

拡散形半導体ストレインゲージ応用伝送器

Diffused Semiconductor Strain Gauge-Applied Transmitter

差圧及び圧力伝送器は、従来からプラントの流量、圧力、液面、密度などの計測と自動制御に重要な役割を果たしている。日立製作所は、昭和38年メタルストレインゲージを適用した伝送器を開発し、その有用性を実証してきた。今回、このストレインゲージを拡散形半導体ストレインゲージに置き換え、測定スパン100～40,000 mmH₂Oの差圧伝送器、及び0.3～500kgf/cm²の圧力伝送器を開発した。

この半導体ストレインゲージと、シンプルな全溶接構造の受圧部、及び直結直流増幅器の採用により、精度0.2%で周囲の環境変化に強く、長期間安定に動作する伝送器を実現した。

松岡祥隆* Yoshitaka Matsuoka

西原元久** Motohisa Nishihara

坂本達事*** Tatsuji Sakamoto

池上 昭**** Akira Ikegami

1 緒 言

近年、化学、鉄鋼、電力、食品、上下水道など各種プラントで高度な制御が要求され、検出端の精度、信頼性の向上がプラント計装上の大きな課題となっている。その結果、検出端として最も多く使用される差圧伝送器、及び圧力伝送器(以下、この2種類を伝送器と総称する。)にも高精度化、高信頼度化の要求が高まり、従来の精度0.5%を0.2%にするとともに、環境変化による影響が少ない伝送器を開発する必要性がでてきた。

一方、伝送器を歴史的に振り返ってみると、力平衡方式が主流を占める中で、日立製作所は昭和38年にメタルストレインゲージを採用した直接変換方式の伝送器を製品化¹⁾し、その利点を市場に問うてきたが、高精度化時代の現在では検出方式は異なるものの、直接変換方式が主流に変わりつつある。日立製作所は長年培ってきた直接変換方式のノウハウと、最近特に技術革新の著しいIC製造技術を駆使して開発したシリコンダイアフラム式半導体圧力センサ(以下、半導体センサと略す。)を組み合わせることにより、高精度かつ高安定な拡散形半導体ストレインゲージ応用伝送器を製品化した。

シリコン単結晶は理想的な弾性材料であり、これを利用した半導体センサはヒステリシス、クリープ、疲労がなく、機械的に過酷な使用条件に対して優れた特性が期待できる。本稿では、この半導体センサの特性を有効に引き出すシンプルで信頼性の高い全溶接構造の受圧部と、4～20mA DCの統一信号に変換する直結直流2線式増幅器を組み合わせた伝送器の特長、及び個々の特性について述べる。

図1に新たに開発したEDR-71形差圧伝送器、及びEPR-71形圧力伝送器の外観を、表1にそれぞれの主な仕様を示す。

2 半導体圧力センサ

2.1 半導体ストレインゲージの原理

一般に抵抗体は引張り・圧縮により抵抗値が変化する。このときの抵抗変化率は(1)式となる。

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \cdot \epsilon + \pi \cdot E \cdot \epsilon \dots \dots \dots (1)$$

$$= G_f \cdot \epsilon \dots \dots \dots (2)$$

ここに $\frac{\Delta R}{R}$: 抵抗変化率

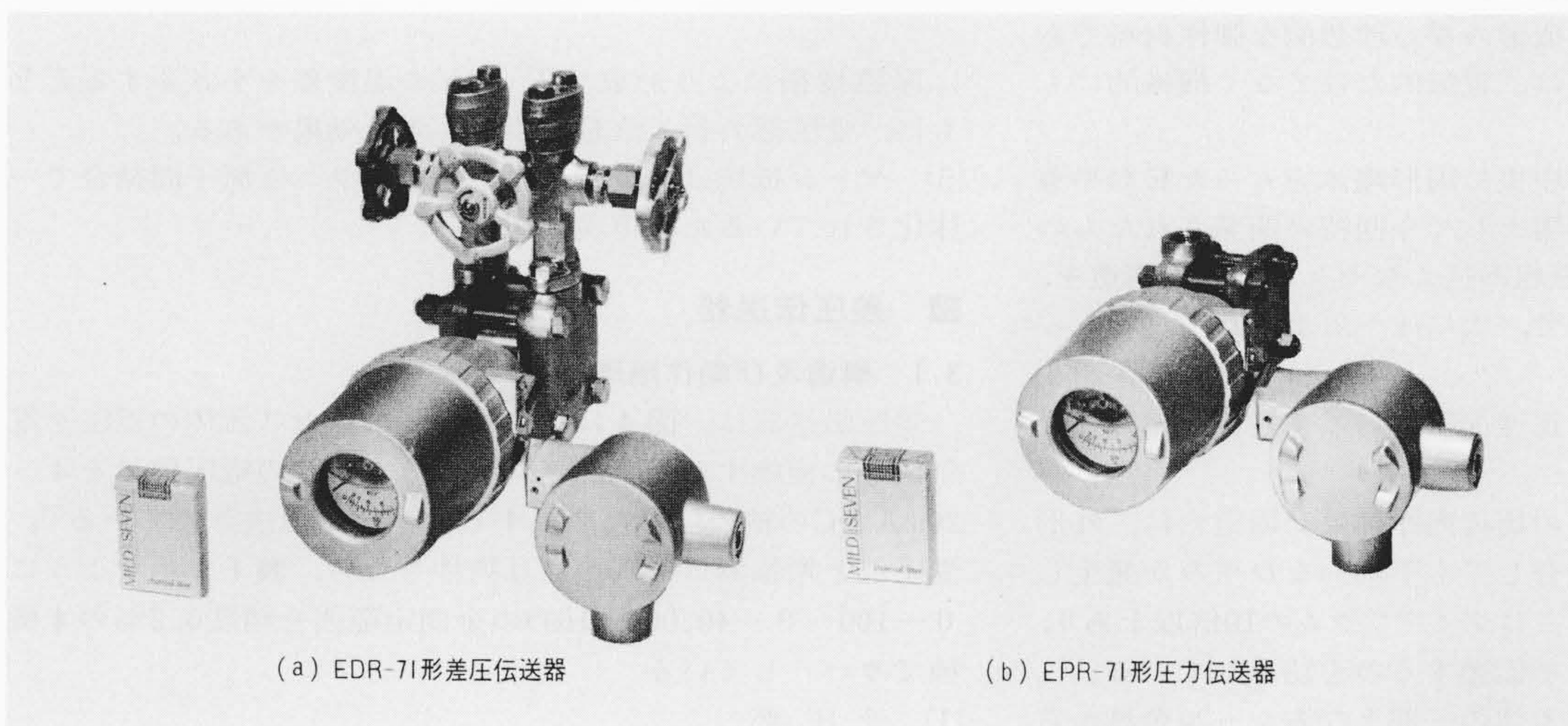


図1 伝送器外観 基準レンジ8,000mmH₂Oの差圧伝送器(a)と基準レンジ25kgf/cm²の圧力伝送器(b)で、防水・防爆形(dS2G4, i3nG5)となっている。

* 日立製作所那珂工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所機械研究所 **** 日立製作所生産技術研究所

表1 伝送器の主な仕様 差圧伝送器及び圧力伝送器の主な仕様を示す。

項目	形式	EDR-71形差圧伝送器		EPR-71形圧力伝送器	
		基準レンジ	適用範囲	基準レンジ	適用範囲
測定範囲		500mmH ₂ O	0—100～ 0—500mmH ₂ O	1.5kgf/cm ²	0—0.3～ 0—1.5kgf/cm ²
		2,500mmH ₂ O	0—500～ 0—2,500mmH ₂ O	5 kgf/cm ²	0—1～ 0—5 kgf/cm ²
		8,000mmH ₂ O	0—800～ 0—8,000mmH ₂ O	25kgf/cm ²	0—5～ 0—25kgf/cm ²
				100kgf/cm ²	0—20～ 0—100kgf/cm ²
		40,000mmH ₂ O	0—6,400～ 0—40,000mmH ₂ O	500kgf/cm ²	0—100～ 0—500kgf/cm ²
出力	DC 4～20mA				
精度	±0.2%				
電源電圧	DC24V±10%				
最高使用圧力	150kgf/cm ² *		基準レンジ		
耐圧	225kgf/cm ² *		基準レンジの150%		
周囲温度	-40～100℃				
接液温度	-40～120℃				

注：*ただし、基準レンジ500mmH₂Oの場合は最高使用圧力50kgf/cm²、耐圧75kgf/cm²となる。

- ν : 抵抗体のポアソン比
- E : 抵抗体のヤング率
- ϵ : 抵抗体に発生するひずみ
- π : 抵抗体のピエゾ抵抗係数
- G_f : ゲージファクタ

メタルストレインゲージでは、(1)式第1項の形状変化だけが感度に寄与するので、ゲージファクタ G_f はおよそ2程度である。これに対し、半導体ストレインゲージでは半導体特有のピエゾ抵抗効果により第2項の比抵抗変化の項が大きくなり、 G_f は100～150にも達する。

2.2 シリコンダイアフラム式半導体圧力センサ

半導体センサは、圧力をひずみに変換するシリコン単結晶のダイアフラムとその表面層に拡散形成された半導体ストレインゲージ抵抗から構成される²⁾。このシリコン単結晶は結晶欠陥が極めて少なく、一般金属材料などの多結晶と異なり、ヒステリシス、クリープ、疲労のない理想的な弾性材料である。このため半導体センサは、電氣的だけでなく機械的にも優れた特性を示す³⁾。

シリコンダイアフラムの中央に円形剛体をもったE形半導体センサ²⁾は、差圧伝送器用として今回特に開発されたものである。図2はこのセンサを組み込んだセンサ部断面構造を、図3はその外観を示すもので、次に述べるような特長をもっている。

- (1) E形半導体センサは、正逆加圧に対して良好な直線性を示す。
- (2) シリコンダイアフラムの周辺肉厚部及び固定台は、外形が同じ円形としてあり、接合しても不均一なひずみが発生しない。また周辺肉厚部の厚さはダイアフラムの10倍以上あり、外乱ひずみがゲージ抵抗まで伝達するのを防止している。
- (3) 半導体センサは受圧部本体の一部となるシール金具から遠く離れた一点で固定し、溶接ひずみ、静圧時の受圧部変形などの影響を極小にしている。
- (4) 温度補償に使われるサーミスタは、半導体センサの近く

