

最近の半導体圧力センサ

Recent Semiconductor Pressure Sensors

拡散形半導体圧力センサは、小形、高感度でヒステリシスがないという優れた特性があるため、近年、応用分野が急速に拡大しつつある。

本論文は、差圧、圧力伝送器などの工業計器用、及び自動車エンジン制御用を目的に開発した半導体圧力センサについて述べたもので、シリコンでのpiezo抵抗効果に関し詳細な特性評価を行ない、非直線誤差0.02～0.2%フルスケール、出力感度20～60mV/Vフルスケールの高精度化、高出力化を達成した。また最低100mmH₂Oフルスケールから最高500kgf/cm²フルスケールに至る各種圧力レンジのシリコンダイアフラム形圧力センサを開発した。

西原元久* Motohisa Nishihara
松岡祥隆** Yoshitaka Matsuoka
山田一二* Kazuji Yamada
御法川斎*** Hitoshi Minorikawa
坂本達事**** Tatsuji Sakamoto

1 緒 言

半導体技術は、ICやLSIだけでなく、センサの分野にも著しい影響を与えている。

シリコンのpiezo抵抗効果によって圧力を計測する拡散形半導体圧力センサは、このような半導体技術の発展を背景に開発されたもので、圧力という機械量を検出し電気信号に変換する要素を、シリコン結晶上に集積化したものである。このセンサは応用分野の広い基本センサの一つで、差圧、圧力伝送器などの工業計器や自動車エンジン用センサなどに使用されている。

本論文では、今回開発した半導体圧力センサを中心に、最近の動向について述べる。

2 半導体圧力センサの動向

近年、センサは半導体技術と深い関係をもつようになってきた。本論文で述べる半導体圧力センサのほか、ホトダイオードをはじめとする光センサ、ホールICなどの磁気センサ、IC化温度センサなど、シリコン自身をセンサとするものはもちろん、湿度、ガス、イオンなどの化学的なセンサも、無機や有機の機能性材料をMOS(Metal Oxide Semiconductor)トランジスタと一体化し、半導体集積化センサを指向している。この理由は、半導体の微細加工技術を応用することによって、センサの超小形化が可能となること、またシリコンの上に周辺回路を一体化して形成し、出力増幅や信号処理を行なえるなどの利点があるためである。図1に主なセンサの材料と集積化の傾向を示したが、この動向は今後ますます発展し、より小形で使いやすく、より高度な機能をもつセンサの開発が進むと思われる。

半導体圧力センサについては、次の二つの方向が指向されている。

一つは高精度化の追求である。IC技術によって微細なゲージ抵抗体をシリコン結晶に、精密かつ均一に拡散形成する技術が確立した結果、半導体圧力センサは実用的センサへと発展してきたが、更にpiezo抵抗特性の解明やシリコンの微細加工技術の改良により、非直線誤差0.02～0.2%の高精度化が可能となった。

