

FPR-7 形 空 気 式 差 圧 伝 送 器

New Type FPR-7 Pneumatic Differential Pressure Transmitter

木 村 一 路* 長 田 太 計 男*
 Ichiro Kimura Takeo Nagata
 近 藤 秀 雄** 藍 光 郎**
 Hideo Kondô Mitsuo Ai

要 旨

空気式工業計器は、本質的に発火性のないこと、共通な統一信号、誘導などの相互干渉のないこと、などの特長から電子式計器と並んで広くプロセス制御用に用いられているが、そのうちで差圧伝送器は重要な検出部としてとくに性能が重視される。

ここに、新たに開発したダイヤフラム形差圧伝送器の原理および実験結果について報告する。本器は独自のOリングシール方式により従来もっとも大きい問題であった静圧の影響を原理的に除き、また困難とされている応答度の大幅なかつ微細な調節を可能にするなど一段の飛躍をはかったものである。

1. 緒 言

空気式工業計器は本質的な非発火性のほか信頼性についても永年の実績があり多くのプラントで採用されているが、中でも流量、圧力、液面などの測定に用いられる差圧伝送器は重要な検出部としてその良否が重視される。メーカーによって各社各様の構造・原理のものがあるが、受圧要素から分類すると、ペローズ形⁽¹⁾とダイヤフラム形に大別される。最近のプラントでは高分子化合物、腐食性流体が増加しているので、ダイヤフラム形のほうがじょうぶで精度が高いことのほかに、受圧部の形状が簡単で沈殿物による事故が起こりがたく腐食にも強い点が重視され、今まで以上に利用されるようになった。

しかし、ダイヤフラム形は変位を大きくとれないためダンパがききにくく、測定液の質量と共振してハンチングを起こしやすく、またライン圧(静圧)の影響を受けやすい欠点がある。

以下に述べる新形伝送器では新たにこう配付らせんみぞ形式のダンパを開発して応答の大幅な変更を可能とし、Oリングシールにより原理的に静圧の影響を受けない構造としたほか、沈殿物や腐食などの事故についても信頼度の高い構造をとり面目を一新している⁽²⁾。

2. FPR-7 形空気式差圧伝送器の概要

図1に標準品(中差圧用)を示す。一般に流量、液面、圧力の測定・制御に使用されるが、とくに多い流量制御の場合の使用例を図2に示す。標準品の仕様は表1のとおりであるが、このほか低差圧用、高差圧用、フランジ形などがある。つぎに図3の原理図について作動原理を簡単に述べる。測定圧が高圧側および低圧側の測定圧室にそれぞれ導入されると、その差圧によって二枚のダイヤフラムは同時に図の左方へ押される。二枚のダイヤフラムは連結されており、かつその間は封液で満たされているので一体となって左へ変位すると、力伝達レバーの下端が連結バネによって左に引張られ同レバーは右回りに回転する。そのためフラップはノズルに近づきノズルの空気圧が上昇するので、これをパイロット・バルブで増幅して出力とする。出力の一部は同時にフィードバック・ペローズに加えられるので、力平衡レバーを左回りに回転しようとするモーメントが発生し、前記の測定圧による右回りのモーメントと平衡する。この平衡のため差圧に正確に比例した出力圧が得られる。したがっ