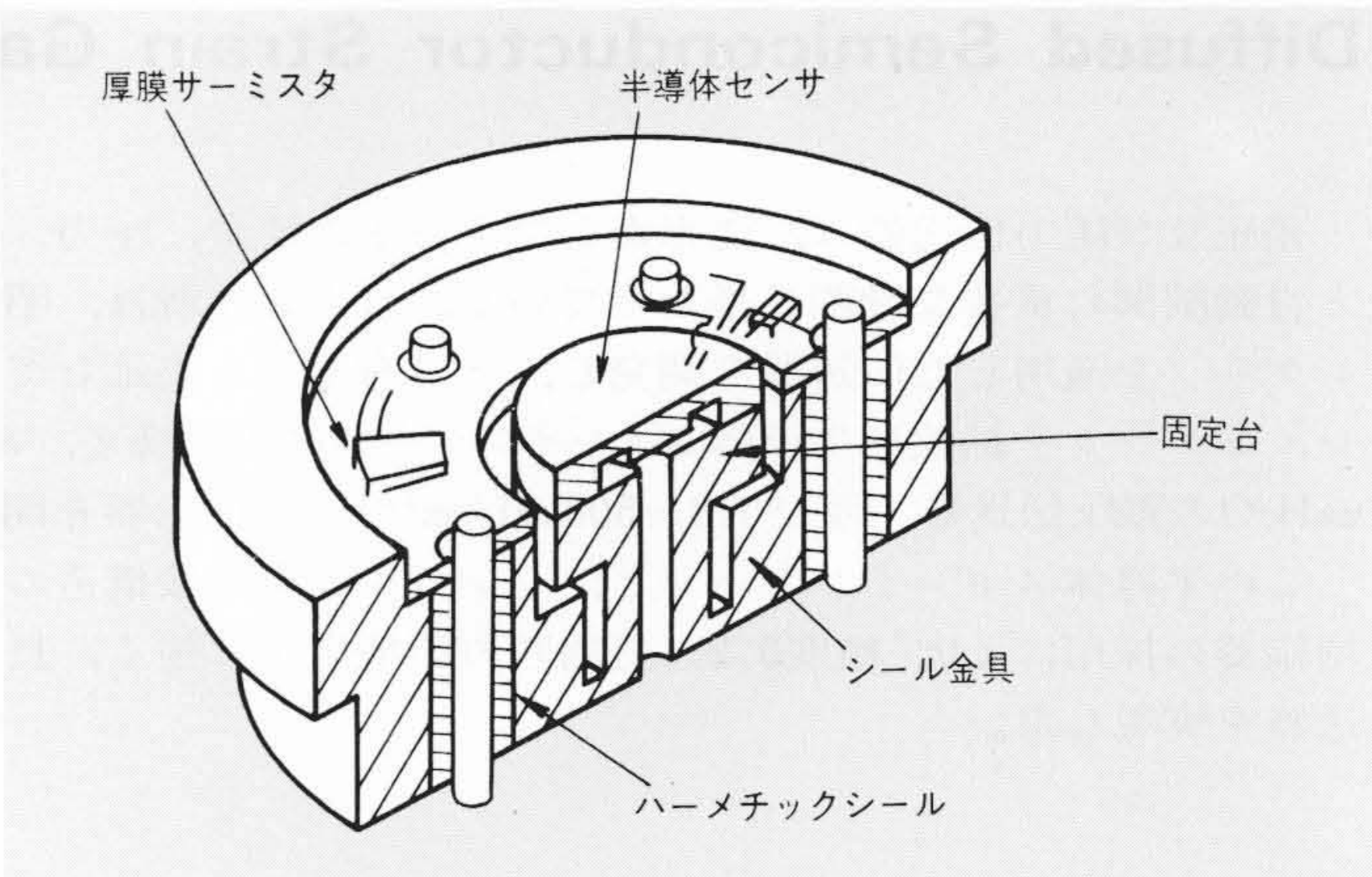


図2 シリコンダイアフラム式半導体圧力センサ（半導体センサ）部の断面構造 差圧伝送器用に開発したE形半導体センサを固定台に接合し、シール金具に組み込まれた状態の断面構造を示す。

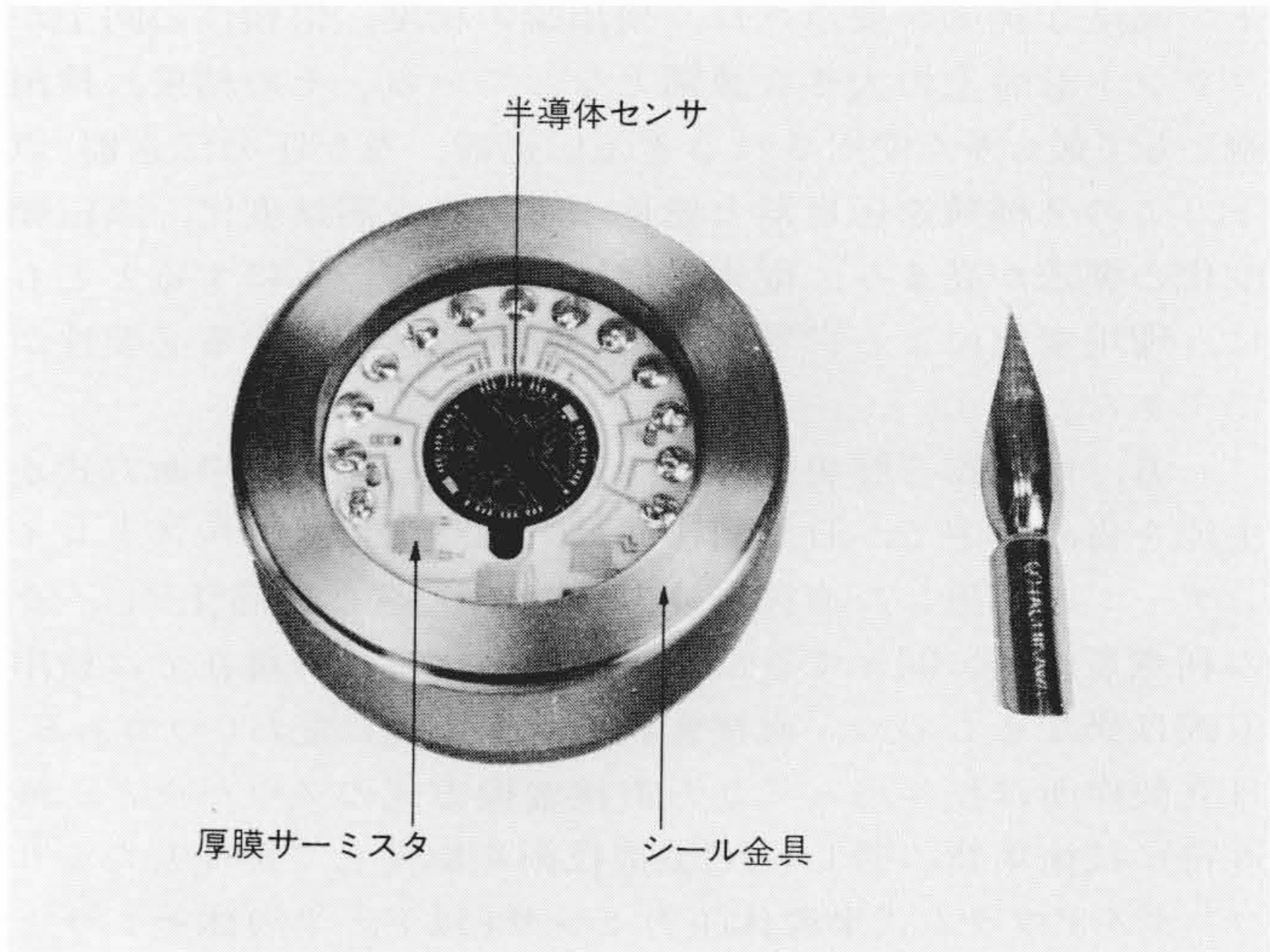


図3 シリコンダイアフラム式半導体圧力センサの外観 半導体センサと温度補償用厚膜サーミスタは、ハイブリッド方式によりシール金具中に一体に組み込まれている。

に厚膜技術により形成し⁴⁾、相互の温度差を小さくするとともに、受圧部の封入液量を少なくする効果がある。

- (5) ゲージ抵抗は、シリコンダイアフラムと原子間結合で一体化されているため再現性が良い。

3 差圧伝送器

3.1 構造及び動作原理

差圧伝送器は、図4に示すようにプロセス流体の差圧を電気信号に変換する受圧部と、半導体センサの電圧信号を4～20mA DCの統一信号に変換する増幅部で構成されている⁵⁾。受圧部と増幅器はそれぞれ互換性をもち、表1に示すように0—100～0—40,000mmH₂Oの全測定範囲を精度0.2%の4機種でカバーしている。

