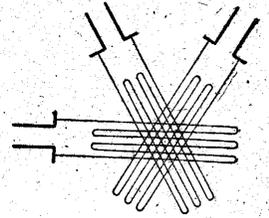


# 抵抗線歪計の試作

大井光四郎  
浅野六郎・小倉公達



抵抗線歪計は瞬間的な現象から、長期間にわたる現象まで、その歪や応力を正確にとらえる計器として実験室でも現場でも応用の範囲は極めて廣い。さてそれを実際に作るのには？

## 1. はしがき

機械や構造物を設計するとき、簡単な假定のもとに應力を計算し、種々の条件を考え合わせて、その應力をある限度に収めるのが普通のやり方である。しかしでき上った實物に果して計算通りの應力がかかっているかどうか疑わしく、設計が合理的なものであるかどうかは實物について應力を測定して見なければわからない。それ故應力を實際について測定することが近頃は各方面で廣く行われるようになった。また強さという観点からでなくとも、旋盤のバイトにかかる力あるいは回轉軸のトルク等機械の運行状態を研究するためにも應力の測定が簡單に行われることが望ましい。しかし局所の應力そのものは直接に測ることができないから、その歪を測定してヤング率を介して應力を推算するわけである。だからここでは應力の測定も歪の測定もほとんど同意語のように解し、神経質な區別をしない。

これらの要求に答えるために色々な歪計が考案されているが、それを大別すると機械的なものと電氣的なものになる。そのうち機械的なものは一般に安定性がよく靜的な歪を長時間にわたって測定するのに適したものが多く、倍率は1000倍を越えると測定に困難さが増す。また動的な歪に對しては指針を振らせる型のもはその慣性が大きく利くので、動的な測定には適しない。その反面電氣的なものは安定性に缺けるものが比較的多く、倍率も高め得るし、動的な歪を測定することは最も得意とする所である。電氣的なものうちで抵抗の變化を利用したものとして従来 carbon pile を用いたものがあつたが、抵抗値の安定性や履歴現象などに難があつた。carbon pile の代りに金屬の細い抵抗線を用いるとこれらの缺點がのぞかれるうに、歪の急激な變化にも追隨し得るので、歪計として理想に近いものになる。この種のいわゆる抵抗線歪計は歐米ではすでに製品として賣り出されて、廣く利用されていることは周知の通りである。わが國でも抵抗線を利用した歪計の研究は戦時中から始められていたようであるが、近頃は筆者の知つている範囲でも鐵道技術研究所<sup>(1)(2)(3)</sup>、運輸技術研究所<sup>(4)</sup>、京都大學<sup>(5)</sup>等できかに研究されている。筆者も一年餘り前から試作に着手し、一應使える程度に達した。日本では未だこの種の歪計が市場に出ていないので、自分

で作つて見ようとされる方にすぐ役立つように、筆者の經驗を本にして、基本的のことがらや細かい注意を具體的に述べたいと思う。

## 2. 原理

金屬の細い針金を弾性的に引き伸すと、長さが伸びると共に斷面積が減少する。Poisson 比を  $\nu$  とし、材料の比抵抗は變らないとすると、長さ  $l$  の針金の伸び  $\Delta l$  と抵抗  $R$  の増加  $\Delta R$  との關係は

$$\Delta R/R = (1+2\nu) \Delta l/l$$

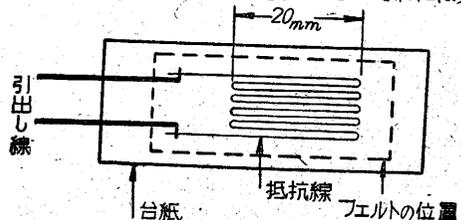
になる。いま  $\nu=0.3$  とすれば上式の右邊の係数は 1.6 である。しかし實際にはこの係数は線の材料の種類によつて種々の値をとるので、

$$\Delta R/R = \alpha \Delta l/l$$

とおき、 $\alpha$  を歪感度係数とよんでいる。Hetényi の本<sup>(6)</sup>その他<sup>(7)</sup>によれば代表的な材料の  $\alpha$  の値は第 1 表の通りである。ニッケルの  $\alpha$  は大きい、 $\Delta l/l$  と  $\Delta R/R$  の關係が直線的でない由である。表中の他のものは引張りと壓縮をふくめて廣い範圍で直線的である。マンガニンは  $\alpha$  が小さいので普通使われない。

