

高圧用ダイアフラム差圧計の圧力依存性

小口 幸成・山岸 誠至・佐久間 智也
櫻井 登・清水 義夫

Pressure Dependence of the Diaphragm Type Pressure Balance Detector for High Pressure Use

Kosei OGUCHI, Masashi YAMAGISHI, Tomonari SAKUMA
Noboru SAKURAI and Yoshio SIMIZU

Abstract

The diaphragm type pressure balance detector, so-called the differential pressure gauge, used for a gas thermometer was reconstructed for high pressure use¹⁾, and is utilized for an experimental device of the *PVT* property measurement. It is assembled in a pressure vessel as shown in Fig. 2, and is compressed by a pressurized medium as nitrogen or argon for transferring sample pressure to a pressure gauge. For a practical application of measuring pressure difference, it should be calibrated relating to not only the thermal effects but also the pressurized effects of a diaphragm deformation and dielectric constant of a medium. However, only the thermal effects are calibrated without any examination of the pressurized effects.

In the present paper, its thermal and pressurized effects are calibrated experimentally in the range of temperatures from 241 K to 473 K and pressures up to 17 MPa. The experimental results show that only the thermal effects are specified in this range of temperatures and pressures.

1. ま え が き

電気容量式ダイアフラム差圧計は定容形の気体温度計に使用され、微小圧力差の検出に適した装置である。しかし、この装置を高圧用に改良することによって¹⁾、流体の圧力、容積および温度の関係、いわゆる *PVT* 関係の高精度測定が容易になり、ダイアフラム差圧計を使用した *PVT* 関係測定装置が極めて多くなってきている。この利点は、ダイアフラム差圧計を使用することによって、純物質ばかりでなく混合物の *PVT* 関係が高精度で実測できることにある。

しかるに、このダイアフラムをはさんだ両側の圧力差補正が重要であるにもかかわらず、従来はこの圧力差補正を温度に対する補正值のみを検定して使用している。本研究では、この圧力差補正を温度補正ばかりでなく、圧力補正に対しても検討し、新たに検定方法を考案し圧力補正值を検定したので、その結果を報告

する。

2. 電気容量式ダイアフラム差圧計の概要

気体温度計に使用される電気容量式ダイアフラム差圧計は、Fig. 1 に示す原理図のように、圧力が低い場合、差圧計本体はガラスで作られ、中央にすり合わせをしてはさみ込んだダイアフラムと、ガラスに銀メッ

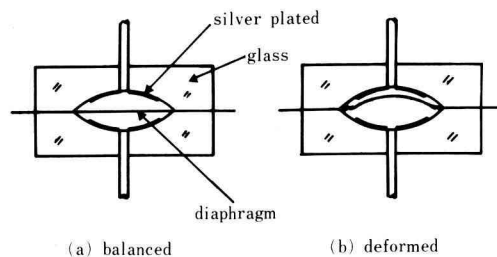


Fig. 1. Diaphragm type pressure balance detector for a gas thermometer.

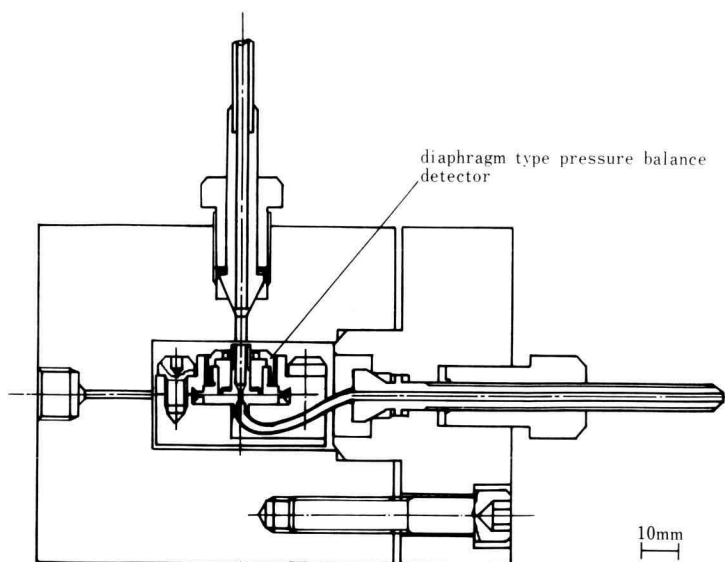


Fig. 2. Diaphragm type pressure balance detector in a pressure vessel (designed and assembled originally)