(1) 受圧部

受圧部は図5に示すような2液室、3枚ダイアフラム構造とした。高圧側及び低圧側に導入された圧力は、シールダイアフラム及び封入液を介して半導体センサのシリコンダイア

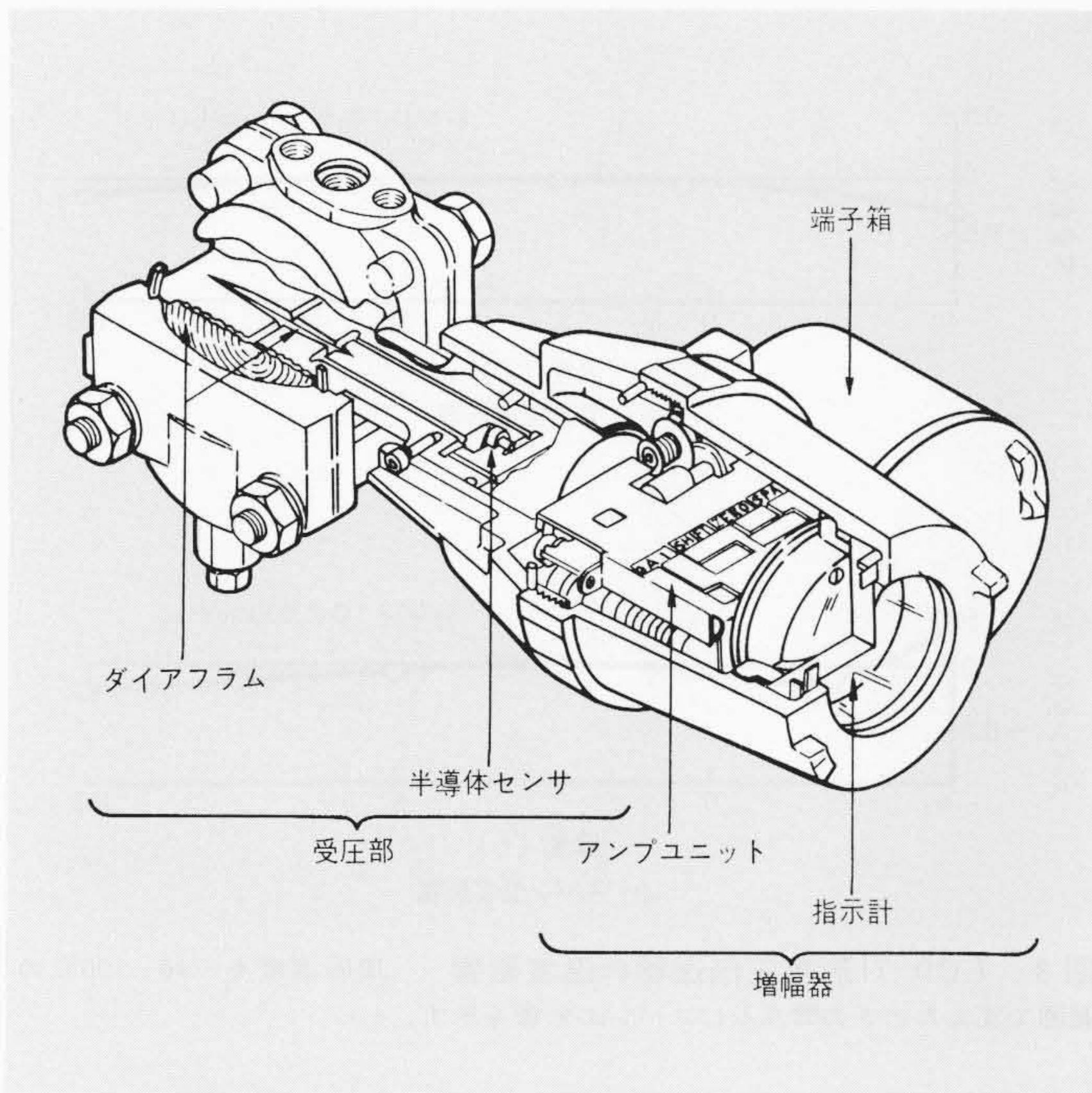


図4 EDR-71形差圧伝送器の全体構成 差圧伝送器の全体構成は、フィールドの圧力を電気信号に変換する受圧部と、電気信号を4～20mAの統一信号に変換する増幅器から構成される。

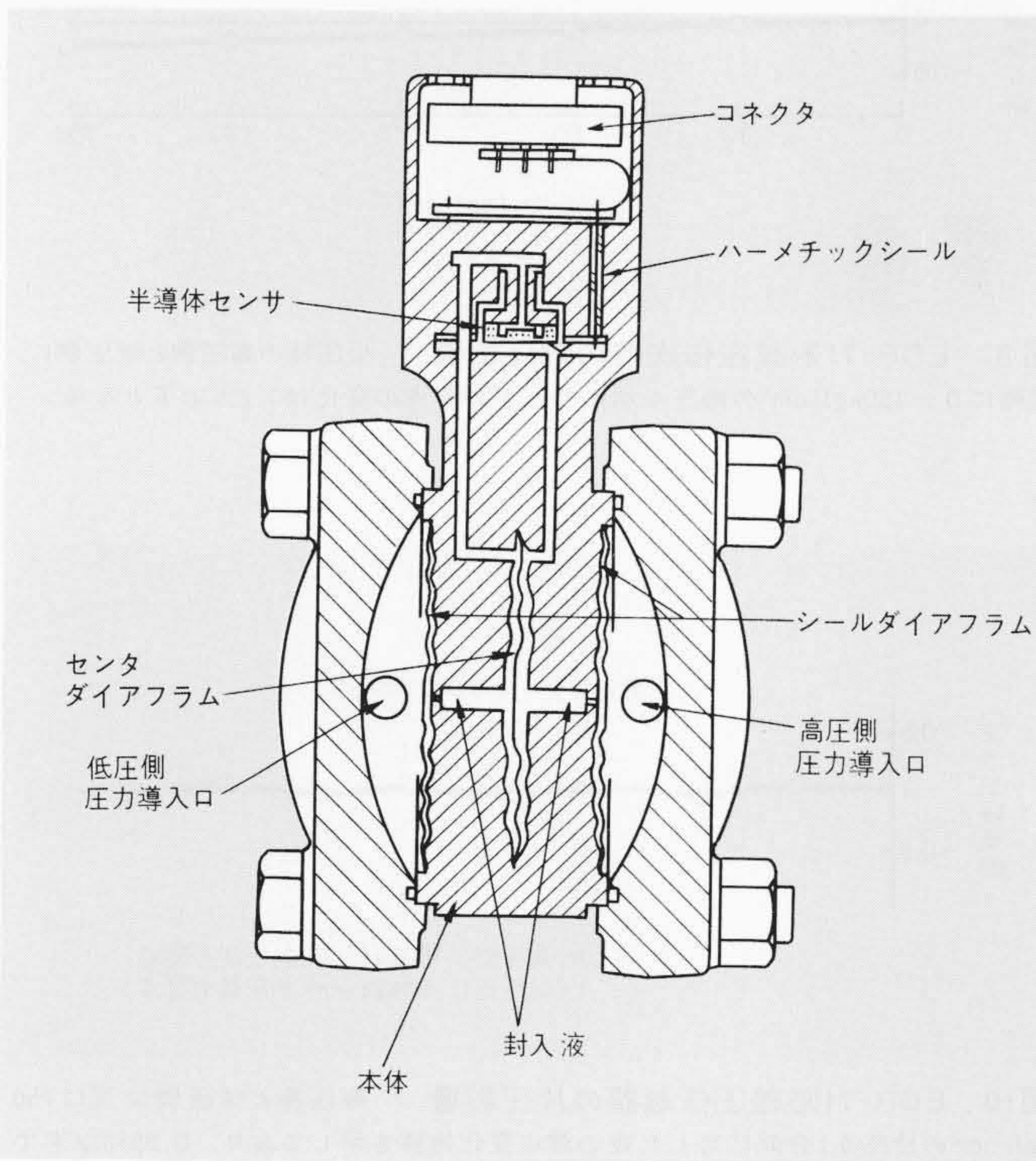


図5 EDR-71形差圧伝送器受圧部の構造断面 半導体センサはシリコンオイル中に封入されており、受圧部は2液室、3枚ダイヤフラム構造とした。

フラムの両面に伝達され、電気信号に変換される。

受圧部は腐食性流体を測定したり、 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ 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

料を一切使用していないため、高温状態など厳しい周囲環境下にさらされても部品の劣化がなく、長期間安定に動作する構造とした。

差圧伝送器は圧力伝送器と異なり、例えば $150\text{kgf}/\text{cm}^2$ と大きなライン圧力下に発生するわずかな圧力差($0.05\sim 4\text{kgf}/\text{cm}^2$)をフルスケールとして、 0.2% 以上の精度で測定しなければならない。このため、半導体センサを等価的に封入液の中空に浮いた状態となるよう受圧部本体から十分に離れた一点で固定し、ライン圧による本体のわずかな変形がほとんど出力信号に影響を及ぼさない構造とした。

また受圧部は、誤操作などにより片側から過大差圧(以下、片圧と略す。)が印加されても、半導体センサを保護する機構を備えている必要がある。そこで、センタダイヤフラムと2枚のシールドダイヤフラムの体積剛性を適当に選び、通常の測定範囲では各ダイヤフラムが本体に接触せず、半導体センサに正常な圧力を伝達する。しかし、測定範囲を越えて片圧が印加された場合は、シールドダイヤフラムが波形の本体に着座し内圧上昇を抑える構造とした。このとき、センタダイヤフラムは本体と接触しないので弾性変形であり、しかもセンタダイヤフラムの体積剛性をシールドダイヤフラムよりも十分大きくとってあるため、センタダイヤフラム及びシールドダイヤフラムが多少変形しても片圧の影響は小さくなる。

(2) 増幅部(電圧-電流変換部)

半導体センサの出力電圧は十分大きいので、単純な直結直流増幅回路により4～20mA DCの統一信号に変換できる。

図6は2線式伝送器の回路構成であり、次に述べるような特長をもっている⁶⁾。

- (a) 電圧-電流変換回路は、温度特性をそろえた差動増幅器をペアで構成しているため、温度影響が小さい。
- (b) 回路は零スパンの相互干渉が小さく、レンジ変更が容易な構成である。
- (c) 回路全体は12Vと低電圧で動作しているため、一般に使用される電源電圧24Vのとき負荷抵抗が 600Ω 以上とれ、システム構成が容易である。
- (d) フィルタと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。
- (e) コンデンサは寿命の限られたアルミ電解コンデンサを避け、セラミック系のものだけで回路を構成した。

