

電子管式流量計および積算計

Electronic Self-Balancing Flowmeter and Integrator

松 原 一 郎*
Ichirō Matsubara

内 容 梗 概

電子管式自動平衡形流量計において励磁コイル、基準電圧コイル、信号電圧コイルの3個のコイルを有する特殊差動変圧器を使用した測定回路の原理特性およびコイル構造について記すとともに、これと組合わせて使用される交流タコジェネレータとサーボモートルおよび増幅器を用いた電子管式流量積算計について述べる。

1. 緒 言

流量は温度、圧力などの物理量とともに近代工業においては重要なプロセス変数の一つで、プロセス各系の流量を測定あるいは制御する要求が多い。

流量計としては古くから種々の方式のものが存在し、流量の大小、測定条件、設置条件などによりそれぞれ異なったものが使用されている。工業用としては一般に差圧式流量計および面積式流量計が現状ではその大半を占めている。電送式差圧流量計は管路に絞リ機構を設け、その前後の差圧を測定する差圧計の封塞液面の変位を電気的に検出し測定する。また電送式面積流量計は差圧式流量計と同様に、テーパ管と浮子により流体の通過面積を変化させ、浮子の移動位置を測定する面積流量計の浮子変位を電気的に検出し測定するものである。

電子管式平衡計器を使用した流量測定にはこれらの変位を鉄心変位とし誘導コイルを使用して、電気的に変換を行い測定する。以下この測定方式の原理特性およびコイル構造について概説を行い、また計器により測定した流量の積算を行う、交流タコジェネレータとサーボモートルおよび増幅器を組合わせて使用した電子管式流量積算計について述べる。