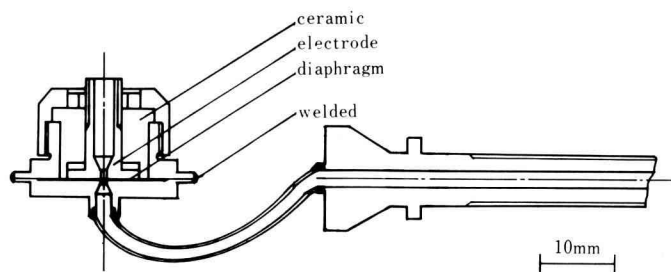


Fig. 3. Diaphragm type pressure balance detector for high pressure use.

キされた電極の間を上下それぞれコンデンサーとし、圧力差によるダイアフラムの変位をコンデンサーの電気容量の変位として出力し、変成器ブリッジの平衡状態からのずれからダイアフラムの上下の圧力差を検出する装置である。

筆者の一人が高圧用に改良した電気容量式ダイアフラム差圧計は、文献¹⁾のものを改良し²⁾ Fig. 2 に示すように、差圧計本体を高圧の耐圧容器に封じ込んだものである。これはダイアフラムに加わる圧力差を小さくでき差圧計本体のシールが容易なためである。耐圧容器に封じ込められている差圧計本体は、Fig. 3 に示す

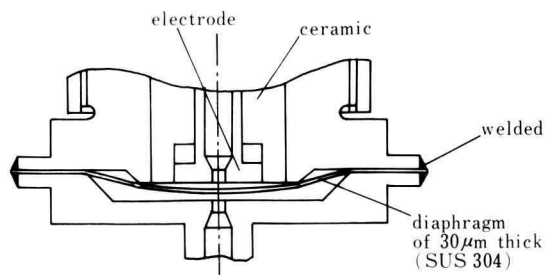


Fig. 4. Assembling of diaphragm (not in scale)

ように, $30\ \mu\text{m}$ 厚さのダイアフラムを使用し, Fig. 1 と異なり, 電極はダイアフラムの一方だけに設置されている。Fig. 1 の差圧計は, ダイアフラムの両側に電極があるため, 電気容量の平衡検出は $-\infty$ から $+\infty$ まで可能であるが, Fig. 3 の差圧計は, $-\infty$ の検出はないため $+\infty$ の方で検出することが多くなる。Fig. 3 のダイアフラムはアルゴン溶接によって接合され, $10\ \mu\text{m}$ 厚さまで成功している。ダイアフラムと電極部分の構造は Fig. 4 に示すように, ダイアフラムをはさむフランジに, ダイアフラムにたるみを与えないよう工夫をしてあり, 独自の設計である。

3. ダイアフラムと電極の間隔が与える 圧力平衡状態への影響

Fig. 5 のように, 内外圧力を受ける球殻の弾性変形による半径変位 u_r を, (a) 外半径 a の球が圧力 P の流体中に設置された場合, (b) 内半径 a , 外半径 b で内外圧力 P の流体中に設置された場合, (c) 内圧力 P , 外圧力 0 の場合のそれぞれについて, 半径 a の変位 u_a を比較する。

内外圧力を受ける球殻の弾性変形は, 内半径 r_1 , 外半径 r_2 , 任意半径 r ($r_1 \leq r \leq r_2$), 縦弾性係数 E , ポアソン比 ν , 球殻の内圧力 P_1 , 外圧力 P_2 とすると次式で与えられる³⁾。

$$u_r = \frac{r_1 r_2}{E(r_2^3 - r_1^3)} \left[P_1 r_1^2 \left\{ (1-2\nu) \frac{r}{r_2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{r_2^2}{r^2} \right\} - P_2 r_2^2 \left\{ (1-2\nu) \frac{r}{r_1} + \frac{1+\nu}{2} \frac{r_1^2}{r^2} \right\} \right] \quad (1)$$