他の一つは、半導体プロセス技術を生かした圧力センサの量産技術の追求である。センサチップの小形化、特性の均一

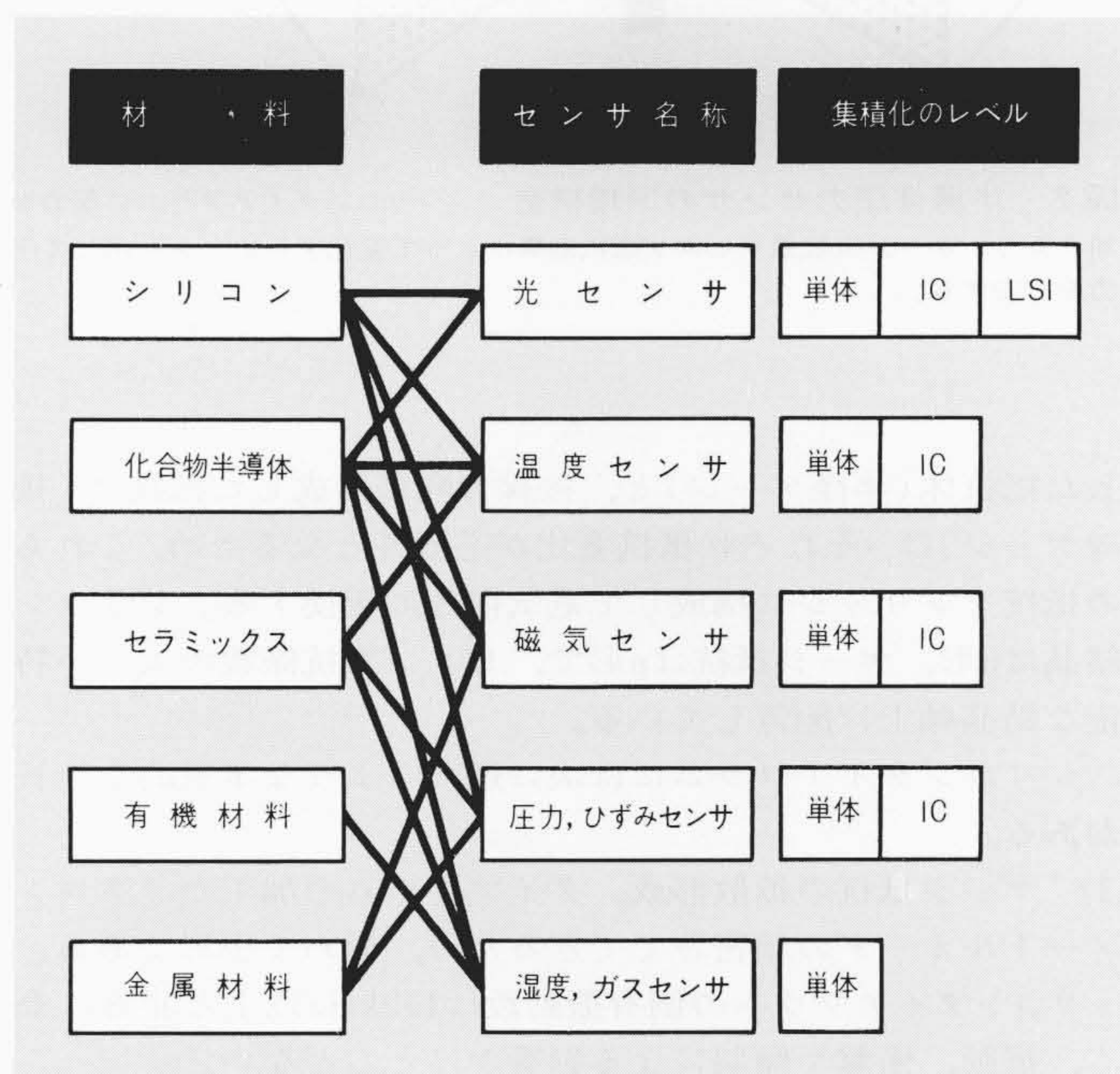


図1 センサの材料及び集積化の傾向 シリコン自身をセンサとするものはもちろん、他の材料についても半導体と一体化して、周辺回路を含む集積化センサが指向されている。

化、周辺回路の簡易化などの改良が図られている。これによって圧力センサのコストダウンが可能となり、汎用的な電子部品として、マイクロコンピュータの発展とともに新しいニーズを掘り起こしてゆくものと思われる。

3 半導体圧力センサの原理と特長

圧力を検出するエレメントをシリコンダイアフラムと呼ぶ。その構造は図2に示すように、シリコン結晶の中央部を薄く加工して圧力によりたわみを生ずるダイアフラムを形成し、表面に4個のゲージ抵抗体を拡散形成したものである。圧力が印加されるとダイアフラム部分が変形し、表面に応力が発生する。応力を受けるとpiezo抵抗効果によってゲージ抵抗の値が変化する。この場合、ダイアフラムの半径方向に形成

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所那珂工場 *** 日立製作所佐和工場 **** 日立製作所機械研究所

