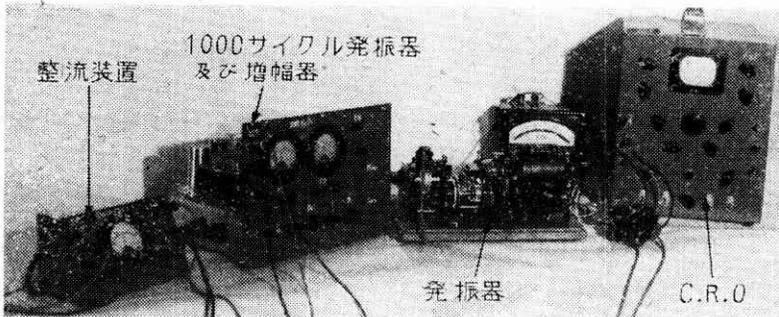


# サーボ系の特性を求め る 低周波発振器

三井田 純一

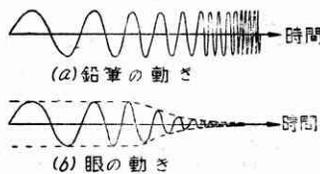
不規則な運動をする目標を、おくれないように追従する自動装置、いわゆるサーボ機械——たとえば、微分解析機の積分機用の追従装置などがよい例であるが——その性能をよくするには、いろいろの場合について、その系の特性を調べる装置が必要である。この目的に試作した試験装置を紹介する。

鉛筆のさきを眼の前に明視距離へだてて手に持ち、これを左右にゆつくり動かし眼を絶えずこの鉛筆のさきを注視させる。鉛筆の動きが非常にゆるやかな間は眼はほとんど完全に鉛筆の方向に向いているが、今鉛筆を左右にふるさる速さをだんだん増す、もつと厳密にいえば鉛筆の左右にふる振動の周波数をだんだん上げてゆくと、ある周波数の近所から次第に眼はそれに追いつけなくなつてほとんどまつてしまう。そして眼には左右にぼんやりと擴つた鉛筆がうつる。その状態はちようど第2圖のようになるであろう。周波数をだんだん上げると眼の振幅が次第に減少すると同時に位相の遅れもともなうであろう。かりにこれ圖で示せば第3圖のようになる。



第1圖

次に第二の實驗として鉛筆のさきを最初静止させて急激にこれを右に1種ばかりずらせ再び急激に停止させる(第4圖(a)), しかし眼はそのような急激な變化には追いついて行けないだろうから、かりに何かの方法で眼の動きを測定すれば第4圖(b)のような動きを示すであろう。



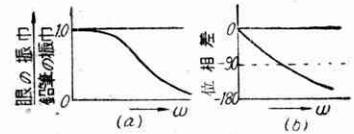
第2圖

以上のことは筆者が實驗して測定したわけではな

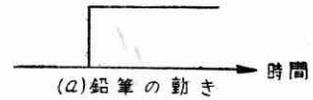
く、うまい例ではないかもしれないが、われわれの身近なものとして説明できるからあげたまでである。しかし定性的にはこのような説明をしても大して違いはないであろう。

動いているものを注視する場合眼およびそれに關係した神経系統は、非常に優秀なサーボ系を形成しているといえる。

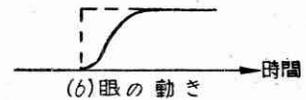
野球のうまい人はこの系統が非常に發達しているのかもしれない。眼が動いている目標を追跡する機構を分析すると、おそらく次のことが想像される。目標の像が眼の網膜にうつり、その像が網膜の中心からはずれていると、そのはずれた量(或はまた眼から物體に至る方向と眼の軸とのずれ)が神経を刺戟し脳を経て眼球の筋肉をはたらかせて、そのはずれただけの量を0にもつて行くと考えられる。このような働きをかたんにかけば第5圖(a)のようになり一種のサーボ系をつくる。この圖で矢印は信號の傳達方向を示す。中央の矩形の枠の部分は左のAからくる各瞬間の誤差信號(物體の位置と眼の位置との差)をうけて眼をうごかし、Bの部分にその位置があらはれることを示す。Aに信號が入つている限り筋肉は働きつづけ、この動作は眼の位置が物體の位置と一致してAに入る信號が0になるまで続く。第5圖(b)は一般にあるサーボ系の概念圖で、不思議にも(a)圖ときれいに對應している。目標の位置 $\theta_i$ と追従する物體の位置 $\theta_0$ の差 $\epsilon = \theta_i - \theta_0$ が増幅器の入力側に入り増幅され、モーターを驅動して $\theta_0$ を變えるわけであるが、やはりこの動作は $\theta_i$ と $\theta_0$ とが等しくなつて $\epsilon = 0$ になるまで続く。このような動作を行うもの