物體の表面のある點の附近の歪を測定しようとする場合、そこに、金屬線を物體と電氣的に絶縁してはりつける。物體が力を受けて歪むと、それに應じて線が伸縮するので、線の抵抗の變化を測定すれば線の方向への物體の伸縮が測定されるわけである。二次元的な應力状態を測定する場合には、歪の獨立な成分が三つあるから線を三方向に張ればよいわけである。(いわゆる Rosette 型、カット参照)

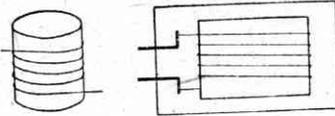
抵抗線を物體にはりつけるのには、あらかじめ線を絶縁のよい臺紙にはつておいて、臺紙を物體にはりつける方法をとるのが普通である。手頃な抵抗値を持つ線は普通長さが 20 cm 以上になるので、せまい範圍の應力を測定するために、線を曲げて往復させる。それには第 1



第 1 圖

## 第3巻 第12號

圖のように線を臺紙の上に平に往復させるか、または第2圖のように線を圓筒形の薄い紙に巻きつけてはつておいて、圓筒を



第2圖

つぶして平にして臺紙にはればよい。以下に歪計の作り方など筆者の試みた方法を紹介するが、鐵研、運研などでもそれぞれ独自の工夫をしている。また磯部孝氏の通信<sup>(8)</sup>も興味深い。

## 3. 歪計の材料

(a) 抵抗線 第1表で見られる通り普通用いられる材料の $\alpha$ は2~4であるから抵抗の變化の割合は

第1表 各種の材料の歪感係数

材 料	$\alpha$	比抵抗 $\mu\Omega\text{cm}$	抵抗温度係數 $^{\circ}\text{C}$	銅に対する熱起電力 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Advance <sup>(1)</sup>	2.05~2.12	48	0.000 01	43
Iso Elastic <sup>(2)</sup>	3.53~3.6	—	0.000 47	3.0
Nichrome <sup>(3)</sup>	2.1~2.63	100~110	0.000 4	22
Nickel	-12~-20	7	0.006	22

(1) Cu 54~55, Ni 44~46. (2) Ni 36, Cr 8, Mn, Si, Mo 等合せて4. 残り Fe. 毎かに C, V 微量. (3) Ni 75, Fe 12 Cr 11, Mn 2.

大體歪と同程度である。だからいま鋼に  $20\text{ kg/mm}^2$  の應力がかかったとしても  $\Delta R/R$  は  $10^{-5}$  の程度で、それを  $1/100$  の精度で讀むためには  $\Delta R/R$  を  $10^{-5}$  の程度まで讀む必要がある。このような測定には  $R$  自身あまり小さくない方が都合である ( $50\ \Omega$  以上)。また物體の應力状態を亂さないためや、接着劑の負擔を軽くするためにも線は細い方が好ましい。米國では直径が  $25/1000\text{ mm}$  程度のものを使つているようであるが、この位細い線はニッケル線かタングステン線以外には手近に見當らなかつたので、初期の實驗には住友電気工業 KK の御好意による  $5/100\text{ mm}$  の advance 線を用いた。その後この程度のは市販にあることが判つたので、現在は市販の  $5/100\text{ mm}$  の advance 線とニクロム線を用いている。advance はハンダ付ができるので便利である。この線の抵抗は約  $2.2\ \Omega/\text{cm}$ 、歪感係数は  $\alpha=2.0$ 。