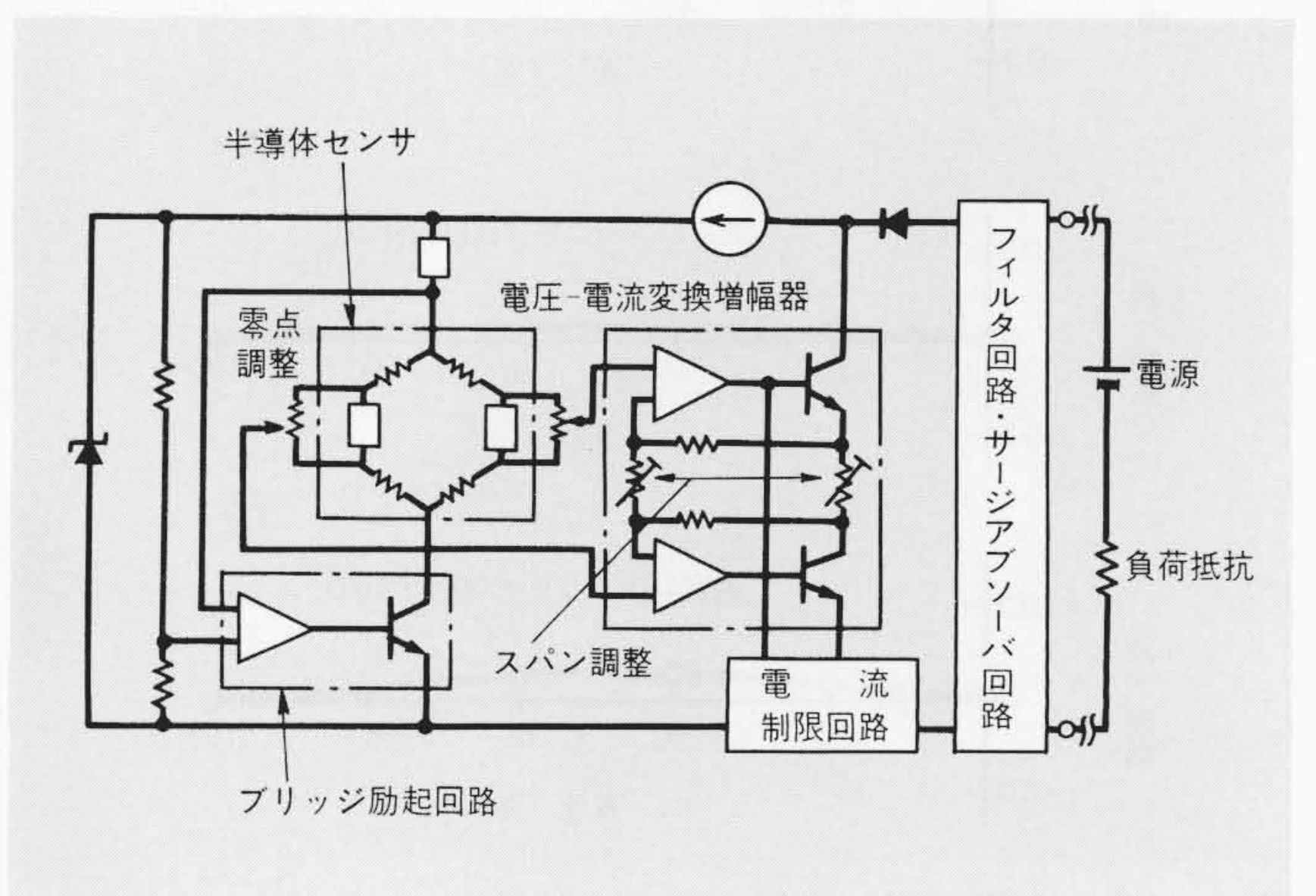


図6 増幅器の回路構成 半導体センサから大きな電圧信号が得られるため、単純な直結形直流増幅回路により4～20mAの統一電流信号に変換している。

(f) 片圧が印加されたときにも過大な出力信号を発生しない電流出力制限回路を設けた。

(g) リニアライズ回路を設け、受圧部から発生する非直線誤差を低減している。

3.2 特性及び影響値

最も標準的な基準レンジ8,000mmH₂Oの差圧伝送器を試験した結果の一例について述べる。

(1) 入出力特性

図7は高圧側から圧力を印加した場合の入出力特性で、0—800mmH₂Oから0—8,000mmH₂Oまで10倍にレンジ変更しても各レンジで直線性は0.1%以下であり、ヒステリシスは0.01%以下と非常に小さい。この特性はリニアライズしておらず、リニアライズ回路を使えば更に直線性が良くなる。またE形半導体センサの形状効果により、低圧側から加圧した場合でも同様な優れた入出力特性が得られる。

(2) 温度変化の影響

測定レンジ0—5,000mmH₂Oに調整し、周囲温度を-40—100°Cの範囲で変化させたときの零点とスパンの変化を図8(a)、(b)に示す。これにより、全温度範囲で零点変化0.3%、スパン変化0.4%の特性が得られた。

一般に半導体ストレインゲージ抵抗の温度係数は大きいですが、半導体センサに拡散されたゲージ抵抗は抵抗値と温度係数を良くそろえ、かつブリッジ回路を構成しているので、零点の温度依存性は大幅に改善される。更に零点はゲージ抵抗に直並列に固定抵抗を挿入して補正し、スパンはブリッジ励起電圧を厚膜サーミスタを使って補償し、良好な温度特性の伝送器としている。

(3) 静圧及び片圧の影響

図9は受圧部の高圧側と低圧側同時に0—150kgf/cm²の静圧を加えたときの零点変化であり、測定レンジ0—5,000mmH₂Oで0.2%以下の値である。

図10は本器の高圧側と低圧側交互に150kgf/cm²の片圧を各各1分間印加した後の零点変化推移を示しており、0.05%以下で安定している。このことは、スリーバルブの誤操作、ドレン抜き、その他過渡的にライン圧力がそのまま片側からか

