

ストレインゲージを使用した EDR-2 形 電子式 差 圧 伝 送 器

Type EDR-2 Electronic Differential Pressure Transmitter using a Strain Gauge

近 藤 秀 雄* 藍 光 郎*
Hideo Kondô Mitsuo Ai
高 橋 利 男* 木 下 敏 雄*
Toshio Takahashi Toshio Kinoshita

内 容 梗 概

ストレインゲージを変位電氣量変換要素として採用した電子式差圧伝送器の原理、構造、特性および特長について記し、あわせて従来電子式伝送器で一般に採られてきた準力平衡方式の場合と比較し直線性、耐環境性などについてすぐれた性能を示すことを記した。

1. 緒 言

全電子式計器は、大規模な計装、徹底した集中管理、データ処理装置との接続にきわめて適しているため、石油化学工業などに空気式計器に代わってますます多く採用されるようになってきた。

これらの計器のうち、差圧、圧力、液面などの伝送器は一般に、空気式計器で開発され実績のある受圧部を使用して、空気系を電気系に置き換え、準力平衡方式を採っている。すなわちノズル・フラップ系を差動トランスや発振コイルに、パイロットバルブをトランジスタ増幅器に、復元ベローズをフォースモータにするなどである。

しかし、この方式では、フォースモータで得られる負帰還のための力が、復元ベローズの場合と比較して、1~2けた弱く、また負帰還系に固有振動数の低い機構部が接続されることから、採り得るループゲインに限度があって、空気式伝送器で実現している完全な平衡方式にくらべ外乱に対する安定性に劣っていた。

ここで空気式伝送器の原理、構造から脱却し、電子式伝送器としての特長をさらに一歩進めるため、新たにストレインゲージを変位電氣量変換要素として採用し、差圧などの工業量を、リンク機構を介さず、直接測定点で電氣量に変換することを試みた。

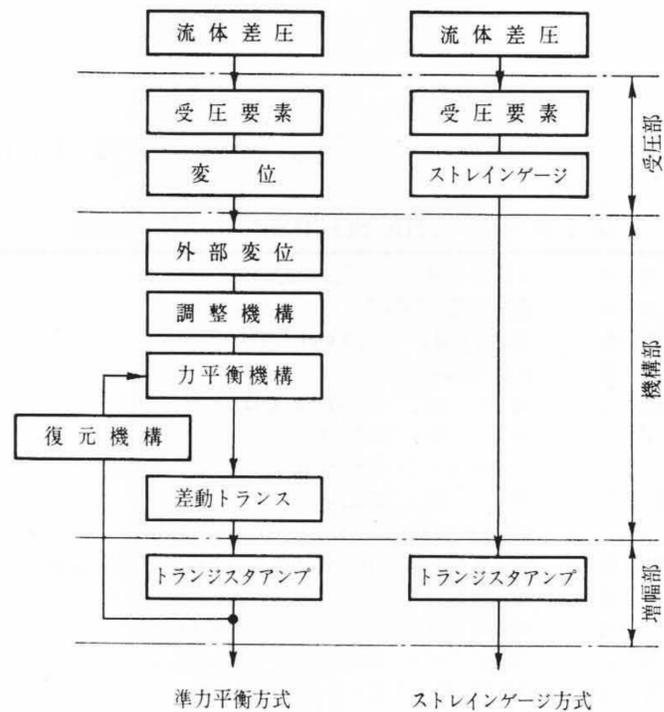
第1図は準力平衡方式とストレインゲージ方式の構成の比較である。ストレインゲージ方式では振動系を作るレバーやリンク機構を除き、可動部分を受圧部内にかぎって、可動シール部を不要とし、調整、演算などは電氣的に回路で操作できる構成とした。したがって部品数が著しく減少し、伝送器として耐環境性を向上できたばかりでなく、信頼性、安定性など十分空気式伝送器を凌駕することができた。

以下 EDR-2 形電子式差圧伝送器について、原理、構造、特性および特長について詳述する。

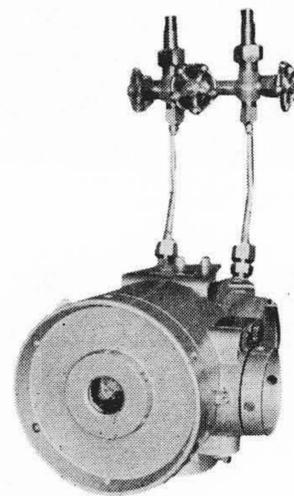
2. EDR-2 形電子式差圧伝送器の概要

第2図は、本計器の外観図である。本計器は各種工業プラントで流量、圧力および液面の計測に使用されるが、第3図は特に使用例の多い流量計測の場合の制御系を示したものである。流量、圧力および液面などの工業量を検出して、これらを統一された日立ユニトリール（電子式制御装置）の伝送信号（D.C 0~16 mA）に変換し、PID 調節器や記録計などの受信計器に伝送する。このため本計器はプラントの各所に設置される場合が多く、特に防爆構造は、JIS C 0903 d2G4 を、また防水構造は JIS F 8001 散水第3種の規格を満足するようになっている。

