

抵抗線歪計の簡単な装置について

大井光四郎・浅野六郎・小倉公達

1. はしがき

抵抗線歪計により静的応力を測定するには交流ブリッジを用いるのが常識である。直流ブリッジに組んで検流計によって測定する方法は、原理的に簡単であるから歪計の教科書では皆最初に説明している。しかしこの方法は個々の研究者が自分でブリッジを組んで、あり合せの検流計によって測定する程度で、余り広く行われていない。その第一の理由は熱起電力に対する心配であるが、抵抗線歪計が戦争中に米国で完成されて、日本が戦後この技術を取り入れたときに、米国式のものにこだわり過ぎたという事情も見逃しえない。事実ヨーロッパでは米国よりも直流ブリッジの方法が広く採用されているようである。

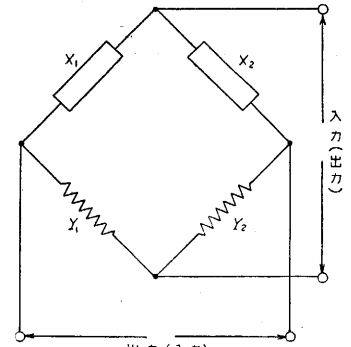
歪計の抵抗線には普通コンスタンタン系統の Ni/Cu の合金が用いられている。抵抗線は銅線で計器に結ばれるので、ここに能率の良い熱電対が形成される。もし歪計を直流ブリッジに組んで検流計によって測定すると、熱起電力によって測定結果が乱される。一般に熱の影響は変化が緩慢であるから、交流ブリッジにして直流成分を断ち切って増幅すればこの影響は除くことができる。しかしブリッジからの出力電圧は小さいので、増幅がかなり厄介で、装置も高価になる。直流ブリッジの方法には上に述べたような欠点もあるが、装置が簡易であるために価格が安いという利点がある。結局問題は測定精度の点に帰する。交流ブリッジの場合普通精度は 1%、測定可能最小目盛は抵抗変化の割合にして 1×10^{-5} (鋼の応力に換算して 0.1 kg/mm^2) の程度を目標にしている。そこで同じ程度を目標にして直流ブリッジの装置を試作した所、十分に役立つものが得られたので、ここに設計の筋道や試験の結果を紹介する。

2. ブリッジ回路

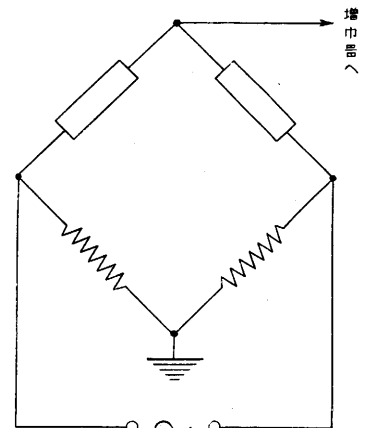
抵抗線歪計の出力電圧はゲージの許容電流で押えられる。それ故抵抗値の大きいゲージを使う方が大きな出力をとることができる。交流ブリッジの場合は浮遊容量などの関係から抵抗値の大きいゲージを使うのは適当でないので、普通 120Ω のものを使っている。そのために出力電圧は大きくできないが、この点は高度の増幅で補っている。しかし直流ブリッジの場合にはゲージの抵抗を大きくして、出力電圧を高くすることは、測定を容易に

するばかりでなく、熱起電力の影響を相対的に小さくすることにも役立つ。それ故ゲージには $300 \sim 1000 \Omega$ のものを用いる。ここでは 500Ω を標準に選ぶことにする。

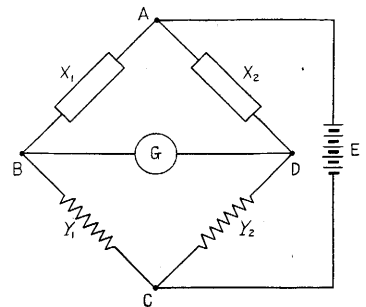
許容電流はゲージの貼ってある物体の熱伝導率にもよるが、安全側にとって 15 mA とする。第 1 図において X_1 は問題のゲージで、 X_2 は温度補償のための X_1 と同種のゲージである。一般にブリッジでは入力端子(電源)と出力端子(検流計、増幅器)とは位置を入れ換えることができる。交流ブリッジの場合には浮遊容量がアースに対して対称になるように、第 2 図の形式が用いられるが、直流ブリッジの場合には熱的条件が検流計に対して対称になるように第 3 図の形式をとる方が優れている。