て、変位はきわめてわずかであるから、変位拡大のためのリンク機構による摩擦がなくヒステリシスの生ずるおそれがない。また、全

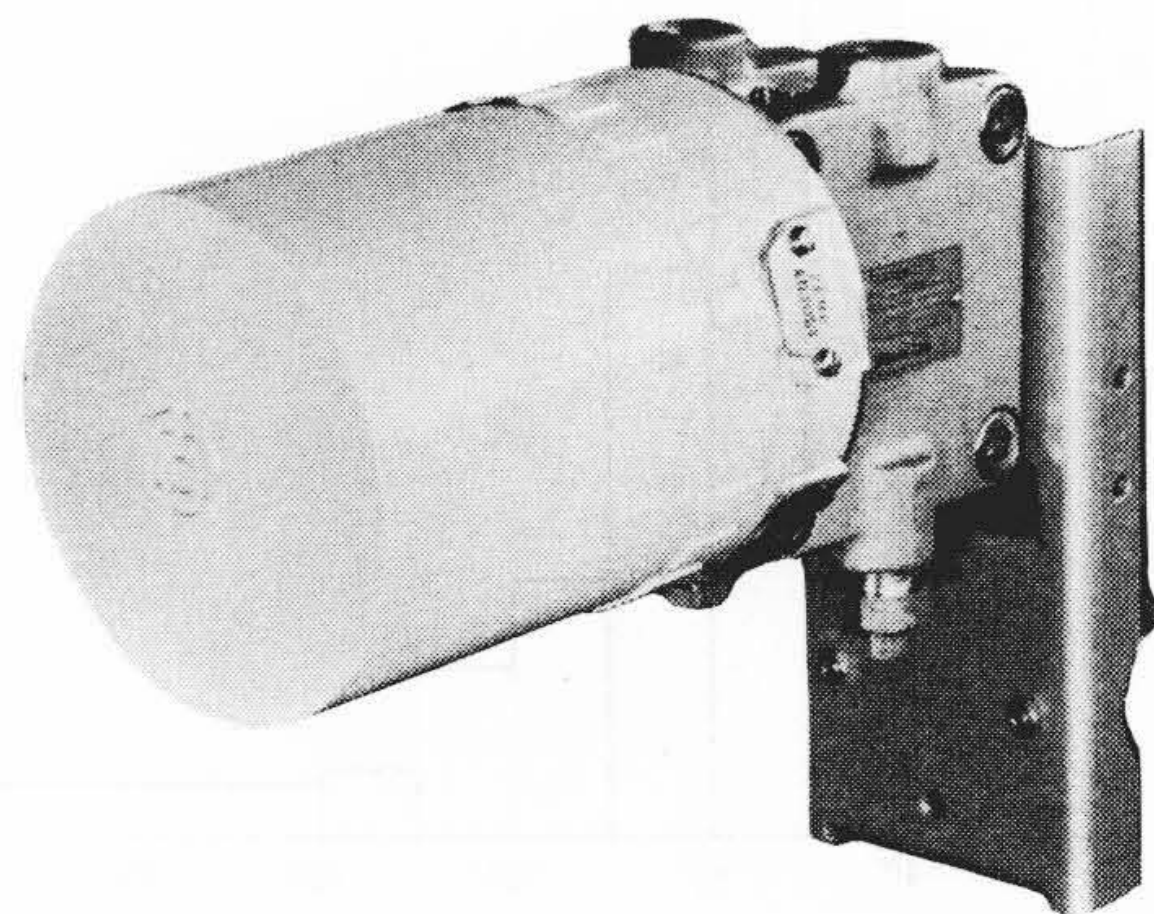


図1 FPR-7 形空気式差圧伝送器

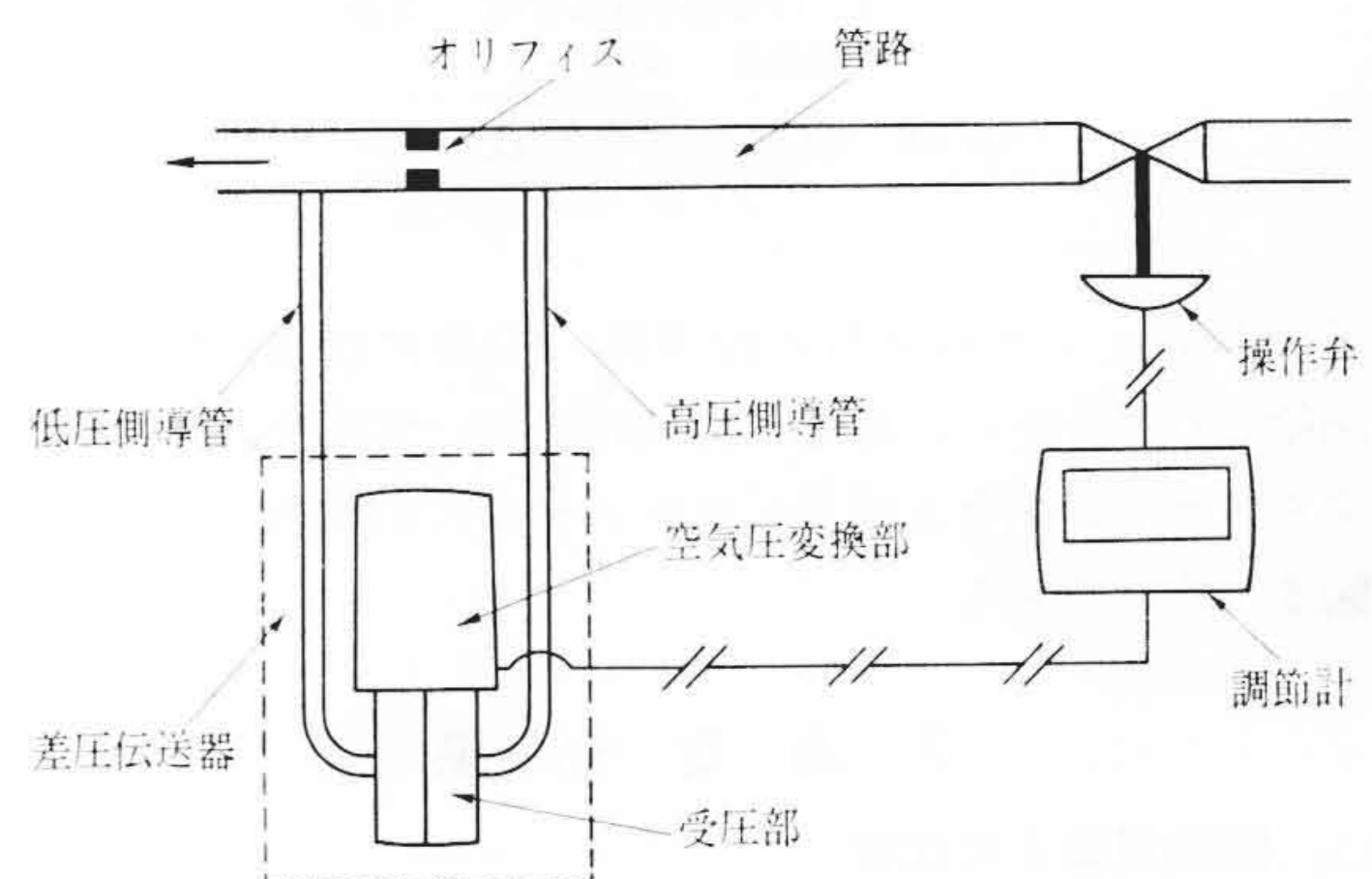


図2 流量制御の一例

表1 FPR-7 形空気式差圧伝送器標準仕様

レ	ン	ジ	0-500~0-6,000 mm H ₂ O 連続可変
精		度	±0.5%
最	高	使	100 kg/cm ² G
使	用	温	-30~+90°C
演		算	サブプレッション (最大レンジ)-(測定スパン) まで可能
			エレベーション 同 上
材	質		本体 SUS 32, ダイヤフラム SUS 33
取	付		横位置が標準なるも縦位置も可能
			スタンド, 縦向パイプ, 横向パイプ, 壁取付いずれも可
大	き	さ	127×277×135 mm
重		量	8 kg.

このほかに、高差圧用、低差圧用、フランジ形などがある。
 材質は要求により、モネル、ハステロイC、チタン、タンタル、銀クラッドベリリウム銅などの耐食金属のものも製作する。

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所那珂工場

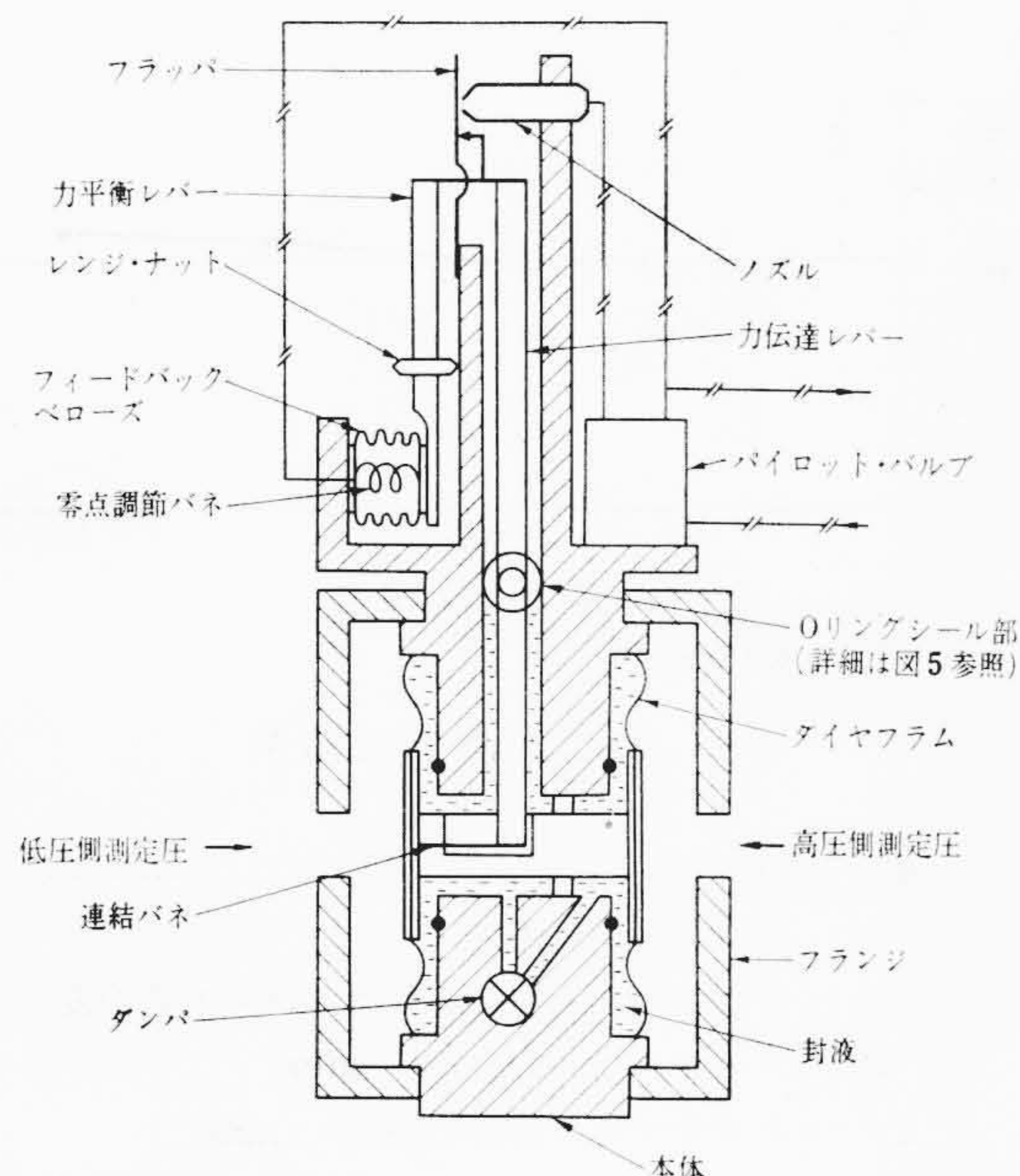


図3 FPR-7形差圧伝送器の構造

体にフィードバックがかかっており、計器全体の機械的なインピーダンスが高いので環境の影響を受けがたく安定である。この力平衡の原理は従来と同じであるが、各部の構造はまったく新しい原理に基づくものである。以下おもな特長について説明する。