第3圖

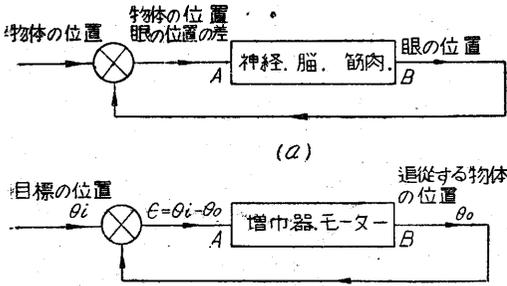


(a)鉛筆の動き



(b)眼の動き

第4圖



第 5 圖

をわれわれは多く見ることができる。たとえば計器の自動記録装置、計算機械の追従装置、工作機械を自動的に動かす装置、天望遠鏡やレーダーアンテナの自動照準、航空機船舶等の自動操縦等はすべて第 5 圖 (b) のカテゴリーの中に入る。これらに共通の特色は、追従する物體を動かすエネルギーの高い駆動装置は誤差信号  $\epsilon = \theta_i - \theta_o$  およびこれに関係した量だけで制御されていることである。

さて本論と関係をつけるために、もう少し話を續けさせていたきたい。サーボでは  $\theta_i$  はどのように變化するかは豫測できないで、全く任意に變り得るものである。そこで次の二つの問題がおこる。まず最初に (1) 一つのすでにでき上つているサーボ系に對して任意の  $\theta_i$  を與えたとき、 $\theta_o$  はどのような追従の仕方をするか？或は  $\epsilon = \theta_i - \theta_o$  はどの程度小さくおさめられるか？次の問題として (2) 或る要求を満足するサーボ系を作るにはどうすればよいか？或は既設のサーボ系の性能を改良するにはどうすればよいか？等である。(1) の方は解析 (Analysis) の問題であり、(2) の方は綜合設計 (Synthesis) の問題である。これらを解決する手段としてここ十年來 MIT 等の研究グループを發祥地として發達した傳達かん數法<sup>(1)</sup> (Transfer Function Method) というのがある。この方法の根本假定は系はすべて線形法則に支配されているということであるが、今この方法に關して少しのべなければならぬ。

冒頭にかかげた二つの素朴な實驗はこれらの理論と密接に關係している。ここで前者を實驗 (1) 後者を實驗 (2) としよう。

實驗 (1) では  $\theta_i$  に一定の振幅と周波數をもつた信號を入ると、定常状態では  $\theta_o$  同じ周波數の振動を持続するが、その振幅と位相は  $\theta_i$  のそれと異なる。したがつて  $\theta_i = Ae^{j\omega t}$ ,  $\theta_o = Be^{j(\omega t + \phi)}$  とすれば、

$$\left| \frac{\theta_o}{\theta_i} \right| = \frac{B}{A}, \text{ Ang } \frac{\theta_o}{\theta_i} = \phi \dots\dots\dots (1)$$

となる。この二つの量を周波數  $\omega$  の函數として注目する。この場合時間  $t$  は表面に直接あらわれてこない。

實驗 (2) では  $\theta_i$  を  $t=0$  で突然第 4 圖 (a) のように 0 から 1 に變化させた場合  $\theta_o$  の時間に對する變化、

$$\theta_o = \theta_o(t) \dots\dots\dots (2)$$

に注目する。

系が線形であるならばこれ二つの結果の間に密接な關係のあること、二つのうち何れか一方が知られば他は導かれること\* は電気回路の理論に親しい讀者ならばすぐに氣がつかれることであろう。或は將來この外にすぐれた方法が出るかもしれないが現在の所では主としてこの二つの大きな見方が用いられている議論が進められている。

