，

$$R(0,0,0) = \rho_s \cdot \frac{L}{W}$$

ここに ρ_s : シート抵抗値
 L : 抵抗体長さ (mm), W : 抵抗体幅 (mm)

} (4.1)

となる。今， $\rho_s \approx 150 \Omega/\square$ ， $R(0,0,0) \approx 6 \text{ k}\Omega$ 程度に設計するものとすれば， $L/W \approx 40$ となるので，

$$L = 1.2 \text{ mm} \quad , \quad W = 0.03 \text{ mm} \quad \text{..... (4.2)}$$

と設計した。そして図 4.4 に示すように，抵抗体 (p 層) を長手方向に 4 分割し，これらを p^+ 高濃度層 (表面不純物濃度 $\approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，シート抵抗値 $\approx 20 \Omega/\square$) の低抵抗層で連結する形状とした。これは，抵抗体を Si ダイアフラム上のできるだけ小さいエリアに限定して配置したためである。

またゲージ抵抗体はダイアフラム径に対し有限な大きさを持つために，4 分割したそれぞれの抵抗体を長手方向に 10 分割して特性計算を行なう (第 3 章，3.4 節参照)。したがって分割された要素抵抗は， $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ となり，ダイアフラムの径に比べると十分

小さな点と見なせるオーダーとなる。

(2) Siダイアフラムの設計諸元：

Siダイアフラム形状の設計諸元は，測定圧力の大きさに応じて設計されねばならない。

Si単結晶の強度は，結晶に傷などの欠陥がない場合，実用的レベルで，応力で1000 MPa，ひずみで 6000×10^{-6} 程度の強度を持つ。圧力センサ設計の場合には，この破壊強度の $\frac{1}{5}$ 位の安全率を見込んで設計し，最大応力200MPa，最大ひずみ 1200×10^{-6} 程度を一応の設計基準とする。

ここでは，測定圧力レンジを最大0.5MPaフルスケールとした仕様で考える。この仕様で，Siダイアフラムの形状を図4.5に示すように決定した。すなわち，ダイアフラム半径 a ，板厚 h ，印加圧力 P を次のようにした。

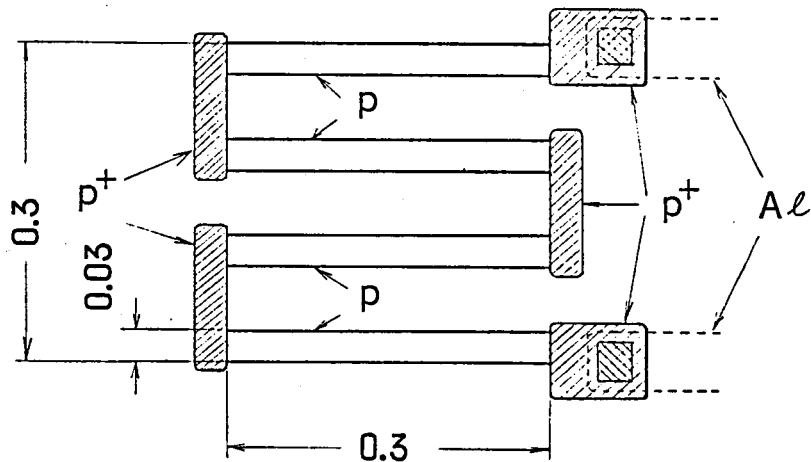


図4.4 ゲージ抵抗体形状の設計値

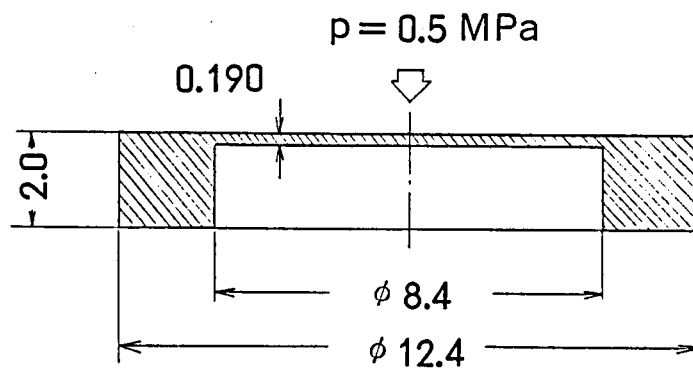


図4.5 Siダイアフラム形状の設計値

$$a=4.2\text{mm}, h=0.190\text{mm}, P=0.5\text{MPa} \dots\dots\dots (4.3)$$

この設計条件では，Siダイアフラムの最大応力は約200MPa，最大ひずみは 930×10^{-6} 程度となる（第3章，図3.7，3.8参照）。なお圧力pは，図4.5において，Siダイアフラム上面が正圧となる方向に印加するものとする。

(3) ピエゾ抵抗係数

第2章，表2.1に示したピエゾ抵抗係数は，{110}面<111>軸に関する値である。したがって，他の結晶面や結晶軸に関する値は，これを変換しなければならない。その変換手法は第3章，3.4節で述べている。すなわち，ピエゾ抵抗効果の非線形特性及び温度特性は，表面不純物濃度が一定であれば，他の結晶軸に関しても，相対的に同一であると仮定し，ピエゾ抵抗係数の2次及び3次係数の1次係数に関する比は結晶軸によらず一定であると見なし，表2.1の π_{ij}, π_{tj} を座標変換して求めている。表4.1は，図4.2(a),(b)に示すゲージパタンの解析に必要とする{110}面<110>軸から45°方向のピエゾ抵抗係数と，{100}面<110>軸のピエゾ抵抗係数を，上記仮定により変換して求めたものである。なお温度係数は表2.1の値をそのまま使用している。

表4.1 ピエゾ抵抗係数

(注) 表面不純物濃度： $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

結晶面、結晶軸	π_{L1} (MPa ⁻¹)	π_{L2} (MPa ⁻²)	π_{L3} (MPa ⁻³)	π_{t1} (MPa ⁻¹)	π_{t2} (MPa ⁻²)	π_{t3} (MPa ⁻³)	備考
{110}面 <111>軸	7.3 $\times 10^{-4}$	6.2 $\times 10^{-9}$	-1.9 $\times 10^{-10}$	-3.5 $\times 10^{-4}$	2.6 $\times 10^{-7}$	2.9 $\times 10^{-12}$	実験値
{110}面 <110>から45°	6.8 $\times 10^{-4}$	5.8 $\times 10^{-9}$	-1.8 $\times 10^{-10}$	-3.9 $\times 10^{-4}$	2.9 $\times 10^{-7}$	3.3 $\times 10^{-12}$	換算値
{100}面 <110>軸	5.6 $\times 10^{-4}$	4.8 $\times 10^{-9}$	-1.5 $\times 10^{-10}$	-5.2 $\times 10^{-4}$	3.9 $\times 10^{-7}$	4.3 $\times 10^{-12}$	換算値

(4) ブリッジ回路の構成：

ゲージ抵抗体をブリッジに構成した場合の，ブリッジ回路の励起方式には，定電流励起と定電圧励起の2方式がある。半導体ゲージ抵抗の場合には，定電流励起方式の方が，ブ

リッジ出力の温度変化が小さくなる²⁾ので、第3章、(3.11)式の計算によっている。

(5) 温度条件：

特性解析を行う場合の基準温度は、室温 20°C (293°K)とする。また温度範囲としては、工業計器³⁹⁾⁴⁰⁾や自動車エンジン制御システム⁴²⁾で圧力センサに要求される -40°C ~ 120°C (233°K ~ 393°K)とする。

4.4 ゲージパタンの最適設計³⁶⁾

前節で述べた解析条件のもとに、第3章、3.4節で述べた半導体圧力センサの特性解析シミュレータによって、{110}面と{100}面のゲージパタンを持つSiダイアフラムの特性解析をし、最適ゲージパタンについて考察する。この解析では、図4.2(a),(b)に示す{110}面と{100}面のゲージパタンにおいて、半径ゲージ抵抗 R_R の位置 X_R 及び接線ゲージ抵抗 R_T の位置 X_T を変数として、ブリッジ出力、非直線誤差、非直線誤差の温度依存性等の関係を定量的に明らかにし、最適ゲージパタンを決定する。

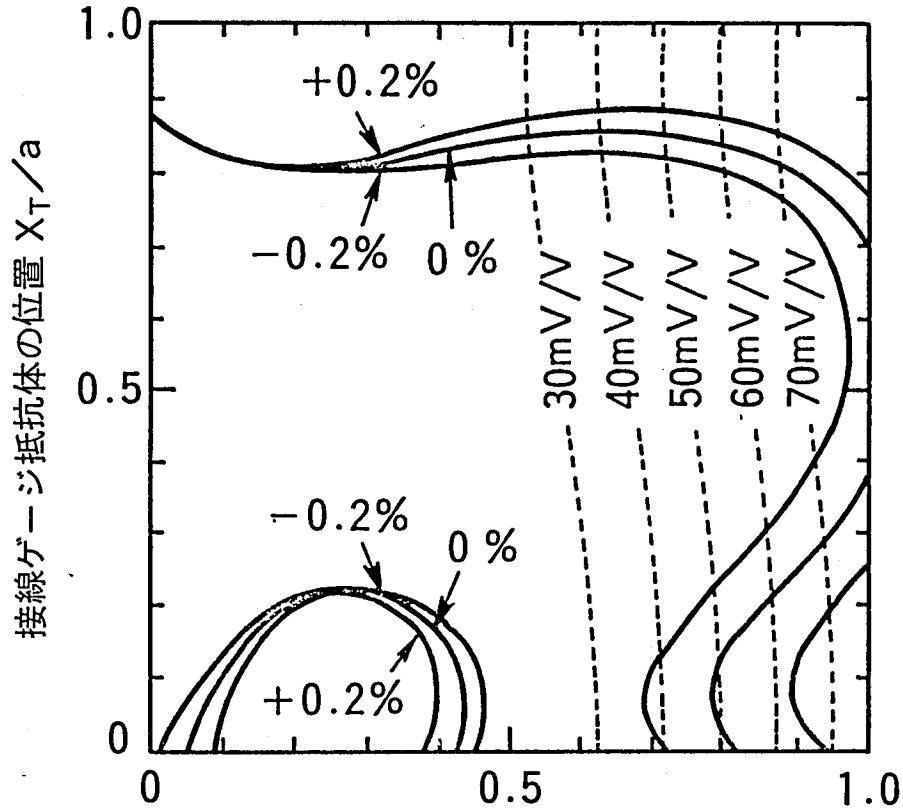
4.4.1 室温(基準温度)条件下での特性解析³⁶⁾

まず、図4.2(a),(b)に示した{110}面と{100}面ゲージパタンにおいて、各ゲージ抵抗の位置 X_R , X_T を変えた場合に、ブリッジ出力がどのように変化するか、またブリッジ出力の非直線誤差が±0.2%以内となる高精度領域はどこか解析した。 X_R/a , X_T/a の値に対するブリッジ出力と非直線誤差±0.2%以内の高精度領域の関係を図4.6に示す。温度条件は基準温度 20°Cとし、出力の大きさはブリッジ両端にかかる励起電圧との比で示した。

図から{110}面Siダイアフラムと{100}面Siダイアフラムの違いがはっきり分るが、その特徴的事項を整理すると次のようになる。

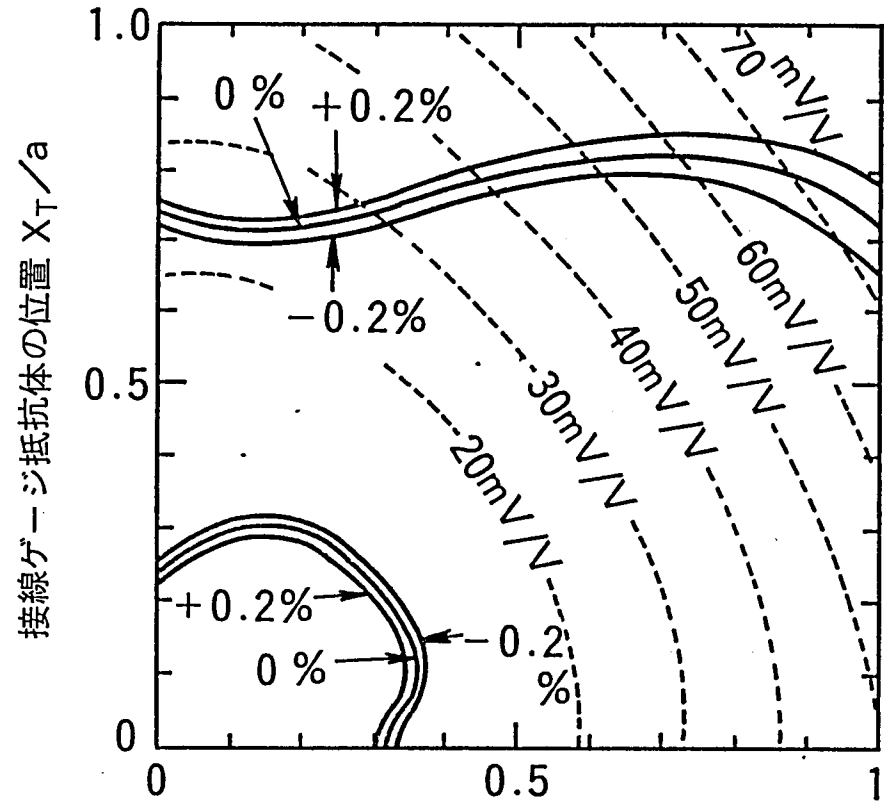
まず(a){110}面Siダイアフラムの場合には、ブリッジ出力の大きさは X_R/a に依存し、この値が1に近いほど大きな出力が得られる。 X_T/a の値にはほとんど依存しない。この理由は、第3章、図3.10に示したように、半径ゲージ抵抗 R_R の抵抗変化率が X_R/a に大きく依存するに対し、接線ゲージ抵抗 R_T の抵抗変化率は X_T/a に余り依存しないことにある。また X_R/a が1に近く、ブリッジ出力の大きい領域で、非直線誤差±0.2%以内の高精度領域が広く存在していることが分る。

一方(b){100}面Siダイアフラムの場合には、ブリッジ出力の大きさは、 X_R/a , X_T/a



半径ゲージ抵抗体の位置 X_R/a

(a) {110} 面 Si ダイアフラム



半径ゲージ抵抗体の位置 X_R/a

(b) {100} 面 Si ダイアフラム

図 4.6 ブリッジ出力のゲージ位置依存性及び非直線誤差±0.2%領域

の値が共に 1 に近いほど大きくなり、また高精度領域が $X_T/a \approx 0.8$ の近辺に存在していることが分る。

また {110} 面，{100} 面共に，ダイアフラム中心近傍にも，非直線誤差の小さい領域が存在しているが，いずれもブリッジ出力は小さい領域である。

非直線誤差とゲージ抵抗体の位置の関係をさらに詳細に知るために， X_R/a をパラメータとして，非直線誤差と X_T/a の関係を解析した。結果を図 4.7 に示す。同図(a)は {110} 面 Si ダイアフラムの場合，同図(b)は {100} 面 Si ダイアフラムの場合で，非直線誤差が零となるゲージ抵抗位置 X_R/a と X_T/a の値が，この図から定量的に求められる。

以上の結果から，高精度かつ高出力な半導体圧力センサを得るための最適なゲージパターンは，{110} 面，{100} 面いずれの場合も， X_R/a をできるだけ 1 に近づけて配置して大きなブリッジ出力を得るようにし，一方 X_T/a は非直線誤差が零となる位置を選べばよいことになる。仮りに $X_R/a=0.9$ にしたとき，最適ゲージパターンは，図 4.7 から

$$\left. \begin{array}{l} \text{\{110\} 面の場合： } X_R/a=0.90, X_T/a=0.80 \\ \phantom{\text{\{110\} 面の場合： }} X_R/a=0.90, X_T/a=0.26 \\ \text{\{100\} 面の場合： } X_R/a=0.90, X_T/a=0.80 \end{array} \right\} \text{----- (4.4)}$$

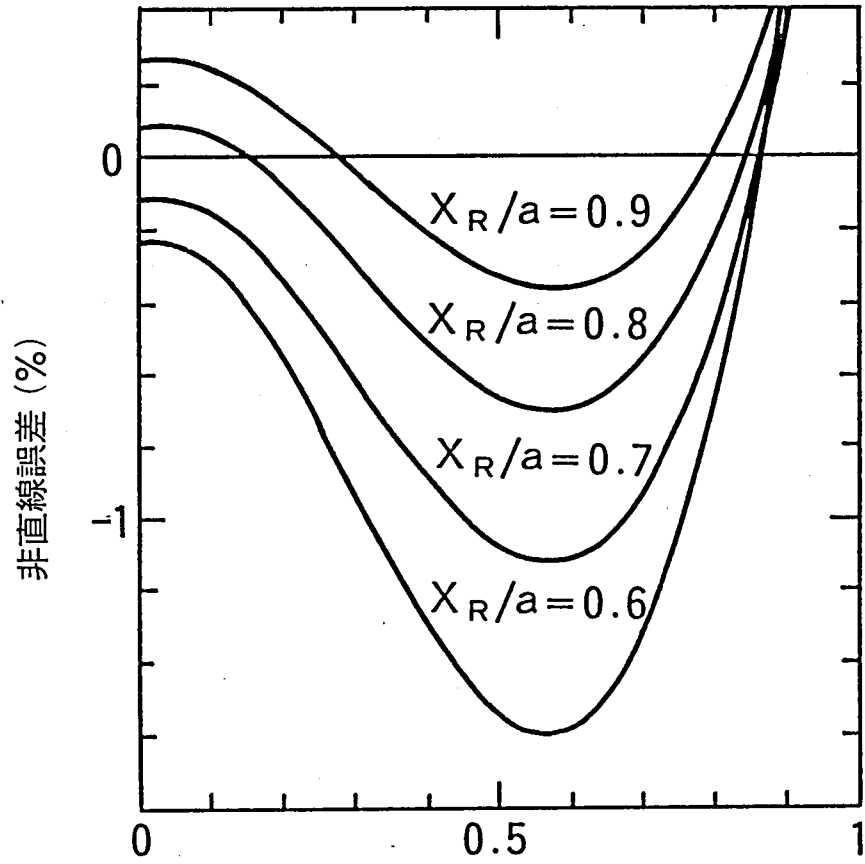
のように定められる。ただし以上は，基準温度 20°C (293°K) の条件の元での計算である。

4.4.2 非直線誤差の温度依存性³⁶⁾³⁷⁾

次に非直線誤差の温度依存性について解析する。

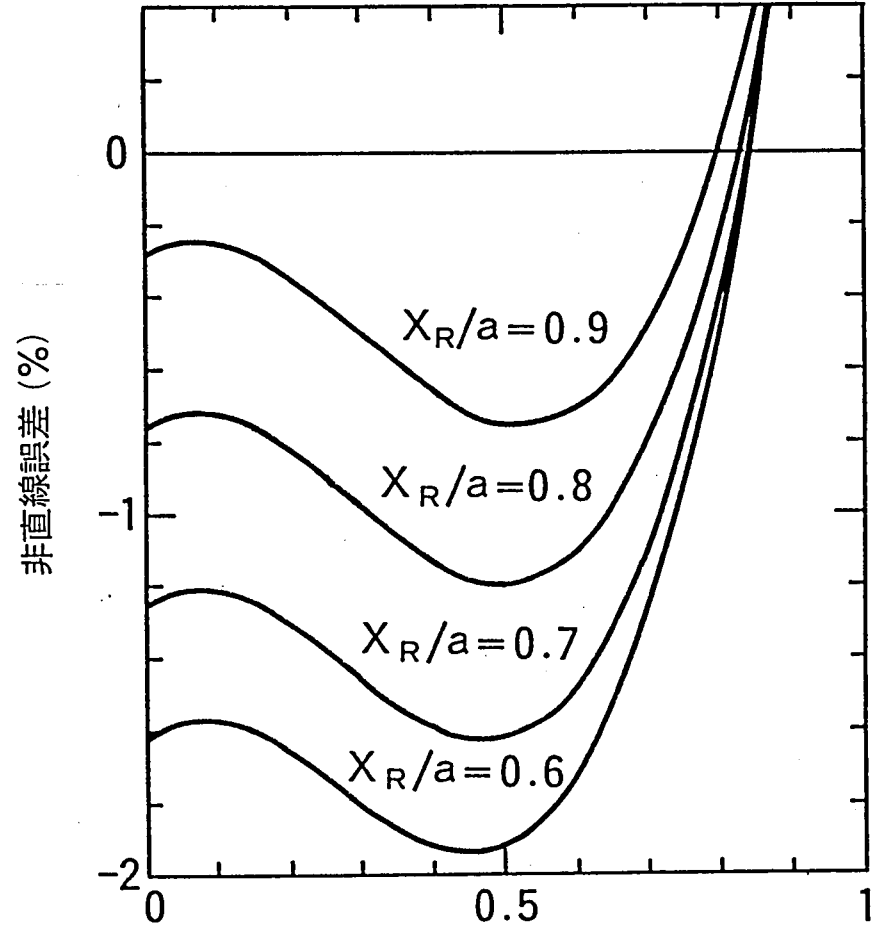
前節の結果から $X_R/a=0.9$ として，ブリッジ出力の非直線誤差を X_T/a に対して温度条件を変えて計算した。温度範囲は，先に述べた前提条件から，120°C ~ -40°C の範囲とした。解析結果を図 4.8 に示す。

この結果，ブリッジ出力の非直線誤差を零とする最適なゲージ抵抗の位置は温度によって変化することが分る。いかえれば，基準温度 20°C の条件下で最適なゲージパターン条件 (4.4) 式の値を決定した場合，温度が 120°C ~ -40°C の範囲で変化すれば，非直線誤差が図示の δ_{NL} だけ変化することになる。 δ_{NL} は図示のようにゲージ抵抗位置によっては，0.3



接線ゲージ抵抗体の位置 X_T/a

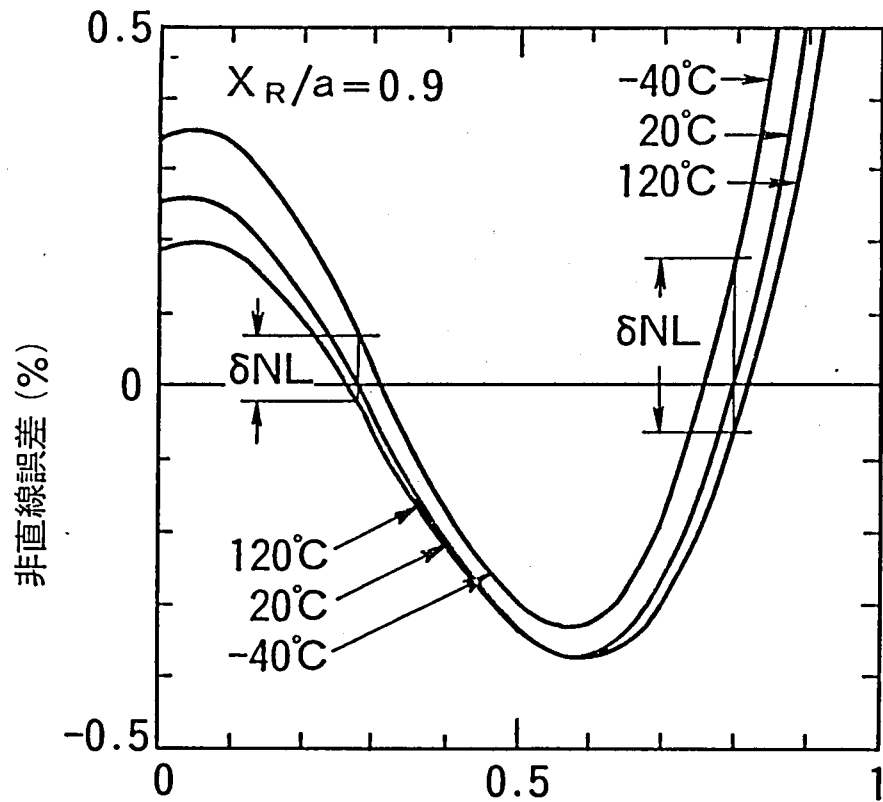
(a) {110} 面 Si ダイアフラム



接線ゲージ抵抗体の位置 X_T/a

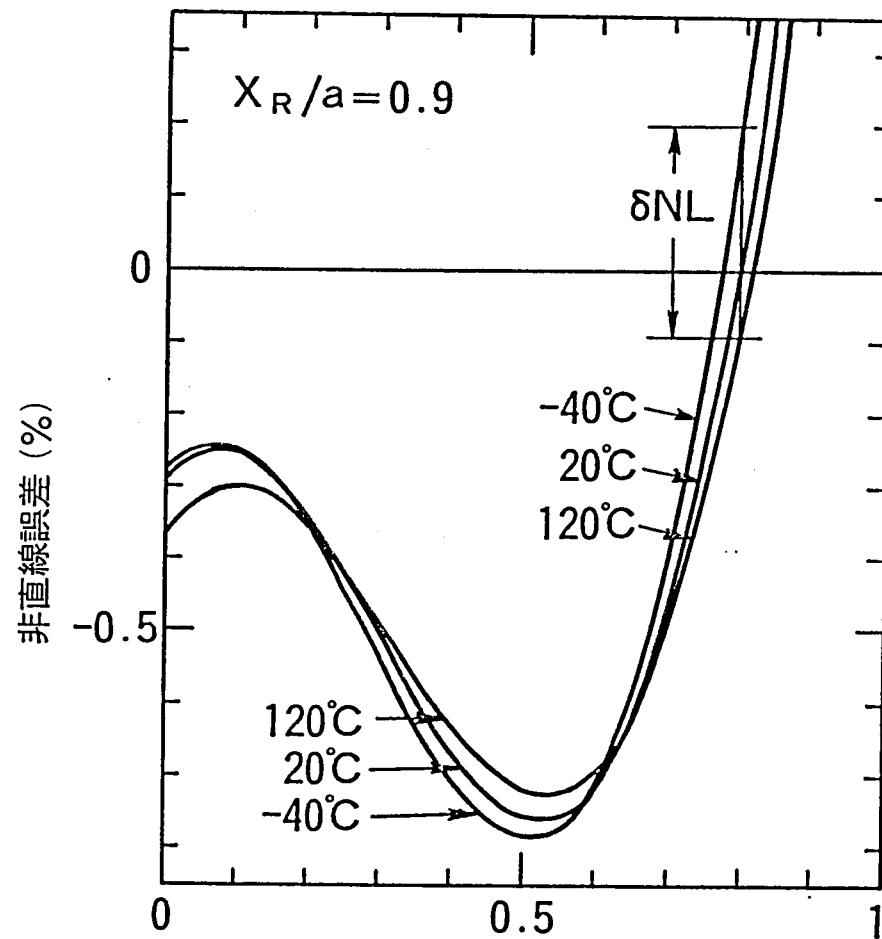
(b) {100} 面 Si ダイアフラム

図 4.7 ブリッジ出力の非直線誤差のゲージ位置依存性



接線ゲージ抵抗体の位置 X_T/a

(a) {110} 面 Si ダイアフラム



接線ゲージ抵抗体の位置 X_T/a

(b) {100} 面 Si ダイアフラム

図 4.8 ブリッジ出力非直線誤差のゲージ位置依存性と温度依存性

%/160°C 近く発生するため、0.1~0.2%の高精度圧力センサの設計には極めて問題となること
とが分る。そして δNL の変化幅は同図(a) {110}面の $X_T/a=0.26$ の場合が最も小さいこと
を示している。