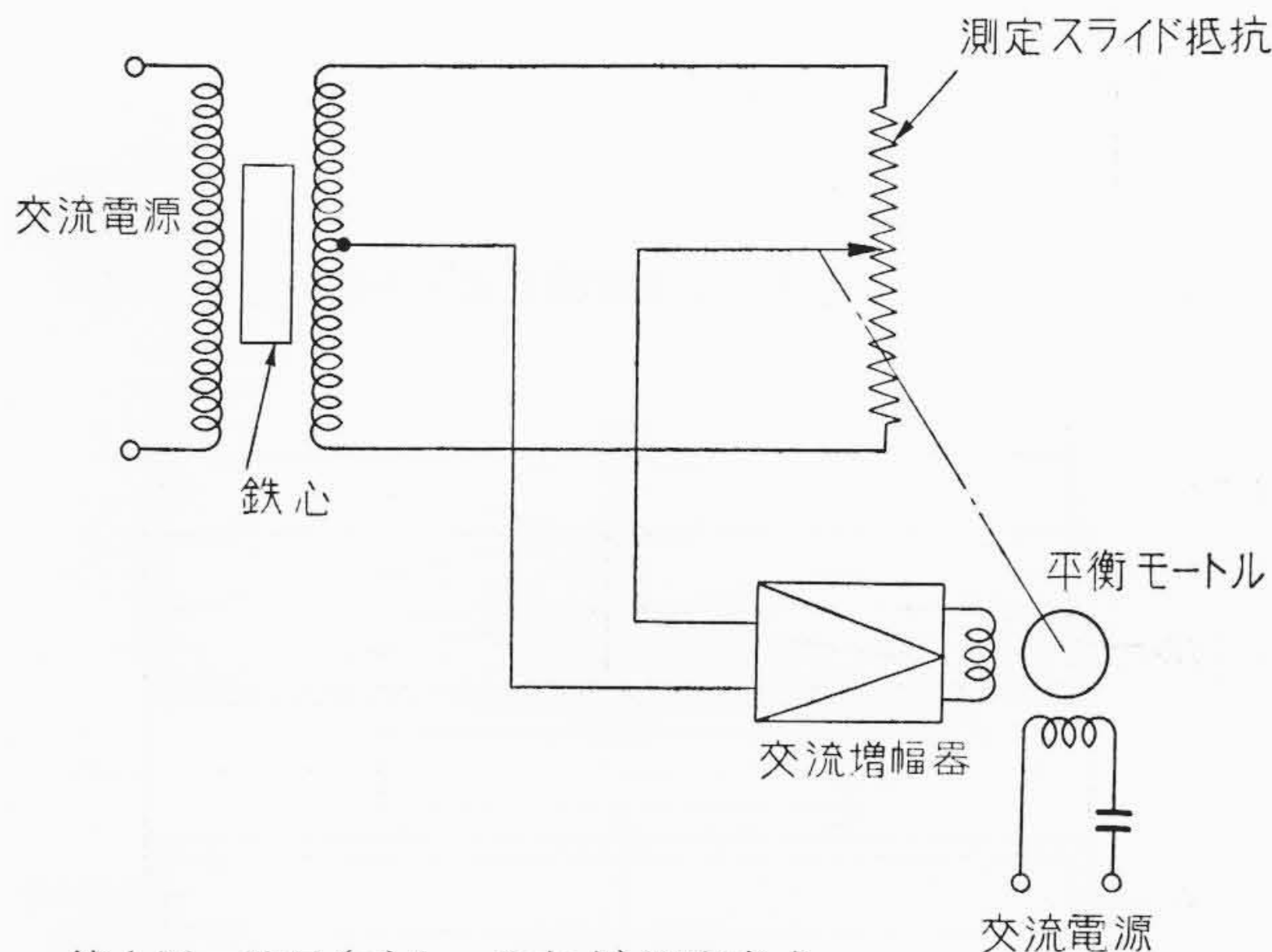
2. 測 定 方 式

誘導コイルを使用する測定方式は種々存在するが、平衡計器の測定回路可変部にスライド抵抗を使用する場合、一般的な測定回路として第1図に示すような方式を使用している。すなわち誘導コイルは一次コイルを交流電源により励磁し、二次コイルより信号を検出する。鉄心はこのコイル中を変位する。二次側には測定信号を測定する測定回路と増幅器とを接続し、二次コイルとスライド抵抗を2辺としたブリッジを構成させている。