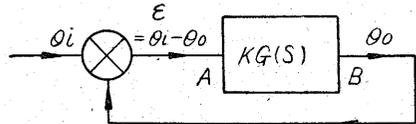
次に第 5 圖 (b) の矩形であらわされている部分の特性をあらわす具體的な量と (1) 式および (2) との關係が問題となる。この部分では A から入る  $\epsilon$  と B から出る  $\theta_o$  との關係が線形の微分方程式で關係づけられているとすれば、一般にこれらの方程式をラプラス變換して次の形にあらわされる。

$$F_1(s)\theta_o(s) = F_2(s)\epsilon(s) \dots\dots\dots (3)**$$

ここに  $s$  は複素數、 $\theta_o(s)$ ,  $\epsilon(s)$  はそれぞれ  $\theta_o$ ,  $\epsilon$  のラプラス變換をあらわす。 $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$  は當然  $s$  について或次數の代數式となる。 $F_2(s)/F_1(s) = KG(s)$  とすれば (3) は

$$\theta_o(s)/\epsilon(s) = KG(s) \dots\dots\dots (4)$$

となる。なぜこのようなまわりくどいめんどうなことをするのかと讀者は疑われるかもしれないが、これは次のような理由による。(1) 系がふくぎつになつたとき微分方程式をそのままあつかうより、このような方法で代數的に取り扱う方がはるかにかんたんである。(2) 實驗 (1) のような周波數特性を取扱うとき  $s$  を  $j\omega$  でおきかえると (4) の複素數がそのまま  $\theta_o$  と  $\epsilon$  の振幅比と位相差を



第 6 圖

あらわす。(2) (3) 實驗 (2) で出てきた  $\theta_o(t)$  等を求めるとき (4) 式から直接計算されること。(4) 安定性の判定その他綜合設計にこの形の議論をすると、事柄が非常にかんたん化されるという多くの利點をもつているためである。このようにして  $KG(s)$  は矩形枠の部分の特性をあらわしていると考えることができる。またこれは微分方程式と一義的に關係づけられている。

さて (4) 式は  $\theta_o$  と  $\epsilon$  との關係であるから  $\epsilon = \theta_i - \theta_o$  を代入して  $\theta_o$  と  $\theta_i$  との關係を求めれば

$$\theta_o(s)/\theta_i(s) = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)} \dots\dots\dots (5)$$

\* 數式ではかんたんに關係づけられるが具體的な數値計算は一般に容易ではない。

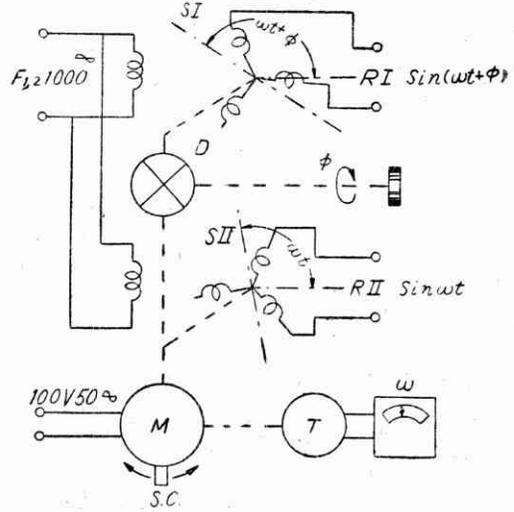
\*\* 一般にラプラス變換の場合は  $\theta_o$ ,  $\epsilon$  等の初期條件を含むがここではすべて 0 としてある。このことは後に明らかになる。

今周波数特性に注目するため(5)式において  $s \rightarrow j\omega$  としてこれを(1)式とくらべると次の式がえられる。

$$\left| \frac{KG(j\omega)}{1+KG(j\omega)} \right| = \frac{B}{A}, \text{ Ang} \frac{KG(j\omega)}{1+KG(j\omega)} = \phi \dots (1')$$