ところで以上の解析結果は、圧力を0.5MPaフルスケールとした場合の計算であるため、
(4.4)式に示す3通りのゲージパタンのブリッジ出力値はそれぞれ若干異なっている。圧
力センサとしては同一なブリッジ出力値が得られる条件で3者を比較せねばならない。

そこで、上記3通りのゲージボタンについて、ブリッジ出力と δNL の関係を計算により
求めた。結果を図4.9に示す。 δNL は{(-40°Cにおける非直線誤差)-(120°Cにおける
非直線誤差)}を示しており、グラフ横軸の各ブリッジ出力に対し、その値をフルスケ
ールとした%値である。

この結果から、{110}、{100}面共に、 $X_T/a=0.8$ の場合には、 δNL はブリッジ出力
を大きく得るに伴って、比例的に増加する。高精度な圧力センサを設計する場合、たと
えば精度0.2%級の圧力センサを設計する場合には、 δNL は少なくとも0.1%/160°C以内で
ある必要がある。このため上記ゲージボタンでは、ブリッジ出力が30mV/V程度を越えない
ように設計する必要がある。従来、高精度圧力センサを設計する場合出力レベルを制限し
ていた理由がここにあることが分る。

これに対して{110}面、 $X_T/a=0.26$ の場合には、 δNL は前記の2つに比較して大幅に
低減し、 $\delta NL \leq 0.1\%/160^\circ\text{C}$ とすればブリッジ出力は65~70mV程度まで許容できること
が分る。この理由は、図2.8~2.10に示した各々のゲージ抵抗におけるピエゾ抵抗効果の
非直線誤差とその温度依存性がブリッジ出力としてうまく打消し合うためと考えられる。
したがって、以上3つのゲージボタンを比較したとき、{110}面、 $X_T/a=0.26$ のゲー
ジボタンが、広い温度範囲で、高出力化、高精度化の条件を最も良く満たすことになる。

4.4.3 最適ゲージボタンの決定³⁶⁾

以上の解析結果をもとに、最適ゲージボタンの考察をする。

最適ゲージボタンの条件としては、

- (1) 圧力に対して出力が直線的に変化し、非直線誤差が小さいこと。
- (2) 広い温度範囲にわたり非直線誤差の温度依存性が少ないこと。
- (3) 同一条件下で、ブリッジ出力が大きいこと。

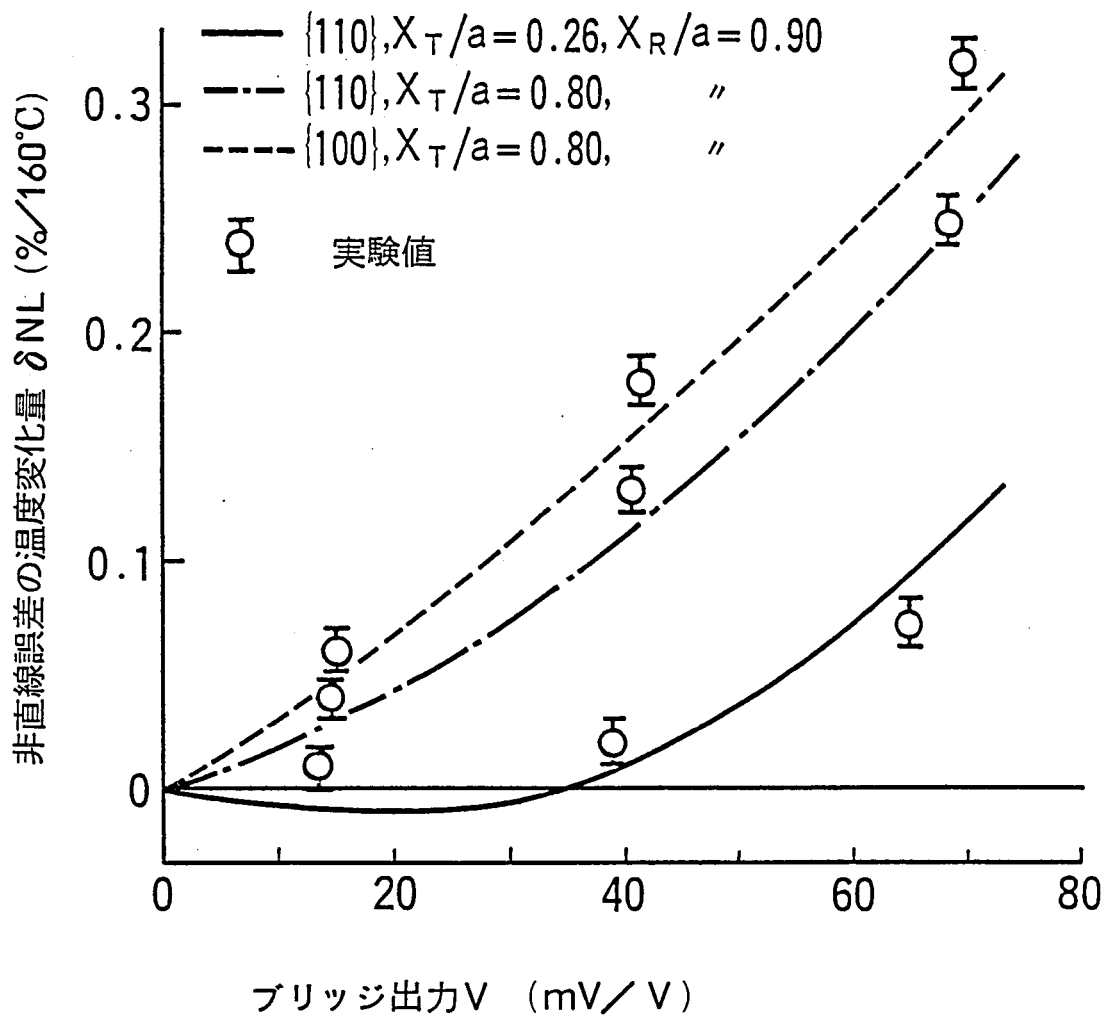


図 4.9 ブリッジ出力に対する非直線誤差温度依存性の比較

(4) Siダイアフラムの加工精度の許容条件がゆるやかで、センサとしての生産性が高いこと。

が考えられる。

条件(1)~(3)に関しては、これまでの検討結果から明らかなように、{110}面Siダイアフラムで、 $X_R/a=0.9$ 、 $X_T/a=0.26$ のゲージボタンが最も優れていることが分る。特に非直線誤差の温度依存性が、他のゲージボタンに比べて $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ に低減することは、これまで知られていなかった点であり、高精度半導体圧力センサとして新しいゲージボタンを提案できたものである。

次に条件(4)について、図4.7を用いて説明する。

図4.7から分るように、(a){110}面Siダイアフラム、(b){100}面Siダイアフラムいづれの場合にも、 $X_T/a \approx 0.8$ 近辺にて非直線誤差を零とするゲージ位置が存在する。しかしこの領域は、図から分るように X_T/a の値が若干変化すれば、非直線誤差が大きく変化する。これはSiダイアフラムの凹形状の加工誤差によって X_T/a の値が変動したとき、その影響を受けやすいことを意味する。

一方(a){110}面Siダイアフラムにおいて、 $X_T/a \approx 0.2 \sim 0.3$ 近辺で非直線誤差が零となる領域では、 X_T/a の変化に対する非直線誤差変化の割合が、前記のものに比べ格段に小さい。すなわち、非直線誤差が、ダイアフラムの凹形加工誤差による X_T/a の変動の影響を受けにくいことを示す。これは、図4.6(a)において、 X_R/a が $0.8 \sim 0.9$ かつ X_T/a が $0.1 \sim 0.3$ の領域は、非直線誤差 $\pm 0.2\%$ の高精度領域が広いことの裏付けを示すものであり、この領域は、Siダイアフラムの加工精度条件の上からも望ましいことが分る。

以上の結果をまとめて、最適ゲージボタン設計の基本思想は、

結晶面：{110}面

半径ゲージ抵抗の配置： $\langle 111 \rangle$ 軸上、 $X_R/a \rightarrow$ ダイアフラム端部へ

接線ゲージ抵抗の配置： $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向、 $X_T/a \rightarrow$ ダイアフラム中心へ

を満足するように配置するのが良い。 X_R/a は設計条件が許容されるかぎり1へ近づけて大きな出力を得るようにし、 X_T/a は非直線誤差を零とするダイアフラム中心部の位置を選定する。⁴⁸⁾

今， $X_R/a=0.9$ とした場合には，最適ゲージパターンは図 4.6～図 4.8 より次の条件となる。

結晶面： $\{110\}$ 面	} -----(4.5)
半径ゲージ抵抗の位置： $\langle 111 \rangle$ 軸上， $X_R/a=0.9$	
接線ゲージ抵抗の位置： $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向， $X_T/a=0.26$	

4.5 試作と検証³⁶⁾

以上の解析結果を検証するために，(4.4)式に示す3通りのゲージパターンを持つ圧力センサを試作した。Si ダイアフラムチップ写真を図 4.10 に示す。

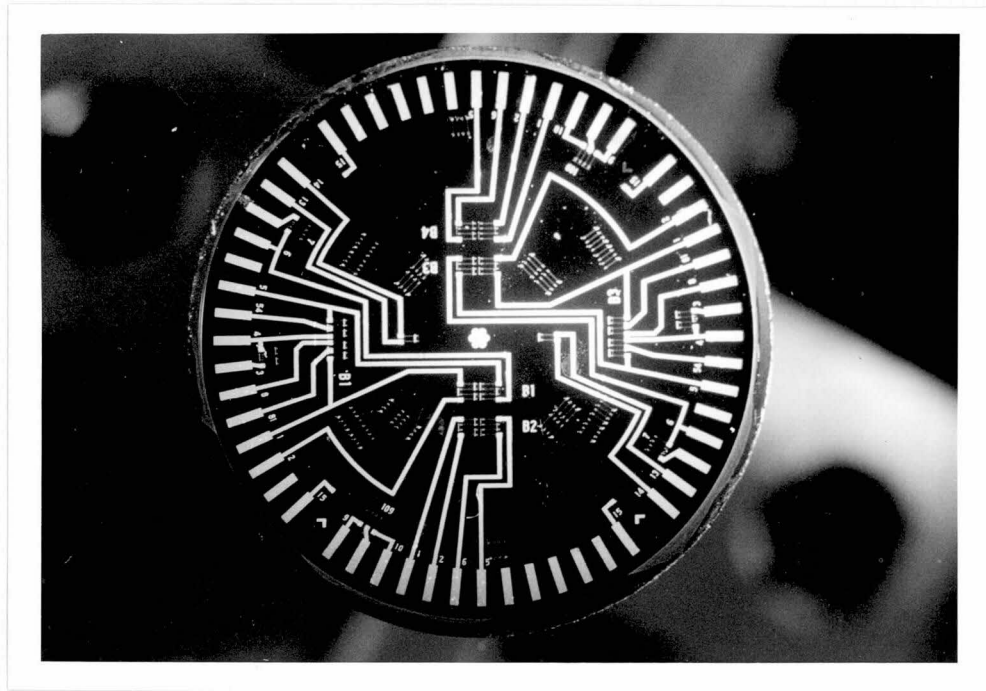


図 4.10 試作 Si ダイアフラムセンサチップ外観

このセンサは半導体集積回路の製作と同じプロセスで作られる。そのためゲージ抵抗体の拡散形成用光学マスクには，(4.4)式のゲージパターン3通り全てが混在できるようにしており，アルミ電極形成用のマスクをとりかえることによって，任意のゲージパターンを引出せるようにしている。写真は $\{110\}$ 面 Si ダイアフラムのチップを示しているが，

{100}面 Si ダイアフラムも同様の外観である。

試作センサの非直線誤差とその温度依存性の実験結果を図 4.11, 図 4.12 に示す。図 4.11 は {110} 面 Si ダイアフラムの実験結果で, (a) は $X_T/a=0.26$, (b) は $X_T/a=0.80$ のゲージパタンのものであり, 図 4.12 は {100} 面 Si ダイアフラムの実験結果である。図は, 同一センサに印加圧力として 0.5, 0.3, 0.1 MPa をそれぞれフルスケール圧力として加えた場合の非直線誤差のプロフィールを示している。非直線誤差の値は, それぞれのフルスケール圧力に対する % 値である (図 2.6 参照)。

この実験結果は先の解析結果とよく一致しており, 特に (4.5) 式で提案した最適ゲージパターンを持つ図 4.11(a) のデータでは非直線誤差の温度変化が極めて小さいことを実証している。そして $120^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ の全温度範囲にわたり非直線誤差は $\pm 0.1\%$ 以内を示している。

この結果から, 0.5, 0.3, 0.1 MPa それぞれの圧力レンジにおける非直線誤差の温度変化の最大変化幅 δNL を求め, これを前記図 4.9 にプロットした。この結果は計算値とよく一致していることが分る。しかし図 4.11(a) の場合, 出力が小さい領域でも δNL は正方向となっており, この点は図 4.9 の計算値と合っていない。しかしこの値は小さいので実際には問題にならない。

以上, 4.4 節で述べた半導体圧力センサの非直線誤差及びその温度依存性の理論解析が, 実験値と良く一致することが確認でき, (4.5) 式に示した最適ゲージパタンの設計仕様により, 高出力, 高精度な圧力センサが実現できることが明らかとなった。

4.6 まとめ

本章では, Si ダイアフラムセンサのゲージパターンについて考察し, 従来明らかにされていなかった非直線誤差及びその温度依存性について解明して, 高精度, かつ高出力な圧力センサ設計のための最適ゲージパターンを決定した。得られた結論を要約すると次のようになる。

- (1) {110} 面, {100} 面, {111} 面の各 Si ダイアフラムにおける各種ゲージパターンについて比較考察を行ない, 感度の点から {110} 面と {100} 面 Si ダイアフラムが優れていることを述べた。

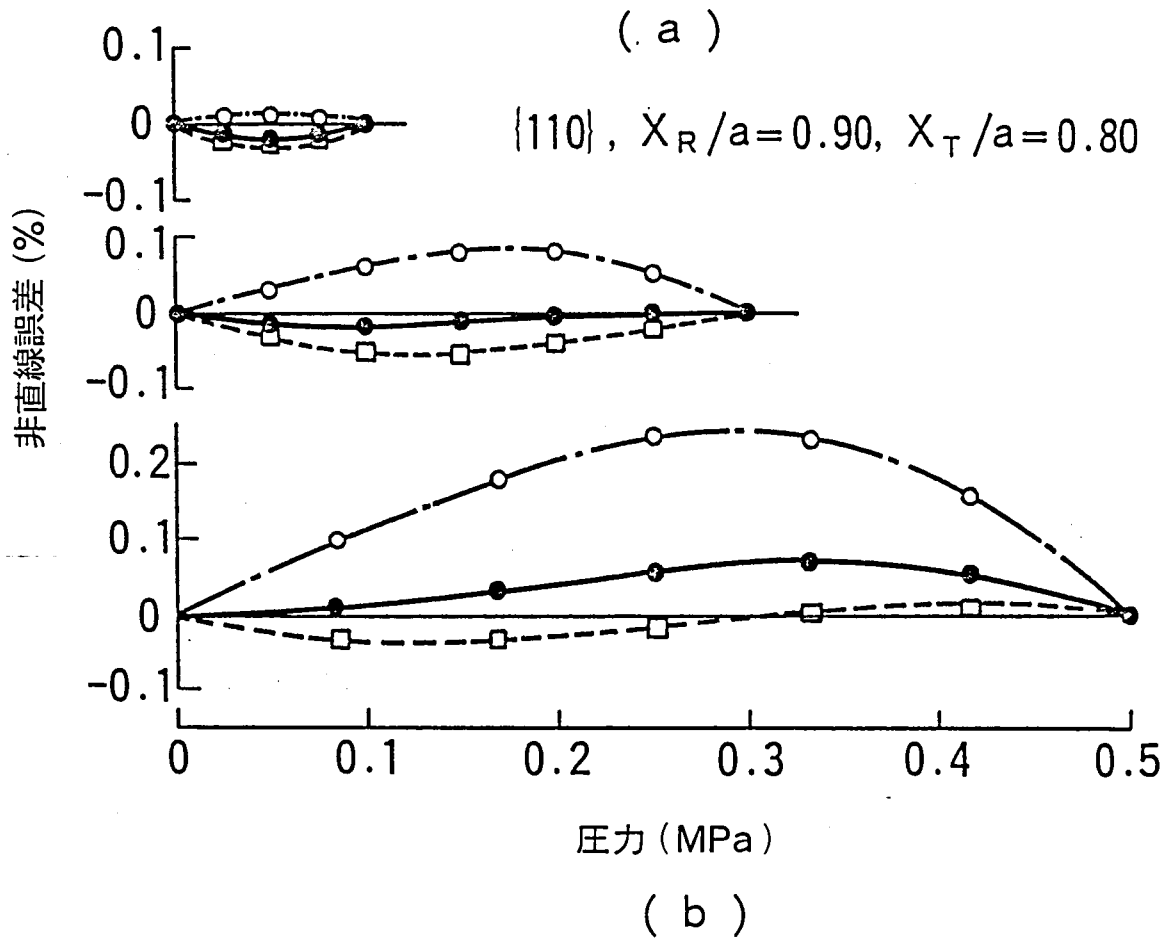
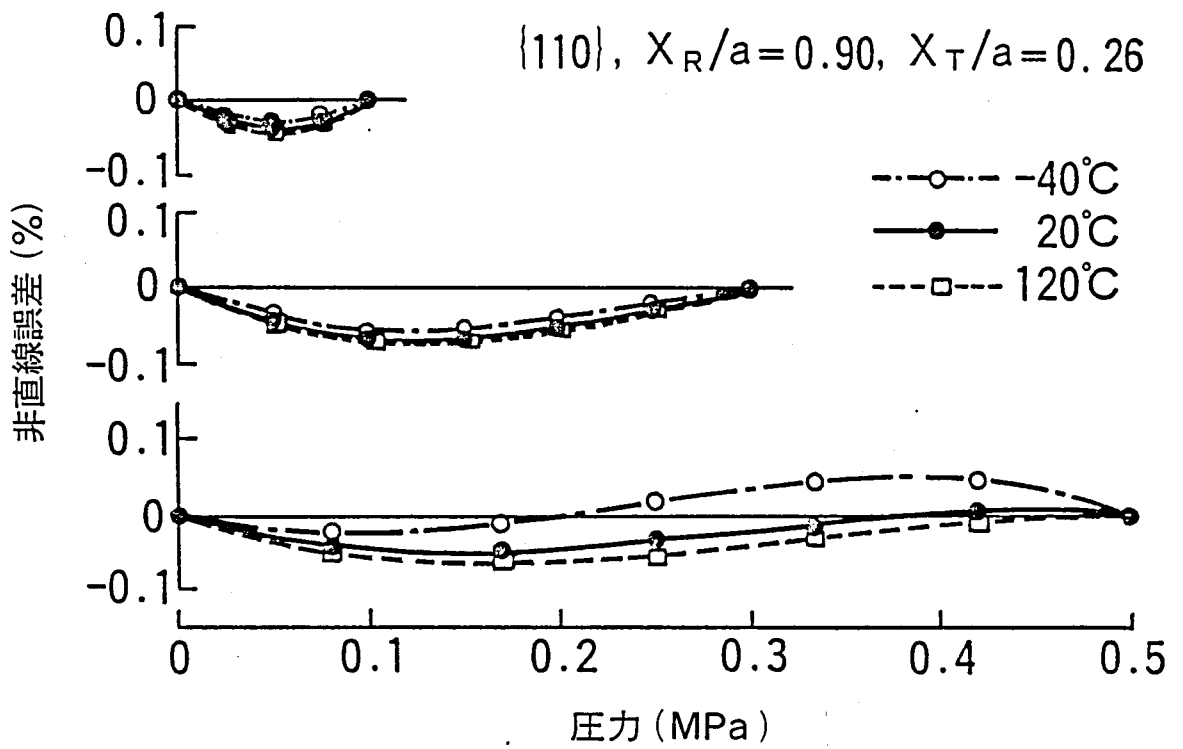


図 4.11 {110} 面 Si ダイアフラムセンサの非直線誤差とその温度依存性

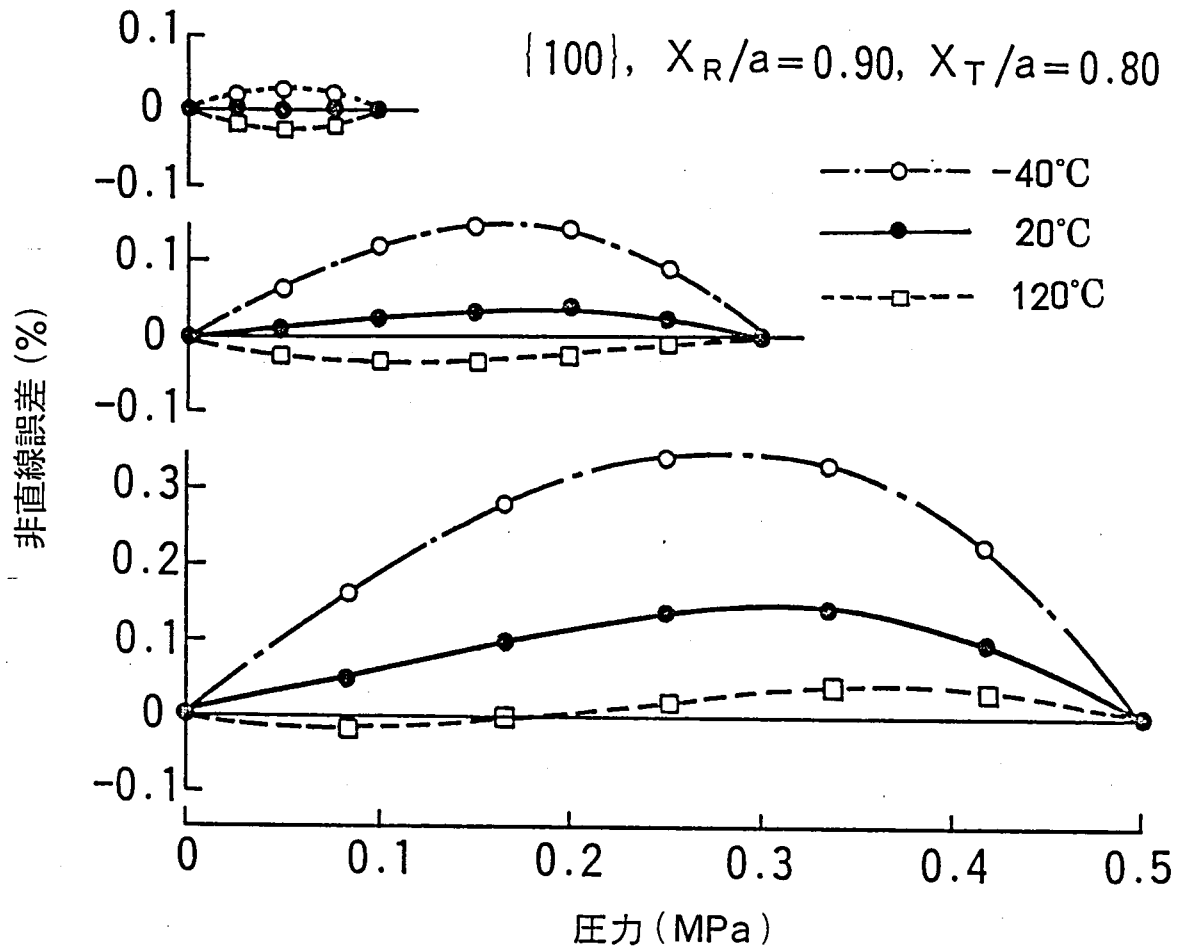


図 4.12 {100}面Siダイアフラムセンサの非直線誤差とその温度依存性

(2) {110} 面及び {100} 面 Si ダイアフラムについて、ブリッジ出力及びその非直線誤差のゲージ位置依存性を定量的に解析し、基準温度 (20°C) の条件下で非直線誤差が ±0.2% 以内となる高精度領域を明らかにした。この結果から、高精度、かつ高出力なセンサを得るためには、半径ゲージ抵抗体をできるだけ Si ダイアフラム端部に配置して高出力を得、かつ接線ゲージ抵抗体を、ブリッジ出力の非直線誤差が零となる適切な位置に配置すべきであるという、ゲージボタン設計上の基本的指針を得た。³⁶⁾

このことは、第 2 章、2.3.3 で述べたピエゾ抵抗効果の考察において、高感度な縦ピエゾ抵抗効果 ($\pi_l \sigma_l$) は、非直線誤差の小さくなる引張応力領域で使いべきであるということ、また大きな非直線誤差を持つ横ピエゾ抵抗効果 ($\pi_t \sigma_t$) は、ブリッジ出力の非直線誤差を積極的に打消すために利用できるということを示したものである。

(3) 次に Si ダイアフラムセンサのブリッジ出力の非直線誤差は、温度に依存して変化するという重要な事実を明らかにした。³⁶⁾³⁷⁾ いわゆる、非直線誤差を零とする最適ゲージ位置は、温度に依存して変化する。非直線誤差の温度依存性は、ブリッジ出力の増加に比例して増大し、このことが、高精度、かつ高出力なセンサ設計に対し、大きな制約となることを示した。