ここに u_r は, 半径 r における半径方向の変位である。

(1) Fig. 5(a) の場合:

式 (1) において, $r_1 = 0$, $r_2 = a$, $P_2 = P$ とおくと次式が得られる。

$$u_1 = -\frac{1-2\nu}{E} aP \quad (2)$$

(2) Fig. 5(b) の $r=a$ における変位:

式 (1) において, $r_1 = a$, $r_2 = ka$ ($k > 1$), $P_1 = P_2 = P$ とおくと, $r=a$ における内半径の変位は次式で与えられる。

$$u_2 = -\frac{1-2\nu}{E} aP \quad (3)$$

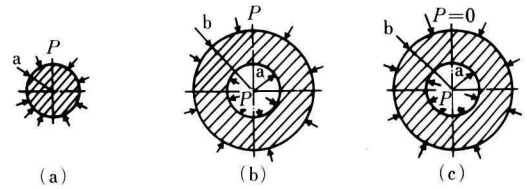


Fig. 5. Difference of spherical vessels by pressure effect.

(3) Fig. 5 (c) の $r=a$ における変位:

式 (1) において, $r_1 = a$, $r_2 = ka$ ($k > 1$), $P_1 = P$, $P_2 = 0$ とおくと, $r=a$ における内半径の変位は次式で与えられる。

$$u_3 = \frac{aP}{E(k^3 - 1)} \left\{ (1-2\nu) + \frac{1+\nu}{2} k^3 \right\} \quad (4)$$

式 (4) において無限厚さの球殻が内半径変位が最小になるので, $k \rightarrow \infty$ を考えると次式のようにになる。

$$u_4 = \lim_{k \rightarrow \infty} u_3 = \frac{1+\nu}{2E} aP \quad (5)$$

式 (2), (3) および (5) から次の事が推測できる。

Fig. 5(b) の容器内の流体の体積は, 容器と同じ材質の固体で流体と同じ体積の弾性変形に等しい。また, 一般に $\nu \approx 0.3$ であるが, $\nu > 0.25$ であれば, $u_4 > u_1 = u_2$ であり, 二重容器形にした方が変形が小さいことを示している。

上述の推測から, ダイアフラムと電極の間隔に圧力の影響を小さくするため, Fig. 2 のように圧力容器内にダイアフラム差圧計を封じ込めることにしたものである。

次に, ダイアフラムと電極の間隔に与える温度と圧力の影響を検討すると次のようになる。

ダイアフラムと電極の間の電気容量 C は, 間隔を δ , 電極の面積を S , 誘電率を ϵ とすると次式で与えられる。

$$C = \epsilon \frac{S}{\delta} \quad (6)$$

誘電率 ϵ は圧力 P と温度 T の関数であるが, ダイアフラムと電極の間には窒素など気体を使用するため P と T の影響は知られている。差圧計の材質の線膨張係数を α (K^{-1}) とすると電極の面積 S は次式で与えられる。

$$S = S_0(1 + \alpha t)^2 \quad (7)$$

ここに S_0 は $t=0^\circ\text{C}$ における面積である。一方、間隔 δ の変位 $\Delta\delta$ について検討すると、 δ は一方向の変位であるから、温度に対して式 (8)、圧力に対して式 (9) のように得られる。すなわち

$$\frac{\Delta\delta_T}{\delta} \doteq \frac{\delta_T - \delta_0}{\delta_0} = \alpha t \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\delta_P}{\delta} \doteq \frac{P}{E} \quad (9)$$

ステンレス鋼 SUS 304 では、 α および E は温度の関数としてそれぞれ次式で与えられる⁴⁾。

$$\begin{aligned} \alpha(\text{K}^{-1}) &= 1.5743 \times 10^{-5} + 1.083 \times 10^{-8} t \\ &\quad - 1.083 \times 10^{-11} t^2 \\ E(\text{MPa}) &= 1.9614 \times 10^5 - 4.1807 \times 10^1 t \\ &\quad - 8.4249 \times 10^{-2} t^2 + 5.9288 \times 10^{-5} t^3 \\ &\quad - 4.0842 \times 10^{-8} t^4 \end{aligned}$$