一、二次コイル間の相互インダクタンスの変化が鉄心の変化に比例する範囲に対し、スライド抵抗の変化によりブリッジは自動平衡され流量を測定する。

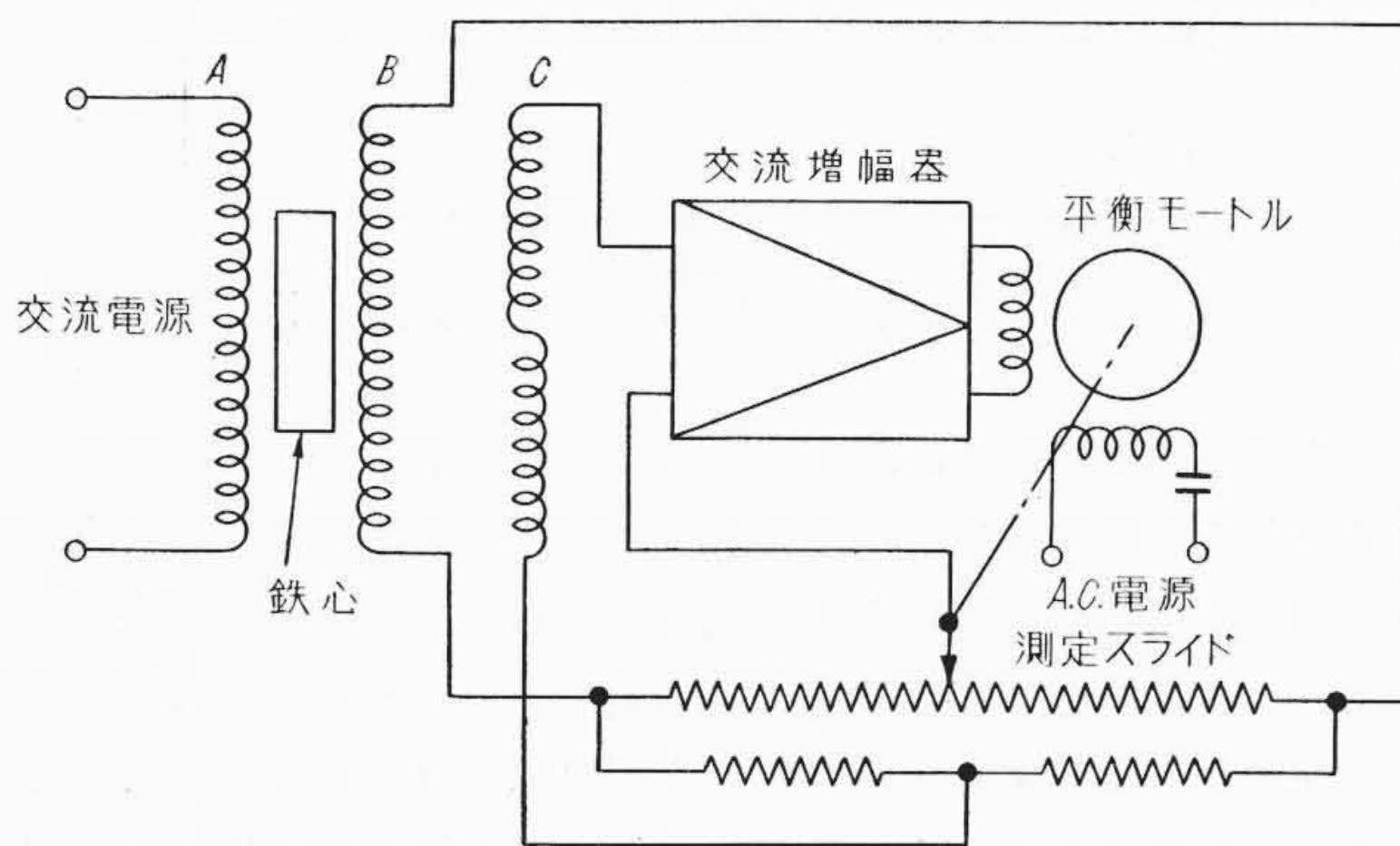
日立電子管式流量計の測定方式は、第2図に示すような差動変圧器を応用したものである。Aは励磁コイル、Bは基準電圧コイル、Cは信号電圧コイルとして使用し、Bコイルに発生した電圧を測定スライド抵抗に印加し、鉄心の変位に比例するCコイルの電圧を交流電位差計方式の自動平衡にて測定している⁽¹⁾。