3. 新設計の要点

3.1 応答度の調節(ダンパ)⁽³⁾

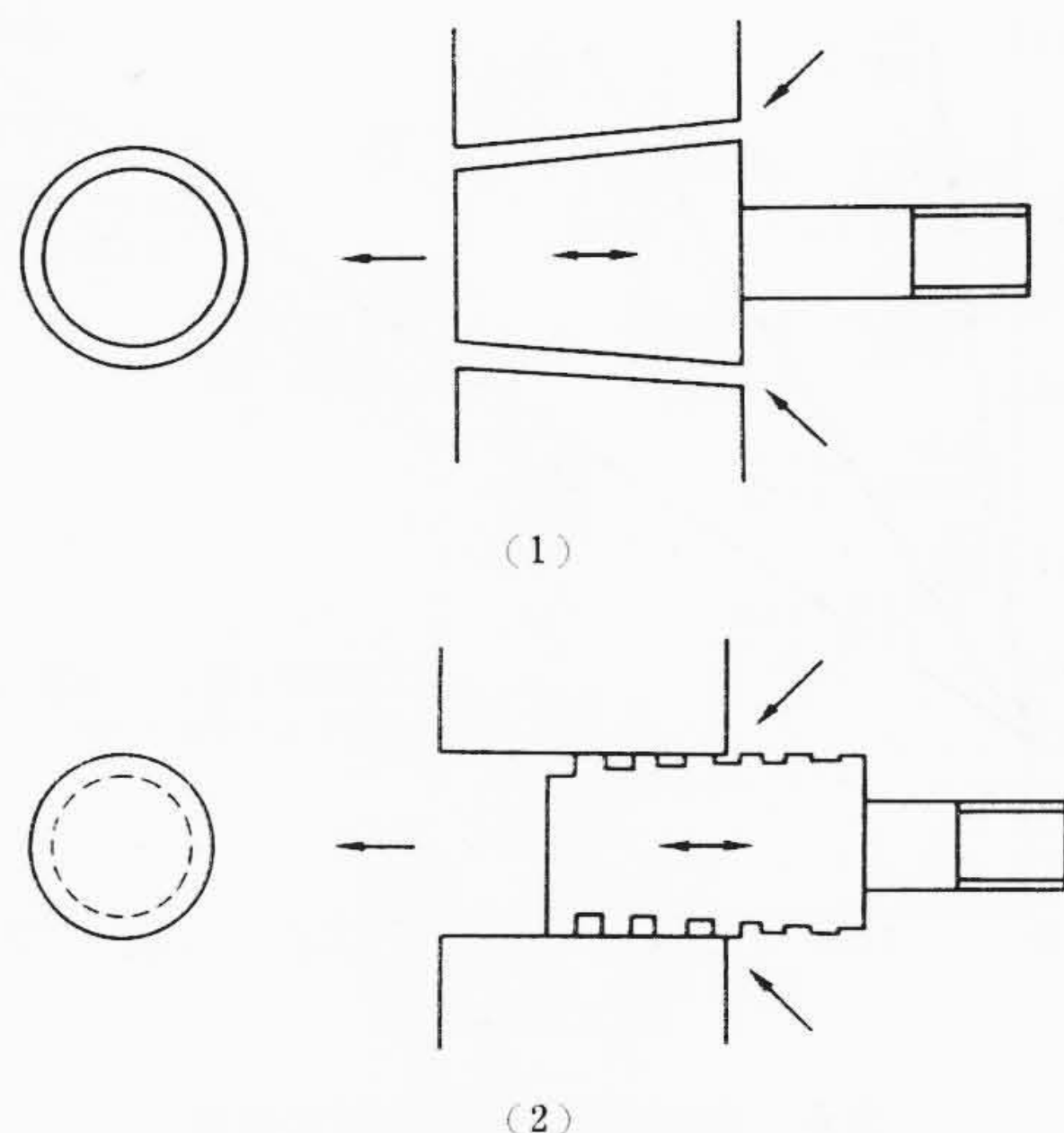
前述のように、力平衡形の差圧伝送器ではダイヤフラムの動きがきわめて小さく、一例をあげるとフルスケールでも30~300 μ (レンジにより異なる)しかないのでダンパはききにくい。このため従来の伝送器では固定ダンパのものが多く用いられているが、固定では不必要なノイズにตอบสนองしたり、測定液の質量と共振してハンチングを起こす場合があり、力平衡式の欠点の一つとされている。

一般に用いられているダンパは図4(1)のような円すい弁形であるが、流量が少ない場合はそのすき間を非常に小さくしなければならぬので、工作がむずかしい。また、流れの抵抗を変えるにはこのすき間を変えねばならないが、このような構造では、円すいのわずかな出し入れによるすき間の変化が大きいため、円すいのテーパ角をできるだけ小さくしネジのピッチを小さくしても、応答度の調節は非常に困難である。

本器では図4(2)のようならせんみぞの深さにこう配をつけたものをダンパとして開発した。この方法によれば、封液(油)の通路の長さおよび断面積がダンパの出し入れに伴い同時に変化し流体抵抗が変化するので、ストロークを十分大に設計できるから流体抵抗の変化範囲が大きくかつ調節がゆるやかで容易である。この場合レイノルズ数は最大1,200であるから層流として扱い、圧力差と流量との比を流体抵抗と定義すれば、次のような近似式で表わされる⁽⁴⁾。

$$r = r_0 + \frac{4\mu p_c}{\sin\theta \cdot a b_0^3} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2 \left(\frac{a}{b_0} \cdot \frac{n_0}{n_0 - n} \right)} \cdot \frac{n}{\left(1 - \frac{n}{n_0} \right)^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 r : こう配付らせんみぞの流体抵抗 (kg·s/cm⁵)
 r_0 : ダンパ以外の通路の抵抗 (kg·s/cm⁵)
 μ : 油の粘性係数 (kg·s/cm²)
 p_c : みぞのピッチ (cm)