第 1 図



第 2 図



第 3 図

いま第 3 図において $X_1 = X_2 = X$, $Y_1 = Y_2 = Y = nX$ とし、 X_1 に流れる電流を I とする。E は電源の電池で G は検流計である。

最初にブリッジは平衡しているものとし、次に X_1 が歪を受け、抵抗値が $4X_1$ だけ変わったとする。そのた

めにBD間に生ずる電位差 Δe_0 を求めるには、ブリッジのAB間の枝に $I\Delta X_1$ の“起電力”が発生したと考えるのが便利である。検流計を接続しないときには、

$$\Delta e_0 = \frac{n}{n+1} I\Delta X_1 \quad (1)$$

となつて (Δe_0 の0は検流計に流れる電流が0である気持を表わす), n を大きくする方が Δe_0 は大きくなる。次にBD間に検流計をつなぐと、検流計に対する外部抵抗 r_a は

$$r_a = \frac{2nX}{n+1} \quad (2)$$

検流計の内部抵抗を r_i とすれば、検流計に流れる電流 Δi は

$$\Delta i = \frac{\Delta e_0}{r_a + r_i} = I \frac{\Delta X_1}{X_1} \left/ \left\{ 2 + \left(1 + \frac{1}{n} \right) \frac{r_i}{X} \right\} \right. \quad (3)$$

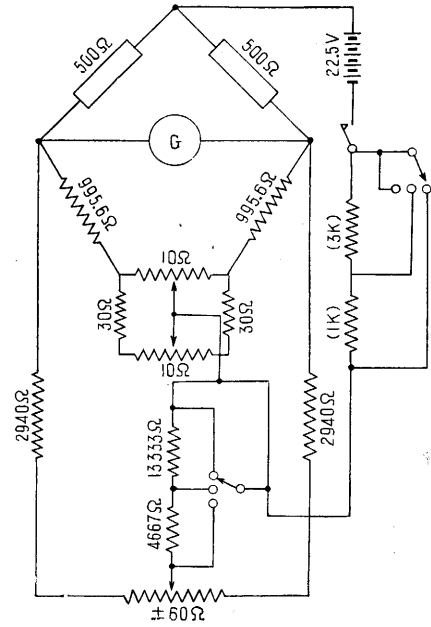
となる。普通 $r_i < X$ であるから n を大きくしても検流計に流れる電流は余り大きくならない。しかし同じ電流感度ならば r_a が大きい方が検流計の設計としては楽であるし、また電源に 22.5 V の規格の積層乾電池を使いたい関係から $n=2$ すなわち $Y=1k\Omega$ とする。

以上の基本方針のほかにはブリッジの設計に際して注意を払ったのは次の諸点である。

- a) 測定範囲の切換ができること。
- b) 範囲の切換を行っても検流計に対する外部抵抗が変らないこと。
- c) 測定には零位法を用いること。
- d) ブリッジの各要素はすべて検流計に対して対称になっていて、熱の影響は消し合うようにすること。
- e) 500 Ω 以外のゲージも使うことができること。
- f) スイッチを含む回路は相当な抵抗値を持つようにして、スイッチの接触抵抗は無視しうるようにすること。
- g) 切換によって多数点の測定ができるようにすること。

およそ以上のことを念頭においてまとめたのが第4図である。附記してある抵抗は個々の場合に調整する必要があるので概略の値である。 $\Delta X_1/X_1$ の測定範囲は $\pm 0.1, \pm 0.3, \pm 1.0\%$ の三段とした。これは歪感度係数が2のゲージを用いた場合、鋼の応力に換算しておよそ $\pm 10, \pm 30, \pm 100 \text{ kg/mm}^2$ に相当する。このブリッジに関して考えておく必要があることは、範囲切換を最小としたときの出力と、切換を最大にしたときの非直線性の誤差である。

範囲切換を最小にした場合に 0.1 kg/mm^2 の応力に対し検流計に流れる電流は、かりに $r_i=300\Omega$ とすると、 $5 \times 10^{-8} \text{ A}$ である。検流計はこの数字に基づいて設計する。非直線誤差は最悪の場合でも 0.5% であるから多くの場合は無視しうるが、特に必要のあるときには簡単な計算で補正することにする。