(4) 非直線誤差の温度依存性を、{110} 面 Si ダイアフラムと {100} 面 Si ダイアフラムについて解析比較した結果、{110} 面 Si ダイアフラムにおいて、半径ゲージ抵抗を Si ダイアフラム端部へ配置し、かつ接線ゲージ抵抗をダイアフラム中央部へ配置すれば、非直線誤差及びその温度依存性が極めて小さくできるという新しい事実が分った。この結果から、Si ダイアフラムの最適ゲージボタンの設計条件を下記のように決定した。³⁶⁾

結晶面：{110} 面

半径ゲージ抵抗配置：〈111〉軸上、 $X_R/a=0.9$

接線ゲージ抵抗配置：〈110〉軸から 45 度方向、 $X_T/a=0.26$

これは従来に無い新しいゲージボタンを提案したものである。⁴⁸⁾

(5) 以上の設計結果を、実験により確認した結果、上記最適ゲージボタンの Si ダイアフラムは、120°C ~ -40°C の広い温度範囲において、非直線誤差 ±0.1% 以内、ブリッジ出力 65 mV/V 以上が得られることが分った。これは、従来実用化されてきたゲージボタンに比べて、2 倍 ~ 3 倍の高出力が、非直線誤差 ±0.1% 以内の精度で得られたことになり、高精度な半導体圧力センサの実現が可能となった。³⁶⁾

第 5 章 高精度半導体圧力センサの試作

第5章 高精度半導体圧力センサの試作

5.1 はじめに

本章では，前章で検討した{110}面Siダイアフラムの最適ゲージパタンの基本設計に基づいて，半導体圧力センサの詳細設計を行ない，その試作について述べると共に，半導体圧力センサの高精度化のための，もう一つの重要課題である温度補償について検討する。

半導体圧力センサの高精度化のためには，前章までに述べたSiダイアフラムゲージパタンの最適設計の他に，センサ出力の温度影響，すなわち零点とスパンの温度影響の補償が重要な課題である。すでに述べたように，Siのピエゾ抵抗特性は，温度に対して極めて敏感に変化する。第4章に述べた非直線誤差の温度影響は，最適ゲージパタンの設計によって低減できたが，零点とスパンの温度影響は外部回路によって補償する必要がある。

半導体圧力センサの零点出力（圧力が零の時のブリッジ出力）は，4個のゲージ抵抗値の不均衡によって生じるもので，ゲージ抵抗値自身の温度係数は $0.25\%/^{\circ}\text{C}$ にも及ぶので，不平衡電圧の温度変化は無視できない。このためには，ブリッジ4辺のゲージ抵抗値の平衡をとり，かつその温度係数を一致させる温度補償が必要である。またスパン（測定圧力に対するブリッジ出力の変化量）の温度変化は， $120^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において，4～5%も変化し，かつ温度に対して極めて大きい非線形特性を示す。したがってスパン温度補償は，非線形な温度補償が必要となる。

半導体圧力センサの温度補償については，スパンの温度補償を，ダイオードを用いて補償する例が発表²⁾⁴⁹⁾されているが，ダイオードの温度特性は比較的線形な特性であるために，温度補償の精度に限界があった。本論文の目的としている精度 $0.2\sim 0.1\%$ 級の高精度半導体圧力センサでは，従来の方法より格段に精密な温度補償が不可欠の課題である。そのため，サーミスタと拡散抵抗体の抵抗値が，それぞれ温度に対して非線形に変化することを利用して，これらを組み合わせた回路網によって，半導体圧力センサの非線形な温度特性を補償する方式を開発した。

次にSiダイアフラムの製造において，ゲージ抵抗の拡散には，通常のイオン打込み，熱

拡散のプロセスを利用するが、ブリッジの不平衡電圧を小さくするため、4個のゲージ抵抗値を0.5%位で一致させること、及び表面不純物濃度を $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に制御することがポイントとなる。

またSi単結晶に2mm近い深い凹形加工をしてダイアフラムを形成する加工法については、エッチングのみでは不可能であるため、化学的機械研削法を開発して適用した。本章では、これらの製造プロセスの要点について述べている。

5.2 半導体圧力センサの詳細設計

前章で述べたSiダイアフラムの最適ゲージパタンの基本設計に基づき、その温度補償方式を含めて、半導体圧力センサ全体の詳細設計を行なう。表5.1に、半導体圧力センサの目標仕様を示す。測定圧力0~0.5MPa、ブリッジ出力65mV/V以上、非直線誤差±0.2%以内、また周囲温度120°C~-40°Cの範囲において、零点温度変化±0.5%以内、スパン温度変化±0.5%以内を目標とする。

表5.1 半導体圧力センサ目標仕様

項 目		目 標 仕 様
測 定 圧 力		0 - 0.5 MPa
非 直 線 誤 差		0.2% FS 以内
温 度 影 響	零 点	0.5% FS (120~-40°C)
	スパン	0.5% FS (120~-40°C)
ブ リ ッ ジ 出 力		65 mV/V
使 用 温 度		120~-40°C
耐 圧		測定圧力の1.5倍以上

5.2.1 Siダイアフラムセンサの詳細設計

図5.1に、Siダイアフラムの詳細設計図を示し、以下にその要点を述べる。

- (1) Siダイアフラムは、結晶面{110}を使用する。ゲージパタンは、第4章の結果に基づき、 $\langle 111 \rangle$ 軸に半径ゲージ抵抗 R_{R1} , R_{R2} , $\langle 110 \rangle$ 軸から45°方向に接線ゲージ抵抗 R_{T1} , R_{T2} をそれぞれ配置し、(4.5)式に基づいてその位置を決定した。すなわちダイアフラム中心から、 R_{R1} , R_{R2} までの距離を3.78mm ($X_R/a=0.9$), R_{T1} , R_{T2}

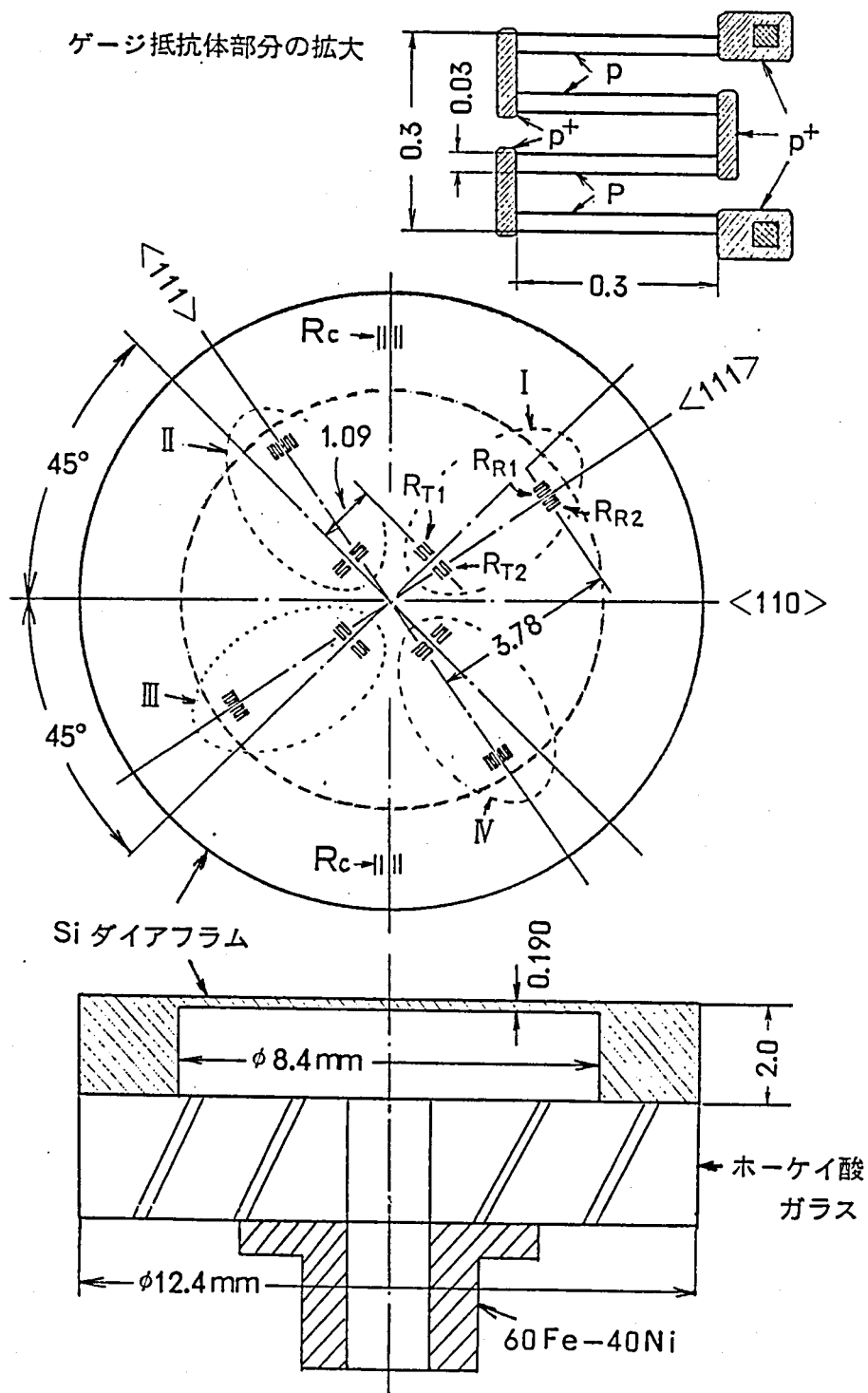


図 5.1 Si ダイアフラム 詳細設計図

までの距離を 1.09mm ($X_T/a=0.26$) とした。

- (2) 個々のゲージ抵抗体は、図中拡大図のように、抵抗部分 (p 層) を 4 つに分割し、これを低抵抗の p^+ 層で結合した 4 つ折れ構造とした。理由は、ゲージ抵抗体を Si ダイアフラム上の小さいエリアに限定して配置するためである (第 4 章, 4.3 節参照)。p 層は、その表面不純物濃度を $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、シート抵抗値 ρ_s を $150 \Omega/\square$ とし、ゲージ抵抗値を次のように設計した。

$$R(0,0,0) = \rho_s (L/W) = 6.0 \text{ (k}\Omega) \text{ (5.1)}$$

また p^+ 高濃度層は、その表面不純物濃度を約 10^{19}cm^{-3} 、シート抵抗値 ρ_s を $20 \Omega/\square$ とし、この部分の抵抗値は

$$r = \rho_s \cdot (L/W) = 100 \text{ (}\Omega) \text{ (5.2)}$$

と設計した。したがって、ゲージ抵抗体の全抵抗値は次のようになる。

$$R(0,0,0) + r \simeq 6.1 \text{ (k}\Omega) \text{ (5.3)}$$

- (3) Si ダイアフラム上には、図示のように、半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗をそれぞれ 4 組形成し、4 組のブリッジ回路 (I, II, III, IV) が構成できるようにした。すなわち、ペアとなる R_{R1}, R_{R2} と R_{T1}, R_{T2} は、それぞれ近接して配置し、各ペアの抵抗でブリッジを構成する。これを Si ダイアフラム上で 4 組形成している。

R_{R1}, R_{R2} 及び R_{T1}, R_{T2} をそれぞれ近接させた理由は、マスクパタン及びホトレジ工程におけるゲージ抵抗体の加工精度ばらつきや拡散の不均一性による抵抗間のばらつきを極力少なくするためである。またこれらの抵抗を 4 組設けた理由は、4 組のブリッジ回路のうち、最適な 1 組を選べるようにするためである。すなわち、いずれかのゲージ抵抗が不良であった場合に、他のゲージ抵抗体を選定できるように冗長性を高める意図と共に、ダイアフラム凹形加工の位置ずれなどにより、ゲージ抵抗体の相対位置 ($X_R/a, X_T/a$) がずれた場合に、非直線誤差の最も小さいブリッジの組を選定できるようにするためである。

なお Si ダイアフラムの周辺固定部（ひずみの生じない部分）に，固定抵抗 R_C を拡散で形成している。この抵抗は，圧力が Si ダイアフラムに加えられても変化しない抵抗で，次節にて述べる温度補償に用いるものである。表面不純物濃度はゲージ抵抗体と同じ $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり，その抵抗値が温度によって変化することを利用し，温度補償を行なう。基準温度 20°C における抵抗値は， $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ と設計している。

またダイアフラム半径，板厚等の設計値は，第 3，4 章で述べた値と同一にした。

Si ダイアフラムは，図示のような支持体に固定される。Si 結晶は熱膨張係数が比較的小さい材質である。したがって，Si 結晶と熱膨張係数が合致した材質で Si ダイアフラムを固定して，熱ひずみが生じないようにせねばならない。そのため，図示のように，Si ダイアフラムをホーケイ酸ガラスのリングに接合し，さらに 60Fe-40Ni 合金のパイプに接合して支持する構造を採用した。各材質の熱膨張係数は，Si 単結晶が $3.2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，ホーケイ酸ガラスが $3.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，60Fe-40Ni 合金が $3.2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ であり，Si の熱膨張係数に極めて近い値を持つ低熱膨張材料で Si ダイアフラムを支持している。これによって，異種材質間の熱膨張差によるひずみの発生が低減でき，熱ひずみによる Si ダイアフラムの特性変化が防止できる。

5.2.2 温度補償方式の設計

(1) 半導体ゲージ抵抗ブリッジの温度特性

半導体ゲージ抵抗体の抵抗値は，応力 σ_L ， σ_t 及び温度 t の関数として，第 2 章，(2.11) 式の $R(\sigma_L, \sigma_t, t)$ で示される。今， $R(\sigma_L, \sigma_t, t)$ を，応力によって変化する項 $\Delta R(\sigma_L, \sigma_t, t)$ と応力に無関係な項 $R(0, 0, t)$ に分けて考える。そして応力 σ_L, σ_t は Si ダイアフラムに印加される圧力 P の関数であるので， σ_L, σ_t を圧力 P におきかえれば，(2.11) 式は次のように変形して考えることができる。

$$R(P, t) = R(0, t) + \Delta R(P, t) \quad \text{..... (5.4)}$$

このような特性を持つゲージ抵抗体を図 1.4 に示すブリッジ回路に結線し，電流 I_S で励起すると，次式のブリッジ出力 V を得る。

$$V = \frac{R_{R1} \cdot R_{R2} - R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{R1} + R_{R2} + R_{T1} + R_{T2}} \cdot I_s$$

$$= \{ \gamma \cdot R(0, t) + \Delta R(P, t) \} \cdot I_s \quad \text{----- (5.5)}$$

ここに， γ は $P = t = 0$ 時のブリッジ4辺の抵抗値の偏差， $\Delta R(P, t)$ はブリッジ4辺の抵抗変化の平均値とする。 $R(0, t)$ ， $\Delta R(P, t)$ は温度 t の関数であり，次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} R(0, t) &= R(0, 0) \{ 1 + \alpha(t) \} \\ \Delta R(P, t) &= \Delta R(P, 0) \{ 1 + \beta(t) \} \end{aligned} \right\} \text{----- (5.6)}$$

温度係数 $\alpha(t)$ ， $\beta(t)$ は，ゲージ抵抗体の表面不純物濃度 N_s によって異なるが， $N_s = 2 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-3}$ の場合， 20°C を基準としたときの実測値は，図5.2のようになり，温度に対して大きな非線形特性を示す。²⁾

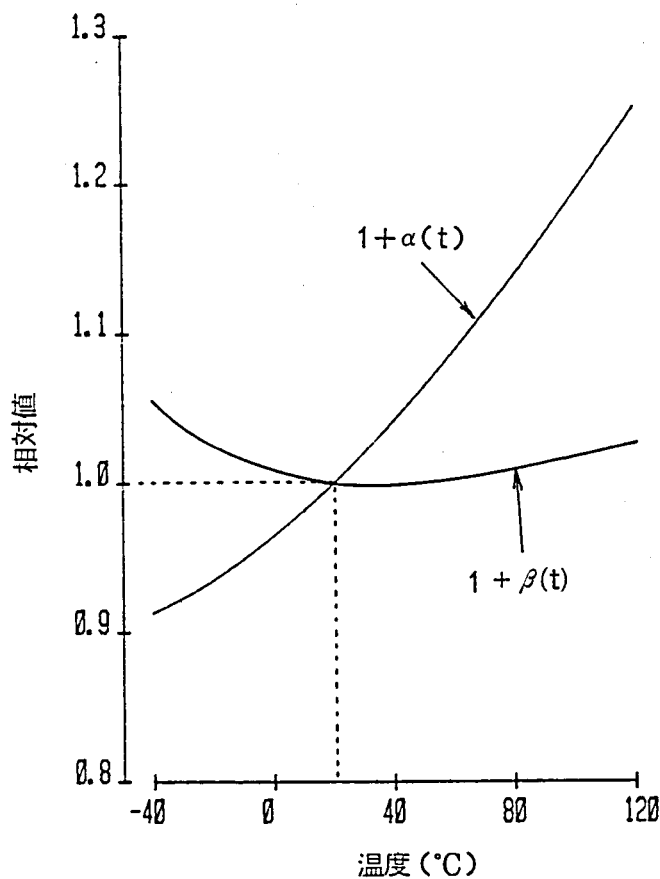


図5.2 拡散ゲージ抵抗値及びスパンの温度変化 (表面不純物濃度： $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

(5.5) 式の第1項 $\gamma \cdot R(0, t) \cdot I_S$ は、圧力が零の時の出力であり、これを零点出力という。零点出力はブリッジ4辺の抵抗値が等しければ零(V)であるが、実際のセンサにおいては、ゲージ抵抗値のばらつき(偏差 γ)のため不平衡電圧が生じる。この不平衡電圧を温度によらず零(V)に補償することを、零点温度補償という。

(5.5) 式の第2項 $\Delta R(P, t) \cdot I_S$ は、圧力が印加された時の出力の変化であり、フルスケールの圧力を印加したときの出力変化幅をスパンという。このスパンを温度によらず一定に補償することをスパン温度補償という。

したがって温度補償では、零点温度補償とスパン温度補償の2つが必要で、それぞれの温度影響を独立に補償せねばならない。特に半導体圧力センサの場合には、零点温度変化、スパン温度変化のいずれも大きく、かつ、図5.2のように温度に対して非線形特性となるため、以下に述べるような複雑な温度補償方式を必要とする。

(2) 零点温度補償

図5.3(a)のブリッジ回路は、圧力 $P=0$ の時にも、ゲージ抵抗値のばらつき γ のために不平衡な零点出力 ΔV_0 を生じている。 ΔV_0 の大きさは、(5.5), (5.6) 式より

$$\Delta V_0 = \gamma \cdot R(0, 0) \cdot \{1 + \alpha(t)\} \cdot I_S \quad \text{..... (5.7)}$$

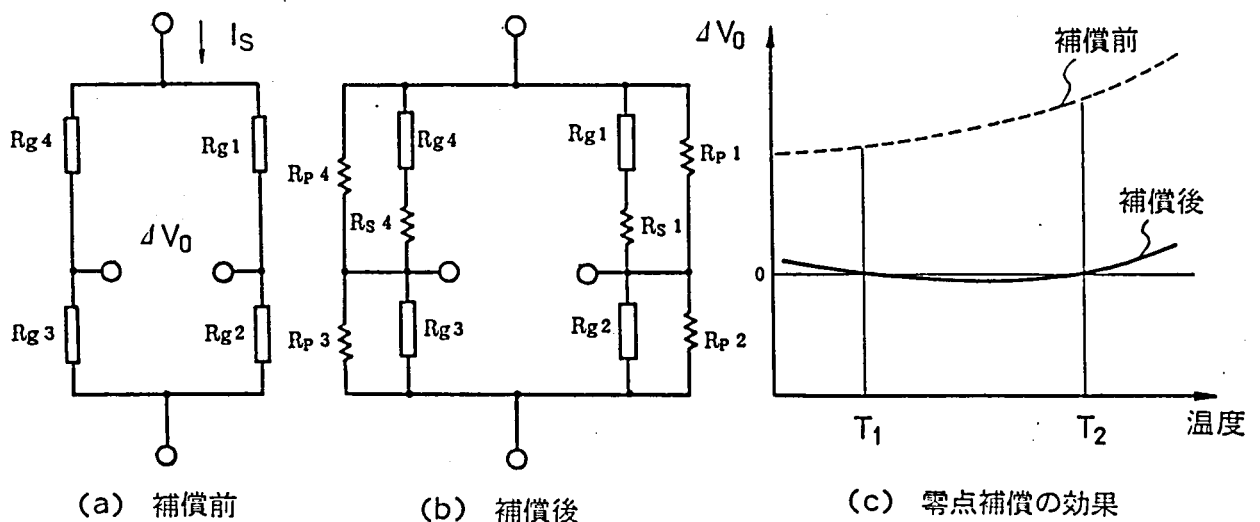


図5.3 ブリッジの零点温度補償回路

であり， $\alpha(t)$ の温度係数を持つ。

不平衡電圧を零にするには，同図(b)に示すように，ブリッジの各脚に，ゲージ抵抗体（ここでは R_{gi} と表示する）と直列又は並列に固定抵抗 R_{si} 又は R_{pi} を挿入して，ブリッジの平衡をとればよい。この時，挿入する固定抵抗が温度係数を持たないものとするれば，ゲージ抵抗自身の持つ温度係数も同時に変調される。

今，ゲージ抵抗 R_{gi} に直列に固定抵抗 R_{si} を挿入した場合を考えると，その合成抵抗値は

$$R_{gi} + R_{si} \simeq R_{goi} \left(1 + \frac{R_{si}}{R_{goi}} \right) \left\{ 1 + \left(1 - \frac{R_{si}}{R_{goi}} \right) \alpha(t) \right\} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ただし， R_{goi} ：基準温度（20℃）でのゲージ抵抗値， $R_{goi} \gg R_{si}$

となる。すなわち，ゲージ抵抗値は R_{si}/R_{goi} だけ増大し，温度係数 $\alpha(t)$ は R_{si}/R_{goi} だけ減少したと等価になる。例えば，ゲージ抵抗値を1%だけ増加させれば，温度係数は1%減少する。

次に，ゲージ抵抗 R_{gi} に，並列に固定抵抗 R_{pi} を挿入した場合を考えると，その合成抵抗値は

$$R_{gi} // R_{pi} \simeq R_{goi} \left(1 - \frac{R_{goi}}{R_{pi}} \right) \left\{ 1 + \left(1 - \frac{R_{goi}}{R_{pi}} \right) \alpha(t) \right\} \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

ただし， $R_{goi} \ll R_{pi}$

となる。すなわち，ゲージ抵抗値は， R_{goi}/R_{pi} だけ減少し，温度係数 $\alpha(t)$ は R_{goi}/R_{pi} だけ減少する。例えばゲージ抵抗値を1%だけ減少させれば，温度係数も1%だけ減少する。

以上の関係をまとめると表5.2のようになる。

この関係を用いれば，ブリッジ各辺の抵抗値とその温度係数が自由に調整可能となるので， R_{S1} 又は R_{S4} と $R_{P1} \sim R_{P4}$ を適当に選ぶと，温度によらずブリッジの不平衡電圧を常に零にすることができる。これが零点温度補償の原理である。

表 5.2 合成抵抗の抵抗値と温度係数

項 目	ゲージ抵抗	並列接続	直列接続
接 続 図		 ($R_{gi} \ll R_{pi}$)	 ($R_{gi} \gg R_{si}$)
抵 抗 値 (20℃)	R_{goi}	$R_{goi} \left(1 - \frac{R_{goi}}{R_{pi}}\right)$	$R_{goi} \left(1 + \frac{R_{si}}{R_{goi}}\right)$
温 度 係 数	$\alpha(t)$	$\left(1 - \frac{R_{goi}}{R_{pi}}\right) \alpha(t)$	$\left(1 + \frac{R_{si}}{R_{goi}}\right) \alpha(t)$

(3) スパン温度補償

零点補償後のブリッジ出力は，(5.5)式において第1項が零となるので次式のようになる。

$$V = \Delta R(P, t) \cdot I_s \quad \text{..... (5.10)}$$

$\Delta R(P, t)$ の温度変化は，図 5.2 において $1 + \beta(t)$ で示され，温度に対して大きな非線形性を持つ。スパン温度補償は，(5.10)式の V が，温度によって変化しないようにするのが目的である。

今，(5.10)式を温度の関数として，温度 T で微分すれば

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{1}{\Delta R(P, t)} \cdot \frac{\partial \Delta R(P, t)}{\partial T} + \frac{1}{I_s} \cdot \frac{\partial I_s}{\partial T} \quad \text{..... (5.11)}$$

となる。上式左辺は，スパンの温度変化率を示すものであるから，これを温度によらず零とするためには，上式右辺が零であることが必要である。すなわち

$$\frac{1}{\Delta R(P, t)} \cdot \frac{\partial \Delta R(P, t)}{\partial T} + \frac{1}{I_s} \cdot \frac{\partial I_s}{\partial T} = 0 \quad \text{..... (5.12)}$$

が成立すれば，スパンの温度変化が生じない。³⁸⁾

したがって、スパン温度補償の原理は、励起電流 I_S を (5.12) 式が成立するように制御すればよい。すなわち、 $\Delta R(P, t)$ の温度変化に対して、これと逆の温度特性を I_S に持たせればよい。

図 5.4 はスパン温度補償回路の原理図であるが、図においてブリッジ励起電流 I_S は、 $I_S = E_S / R_S$ で制御されるので、 R_S に温度特性を持たせれば、

$$\frac{1}{I_S} \cdot \frac{\partial I_S}{\partial T} = - \frac{1}{R_S} \cdot \frac{\partial R_S}{\partial T} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

となる。よって、(5.12)、(5.13) 式から

$$\frac{1}{\Delta R(P, t)} \cdot \frac{\partial \Delta R(P, t)}{\partial T} = \frac{1}{R_S} \cdot \frac{\partial R_S}{\partial T} \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