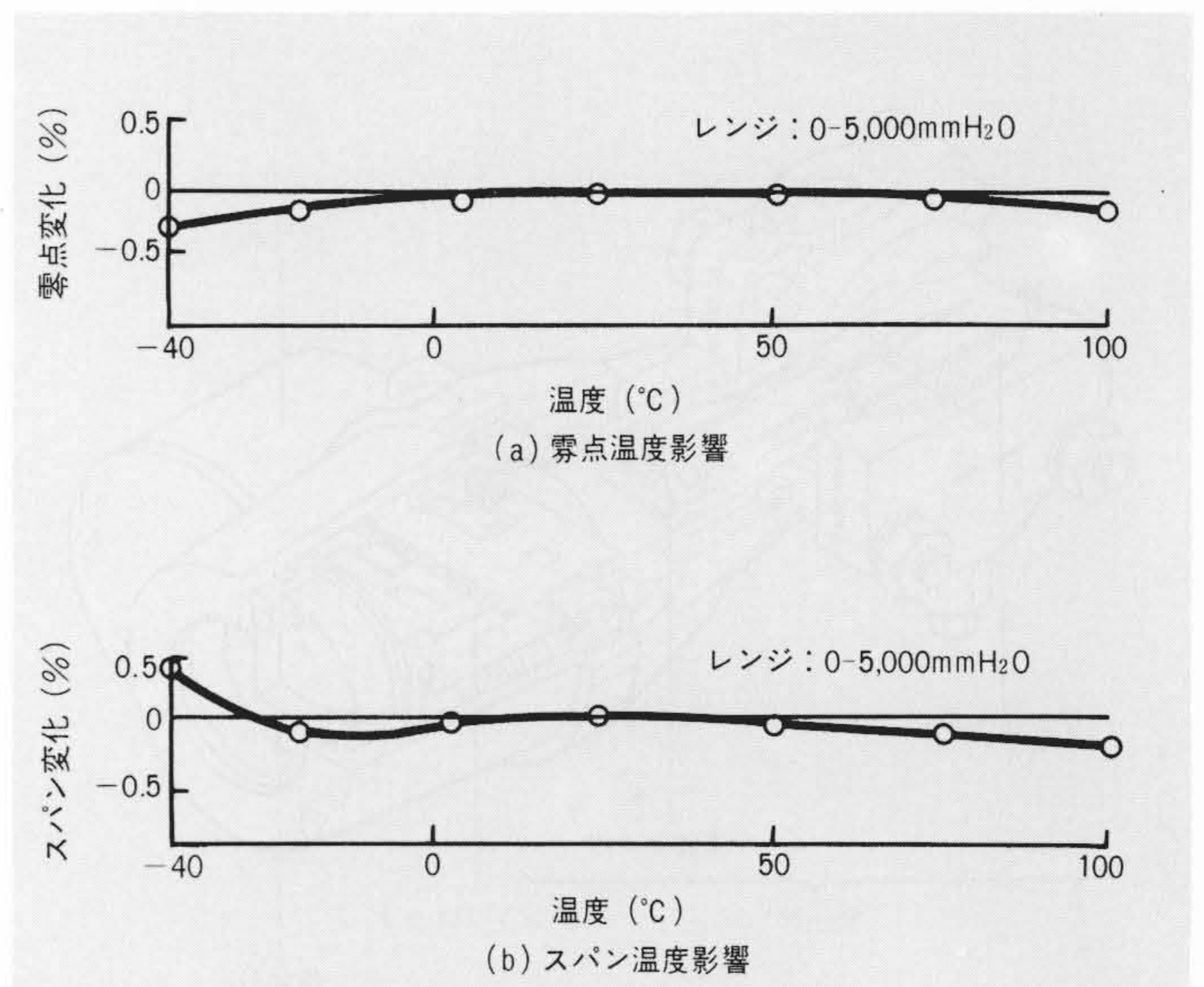


図8 EDR-71形差圧伝送器の温度影響 周囲温度を-40—100°Cの範囲で変えたときの零点及びスパンの影響を示す。

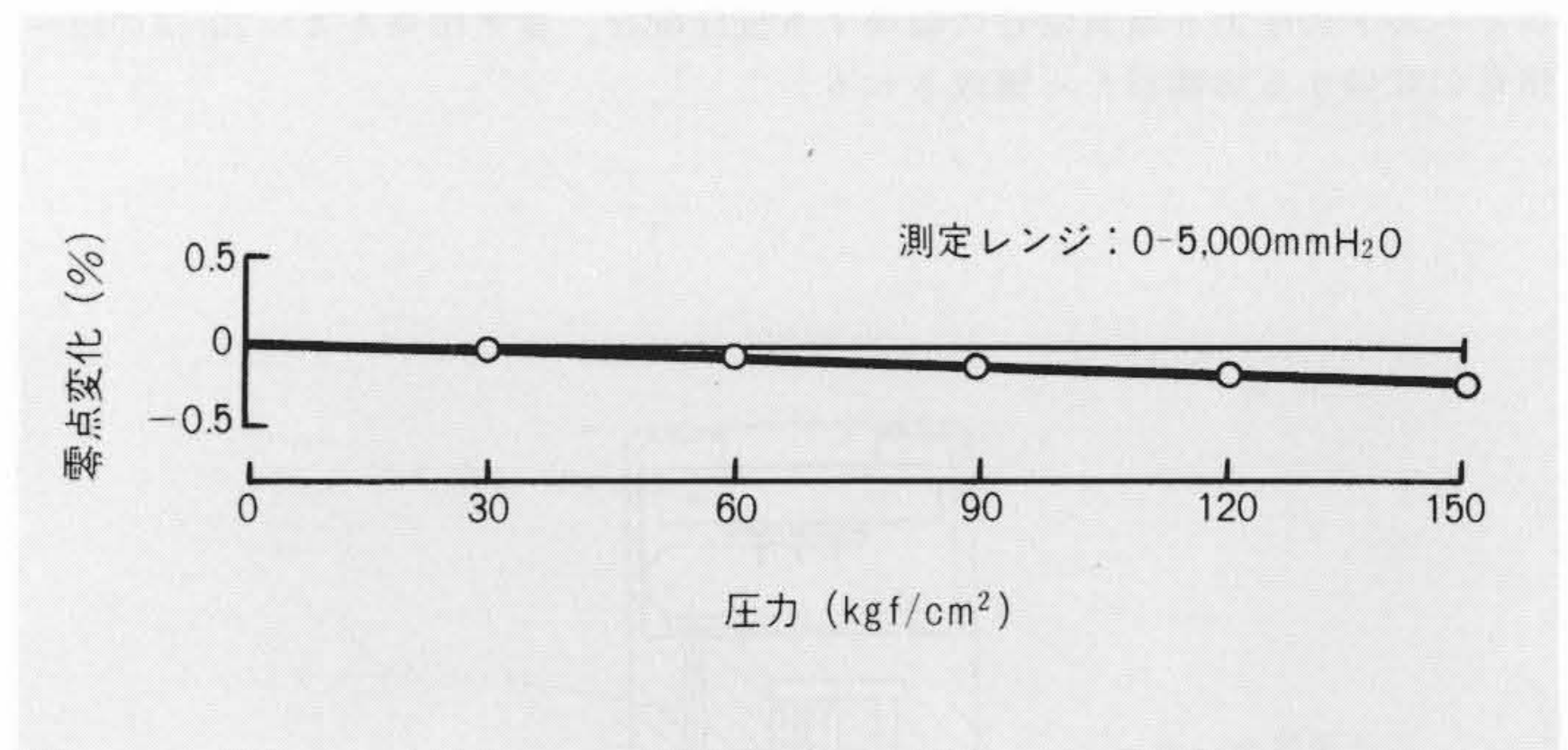


図9 EDR-71形差圧伝送器の静圧影響 受圧部の高圧側と低圧側に、同時に0—150kgf/cm²の静圧を加えたときの零点の変化は0.2%以下となる。

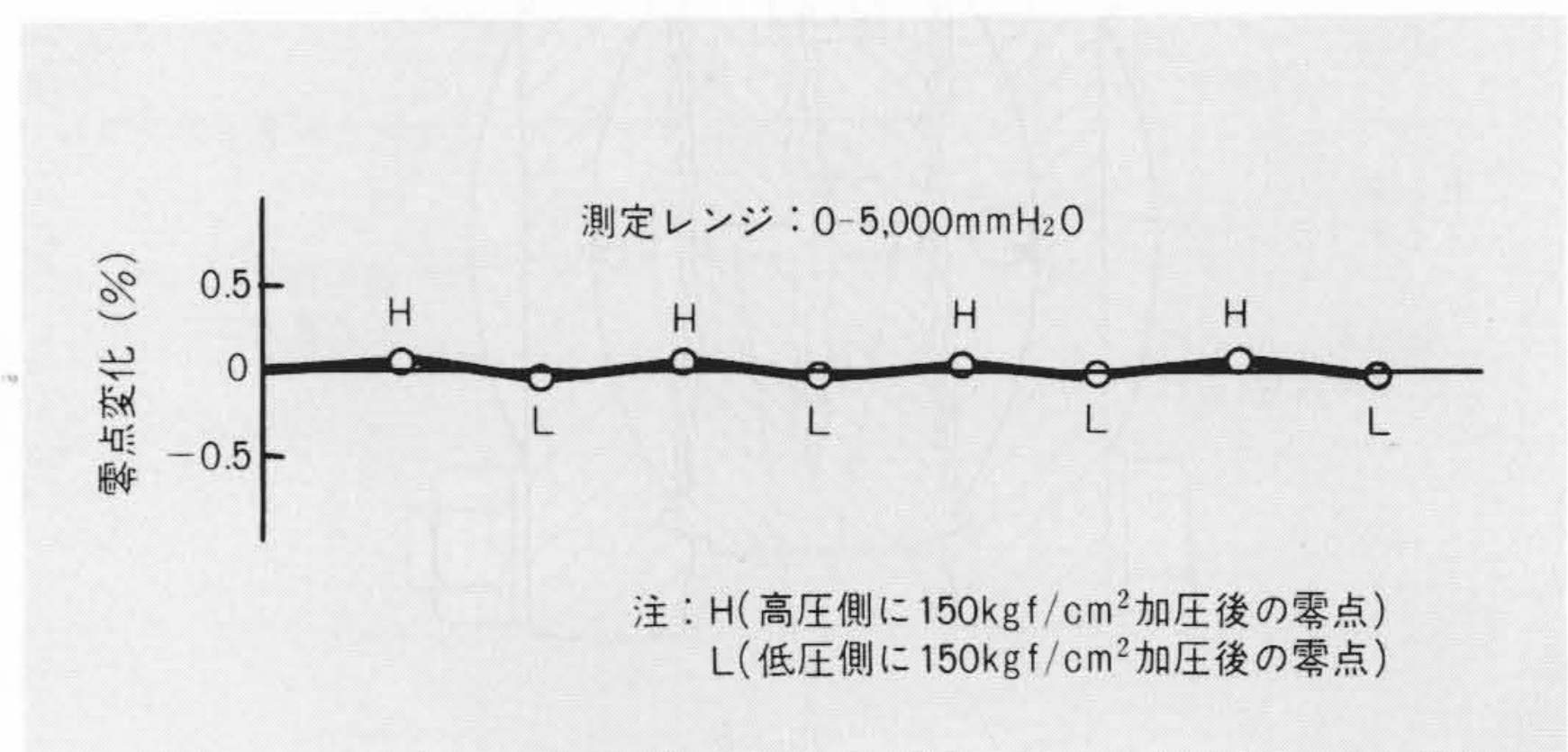


図10 EDR-71形差圧伝送器の片圧影響 高圧側と低圧側交互に150kgf/cm²の片圧を1分間印加した後の零点変化推移を示しており、0.05%以下で安定している。

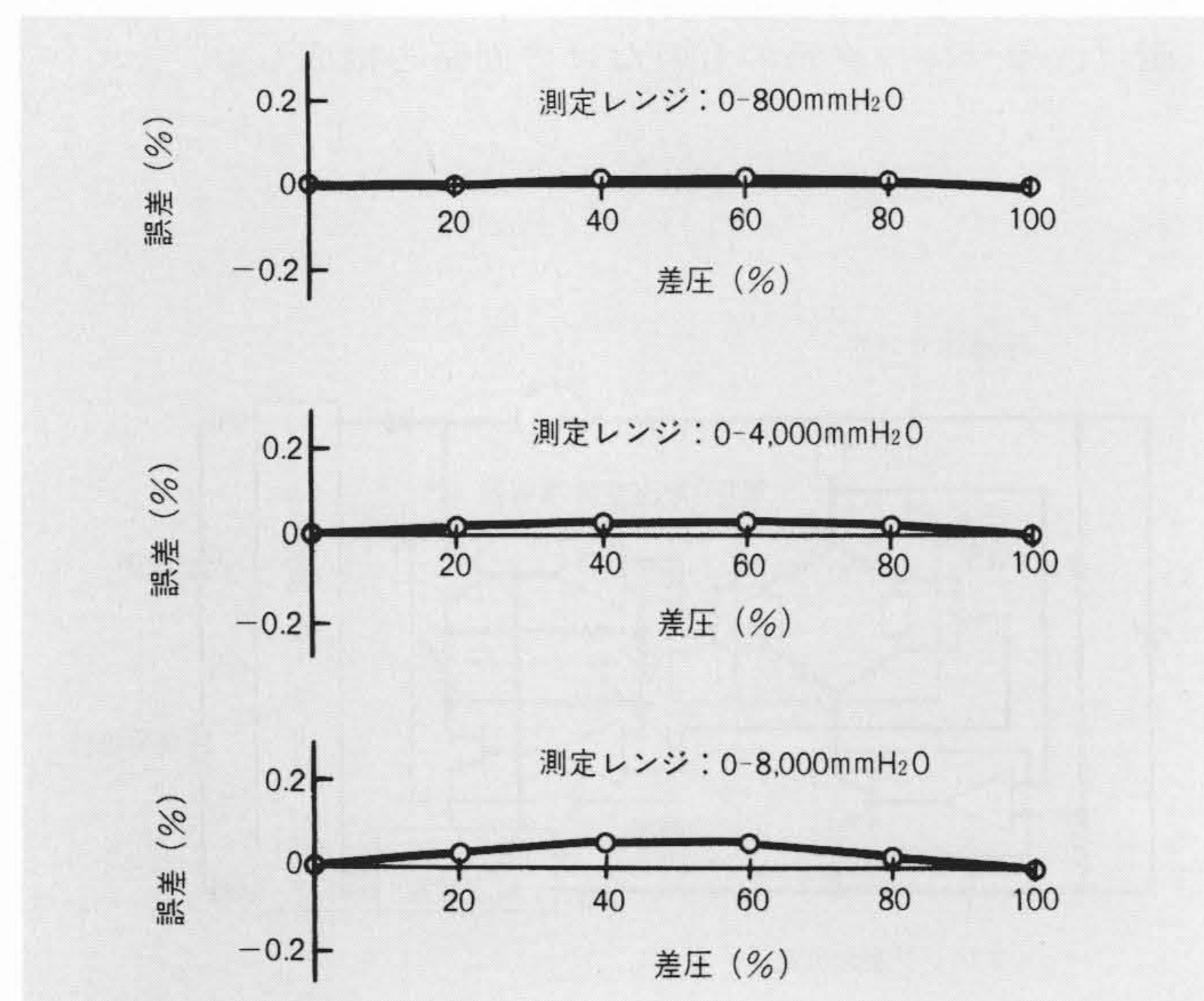


図7 EDR-71形差圧伝送器の入出力特性 0—800mmH₂Oから0—8,000mmH₂Oまで10倍にレンジ変更しても、各レンジで0.1%以下、ヒステリシス0.01%と精度0.2%を満足している。