(b) 接着劑 抵抗線を臺紙にはりつけるのにセルロイドを醋酸アミルに溶したものを用いている。濃さは夏の水飴程度。溶して一週間以上経過したものが良い。臺紙を物體にはりつけるのには、上の液をアセトンで薄めたものの方が使いやすい。前記の磯部氏の通信によれば、米國では歪計をはるのに、歪計用として會社で提供しているもののほかに、日本のセメダイン C に似た

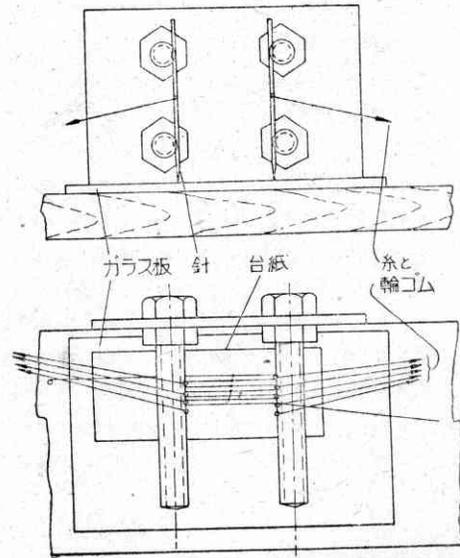
ものでも良いといわれている由である。接着劑は重要な問題で、はがれないことと絶縁が良いことが大切である。また用途によつては濕氣や熱に耐えることが必要である。

(c) 臺紙 最初は薄い和紙を用いたが、絶縁が悪いので、現在は厚さ  $5\sim 7/100\text{ mm}$  の質の密な洋紙を用いている。絶縁さえ悪くなければもつと薄い方が良いと思う。

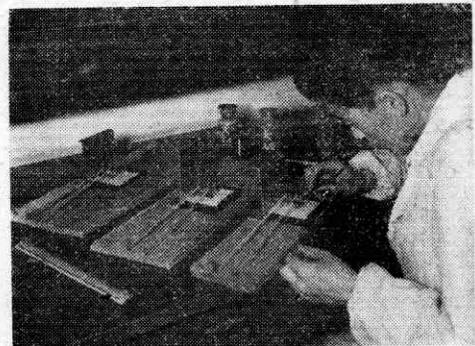
(d) フェルト 臺紙の上にはりつけて抵抗線をおおうもの。厚手のものを用いている。フェルトでおおるのは歪計を物體にはるとき力が均一にかゝるようにするほかに、抵抗線に直接風が當ると、熱起電力のためか、計器の讀みがふらふらするのでそれをふせく目的もある。

## 4. 歪計の作り方

たとえば第1圖のような標準的な歪計を作るのには第3圖(a)と(b)に示すような装置を用いて好結果を得ている。  $100\sim 200\ \Omega$  位が手頃であるが、手元にある線が



第3圖(a)



第3圖(b)

