

菊川の「応力分布の測定において標点距離が有限なることによる誤差の補正方法」の一拡張

大井 光 四 郎

抵抗線ひずみ計を用いてひずみを測定するとき、ゲージ長が有限であるために生ずる誤差の補正方法に関する菊川の着想を、少し拡張して、実用に適した方法を提案する。

1. まえがき

物体の表面のひずみが一様でない場合、たとえば切欠き底部の応力集中を問題にするようなときに、ひずみ計を用いて測定すると、ゲージ長が有限であるために、ゲージ長の中のひずみの平均値を測定することになって、真のひずみの値が得られない。これに対して古くから Rühl-Fischer の名で呼ばれる補正方法が知られている。表題に引用した菊川の論文¹⁾はすぐれた着想に基づいてこの種の問題を取り扱ったものである。本文ではこの菊川の方法を少し拡張することを試みる。順序として最初に菊川の方法を紹介するが、原論文とはおもむきを変えて、なるべく初等的な誘導を行なう。

2. 菊川の方法

物体の表面のひずみの x 成分 ε_x の x 軸に沿っての分布が次のように二次式で表わされるものとする。ここではすべて x 方向のひずみばかりを問題にするから ε_x の添字を省略して ε で表わす。すなわち $\varepsilon(x)$ は点 x におけるひずみの x 成分を意味する。

$$\varepsilon(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1)$$

このひずみをゲージ長 l のひずみ計で測定したとする。ひずみ計が正確に動作すると仮定すれば、われわれが得る値は l の間のひずみの平均値である。ひずみ計の位置をゲージ長の中点で代表させると平均値 $\bar{\varepsilon}(x)$ は

$$\bar{\varepsilon}(x) = \frac{1}{l} \int_{x-\frac{l}{2}}^{x+\frac{l}{2}} \varepsilon(x) dx \quad (2)$$

である。これに (1) を代入して計算すれば

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}(x) &= a_0 + a_1x + a_2 \left\{ x^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right\} \\ &= \varepsilon(x) + \frac{a_2 l^2}{12} \quad (3) \end{aligned}$$

となる。すなわち曲線 $y = \bar{\varepsilon}(x)$ は $y = \varepsilon(x)$ の形を変えず単に $a_2 l^2 / 12$ だけ y 方向に平行移動させたものである (第 1 図)。 $\bar{\varepsilon}(x)$ は多数点の測定を繰り返せば精密に描くことができる。これを逆に $-a_2 l^2 / 12$ だけ平行移動さ

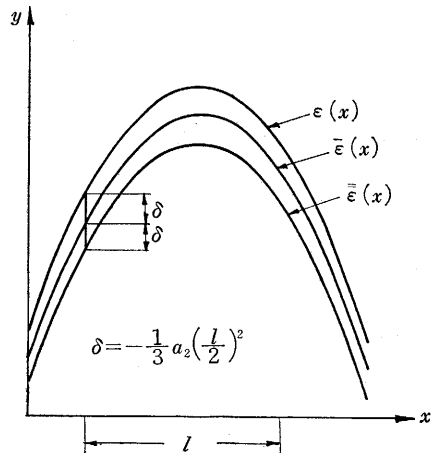
せば $\varepsilon(x)$ を知ることができる。したがってこの $a_2 l^2 / 12$ の値を知ることが問題になる。そのために $\bar{\varepsilon}(x)$ に再び同様に平均値をとる操作を繰り返す。すなわち

$$\bar{\bar{\varepsilon}}(x) = \frac{1}{l} \int_{x-\frac{l}{2}}^{x+\frac{l}{2}} \bar{\varepsilon}(x) dx \quad (4)$$

$\varepsilon(x)$ と $\bar{\varepsilon}(x)$ は同じ形の二次曲線であるから、 $\bar{\bar{\varepsilon}}(x)$ は $\bar{\varepsilon}(x)$ を同じく $a_2 l^2 / 12$ だけ平行移動させたものになる。したがって

$$\varepsilon(x) = \bar{\bar{\varepsilon}}(x) + \{ \bar{\varepsilon}(x) - \bar{\bar{\varepsilon}}(x) \} \quad (5)$$