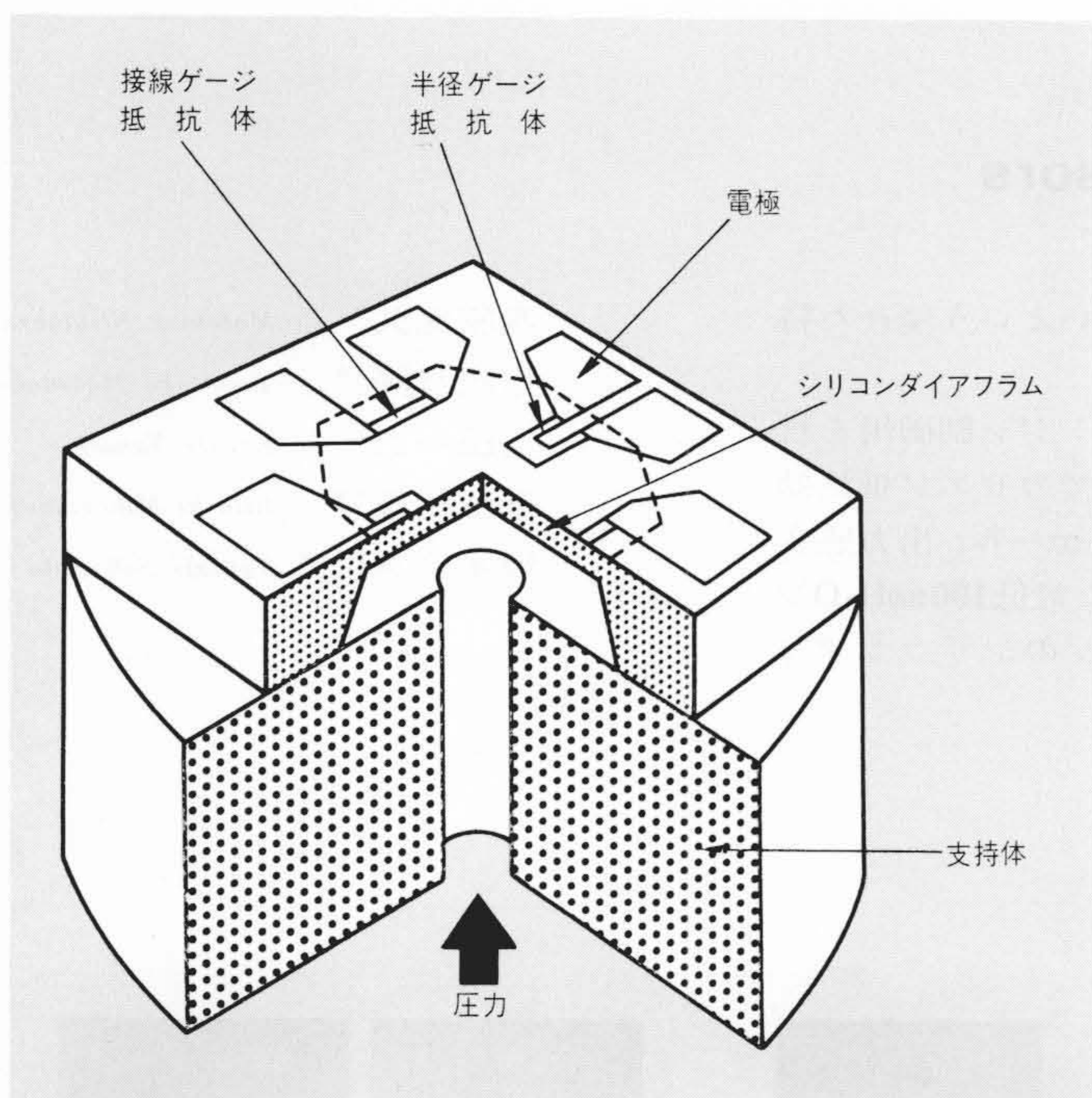


図2 半導体圧力センサの原理構造 シリコンダイアフラムに圧力を加えると、ゲージ抵抗値がピエゾ抵抗効果によって変化することを利用して圧力を測定する。

した抵抗体（半径ゲージ）と、接線方向に形成した抵抗体（接線ゲージ）は、それぞれ抵抗変化が逆極性となるため、これらの抵抗をブリッジに構成して電気信号に変換する。シリコン結晶はn形、ゲージ抵抗はp形で、ピエゾ抵抗係数の大きい特定の結晶軸上に配置している。

シリコンダイアフラムには次に述べるような本質的な特長がある。

- (1) ゲージ抵抗の拡散形成、ダイアフラムの加工がミクロンメートルオーダの精密さでできるため、極めて小形である。シリコンダイアフラムの固有振動数は150kHz以上と非常に高く、振動、衝撃や傾斜による影響がほとんどない。
- (2) シリコン結晶は理想的な弾性体であり、またゲージ抵抗体はシリコンに拡散形成され接着部がないため、ヒステリシス特性がない。
- (3) ピエゾ抵抗効果によるため感度が高く、周辺回路が簡単にできる。

4 半導体圧力センサの高精度化

4.1 ピエゾ抵抗特性

圧力感度を示すピエゾ抵抗係数は、シリコンの結晶軸に応じた異方性があることが知られており¹⁾、これを図示すると図3のようになる。 $\{110\}$ 面のシリコンでは $[111]$ 軸で、 $\{100\}$ 面のシリコンでは $[110]$ 軸でピエゾ抵抗係数が大きく、シリコンダイアフラム上のゲージ抵抗体はこれらの結晶軸上を選んで配置する。

ところで、シリコンダイアフラムに圧力が印加された場合、ゲージ抵抗体には抵抗体の長手方向と直交方向に σ_l, σ_t の2軸応力が加わる。このとき、応力と抵抗変化の関係は、従来、

$$\Delta R/R = \pi_{11}\sigma_l + \pi_{11}\sigma_t \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに R : ゲージの抵抗値,

ΔR : 抵抗変化量

π_{11}, π_{11} : 縦及び横ピエゾ抵抗係数(一次)