ここに、適用範囲は α について温度 173~800 K、 E について温度 33~1073 K である。式 (8)、(9) の比較では、 $t=0^\circ\text{C}$ 近傍を除いて通常の PVT 関係の実測を考えると高温ほど高圧になるが、 $t=10^\circ\text{C}$ 、 $P=10\text{ MPa}$ では

$$\frac{\Delta\delta_T}{\delta} = 1.57 \times 10^{-4}, \quad \frac{\Delta\delta_P}{\delta} = 5.10 \times 10^{-5}$$

となり、一般に広い温度、圧力範囲にわたって、

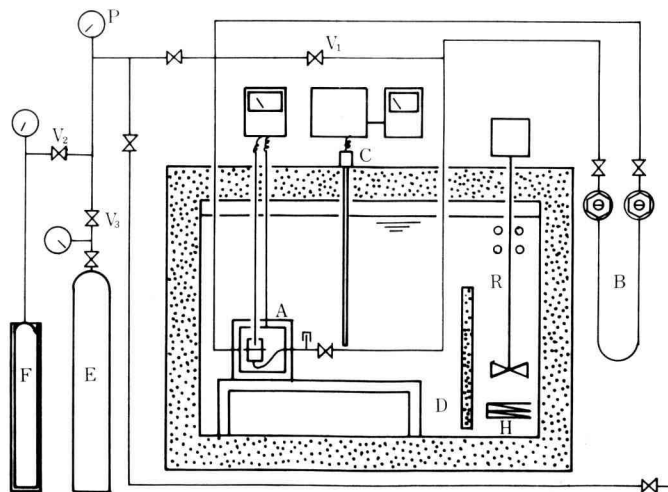
$$\left| \frac{\Delta\delta_T}{\delta} \right| > \left| \frac{\Delta\delta_P}{\delta} \right| \quad (10)$$

の関係が成立する。

上述の検討の結果、従来はダイアフラムを挟んだ上下の圧力平衡状態を式 (6) で検出する場合、温度に対する特性を検定するだけで充分と考えられた。しかし、差圧計には Fig. 3 の上下から圧力が作用するばかりでなく、左右の横からも圧力が加わるため、ダイアフラムに横からの圧縮による応力が加わることで、気体の誘電率も圧力が 10 MPa 以上になると 0.1 MPa の数十パーセントも大きくなることを考慮して、差圧計の特性検定には圧力に対する検定も必要であることが判明した。