の関係を得る。すなわち、スパン温度影響を補償するには、インピーダンス R_S を、

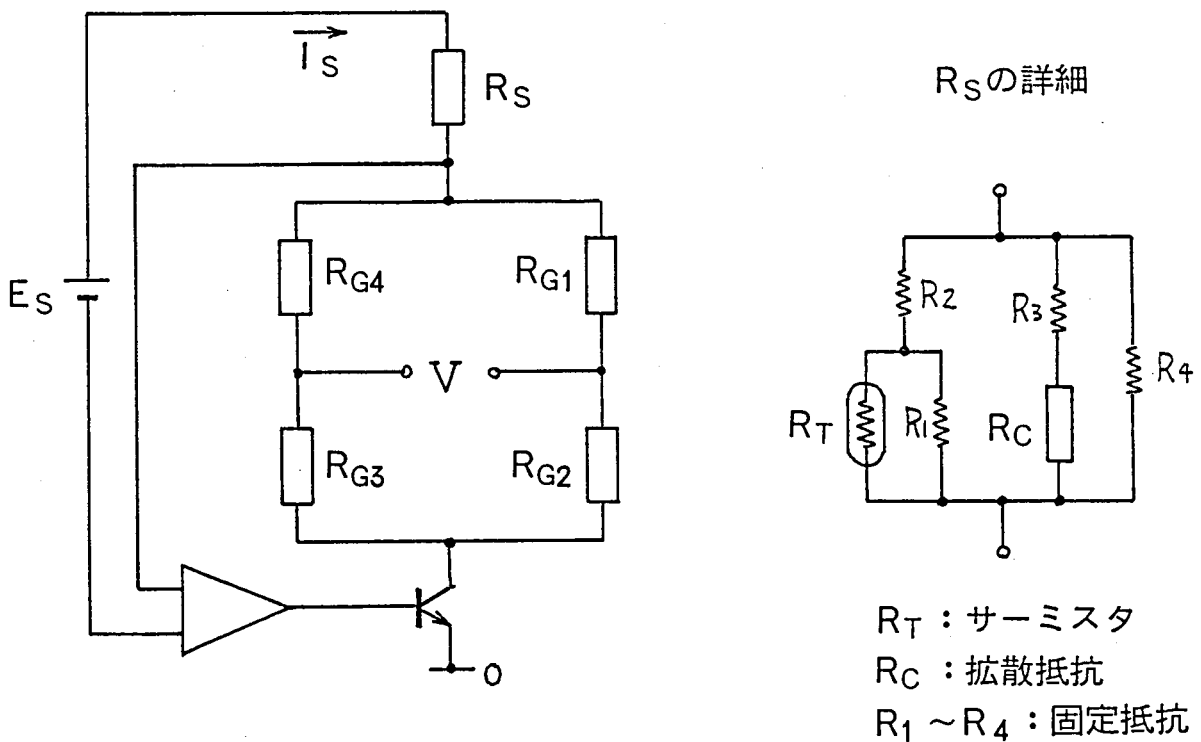


図 5.4 スパンの温度補償回路

$\Delta R(P, t)$ の温度特性と一致させればよいことが分る。

$\Delta R(P, t)$ の温度特性は非線形であり，その温度係数 $\beta(t)$ は，図 5.2 のように正と負の温度係数を持つ特性を示す。したがって， R_S は，温度に対して，正と負の温度係数を持った非線形な温度特性をもたせる必要がある。

そこで，図 5.4 に示すように，負の温度係数を持つサーミスタ R_T ，正の温度係数を持つ拡散抵抗 R_C ，および温度係数の小さい抵抗 $R_1 \sim R_4$ を組合せ， $\beta(t)$ と同じ温度特性を持つインピーダンス回路 R_S を開発した。³⁸⁾ R_S の温度特性を図 5.5 に示す。図示のように (R_T, R_1, R_2) で構成した回路 Z_1 は，サーミスタ特性により負の温度係数を持ち， (R_C, R_3, R_4) で構成した回路 Z_2 は，拡散抵抗の温度特性により，正の温度係数を持つ。したがって， Z_1, Z_2 を合成した回路 R_S は，図示実線の特性となる。この場合の， $R_T, R_C, R_1 \sim R_4$ の回路定数は，

$$R_T = R_{T0} \cdot \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{273} \right) \right\}$$

ここに， $R_{T0} = 2 \text{ k}\Omega$: $T = 0^\circ\text{C}$ 時のサーミスタ抵抗値

$B = 2500^\circ\text{K}$: サーミスタ B 定数

$$R_C = R_{C0} \cdot \{ 1 + \alpha_1 (T - T_0) + \alpha_2 (T - T_0)^2 + \alpha_3 (T - T_0)^3 \} \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

ここに， $R_{C0} = 2 \text{ k}\Omega$: $T = T_0 (20^\circ\text{C})$ 時の拡散抵抗値

$$\alpha_1 = 1.9 \times 10^{-3}, \quad \alpha_2 = 7.2 \times 10^{-6}, \quad \alpha_3 = -1.4 \times 10^{-8}$$

$$R_1 = 15.4 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 6.2 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 1.4 \text{ k}\Omega, \quad R_4 = 2.5 \text{ k}\Omega$$

である。図において， R_S の特性は，センサの適用温度である $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ の範囲で見れば，図 5.2 の $\beta(t)$ の温度特性と同一である。したがって，スパンの温度変化が完全に補償できる。

ところで実際のセンサは，製造工程におけるゲージ抵抗体の表面不純物濃度のばらつきなどが原因で，それぞれ個々にスパン温度特性がわずかながら異なってしまう。この

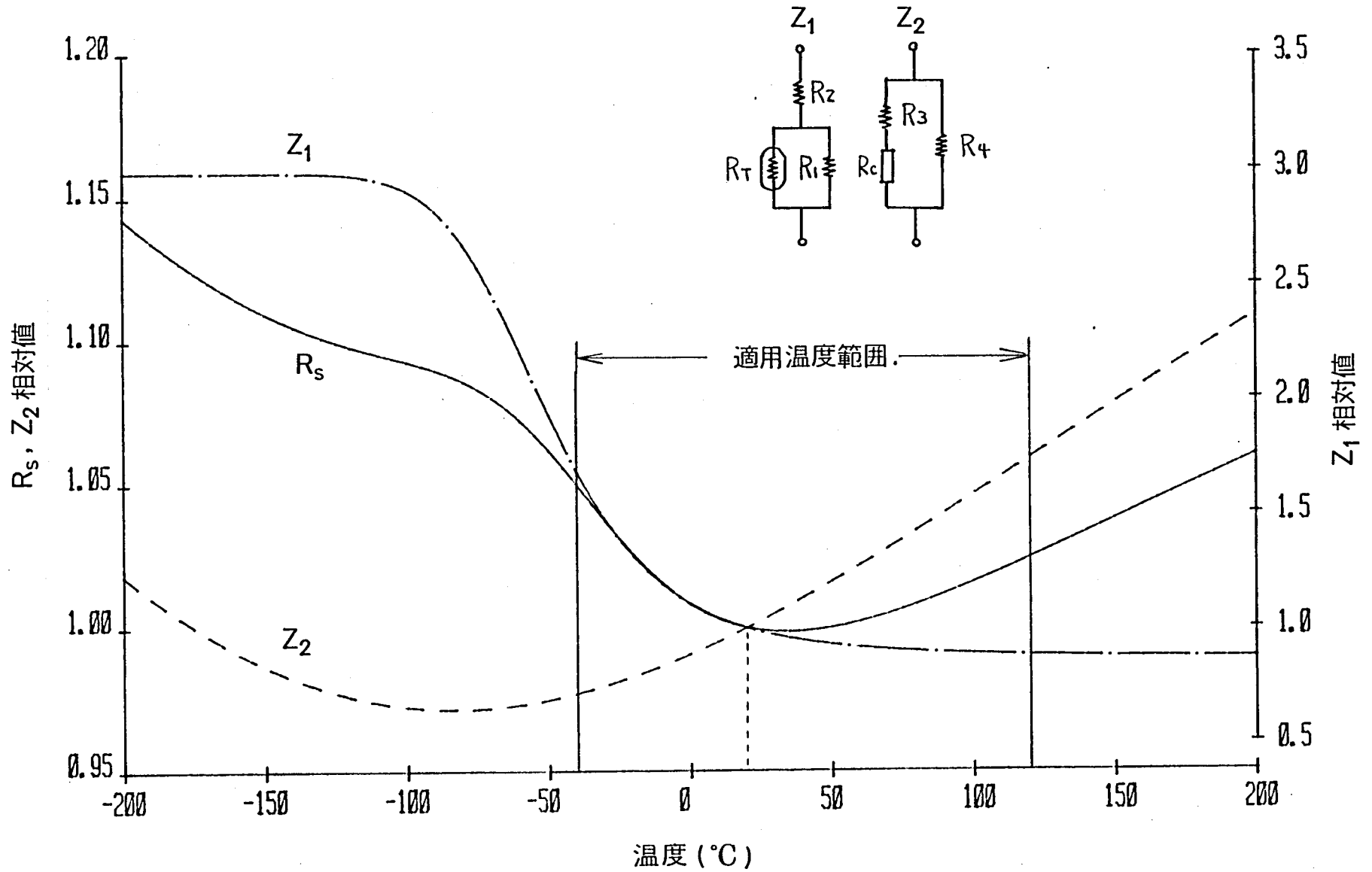


図 5.5 スパン温度補償用 R_s の温度特性

場合には、固定抵抗 $R_1 \sim R_4$ を適切に選ぶことによって、 R_S の温度特性が自由に調整できる。

なお、温度補償要素である拡散抵抗 R_C は、Si ダイアフラムの周辺固定部に形成している（図 5.1 参照）。またサーミスタ R_T は厚膜サーミスタを開発して⁵⁰⁾、セラミクス基板上に、 $R_1 \sim R_4$ と一体的に形成して Si ダイアフラム周囲に設置している（図 5.9 参照³⁹⁾⁴⁰⁾）。

5.3 半導体圧力センサの製造

Si ダイアフラムの製造プロセスの工程を図 5.6 に示し、主要な事項を以下に記す。

① Si 基板は、{110} 面，n 形（リンドーブ），抵抗率 $1 \sim 2 \Omega\text{-cm}$ ，両面鏡面研磨仕上げのものを利用した。大きさは $\phi 50\text{mm}$ ，厚さ 2mm で、通常よく使用される基板より厚いウェハを使用している。

①～④は、ゲージ抵抗（p 層）の形成プロセスである。

まず、イオン打込みのチャンネリング防止の為に、非常に薄い酸化膜を形成した Si 基板に、イオン打込み用マスクをホトレジストで形成し（①），これをマスクにしてボロンイオンを打込み、ゲージ抵抗（p 層）を形成する（②）。ホトレジストを除去して（③），ドライブイン拡散(I)を行なう（④）。拡散は $1200^\circ\text{C} \times 12$ 分，ドライ N_2 中で行ない，この工程で、ゲージ抵抗体のシート抵抗 ρ_s と表面不純物濃度 N_s を設計仕様値に調整する。ただし，⑧の工程で再度ドライブイン拡散を行なうので， ρ_s と N_s は，④と⑧の 2 工程で，所期の設計仕様値になるよう調整している。 ρ_s はゲージ抵抗値を決め， N_s はゲージ抵抗の温度特性を決定するものであるから，この 2 つの工程によって，いずれの値も正確に調整することが，ゲージ抵抗形成の技術的ポイントである。

⑤～⑧は， p^+ 層の形成プロセスである。

p^+ 拡散用のマスクを CVD 酸化膜によって作り（⑤⑥），減圧 BN 法により BN（ボロンナイトライド）プレデポジションを行なって p^+ 層を形成する（⑦）。BN プレデポジションにより，Si 及び SiO_2 表面に BSG 膜（ボロシリゲートガラス）が生成するので，これをエッチングによって除去している。しかる後， $1200^\circ\text{C} \times 40$ 分，ドライ O_2 中でドライブイン拡散を行なう（⑧）。この工程は，先に述べたように，ゲージ抵抗層のシート抵抗 ρ_s ，

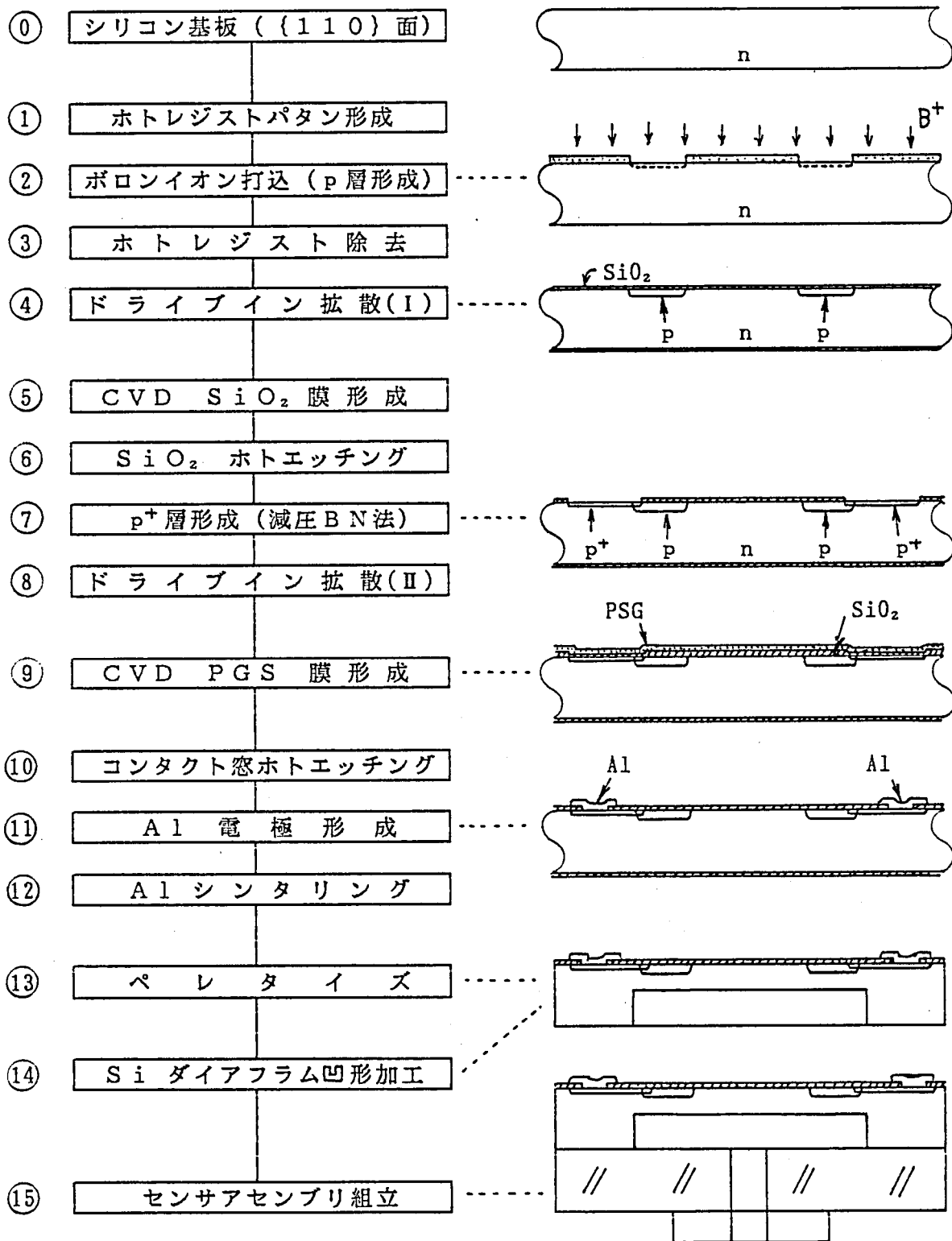


図 5.6 半導体圧力センサの製造プロセス

と不純物濃度 N_s を④の工程と合わせ、 $\rho_s = 150 \pm 5 \Omega/\square$ 、 $N_s = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となるように最終調整を行なうものである。またこの工程では、同時に p 層と p⁺ 層の保護のために熱酸化膜を 0.5 μm だけ形成する。

⑨は、パッシベーション用の PSG 膜を形成するプロセスである。

PSG のリン濃度は 3~4% mol% で、0.4 μm の厚さに形成する。先の工程で生成した熱酸化膜と PSG 膜を合わせて、0.9 μm と比較的薄い膜でパッシベーションをしているが、この理由は、酸化膜が Si に及ぼす応力を低減する為である。PSG 膜は 900°C × 10 分、N₂ 中でデンシファイ（緻密化）している。このように、比較的薄いパッシベーションで、長期にわたる安定性を確保させる必要があり、これがプロセス上のポイントの 1 つである。

⑩~⑫は電極形成プロセスである。

p⁺ 層にコンタクト窓をホットエッチングで開口し（⑩）、Al を堆積後これをホットエッチングして電極を形成する（⑪）。最後に Si と Al のコンタクト性を良好にするために、430°C × 5 分、ドライ N₂ 中で Al シンタリングをしている（⑫）。以上の工程により、ゲージ抵抗体を形成した Si 基板が製造される。

⑬は、Si ダイアフラムチップのベレタイズ工程である。ここでは、2mm の厚さの Si を $\phi 12.4 \pm 0.1 \text{ mm}$ の円形に精度良く切り出すために超音波ホーンを用いた加工法を採用している。超音波ホーンは、チップ形状に合わせて特別に作り、19kHz の超音波で励振して切り出している。

⑭は、Si ダイアフラムの凹形加工プロセスであり、この加工法を図 5.7 に示す。

凹形加工では、同図(b)のように、2mm 厚みの Si 単結晶に、直径 $2a = 84 \text{ mm}$ の円形穴を $\pm 0.005 \text{ mm}$ の精度であけ、しかも残り厚板 h を $0.19 \pm 0.005 \text{ mm}$ の精度で加工することが必要である。Si ダイアフラムの感度は板厚 h の 2 乗に反比例するため、センサ特性のばらつきを少なくするために、高度な加工精度が要求される。

このように深く、かつ、高精度が要求される Si の凹形加工は、化学的なエッチング加工では不可能である。そのため、同図(a)に示す MG (Mechano Grinding) 加工法を開発

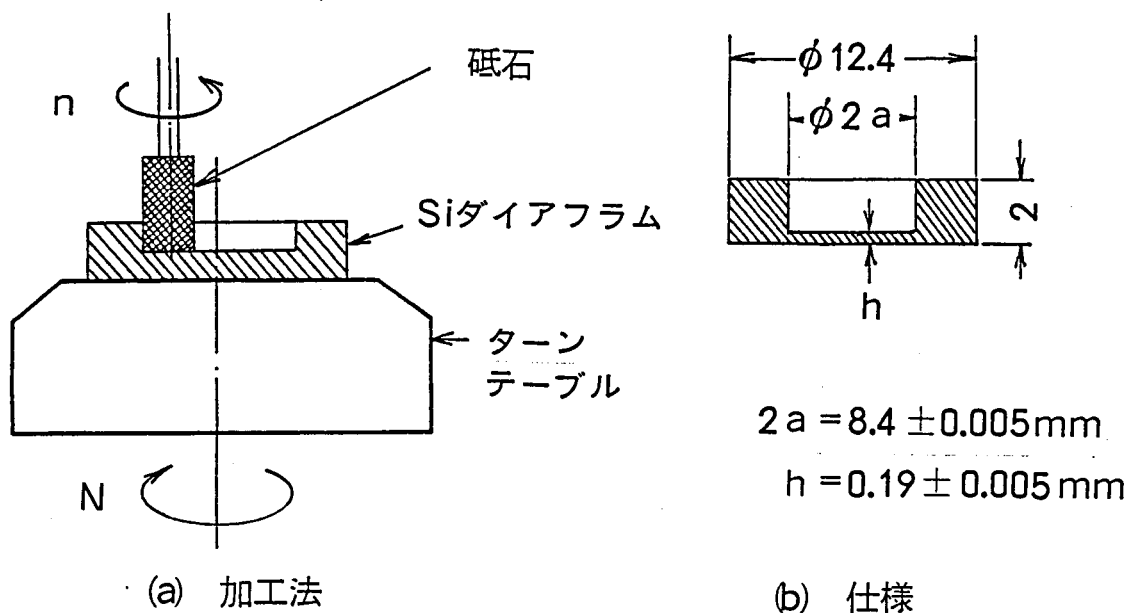


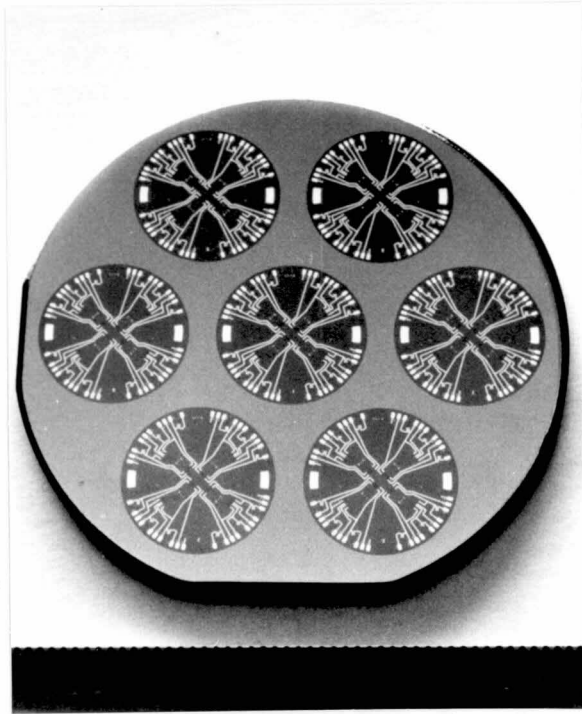
図 5.7 Si ダイアフラムの凹形加工

した。この加工法は Si 単結晶をターンテーブルに接着してこれを回転させ、反対側からダイヤモンド粒を入れた砥石を高速で回転させて、Si 単結晶に凹形加工をする方法である。ターンテーブルと砥石の回転は逆回転で、しかもその中心軸を偏心させている。Si ダイアフラムの加工精度は、直径方向に $5 \mu\text{m}$ 、板厚方向 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ を達成した。

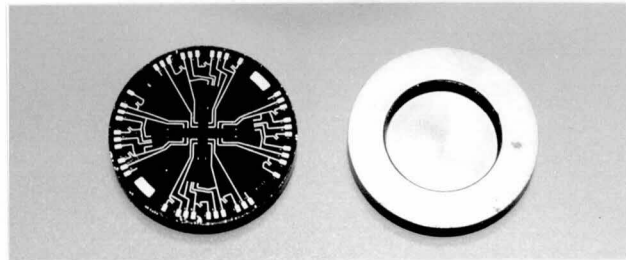
なお、MG 加工によって、Si 結晶には加工変質層が生じ、Si ダイアフラムの強度が低下する。このため、MG 加工後に、エッチングによって加工変質層を除去し、Si ダイアフラムの強度を回復している。

⑤はセンサアセンブリの組立工程である。ここでは Si ダイアフラムをホーケイ酸ガラスのリングを介して 60Fe-40Ni 合金パイプに接合し、Si ダイアフラムアセンブリが完成する。

以上の工程によって製作した試作品の外観を図 5.8 に示す。同図(a)は、ゲージ抵抗を形



(a) ゲージ抵抗体を形成したSi基板



(b) Siダイアフラム



(c) Siダイアフラムセンサアセンブリ

図5.8 Siダイアフラムの試作品

成したSi基板であり，1枚の基板から7個のセンサが得られる。同図(b)は，凹形加工をしたSiダイアフラム，同図(c)はそのアセンブリー外観である。

5.4 半導体圧力センサの特性

本節では，試作センサの実験結果について述べる。

図5.9は，半導体圧力センサのアセンブリー(治具)構造である。5.2.1項で述べたように，Si結晶は熱膨張係数が $3.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ という低熱膨張材である。それ故，ハウジング

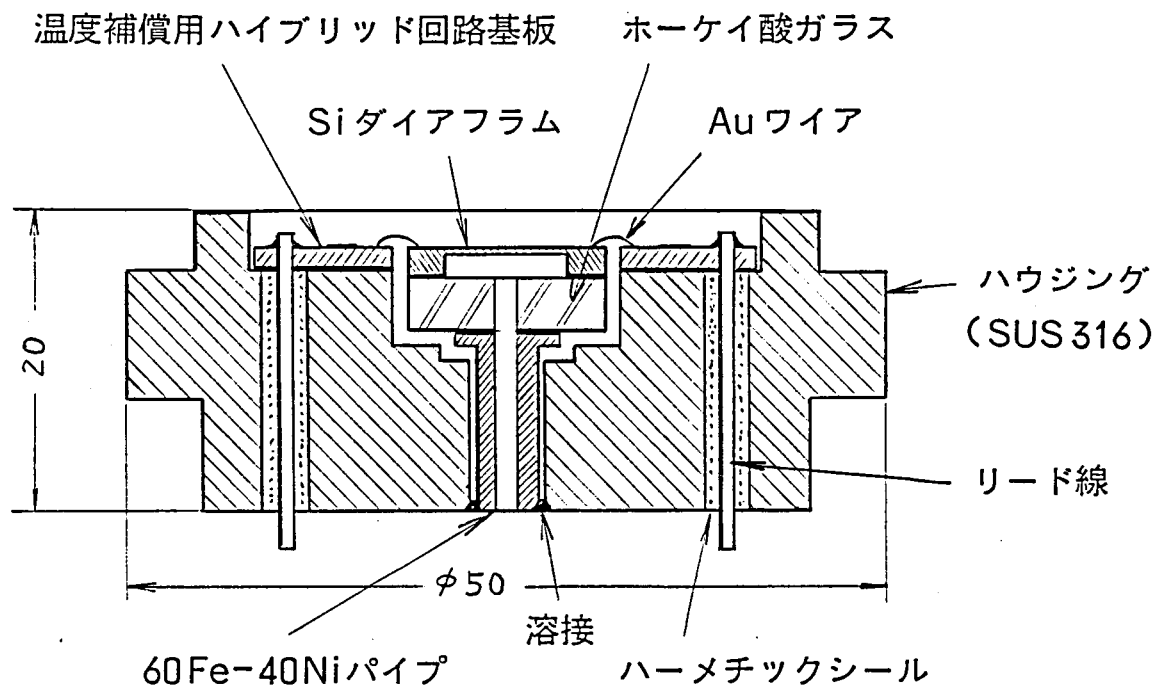


図5.9 半導体圧力センサのアセンブリー構造

への取付けにおいて異種材質間の熱膨張差による熱ひずみが，Siダイアフラムへ影響しない構造とする必要がある。このため，図に示すように，Siダイアフラムを支持している。60Fe-40Ni材のパイプの先端をハウジング(SUS316，熱膨張係数 $\approx 16.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)に溶接する構造とし，ハウジングの大きな熱膨張ひずみが60Fe-40Niパイプにより緩和され，Siダイアフラムに影響しにくい構造とした。また5.2.2項で述べた温度補償素子は図示のハイブリッド基板に厚膜で形成し，Siダイアフラムと温度条件が合致するよう近接して設置した。圧力は，Siダイアフラム上面が正の圧力となるように印加した。

