

# 新しい容量型歪計

池 田 健 ・ 富 田 文 治

電氣的歪計としては、抵抗線歪計が廣く利用されているが、容量型やインダクタンス型歪計は外國でも實用的なものはほとんど作られていない。ここに述べる容量型歪計は靜的應力の測定には抵抗線歪計に優るとも劣らない程度に便利で安價でかつ精度も感度もよい。

## 1. は し が き

構造物や機械の部分の應力を測定するためには以前は主として機械的、光學的歪計が用いられていた。オクイゼン、フッゲンベルグ、マルテンス歪計がその例で、これらは一應精度や感度の點では實用的要求を満たしている。しかし最近強度上の諸問題の解析に計算的手段の外に實驗的手段を大いに利用するために、歪計としては多數個所の測定、遠隔測定の可能なこと等が要求されるようになった。このためには電氣的方法以外に、抵抗線型、容量型、インダクタンス型等が考えられている。この中で抵抗線歪計はアメリカで非常に發達しわが國でも實用化の段階にまで進んできており、動的應力の測定には現在のところ、他の追従を許さないほど便利であるが、靜的測定の場合には温度補償が完全でないと高い精度は期待し得ない。インダクタンス型は戦前ドイツで標點距離が短かく、輕量なものが作られたがその實用性はあまり知られていない。容量型は何故か實用された例は少ないがこれはおそらくすぐれた歪ゲージが作られなかつたためであろう。幸い筆者らの所で種々改良の結果よい性能をもつものができ、現在までに實驗室内の各種の測定や實際の構造物（バス、橋梁、ケーブルカー等）の多數個所の靜的測定に使用したところ極めて便利で確實な精度のよい結果が得られた。現在のところ動的應力測定には高い精度を期待し得ないが、靜的測定には經費の點では抵抗線歪計よりはるかに安く、精度も感度もよく温度變化の影響をほとんど受けないものができた。

## 2. 装置の概要

容量型歪計は大別して三つの主要部分から成立っている。すなわち、(a) 物體に生じた歪を電氣容量の變化に變換する装置、すなわち、電氣工學では一般に變換器

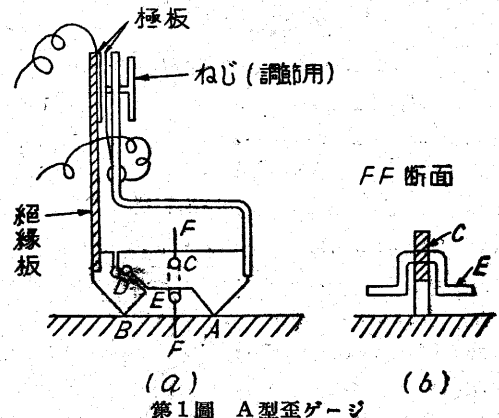
(transducer) またはピックアップといわれる部分で、應力測定學の分野では歪ゲージ (strain gage) と呼ばれ直接被測定物に取付ける部分と (b) この容量變化を指示する指示装置 (indicator) とさらに (c) 多數個所の測定のための切換え装置とである。歪ゲージとしては取り扱い（感度調整や較正も含む）が便利で、温度變化の影響がなくかつ安價であることと製品の均一性等が要求される。指示装置の部分は從來から研究されており、指示メータの一目盛が  $0.01 \mu F$  程度の感度を持つものは種々考案されているからその中で歪計として便利なものを利用すればよいわけである。多數個所の測定のための切換え装置としては、指示装置に自記記録装置が用いられれば、この装置も自動式が便利であるが、目下のところメータ指示方式であるから手動式の切換え装置を使用している。

## 3. 歪ゲージ（變換器またはピックアップ）

歪ゲージとしては次に示すような A 型、B 型の 2 種を製作した。B 型は輕量で取扱いが便利であるが、實用試驗の結果温度變化の影響を受けやすいので實驗室内の一定温度下の實驗にのみ適するが、一般に温度變化の影響を受けない A 型の使用を推奨したい。