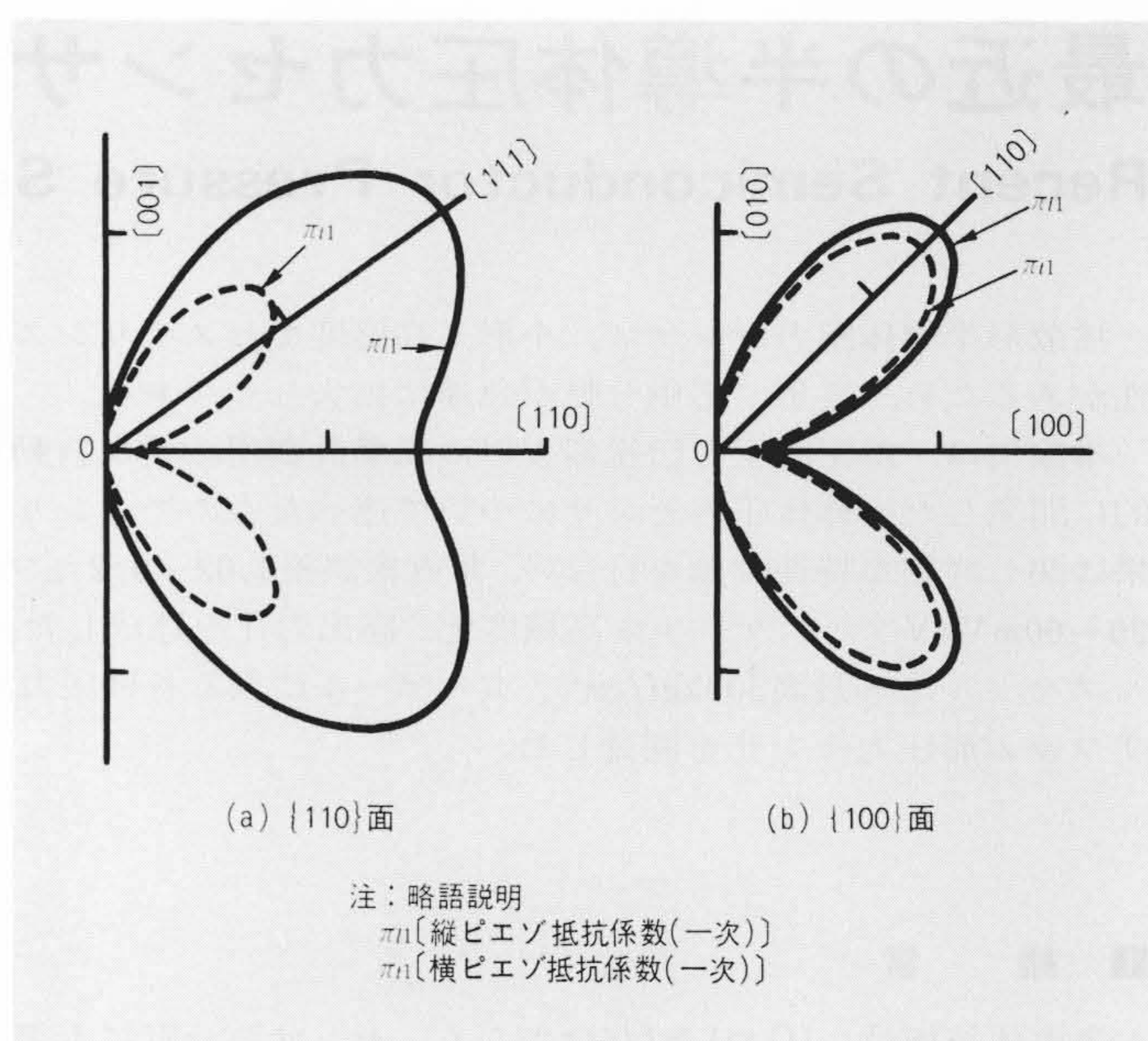


図3 p形シリコンピエゾ抵抗係数の結晶軸依存性 $\{110\}$ 面シリコンでは $[111]$ 軸、 $\{100\}$ 面シリコンでは $[110]$ 軸のピエゾ抵抗係数が大きいことが分かる。

で近似し、線形とみなしてきた。しかし、非直線誤差0.1%程度の高精度化を目的とした場合、(1)式では不十分である。

そこでピエゾ抵抗特性を詳細に解析し、応力に対する非線形性と温度影響を含む次のような新しいピエゾ抵抗特性式を求めた。

$$R(\sigma_l, \sigma_t, t) = R(0, 0, 0) \left[1 + \sum \left\{ \alpha_i t^i + \pi_{ij}(1 + \beta_{ij} t^i) \sigma_l^j + \pi_{ij}(1 + \beta_{ij} t^i) \sigma_t^j \right\} \right] \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに α_i : 抵抗の温度係数

t : 基準温度からの差

π_{ij}, π_{ij} : 縦及び横ピエゾ抵抗係数

β_{ij}, β_{ij} : ピエゾ抵抗係数の温度係数

(2)式を用いて、圧力センサの非直線誤差の解析、感度計算、温度影響の解析をしてゲージパターンの最適設計を行ない、次に述べるような高感度かつ高精度なシリコンダイアフラムを開発した。

4.2 C形シリコンダイアフラム

図4(a)は、圧力伝送器用に開発したシリコンダイアフラムで、断面形状からみてこれをC形と呼ぶ。圧力 P の印加によって、シリコンダイアフラム上には、図示のように半径方向応力 σ_r と接線方向応力 σ_θ が発生する。これらの応力と(2)式により抵抗値 R と圧力 P の関係が得られ、特性解析ができる。この結果、出力感度が大きくかつ非直線誤差が最小となる最適ゲージパターンとして、図示のように $\{110\}$ 面シリコン結晶の $[111]$ 軸に半径ゲージ抵抗体を、 $[110]$ 軸から45度方向に接線ゲージ抵抗体を配置したパターンを開発した^{2),3)}。非直線誤差は図5のようにゲージ抵抗体位置 X_T によって変化し、誤差零となる最適な位置が存在することが分かる。このタイプの圧力センサは、圧力レンジ0.3~500kgf/cm²用として非直線誤差0.02~0.2%の高精度なものが得られている。

4.3 E形シリコンダイアフラム

図4(b)は、差圧伝送器用に開発したシリコンダイアフラムで、断面形状の特長からE形シリコンダイアフラムと呼ぶ。前記C形の欠点は、差圧伝送器で必要な0.3kgf/cm²以下の低い差圧レンジで非直線誤差が大きくなること、及び正逆の差