かる場合など、異常状態が発生しても実用上問題のない小さな影響値と言える。

(4) 姿勢の影響

図11は本器をX軸を中心に傾斜させたときの零点の変化を示すものである。受圧部内の封入液のヘッド分が影響値となるため、測定レンジ0—5,000mmH₂Oでは5度変化で3mmH₂O相当の0.06%の零点変化、90度変化で40mmH₂O相当の0.8%の零点変化となる。スパンは変化しないので取付後零点を調整

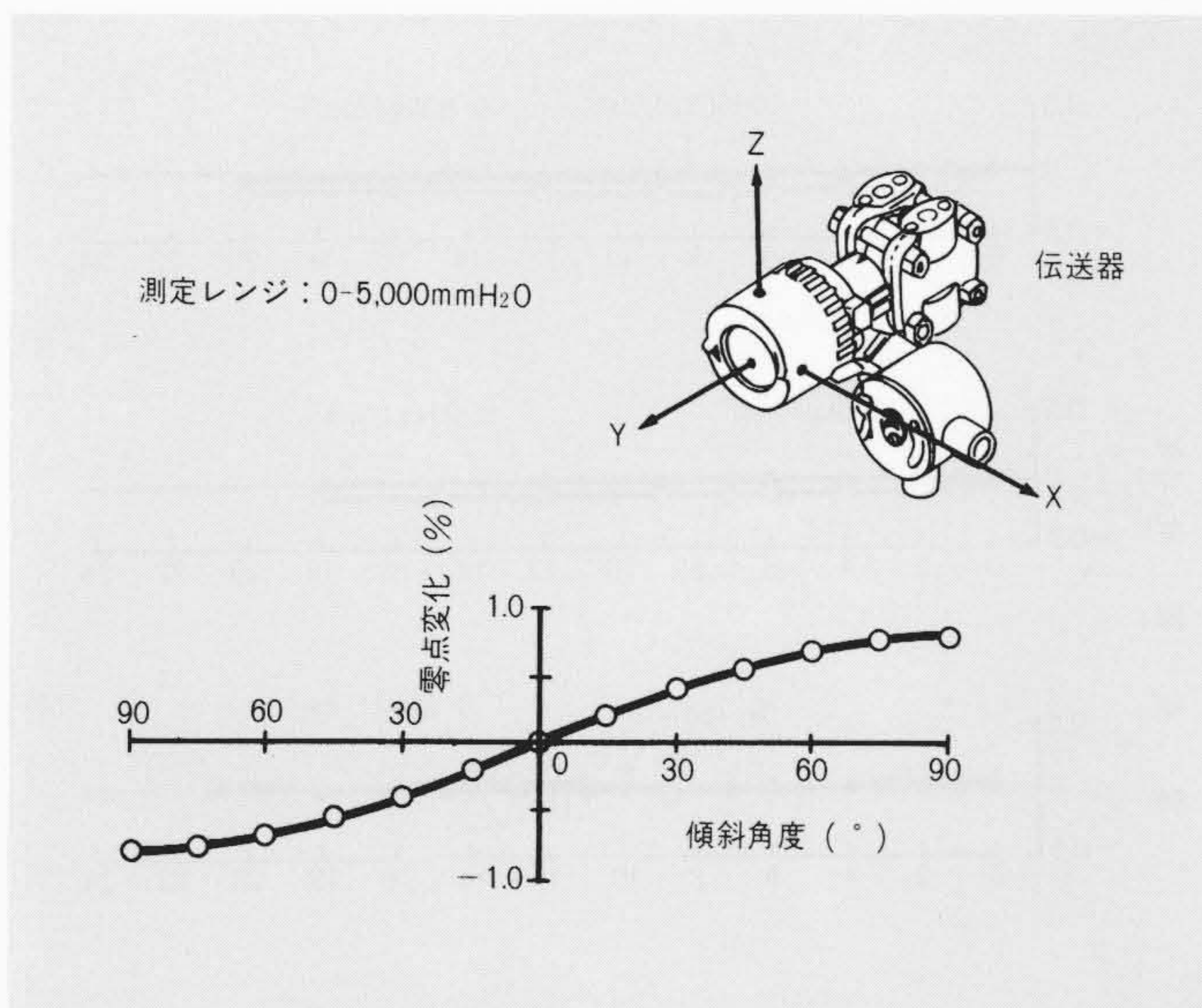


図11 EDR-71形差圧伝送器の姿勢影響 受圧部内の封入液のヘッド分が影響値となっている。

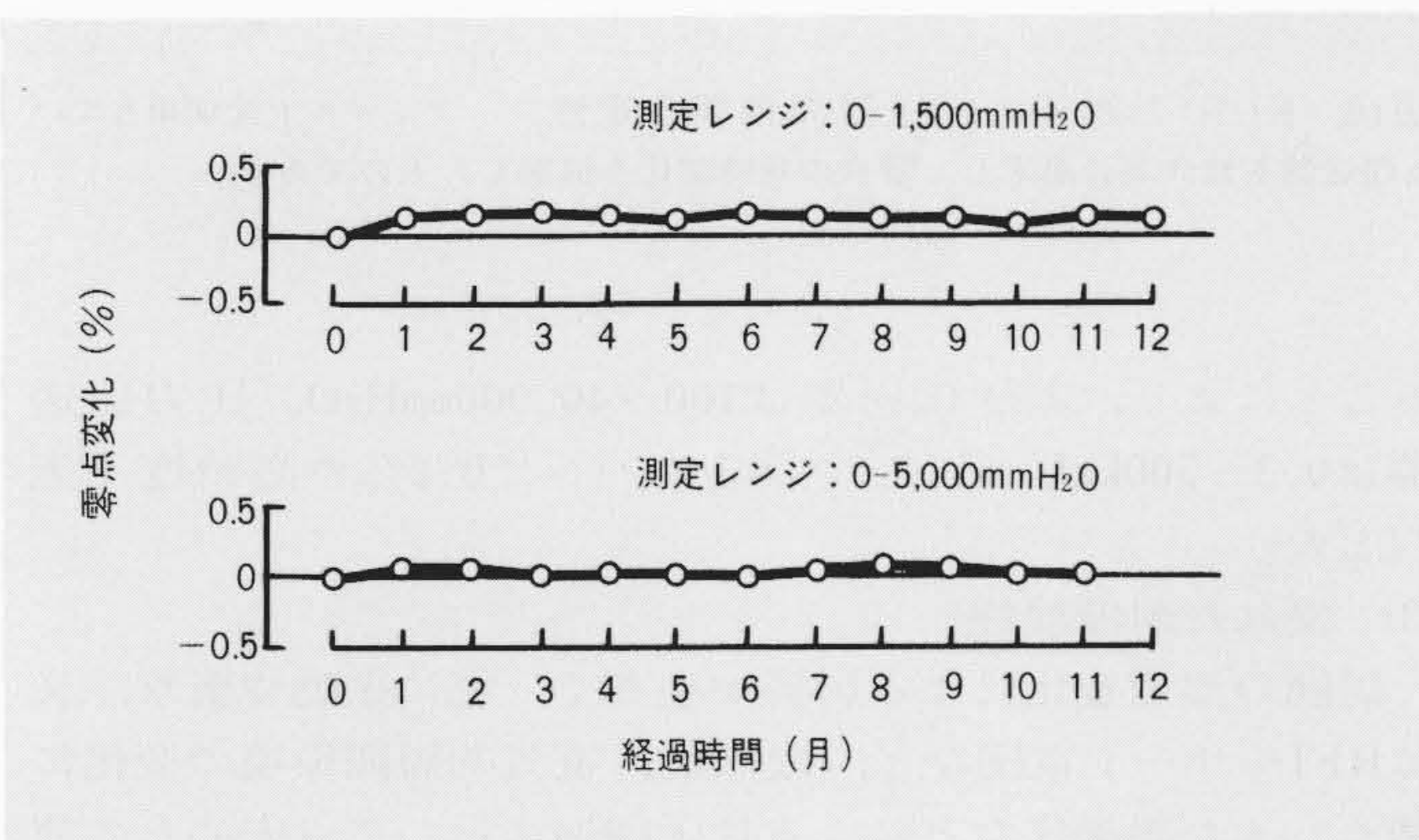


図12 EDR-71形差圧伝送器の長期安定性 既に長期間実績のある圧力伝送器と同じ半導体センサの採用により、優れた特性をもっている。

すれば問題なく作動する。なお、Y軸、Z軸を中心にした傾斜ではほとんど影響しない。

(5) 長期安定性

図12は測定レンジ0—1,500mmH₂Oと0—5,000mmH₂Oにそれぞれ調整した本器の零点の経時変化を示したものである。長期間実績のある圧力伝送器と基本的に同じ半導体センサを採用しており、差圧伝送器も長期間安定に動作していることを確認した。

(6) その他の影響

前後、左右及び上下方向に1,000rpm、2mmp-p、1時間(1Gに相当)の振動、及び落下試験による50Gの衝撃いずれを加えても、その前後の零点の変化は認められなかった。

負荷抵抗変化の影響をみるため電源電圧24V、250Ωの負荷抵抗を基準とし、600Ω又は0Ωとしても出力変化は0.1%以下であった。また、電源電圧影響は0.015%/V以下であった。

その他、27MHz 0.5W、150MHz 1W、400MHz 0.5Wのトランシーバを使いRFIを調べた結果、メータなしの場合には本器にアンテナを接触させても影響は認められず、またメータ付の場合でもメータの正面から300mm以上離せば出力の変化は現われなかった。