また(2)式の  $\theta_0(t)$  は(5)式からラプラスの逆変換で容易に求められるがここでは省略しよう。

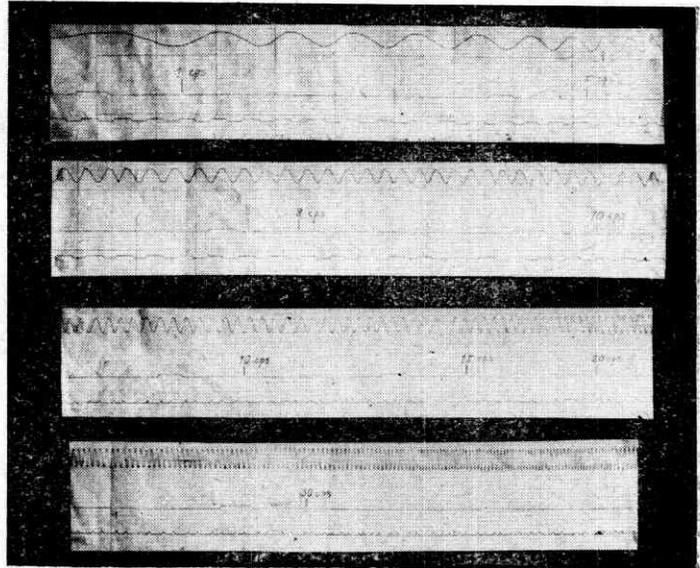
めんどうなことを長々とかいたが、ここで目的地に到達した。問題は(1')式である。一つのサーボ系を組立てた場合この特性を知りたいとき、実際に  $\theta_i$  にいろいろな周波数の一定振幅の信号を入れて各周波数について  $B/A$  と  $\phi$  を実測してやれば(1')式から  $KG(j\omega)$  を逆算することができて、それをもとにしていろいろな議論を進めることができる。これをかんたんに行う装置があると便利である。筆者はこのような意圖のもと一つの装置を試作したので、ここにこれを紹介する次第である。理論的には(5)式からわかるようにフィードバックを断つて直接  $A$  から正弦波を入れて  $B$  から出る量を測定して  $\theta_0$  と  $\varepsilon$  の比および移相差から  $KG(s)$  が求められるが、実際にはこれはかなり困難な問題である。何となれば  $\theta_0/\varepsilon$  は通常大きな値になり観測可能な  $\theta_0$  を作るためには、 $\varepsilon$  を非常に小さくしなければならないからである。したがって(1')式の関係から求める方が容易である。幸にして  $|\theta_0/\theta_i|$  は大體 1.5 から 0 の間におさまる。筆者がこの装置を作つた理由は微分解析機のサーボ機構の研究を行っている上に必要にせまられての要求からであることを附記しておく。あまり適当な名前ではないかもしれないが以下この装置を低周波発振器とよぶことにしよう。



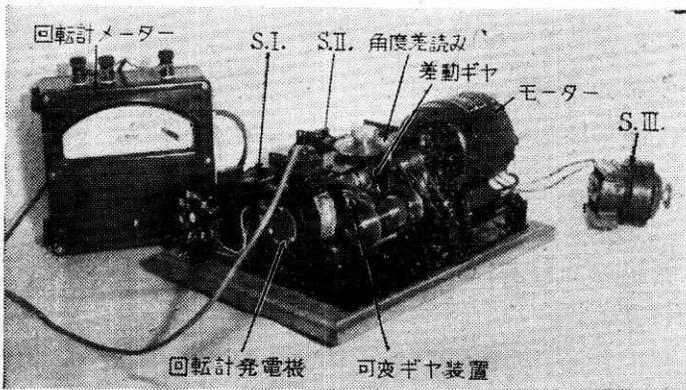
M モーター T 回転計発電機  
D 差動ギヤ S.C. モーター速度制御  
第8圖 低周波発振器の原理