第 4 図

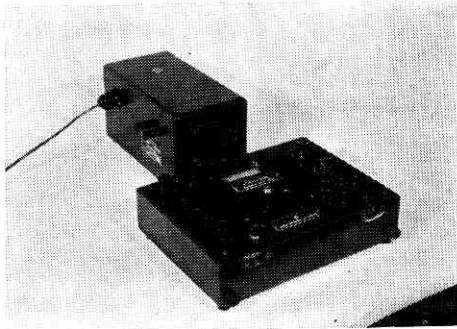
3. 検流計

このブリッジに組み合せて用いる検流計は必要な感度を持つと共に、現場的な使用に耐えるように丈夫なものでなければならぬ。抵抗線歪計において直流ブリッジが余り用いられない原因の一つは、目的に合わせて設計された検流計がなく、出来合いのものでは特性や丈夫さの点で使い難いことにもよる。普通の可動コイル型の検流計は感度を本位に考えてあるため、コイルを吊るリガメントに極力細い線を用いている。コイルの重量に比べて、リガメントが細いことが検流計の故障の主要な原因である。われわれの場合にはブリッジの出力がかなり大きいから、感度の点では比較的らくである。実際に使用する上には感度のほかに周期と制動状態が重要である。零位法で測定するとき、可変抵抗のダイヤルを手で廻す速さに比べて、検流計の指示が遅いと測定に著しく不便である。制動状態は周期より以上にこれに関係する。制動は臨界制動よりも少し振れ過ぎの方が使い易い。上記のブリッジでは r_i は 600Ω であるから検流計の外部臨界制動抵抗値は 500Ω 前後が適当である。これらの条件に近い検流計を市販品のカタログで探してみると、ランプとスケールを自蔵した箱型の検流計がそれに当る。第 1 表

第 1 表

	電流感度 10^{-8} A/mm	コイル抵抗 Ω	外部臨界 制動抵抗 Ω	周 期 sec
a.	5	300	約 1000	3
b.	5~7	450	1000~1500	2.2~2.5
c.	2	530	3000	3
c'.	10	265	525	1.35

1表 a, b, c がこれらの例である。われわれの目的に適應するように、一例として同表の c を改造してみる。コイルの巻数を半分にし、リガメントの剛性を 2.5 倍にする。コイルには反射鏡などがついているから、巻数を半分にしても可動部の重量や慣性性能率は半分にはならないが、かりにこれらが半分になるものとして計算すると、c は同表 c' のようになる。これをわれわれのブリッジに適用すると 10 kg/mm^2 の応力で 50 目盛余り振れることになる。リガメントの剛性が増してコイルの重量が減少するので周期も短くなり、リガメントの断線はほとんどなくなる。実際にはこのような改造ではなく、新設計すべきであるが、丈夫なものが得られることはこの一例からでもわかる。指針型の検流計を用いることができると便利であるが、特性上少し無理で、強いて用いれ

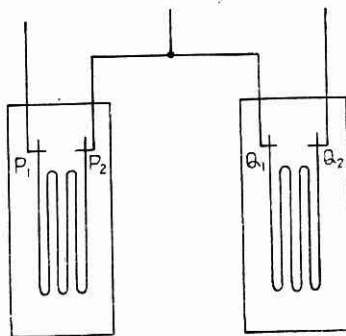


第 5 図

ば感度が丈夫さを犠牲にしなければならない。第 5 図はこの試作品で、ブリッジと検流計が別になっているが、将来は同一の箱に収納する予定である。

4. 熱起電力の影響

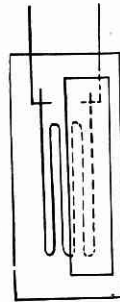
銅・コンスタンタンの熱起電力は $43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ である。この数字は § 2 に述べた $4X_1$ による“起電力”に比較されるべきものである。すなわち 1°C の温度差は鋼に換算して 0.055 kg/mm^2 の応力に相当する。誤差はこの程度に止めたい。周知のように熱起電力が発生するのは異種の金属の接合点に温度差がある場合である。第 6 図のように二つのゲージの間に温度差があっても、 P_1 ,



第 6 図

P_2 の点の温度が t , Q_1, Q_2 の温度が t' というように、それぞれのゲージのなかでは温度が等しければ起電力は各ゲージの中で消しあって、外部には電圧は出でこない。すなわち熱起電力に関し

てゲージとして警戒しなければならぬのは、同じゲージの中で抵抗線と引出線の二カ所の接合点の温度差である。この点の影響を見るために、わざと一つのゲージのフェルトの被覆を半分だけはがして試験を行った(第 7 図)。このような苛酷な条件でも検流計のふらつきは