この両者の測定方式の特性比較の一例として、計器の不感動帯に対する試験結果を第3図に示す。前者のブリッジ方式においては最大0.7%程度の不感動帯を有するが、後者の交流電位差計方式においては不感動帯を認めることができなかった。これらのおもな原因としては後述する交流電位差計方式において、誘導コイルにA、B、Cの3個のコイルを使用するための種々の特長によるものと考えられる。

* 日立製作所多賀工場



第1図 流量(ブリッジ方式)測定方式



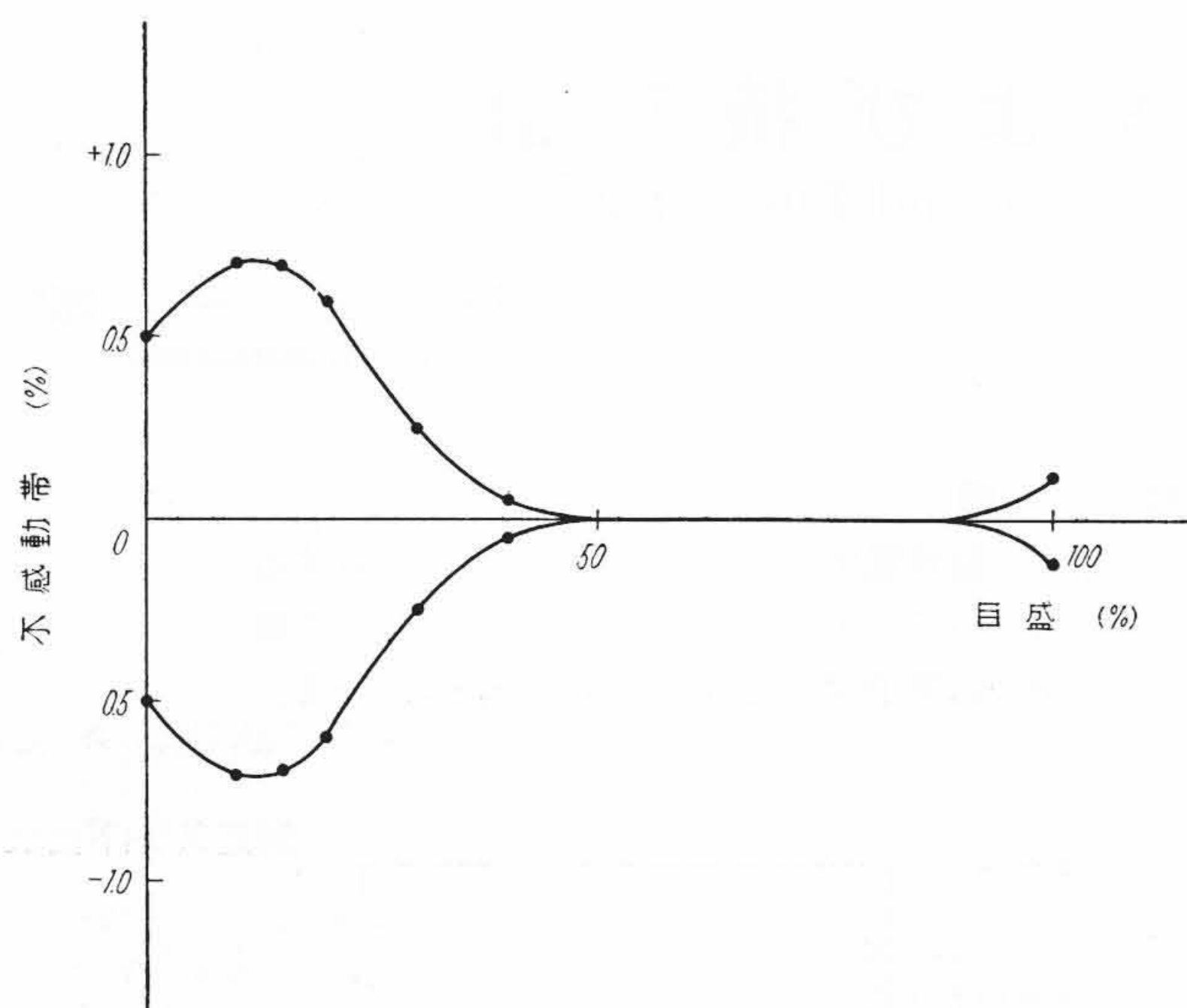
第2図 流量計測定回路原理図

3. 原 理

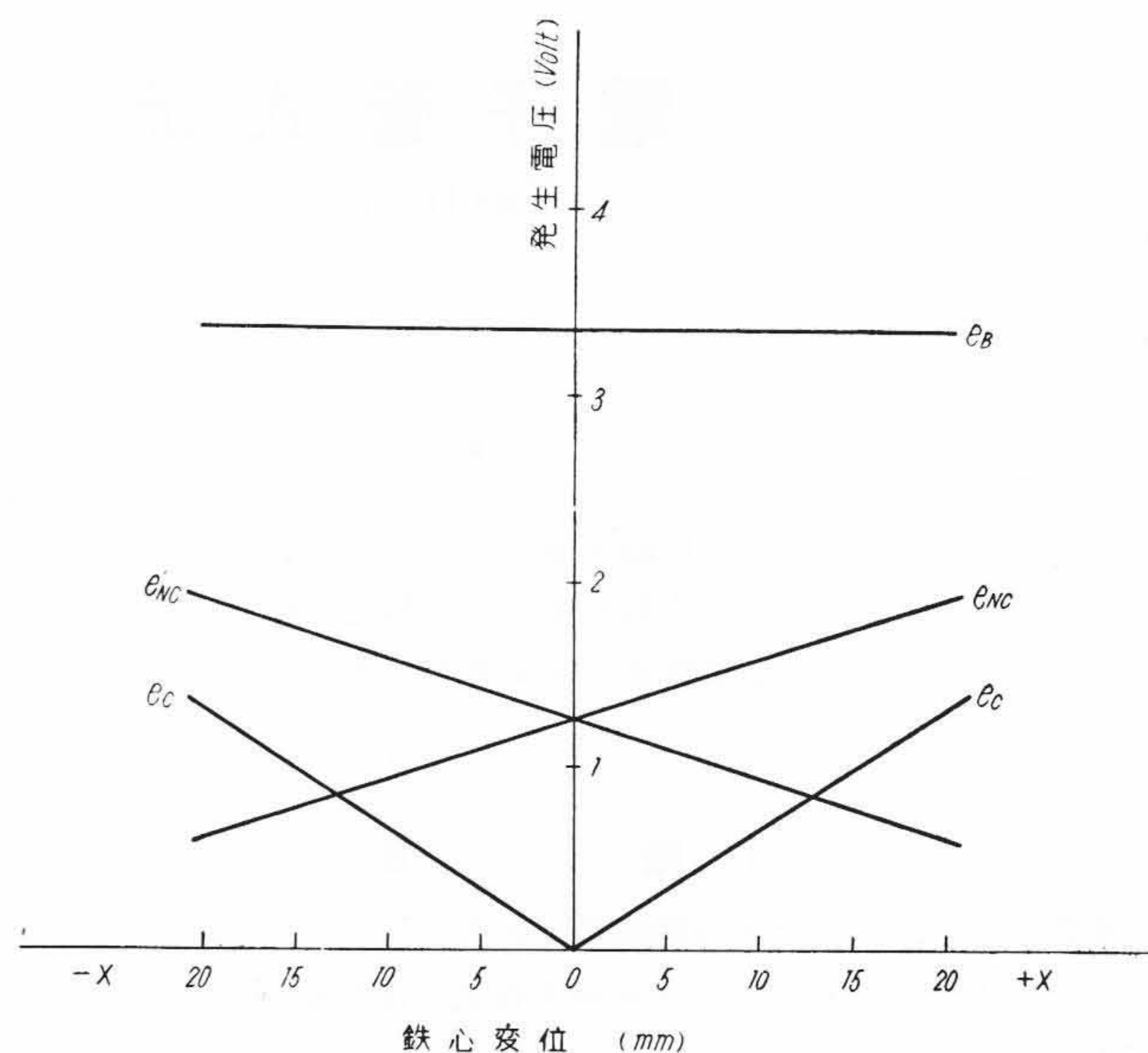
コイルは第4図に示すように同一ボビンに3組のコイルを巻装し、 N_A, N_A' は励磁用として電源に接続されるAコイル、 N_B, N_B' は基準電圧発生用として直列に接続されたBコイル、 N_C, N_C' は測定電圧発生用として逆極性に接続されたCコイルである。コイル中心には45%パーマロイ製の鉄心をそう入し軸方向に変位する。

鉄心変位 X に対する各コイルの発生電圧は第5図のように変化する。すなわちコイルの中心と鉄心の中心が一致した点を0として、 $\pm 20\text{ mm}$ の範囲では N_C, N_C' のコイルに発生する電圧は e_{NC}, e'_{NC} のように直線的に変化し、逆極性に接続しているため e_C のように変化する。またこれと同様な傾向を有する電圧を直列に接続したBコイルは、 e_B のように一定の電圧を発生する。この e_B を交流電位差計の基準電源とし、Cコイルの電圧変化すなわち流量を測定する。