1. 低周波発振器の原理および構造

第7圖は上にのべた目的にかなうため試作したものである。第8圖はこの原理および構造を示す。主な部分は SI および SII とかか



第9圖 低周波発振器の出力の記録



第7圖 低周波発振器

れているセルシン (別名シンクロともよばれているが一種の可変トランスと考えられる) とこれらのローターをまわす整流子モーターである。SI, SII の励磁線輪は 1000 サイクルで励磁される。これは別の 1000 サイクルの発振器より  $F_{12}$  を通して行われる。ローターに固定されている線輪が励磁線輪によって生じた磁場の方向に一致すればこの中に生ずる誘起電圧は最大になり、直角をなすと誘起電圧は 0 になる。その中間では誘起電圧はローターの角度と共に正弦波状に変化する。これらの電圧は 1000 サイクルの変調波として RI, RII にあらわれる。SI, SII のロータ

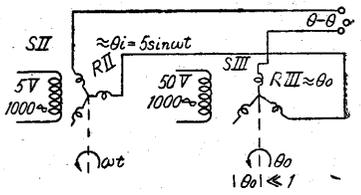
はモーター M に連結されモーターの回転がそのままローターに傳わる。この際 SI と SII の二つのローターの軸の間に差動ギヤ D がおかれて、SI と SII のローター軸の相對位置を任意にかえることができる。D により  $\phi$  なる角度差をあたえると RI, RII よりそれぞれ  $\sin(\omega t + \phi)$  と  $\sin \omega t$  に比例する 1000 サイクルの變調波がとり出される。モーター M は整流子電動機を用いているから、速度のある範囲内で變えることができるが、さらに大きな速度の變化をえたい場合にはギヤの切換えによつて行ふ (第 7 圖可變ギヤ装置)。とり出される正弦波の周波數  $\omega$  はモーター M の回転數によつてきまつてくるから、これを測定するためにタコメーター發電機 T がモーター軸に直結されて、この發電電壓からメーターにより回転數が直讀され、したがつて周波數を知ることができる。得られる周波數は大體 40~0.2 サイクル/秒の範囲である。第 9 圖は RI から出た波形を整流してインクリターによつて記録した一例である。寫真中の數字は周波數を示している。

2. サーボ系の特性を測定する方法

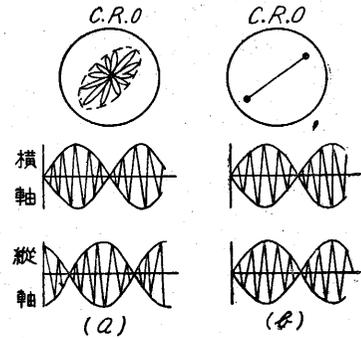
前節でのべた装置を用いて B/A および  $\phi$  を測定する装置全體をのべよう。この全體を第 10 圖に示す (寫真第 1 圖を参照)。圖の下の方にある S は今測定しようとするサーボ系で、フィードバックを切つた状態であるから、ちょうど第 5 圖の矩形の枠の部分に相當する。したがつて左側の端子が誤差信號の入る A の部分を示す。ここでは具體的な入力軸  $\theta_i$  に相當する部分は姿を消して、入力軸の回転角に相當するものが電壓でおきかえられている。

低周波發振器の RII から  $\theta_i$  に比例した電壓がとり出され、これは M の回転數に應じた周波數をもつた正弦

波である。次にサーボ系の出力軸  $\theta_0$  を實際に電壓に變換しなければならぬから、この部分にセルシン SIII を用いる。勵磁コイル  $F_3$  はやはり同じ發振器よりくる 1000 サイクルの周波數の電壓によつて勵磁されている。ここで RIII に出てくる電壓は  $\sin \theta_0$  に比例するわけであるが、幸なことに  $\theta_0$  は振動を行うわけであるから、その振動