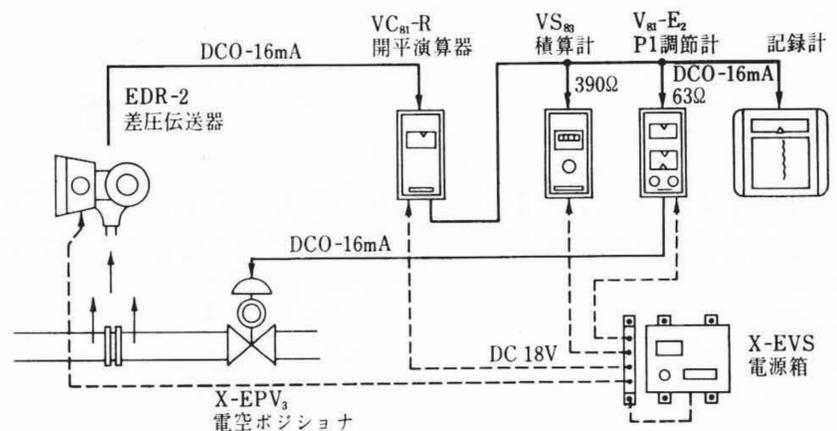
* 日立製作所那珂工場



第1図 準力平衡方式とストレインゲージ方式との比較



第2図 EDR-2 形 差 圧 伝 送 器



第3図 流量制御系の一例

本計器の構成は第1, 2図に示したように、受圧部と増幅部とからなる。受圧部では差圧を検出してストレインゲージのブリッジによりこの差圧に対応する電圧に変換し、増幅器ではこの電圧を増幅して伝送信号とするとともにゼロ・サプレッション、逆出力などの演算、レンジの変更および零点の調整を行なうことができる。

3. 構造および動作原理

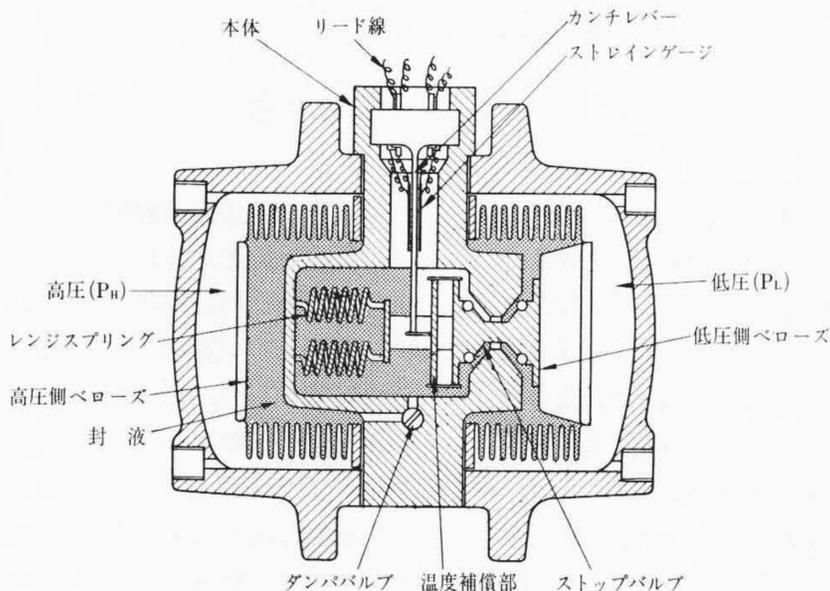
3.1 受圧部

第4図に受圧部の構造を示す。本体をはさんで高圧側ベローズ、低圧側ベローズが固定され、これらのベローズ系内は封液で置換されている。低圧側ベローズは過負荷、逆圧による破損防止のためのストップバルブ、封液膨張など周囲温度変化による誤差を除くためのバイメタルからなる温度補償部、ストレインゲージカンチレバーに差圧に対応する変位を与えるためのカンチレバー接続部および恒弾性レンジスプリングを介して本体と接続している。また高圧側ベローズは、ダンパーバルブを介して封液により低圧側ベローズと接続してある。はり付け型ストレインゲージを両側面にブリッジを形成するようにはり付けたカンチレバーは本体に固定され、先端は低圧側ベローズとカンチレバー接続部で接続してあり、このブリッジのリード線は、超絶縁性のある耐圧端子により静的に外部に導びかれる。

測定する差圧は、高低圧側ベローズの両側から導入される。差圧の増加に従って、高圧側ベローズは圧縮され、封液はダンパーバルブおよびストップバルブの周縁を通過して低圧側ベローズに移動する。低圧側ベローズ内の封液の増加に従って、低圧側ベローズは高低圧側ベローズ、レンジスプリングおよびストレインゲージカンチレバーのバネ常数と平衡する位置まで変位する。この変位はカンチレバーの表面ひずみに変換され、ブリッジに組み込まれたストレインゲージで不平衡電圧として検出される。