(1) 一般の円すい弁形ダンパ
 (2) 本器のこう配つきらせんみぞダンパ

図4 一般のダンパと本器のダンパ

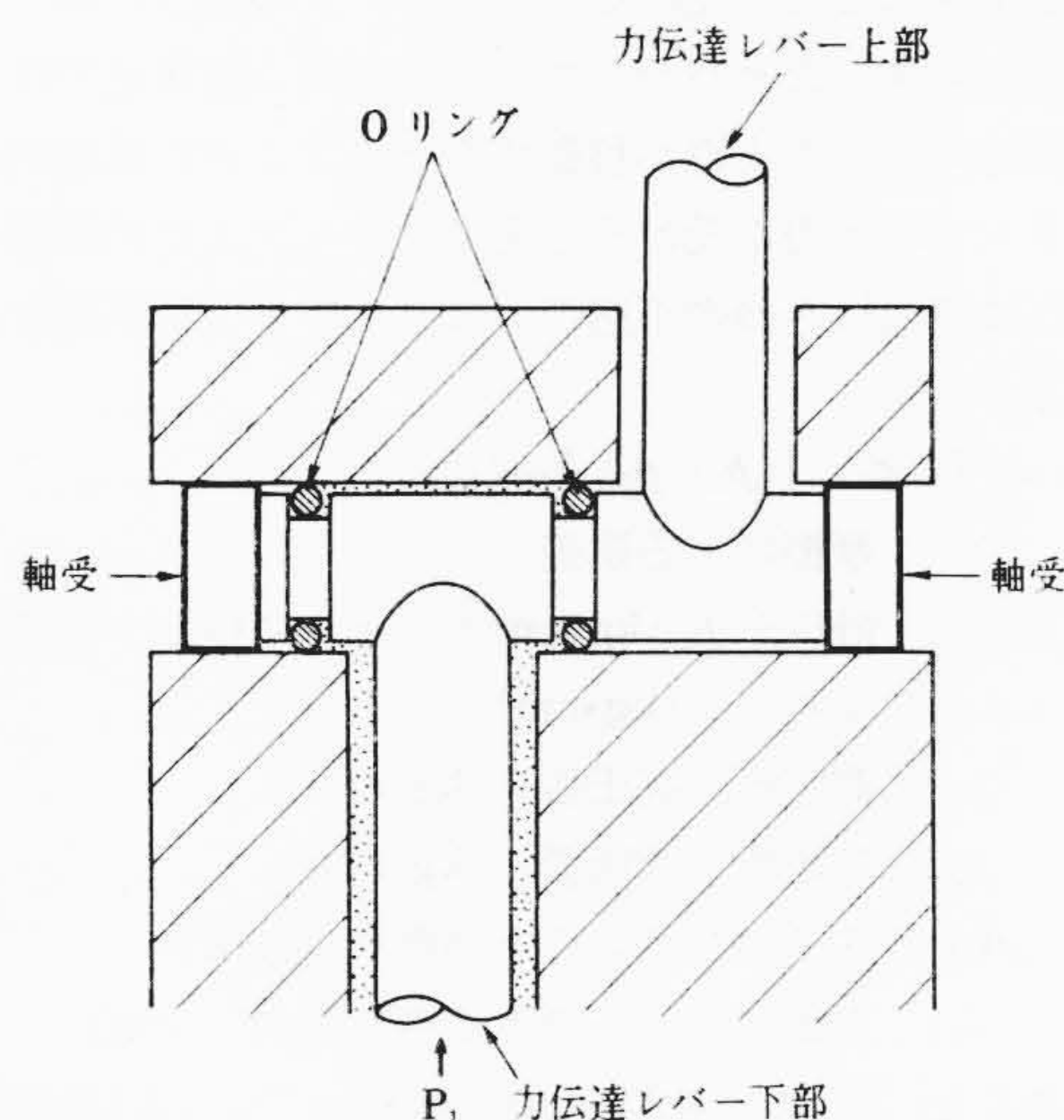


図3のOリングシール部を側面から見た詳細図

図5 Oリングシール部の構造

θ : らせんみぞのつまき角 (rad)

$2a$: みぞ幅 (cm)

$2b_0$: みぞの始端の深さ (cm)

n_0 : みぞの深さが零になるときの調節ネジの回転数

n : 調節ネジの回転数

また ε_2 は次のような関数である。

$$\varepsilon_2(x) = \frac{16}{3} - \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 \cdot x \left(\tanh \frac{\pi}{2} x + \frac{1}{3^3} \tanh \frac{3\pi}{2} x + \dots \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $x \geq 1$

3.2 静圧シール

たとえば、図2のように使用するとき、測定流体の圧力が高い場合は、伝送器は高いライン圧(静圧)中からオリフィスによって生ずるわずかな差圧を取出さねばならない。

したがって、図3の力伝達レバーの受圧部貫通部分には高い静圧の影響を受けずわずかな力で作動するようなたわみシールが必要で、従来ダイヤフラムシール、トルクチューブなどが一般に用いられている。しかし、これらのシールは静圧のために変形するので、力伝達レバーが動き出力変化を生ずる。本器では図5のように力伝

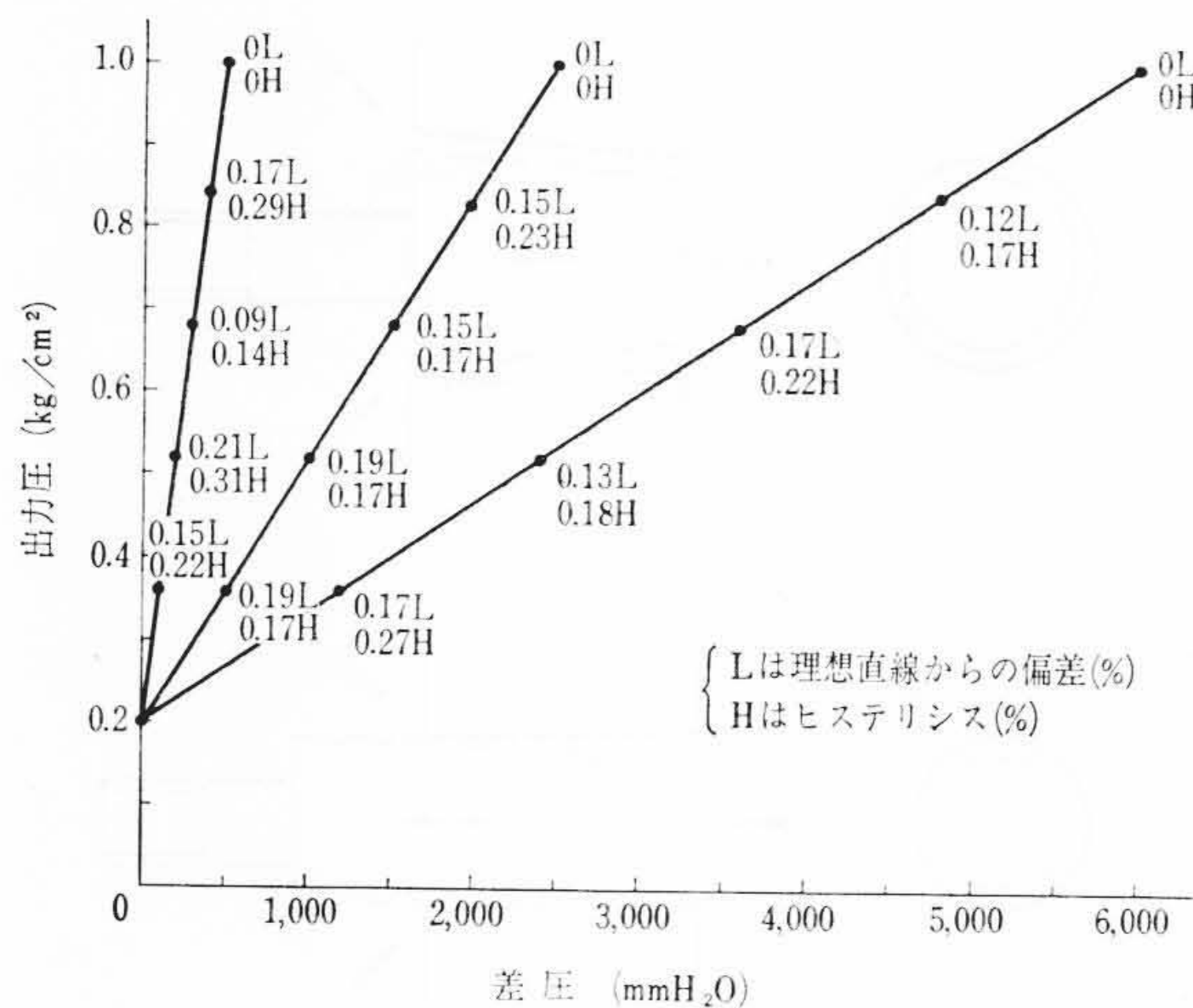


図 6 差圧-出力圧特性測定結果

達レバーにシャフトを設け、この両端をベアリングで支持し圧力は O リングでシールする構造としてある。したがって、静圧のために外部へ押し出される力を受けるのは O リングの部分のみであって、この力は左右対象のためバランスして、結局この構造では、静圧のために力伝達レバーの支点が移動するということが原理的にない。ただ、O リングは圧力を受けると変形しシャフトの回転摩擦が増加する。これは結局伝送器の不感帯となり次のような誤差を生ずると考えられる。

$$\varepsilon_f = T_f(p_1) / \{(p_1 - p_2) A_D \cdot l_1\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ε_f ：摩擦による誤差

$T_f(p_1)$ ：静圧が p_1 (kg/cm²) のときの O リングの静止摩擦トルク (kg・cm)

p_1 ：測定圧，高圧側 (kg/cm²)

p_2 ：測定圧，低圧側 (kg/cm²)

A_D ：ダイヤフラムの有効面積 (cm²)

l_1 ：力伝達レバーの下部の有効長 (cm)