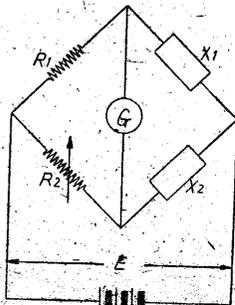
太いので主として 70 Ω 程度のものを作っている。

装置の要點は縫針を数本づつ並べて2列に平行に立て、線を縫針に引掛けて張るわけである。針を並べて立てるのはボルトのねじのピッチを利用している(ピッチは約 1 mm)。縫針は糸と輪ゴムで引張られてねじの谷に押しつけられているから、摩擦によつて針は任意の高さに止まる。縫針の先は適当な太さになるように平に磨つてある。まずガラス板に臺紙の四隅を糊で止めて貼り、圖の位置におき、針は臺紙から少し浮かせておく。抵抗線的一端を止めて、軽く張力を與えながら針の下をくぐらせては針の先を臺紙の上に下ろす。線を針に引掛けて反対の方向に張る、これを繰返して糸を往復させる。張り終つたらば接着劑を厚さ 1 mm 位に平に流して放置する。このとき針の先端の部分だけには接着劑を流さないで置いて、乾いてから針を去つて、その部分に接着劑をつけ直しするとよい(この點小林韓治氏の御注意による)。次に抵抗線の先に銅線をハンダ付けまたは溶接して取りつけ引出し線にする。銅線は平につぶしておく方がよい。銅線も接着劑で臺紙に固定して、フェルトを軽くはつて完成する。溶接は線がニクロムの場合に行い、點溶接機によつてゐる。

歪計を物體にはるのには、相手が金屬のときには細心の注意を要する。金屬の表面をエメリーペーパーで少し粗くして、アセトンでよく油氣を去り、接着劑を少し廣めにぬつて歪計をはる。このとき逆に接着劑を金屬面にぬらずに、臺紙にぬつてはるとはがれやすくなる。おそらく臺紙に接着劑をぬつた時にすぐに表面に薄い膜ができ、金屬面となじみ難くなるためであろう。歪計をはつて指先でよく壓して氣泡を去り、フェルトの上から數百グラムの壓力をかけて一晝夜放置する。丸棒にはる時にはゴム紐で巻いておくと良い。これで 1/1000 位の靜的な歪でははがれない。物體と抵抗線との間の絶縁は接着劑が乾かない間は數十 kΩ であるが、よく乾くと數 MΩ に達する。

### 5. 應力の測定法(増幅しない場合)

抵抗線歪計によつて靜的な應力を測定するには普通第4圖のように Wheatstone bridge を用いる。いま  $X_1$  を問題の歪計とし、その抵抗も  $X_1$  で表わす。 $X_1$  のはつてある點の應力だけを測定する場合にも bridge の隣の邊  $X_2$  に同じ型の歪計を應力のかからない状態で用いる(いわゆる dummy gage)。これは温度による誤差を補償するためである。温度係数が 0 の抵抗



第4圖

線を用いた場合でも、もし被試験體の温度が變ると熱膨脹によつて長さが變るから、見掛け上應力を受けたのと同じ結果になる。だから dummy gage は active gage のはつてあるものと同質のものにはつて、なるべく等しい條件におく。dummy gage を空中に浮かせておいたりすると、風のために gage が變形して、檢流計の讀みが定まらない。bridge の  $X_2$  の所に dummy gage の代りに  $X_1$  と反対の歪を受けるような gage を入れると感度が良くなる。たとえば單純な引張りを受ける場合には  $X_2$  を  $X_1$  と直角にはつて、Poisson 比に相當する横歪を利用したり、曲げを受ける板の場合には、 $X_1$  と  $X_2$  とを對等の資格で板の表と裏にはつたりする。

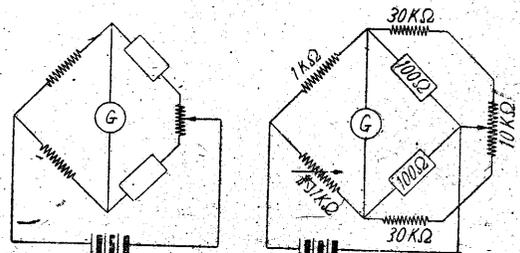
dummy gage を使つた場合  $X_1 = X_2$  であるから  $R_1 = R_2$  である。いま  $X_1 = X_2 = X$ ,  $R_1 = R_2 = R = nX$  とし、 $X_1$  が  $\Delta X_1$  だけ變化したとすると、檢流計に掛る電壓  $e$  は