この関係を示すブロック線図は、個々の構成要素間で成立する関係式から第5図のように導びかれ、さらにこのブロック線図から変位 δ に関して(1)式が求められる。また第6, 7図に示すストレインゲージカンチレバーで、先端の変位 δ と不平衡電圧 E_0 との関係は(2)式で求められる⁽¹⁾。(1)および(2)式から差圧 ($P_H - P_L$) と不平衡電圧 E_0 との関係は(3)式として得られ、明らかに比例関係が成立する。

$$\delta = \left[1/S_{VL} \left\{ \frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L + K_R + K_t}{S_{EL}S_{VL}} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_t}{K_M} \left(\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L + K_R}{S_{EL}S_{VL}} \right) \right\} \right] (P_H - P_L) \\ = K(P_H - P_L) \dots \dots \dots (1)$$



第4図 ECR-2 形差圧伝送器の受圧部構造

$$E_0 = \frac{2lt}{2l_0^3} G_f \cdot E_s \cdot \delta \\ = K' \delta \dots \dots \dots (2) \\ = KK'(P_H - P_L) \dots \dots \dots (3)$$

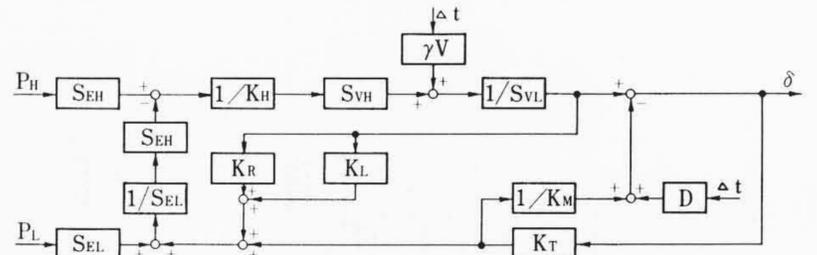
ここに記号は、第5図による。また

G_f : ゲージファクタでストレインゲージ線材によって定まる定数

E_s : ストレインゲージのブリッジを励起する電圧

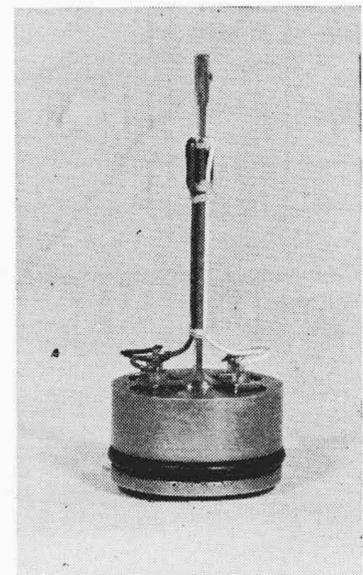
K, K' : それぞれ(1)(2)式に示す係数

すなわち(1)および(2)式の右辺に表われる各係数は、ベローズ、レンジスプリング、カンチレバーの形状およびストレインゲージ

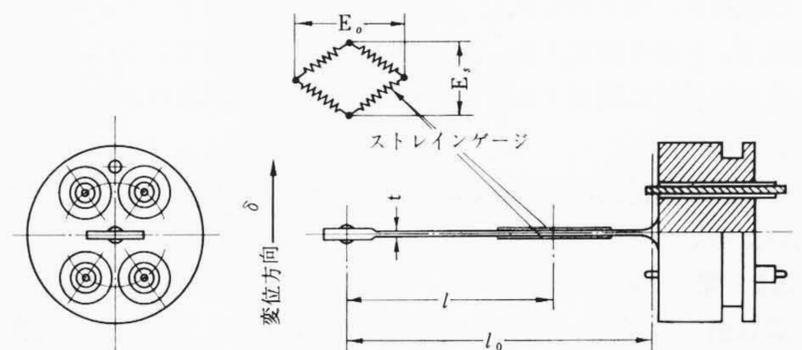


- P_H : 高圧側圧力 (kg/cm²)
- P_L : 低圧側圧力 (kg/cm²)
- S_{VH} : 高圧側ベローズ体積有効面積 (cm²)
- S_{VL} : 低圧側ベローズ体積有効面積 (cm²)
- S_{EH} : 高圧側ベローズ圧力有効面積 (cm²)
- S_{EL} : 低圧側ベローズ圧力有効面積 (cm²)
- K_H : 高圧側ベローズバネ常数 (kg/cm)
- K_L : 低圧側ベローズバネ常数 (kg/cm)
- K_R : レンジスプリング常数 (kg/cm)
- K_T : カンチレバー常数 (kg/cm)
- K_M : バイメタル温度補償部常数 (kg/cm)
- γ : 封液の膨張係数 (deg⁻¹)
- V : 封液の総体積 (cm³)
- D : バイメタル温度補償部の単位温度当たりの変位量 (cm/deg)
- δ : ストレインゲージカンチレバー先端の変位 (cm)