とすれば求める $\varepsilon(x)$ を得ることができる。



第 1 図 $\varepsilon(x)$ が二次式で表わされる場合

菊川は (4) の積分を行なうために数値積分のガウスの方法のなかの代表点が 2 点の場合を採用した。すなわち一般に $f(x)$ を十分になめらかな関数とするとき次の近似式が成り立つ。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{l} \int_{x-\frac{l}{2}}^{x+\frac{l}{2}} f(x) dx \\ &\doteq \frac{1}{2} \left\{ f \left(x + \frac{l}{\sqrt{12}} \right) + f \left(x - \frac{l}{\sqrt{12}} \right) \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

なお $f(x)$ が三次までの多項式ならば (6) は正確な積分値を与えることも良く知られていることである。(6)

式中の $1/\sqrt{12}$ という数は、今後たびたび出てくるのでこれを γ で表わすことにする。

すなわち

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{12}} \quad (7)$$

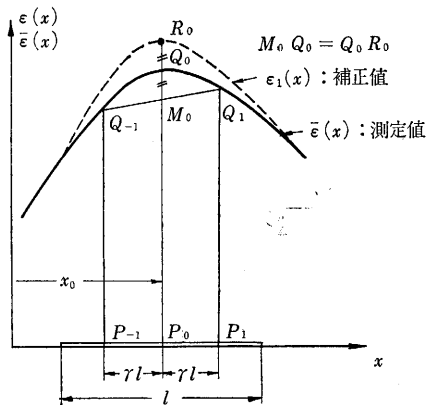
今の場合 $\bar{\varepsilon}(x)$ は二次式であるから正確に

$$\bar{\varepsilon}(x) = \frac{1}{2} \{ \bar{\varepsilon}(x+\gamma l) + \bar{\varepsilon}(x-\gamma l) \}$$

となり、したがって (5) は次式になる。

$$\varepsilon(x) = \bar{\varepsilon}(x) + \left[\bar{\varepsilon}(x) - \frac{1}{2} \{ \bar{\varepsilon}(x+\gamma l) + \bar{\varepsilon}(x-\gamma l) \} \right] \quad (8)$$

この式の右辺には測定値 $\bar{\varepsilon}(x)$ のみが含まれている。(8)式に相当する操作を測定結果のグラフの上で行なうことも簡単である。すなわち第2図において注目している点 $P_0(x_0)$ の両側に $\pm \gamma l$ だけ隔った2点 $P_{-1}(x_0 - \gamma l)$ および $P_1(x_0 + \gamma l)$ を取り、 P_{-1}, P_0, P_1 に相当する $y = \bar{\varepsilon}(x)$ 上の点を Q_{-1}, Q_0, Q_1 とする。弦 $Q_{-1}Q_1$ の中点を M_0 とし、弧 $Q_{-1}Q_0Q_1$ のキャンバ M_0Q_0 をそれに等しく延長して $Q_0R_0 = M_0Q_0$ とすれば R_0 は求める点になる。(8)式またはこれに相当する図上の操作を「操作 $K_1(\gamma)$ 」と名付けよう。この K_1 の添字1は第1近似の意味である。



第2図 菊川の第1近似

これまで $\varepsilon(x)$ を二次式と考えて、その二次の項の影響を補正することを目標にしてきたが、操作 $K_1(\gamma)$ は実は三次の項の影響まで消去することになっている。

すなわち

$$\varepsilon(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

とおき計算すれば正確に (8) 式が成り立っていることがわかる。なおこのときの補正項 Q_0R_0 は

$$Q_0R_0 = -\left(\frac{1}{3}a_2 + a_3x\right)\left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (9)$$

である。

さらに $\varepsilon(x)$ が次のように x の五次式で表わされるものとする。

$$\varepsilon(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (10)$$

このときには操作 $K_1(\gamma)$ は $\varepsilon(x)$ の第1近似値を与えるが、正確な $\varepsilon(x)$ の値は与えない。そこでこの操作の結果を $\varepsilon_1(x)$ と記すことにする。