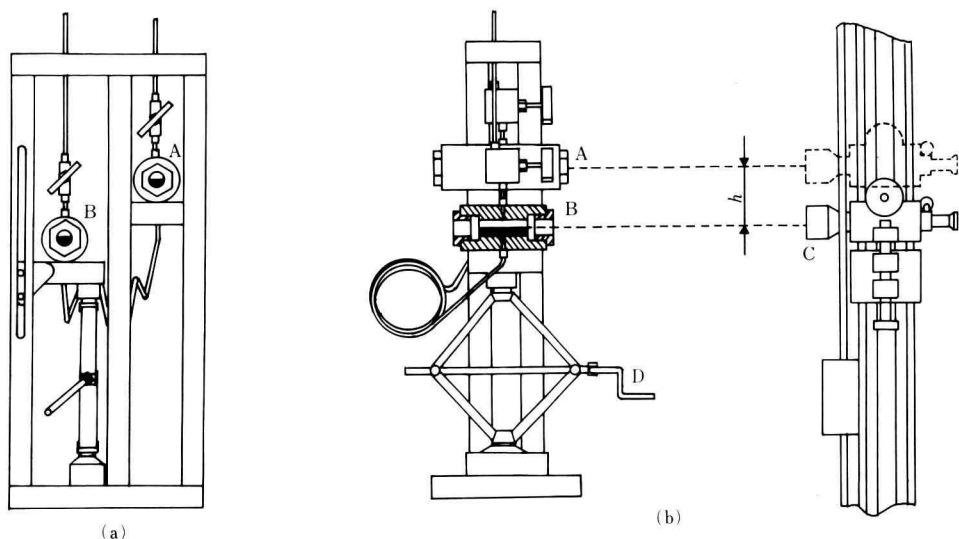
4. 圧力差検定装置および検定方法

ダイアフラム上下の圧力差検定装置を Fig. 6 および Fig. 7 に示した。

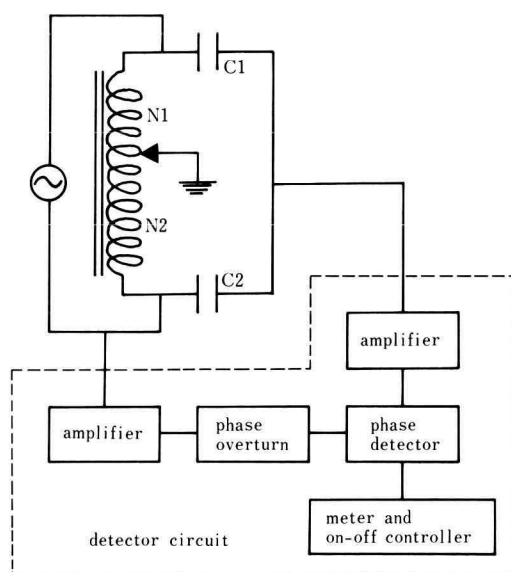


- | | |
|---|---------------------------------------|
| A: diaphragm type pressure balance detector | F: nitrogen bottle (up to 17 MPa) |
| B: mercury manometer | H: electric heater |
| C: platinum resistance thermometer | P: pressure gauge |
| D: thermostated bath | R: cooler |
| E: nitrogen bottle (up to 13 MPa) | $V_1 \sim V_3$: high pressure valves |

Fig. 6. Experimental apparatus.



A, B: mercury vessels C: travelling microscope D: height adjuster h: pressure difference
Fig. 7. Mercury manometer for high pressure



C1: diaphragm type pressure balance detector
C2: condenser (10pF) N1, N2: ratio-former

Fig. 8. Principle of transformer bridge

Fig. 6 に示すように、差圧計 A を恒温槽 D 内に設置し、白金抵抗測温体 C で温度を測定し、所定の温度には電熱ヒータ H と冷却コイル R で調節する。系内の圧力は、高圧弁 V_1 を開いた状態で、高圧窒素ポンペ E

(13 MPa まで) および F (17 MPa まで) から窒素ガスを導入することによって所定の圧力に調節する。恒温槽内の温度が一定になった状態で、高圧弁 V_1 を閉じ、水銀マンオメータ B によってダイアフラム上下に圧力差を発生させる。すなわち Fig. 7 に示すように、ガラス窓を備え水銀を封入した A, B 2 個の容器を水銀を充填したパイプで結んだ高圧用マンオメータを製作し、この A, B 2 個の容器に高さの差をつけることによってダイアフラム上下に圧力差を発生させた。微調整を行うためマンオメータ容器の移動にはジャッキ D を使用し、圧力差検出用の変成器ブリッジの平衡がくずれた時の水銀柱 h をカセットメータ C によって計測した。変成器ブリッジの原理図を Fig. 8 に示す。

5. 検 定 結 果

本装置は PVT 関係の実験装置の一部として使用されるが、温度範囲 243.15~473.15 K、圧力範囲 17 MPa までを適用範囲として設計された。したがって、上述の温度および圧力範囲にわたって検定を行った。PVT 関係実験装置は数気圧以上の高圧測定を目的としているため、ダイアフラムには厚さ 30 μm のステンレス SUS 304 の箔を使用しており、圧力差の再現性や検定精度を約 5 mmHg (0.67 kPa) 以内とした。