5.4.1 入出力特性

試作した圧力センサの入出力特性を図 5.10 に示す。

同図(a)は圧力-出力特性を示す。ブリッジ励起電流 I_S をパラメータにして示してある。ゲージ抵抗値は約 $6\text{ k}\Omega$ であるので、 $I_S = 1\text{ mA}$ のときには、ブリッジ両端の印加電圧は 6 V となり、この場合、圧力 0.5 MPa で出力 390 mV を得ている。したがって、単位印加電圧当りの出力は、 65 mV/V となり、設計仕様の結果が得られた。

同図(b)は非直線誤差とその温度依存性である。この特性は、第 4 章で述べた特性とほぼ同じ結果であり、非直線誤差は、 $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ の範囲で、 $\pm 0.05\%$ が得られている。

5.4.2 温度影響

(1) 零点温度影響

試作した圧力センサの零点温度影響を図 5.11 に示す。

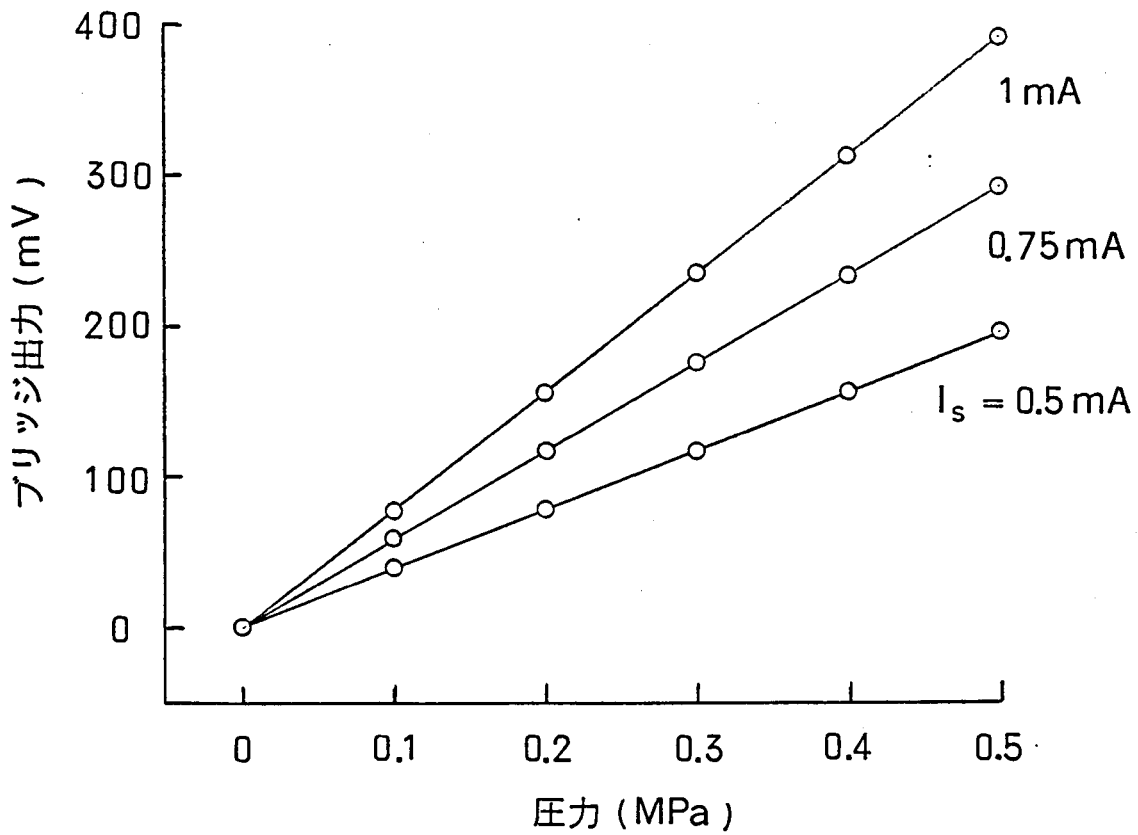
温度補償前の零点とその温度変化は、同図(a)に示すとおりである。縦軸は零点変化を $\%$ 値で示しているが、これはフルスケール出力を 65 mV/V とした場合の数値である。このセンサを、5.2.2 項に述べた方法により補償した結果は、同図(b)のようになり、 $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ の全温度範囲で、ほぼ $\pm 0.1\%$ の範囲に補償された。

(2) スパン温度変化

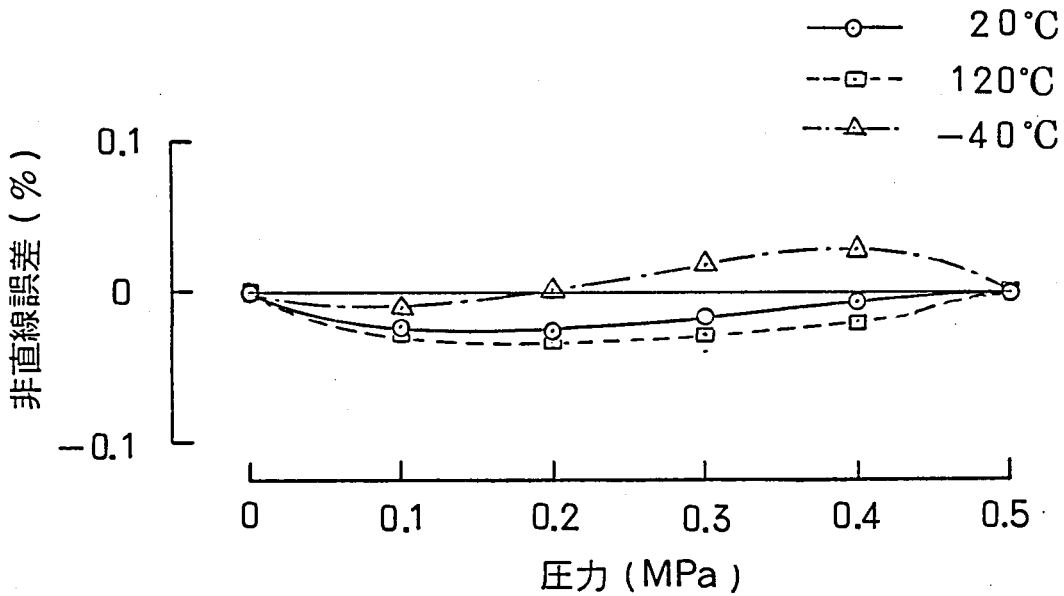
スパン温度特性を図 5.12 に示す。

温度補償前の特性は同図(a)のように大きな非線形特性を示している。これを 5.2.2 項に述べた方法により補償した結果は、同図(b)のようになり、 $100^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ では $\pm 0.1\%$ 以内、 $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ では $\pm 0.25\%$ 以内に補償されている。

スパン温度変化を複数の試作センサについて実験すると、図 5.13(a)のようにばらついている。この図は、基準温度 20°C 時のスパンを基準として、そのばらつき範囲を示している。このようなセンサのばらつきに対して、補償後の特性を計算すると、同図(b)のようになる。スパン温度変化率は、 -40°C と 120°C の点で大きくなるが、それでも全温度範囲で $\pm 0.4\%$ 以内に補償し得る。この結果、センサの特性がばらついても、5.2.2 項の温度補償方式は有効であることが確認できた。

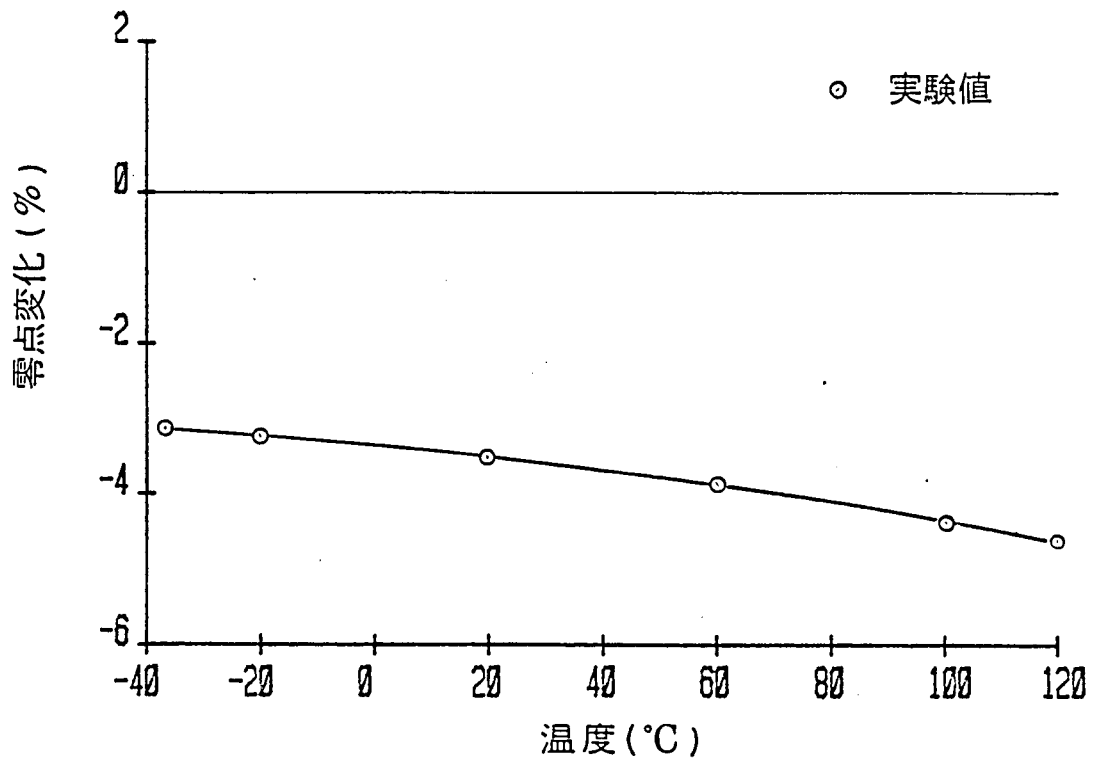


(a) 圧力-出力特性

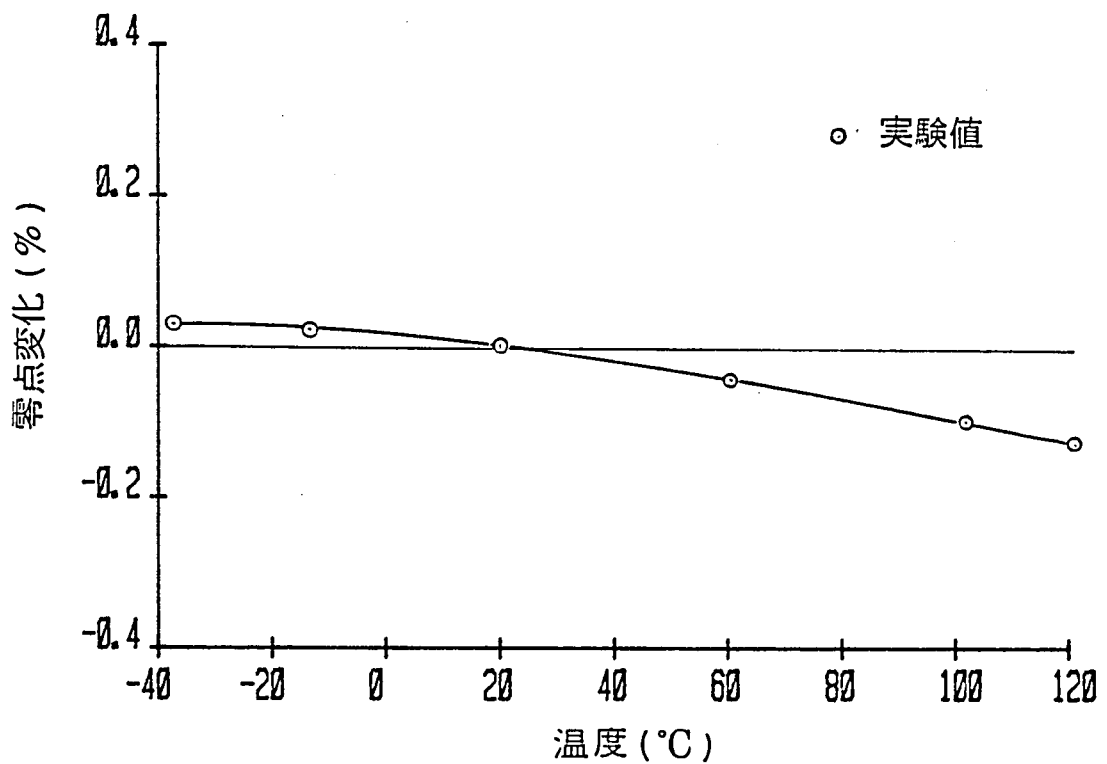


(b) 非直線誤差とその温度依存性

図5.10 入出力特性

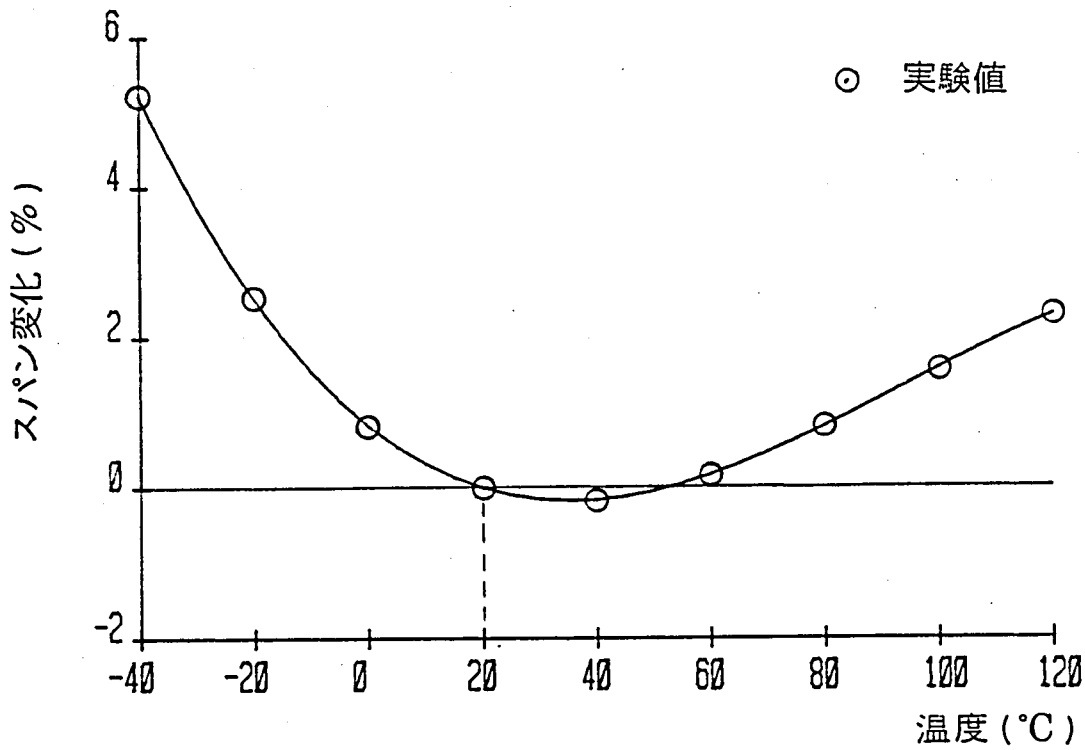


(a) 補償前の零点変化

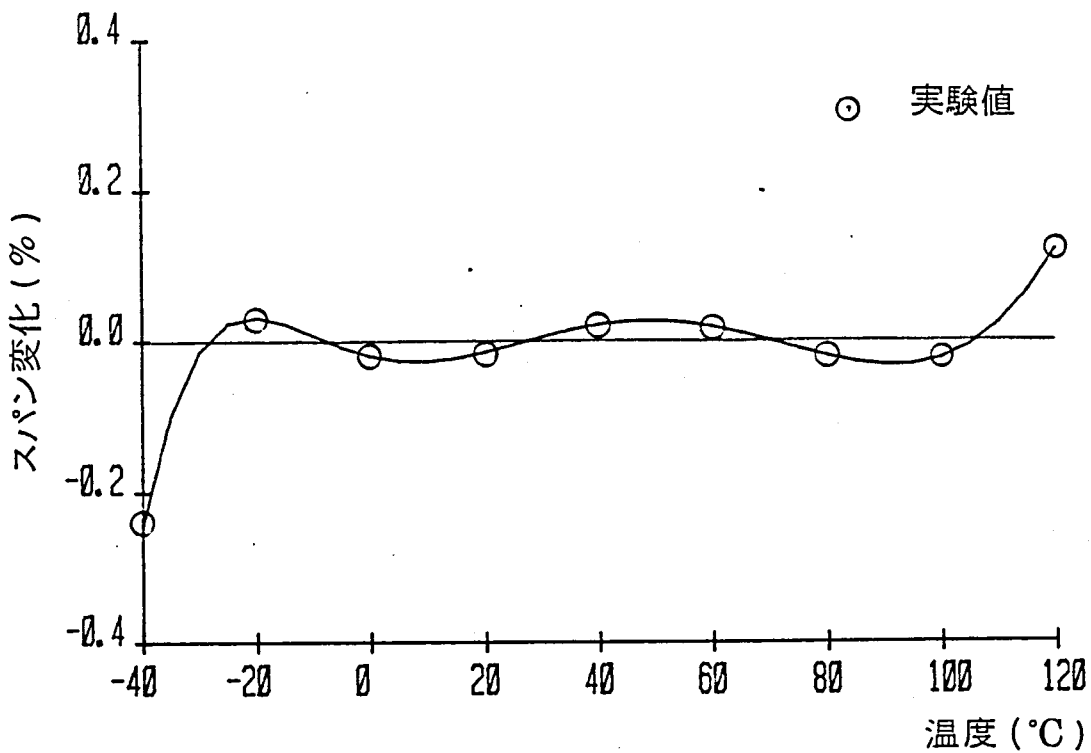


(b) 補償後の零点変化

図5.11 零点温度特性

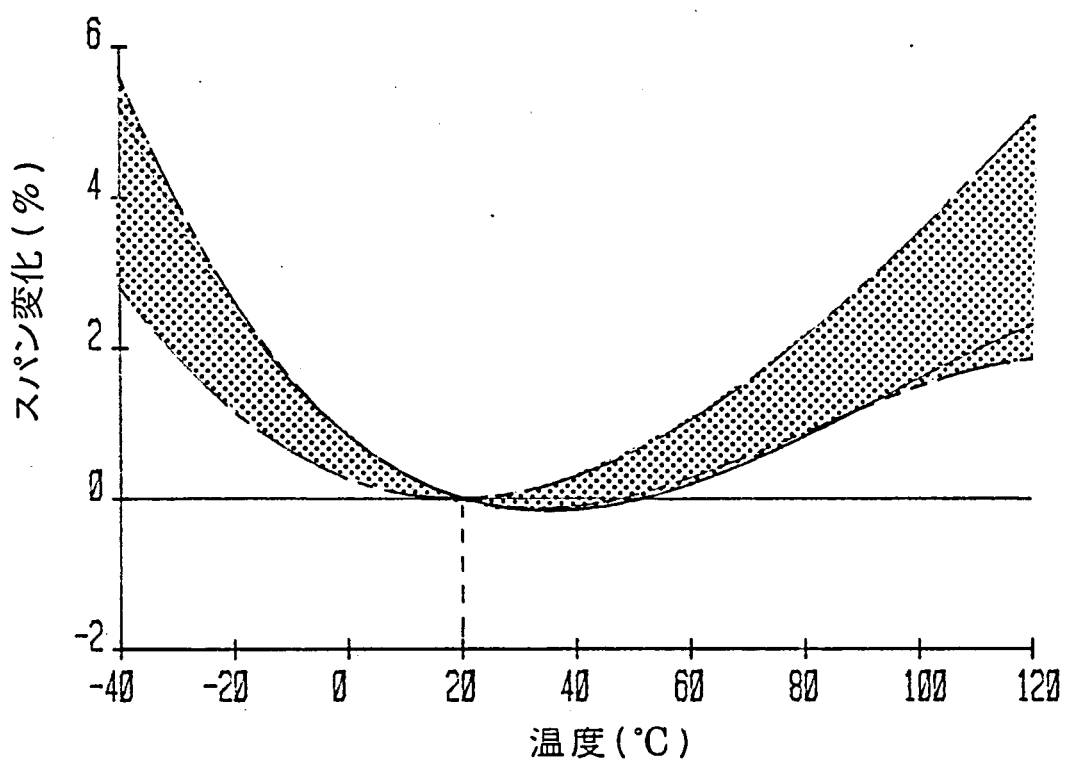


(a) 補償前のスパン変化

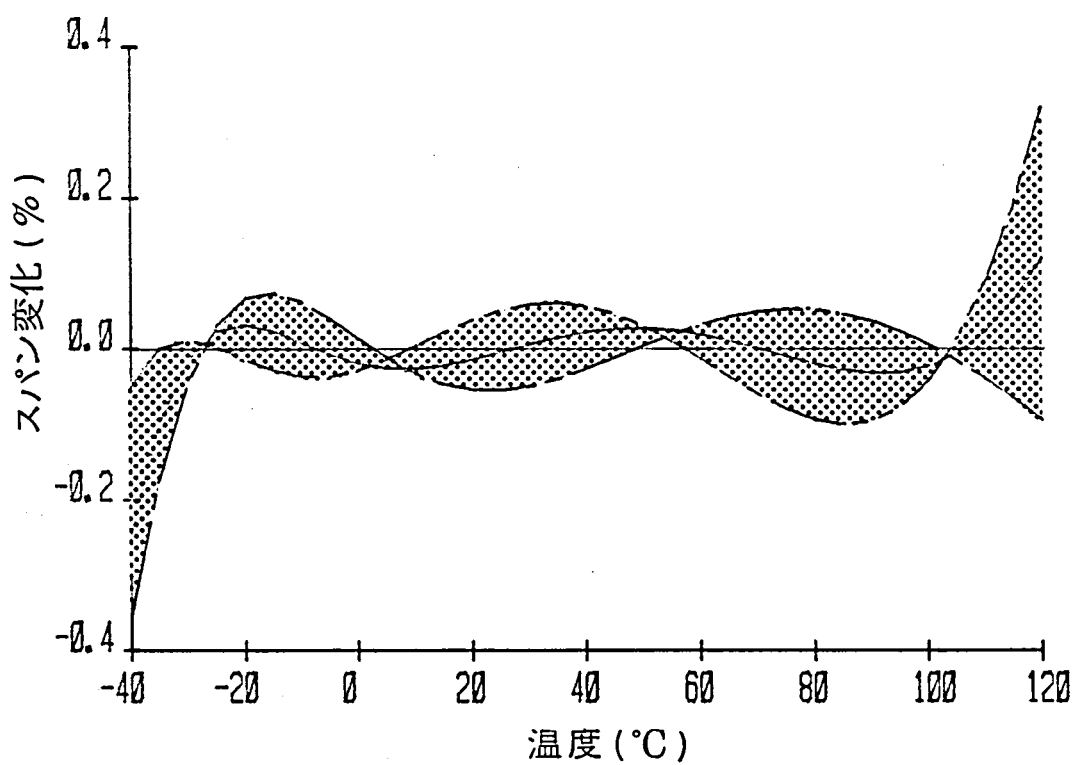


(b) 補償後のスパン変化

図 5.12 スパン温度特性



(a) 補償前のスパン変化のばらつき範囲 (実験値)



(b) 補償後のスパン変化のばらつき範囲 (計算値)

図5.13 スパン温度影響のばらつきに対する補償効果

5.5 まとめ

本章では、最適ゲージパタンの基本設計に基づいて、{110}面Siダイアフラムセンサの詳細設計を行ない、その試作について述べると共に、半導体圧力センサの温度補償方式について検討した。要約すると次のようになる。

- (1) {110}面Siを利用し、 $\langle 111 \rangle$ 軸に半径ゲージ抵抗、 $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に接線ゲージを配置した新しいゲージパタンを持つSiダイアフラムの詳細設計を行ない、その試作をした。ゲージ抵抗の位置は最適ゲージパタンの計算に基づいて $X_R/a=0.9$ 、 $X_T/a=0.26$ とし、1つのSiダイアフラム上に4組のブリッジを構成し得るように設計して、冗長性を高めた。
- (2) 半導体ゲージ抵抗ブリッジの温度特性を明らかにした。すなわち、ブリッジ出力を圧力と温度の関数として表わす基本式を求め、零点の温度係数 $\alpha(t)$ とスパンの温度係数 $\beta(t)$ を定量的に示した。²⁾
- (3) 零点温度補償方式は、ブリッジ各辺のゲージ抵抗体に、直列或いは、並列に固定抵抗を挿入する方法により、温度によらず常にブリッジの不均衡電圧を零とする方式が可能であることを示した。固定抵抗を挿入することによるゲージ抵抗値自身の変化と、その温度係数の変化について理論的に明らかにした。
- (4) スパン温度特性は、温度に対して大きな非線形を持つことを示し、その補償原理を理論的に明らかにした。³⁸⁾ この理論をもとに、厚膜サーミスタと拡散抵抗から成る非線形回路網によって、スパンの温度補償を行なう方法を開発し、採用した。³⁹⁾⁴⁰⁾
- (5) ゲージ抵抗の形成は、通常のイオン打込み、熱拡散によるプロセスを採用したが、ゲージ抵抗体の表面不純物濃度 N_s とシート抵抗 ρ_s を共にコントロールすることがポイントである。またSiダイアフラムの深い凹形加工法として、MG (Mechano Grinding) 加工法を開発し、加工精度 $2\sim 5\mu\text{m}$ を達成した。
- (6) 以上の結果をもとに試作した半導体圧力センサは、非直線誤差 $\pm 0.05\%$ 、出力 65mV/V 、 $120^\circ\text{C}\sim -40^\circ\text{C}$ の温度範囲において、零点温度影響 $\pm 0.15\%$ 、スパン温度影響 $\pm 0.25\%$ 以内となり、その高精度化が確認できた。