第 7 図

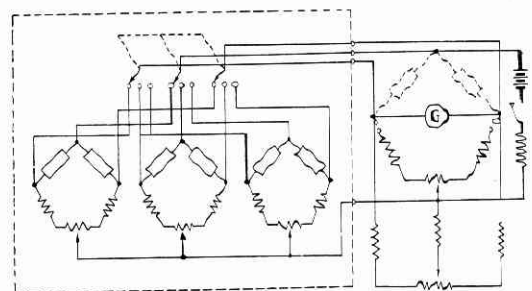
応力に換算して 0.1 kg/mm^2 を越えない。普通のゲージを用いた場合にも数時間の間には 0.1 kg/mm^2 以内の零点の移動が認められたが、この原因はゲージにあるのか否かは明白でない。この点は別に検討を要するが、現在のままでも 1% 以内の精度で安心して使うことができる。熱起電力はゲージばかりでなく、ブリッジの他の辺にも発生する。しかしこの場合はゲージに比べて電流容量の点で楽であるから、温度差の発生する心配は少ない。また、かりにゲージと等しい熱起電力が発生しても (1) により検流計に対する影響はゲージの場合より小さい。

5. ゲージの抵抗値を変えた場合

この装置では 500Ω のゲージを使うことを標準としているが、 $350 \sim 1,000 \Omega$ のゲージならばほとんど同じように使うことができる。 120Ω のゲージを使うと過制動の状態になり検流計の指示が落ちつくのに多少時間を要するほかに、同じ歪に対し検流計の振れが約半分になり熱起電力の影響が相対的に増大する。それ故測定に際して安定感が少し減るが、測定困難という程ではない。

6. 多数点測定の場合

構造物の応力を測定するような場合には、切り換えスイッチにより多数点の応力を次々に測定したいことが多い。それにはこれにスイッチ箱を併用すれば良い。切り換えスイッチは一万回切換えても接触抵抗が $10 \text{ m}\Omega$ 以内に保たれるものが得られるから、接触抵抗の点は問題はない。スイッチ箱には、それぞれの測定点に対してブリッジの二辺と零点調整装置を収納しておく。第 8 図はこのような切換装置の一例である。



第 8 図

7. 交流ブリッジとの比較

交流ブリッジの場合は、熱起電力の影響は避けられるが、これを完全に動作させるのはなかなか困難である。ブリッジに供給する電流が必ずしも完全な正弦波ではないこと、電流を供給する変圧器につきもの浮遊容量や漏洩インダクタンスの影響、真空管の雑音等がこれの原因である。歪計の許容電流を一定に押えるとき、真空管の雑音に対しては歪計の抵抗値を増して、ブリッジからの出力電圧を大きくとる方が有利であるが、浮遊容量などの点からは、抵抗値を減らして低インピーダンスにする方が有利である。許容電流が 20 mA のとき 120 Ω のゲージを使うと 0.1 kg/mm² の応力に対し出力電圧は 12 μV である。この出力を増幅してブラウン管で観察すると問題の波が搬送波の高調波や真空管の雑音に埋没して見えて、これでよくメーターは大過なく指示するものと感心させられることがある。これは増幅器の特性に搬送波のところで鋭い山をもたせることにより相当改善できるが、程度の問題である。ここで感度を増すためにゲージの抵抗を大きくすると、浮遊容量などの影響が抵抗と共に増加するので、ブリッジの平衡はますます取り難くなる。それ故 120 Ω という抵抗値は 10⁻⁵ 程度の精度で ΔX/X を測定するにはちょうど手頃な値であって、この上精度を上げるためには、装置全体にわたって相当な努力を要する。このような見地から考えると直流ブリッジも静的歪の測定に関しては交流ブリッジとほぼ同じ程度の性能を有するものといえる。ただゲージの抵抗値が一方は 120 Ω で他方は 500 Ω であるから、標点距離の短い場合などには不利である。

ついでに動的応力の測定の場合にも触れておくと、数百サイクルまでの測定には現在のところ交流ブリッジの方が断然有利である。最近電流容量の大きい抵抗箔歪計が出現したので、直流ブリッジによる動的測定も多少やり易くなった。しかしこれも 0.1 kg/mm² の応力まで読むときには出力の関係から数十サイクルが限度である。キロ・サイクルの程度になるとブリッジを使うのは適当でないから別の方法をとる。このように考えると静的専用の交流ブリッジ型の装置は存在意義が薄くなって、交流ブリッジは静的動的兼用のものとするのが得策である。