実験によると、 $T_f(105) = 2.9 \times 10^{-3}$ kg・cm で、(3) 式の分母は最小レンジのときでも 9.56 kg・cm であるから、 $\varepsilon = 0.03\%$ となり問題にならない。

3.3 ダイヤフラム

ダイヤフラムは耐食性が高く直線性、ヒステリシスとも良好なものでなければならない。ステンレス鋼の中でも SUS 33 はとくに耐食性が高くバネ性が良いので、本器ではこれを標準ダイヤフラムとしているが、そのほか、表 1 に掲げた耐食金属でも製作することができる。SUS 33、モネルなどは焼鈍して成形した後焼入れまたは析出硬化処理によって硬度を上げることができないので、あらかじめ冷間加工によって硬化させた材料で成形し、低温焼鈍を行なってバネ性を改良する。しかし、あまり硬化させると伸びが少なくなり成形できなくなるから、成形に必要な最小限の伸びで製品の強度を最大限になるように、適当な圧延率の板を選ぶ必要がある。

本器に用いたダイヤフラムの材料は真空溶解によってインゴットを作り、フルアニールで圧延後、厳密な圧延率の管理の下に冷間圧延を行なったものである。このような注意によってダイヤフラムの降伏点は約 100 kg/mm² のものになっている。

ダイヤフラムの直線性は、Haringx の理論から次のように計算される。

$$\varepsilon \doteq \frac{0.385 w_{of}^2}{h^2 Q^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし、} Q^2 = 7 q^2 (3q + 5) (2q + 1) (q + 11) (q + 4) / \{1,728 (q + 1)^2\} \dots\dots\dots (5)$$

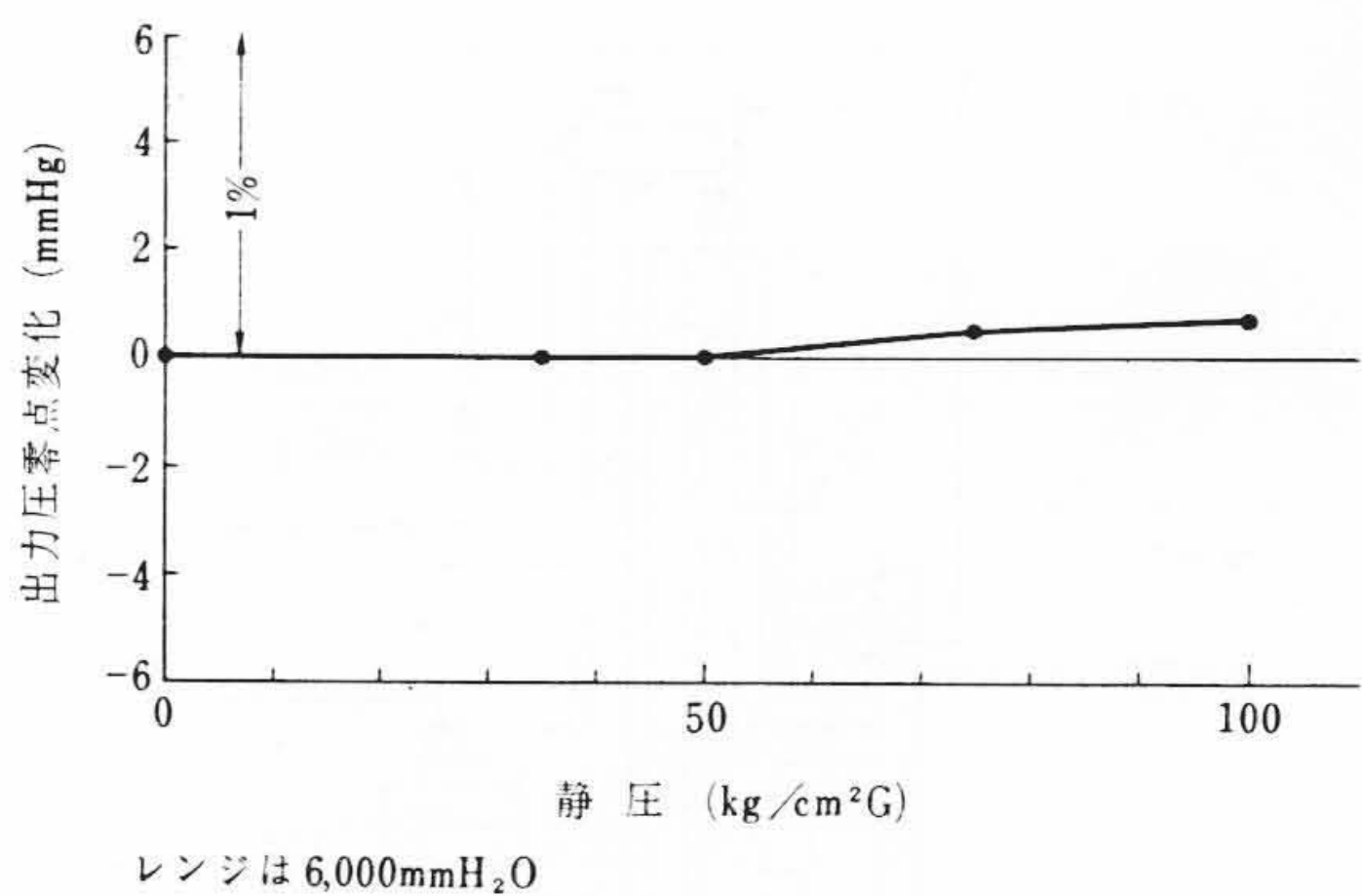


図 7 静圧影響測定結果

$$q^2 = 1 + 6 (d/h)^2 \dots\dots\dots (6)$$

ε ：直線誤差

w_{of} ：フルスケール時のダイヤフラム中心の変位 (mm)

h ：ダイヤフラムの板厚 (mm)

$2d$ ：ダイヤフラム波形の波高 (mm)

また、ダイヤフラムのヒステリシスは最大変位時の発生応力と材料の弾性限とによって決まると考えられる。

本器のダイヤフラム単体の特性は、標準品の場合 0.8 mm 変位時の直線性 0.5%，正負各 1 mm 変位後のヒステリシス 1～2 μ となっている。

近年、高分子化合物の増加のため受圧部に沈殿物などがたまる事故がふえてきたが、本器では本体を取り付けたまま、フランジだけ取はずし受圧部の点検ができる構造となっている。また、腐食性の強い流体も増加しているが、本器では測定流体に接するのはダイヤフラム部分のみであり、連結板バネやシール部など重要なメカニズムが測定液に触れるということがないので、耐食に関しても信頼度が高い。

3.4 空気圧変換部

図 3 に見られるように、本器では零点調節バネをフィードバック・ベローズに内蔵したので、レンジ変更によって零点が大幅に変わるという在来の伝送器の欠点が無くなった。すなわち、入力为零で出力が 0.2 kg/cm² の状態では (7) 式が成立せねばならないが、一般の伝送器ではレンジ変更のため l_b/l_s が変わるので F_{s0} を変えてやらなければ、出力 p_0 が変化する。

$$p_0 A_b l_b = F_{s0} \cdot l_s \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 F_{s0} ：零点調節バネの力 (kg)

l_b ：レンジナットとベローズ中心の距離 (cm)

l_s ：レンジナットと零点調節バネの距離 (cm)

p_0 ：出力圧 (0.2 kg/cm² G)

A_b ：フィードバック・ベローズの有効面積 (cm²)

本器では $l_b/l_s \equiv 1$ であるからレンジナットを移動しても零点 ($p_0 = 0.2$ kg/cm²) は変化しない。

元来、零点調節バネは零点の微調整が目的であるから、調節範囲を狭くして調節感度をゆるやかに設計すれば、調節がやりやすいが、本器では上記の原理のために調節範囲を広くとる必要がないので、このような設計が可能となった。もちろん、零点の粗調節ネジは空気圧変換部を分解したとき以外調節の必要がない。