すなわち

$$\varepsilon_1(x) \equiv \bar{\varepsilon}(x) + \left[\bar{\varepsilon}(x) - \frac{1}{2} \{ \bar{\varepsilon}(x+\gamma l) + \bar{\varepsilon}(x-\gamma l) \} \right] \quad (11)$$

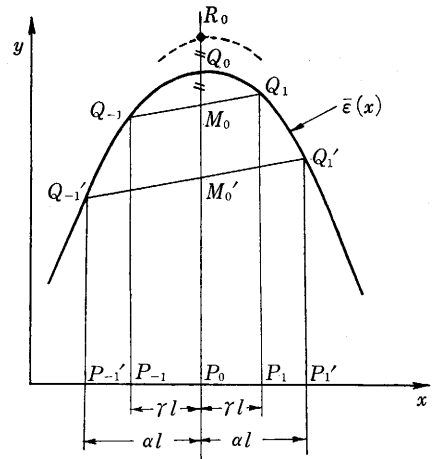
この式に (10) を代入して計算すれば

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1(x) + \frac{26}{45}(a_4 + 5a_5x)\left(\frac{l}{2}\right)^4 \quad (12)$$

となる。菊川は上記の論文において a_4, a_5 を含む項までの補正をする第2近似の方法についても述べているが、これについては後に触れる。

3. ゲージ間距離を変えた場合

菊川の方法を実際問題に適用する場合に $\gamma = 1/\sqrt{12}$ の値を採用すると不便なことがある。そこで γ の値の代わりに一般の α を用いて $K_1(\gamma)$ の代わりになる操作を求めよう。第3図においてわれわれが必要とするのは補正



第3図 ゲージ間距離を変えた場合

項 Q_0R_0 である。簡単のために再び $\varepsilon(x)$ は二次式であると仮定する。同図中において着目している点 $P_0(x_0)$ の両側に αl の距離にある点 P_{-1}', P_1' をとり、それに対応する $y = \bar{\varepsilon}(x)$ 上の点を Q_{-1}', Q_1' とし、 $Q_{-1}'Q_1'$ の中点を M_0' とする。 $\bar{\varepsilon}(x)$ が二次式ならばキャンバ $M_0'Q_0$ および $M_0'Q_0$ の長さは対応する弧 $Q_{-1}Q_0Q_1$ および $Q_{-1}'Q_0Q_1'$ の x 軸への正射影 $P_{-1}P_1$ および $P_{-1}'P_1'$ の長さの比の二乗に比例することは容易に証明できる。

すなわち

$$\frac{M_0Q_0}{M_0'Q_0} = \frac{\gamma^2}{\alpha^2}$$

したがって補正項 Q_0R_0 は

$$Q_0 R_0 = M_0 Q_0 = \frac{\gamma^2}{\alpha^2} M_0' Q_0 = \frac{1}{12 \alpha^2} M_0' Q_0$$

そこで任意の α に対し $K_1(\gamma)$ とよく似た操作が得られた。ただしこの場合には補正項はキャンバの $1/12 \alpha^2$ 倍となる。これを式で表現すれば

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(x) &\equiv \bar{\varepsilon}(x) \\ &+ \frac{1}{12 \alpha^2} \left[\bar{\varepsilon}(x) - \frac{1}{2} \left\{ \bar{\varepsilon}(x + \alpha l) + \bar{\varepsilon}(x - \alpha l) \right\} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

となる。この操作を $K_1(\alpha)$ と名付けることにする。この操作も $K_1(\gamma)$ と同様に $\varepsilon(x)$ が三次式ならば、正確な結果を与え、そのときの補正項は $K_1(\gamma)$ の場合と等しく

$$Q_0 R_0 = - \left(\frac{1}{3} a_2 + a_3 x \right) \left(\frac{l}{2} \right)^2 \quad (14)$$

であり、また $\varepsilon(x)$ の五次の項までとれば

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1(x) + \left(\frac{7}{15} + \frac{4 \alpha^2}{3} \right) (a_4 + 5 a_5 x) \left(\frac{l}{2} \right)^4 \quad (15)$$