8. 結 び

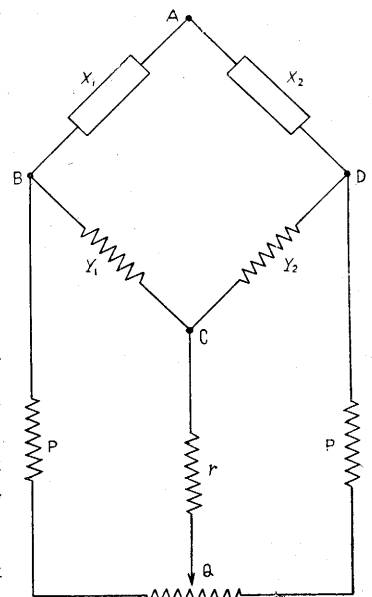
抵抗線歪計による静的応力の測定に交流ブリッジを用いることは、それ相応の理由もあるが、装置が複雑で高価である。そして一旦故障でも起ると修理が厄介である。直流ブリッジは理論的には熱起電力の影響という難点があって敬遠され勝ちであるが、実際には交流ブリッジと同程度の測定が可能である。装置が極めて簡易であ

るから価格も安くできる。本稿の目的は直流ブリッジ法の能力の再認識であって、ブリッジ回路などは可能な形式のなかの一例であるに過ぎない。抵抗線歪計による測定が現在よりも広い範囲で行われるようになる一助ともなれば幸である。なお本研究は応力測定技術研究委員会（委員長竹中二郎教授）における研究の一つとして行ったもので、同委員会を通じて文部省科学研究費の援助を受けたことを感謝している。

附記 ブリッジの非直線性の誤差について

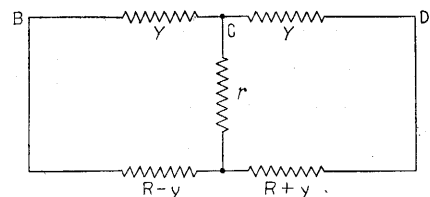
第 2 節にこのブリッジの非直線性の誤差およびその補正について述べた。簡単な計算であるが、念のために結果を記しておく。500 Ω のゲージは普通 1 Ω 以内の偏差で作られている。それ故数個のゲージのなかから選べばほとんど抵抗値の等しいものが得られる。それ故ここではゲージの抵抗値は等しいものとする。

第 9 図はブリッジの要所だけの図である。ここで $X_1 = X_2 = X$, $Y_1 = Y_2 = Y$ とする。Q は零位法のための可変抵抗で、その抵抗値も Q であらわす。仮定により Q が中点にあるときブリッジは平衡する。X₁ が ΔX₁ だけ増加したとき、Q を y だけ移動させてブリッジは再び平衡したとする。第 10 図（ただし X₁, X₂ は省略してある）はこのときの状態である。これは第 11 図と等価である。ここに



第 9 図

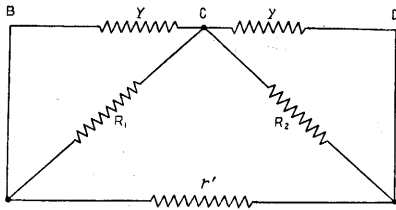
このときの状態である。これは第 11 図と等価である。ここに



第 10 図

$$r' = 2R + \frac{R^2 - y^2}{r}$$

$$R_1 = \frac{2rR + R^2 - y^2}{R - y}$$



第 11 図

$$R_2 = \frac{2rR + R^2 - y^2}{R + y}$$

r' は検流計に並列に入るから、ブリッジの平衡には関係がない。そこで r' を除いて考えると

$$BC \text{ 間の抵抗 } Y_1' = \frac{Y(2rR + R^2 - y^2)}{R(2r + R + Y) - y^2 - Yy}$$

$$DC \text{ 間の抵抗 } Y_2' = \frac{Y(2rR + R^2 - y^2)}{R(2r + R + Y) - y^2 + Yy}$$

ブリッジで問題になるのは辺の比であるから

$$\frac{X_1 + \Delta X_1}{X_2} = \frac{Y_1'}{Y_2'} = \frac{R(2r + R + Y) - y^2 + Yy}{R(2r + R + Y) - y^2 - Yy}$$