4 圧力伝送器

4.1 構造及び動作原理

表1に示すように、圧力伝送器は測定範囲0—0.3—0—500 kgf/cm²を5機種でカバーし、全測定範囲で精度0.2%を満足する。

図13に受圧部の断面構造図を示す。半導体センサは、差圧伝送器と異なり耐圧150%で最大750kgf/cm²にも達するため、半導体センサは中央に円形剛体の付いていないC形を使用している^{2),7),8)}。圧力はシールドダイヤフラムから封入液のシリコンオイルを介して半導体センサに伝わる構造であり、伝送器の特性は良好な特性をもつ半導体センサで決まる。信頼性については、半導体センサをシリコンオイル中に封入し全溶接構造である点、基本的に差圧伝送器と同様の思想で設計している⁹⁾。

4.2 特性及び影響値

温度特性、電気的特性などは差圧伝送器とはほぼ同じ特性をもつので省略し、ここでは圧力伝送器の入出力特性と安定性について述べる。

(1) 入出力特性

図14は基準レンジ25kgf/cm²の圧力伝送器の入力圧力に対する出力信号の直線性を表わしており、5倍のレンジ変更を行っても0.1%以内の特性を示す。また、ヒステリシスは0.01%以下と非常に小さく、半導体センサの再現性の良さを示している⁹⁾。

(2) 繰返し加圧の影響

図15は基準レンジ25kgf/cm²の圧力伝送器に圧力振幅0—25 kgf/cm²-pを0.5Hzで繰返し印加したときの零点変化を示す。半導体センサの材料が、シリコン単結晶のためクリープや疲労がなく、10⁷回の繰返し加圧に対しても零点は0.2%以下で安定していることが分かる。これは、半導体センサの機械的安定性を実証しているものと考えられる。

(3) 長期安定性

本器は既にフィールドで2年以上の使用実績をもっているが、図16は種々の測定レンジの7台を無作為に選定し、零点の経時変化を追跡し示したものである。季節による温度変動

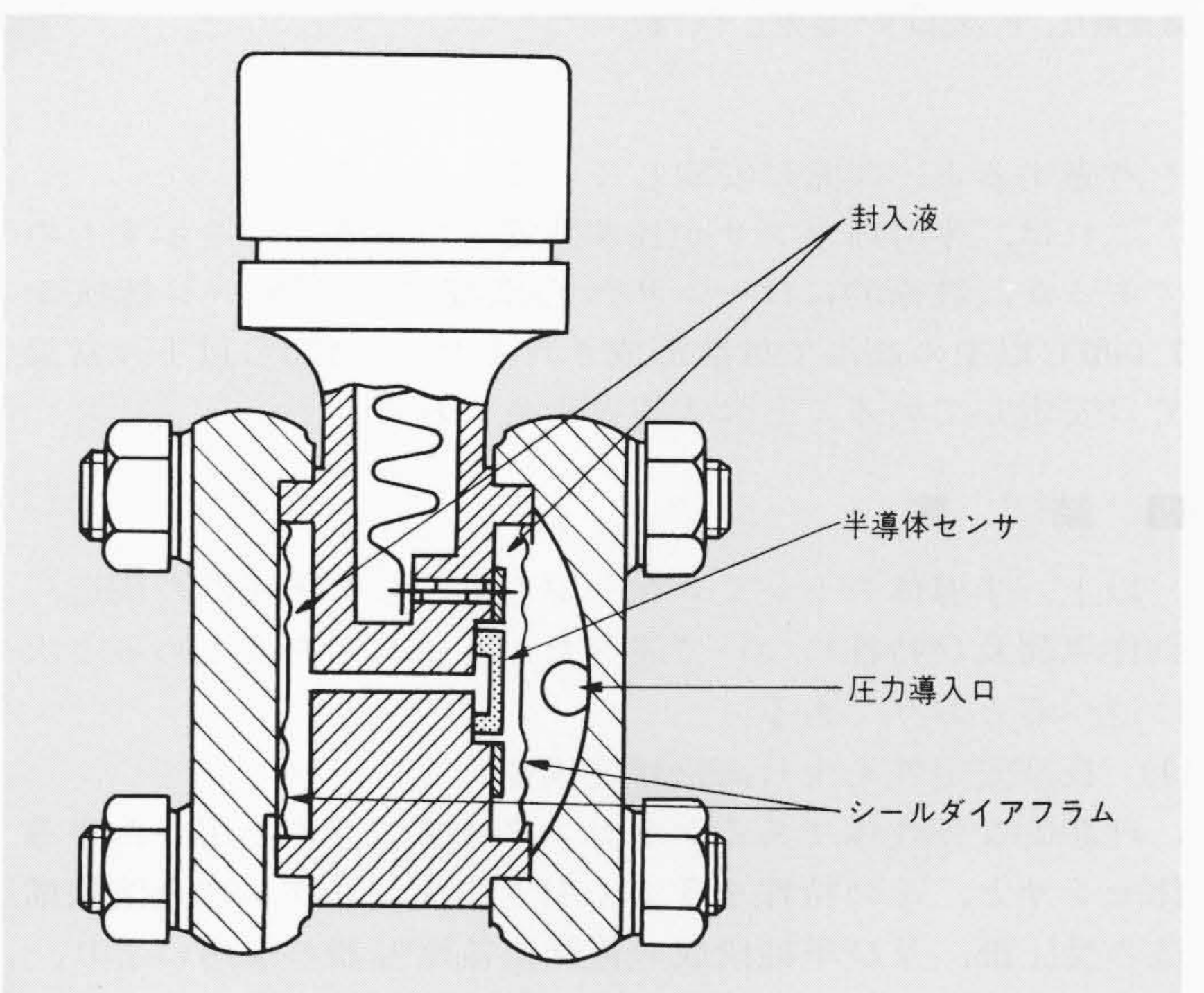


図13 EDR-71形圧力伝送器受圧部の構造断面 シールドダイヤフラム及び封入液は、圧力の伝達を行なうだけで、圧力伝送器の特性は半導体センサの特性に依存する。

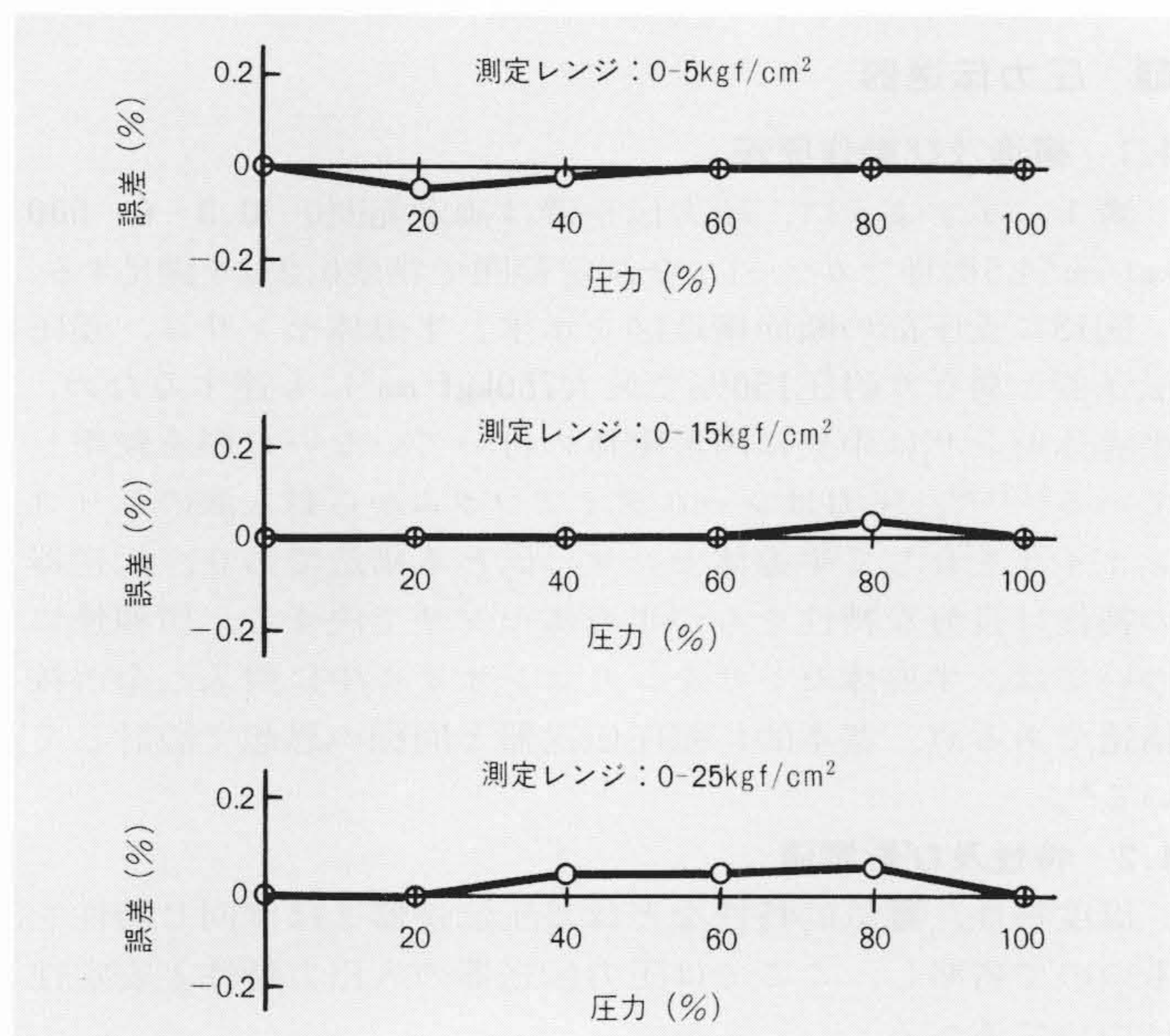


図14 EPR-71形圧力伝送器の入出力特性 0—5 kgf/cm²から0—25 kgf/cm²まで5倍にレンジ変更しても各レンジで0.1%以下、ヒステリシス0.01%と精度0.2%を満足している。