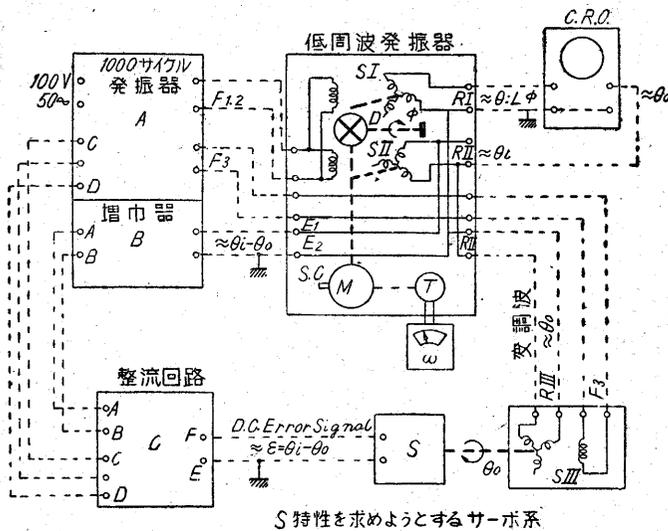
第 11 圖



第 12 圖 C.R.O. にあらわれる圖形

中心を  $\theta_0=0$  にとつて  $\theta_0$  の絶對値が小さいあたりを用いれば大體  $\theta_0$  に比例する電壓が得られる。  $\sin \theta_0 = \theta_0 - \frac{\theta_0^3}{3} + \dots$  で第 2 項が第 1 項に比べて 1/10 程度になる。所は  $\theta_0$  が大體  $30^\circ$  位であるから實驗上十分差支ない。 $\theta_i - \theta_0$  に比例した電壓を得るには RII, RIII の端子電壓の差をとればよいのであるから簡單である。第 11 圖を参照されれば理解が容易である。第 10 圖ではこれは端子  $E_1, E_2$  にあらわれている。これは増幅器 B で増幅されてサーボ S に入るべきであるが、實はこれは 1000 サイクルの變調波であるから、これを直流になおすため整流回路 C が入れてある。これで S は  $\theta_i - \theta_0$  が誤差信號端子に入っているから閉じたループをこの系は作つて前

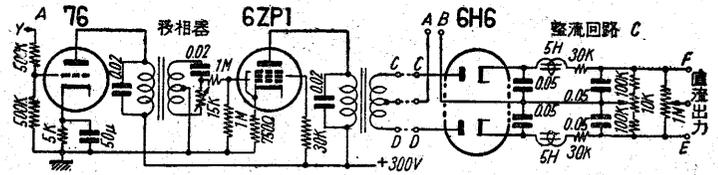
にのべた B/A と  $\phi$  を求めるに好都合の状態になった。  
今この状態でモーター M の回転をはじめれば、RII からその回転數に應じた周波數の正弦波が出ているから、 $\theta_0$  はそれに相當した振動をはじめるのであろう。 $\theta_0$  の振動の振幅  $|\theta_0|$  及び  $\theta_i$  と  $\theta_0$  の振動の位相のずれを測定する必要があるが、これには陰極線オツシロ C.R.O. を用いる。この縦軸に RI をつなぎ、横軸に  $\theta_0$  の振動波形を入れてやると一般には第 12 圖 (a) のような圖形をえがくであろうが、差動ギヤ D を回轉して  $\phi$  を適當にかえてやれば、圖形が第 12 圖 (b) のように直線になる部分があるだろう。このときの  $\phi$  がちょうど  $\theta_i$  と  $\theta_0$  の移相差をあたえることは容易にわかる。B/A に相當する値は縦軸と横軸の振幅の比であるから、この (b) 圖の直線



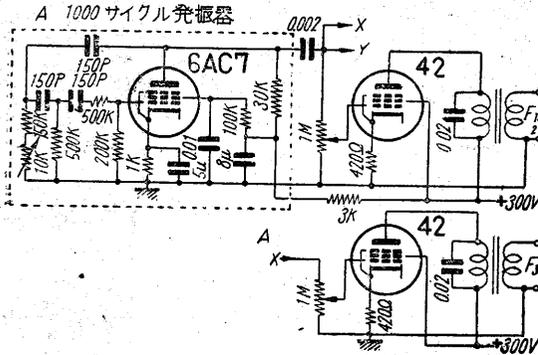
第 10 圖 サーボ系の特性を測定する装置 (第 1 圖参照)