第 6 章 半導体圧力センサの応用

第6章 半導体圧力センサの応用

6.1 はじめに

前章までに、Siダイアフラム形半導体圧力センサに関する解析を行ない、その高精度化をはかるための設計の基礎並びに試作結果について述べてきた。本章では、この設計理論に基づいて開発した半導体圧力センサの応用について概説する。

応用の1つは、工業計器である圧力伝送器の開発である。^{39)~41)3)4)} 圧力伝送器は、化学、鉄鋼、電力、食品、上下水など各種のプラントを制御するシステムにおける検知器として使用されるもので、プロセス量(圧力)を4-20mAの統一信号に変換し、遠隔に設置された制御用計算機ないしコントローラへ伝送するものである。近年、システムの制御精度の向上に伴い、圧力伝送器には0.2%級以内の高精度が必要とされている。

計測精度の観点から見たときの圧力伝送器の難しさは、レンジアビリティの問題である。レンジアビリティとは、1台の機種で計測し得る圧力レンジ(範囲)の可変能力を意味する。たとえば、1台の圧力伝送器で、0-0.1MPaの圧力範囲から、0-0.5MPaの圧力範囲まで、回路ゲインを調整するのみで使用できる場合、レンジアビリティは5であるという。この場合、0-0.1MPa~0.5MPaの任意圧力範囲で計測精度0.2%級を保証できなくてはならない。

ここでは、システムの要求に応じて、0-0.03MPaの低圧レンジから、0-50MPaの超高压レンジまでを、下記の5機種の圧力伝送器を開発して、カバーできるようにした。

- (1) 低圧形圧力伝送器： 圧力範囲 0-0.03 MPa~0-0.15 MPa, レンジアビリティ 5
- (2) 標準形圧力伝送器： 圧力範囲 0-0.1 MPa ~0-0.5 MPa, レンジアビリティ 5
- (3) 中圧形圧力伝送器： 圧力範囲 0-0.5 MPa ~0-2.5 MPa, レンジアビリティ 5
- (4) 高压形圧力伝送器： 圧力範囲 0-2.0 MPa ~0-10 MPa, レンジアビリティ 5
- (5) 超高压形圧力伝送器： 圧力範囲 0-10 MPa ~0-50 MPa, レンジアビリティ 5

前章までに述べた{110}面Siダイアフラムは、上記(2)標準形圧力伝送器を対象としたものである。他の機種についても、この設計手法を適用して開発したもので、全て{110}面Siダイアフラムを適用している。

他の応用は、自動車エンジン制御用の圧力センサである。²⁾⁴²⁾⁴³⁾

'70年代後半から'80年代にかけて、自動車の排ガス規制や燃費向上を目的として、エンジンのマイクロコンピュータ制御システムが導入されてきた。このシステムでは、エンジンが吸入する空気量をマニホールドの負圧を計測することによって求め、最適な燃料量をマイコンによって計算し、エンジンに供給する。このエンジンのマニホールド負圧を計測する半導体圧力センサを開発した。

エンジン制御の場合には、計測圧力は零（大気圧）から -100kPa の範囲の固定レンジでよく、レンジアビリティは1であり、また要求精度は0.5~1%級である。したがって精度的要求は、圧力伝送器ほどきびしくはないが、一方、非常に高い量産性と低コスト化、並びにエンジンルームへ設置することからくる耐久性が要求される。

量産性の点から見たとき、Siダイアフラムの加工性が最も問題となる。Siダイアフラム加工は、第5章で述べた機械的加工法ではなく、量産性に優れた化学的エッチング法が必要である。化学的エッチングを{110}面Si単結晶に適用しようとするれば、強酸によるエッチング法となるために、ダイアフラムの凹形加工精度が不十分となる。これに対し、{100}面Si単結晶では、アルカリ性溶液によって $\langle 110 \rangle$ 軸に沿って異方性エッチングが可能であるという特長があるため、自動車エンジン制御用圧力センサでは{100}面Siダイアフラムを採用することにした。また低コスト化のためには、Siダイアフラムチップの小形化が必要で、圧力伝送器用センサに比べて大幅に小形化した 3mm^2 チップを開発した。{100}面Siダイアフラムの解析は、第4章で行なっており、{110}面Siダイアフラムに比べて、高出力化した場合に非直線誤差の温度依存性が大きくなる問題があるが、自動車用は、上述のように、固定圧力レンジであるため高出力化はかならずしも必要でなく、また精度も圧力伝送器ほどきびしくない。したがって{100}面Siダイアフラムで十分である。この最適ゲージパターンも前章までの結果をもとに設計されている。

6.2 圧力伝送器^{39)~41)3)4)}

6.2.1 構造と仕様³⁹⁾⁴⁰⁾

圧力伝送器は、受圧部と増幅器部より構成され、図6.1にその外観写真を、図6.2に受圧部の断面構造を示す。

図6.2の受圧部において、圧力導入口より導入された被測定圧力は、シールダイアフラム（SUSやハステロイ製）に加えられ、封入液を介して半導体センサのSiダイアフラムに伝達され、電気信号に変換される。

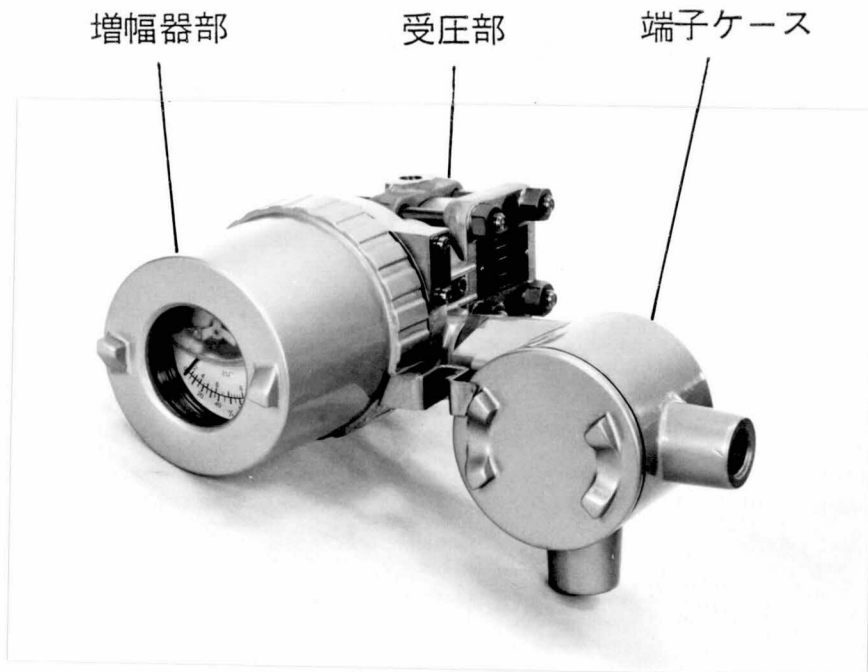


図 6.1 圧力伝送器

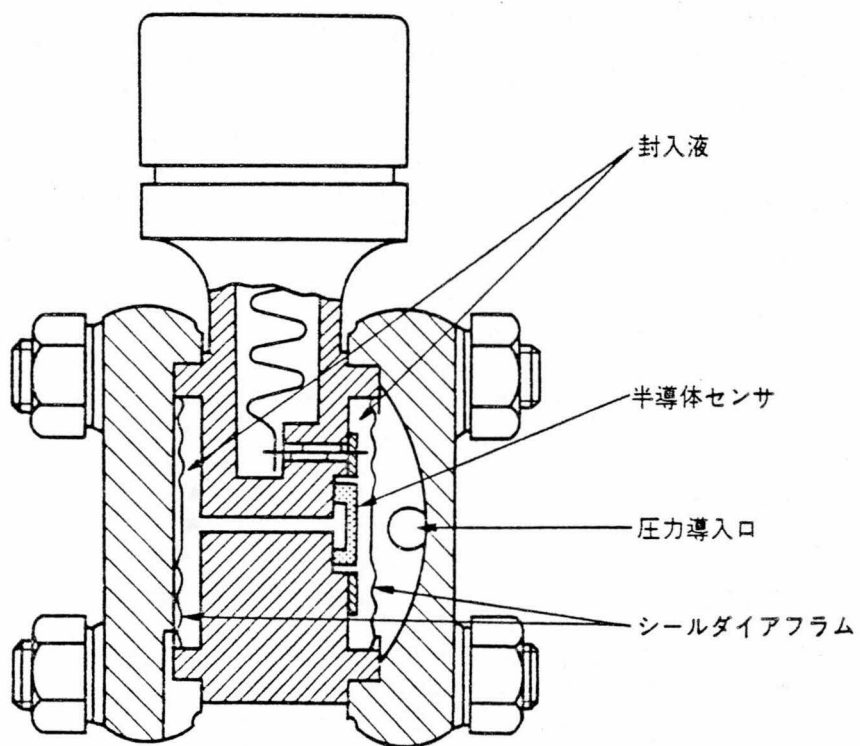


図 6.2 圧力伝送器の受圧部構造

受圧部は腐食性流体を測定したり，120℃～-40℃の広い接液温度で使用するなど，過酷な環境条件で使用しても安定に動作する必要がある。そのため半導体センサはシリコンオイル中に封入され，全溶接構造で外部と隔離されている。加えて，安定性について実績のあるシリコンオイル以外に有機材料を一斉使用せず，高温状態など厳しい周囲環境に長期間さらされても劣化が生じないように配慮してある。

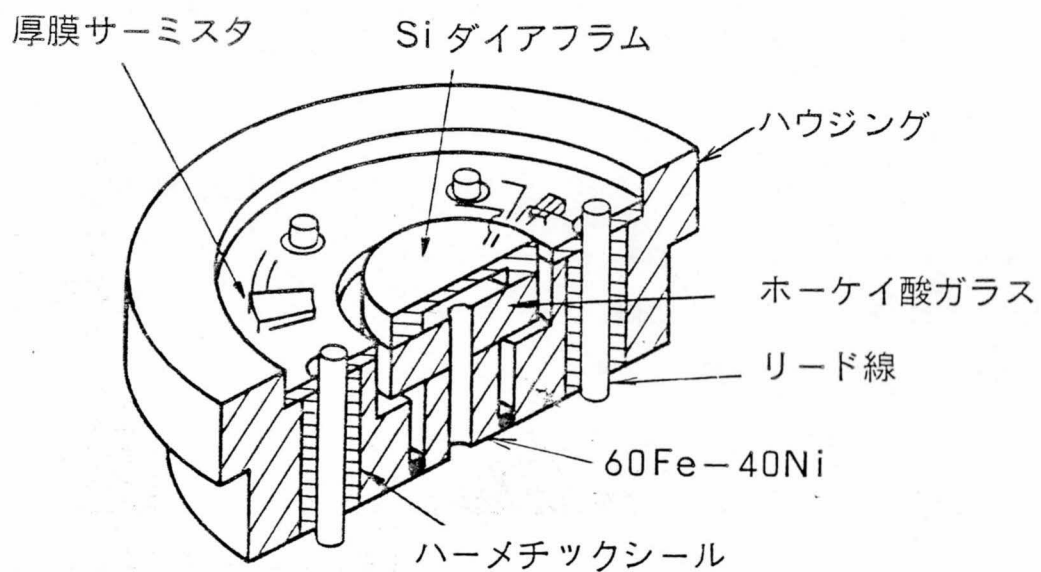
図 6.3 は，半導体センサアセンブリーの構造と写真である。Siダイアフラム近くに設置したセラミクス上に厚膜サーミスタなどの温度補償回路をハイブリッドIC技術によって作っており，SiダイアフラムとAu線によるワイアボンディングにより接続している。ハイブリッド回路からの信号線は，ハーメチックシールを介して受圧部容器外へ導き，増幅回路部と接続される。

表 6.1 は，圧力伝送器の主な仕様である。

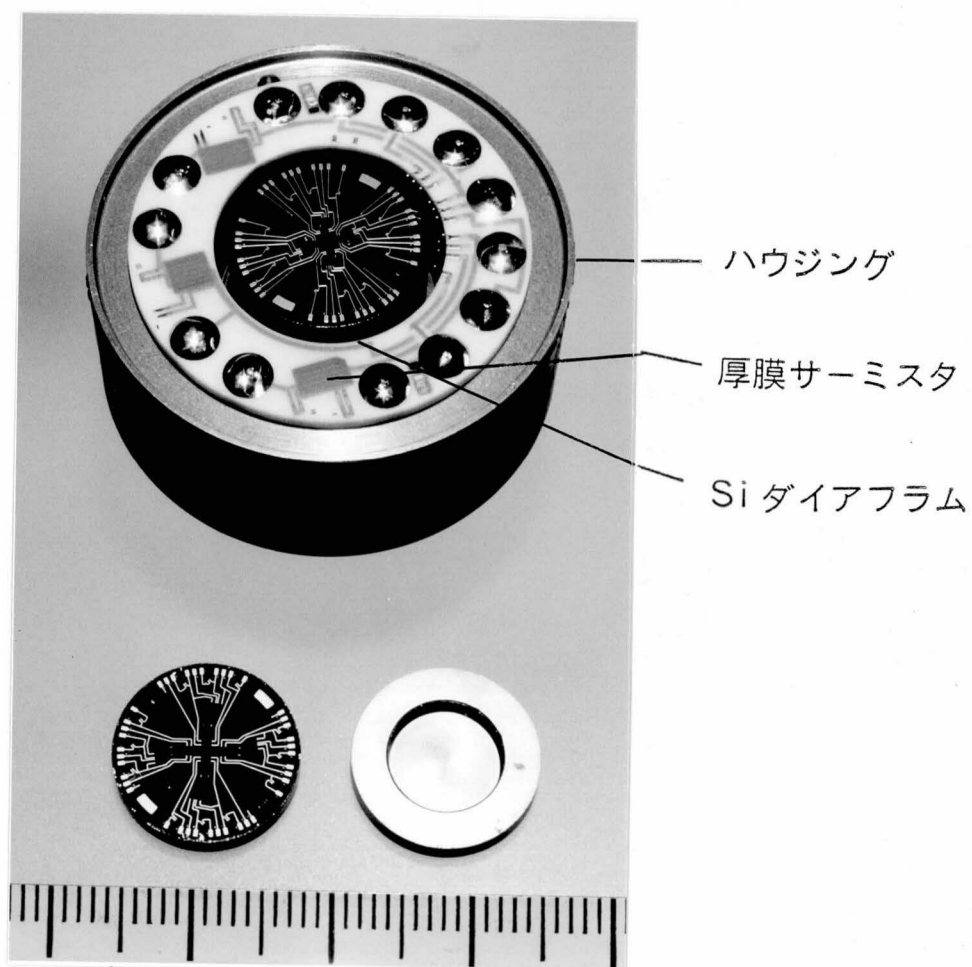
圧力範囲は，最小 0-0.03MPa から最大 0-50MPa までの範囲を，5 機種 of 圧力伝送器でカバーする。基準圧力レンジとは，その機種 of 最大測定圧力を示している。出力 DC 4～20mA および電源電圧 24V DC は，工業計器の国際標準規格に合わせている。

表 6.1 圧力伝送器の主要仕様

項目	仕様	
測定範囲	基準圧力レンジ	適用範囲
	0.15 MPa	0-0.03 ~ 0-0.15 MPa
	0.5 MPa	0-0.1 ~ 0-0.5 MPa
	2.5 MPa	0-0.5 ~ 0-2.5 MPa
	10 MPa	0-2 ~ 0-10 MPa
	50 MPa	0-10 ~ 0-50 MPa
出力	DC 4～20mA	
精度	±0.2%FS	
使用温度	-40～120℃	
耐圧	基準レンジの150%	
電源電圧	DC 24V±10%	



(a) 断面構造図



(b) 外観写真

図 6.3 半導体センサアセンブリー

表において、基準圧力レンジ 0.5MPa の伝送器は標準形と呼ばれるもので、最も良く使用される機種である。この機種に使用したSiダイアフラムは、本論文で解析モデルとしてとり上げたものである。他の機種に適用するSiダイアフラムについては、それぞれの圧力レンジに応じて、ダイアフラム形状（直径 $2a$ ，板厚 h ）を変えて設計しているが、その設計には本論文の手法によって³⁾⁴⁾いる。ただし基準圧力レンジ 10MPa と 50MPa の 2 機種については、応力解析手法に有限要素法を利用して⁴⁾いる。この理由は、高圧の場合には、Siダイアフラム周辺の固定部や支持体にもかなりのひずみが発生するため、周辺完全固定の応力解析手法では計算誤差が生じるからであるが、ここではその詳細は省略する。

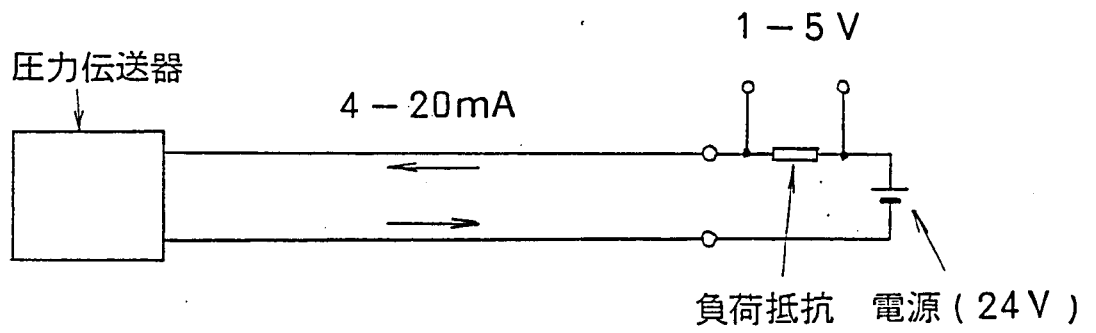
6.2.2 増幅回路³⁹⁾⁴⁰⁾

Siダイアフラムの出力は、ブリッジ励起電流 $I_S = 0.5\text{mA}$ で、最大 200mV が得られるように設計している。したがって最小圧力レンジで、この $\frac{1}{5}$ に当る 40mVの出力が得られるので、単純な直結直流増幅器で、センサ信号を 4-20mA DC の統一信号に変換できる。

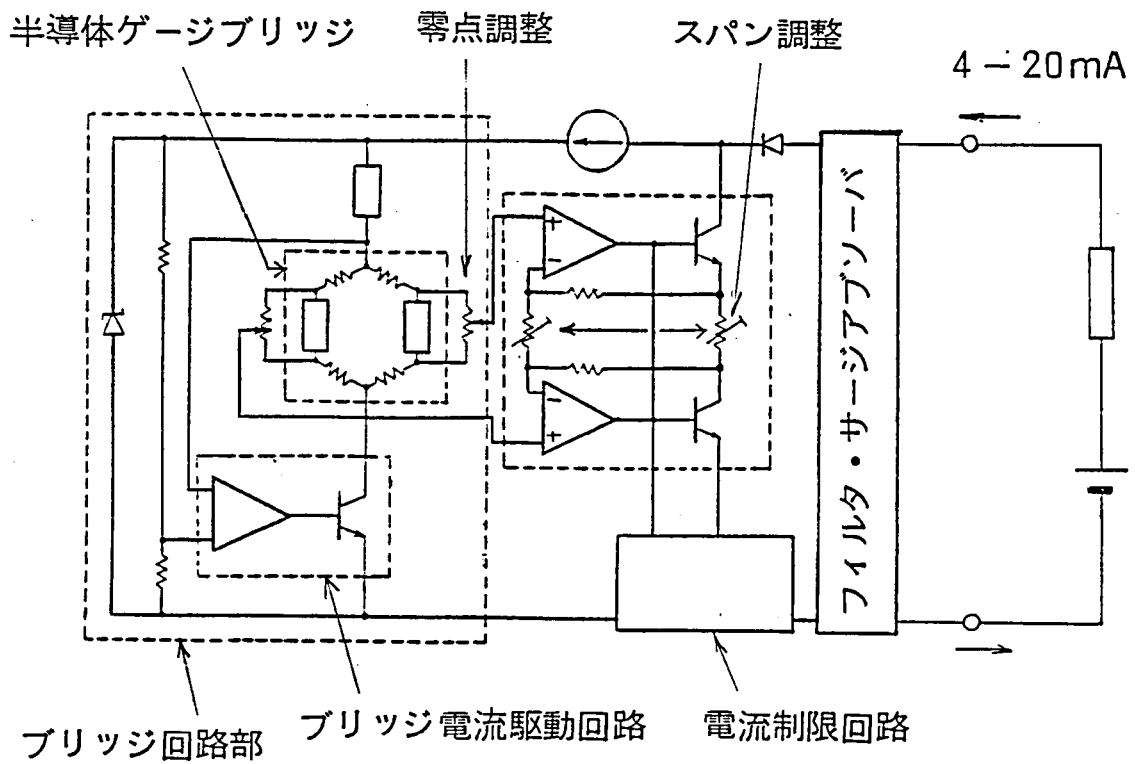
圧力伝送器は、図 6.4(a)のように、24V DC電源（通常コントロール室内に設置）から 2本のワイアを介して給電され、圧力の計測信号を 4-20mA DC の電流に変換して、同じワイアを介して伝送する。この電流信号は、コントロール室側の負荷抵抗を流れ、1-5V DC の電圧信号となり、受信計器と接続される。このように 2本のワイアにより、給電と信号伝送を行なうために、2線式伝送器と呼ばれることもある。

図 6.4(b)は、伝送器の増幅回路の構成である。半導体ゲージのブリッジ出力を、2個の差動増幅器で受け、4-20mA の電流信号に変換して伝送する。この増幅回路は

- (i) ブリッジ回路を定電流励起方式とし、第 5 章、5.2 節に述べた温度補償方式を採用した。
- (ii) 零点の調整は、ブリッジ両端の可変抵抗器により行ない、スパンの調整は電圧-電流変換回路内の可変抵抗器で行なう。したがって零点とスパンは、相互干渉なく独立に調整できる。
- (iii) フィルタ回路、サージアブソーバ回路を内蔵し、RFI (Radio Frequency Interference, 電波障害) やサージ電圧に強い構成とした。
- (iv) 過大圧力があやまって加えられた時にも、過大電流が流れないよう電流出力制限回路を設けた。



(a) 2線式伝送器



(b) 増幅回路

図 6.4 圧力伝送器の増幅回路

などの工夫をしてあり、工業計器用として高い精度と信頼性を持たせるようにした。

39)40)

6.2.3 圧力伝送器の特性

(1) 入出力特性

各基準レンジの圧力伝送器の入出力特性を測定し、その非直線誤差を図 6.5 に示した。図は、各機種につき、最小圧力レンジと最大圧力レンジにおける非直線誤差を示している（温度条件は 20℃）。入出力特性においてヒステリシスは 0.01% 以内、再現性も 0.01% 以内であり、Si ダイアフラムの機械的に優れた特性を裏づけるものとする。

なお温度条件を 120℃ ~ -40℃ まで変化させたときの非直線誤差の変化については、第 4 章で述べたように全機種にわたり ±0.05% 以内を示し、非直線誤差の温度依存性が極めて小さくなっている。この結果、レンジアビリティ 5 の範囲で、全機種とも精度 ±0.2% 以内を達成できた。

(2) 温度影響

零点とスパンの温度影響を図 6.6 に示す。温度影響の相対値は、各機種ともに、ブリッジ出力の小さい最小圧力レンジにおいて最も大きくなる。そのため、補償前特性は、最小レンジにおける影響値をプロットしており、補償後は最小レンジと最大レンジ両方の温度特性を示した。

温度補償前の影響値は、Si ダイアフラムセンサ自身の温度特性に、受圧部構造からくる影響値が加算されて発生するものと考えられる。受圧部構造において、2 枚のシールドダイアフラムの剛性の変化とそのアンバランスや、Si ダイアフラムで区分されている左右の封入液量のわずかなアンバランスが温度影響の原因となる。

温度補償は、Si ダイアフラムセンサを受圧部に組込んだ後、温度影響値を測定し、この値をもとにして温度補償定数を計算するので、Si ダイアフラムを含む受圧部全体を一括して補償するわけである。したがって補償後の温度影響は極めて小さくなっていることが認められよう。

(3) 繰返し加圧影響値

図 6.7 に、基準圧力レンジ 2.5MPa の圧力伝送器を用い、0-2.5MPa の圧力を長期間繰返し与えたときの零点の変動を示している。一般に、他方式の圧力センサでは、圧