第5図 受圧部のブロック線図

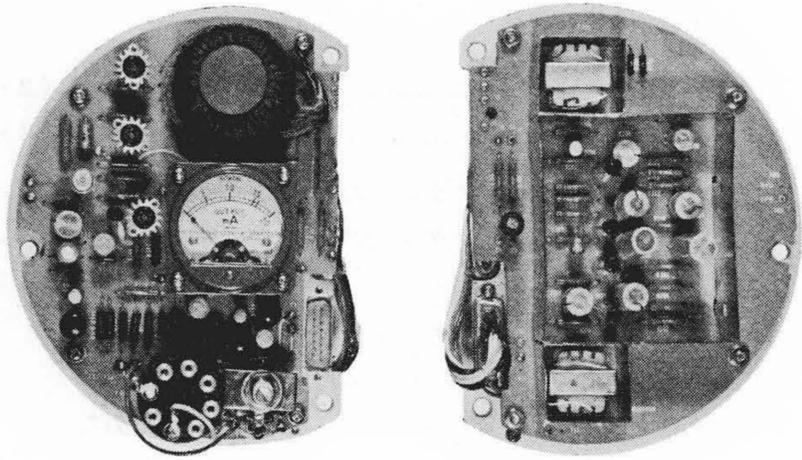


第6図 ストレインゲージカンチレバーの外観

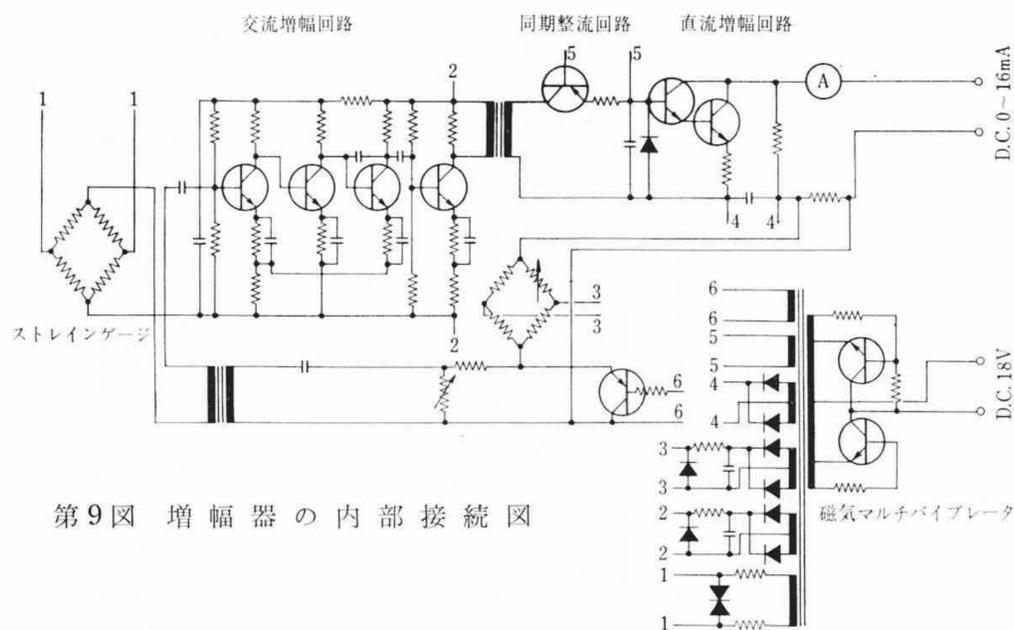


- l_0 : カンチレバーの等価全長 (cm)
- l : 接点よりストレインゲージ中心までの距離 (cm)
- t : カンチレバーの肉厚 (cm)
- E_s : 励起電圧 (V)
- E_0 : 出力不平衡電圧 (V)
- δ : 応答変位 (cm)