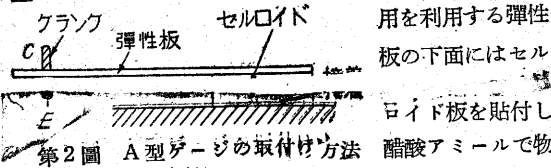
### a) A 型歪ゲージ

この歪ゲージは第 1 圖に示すような構造で絶縁材を除

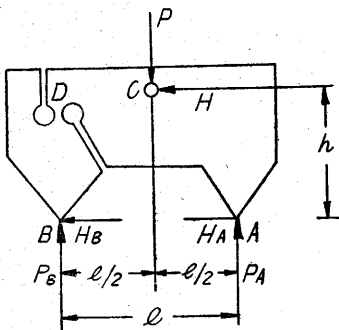


いて他は鋼で作られている。A および B はナイフエッジで被測定體への接觸點であり、D は彈性回轉中心の作用をする。AB 間の伸縮に應じて絶縁板は D を中心として

回轉し上部の極板間の間隙に變化を與えるようになってゐる。Cには約1mmφの円形をしたクランクが取り付けられ、これはC部で摩擦なく回轉できる。このクランクのE部を押えることにより歪ゲージを物體に取付ける。歪ゲージの押えには第2圖に示すように弾性板のばね作用を利用する弾性板の下面にはセルロイド板を貼付し



第2圖 A型歪ゲージの取付け方法  
體に固定する。A型歪ゲージはほとんど温度變化の影響を受けず、また次のような力學的根據によつて測定中ナイフエッジの送りやクリップを生じないようにしたものである。第3圖は供試物に歪が生じた場合にゲージに加



第3圖 A歪ゲージを物體に取付けた場合に働く力  
PおよびHはそれぞれ取付けによる垂直および水平分力、 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $H_A$ および $H_B$ はナイフエッジに働く力。

わる力を示している。P、HはC點に働く取付けの力の垂直と水平成分である。(注意をしないとゲージに無視できない水平分力が生ずるがあとでわかるようにこれはないことが望ましい)  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $H_A$ および $H_B$ はそれぞれナイフエッジの受ける垂直および水平の力の成分である。ここで力の釣合の條件から

$$P_A = P/2 - Hh/l, \quad P_B = P/2 + Hh/l, \quad H_A = H + H_B \quad (1)$$

$H_B$ は弾性回轉部の剛性kとAB間の距離變化 $le$ ( $e$ は歪に比例すから

$$H_B = kle \quad (2)$$

さて、歪が確實に測定されるためにはナイフエッジがはたらないことが必要である。 $\mu$ を摩擦係数とすれば

$$H_B < \mu P_B, \quad H_A < \mu P_A \quad (3)$$

$$\therefore kle < \mu B(P/2 + Hh/l) \quad (4)$$

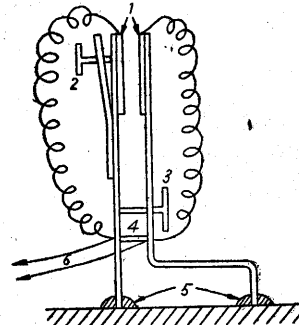
$$kle < \mu A(P/2 - Hh/l) - H$$

この式を見るとHが正の場合はB點がはたらないためには((4)の第1式)有利であるが、Aがはたらないためには((4)の第2式)不利である。Hが負ならば逆の關係になり、實際問題としてはこのような水平分力のないことが望ましい。従來の歪計にはこの點があまり考慮されていないが、この歪ゲージはクランクを通じて取付けられるから水平分力はほとんど加わらない。次にkの値はナイフエッジがはたらないためには小さい程よいが、弾性回轉部をあまり小さくすると強さが減るから、豫想される最大歪に對しはたらない條件と強さの條件を満すように設計しなければならない。 $\mu$ は大きい方が望ましいが控え