となる。

なお $\alpha=1, 2, 3$ としたときにはキャンバに対する補正係数 $1/12 \alpha^2$ はそれぞれ $1/12 \doteq 0.1, 1/48 \doteq 0.02, 1/108 \doteq 0.01$ となる。これらの数字は実際の測定結果のグラフを吟味するときに、いちいち作図または計算によって補正を実行しなくても、グラフの中にゲージ長を思い浮かべることによって、誤差の大きさの見当をつけるのに役立つ。とくに $\alpha=1/2$ すなわちゲージ長 l に相当する弧に対してはキャンバの $1/3$ を加えて補正すれば良いことになる。

4. 適当なゲージ間隔

$y = \bar{\varepsilon}(x)$ の曲線を正確に描くためには測定点を密に取らなければならない。もしそれを粗く取って補間によって結んだ場合には、そのための誤差が混入してくる。なるべくならばなまの測定値を用いることが望ましい。1点 $P_0(x_0)$ におけるひずみの値 $\varepsilon(x_0)$ に着目するときには P_0 およびその両側の $x_0 \pm \alpha l$ における $\bar{\varepsilon}$ の値を知れば足りるが、その場合もし $\alpha = \gamma (\doteq 0.29)$ の値を採用するとゲージ長が重なり合うことになり、特別の場合を除いてはゲージを数回はり直して測定を繰り返すことが必要になる。この点に関しては $\alpha > 1$ に選べば便利である。

α をあまり小さく選ぶと上述のような不便のほかにも別の問題が生ずる。すなわち補正係数 $1/12 \alpha^2$ が大きくなって、測定に伴うランダムな誤差が拡大されることになる。 $\alpha \geq \gamma$ ならば補正係数は 1 より小さくなるのでこのようなことは生じない。

α を大きく取り過ぎると $\varepsilon(x)$ の展開式の高次の項の

影響が出てくる。

次に別の種類の誤差について考える。ゲージ間の距離が $d = \alpha l$ のつもりであるのに実際には $d + \Delta d = (\alpha + \Delta \alpha) l$ であった場合である。実際問題としてはゲージ間の距離の誤差が一般に左右対称ではないであろうが、ここでの議論の目的は誤差の絶対値を知ることにはなく、その大きさの程度を知るためであるので簡単のために上記のように距離の誤差が左右ともに Δd であるとする。距離が正確であるときには

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(x_0) &= \bar{\varepsilon}(x_0) + \frac{1}{12 \alpha^2} \left[\bar{\varepsilon}(x_0) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left\{ \bar{\varepsilon}(x_0 + d) + \bar{\varepsilon}(x_0 - d) \right\} \right] \end{aligned}$$

であるが、距離が間違っているために、われわれが得る結果は

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(x_0) + \Delta \varepsilon_1(x_0) &= \bar{\varepsilon}(x_0) + \frac{1}{12 \alpha^2} \left[\bar{\varepsilon}(x_0) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left\{ \bar{\varepsilon}(x_0 + \overline{d + \Delta d}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \bar{\varepsilon}(x_0 - \overline{d + \Delta d}) \right\} \right] \end{aligned}$$

となる。ここで $\varepsilon(x)$ の展開式の三次までの項をとり計算すると Δd のために生ずる誤差は

$$\Delta \varepsilon_1(x_0) = - \frac{l}{6 \alpha} (a_2 + 3 a_3 x) \Delta d$$

これを (14) の正しい第一次補正項と比較すると

$$\frac{\Delta \varepsilon_1(x_0)}{\text{正しい第一次補正項}} = \frac{2 \Delta d}{d} = \frac{2 \Delta \alpha}{\alpha} \quad (16)$$

となり、一定の Δd に対しては d すなわち α が大きい方が有利であることがわかる。とくに $\alpha = \gamma$ のときについて実際の数字を当たってみる。 Δd をゲージ長 l の 1% とすると $\Delta \alpha = 0.01$ であるから (16) により補正項の誤差は正しい補正項の 6.9% に達する。補正項そのものも元来小さいものであるから、6.9% という数字もさして困るほどではないが、はりつける位置の誤差をゲージ長の 1% に押えての話であるから、実測の立場からは注意を要する。