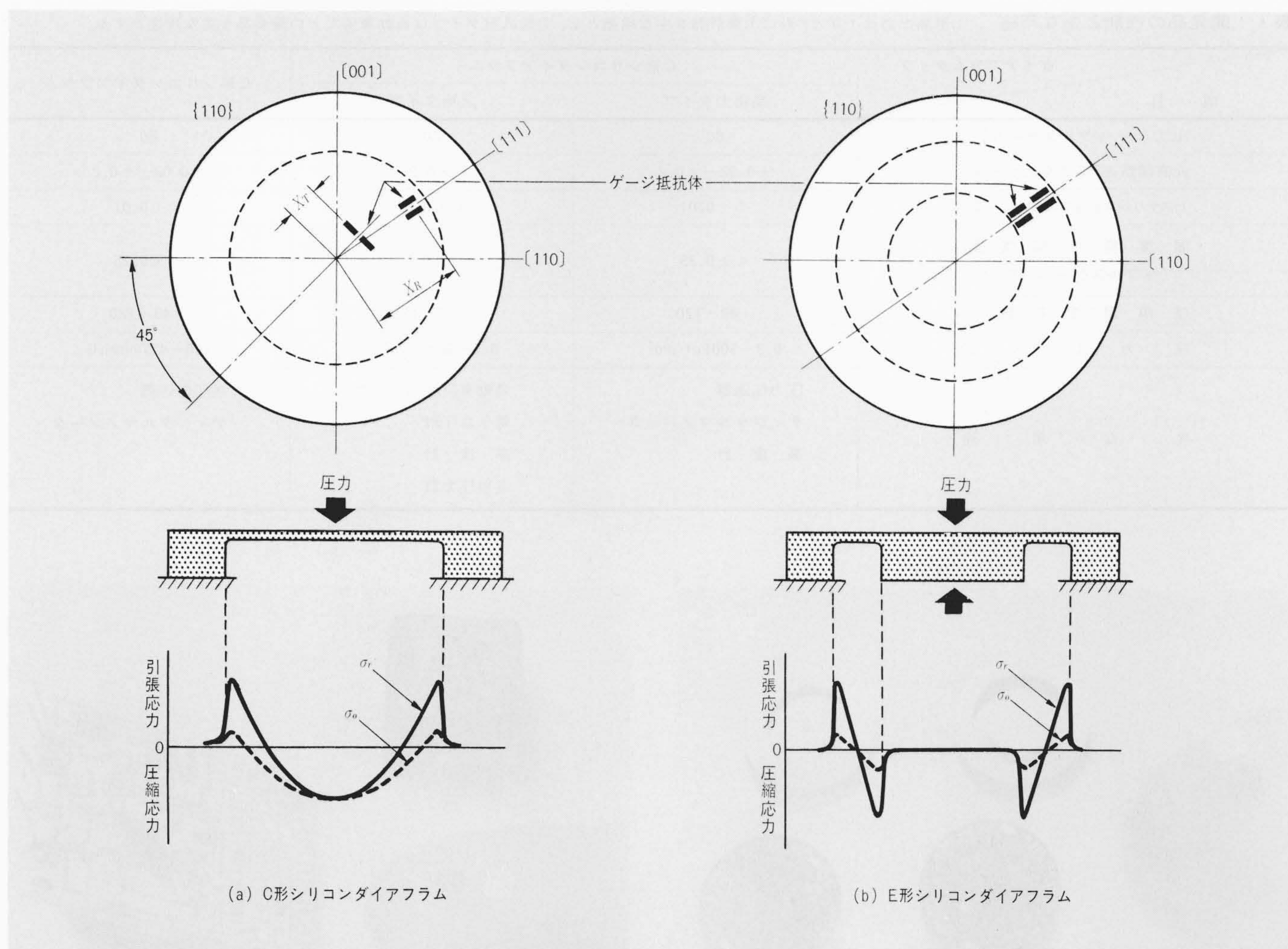


図4 シリコンダイアフラムの構造と応力分布の低い圧力レンジで直線性が良い。

(a) C形は0.3～500kgf/cm²の圧力レンジで直線性が良く、(b) E形は100～4万mmH₂O(0.01～4kgf/cm²)