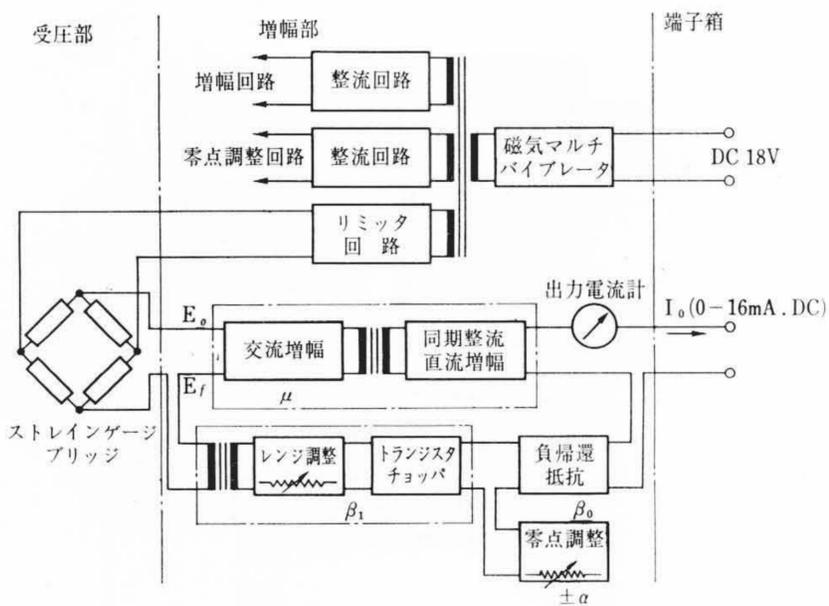
第7図 ストレインゲージカンチレバーの構造



第8図 増幅器



第9図 増幅器の内部接続図



第10図 増幅器のブロック線図

ジの線材から定まる定数で、個々に測定可能な量である。これらの定数はいわゆる組立工程、調整工程では不変の量であり、これらの工程では特性に関係する要因が加わらず工程上再現性があることを示している。

これより本計器の受圧部は、均一性再現性を本質的に備えているといえる。

3.2 増幅部⁽²⁾

第8図に増幅部の外観を、第9図に接続図を、第10図に動作を説明するためのブロック線図を示す。この増幅器は、X-EVS電源箱より安定化したDC 18V(約200mA)が供給されて動作する。

直流電源が採用されたのは

- (1) 電池をフローティングさせて停電対策がとれること
- (2) 試運転時などの異状な電圧上昇に対してトランジスタを保護すること

- (3) 商用電源の電圧変動による誤差や誘導電圧による誤差を除くこと
 - (4) 本計器の内部の温度上昇を避けること
- などのためである。

供給されたDC 18Vは磁気マルチバイブレータによって、約1kc/sの方形波に変換され、それぞれ

- (1) ダブルアノードダイオードによる安定化回路を経てストレインゲージブリッジの励起電圧に
- (2) トランジスタチョッパの励振に
- (3) 整流回路を経て、増幅回路に
- (4) 同期整流回路の同期電圧に加えられる。

ここで1kc/sの方形波を使用することにより、著しく回路部品を小形化し、かつシリコントランジスタやタンタルコンデンサの採用とあわせて、増幅部を広い温度範囲にわたって安定化している。

入力差圧($P_H - P_L$)に対応するストレインゲージブリッジの不均衡方形波電圧 E_0 は、交流増幅回路、同期整流回路、直流増幅回路によって伝送信号(0~16mA DC)に変換される。また負帰還系は出力回路に直列に接続した抵抗器の電圧降下をトランジスタチョッパで方形波とし、出力トランスを介して入力点に加える。この電圧帰還は高いループゲインによって増幅部の動作を安定化するとともに出力インピーダンスを高めて負荷変動の影響を除いている。

ここで同期整流回路および負帰還回路に接続した入出力トランスによって出力伝送回路は、ストレインゲージブリッジおよび交流増幅回路と直流的に絶縁され、伝送信号を任意の個所で接地できる構成としてある。

またこの負帰還系では、電圧加算回路を接続して、零点調整、ゼロ・サプレッションを、また電圧分割回路を接続して、スパン調整をおのおの独立に行なっている。すなわち第10図で(4)式が成立し(5)式の条件を満足することから(6)式が導かれ、レンジ調整と零点調整は相互に干渉しない調整できる。

$$\mu(E_0 - E_f) = \mu\{E_0 - \beta_1(\beta_0 I_0 \pm \alpha)\} = I_0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu\beta_0\beta_1 \gg 1 \dots\dots\dots (5)$$

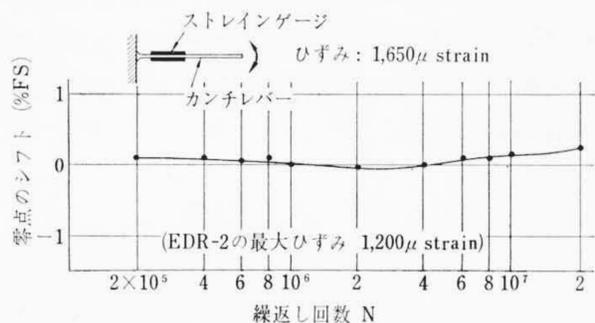
$$I_0 = \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{E_0}{\beta_1} \mp \alpha \right) \dots\dots\dots (6)$$

- ここに、
- μ : 前向き増幅器の総合利得
 - β_0 : 出力回路の固定抵抗による電圧変換利得(一定)
 - β_1 : スパン調整のための可変抵抗による調整利得
 - α : 零点調整のための可変印加電圧