一般にゲージ長が極度に短いものは測定精度も落ちるとされている。そこである測定に際し適当なゲージ長およびゲージ間隔を決定するのは以上の所論からは、一概には決めがたいが、 α の値に関してはこれを γ より小さくするのは不適當で、また 2 以上にとるのも補正係数 $1/12 \alpha^2$ が小さくなるので、補正という点では意味が薄くなる。逆に表現すれば $\alpha > 2$ として測定した場合に、それで無理なく曲線が描けるときには補正の必要がほとんどないということになる。

5. 第二次の補正

前節で述べたように一次の補正でも実際には誤差が混

入しやすいので、さらに二次の補正まで行なって効果があるためには測定がきわめて精密に行なわれることが前提条件である。しかし実測の結果を吟味するためにも二次補正の方法を検討しておくことは無駄ではあるまい。

ゲージは P_0 を中心として対称に $P_{-2}, P_{-1}, P_0, P_1, P_2$ の順に並んでいるものとする。その距離は

$$P_{-1}P_0 = P_0P_1 = d = \alpha l$$

$$P_{-2}P_0 = P_0P_2 = D = \beta l$$

であるとする。2種類の組合せ $P_{-1}P_0P_1$ および $P_{-2}P_0P_2$ を用いて操作 $K_1(\alpha), K_1(\beta)$ を施す。その結果は $\varepsilon(x)$ の三次の項まで取れば一致するはずであるが、五次までの項を取ると一致しない。両者を区別するために補正した結果をそれぞれ

$$\varepsilon_1(x, \alpha), \varepsilon_1(x, \beta)$$

で表わすことにする。五次まで取ったひずみの値 $\varepsilon(x)$ は (15) 式により、それぞれ

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1(x, \alpha) + \left(\frac{7}{15} + \frac{4}{3}\alpha^2\right)(a_4 + 5a_5x) \left(\frac{l}{2}\right)^4 \quad (17)$$

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1(x, \beta) + \left(\frac{7}{15} + \frac{4}{3}\beta^2\right)(a_4 + 5a_5x) \left(\frac{l}{2}\right)^4 \quad (18)$$

となる。この両者の差をとり整理すれば

$$(a_4 + 5a_5x) \left(\frac{l}{2}\right)^4$$

$$= \frac{3}{4(\beta^2 - \alpha^2)} \{\varepsilon_1(x, \alpha) - \varepsilon_1(x, \beta)\}$$

これを (17) に代入して $\varepsilon(x)$ に対する第二近似 $\varepsilon_2(x)$ として

$$\varepsilon_2(x) \equiv \varepsilon_1(x, \alpha)$$

$$+ \frac{1}{\beta^2 - \alpha^2} \left(\frac{7}{20} + \alpha^2\right) \{\varepsilon_1(x, \alpha) - \varepsilon_1(x, \beta)\} \quad (19)$$

を得る。 $\varepsilon_2(x)$ は $\varepsilon(x)$ の展開式の五次の項まで正しい結果を与えることになる。とくにゲージが等間隔に並んでいるときには $\beta = 2\alpha$ とおき

$$\varepsilon_2(x) \equiv \varepsilon_1(x, \alpha)$$

$$+ \left(\frac{7}{60\alpha^2} + \frac{1}{3}\right) \{\varepsilon_1(x, \alpha) - \varepsilon_1(x, 2\alpha)\} \quad (20)$$

さらにここで $\alpha = \gamma$ とおき式を変形すれば次の菊川の結果が得られる。

$$\varepsilon_2(x) \equiv \varepsilon_1(x, \gamma)$$

$$+ \frac{13}{15} \left[\bar{\varepsilon}(x) - \frac{1}{2} \{\varepsilon_1(x + \gamma l, \gamma) + \varepsilon_1(x - \gamma l, \gamma)\} \right]$$