$X_1 = X_2 = X$, $\Delta X_1/X = \xi$ とし、また、

$$\eta = \frac{2yY}{R(2r + R + Y)}$$

とおけば

$$\xi = \eta \left\{ 1 + \left(1 + \frac{y}{Y} \right) \frac{\eta}{2} + \left(\frac{\eta}{2} \right)^2 + \dots \right\}$$

となるから、 ξ が十分に小さいときは、

$$\xi \approx \eta$$

である。 η は y に比例するからダイヤルに η を直接目盛っておくと、それが直ちに求める $\xi = \Delta X/X$ の値に

なる。次に ξ が少し大きいときは

$$\xi \approx \eta \left\{ 1 + \left(1 + \frac{y}{Y} \right) \frac{\eta}{2} \right\}$$

となる。 $|y| \leq Q/2$ であるから、われわれのブリッジでは y/Y は $1/20$ の程度で、補正項のなかでは省略できる。よって

$$\xi \approx \eta \left\{ 1 + \frac{\eta}{2} \right\}$$

この式は切換範囲の如何には関係なく成立つが、実際に問題になるのは範囲が最大のときに限る。たとえばダイヤルで $\eta = +0.01$ と読んだならば実際の $\Delta X/X$ は 0.01005 であり、 $\eta = -0.01$ ならば $\Delta X/X$ は -0.00995 である。この誤差はブリッジの形式を対称にしたために生じたものである。

X_1, X_2 が push-pull に変化して

$$X_1 \rightarrow X + \Delta X, X_2 \rightarrow X - \Delta X$$

となる場合には $\xi = \Delta X/X$ とおくと同様の計算により

$$\xi \approx \frac{\eta}{2} \left(1 + \frac{\eta}{2} \frac{y}{Y} \right)$$

となる。このときには y/Y が小さいことから

$$\xi \approx -\frac{\eta}{2}$$

として差支えない。前の場合も同様であるが、 y/Y の項の誤差はこのブリッジの形式から出るもので、別の形式にすれば避けられる。しかし絶対値が小さいから、回路の便宜上この形式を選ぶことにした。

(1954. 12. 21)

次号予告 (2月号)

研究解説

- 自動車振動試験台とその結果について... 池田 健康
古田 敏康
- メラノイジンの研究..... 友田 宜孝
中村 亦夫
吉 弘 芳 郎
- 粉末冶金の新方向—鉄粉の焼結—..... 原 善四郎

研究速報

- アマルガメーテッド・アルミニウム..... 久松 敬弘
の流電陽極特性..... 鈴木 鉄也
- 噴流を受ける平板の熱伝達..... 橋 内 藤 雄
正 志
- Co⁶⁰ の γ 線による鉄の透過..... 一色 貞 文
- 検査法に関する二、三の測定..... 丸 山 温
- 容量変換式微電流計の試作について..... 中 田 一 郎

本誌12月号「速報」18頁の第11式下記の通り訂正します。

$$E_0 = - \frac{R_1 I_0}{1 + (R_1 + R_2)(1 + \frac{r_1}{r_0}) / \mu R_2} \cdot u(t) + R_1 I_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}$$

$$- I_0 \frac{x_1 r_1}{\mu C_1} \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1} e^{-\frac{\mu C_2}{x_1 r_1 (C_1 + C_2)} t}$$

正 誤 表 (12月号)

頁	裏	行	種別	正	誤
13	左	下11	本文	容量が	容量すか
"	"	"10	"	向上する	向上る
"	右	上1 -6	"	この結合コンデンサーは、第1, 2図のフィードバック回路の場合には入力側時定数にはほとんど影響を及ぼさない	しかし.....向上する
"	"	下8 -7	"	(削除)	入力系の.....測定から
14	左	"	第5図 説 明	β 線の Al 吸収曲線	β 線 Al 吸収の曲線
16	"	上6	本文	直径	径
17	"	上15	"	直流電圧として	直流して
"	"	第1図	"	(R_2, C_2 の間に Y_2 を入れる)	
"	右	上13	本文	入力電圧に等しいか、それより大きくなる	入力電圧より大きくなる
"	"	"15	本文	位相は、 Y_1, Y_2 によって	位相はによって
18	左	"	"	$t \geq 0$	$t > 0$
"	右	"	第3図	x_2 (図中右側)	x_1
19	右	下2	本文	80mm	880mm
02	"	"	成果表	軸圧縮強度 (第5欄)	軸圧力強度