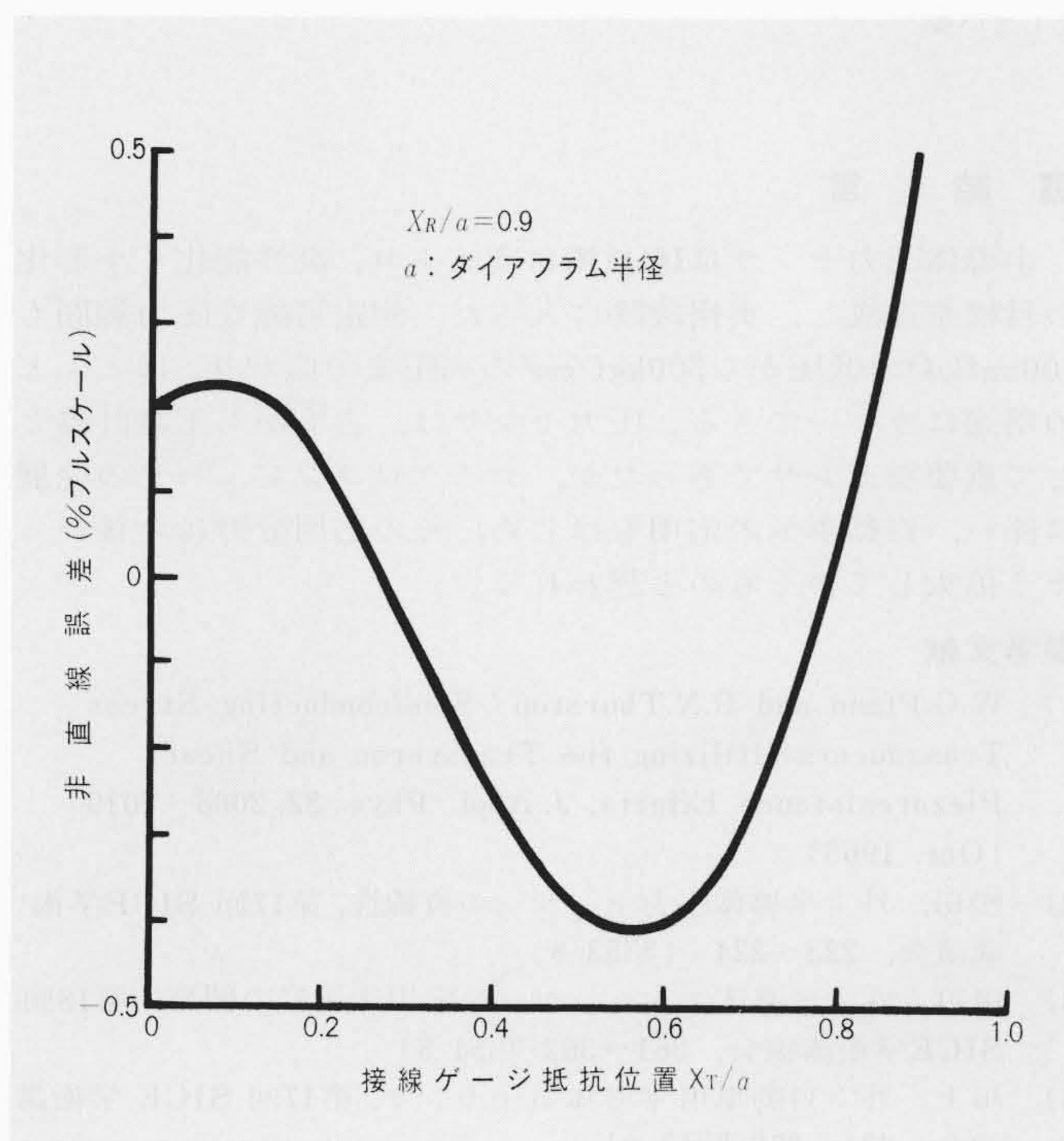


図5 ゲージ抵抗位置と非直線誤差の関係
最適なゲージ抵抗体位置の存在することが分かる。

非直線誤差が零となる

圧に対して非直線誤差に大きな差が生ずることである。これに対してE形は、二組みのゲージ抵抗体は、いずれも半径方向に配置し、この部分に発生する応力が引張りと圧縮で対称となり、かつ正逆の差圧に対しても対称となるため、応力の非線形性が少なく上記の欠点が生じない。このタイプの圧力センサは、圧力レンジ100～4万mmH₂O用として非直線誤差0.02～0.2%の高精度化を達成している。

5 開発品の性能と応用

開発したシリコンダイアフラムの性能と主な用途を表1に示す。C形高出力タイプとE形は、4.2、4.3節に述べたもので、工業計器を主とした用途にするものであるが、C形汎用タイプは、自動車用などの量産品を目的に開発したものである。センサ構造は図1に示すもので、特に量産を目的としてシリコンダイアフラムを小形化している。これら3種類のシリコンダイアフラムを図6に示す。

図7はC形汎用タイプのシリコンダイアフラムを応用して開発したハイブリッドIC化圧力センサである⁴⁾。周辺回路は厚膜で作られ、また温度補償用のサーミスタも厚膜化し小形化を図った。-40～+125℃の広い温度範囲で使用でき、図8に示すような特性が得られている。

差圧、圧力伝送器への応用については、本誌掲載の別論文⁵⁾を参照されたい。

表Ⅰ 開発品の性能と主な用途 C形高出力タイプとE形は工業計器を主な用途とし、C形汎用タイプは自動車用などの量産品を主な用途とする。

項 目	C 形シリコンダイアフラム		E 形シリコンダイアフラム
	高出力タイプ	汎用タイプ	
出力(mV/Vフルスケール)	60	20	60
非直線誤差(%フルスケール)	±0.02～±0.2	±0.2	±0.02～±0.2
ヒステリシス(%フルスケール)	<±0.01	<±0.01	<±0.01
温度特性(補償後) (%フルスケール/50℃)	<±0.25	<±0.5	<±0.25
使用温度範囲(℃)	－40～120	－40～125	－40～120
圧 力 レ ン ジ	0.3～500kgf/cm ²	0.5～3kgf/cm ²	100～4万mmH ₂ O
主 な 用 途	圧力伝送器 デジタルマノメータ 高度計	自動車用圧力センサ 電子血圧計 高度計 汎用圧力計	差圧伝送器 デジタルマノメータ