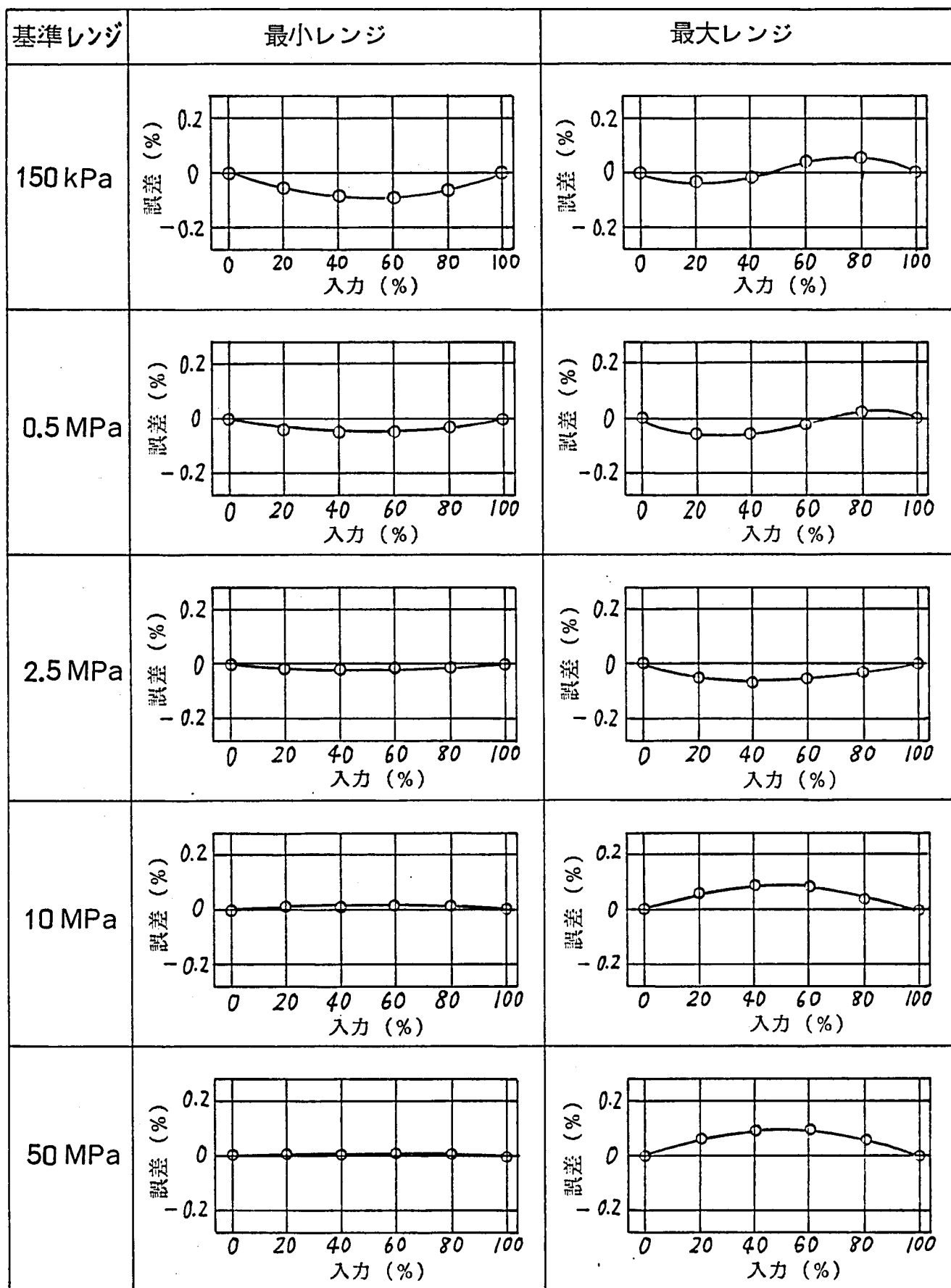


図 6.5 圧力伝送器の非直線誤差

—○— 零点 - - ● - - スパン

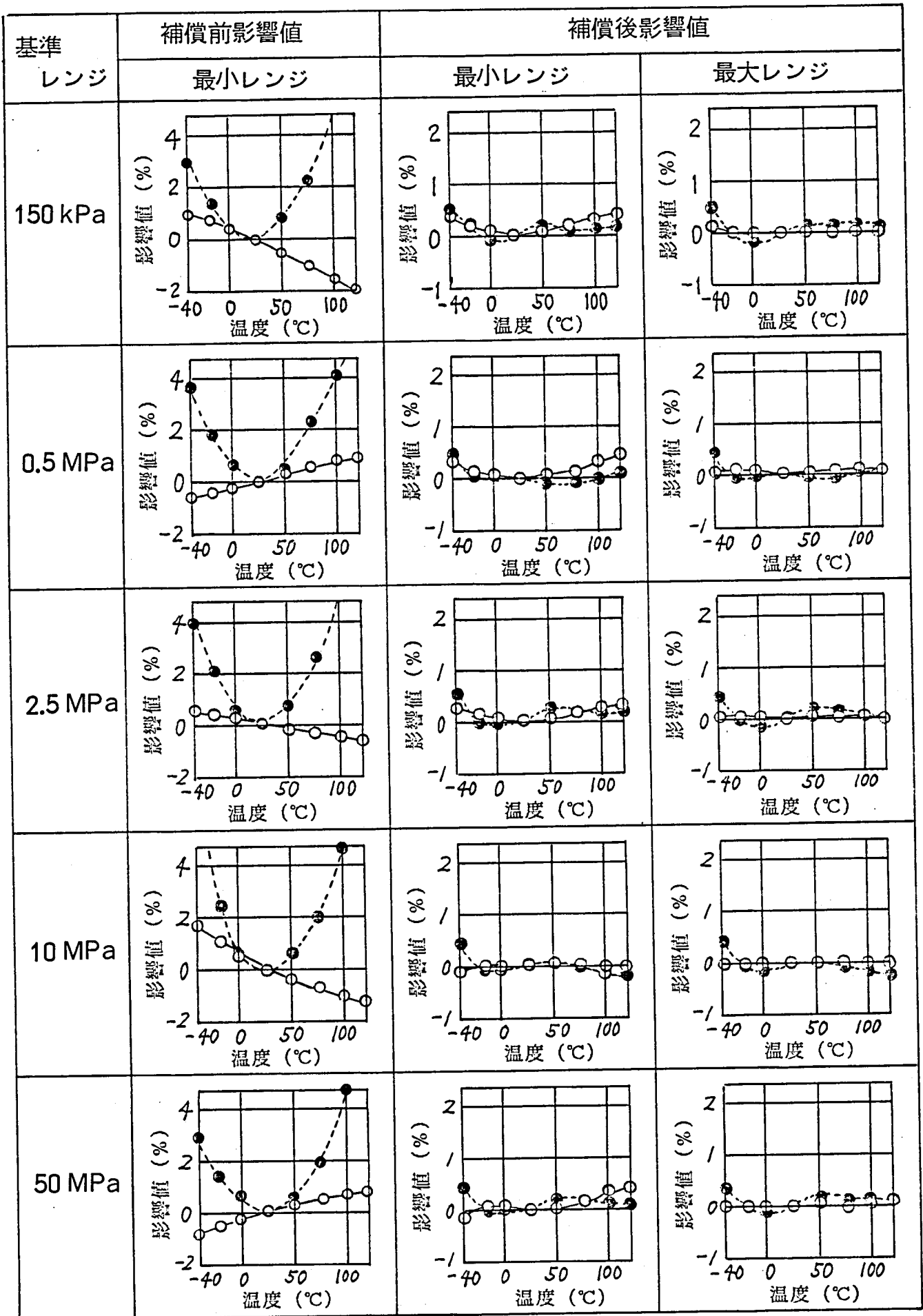


図 6.6 圧力伝送器の温度影響

力の繰り返し印加を行なうと、材料の疲労等の影響で圧力センサの零点はドリフト傾向が見られるものであるが、Si単結晶では、破壊強度を越さないかぎり疲労現象が見られず、機械的特性が安定している。この実験結果はこれを裏付けするものと考えられ、 10^7 回にわたる繰り返し圧力の影響値は $\pm 0.05\%$ 以内である。

(4) 長期フィールド試験

実際のフィールドで運転中の圧力伝送器7台を無作為に選定し、零点の経時変化を追跡して調べた。結果を図6.8に示す。2年近くのフィールド運転における安定性は 0.2% 以内であり、半導体圧力センサが長期安定に優れていることを実証できた。

6.3 自動車エンジン制御用センサ²⁾⁴²⁾⁴³⁾

6.3.1 構造と仕様²⁾⁴²⁾

図6.9は、自動車エンジン制御用に開発した半導体圧力センサ全体とセンサアセンブリの写真である。周辺回路はハイブリッドIC化され、センサアセンブリと共に一つのケースに収容され、全体として極めて小形に設計した。

Siダイアフラム構造は、図6.10に示すように、 3mm^2 のSi結晶の中心に 1.6mm 径のダイアフラムを形成し、これをガラス基板に接合したものである。ダイアフラム部分の板厚は $25\mu\text{m}$ と非常に薄く、これは化学エッチングで加工している。Si結晶は $\{100\}$ 面を用いており、 $\langle 110 \rangle$ 軸に沿って半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗を、ダイアフラム中心軸に対称な位置に形成している。

表6.2は、自動車用圧力センサの主な仕様である。

圧力レンジは、自動車エンジンの吸気マニホールドの圧力を測定するために、大気圧(0kPa)から -100kPa とし、センサ出力は、エンジンの制御システムの入力仕様から、 $1\text{V}\sim 5\text{V}$ (電源電圧 5.5V)とした。

6.3.2 Siダイアフラムと周辺回路²⁾⁴²⁾

(1) Siダイアフラム²⁾⁴²⁾

図6.11にSiダイアフラムの設計諸元を示す。

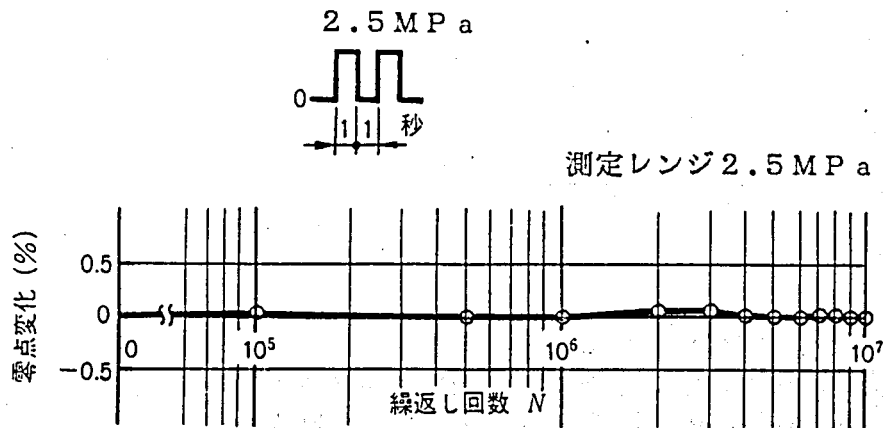


図 6.7 圧力伝送器の繰返し加圧影響値

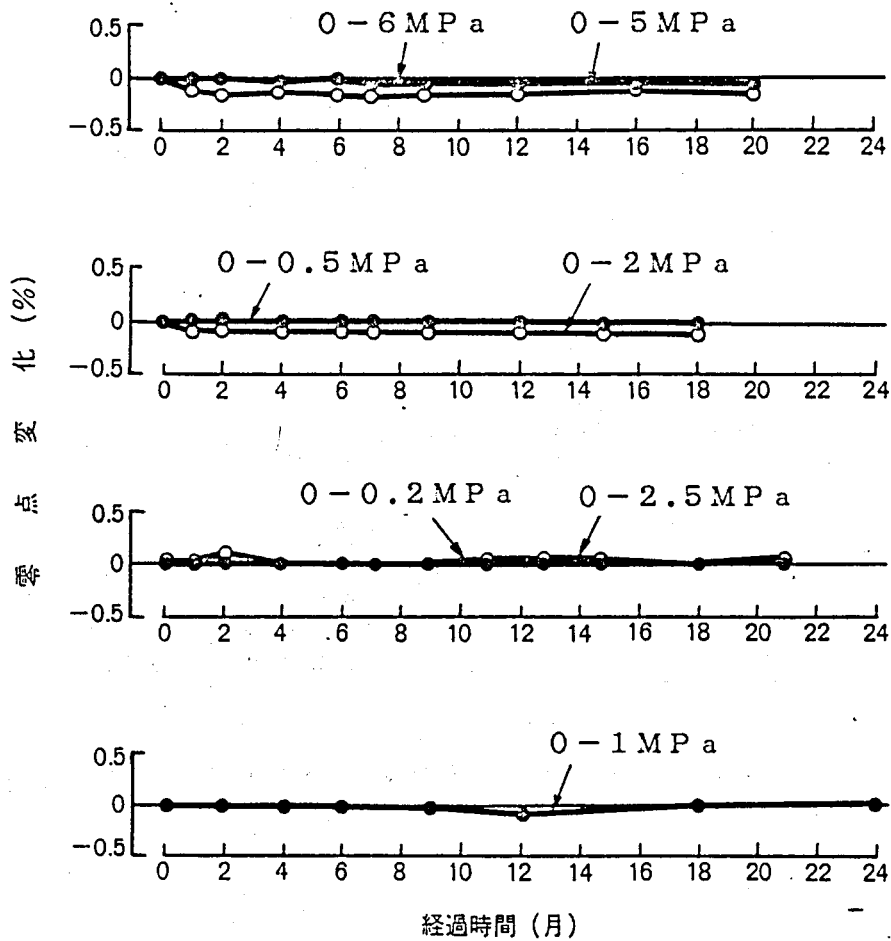
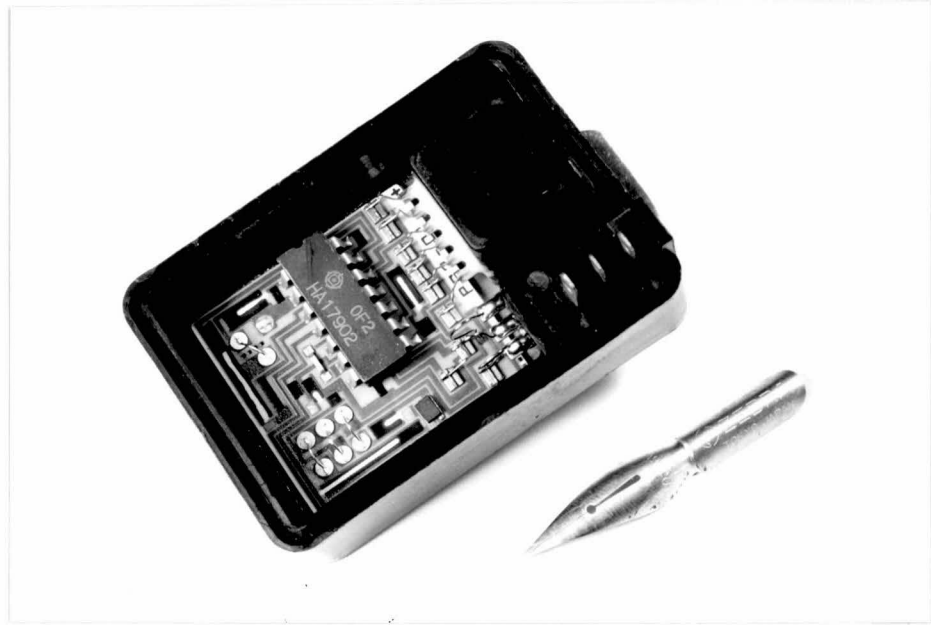
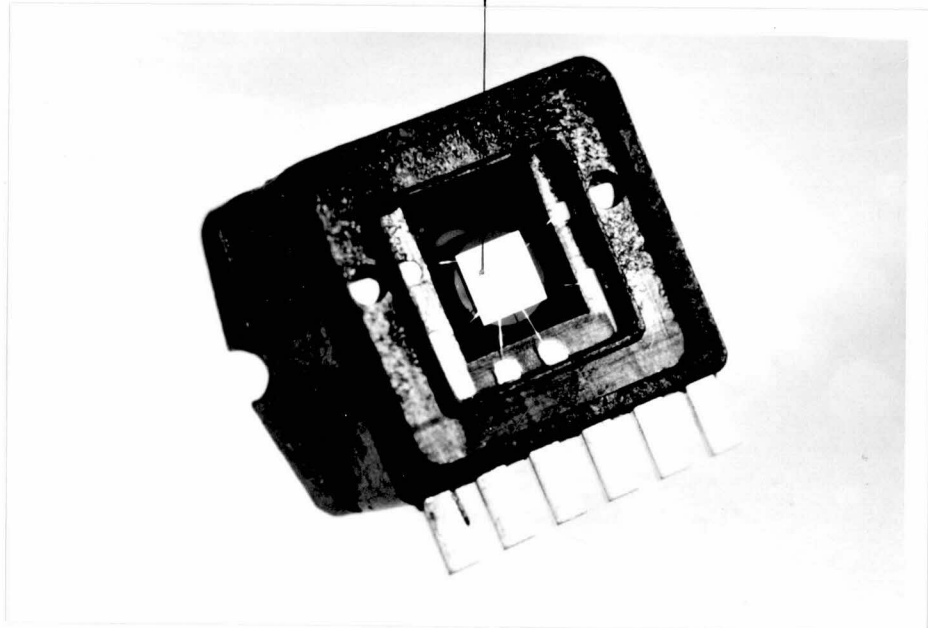


図 6.8 圧力伝送器の長期フィールド試験結果



(a) センサ外観

Si ダイアフラム



(b) センサアセンブリ

図 6.9 自動車エンジン制御用半導体圧力センサ

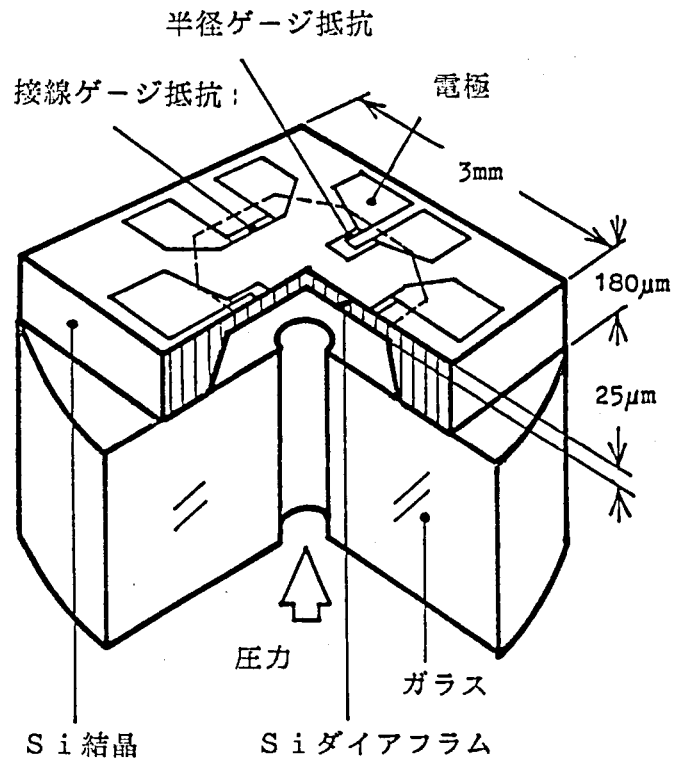


図 6.10 Si ダイアフラムセンサの構造

表 6.2 自動車用半導体圧力センサの主要仕様

項 目	仕 様
測 定 レ ン ジ	0 (大気圧) ~ -100 kPa
測 定 精 度	±1.0%以内
出 力	1~5V
温 度 範 囲	-40~120℃
耐 圧	測定レンジの5倍以上
電 源 電 圧	5.5V±10%

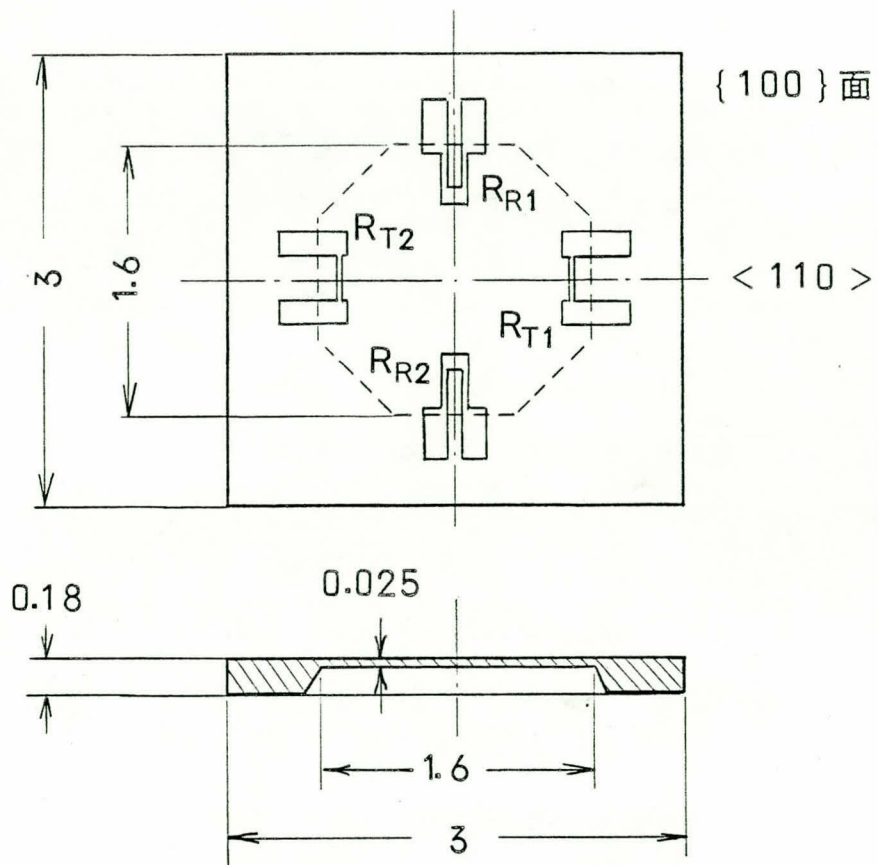


図 6.11 Si ダイアフラム設計値

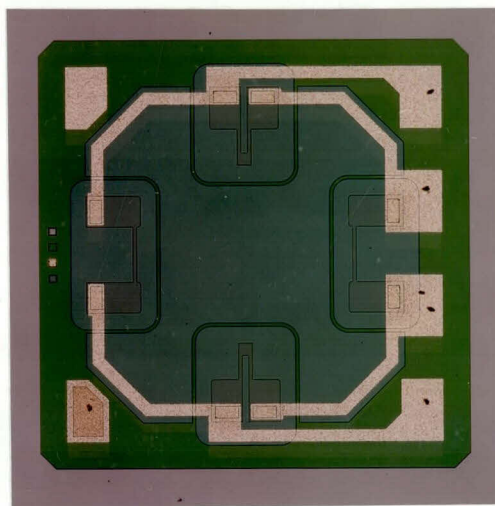


図 6.12 Si ダイアフラムチップ写真

Si結晶は{100}面を用い，<110>軸に沿って半径ゲージ抵抗と接線ゲージ抵抗を配置している。ダイアフラムの形状は，図示のように8角形状とした。この理由は，ダイアフラム加工に，アルカリ溶液（ $\text{KOH} + (\text{CH}_3)_2\text{CHOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ 混合液）による化学エッチングを採用したためである。アルカリ溶液中に{100}面Siを浸すと，<110>軸に沿ってエッチングが進む。これを異方性エッチングという。したがって，たとえ円形のダイアフラムを作ろうとしても，<110>軸に沿ってエッチングが進むために円形とならない。したがって，この性質を積極的に利用し，8角形のダイアフラムを設計した。

ゲージ抵抗位置は，第4章の結果から， $X_R/a=0.86$ ， $X_T/a=0.86$ と設計した。ダイアフラム板厚は $25\mu\text{m}$ であり， -100kPa の負圧をダイアフラム下方から加えた（したがってダイアフラム上面から 100kPa の正圧を加えたと等価）ときのブリッジ出力は約 25mV/V が得られる。このレベルであれば，非直線誤差の温度依存性は十分小さく問題とならない。

Siダイアフラムチップ写真を図6.12に示しておく。

(2) 増幅回路⁴²⁾

自動車用圧力センサは，量産性と低コスト化が必要であるために，圧力伝送器と比べて簡単な回路構成としている。

図6.13はその回路構成である。増幅器A1でブリッジ回路に約 1mA の電流を流し，

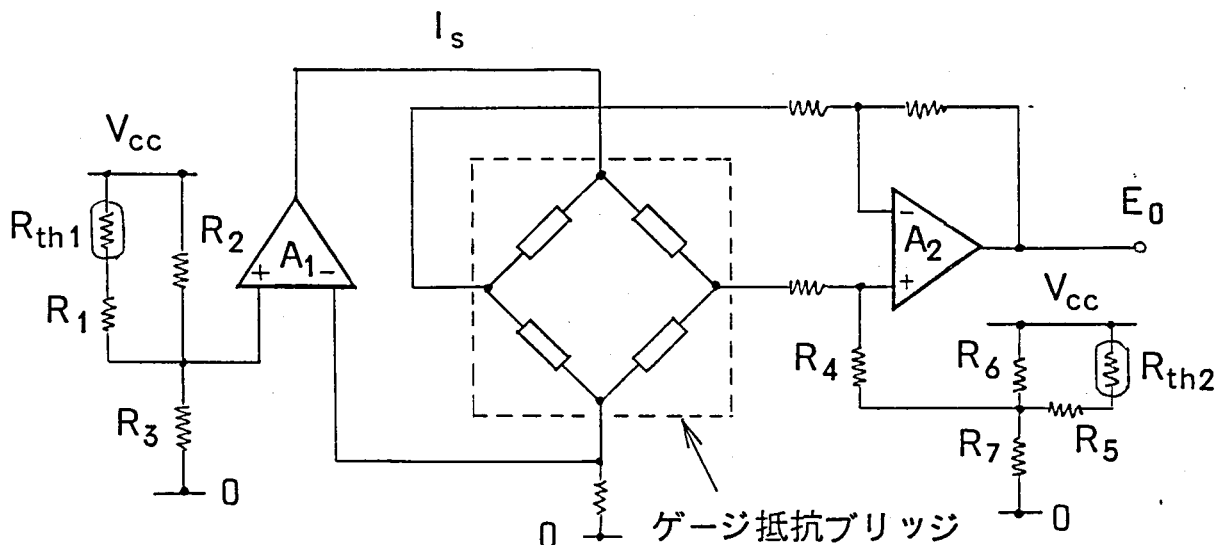


図6.13 自動車用圧力センサの周辺回路

定電流励起方式としている。この励起電流をサーミスタ R_{th1} を含む回路によって制御し、スパンの温度補償を行なう。この回路網では、第5章で述べた拡散抵抗は使用せず、サーミスタのみで温度補償をしているが、個々のセンサのスパン温度特性に合わせて、 R_1 、 R_2 、 R_3 をトリミング調整している。これらの抵抗及びサーミスタは、厚膜ペーストでハイブリッドIC基板上に形成されている。

またサーミスタ R_{th2} で構成した回路網は、零点の温度補償を行なうものである。第5章で述べた温度補償方式では、ブリッジのゲージ抵抗体と直列又は並列に固定抵抗を入れ、ブリッジ零点の温度補償をした。この方式は、本章で述べた圧力伝送器に採用している。しかし自動車用圧力センサでは、回路構成を簡単にするため、スパン温度補償と同様な回路で零点補正を行なった。この回路網の出力を、差動増幅器A2の⊕入力側に接続し、Siダイアフラムセンサの零点温度特性に合わせて補正する。個々のセンサの零点温度特性に合わせて $R_4 \sim R_7$ をトリミング調整している。