6. 数値計算式

二次の補正までも図上で行なうのは作図による誤差が混入しておもしろくない。そこで補正を測定結果から直接計算によって行なう方が有利である。次にそれに必要

な計算式を並べておく。その実質的内容はこれまで述べたことにほかならない。ゲージ間の距離は一様でこれを $d = \alpha l$ とする。

$P_{-2}(x_0 - 2d), P_{-1}(x_0 - d), P_0(x_0), P_1(x_0 + d), P_2(x_0 + 2d)$ における測定値 $\bar{\varepsilon}(x)$ を $\bar{y}_{-2}, \bar{y}_{-1}, \bar{y}_0, \bar{y}_1, \bar{y}_2$ とする。

第一次補正:

$$\varepsilon(x_0) \equiv \varepsilon_1(x_0, \alpha) = \bar{y}_0 + \frac{1}{12\alpha^2} \left\{ \bar{y}_0 - \frac{1}{2}(\bar{y}_{-1} + \bar{y}_1) \right\}$$

第二次補正:

$$\varepsilon(x_0) \equiv \varepsilon_2(x_0, \alpha) = \bar{y}_0 + \frac{1}{288\alpha^2} \left\{ \left(30 + \frac{21}{10\alpha^2}\right) \bar{y}_0 \right.$$

$$\left. - \left(16 + \frac{7}{5\alpha^2}\right) (\bar{y}_{-1} + \bar{y}_1) \right.$$

$$\left. + \left(1 + \frac{7}{20\alpha^2}\right) (\bar{y}_{-2} + \bar{y}_2) \right\}$$

$\alpha = \gamma$ の場合は簡単になって

第一次補正:

$$\varepsilon(x_0) \equiv \varepsilon_1(x_0, \gamma) = 2\bar{y}_0 - \frac{1}{2}(\bar{y}_{-1} + \bar{y}_1)$$

第二次補正:

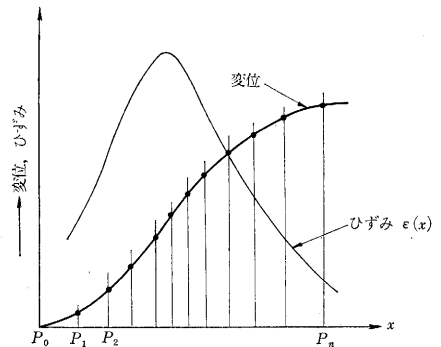
$$\varepsilon(x_0) \equiv \varepsilon_2(x_0, \gamma) = \frac{33}{10}\bar{y}_0 - \frac{41}{30}(\bar{y}_{-1} + \bar{y}_1)$$

$$+ \frac{13}{60}(\bar{y}_{-2} + \bar{y}_2)$$

となる。

7. Rühl-Fischer の方法と渡辺・泉のゲージ

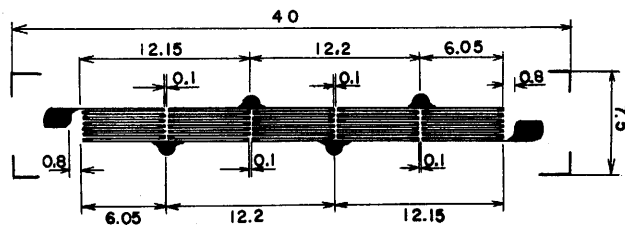
まず Rühl-Fischer の方法の要点を述べる。問題は 2. の最初に述べたのと同様にひずみの x 成分の x 軸に沿った分布、とくにその極値を求めることである。ひずみの分布を $\varepsilon(x)$ とする。ある点たとえば P_0 を基準点にとり、そのほかにいくつかの代表的 P_1, P_2, \dots, P_n をとる。 P_0 を不動点と仮定して P_1, P_2, \dots, P_n の P_0 に対する変位量を縦軸にとる (第4図)。これをなめらかな曲線で結ぶと、曲線の接線の勾配がその点におけるひずみを与えることになる。勾配の最も急な点は