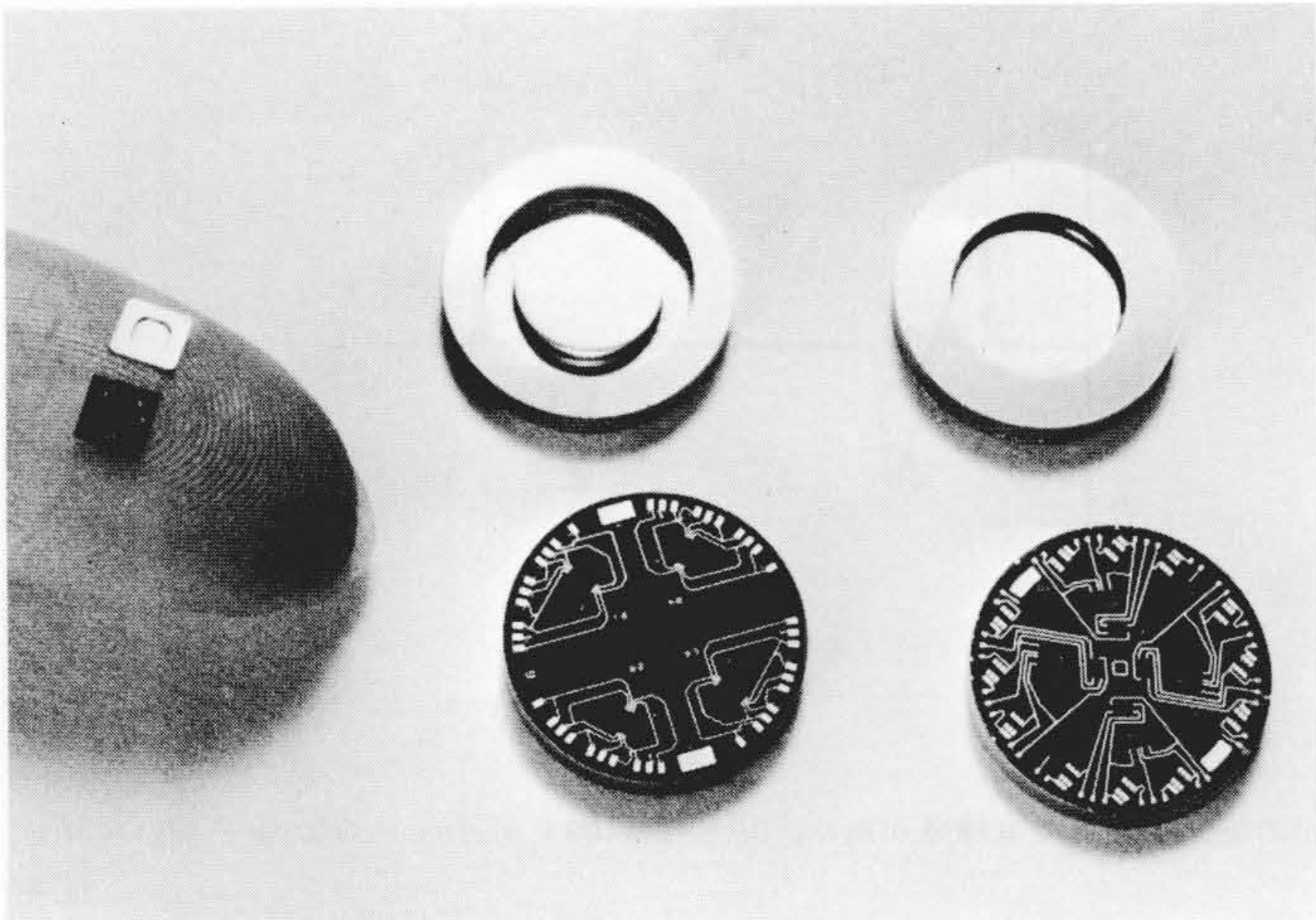


図6 シリコンダイアフラムの外観 右側からC形高出力タイプ、E形及びC形汎用タイプを示す。

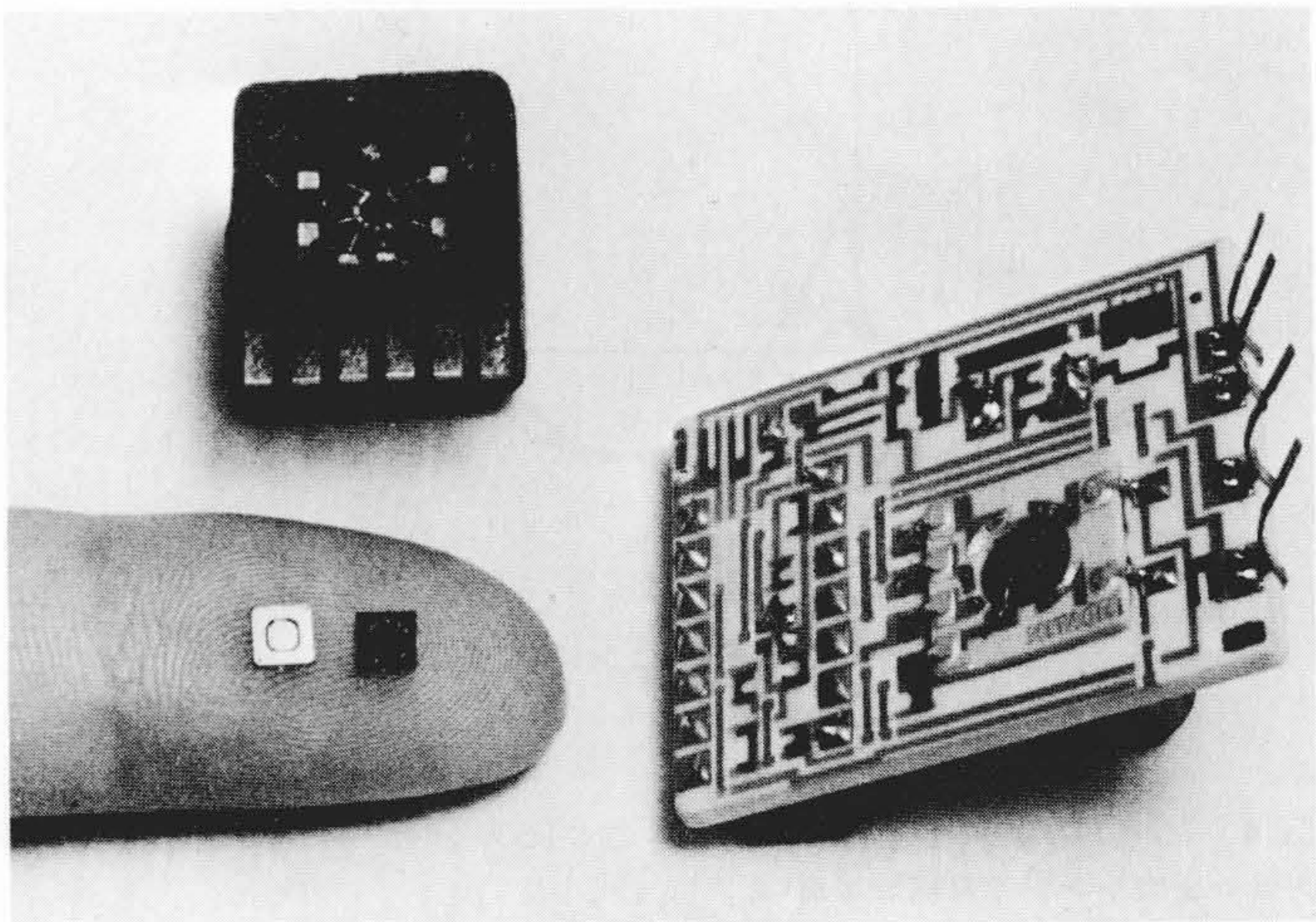


図7 ハイブリッドIC化圧力センサ シリコンダイアフラムは約3mm角、周辺回路は厚膜化し、小形化を図っている。自動車用などの量産品を目的としている。

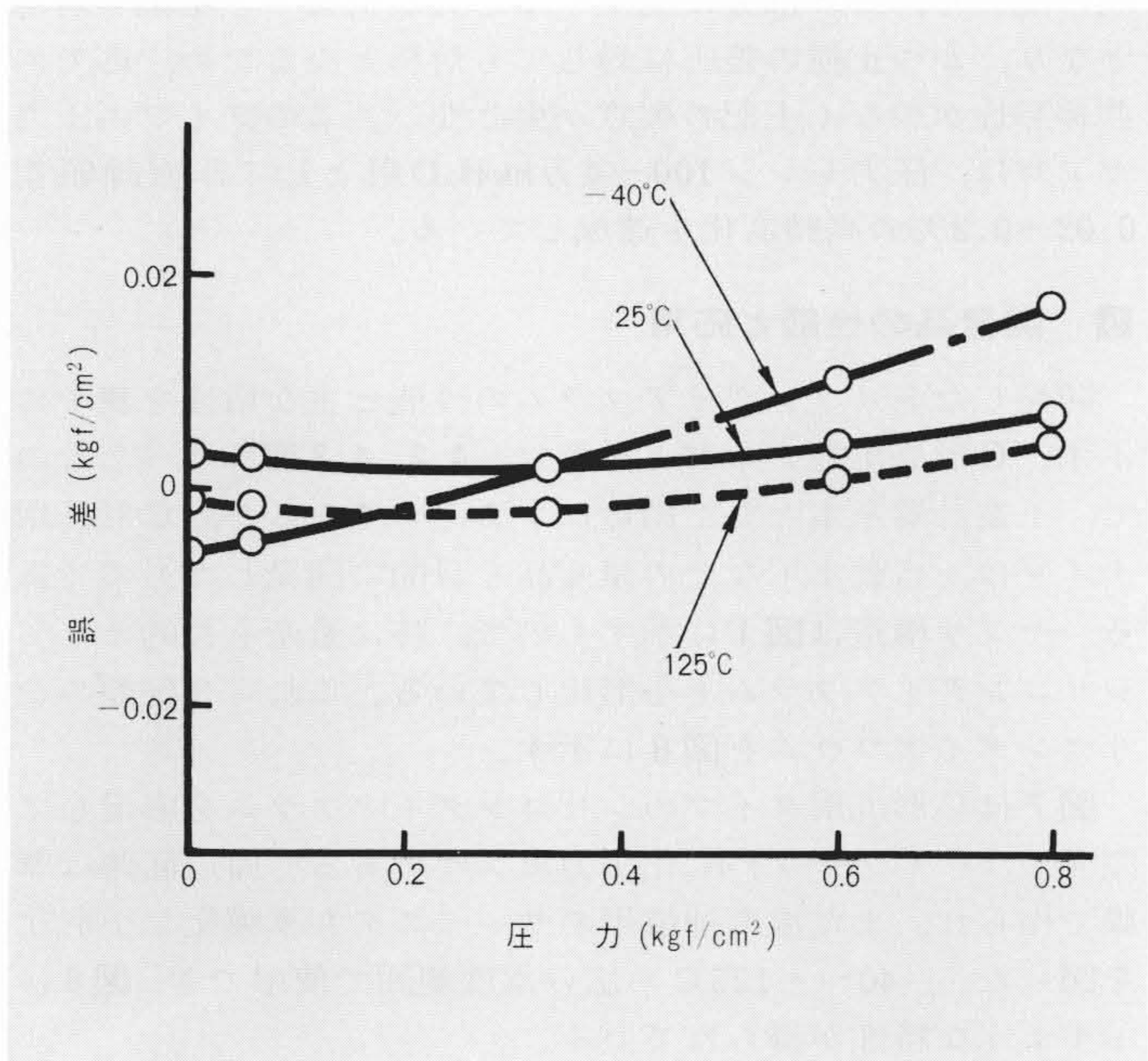


図8 ハイブリッドIC化圧力センサの特性例 －40～＋125℃の広い温度範囲で使用でき、誤差も少ない。ヒステリシスは認められない。

6 結 言

半導体圧力センサはIC技術に支えられ、高性能化と小形化の目標を達成し、実用段階に入った。測定可能な圧力範囲も100mmH₂Oの低圧から500kgf/cm²の高圧まで広がり、ほとんどの用途にカバーできる。圧力センサは、古くから工業計器として重要なセンサであったが、マイクロコンピュータの発展に伴い、自動車への応用をはじめ、その応用分野は今後いっそう拡大してゆくものと思われる。

参考文献

- 1) W.G.Pfann and R.N.Thurston : Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects, J. Appl. Phys. 32, 2008～2019 (Oct. 1963)
- 2) 鳴田, 外 : 半導体圧力センサーの直線性, 第17回 SICE学術講演会, 223～224 (昭53-8)
- 3) 田辺, 外 : 半導体ストレインゲージ応用伝送器の開発, 第18回 SICE学術講演会, 361～362(昭54-8)
- 4) 川上, 外 : 自動車用半導体負圧センサ, 第17回 SICE 学術講演会, 671～672(昭53-8)
- 5) 松岡, 外 : 拡散形半導体ストレインゲージ応用伝送器, 日立評論, 63, 85～90(昭56-2)