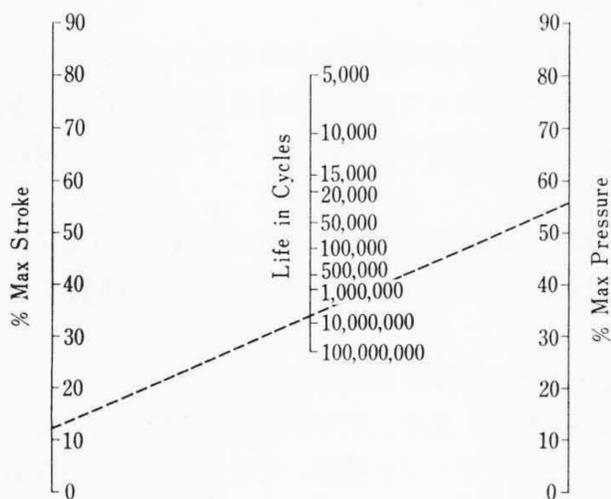
4. おもな特性と影響値

4.1 ストレインゲージの特性

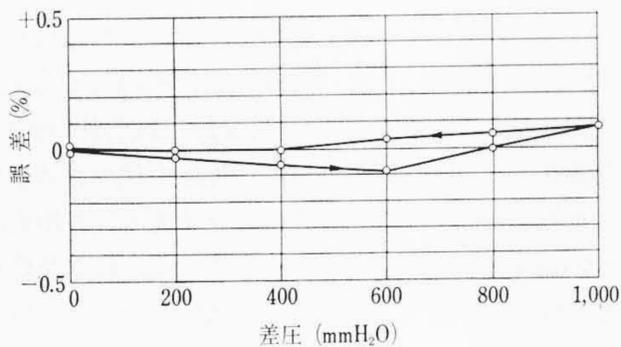
第11図はストレインゲージカンチレバーの加速試験の結果である。第12図に示すR社のペローズの寿命試験と比較して、より長期間にわたり安定な特性を示している。これらの結果は、確実な接着工程と、完全な防湿処理に加えて均質なゲージ線材を使用し、これらの工程の管理が厳密に行なわれているためで、応力測定分野でしばしば問題となってきたストレインゲージのクリープの影響や零点の不安定性は除かれ、現在の構造で非直線性は全目盛の0.1%以下である。一般の差動トランスや発振回路などの方式が原理的に非直線性を示すのと比較してすぐれた直線性を持っている。このため直線性補正の必要がなく、本計器のように受圧部と増幅部とを接



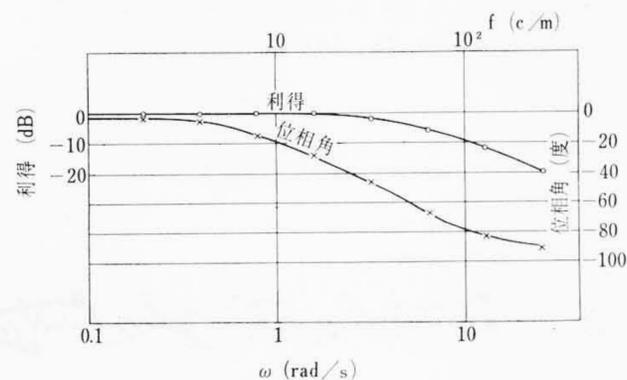
第11図 ストレインゲージカンチレバーの寿命試験 (at 20°C)



第12図 ベローズの寿命線図 (R社)