目に0.1以下に選ぶ方がよい。この他に歪ゲージに必要な條件は測定中のPの變化によつて電極の間隙が變化して讀みが變らないこと、いいかえるとPの變化によつてD點のまわりのモーメントを生じないことである。これは弾性回轉部が移動エッジの眞上になるように作ることと充される。

### b) B型歪ゲージ

B型歪ゲージは極めて軽く製作され物體への取付けは接着剤によつてなされ、特別の取付け装置を要しないことが特徴であるが、實用化試験の結果温度の影響を完全には避けることができない缺點がある。従つてあまり温度變化のない實驗室の使用にのみ適したもので、その構造の概要は第4圖に示すように相對する二つの絶縁體を

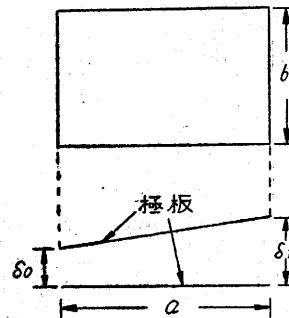


1: 極板(銀粉塗付)  
2: ネジ(微量調節用)  
3: ネジ(取付時の間隙調節用)  
4: 弾性支持棒  
5: 接着剤  
6: 導線  
第4圖 B型歪ゲージ

細い弾性棒で連結し、上端部の内側に銀粉を塗付するか、薄い銅板を貼つて極板にする。物體に接着する足の部分の間隔が標點距離と見なされ、この變化が弾性棒を支點として機械的に4倍擴大されて極板の間隙の變化になる。標點距離は2mm、5mm等であるがいずれも1.0g程度の重量である。物體への固定には酢酸アミールで接着する。

### c) 製品の均一性

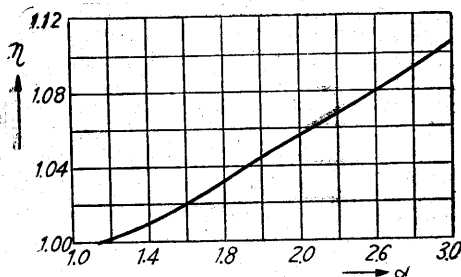
歪ゲージの感度 $\Delta c/\Delta \delta$ ( $c$ は容量、 $\delta$ は間隙)は初期の間隙に左右される。われわれは $\delta$ を直接に測定して調節するのではなく、後で述べるように初期の容量を一定にする方法で多數のゲージの感度を調節している。ゲージの製品の不均一には極板が平行でないこと、面積が一定でないこと等がある。面積は製作時の注意で比較的



第5圖 平行に作られてない極板

一定にし得るが、極板が平行でないために生ずる感度の差異は一應吟味する必要がある。今極板が第5圖のように平行でないとして、 $c$ (容量) = 一定の條件における感度係数 $\eta$ が $\delta_1/\delta_0$ によつてどう變化するかを計算すると第6圖のようになる。

すなわち極板が平行でないことによる感度の差異は平行度がいちじるしく悪くない限りほとんど無視できる。多くの歪ゲージの感度が比較的よい均一性を持つてゐるの

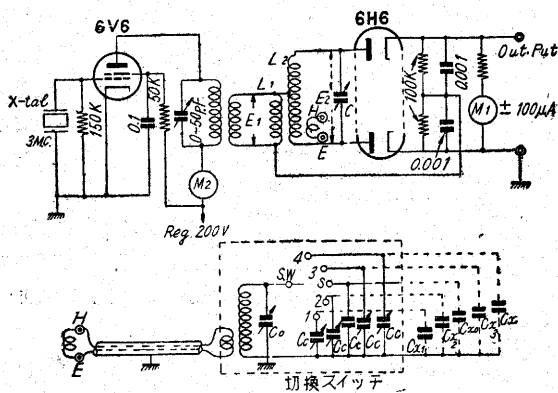


$\eta$  = 感度係数  $\alpha = \delta_1 / \delta_0$  および  $\delta_1$  はそれぞれ極板の最も接近した部分の間隔と最もはなれている部分の間隔