第4図 Rühl-Fischer の方法

ひずみの極値を与える。この操作は接線を引くという誤差を生じやすい作業を必要とする。かりに各点を結ぶのに適当な形の関数を仮定して、数値計算によって勾配を定めるとしても、最急勾配を定めるのは誤差が生じやすい。機械的ひずみ計が最も信頼しうる測定方法であった時代には Rühl-Fischer の方法も十分に存在意義があった。機械的ひずみ計の特色として、 P_1, P_2, \dots, P_n の変位量の絶対値はゲージ長 $P_0P_1, P_0P_2, \dots, P_0P_n$ にあまり関係なく同程度の絶対誤差で測定しうる。この点は抵抗線ひずみ計と少し異なっている。ゲージ長が $P_0P_1, P_0P_2, \dots, P_0P_n$ のひずみ計を用いて測定するときにはおおざっぱにいえば、各区間のひずみの平均値が同一の精度で測定されるので、それにゲージ長を掛けて変位量を求めると、変位量の絶対値についていえばゲージ長の長いものの方が精度が悪くなる。それゆえかなり測定精度の高い抵抗線ひずみ計が得られている現在、抵抗線ひずみ計を用いながら、なお微分操作を含む方法を採用することは得策ではない。

渡辺・泉²⁾は第5図のようなフォイル・ゲージを開発した。これは Rühl-Fischer の方法を適用しやすいように特に工夫されているが、むしろこの場合は5枚のゲージを個々に切り離し、それぞれ独立に測定を行なって、その結果に 6. に記した数値計算法を適用する方が妥当ではあるまいか。実際に普通の単軸ゲージを用いてこの方法を行なおうとすると、ベースの長さが長くて、 α を 2 以下にするのは困難である。また数枚のゲージを相互間の距離を正確に接着するのもなかなかむずかしい。その意味で渡辺・泉のゲージは図面から推測すると α が約 1.2 であって、ゲージさえ正確に作られていれば接着の際のゲージ間の距離も正確になるから、使用が簡易



第5図 渡辺・泉のフォイル・ゲージ

になり、この種の問題に寄与するところが大きいものと思う。

8. むすび

抵抗線ひずみ計を用いて一様でなく分布しているひずみを測定するとき、ゲージ長が有限であるために生ずる誤差の補正方法に関する菊川の方法を少し拡張して応用に便利な形式を提案した。そしてこの方法を適用するのに便利なゲージがほとんど完成している点に注意したい。

なお本文中では x 軸は真直なものと暗黙のうちに仮定して述べたが、物体表面が曲面であっても、曲面に沿った弧の長さを x とし、その弧の方向のひずみ成分を問題にするときにはまったく同様に取り扱うことができることを付言させていただく。(1964年12月9日受理)

文 献

- 1) 菊川 真: 応力分布の測定において、標点距離が有限なることによる誤差の一補正方法, 材料試験 Vol. 2, No. 8, 昭 28. 9 月.
- 2) O. Watanabe, Y. Izumi: An Experiment on a New Type of Resistance Foil Strain Gage for Analysis of Concentrated Stresses, M. Dean, R.D. Douglas, Semiconductor and Conventional Strain Gages, Academic Press, New York-London, 1962.

次 号 予 告 (3 月 号)

研究解説

| | |
|-----------------------------|---|
| 棒の縦衝撃と塑性波の伝ば (1) | 山田 嘉 昭 |
| ルビーレーザ光の空間的コヒーレンス | 小瀬 輝 次 佐々木 秀行 |
| PCM-PAM ハイブリッドテレメータ | 野 村 民 也 安 田 靖 彦 横 山 茂 士 村 田 悠 紀 夫 神 子 冬 雄 |
| 不可逆過程の熱力学の膜現象への応用 (2) | 妹尾 学 鈴木 喬 山 辺 武 郎 |

海外事情

| | |
|-------------------|---------|
| 北京の10日間 | |
| 一日中真空技術交流の旅 | 富 永 五 郎 |

研究速報

| | |
|--------------|------------------|
| 光可変移相器 | 浜 崎 襄 二 野 口 宏 |
|--------------|------------------|