第13図 EDR-2 形差圧伝送器静特性の一例



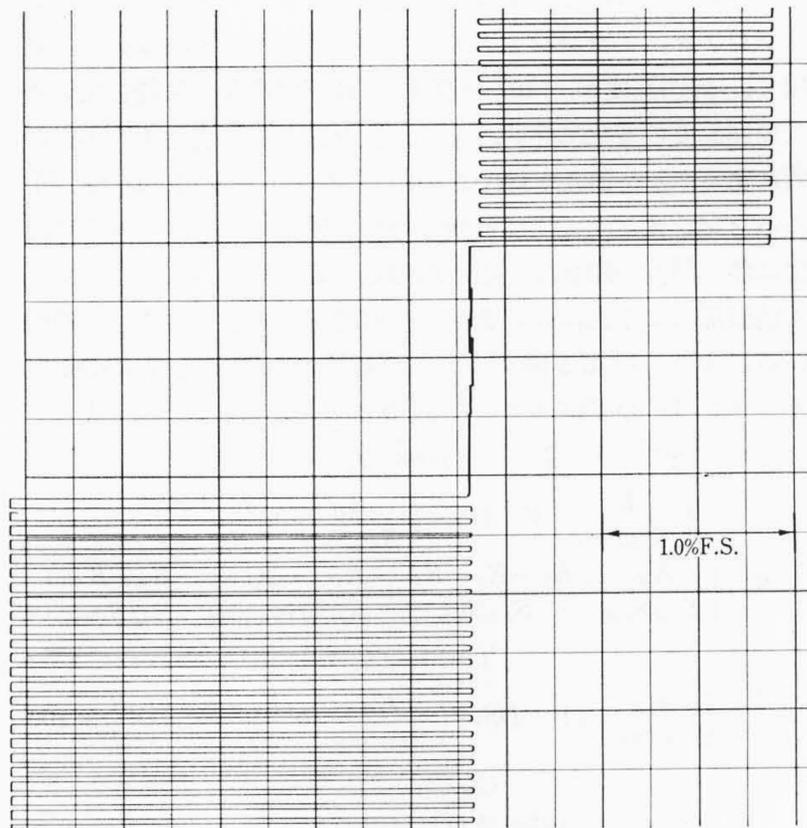
第14図 EDR-2 形差圧伝送器周波数応答特性

続する変位平衡方式を可能としている。

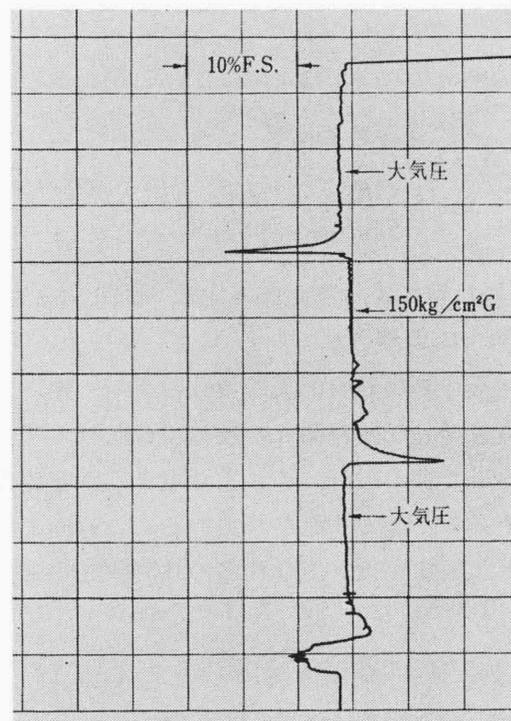
4.2 静特性および動特性

第13図は本計器の静特性の測定例であり、これより十分全目盛の0.5%の精度であることがわかり、前述のブロック線図で、特性は個々の部品の特性から定まり、組立調整工程から静特性に影響する要因がはらないことを示している。

第14図は本計器の周波数応答特性の測定例である。256 c/mまで応答波形のひずみや応答波形の中心位値の変化はなく、上昇、下降の過渡特性もまったく対称と認められる。これは可動部分が受圧部内のベローズ系に限られた一次系であって、準力平衡方式のようにいくつかのリンク機構からなる高次の振動系と摩擦部分とな



ΔP=20 kg/cm²G 繰返し1,500回
第15図 EDR-2 形差圧伝送器正逆過負荷試験チャート



第16図 EDR-2 形差圧伝送器静圧試験

く、時定数はダンパーバルブの開度に対応する液体抵抗にのみ支配されるためである。

4.3 影響値

差圧伝送器は一般に検出すべき差圧と比較してきわめて大きい圧力の下で使用される。すなわち 50 kg/cm²G の管内圧の流量を 500 mm H₂O の差圧でフルスケールとして測定する場合には、運転の際フルスケールの 1,000 倍の過負荷または逆圧が加えられる場合もあり得る。このような過大な圧力に対する保護のため第4図に示したようなストップバルブを設け、封液の非圧縮性を利用してベローズ、レンジスプリングおよび、カンチレバーの特性を維持している。第15図はこのような一方からの高圧が繰返し加えられた場合の零点の安定性を示す記録であり、第16図はこのような高圧が高低圧両側に同時に加えられたときの零点の安定性を示す記録である。

本計器はプラントの各所に設置されて屋外で使用される場合が多く、特に広い温度範囲にわたって安定に動作し精度を維持すること

を要求される。このため増幅部にはソリッドステート化シリコントランジスタ、トランジスタチョップおよびタンタルコンデンサを採用し、周囲温度が $-10\sim+60^{\circ}\text{C}$ の範囲で精度を保証している。また周囲温度の変化に伴い、金属材料の弾性率が変化するが、この影響によるスパン誤差を除くために、系のバネ常数の90%以上を占めるレンジスプリングに恒弾性材料を使用している。さらに温度変化に伴う封液の膨張、収縮から零点が変化しないように、バイメタル補償部により常にカンチレバーの先端を一定位置にして補償している。すなわち第5図のブロック線図から温度変化 Δt degによるカンチレバーの変位 δ_i が(7)式のように求められ、(1)式と(7)式から全目盛に対する誤差 ε_L が(8)式のように求められる。