$$e = E \frac{\Delta X_1}{X_1} \frac{n}{(n+1)^2} \quad (1)$$

である。それ故電源電壓  $E$  を高くすると感度が良くなるが、歪計を流れる電流も大きくなる。筆者はこれを一應 20 mA に押えている。いま歪計に流す電流を 1 mA とすると、 $R$  を大きくして、それに應じて  $E$  を高くすると感度が良くなる。 $R$  を無限大とした極限の場合には  $e = I \Delta X_1$  mV になる。 $n = 2$  で 100 Ω の歪計に 10 mA の電流を流し、1/1000 の歪をかけると、上の理想的な場合には檢流計にかかる電壓は 2 mV である。 $R$  が有限で  $R = nX$  のときは感度は上の場合の  $n/n+1$  倍に落ちる。だから  $n$  を 5~10 とすると感度もあまり落ちず、電源電壓もさほど高くする必要はない。 $R = X$  のときには感度は 1/2 になる。逆に  $E$  がかぎられているときには (1) 式から計算すれば判る通り  $R = X$  のときに感度が最も良くなる。

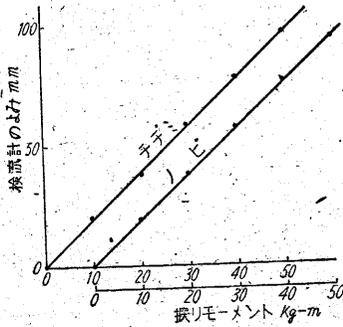
$R_1, R_2$  は P.O. box のもので良いが、 $R_2$  が十分に細分されていないから、平衡の微細な調節には第5圖 (a) (b) のような方法をとる。(b)の方が摺動抵抗の接觸部分の抵抗の不安定さの影響が少いために、手近なラジオの部品が使えるために、筆者はもつぱらこれを用いている。圖の數字は  $R_2$  が 1 Ω 飛びのときの數値の一例。

測定例 坪井教授の研究室の依頼によつて ±50 m-kg の振動的戻りモーメントを測定する目的で試作し



(a) 第5圖 (b)

た應力棒の例について述べる。直径 30 mm の軟鋼の振り應力棒に、軸に 45° の方向に二つの歪計をはつて、それぞれ引張りと壓縮を受けるようにし、各歪計に 20 mA の電流を流し、横河の電磁オツシログラフの D 型の振動子（電圧感度  $1.3 \times 10^{-5}$  V/mm, 自己振動数 150 c.p.s.）に増幅せずに入れて記録させるためのものである。この結果は別に発表されているから<sup>(9)</sup>、ここではこの應力棒を静的に検定した結果についてだけ述べる。おのおのの抵抗は 63.49 および 63.39 Ω でこれを別々に検定した。使用した検流計の電圧感度は  $4.1 \times 10^{-7}$  V/mm で、歪計に流した電流は 10 mA 弱。その結果は第 6 圖に示す通り容量一杯まで ( $\tau_{\max} = 9 \text{ kg/mm}^2$ ) 良く直線に乗り、圖が小さいので往復の平均値をとつてあるが、ヒステリシスは試験機の摩擦におおわれて判らない程度、二つの歪計の特性の差は 2.5% であつた。この應力棒は動的測定に使つていられるうちに歪計がはがれて修理を必要とした。接着剤の検討の必要が痛感された。



第 6 圖

なお静的應力を測定する場合の検流計は箱型でランプとスケールを自蔵しているものが便利で、最近は主にこれを使つている。

## 6. 應力の測定法 (増幅する場合)

静的な應力を測定するには電池と検流計を使うのが簡便であるが、時に熱起電力の影響が混入してくることがあつて多少の不安がある。また動的な應力を測定するのは上に述べたような敏感な振動子を用いるのも良いがこのような振動子はなかなかデリケートで、外部からの振動を嫌つたりするのであまり使いやすくない。また自己振動数が低いので用途もかぎられる。それ故 bridge から出る電圧を増幅するのが次の問題になる。