第 6 圖 極板が平行でないことによる感度係数の変化は主にこの理由によるものと思われる。

#### 4. 測定回路 (歪指示装置)

微小容量の変化を検出する方法にはいろいろの測定回路<sup>(2)</sup>が考案されているが、歪計用に使用する場合には感度と精度が十分である以外に使用上の便利さも必要である。例えば、指示メータが無歪状態で零を示し、その点を中心にして正負に直線部分を有する回路であれば多数点測定の場合に歪の正負判定に便利であり、使用するメータの大きさも制限を受けないから特に感度を上げて小さい歪を測定する場合にも便利である。これらの点を考えて第 7 図のような測定回路を製作した。この回路は対稱



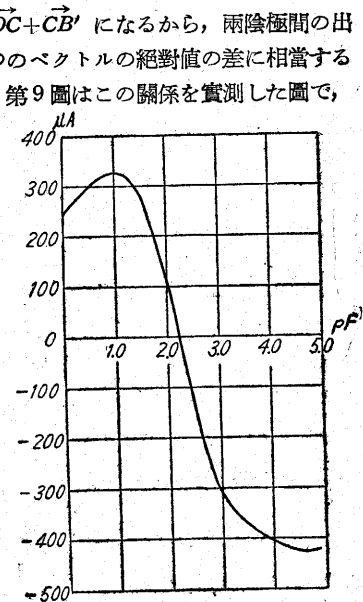
$M_1$ : 測定用メータ ( $\pm 100\mu A$ )  $M_2$ : 振振電圧監視用メータ S.W: 切換えスイッチ (10 點測定用)  $C_c$ : 補償用トリマー  $C_{x1}, C_{x2}, \dots$ : 歪ゲージ

第 7 圖 測定回路および切換えスイッチ

性をもっているから広い範囲に直線性があり、また電源電圧の影響をなるべく少なくする考慮がはらわれている。固定周波数を精確に保つために高周波発振器 (約 3 Mc) には安定度が高く温度の影響の少ない水晶発振器を使用している。この回路の大體の動作原理は次のようである。 $L_1, L_2$  は電磁的に結合していると同時に  $L_1$  の一端は  $L_2$  の中點に接続している。水晶発振器から  $L_1$  に電圧  $E_1$  が加わっている時、 $f = 1/2\pi\sqrt{L_2 C_x}$  ( $f$  は水晶の固有振動数) になる  $C$  のとき  $L_2$  と  $C$  は共振状態になり、 $E_2$  は最大になり  $E_1$  に対する位相差は  $\pi/2$  になる。 $C$  が

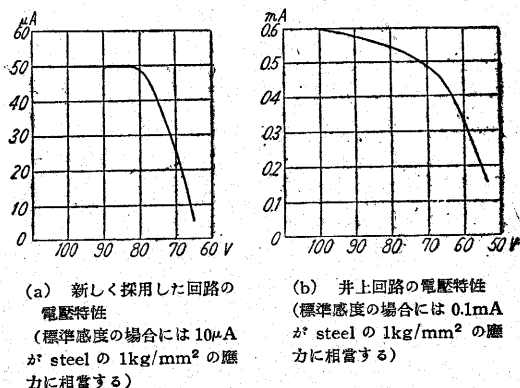
この値から変化すると  $E_2$  は絶対値も変化すると共に  $E_1$  に対する位相も急激に變る。これをベクトルの表わすと第 8 圖のようになる。 $E_1$  を  $OC$  とすると共振時の  $E_2$  は  $AB$  となり、これより  $C$  が増加すると  $E_2$  は  $A'B'$  で示されるような変化をする。 $A', B'$  はそれぞれ近似的に  $AC, BC$  を直径とする圆周上の點で  $\angle OCA'$  が位相角である。結局二つの 6H6 の陽陰極間の電圧は  $OC + CA'$  および  $OC + CB'$  になるから、兩陰極間の出力端子にはこの二つのベクトルの絶対値の差に相當する電圧があらわれる。第 9 圖はこの關係を實測した圖で、横軸に容量變化、縦軸に電流計の読みを示してある。電流計の指示は零點を中心にした部分は直線であるから正負に振れるメータを使えば歪の大きさや符號も同時にわかる。特に小さい歪測定の際には感度の高いメータを使用すればよいが、通常は精度の點を考慮して  $\pm 100\mu A$  のメータを使い、このフルスケールが軟鋼の應力で  $\pm 10\text{kg/mm}^2$