検定は、PVT 関係実験装置に使用する前と、3 本の

Table 1. Coefficients for series 1

a_1	-1.199×10^{-2}
a_2	4.835×10^{-3}
a_3	-5.48
a_4	-2.2×10^{-12}
b_1	0
b_2	0

$$\Delta P(\text{kPa}), \tau = \frac{T(\text{K})}{100}, P(\text{MPa})$$

Table 2. Coefficients for series 2

a_1	-1.193×10^{-2}
a_2	4.71×10^{-3}
a_3	-5.5
a_4	-4.4×10^{-12}
b_1	0
b_2	0

$$\Delta P(\text{kPa}), \tau = \frac{T(\text{K})}{100}, P(\text{MPa})$$

等容線に沿った PVT 関係の実験を行った後の 2 回について行われた。前者をシリーズ 1, 後者をシリーズ 2 として区別する。

シリーズ 1 では, 圧力 0.1, 5.0, 9.9 および 13.8 MPa の各等圧線に沿って温度 241~473 K の範囲で, シリーズ 2 では, 圧力 0.1, 5.0, 9.9, 13.8 および 16.8 MPa の各等圧線に沿って温度 245~473 K の範囲でそれぞ

れ検定した。

検定結果の整理のため, 実験結果にもとづいて相関式を作成した。実験結果を検討したところ, 大部分の領域において, 温度と圧力に関してともに圧力差は線形の関係にあり, 低温域と高温域の一部で温度に対して線形からわずかに離れることが判明した。したがって相関式の形を次式とし, シリーズ 1 に対して実測点 342 点, シリーズ 2 に対して実測点 176 点に対してそれぞれ最小二乗法によって次式の係数を決定した。

$$\Delta P = a_1 + a_2 \tau + a_3 \tau^{-10} + a_4 \tau^{12} + (b_1 + b_2 \tau) P \quad (11)$$

ここに ΔP =(ダイアフラムの下側の圧力)-(電極側の圧力), $\tau = T/100$, $T(\text{K})$, $P(\text{MPa})$ である。

式 (11) のシリーズ別の係数を Table 1 および 2 に示した。検定精度を各シリーズについて $\pm 2 \text{ mmHg}$ (0.27 kPa) とすると, 式 (11) において, $b_1=0$, $b_2=0$ としても各標準偏差はほとんど同じであり, 圧力依存性は確認されなかった。Fig. 9 には圧力差補正值と温度の関係, Fig. 10 には各シリーズ別の等温線に沿った圧力依存性を示した。また, Fig. 11 には等圧線に沿った各実測値の温度依存性を式 (11) からの偏差で示した。Fig. 10 および 11 から圧力依存性を分離することは不可能である。

6. あとがき

本研究によって次の結論が得られた。

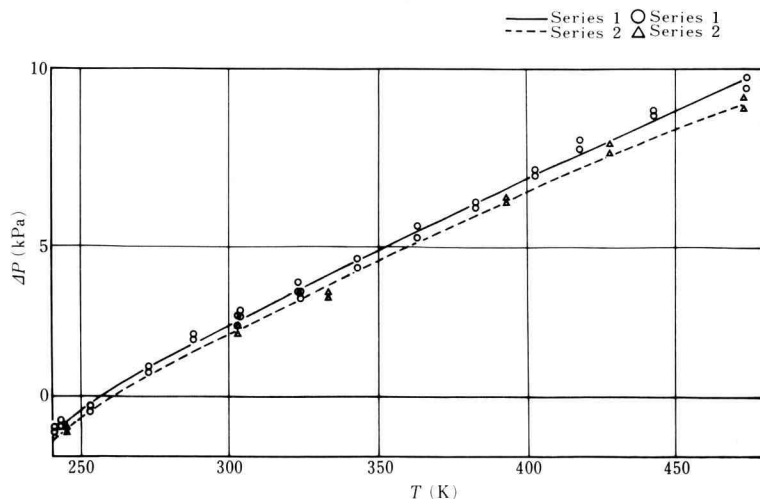
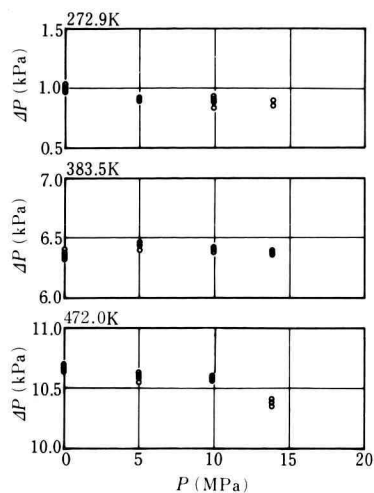
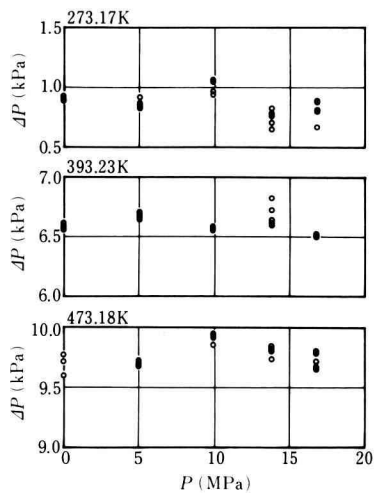