短時間に終る現象や、正弦的な振動を記録するには簡単な増幅器と電磁オツシログラフで記録できるが、非定常な変動や高調波をふくむ振動を記録するには増幅器について多少の注意が必要である。すなわち RC 結合をした増幅器は周波数によつて増幅率が違つたり位相がずれたりするから、増幅器の特性の選擇に注意しないと歪や歪速度や歪加速度を混合して記録するようなことになつて、得られた線圖の解釋が問題になる。また RC 結合をしないで、いわゆる直流増幅をすることは一般に困難であるといわれているし、筆者も試みたがなかなか厄

介で、メーターで讀むのならばともかく、オツシログラフに入れるのは容易でない。そこで bridge に交流を入れて、應力に比例して振幅が變化する搬送波として取出して、これを自由に増幅して、最後に整流して、メーターで讀むなりオツシログラフに入れるなりするのが自然の道筋である。これにも色々の問題があるが<sup>(10)</sup>、結局最も普及するのではないかと思う。紙面にかぎりがあるのでこれに關する報告は近い將來の機會にゆずり今回はこれに止める。

## 7. 結 び

以上に述べたことは細部に拘泥し過ぎて、全體として貧しい内容になつてしまつたが、抵抗線歪計が實驗室で簡単に作ることができることは御了解いただけただかと思ふ。米、英、蘭の諸國では歪計と附屬器具が賣り出されているが、高價で現在のわれわれには気軽に使うことができない。(米國の SR-4 歪計は色々の型のものがあるが最も安い標準品でも 1 弗以上する。これを消耗品と考えるのはつらい)。前記の磯部氏の通信を見ると、米國でも抵抗線歪計は手工業的に作られているようであるから、日本で作ればずつと安く供給されることと思ふ。そうなる日が早いことを希望しているが、その時でもなお實驗室で希望の性質のものを手軽に作ることができるのは強みであらう。

終りに本研究を最初に筆者に示唆され、その後も點検接機その他のことで色々相談に乗つて下さつた澤井教授に感謝すると共に、抵抗線に關して御配慮を受けた住友電氣工業株式會社の御好意に御禮申上げる。なお本研究は大部分文部省の科學研究費によるものである。

(26:9:29 受)

## 文 献

- (1) 中村和雄: 抵抗線歪計, 應用物理, 第 19 卷, 9~12 號, 昭和 26 年 3 月。
- (2) 中村和雄・杉本忠勝: 抵抗線歪計による應力測定, 昭和 25 年 9 月 18 日, 機械學會講演會。
- (3) 小野修一・松本正: ワイヤストレンゲージによる動的應力の測定, 昭和 26 年 4 月 5 日, 機械學會講演會。
- (4) 小林鶴治: 應力の電氣的測定, 昭和 26 年 10 月 26 日, 機械學會講習會テキスト。
- (5) 成岡昌夫: 電氣抵抗線歪計 (SR-4 Strain Gage) について第 1 報, 昭和 25 年 10 月 26 日, 應用力學會機械學會聯合講演會。
- (6) M. Hetényi 編: Handbook of Experimental Stress Analysis, 1950. 英文文獻はこのなかにかくわい。
- (7) K. Fink: Der Dehnungsm-Bstreifen, VDI, Bd. 92, Nr. 4, Februar, 1950. 山田嘉昭・森大吉郎両氏によつて抄録紹介されている。獨文文獻はこれに多くふくまれている。
- (8) 磯部孝: ストレイン・ゲージの Baldwin 見學記, 應用物理, Vol. 20, No. 3. (6 月號), 1951.
- (9) 坪井善壽・富井政英: 面震度の新しい動的剪断試験法, 昭和 26 年 7 月 27 日, 建築學會研究會。
- (10) 大井光四郎: 抵抗線歪計の試作, 昭和 26 年 4 月 5 日, 機械學會講演會。
- (11) 小林鶴治: 金屬抵抗線ひずみ計の製法および使用法, 機械學會誌, 第 54 卷, 第 314 號, 昭和 26 年 11 月。