第 8 圖



第 9 圖 測定器の容量對電流特性 (實測)

を使い、このフルスケールが軟鋼の應力で  $\pm 10\text{kg/mm}^2$



(a) 新しく採用した回路の電圧特性 (標準感度の場合には  $10\mu A$  が steel の  $1\text{kg/mm}^2$  の應力に相當する)

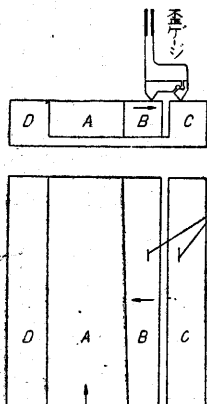
(b) 井上回路の電圧特性 (標準感度の場合には  $0.1\text{mA}$  が steel の  $1\text{kg/mm}^2$  の應力に相當する)

第 10 圖 電源電圧の變化がメータ指示におよぼす影響

に相当する。電圧変動の影響は井上回路の例と比較していちじるしく少ないことを第10圖に示す。遠隔測定および多數點の測定のためには第7圖の  $H, E$  端子に5~10mの線を接続し、その先に切換スイッチをおき10ヶ所の歪ゲージを切換えている。

### 5. 校正および調整法

測定器の感度は歪ゲージの初期容量で任意に変えられるから使用に際しては、まず測定すべき歪の大きさに應じてあらかじめ應力對目盛(メータ)の關係が適當になるようにゲージの初期容量をきめる。このためには第11圖に示す校正器を使用する。 $C, D$ は固定で、 $A$ は1/50

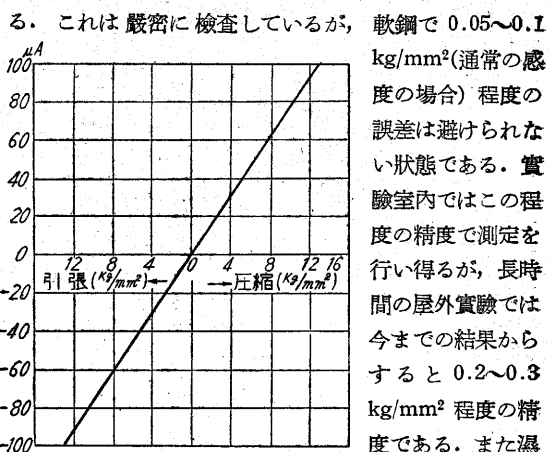


第11圖 感度校正装置

のテーパを持ち1回転0.5mmのねじで矢印の方向に進められ、 $B$ は $A$ に密接して $C$ との間にはばねがあるから $A$ の動き應じて左右に動く。標準となるべき歪ゲージを $B, C$ にまたがつて取付け、 $BC$ の間隙變化とメータの讀みが適當の關係になるようにゲージの調節ねじを加減して標準の初期容量 $C_{10}$ をきめる。このときは歪ゲージは $S$ 端子に接続する。次に被測定物につけた歪ゲージ( $C_{11}, C_{12}, \dots$ )を順次 $S$ 端子に接続し、メータの指示が $C_{10}$ の場合と同じになるようにねじを調節すれば $C_{10} = C_{11} = C_{12} = \dots$ となり感度が統一される。次に各ゲージを切換スイッチの1, 2, 3, ...の端子に接続する。(線は1m以内)このときには線とアースとの間の浮游容量が加わるが、これは各端子についている補償用トリマで補償する。