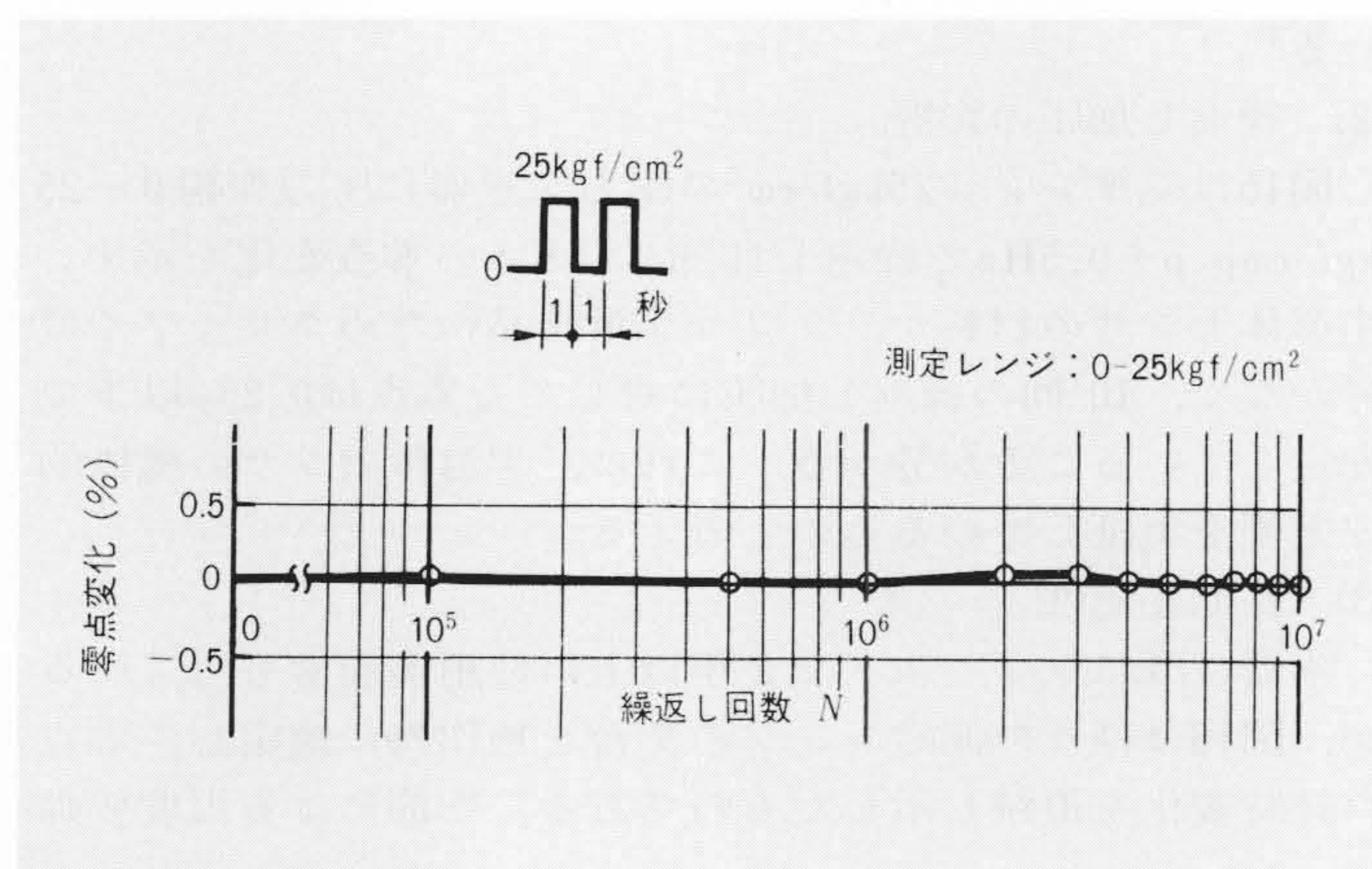


図15 EPR-71形圧力伝送器の繰返し加圧影響 基準レンジ25 kgf/cm²の伝送器を使い、0—25 kgf/cm²の圧力振幅で10⁷回繰返し加圧したときの零点変動は、0.2%以下で安定している。

を考慮すると、非常に安定していると言える。

これは、半導体センサが長期間安定であることを示すものであるが、技術的にはセンサの心臓部であるゲージ抵抗が1,000℃以上の高温で拡散形成されるため、120℃以下の常温では安定していることによると考えられる。

5 結 言

以上、半導体ストレインゲージを応用した伝送器の構造、動作原理及び特性について述べたが、これらをまとめると次に述べるとおりである。

(1) 長期安定性を生む高信頼度構造

理想的な弾性体であるシリコンダイアフラムを用いた半導体センサと、その特性をうまく引き出すシンプルで全溶接構造の受圧部、及び単純構成の直結直流増幅器の採用により、長期間安定に動作する伝送器を実現した。

(2) 0.2%の高精度を発揮

E形とC形それぞれ目的に適合した半導体センサを開発す

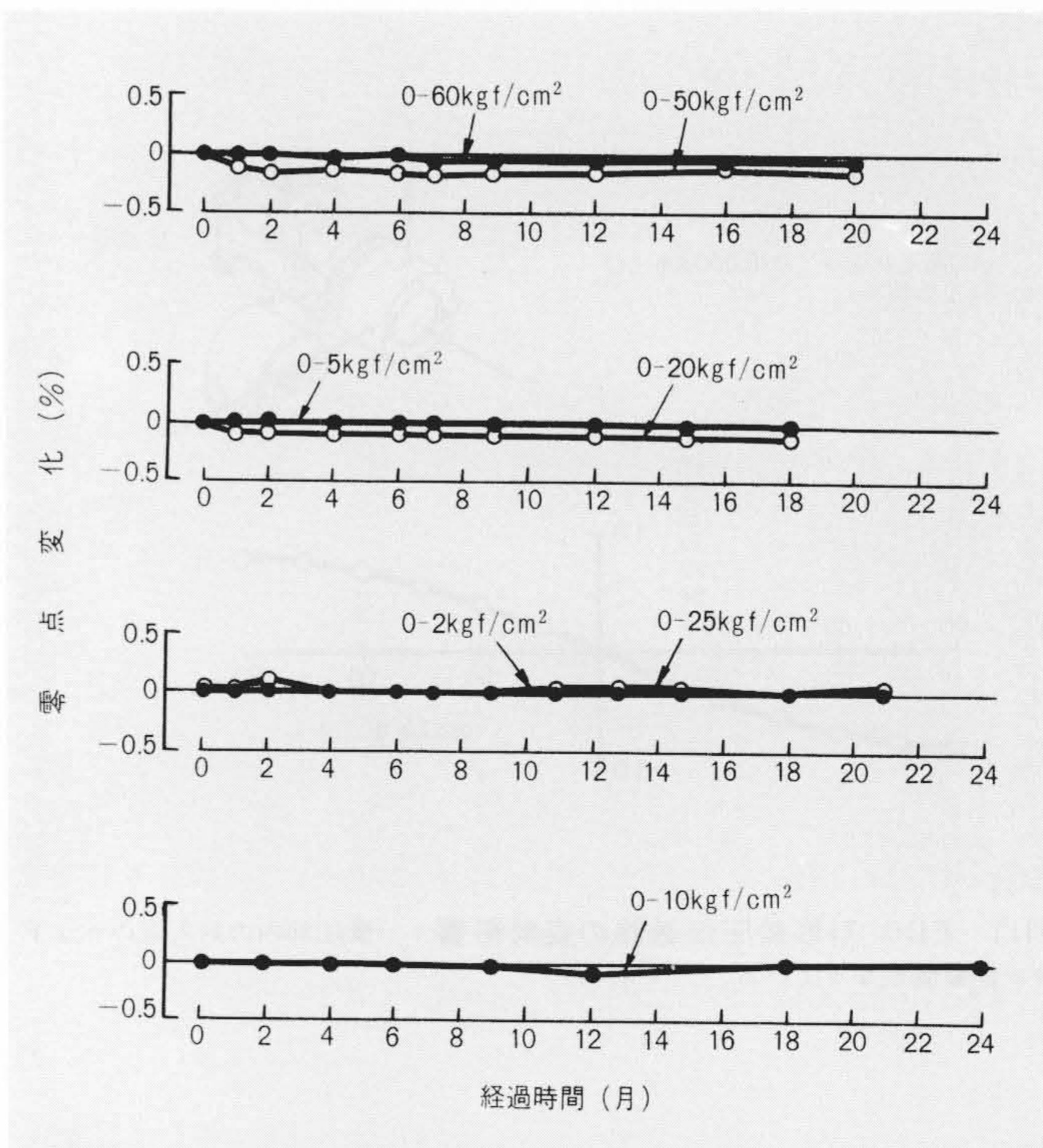


図16 EPR-71形圧力伝送器の長期安定性 フィールドで使用している伝送器を無作為に選定し、零点の経時変化を追跡したものである。

ることにより、差圧伝送器は100～40,000mmH₂O、圧力伝送器は0.3～500kgf/cm²と広い測定スパンで0.2%の高精度を実現した。

(3) 優れた耐環境性

周囲の温度変化による影響が小さく、更に振動や衝撃、又はRFIやサージ電圧など、機械的、電氣的周囲環境の変化に強く、また誤操作などによる片圧印加に対しても安心して使用できる伝送器を実現した。

なお、日立製作所は自社工場に半導体製造設備を設置し、半導体センサの製造から伝送器の検査、出荷まで一貫した品質管理のもとに生産しており、顧客の多様な要求にこたえる体制をとっている。

最後に、この伝送器の開発に当たって種々御協力、御指導をいただいた関係各位に対し、厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 近藤，外：第6回自動制御連合講演会前刷，141～142 (昭38-10)
- 2) 西原，外：最近の半導体圧力センサ，日立評論，63, 91～94 (昭56-2)
- 3) 保川，外：第18回SICE学術講演会予稿集，359～360 (昭54-8)
- 4) 有馬，外：第17回SICE学術講演会予稿集，145～146 (昭53-8)
- 5) 松岡，外：第23回自動制御連合講演会前刷，429～430 (昭55-11)
- 6) 岡山，外：第17回SICE学術講演会予稿集，433～434 (昭53-8)
- 7) 嶋田，外：第17回SICE学術講演会予稿集，223～224 (昭53-8)
- 8) 田辺，外：第18回SICE学術講演会予稿集，361～362 (昭54-8)
- 9) 山本，外：第17回SICE学術講演会予稿集，227～228 (昭53-8)