4. 実験結果と検討

4.1 静特性

静特性測定結果は、図 6 のように各レンジにおいて十分 0.5% 内に入っている。これはダイヤフラム単体の特性が前記のように良く、また伝送器のフィードバックループのゲインも大きく、変位が微小

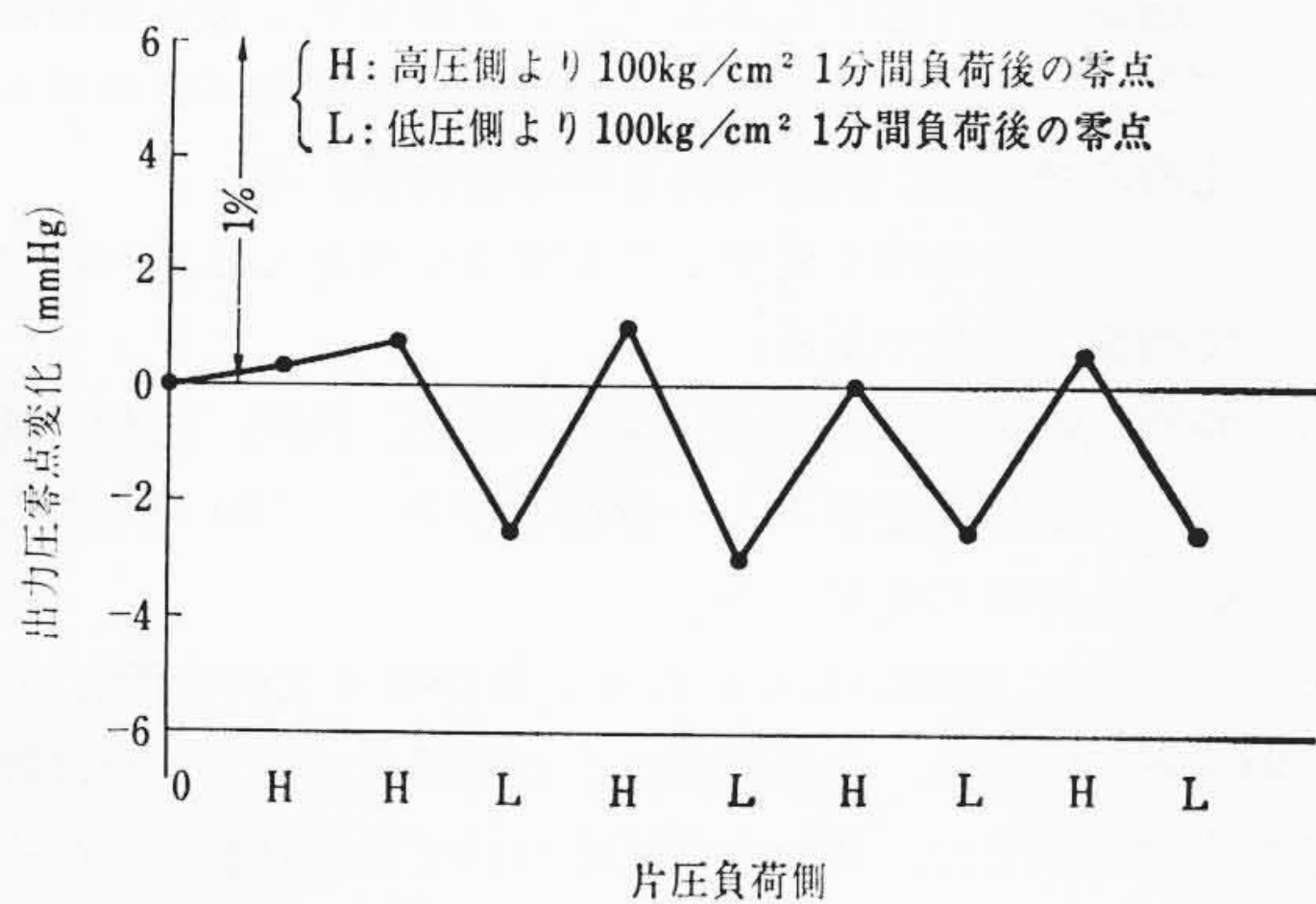
レンジは 6,000mmH₂O

図 8 片圧影響実験結果

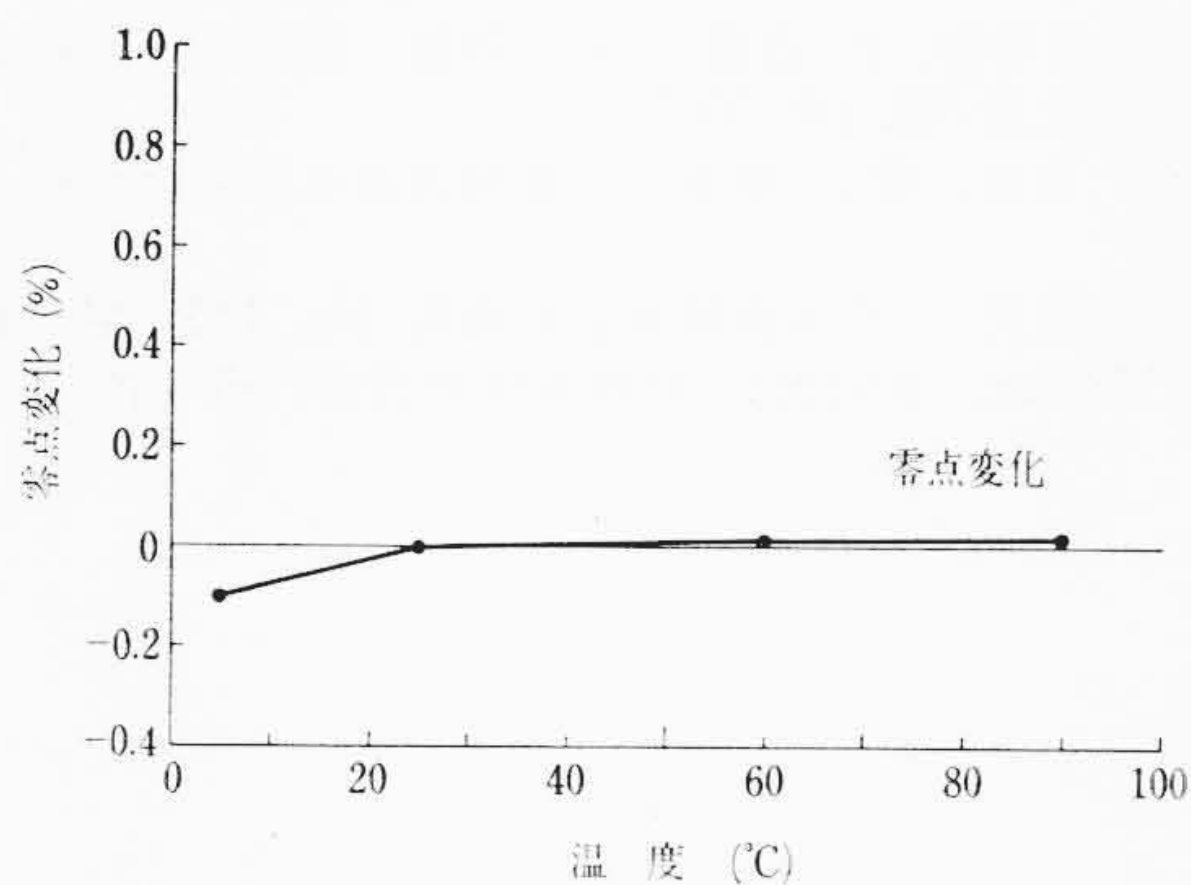


図 9 温度影響の実験結果

であるためであろう。

4.2 影 響 値

4.2.1 静 圧 の 影 響

静圧を負荷したときの出力圧零点の変化を測定した結果は図7のとおりで、0~100 kg/cm²Gの静圧で影響は0.7 mmHg すなわち、0.12% 以下である。

4.2.2 片 圧 の 影 響

通常の使用状態では大きな過負荷はかからなくても、バルブの誤操作、ドレン抜きなど特別な場合には測定圧の数倍の静圧が片側にかかることがある。高压側および低压側から 100 kg/cm²の片圧を 1 分間負荷した後の影響は、図8のように 3 mmHg、すなわち、0.5% 内である。