の傾斜から直ちに求められる。

モーターの回転速度をかえてこのように操作をつぎつぎに繰返して測定すれば、それぞれの周波数に對する  $B/A$  および  $\phi$  がえられるから、第2圖に相當するサーボ系の周波數特性を記述する資料をうる事ができる。



第 14 圖



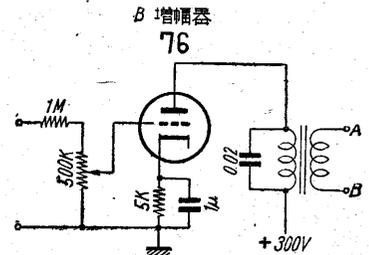
第 13 圖

第9圖でブロックとしてかかわれている部分 A, B, C の各部の具體的な回路圖を第 13, 14, 15 圖に示してある。

この装置の特色は S<sub>1</sub>, S<sub>II</sub>, S<sub>III</sub> を用いているため、任意の周波數を出すことが非常に容易であり、周波數によつて振幅が變らず、1000 サイクルの變調波を用いているため増幅が容易であり、機械的な角度から電壓への變

換が非常に容易な點にある。一つの試みとして讀者の御參考になれば幸である。

1000 サイクル發振器その他電氣的部分について大井助教授より種々御教示をいただき實驗中必要な裝置について御援助をいただいた、機械部分の設計に關し



第 15 圖

て試作工場白石眞三郎氏に負う所が多い。ここに謝意を表する次第である。(1952・7・3)

文 獻

- (1) 高橋安人：生産研究 昭和 26 年 9 月 p. 9.
- (2) たとえば G. S. Brown, D. P. Campbell, Principles of Servomechanisms, J. Wiley, 1948, p. 97.

速報 12

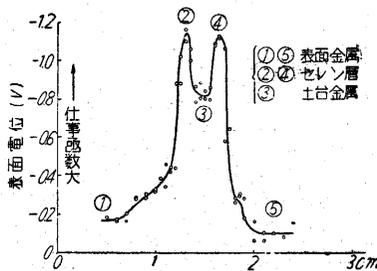
セレン整流器の斜面の表面電位解析

中田 一郎・谷 安正

セレン整流器の整流機構については、現在なお種々の論議が行われているが、堰層およびそれを挟む金属の電位分布が主要な役割を演じている點は異論がなく、その究明は學問的にも興味があり、生産面からも重要な課題である。

電位分布については、整流板を研磨しながら、新しく現われる面の表面電位を測定して内部に向つての分布を推定する方法はすでに行われているが、表面電位の測定につきものの再現性の悪さのために、研磨毎にとつた測定値の關連性について問題がある。

筆者はエメリ一紙にて局部的に研磨した整流板が第1圖のような斜断面を表わし、その面内に各層が排列することから、先に報告した探針式振動容量電位計<sup>1)</sup>により測定を試みたところ

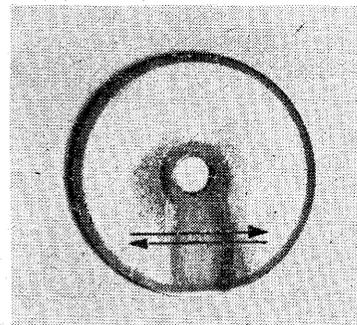


第 1 圖

る、各層の特徴を現わす電位分布が比較的容易にみられるので、結果について簡単に報告する。

第1圖の資料を矢印の方向に移動することにより、第2圖の曲線が得られる。問題の堰層は表面金属とその下のセレンとの境にあるが、今のところ未だはつきり測定にかかつていない。しかしセレンおよびこれを挟む二種類の金属がそれぞれ異つた表面電位を呈している模様が一應うかがわれる。堰層の検出については目下實驗中である。

このような方法により測定した表面電位分布と整流器内部の電位分布との對應についてはいろいろ問題があるが、一つの手掛りになれば面白い。(1952・7・2)



第 2 圖

文獻 1) 中田・小川, 生産研究 3, 369, (1951)