$$S_L = \frac{\left\{ \frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} \gamma V - DS_{VL} \left(\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L+K_R}{S_{EL}S_{VL}} \right) \right\}}{S_{VL} \left\{ \frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L+K_R+K_T}{S_{EL}S_{VL}} + \frac{K_T}{K_M} \left(\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L+K_R}{S_{EL}S_{VL}} \right) \right\}} \Delta t \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon_L = \left\{ \frac{K_H}{S_{EH}S_{EL}} \gamma V - DS_{VL} \left(\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L+K_R}{S_{EL}S_{VL}} \right) \right\} \frac{\Delta t}{\Delta P} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここでバイメタルの弯曲量 D が封液の膨張による誤差 ε_L の補償と同時に、系全体としての金属膨張による零点移動の誤差 ε_M およびストレインゲージカンチレバーよりの温度影響値 ε_G を補償するものとして(9)式の条件から、バイメタルの弯曲量 D は(10)式のように定められる。

$$\varepsilon_L + \varepsilon_M + \varepsilon_G = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$D = \frac{\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} \gamma V + \frac{\Delta P}{10^2 \Delta t} (\varepsilon_M + \varepsilon_G)}{S_{VL} \left(\frac{K_H}{S_{EH}S_{VH}} + \frac{K_L+K_R}{S_{EL}S_{VL}} \right)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで ε_M は金属材料によって定まる定数であり、また ε_G は0.2%/30 deg以下に個々に調整されてある。さらにベローズ、バイメタル、レンジスプリングなどの部品の特性の不均一性から生ずる誤差は、(7)式を K_H, K_L などの個々の変数で偏微分して得られる式と(1)式とを比較して求められ、これより定まる許容誤差を仕様とする部品を選定することにより除かれている。これにより温度変化による特性の変化は基準レンジで全目盛の0.5%/30 deg以下に制限できる。

振動、衝撃などの機械的外力に対しては、固有振動数が準力平衡方式の約25~45 c/sに比較し285~350 c/sと高く、このため強制振動による相対振幅が無視できて、1 G, 16 c/sの振動状態でも出力信号に影響は認められない。

5. 結 言

以上ストレインゲージを使用したEDR-2形電子式差圧伝送器について述べた。ここで従来の電子式伝送器で一般に採用されている準力平衡方式と比較して、

- (1) 可動部分が全く圧力容器内に限られるため、耐環境性を高めるとともに可動シールの必要もなく、高耐圧下でより安定な動作特性を示す。
- (2) 振動系を作る変位調整や負帰還動作のためのリンク機構、接触支点が不要であるため、系の固有振動数が高く、振動、衝撃などの外力による影響を受けにくく、すぐれた周波数応答特性を示す。
- (3) 測定点で直接ストレインゲージを用いて電気量に変換するため、高精度で、かつ著しく部品数を減少し信頼性を向上している。

などの性能上有効な特長があることを示した。

また測定点で直接、差圧、圧力などの工業量を電気量に変換することは、ストレインゲージを採用した電子式伝送器のみが可能な方式で、本文に記したEDR-2形差圧伝送器のほかに、EPR-2形圧力伝送器、ENR-2形液面伝送器も同一の方式によって製品化されている。

終わりに臨み、ストレインゲージの工業計器への応用の指示を与えるとともに終始ご指導いただいた日立製作所那珂工場伊藤部長に厚く感謝の意を表す。本計器の増幅器は、日立製作所中央研究所の猪瀬氏の研究によったもので製作に当たり種々ご教示いただいた。また受圧部に関しては日立製作所日立研究所長谷川氏に、ストレインゲージに関しては共和電業株式会社泉氏、日立製作所中央研究所倉林氏、西村氏に種々ご指導、ご討議いただいた。厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 機械工学便覧 p.4-58 日本機械学会発行 (昭37)
- (2) 猪瀬：電気学会誌 84, 152 (昭39-3)



特 許 の 紹 介



特許第410889号

片桐信二郎・土井俊雄

電 子 レ ン ズ 用 強 磁 性 材 料

電子光学装置においては、その分解能低下の原因の一つがこれに使用される電子レンズの非点収差にあることは周知の通りである。本発明者などの研究によれば、強励磁における非点収差は結晶異方性によるが、弱励磁の場合には、磁歪によって非点収差が発生し、結晶異方性によらないものであることを明らかにした。

本発明はこれらの研究により得られたもので、FeおよびCoを主成分とするとともに、これに重量比で0.001~3%のZrを添加して結

晶を微細化せしめたことを特長とするもので、微量のZr添加によりこれを結晶核として結晶が微細化され、組織が均一化されるのでこれをもって電子レンズの磁路を形成した場合、弱励磁範囲内においては磁歪を、強励磁範囲内においては結晶異方性の影響を軽減せしめ、非点収差を押えることが出来る。すなわち、強弱を問わず全励磁範囲を通じて非点収差の発生を有効に押え得るもので、電子レンズなどの磁性材料として用いて効果はなほ大である。(涌井)