4.2.3 振動および衝撃の影響

1,000 c/min で加速度 1 g ($g=980 \text{ cm/s}^2$) に相当する振動を加えた後の零点の変化は 0.24% で、スパンの変化は 0.29% である。また、30 mm の高さから数回落下させたときの衝撃による零点の変化は 0.5% 以下である。

本器は力平衡方式のため動作部分のステイフネスが高いので振動、衝撃による影響が少ないと考えられる。

4.2.4 温 度 影 響

周囲温度を 90 度まで変化したときの零点の変化は図9のように 0.1% 以下である。またスパンの変化も 30 度当たり 0.4% 以下である。

本器の受圧部は図3のように一液室でかつダイヤフラムは連結されているので、二枚のダイヤフラムの有効面積に差があるときは温度の変化に伴い次のような零点の変化が生ずる計算となる。

$$\varepsilon_T = \frac{\beta V \Delta T \frac{\partial p}{\partial V} (A_{DL} - A_{DH})}{p_F (A_{DL} + A_{DH}) / 2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

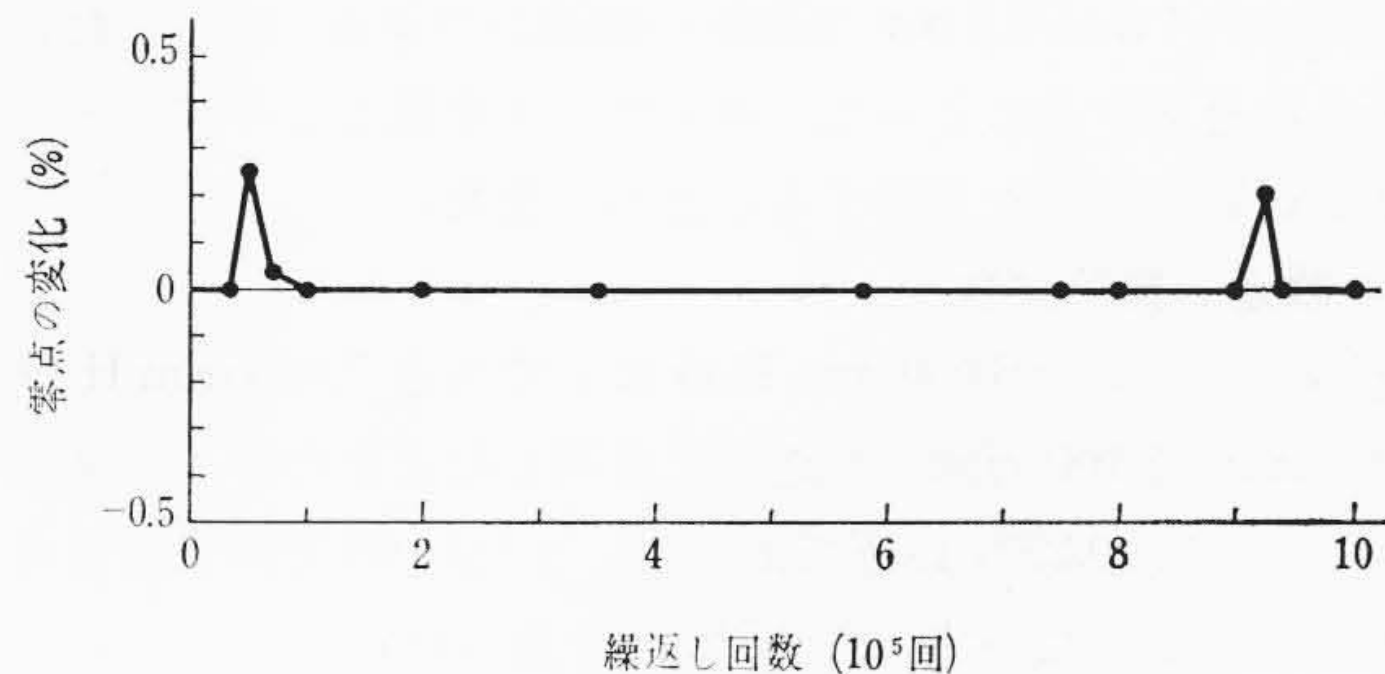


図 10 給気圧変動の影響実験結果

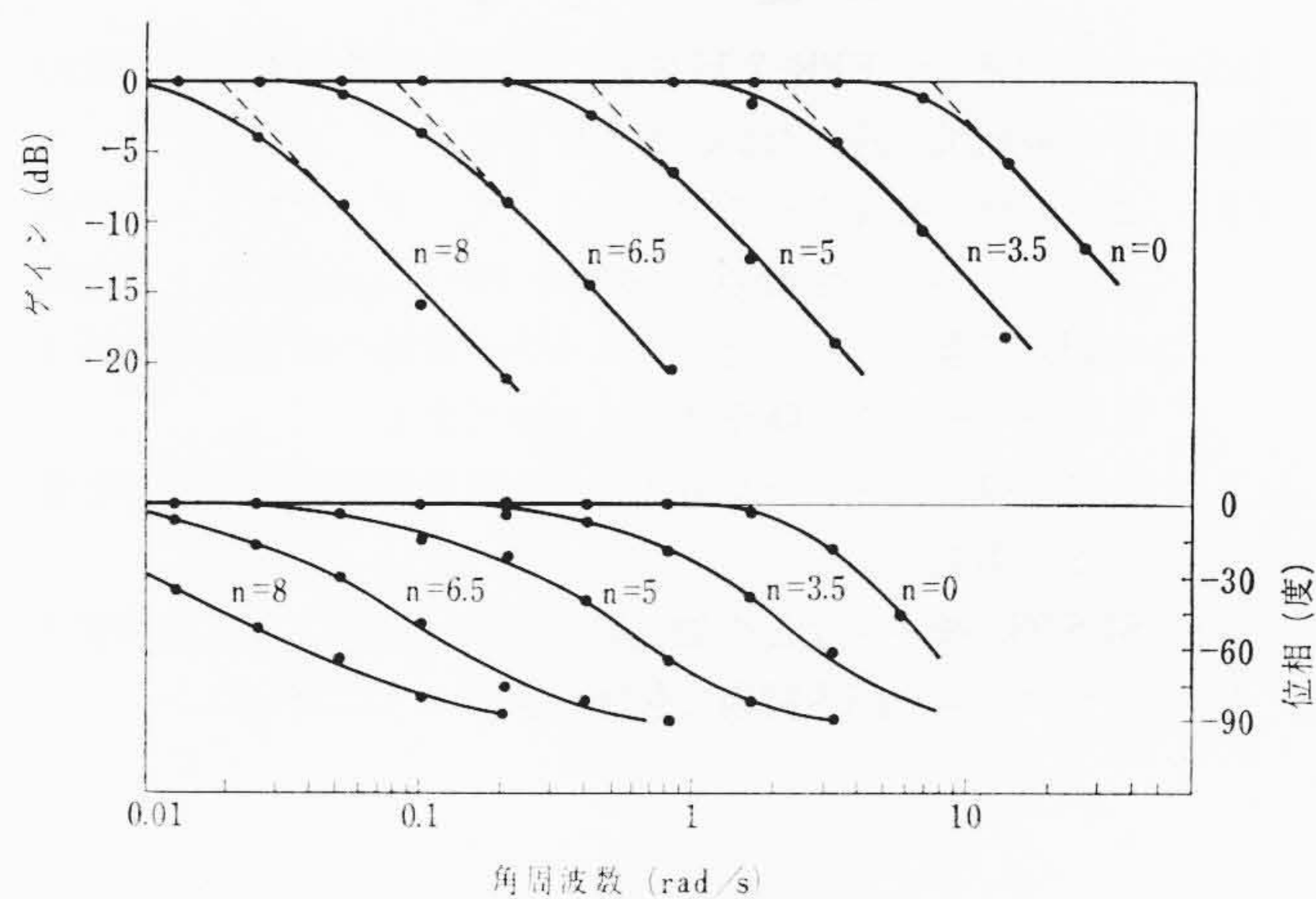


図 11 周波数特性試験結果

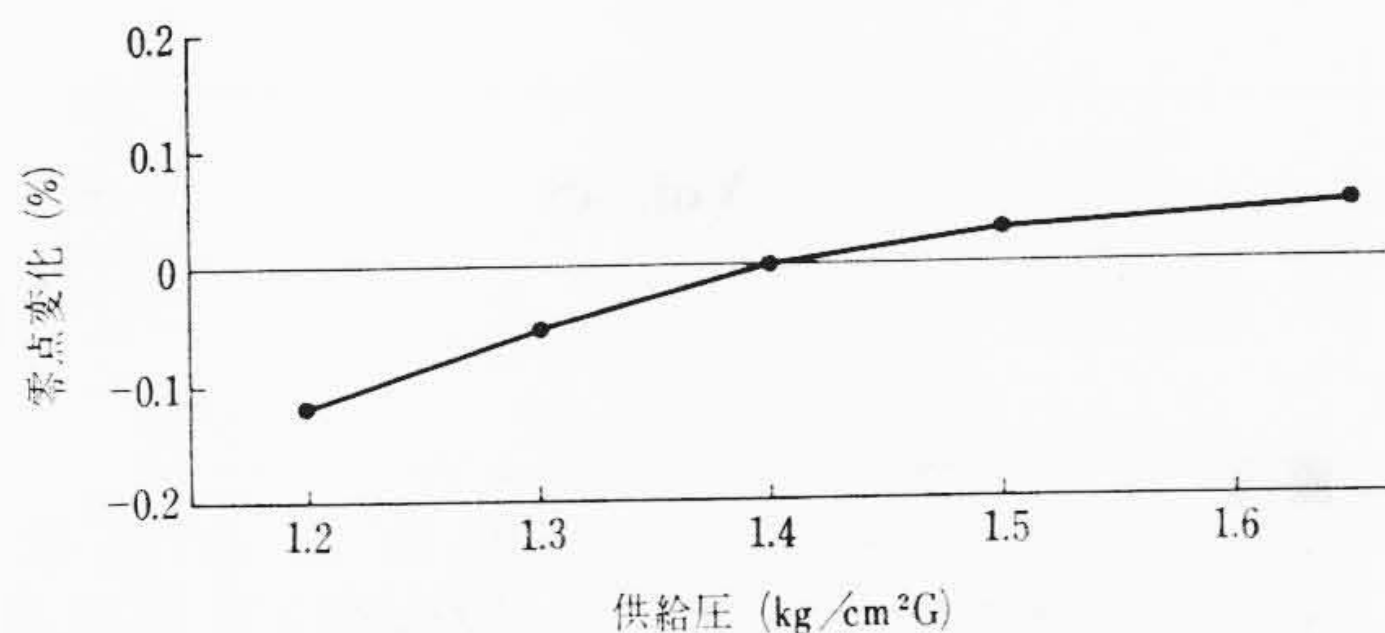


図 12 繰返し負荷による零点変化

ただし、 ε_T ：温度変化による誤差 β ：封液の体積膨張係数 (°C 当たり) V ：封液の体積 (cm³) ΔT ：温度変化 (°C) $\partial p / \partial V$ ：封液の体積変化による液室の圧力変化の割合 (kg/cm⁵) A_{DH}, A_{DL} ：それぞれ高压側および低压側ダイヤフラムの有効面積 (cm²) p_F ：測定スパン (kg/cm²)

(8)式の中で

$$\frac{A_{DL} - A_{DH}}{(A_{DL} + A_{DH}) / 2} \equiv e_D \quad \dots\dots\dots (9)$$

はダイヤフラムの有効面積の誤差率を表わすと考えられるので、ダイヤフラムの有効面積のバラツキを管理することによって前記のように温度の影響を少なくすることができたと考えられる。

4.2.5 給 気 圧 影 響

給気圧が標準の 1.4 kg/cm² から変動したときの影響は図10のように 0.1%/0.2(kg/cm²) である。

4.3 動 特 性

周波数特性試験の結果は図11のようで最高折点周波数は約 10 rad/s、最低は 0.1 rad/s と調節可能範囲は約 100 倍になっており、

調節感度は約1 dec/2.5 rev で細かい調節ができる。前述したこう配付らせんみぞダンパによって、ハンチングを起こしやすいという力平衡式伝送器の欠点を克服することができた。

4.4 繰返し負荷試験