6.3.3 自動車用圧力センサの特性²⁾⁴²⁾

(1) 入出力特性とその温度依存性

図6.14は、 -40°C から 100°C に到る種々の温度条件における入出力特性の誤差を示している。誤差は、要求される入出力特性からの偏差を%で表示している。この結果 $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ の要求温度範囲にて、誤差 $\pm 0.5\%$ 以内の計測精度が得られることが確認できた。

(2) 傾斜及び振動の影響

自動車用圧力センサは、自動車の走行が激しいために、傾斜や振動の影響を受けないことが特に要求される。図6.15はその影響値を測定したもので、Siダイアフラムが小形、軽量であるために固有振動数が極めて高く、したがって傾斜や振動(20G)の影響を全く受けないことが確認された。

(3) 長期安定性

圧力サイクル、温度サイクル、高温高湿環境下での長期試験の結果を図6.16に示す。いづれも $\pm 0.5\%$ 以下の安定性が確認できた。

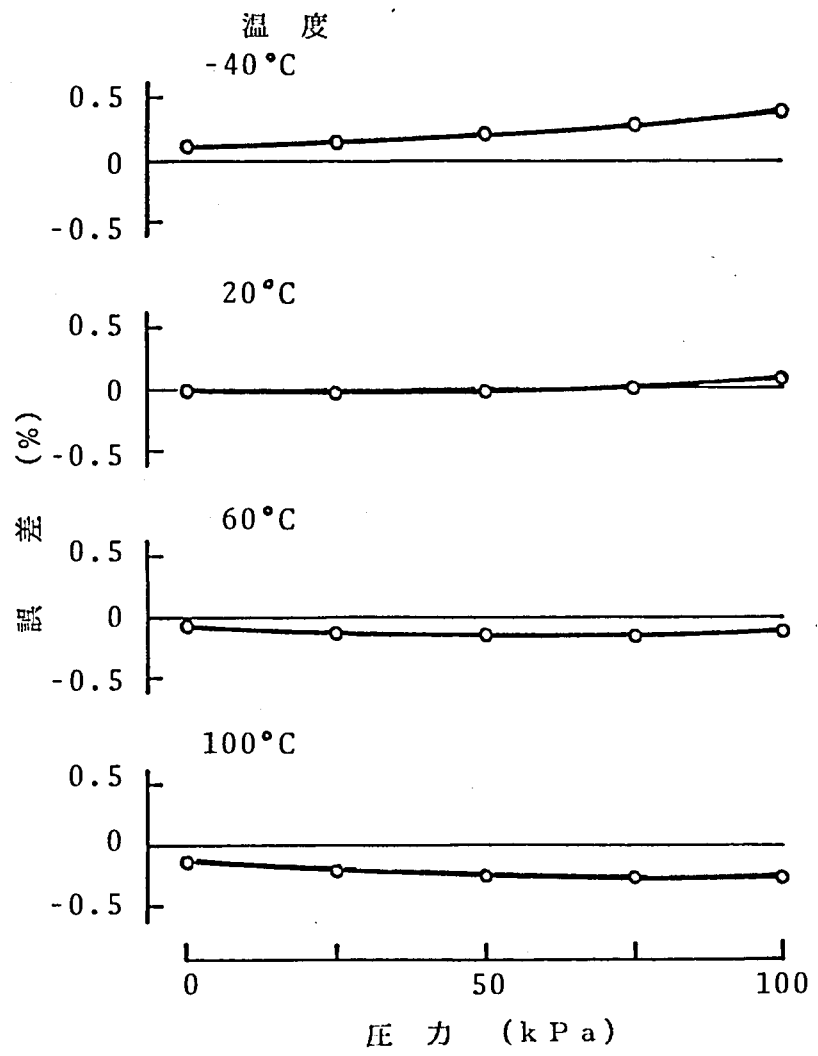


図 6.14 自動車用圧力センサの誤差 (温度補償後の特性)

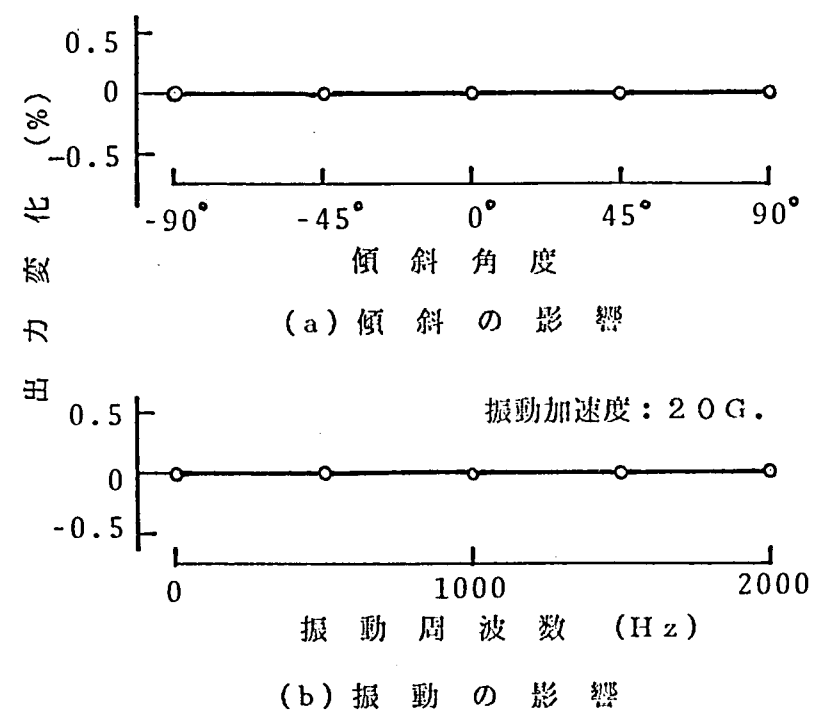


図 6.15 自動車用圧力センサの傾斜及び振動の影響

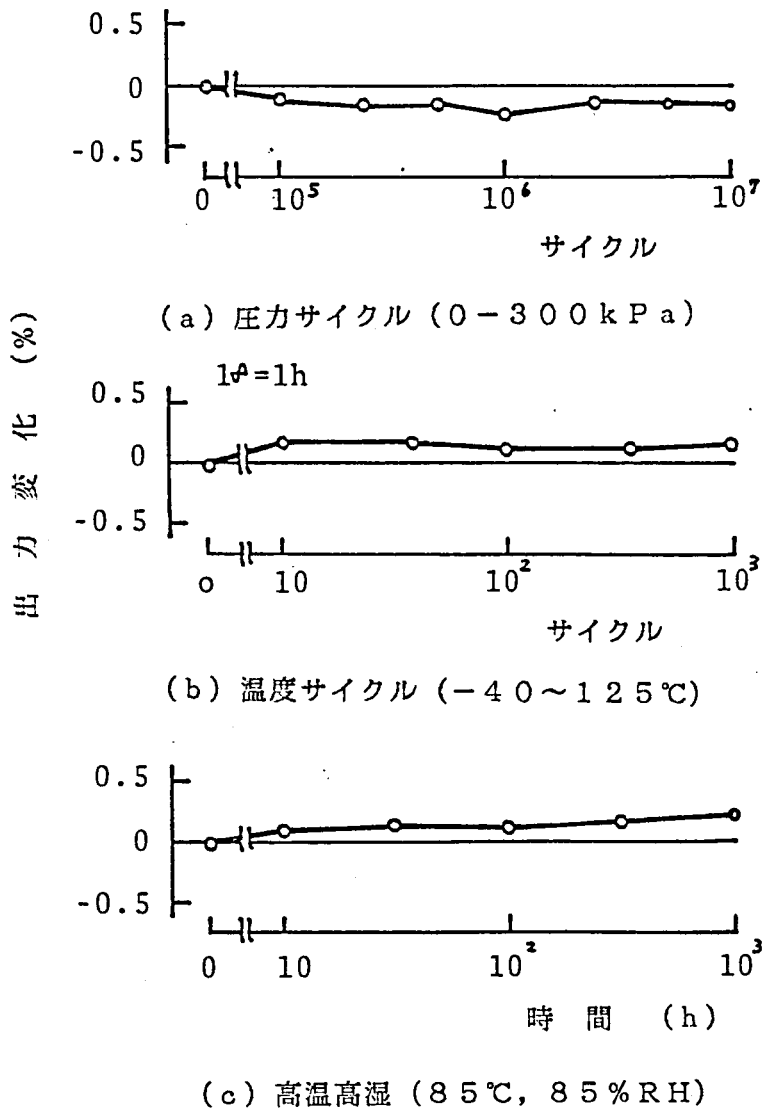


図 6.16 自動車用圧力センサの耐久性試験結果

(4) 破壊試験

Siダイアフラムに定格以上の圧力を印加し，Siダイアフラムの破壊を試験した。結果を図6.17に示す。図示のように定格圧力100kPaに対し，300kPa以上で出力は飽和傾向を示し，850kPa位で破壊した。定格圧力に対し10倍近い安全率が見られる。

以上各種の試験により，半導体圧力センサは，自動車エンジン制御のような過酷な条件でも十分な高精度を保持し，実用に耐えることが実証できた。

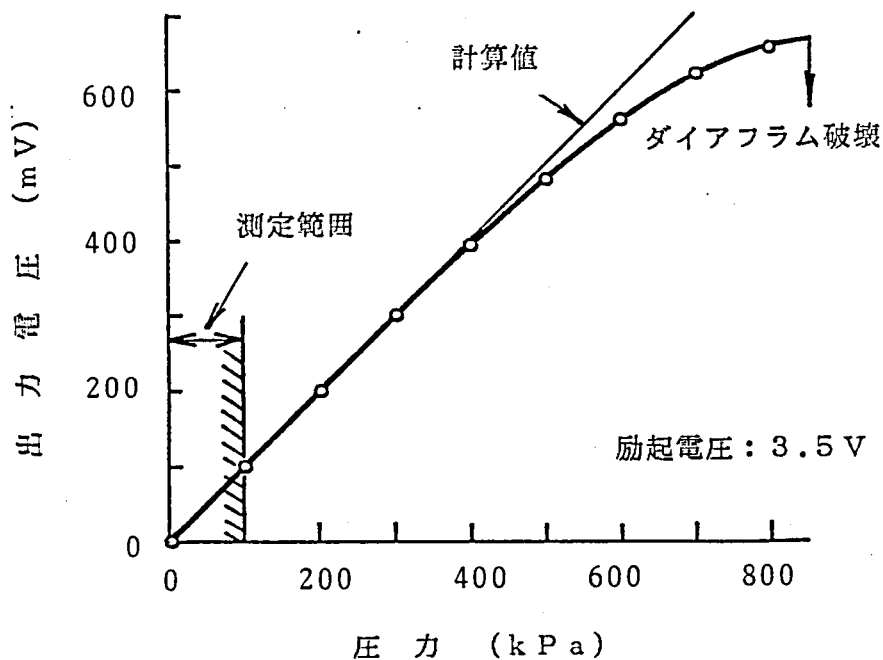


図 6.17 自動車用圧力センサの破壊試験結果

6.4 まとめ

本章では、本研究で確立した設計理論に基づいて開発した半導体圧力センサの応用について述べた。要約すると次のようになる。

(1) 応用の 1 つは、工業計器である圧力伝送器の開発である。圧力伝送器は、計測器の中でも特に高い精度を要求される 1 つであるが、本研究により開発した新しいゲージパターンを持つ {110} 面 Si ダイアフラムを適用して、その高精度化を達成した。すなわち、非直線誤差 $\pm 0.1\%$ 、 $120^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における温度影響 $\pm 0.5\%$ 、レンジアビリティ 5 を実現した。

また、基準圧力レンジ 0.15MPa、0.5MPa、2.5MPa、10MPa、50MPa の 5 機種 of 圧力伝送器を開発し、最小圧力レンジ 0.03MPa から最大圧力レンジ 50MPa の圧力範囲を計測できる半導体圧力センサのシリーズを開発した。^{3)4)39)~41)}

(2) 他の応用は、自動車エンジン制御用の半導体圧力センサの開発である。Si ダイアフラムは、{100} 面のゲージパターンを持つもので、形状は 3mm 角と極めて小形化した。精度は $120^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で $\pm 0.5\%$ を達成し、自動車エンジン制御という過酷な環境下で高精度な圧力計測が可能であることを実証した。²⁾⁴²⁾⁴³⁾

第7章 結 論

第7章 結 論

以上，Siのピエゾ抵抗効果を利用した半導体圧力センサの高精度化を目的とし，ピエゾ抵抗効果における非線形特性の解明，Siダイアフラム上の応力とゲージ抵抗の非線形特性の解析，半導体圧力センサにおける非直線誤差の温度依存性等の問題点解明を行ない，{110}面Siを利用した新しいゲージボタンを持つSiダイアフラムセンサを開発し，広い温度範囲にわたって，高精度かつ高出力な半導体圧力センサを実現した。

これらの研究成果を総括すれば次のようになる。

(1) Siカンチレバーの実験により，p形Si拡散ゲージ抵抗体におけるピエゾ抵抗効果の複雑な非線形特性と温度特性を明らかにした。この結果

- (i) 縦ピエゾ抵抗効果と横ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は大きな差異を示すこと，
- (ii) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差は，応力の方向によって異なること，
- (iii) ピエゾ抵抗効果の非直線誤差には，温度依存性があり，温度によって非直線誤差が変化することなどの事実が明らかになった。

そして，このような複雑なピエゾ抵抗効果の非線形特性とその温度依存性の現象を，数式として定量的に表現できる新しいピエゾ抵抗特性式を導入した。²⁵⁾²⁷⁾

(2) Si単結晶における弾性係数の結晶軸異方性を考慮し，Siダイアフラム上に発生する非線形な膜応力を，円板の大変形理論から求める手法を，Siダイアフラムの応力解析に導入した。そしてこの応力解析式と，ピエゾ抵抗効果の非線形特性式を結合して，半導体圧力センサの非線形特性を詳細に解析する特性解析シミュレータを開発した。

このシミュレータによる特性解析によって

- (i) 半導体圧力センサの非直線誤差が，ゲージ抵抗体のダイアフラム上での位置に依存して大きく変化すること，
- (ii) 非直線誤差を零とし得る適切なゲージ抵抗体の位置が，Siダイアフラム上に存在し得ることを定量的に明らかにした。

また，{110}面及び{100}面Siダイアフラムにおいて，その非直線誤差が±0.2%以内となるゲージ抵抗の配置領域を定量的に明らかにし，高精度な半導体圧力センサを設計するための基礎的事項を体系化した。²⁵⁾

(3) 半導体圧力センサの高精度化と高出力化の上で支障となる非直線誤差の温度依存性の現象を、理論的及び実験的に明らかにした。すなわち、センサの非直線誤差は、温度に依存して変化すること、及び温度依存性の大きさは、ブリッジ出力の大きさに比例して増大することを定量的に明らかにした。この現象はピエゾ抵抗効果を利用するセンサ特有の問題である。

この現象を、{110}面及び{100}面Siダイアフラムの各種ゲージボタンについて比較検討した結果、{110}面Siダイアフラム上で、 $\langle 111 \rangle$ 軸に沿ってダイアフラム端部に半径ゲージ抵抗体を配置し、かつ $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に沿ってダイアフラム中心近傍に接線ゲージ抵抗体を配置すれば、非直線誤差及びその温度依存性が、極めて小さくなるという事実を明らかにした。この結果をもとに、高精度な半導体圧力センサを実現するための新しいゲージボタンを提案した。³⁶⁾³⁷⁾⁴⁸⁾

(4) 以上の結果をもとに、{110}面Siダイアフラムの新ゲージボタンの最適設計を行ない、試作した結果、 $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ の広い温度範囲にわたって、非直線誤差 $\pm 0.05 \sim \pm 0.1\%$ 、ブリッジ出力 65mV/V 以上の高精度、高出力な半導体圧力センサが実現できた。この結果は、従来のゲージボタンに比較して、 $2 \sim 3$ 倍の高出力が、非直線誤差 $\pm 0.1\%$ 以内の精度で実現できたことを示す。³⁶⁾

(5) 半導体圧力センサの精度を支配する他の要因となる零点温度変化とスパン温度変化に対する新しい補償方式を開発した。

すなわち、半導体圧力センサの零点とスパンの温度特性を、ピエゾ抵抗特性式を利用して理論的に求め、その補償原理を明らかにした。この補償原理にもとずき、温度に対して特に大きな非線形特性を示すスパン温度変化に対して、サーミスタと拡散抵抗から成るインピーダンス回路により、ブリッジ励起電流を温度に対して非線形に制御する補償方式を確立し、 $120^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ の全温度範囲で、スパン温度変化を $\pm 0.2\%$ 以内に高精度に補償し得ることを示した。^{2)38)~40)}

(6) 以上の結果をもとにして、高精度半導体圧力センサの応用開発について述べた。

1つの応用例は、工業計測用の圧力伝送器であり、本研究により確立した{110}面Siダイアフラムセンサを利用し、 0.03MPa の低圧用圧力伝送器から、 50MPa の超高压用

圧力伝送器に至るまで，一連の圧力伝送器シリーズを開発し，いずれも精度 $\pm 0.2\%$ 級を
3)4)39)~41)
実現した。

他の応用例は，自動車エンジン制御用の半導体圧力センサであり，これは $\{100\}$ 面 Si
2)42)43)
ダイアフラムを利用した超小形センサであり，過酷な環境下で高精度化を実現した。

これらの応用開発例によって，本論文における設計理論の応用性を示した。

謝

辭

謝

辞

本論文をまとめるにあたり懇切に御指導頂いた京都大学工学部松波弘之教授に心からお礼申し上げます。本研究は主に日立製作所日立研究所において遂行したものであり、研究の機会を与えて頂きました貴重な助言を頂いた日立製作所小林栄二囑託（元所長）、宇都宮大学奥田健三教授（元第9部長）、佐賀大学木村一路教授（元主管研究員）、日立計測器サービス近藤秀雄取締役（元那珂工場副工場長）に深く感謝します。更に、ピエゾ抵抗効果について御指導いただいた浜松医大神田洋三教授、センサの試作と開発に尽力下さった日立製作所研究開発推進センター藍光郎副技師長、那珂工場松岡祥隆部長、佐和工場御法川斉部長他関係者の方々、また研究の遂行に御協力頂いた機械研究所保川彰夫研究員、日立研究所山田一二主任研究員、嶋田智研究員、田辺研究員に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

参 考 文 献

- 1) C.S.Smith : Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, Phys.Rev., Vol.94, №1, PP.42-49 (1954)
- 2) 西原 : 最近の半導体圧力センサ, 日本航空宇宙学会誌, Vol.30, №366, PP.9-15 (1982)
- 3) 西原, 松岡, 山田, 御法川, 坂本 : 最近の半導体圧力センサ, 日立評論, Vol.63, №2, PP.91-94 (1981)
- 4) M.Nishihara, K.Yamada, Y.Matsuoka : Recent Semiconductor Pressure Sensors, Hitachi Review Vol.30, №6, PP.285-289 (1981)
- 5) Y.Kand : Graphical Representation of Piezoresistance Coefficients in Silicon, IEEE Trans.Electron Devices, Vol.ED-29, №1, PP.64-70 (1982)
- 6) F.J.Morin, T.H.Geballe, and C.Herving : Temperature dependence of the piezoresistance of high-purity silicon and germanium, Phys. Rev., Vol.105, PP.525-539 (1957)
- 7) R.W.Keys : The effects of elastic deformation on the electrical conductivity of semiconductors, Solid-State Phys., Vol.11, PP.140-221 (1960)
- 8) W.G.Pfann and P.N.Thurston : Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effect, J.Appl. Phys., Vol.32, PP.2009-2019 (1961)
- 9) O.N.Tufte and E.L.Stelzer : Piezoresistive properties of silicon diffused layers, J.Appl.Phys., Vol.34, PP.313-318 (1963)
- 10) D.R.Kerr and A.G.Milnes : Piezoresistance of diffused layers in cubic semiconductors, J.Appl. Phys., Vol.34, PP.727-732 (1963)
- 11) G.L.Bir and G.E.Pikus : Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors. New York : Wiley (1974)
- 12) S.S.Shakhidzhanov : Total piezoresistance tensor of p-type silicon in a wide temperature range, Sov.Phys. Semicond., Vol.11,

PP.586-587 (1977)

- 13) A.S.Saidov : Piezoresistance of p-type germanium subjected to strong uniaxial deformations at low temperatures, Sov. Phys. Semicond. Vol.11, PP.587-588 (1977)
- 14) W.P.Mason and R.N.Thurston : Use of Piezoresistive Materials in the Measurement of Displacement, Force and Torque, J. Acoust. Soc. Amer., Vol.29, No.10, PP.1096-1101 (1957)
- 15) O.N.Tufte, P.W.Chapman and D.Long : Silicon diffused element piezoresistive diaphragms, J. Appl. Phys., Vol.33, No.11, PP.3322-3327 (1962)
- 16) T.L.Wand : Recent developments in the application of semiconductor strain gauges to physical and mechanical measurements, ISA Conf. Preprint 17, 11-4-65, PP.1-20 (1965)
- 17) A.D.Kurts and C.L.Gravel : Semiconductor transducers using transverse and shear piezoresistance, ISA Conf., P4-1-PHYMMID.67, PP.1-20 (1967)
- 18) E.R.Peake, A.R.Zias, and J.V.Egan : Solid-state digital pressure transducer, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-16, PP.870-876 (1969)
- 19) L.Bretschi : Silicon integrated strain-gauge transducer with high linearity, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-23, PP.59-61 (1976)
- 20) L.B.Wilner : A diffused silicon pressure transducer with stress concentrated at transverse gauges, ISA Trans., Vol.17, No.1, PP.83-87 (1978)
- 21) 神田洋三 : 計測センサに使われる半導体素子, オートメーション, Vol.21, No.13, PP.14-20 (1976)
- 22) Normann Zinker : Diffused silicon diaphragm pressure transducers, Proc.5th Annual ISA Test Measurement Symposium, PP.28-31 (1968)
- 23) Honeywell社編カタログ : Differential Pressure Transmitter (1976)
- 24) D.Long : Stress Dependence of the Piezoresistance Effect, J. Appl. Phys., Vol.32, PP.2050 (1961)

- 25) 西原, 嶋田, 山田, 田辺, 松岡, 保川: 半導体圧力センサの非線形特性の解析, 計測自動制御学会論文誌, Vol.17, №2, PP.114-119 (1981)
- 26) K.Yamada, M.Nishihara, S.Shimada, M.Tanabe, M.Shimazoe & Y.Matsuoka : Nonlinearity of the Piezoresistance Effect of p-Type Silicon Diffused Layers, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, №1, PP.71-77 (1982)
- 27) 山田, 西原, 外: p形シリコン拡散層におけるピエゾ抵抗効果の温度特性, 電気学会論文誌, Vol.103-A, №10, PP.31-38 (1983)
- 28) 島添, 山田, 高松: 半導体ストレングージの温度特性, 第36回秋期応物学会予稿集, 24a-D-6 (1975)
- 29) S.P.Timoshenko and S.Woinowsky-Krieger : Theory of Plates and Shells, Mc Graw-Hill Book Company, Inc. (1959)
- 30) S.Way : Tras. ASME, Vol.56, PP.627 (1934)
- 31) 白水, 佐藤, 君島, 野田: Si圧力センサとその応用, 信学技報, Vol.79, №35, PP.93-99 (1979)
- 32) J.J.Wortman and R.A.Evans : Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium, J. Appl. Phys., Vol.36, №1, PP.153-156 (1965)
- 33) 倉西: 弾性学, 文献社 (1970)
- 34) 保川, 嶋田, 松岡: 半導体圧力センサの応力解析, 日本機械学会講演論文集, Vol. N790, №3, PP.77-79 (1979)
- 35) 熊沢, 坂本, 志田: 反射光の干渉による凹面形状測定, 精密機械, Vol.50, №2, PP.66-70 (1984)
- 36) 西原, 嶋田, 山田, 田辺, 松岡: 半導体圧力センサの非線形特性の温度依存性, 計測制御学会論文誌, Vol.21, №8 (1985)
- 37) M.Nishihara, K.Yamada, et. al. : A silicon diaphragm piezoresistive pressure sensor, Proc. 2nd Sensor Symposium, PP.167-170 (1982)
- 38) 藍, 西原, 外: 拡散形半導体ストレングージを用いた変位センサ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.17, №9, PP.42-47 (1981)
- 39) Y.Matsuoka, M.Nishihara, et. al. : Transmitter Using Diffused

- Semiconductor Strain Gauges, Hitachi Review, Vol.30, No.6, PP.290-296
(1981)
- 40) 松岡, 西原, 外: 拡散形半導体ストレンゲージ応用伝送器, 日立評論, Vol.63,
No.2, PP.5-10 (1981)
- 41) 田辺, 西原, 外: 半導体ストレンゲージ応用伝送器の開発, 第18回SICE学術講演
会予稿集, 2506 (1979.8)
- 42) T.Inui, H.Minorikawa, M.Nishihara : High Reliability Semiconductor
Pressure Sensor for Automobiles, SAE Technical Paper 820515 (1982)
- 43) 川上, 西原, 外: 自動車用半導体負圧センサ, 第17回SICE学術講演会予稿集,
3817 (1978.8)
- 44) 五十嵐, 武内: 自動車用センサの現状と将来, 電子通信学会誌, Vol.61,
PP.874-883 (1978)
- 45) Wolber, W.G. and Wise, K.D.: Sensor Development in the Microcomputer
Age, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED 26, No.12, PP.1864-1874
(1979)
- 46) J.M.Borky and K.D.Wise : Integrated signal conditioning for
silicon pressure sensors, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-26,
PP.1906-1910 (1979)
- 47) K.Yamada, M.Nishihara, et.al : A piezoresistive integrated
pressure sensor, Sensor and Actuators, Vol.4, PP.63-69 (1983)
- 48) 嶋田, 西原, 外: 特開昭 53-114688, ダイアフラム形ひずみゲージ (1978)
- 49) A.S.Fischler and J.A.Collins : Self-compensating Silicon Load
Cell with an Electronic Converter, IEEE Trans. on Electron Devices,
Vol.ED-16, No.10, PP.861~866 (1969)
- 50) 有馬, 池上, 外: スピネル-RuO₂-ガラス系厚膜サーミスタの諸特性とその安定性,
第17回SICE学術講演会予稿集, 1506 (1978)