Fig. 9. Calibration results of pressure correction of diaphragm

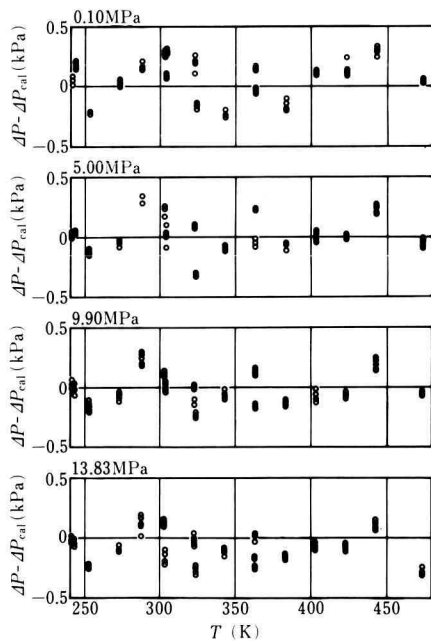


(a) Series 1

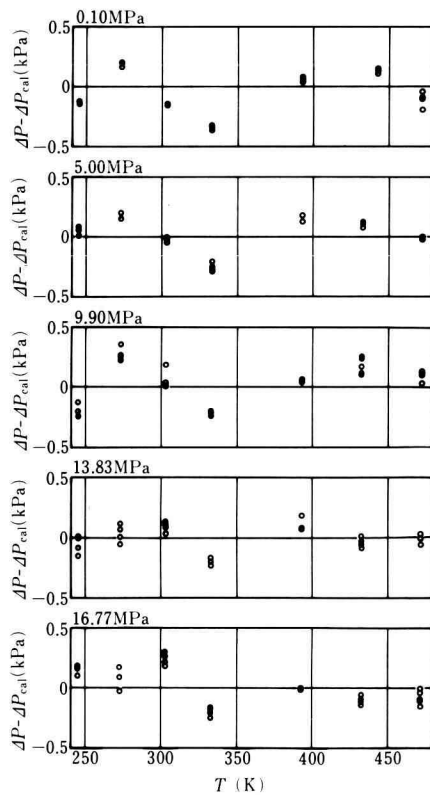


(b) Series 2

Fig. 10. Pressure dependence of pressure correction along isotherms



(a) Series 1



(b) Series 2

Fig. 11. Deviation of pressure correction from Eq. (11)

(1) 電気容量式ダイアフラム差圧計の圧力差補正は、温度ばかりでなく圧力に対しても検定を行うことが重要である。しかし、差圧計を耐圧容器内に密封し二重容器形にした場合、圧力 17 MPa 程度では式 (10) の関係が成立し、圧力差補正值への圧力依存性は無視できることが実験的に確認された。

(2) 温度および圧力に対する圧力差補正值の検定方法を確立し、検定装置を製作した。さらに高圧域における検定が可能である。

おわりに、技術職員の佐藤智明氏に図表のまとめでご協力いただいた。感謝申し上げます。

文 献

- 1) 小口・ほか 4 名, 機論, Vol. 41, No. 344 (昭 50-4), 1226.
- 2) 小口・ほか 2 名, 機論, Vol. 50, No. 459 (昭 59-11), 2606.
- 3) 日本機械学会編, 機械工学便覧, 1987, A 4-75.
- 4) K. Oguchi, Y. Takaishi, J. Kijima and I. Tanishita, Proc. of the 10th Intern. Conf. on the Prop. of Steam, Vol. 1, 132 (1984), Moscow, ed. by V.V. Sytchev and A.A. Aleksandrov, pub. by Mir. Publishers, Moscow.