伝送器のレンジを6,000 mm H₂O にしておき7,000 mm H₂O の差圧を4 c/min で100万回くり返して負荷したときの零点の変化は、図12のように、0.25% 以下であった。また、100万回負荷後各レンジで静特性をとったがすべて0.5% 内であった。

5. 結 言

以上、今回開発したFPR-7 形空気式差圧伝送器の新たな設計の原理および実験結果を述べたが、要約すると、

- (1) こう配付らせんみぞダンパによって、ダイヤフラム形であるにもかかわらず折点周波数を10~0.1 rad/s 以上広範囲に調節できるので、そのプロセスに最適の応答度に調節すればハンチングを防止することができる。
- (2) 独自のOリングシール方式のため原理的に静圧の影響を受けない構造である。
- (3) SUS 33, モネルなどの加工硬化性の材料によって高精度ダイヤフラムを国産技術で製作できるようになった。

- (4) 伝送器を取り付けたままフランジをはずし受圧部の点検ができる。また、ダイヤフラム以外すべてのメカニズムが測定液に触れない構造であるから耐食性が高い。
- (5) レンジを全範囲に変更しても零点がほとんど変わらないので調整が容易である。
- (6) 特性試験の結果、精度0.5% で静圧、片圧、振動、衝撃、温度、給気圧変動などの影響も少なく、100万回の寿命試験後も特性の変化がない。

終わりに、終始ご指導いただいた日立製作所日立研究所北川部長、那珂工場伊藤副技師長、佐藤部長はじめ関係者のかたがたに厚く感謝の意を表する。また、薄板の圧延については日立製作所中央研究所小林主任研究員、ダイヤフラムの製品化については那珂工場工具課上村氏のご協力に負うところが大きい。深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 西原, 長谷川, 藍, 近藤: 日立評論, 日立研究所創立30周年記念論文集 80 (昭39-11)
- (2) 木村, 長田, 藍: 第8回自動制御連合講演会前刷 165 (昭40)
- (3) 木村, 長田: 日本機械学会前刷集 No. 145 (昭40-10)
- (4) W. Müller, 本間訳: 粘性流体の力学, 85 (昭17 コロナ社)

Vol. 48

日立評論

No. 8

目 次

■論 文

- ・蒸気タービンの実用的三次元理論
- ・インドコタクデム発電所納60,000 kW 発電設備
- ・自然循環ボイラと貴流ボイラの動特性の比較
- ・積分形 A-D 変換器
- ・タンデムコールドミルの自動運転
- ・I 断面ガータの横だおれ挫屈強さについて
- ・中容量電動機用ころがり軸受の問題点
- ・採炭機減用電動機とその動向
- ・新形ハイフリーズ冷蔵庫の性能

- ・α-Fe の強度および再結晶温度に及ぼす各種合金元素の影響

■化学プラント特集

- ・日立のエンジニアリング
- ・化学プラント蒸流装置の最近の進歩
- ・化学工業用炉
- ・ガス分離精製装置
- ・化学プラント用計装
- ・化学プラント用プロセス機械
- ・化学プラント用電気設備

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番