### 6. 感度および精度

測定回路の項で述べたように通常の使用状態では感度は大體次の程度である。すなわち標點距離が10mmの標準の歪ゲージを使用すると、極板面積が $1\text{cm}^2$ 、擴大率が5倍、測定回路の電流感度が $500\mu\text{A}/\text{PF}$ であるから極板の間隙を約3mmとすれば $\pm 100\mu\text{A}$ が $\pm 7\text{kg}/\text{mm}^2$ (軟鋼)に相當する。精度に關するものにスイッチがあ



第12圖 軟鋼丸棒の引張り圧縮の實測例

る。これは厳密に検査しているが、軟鋼で $0.05 \sim 0.1\text{kg}/\text{mm}^2$ (通常の場合)程度の誤差は避けられない状態である。實驗室内ではこの程度の精度で測定を行い得るが、長時間の屋外實驗では今までの結果からすると $0.2 \sim 0.3\text{kg}/\text{mm}^2$ 程度の精度である。また湿度の影響を一應検討してみると、實際に遭遇すると思われる最悪の場合について湿った空気の誘電率の變化による影響は容量にして $1/1000\text{ P.F.}$ 以下であり、メータの一目盛は約 $1/100\text{ P.F.}$ であるから湿度の影響は考えなくてよい。温度變化による材料の變形に基く容量變化もわれわれの要求する精度の範囲内では無視し得る程度のものであることは簡単な計算によつて推定できる。

### 7. むすび

以上に大略を述べたような歪計を製作し、實驗室内の測定をはじめ、野外の大きな構造物の多數個所の測定を度重ねて實施してきたが、その度毎の經驗をとり入れて改良を重ねた結果、靜的應力の測定には實用上の感度と精度の要求を十分満足する歪計ができた。ただ高周波の關係で歪ゲージに人間や物が近づくとき容量が變化する缺點がある。これは測定等の注意により避けられる程度のものであるが、他の何らかの遮蔽によつて防ぐ方法はまだ解決してない。

この研究は生研の中間試作研究費によつて行つたもので、この研究に對し終始援助を惜しまなかつた森助教および歪計の製作、測定等に協力した古田敏康、松島仁の兩君に深く感謝する。(27.5.1)

註(1) 池田, 森, 富田: 機械學會誌 Vol. 54 No. 392

(2) 例えは 井上回路: 同上

ピヤス回路: 生産研究 Vol. 2 No. 9

### 久保田 廣著 英文「干渉色の數値表」

生産技術研究所報告 第2巻第5號

白色光が硝子の上の薄い膜に當つて反射されたり、ニコルプリズム間の薄い結晶片を通つた時に生ずる實驗的な干渉色は膜厚の測定や結晶の性質を調べる有力な手掛りとなるものであるが、これを色彩論的に調べるには、その色の三色刺激値を與える積分を、計算する必要がある。この計算ははなはだ面倒なものであるので、今まで

の研究において得られた結果の一部を表として今後の研究者の助けにしようとしたのが本表である。從來發表されたものでこのように完全に數値を與えたものはない。光源は $7000^\circ$  黑體輻射、又はC. I. A. の“A”および“C”光源を用い、干渉する光の位相差が光路長にして $0 \sim 1600\text{ m}\mu$ まで與えてあり、有効數字は $20\text{ m}\mu$ 以下の處のみ5桁、他は4桁である。計算は積分公式によるもの( $7000^\circ$ )および重價座標による數値積分(“A”および“C”光源)を併用した。