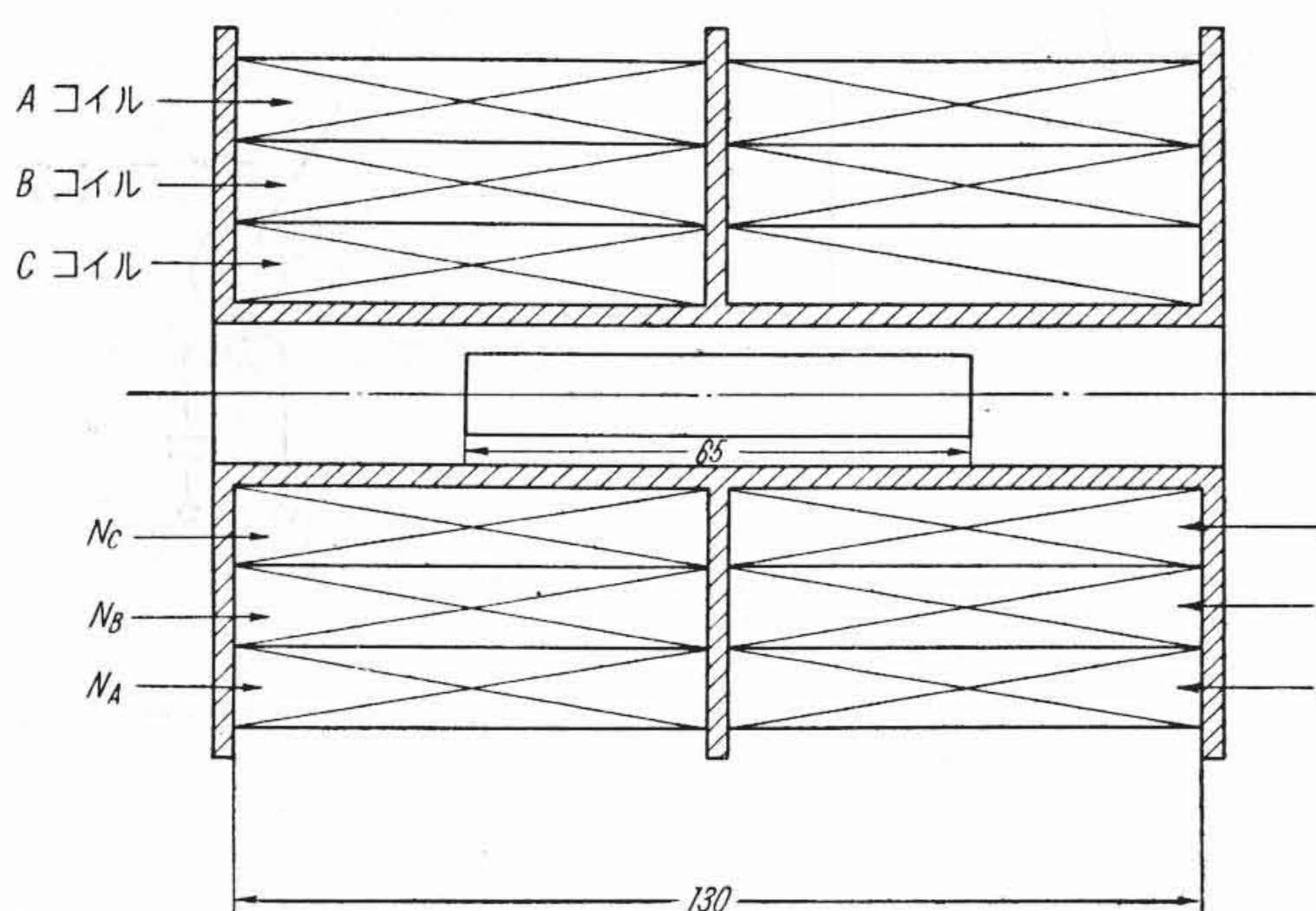
さて第1,2図のように鉄心入り可変インダクタンス素子を測定回路に入れた自動平衡計器において、常に問題となるのは位相関係、電源波形、外部条件の影響である。特に位相関係の相異は平衡点に



第3図 ブリッジ方式による計器目盛と不感動帯との関係



第5図 鉄心変位とコイルの発生電圧との関係



第4図 流量計コイル構造図

おける残留電圧となり、測定回路が見かけ上平衡がとれたのちも平衡モートルを動作させない成分が残留電圧として残る。この残留電圧は指示にはあまり誤差を生じないが、過大な無効電圧が入力となりサーボ増幅器を飽和させ計器の感度を低下させる。このため高精度の計測を必要とする場合、位相の相異は十分注意が必要である。回路の平衡条件を求めるため第6図のような等価回路にて考察する⁽²⁾。

ここに i_0 : Aコイルの励磁電流

i_1, i_2 : Bコイル, Cコイルの電流

i_D : 増幅器への入力電流

ω : 励磁電源の角周波数

M_0 : Aコイルと鉄心との相互インダクタンス

M_1, M_2 : Bコイルと鉄心との相互インダクタンス

M_3, M_4 : Cコイルと鉄心との相互インダクタンス

Z_0 : 鉄心のインピーダンス

Z_1, Z_2 : Bコイルのインピーダンス

Z_3, Z_4 : Cコイルのインピーダンス

Z_D : 増幅器の入力インピーダンス

R_{11} : スライド抵抗

R_{12} : Cコイルの負荷抵抗

n : スライド抵抗のしゅう動子変位率

e_B : Bコイルの電圧

e_C : Cコイルの電圧

e_{NC}, e'_{NC} : Cコイルの N_C, N'_C コイルの発生電圧

$$e_{NC} = \frac{i_0 \omega^2 M_0 M_3}{Z_0} \dots (1)$$

$$e'_{NC} = \frac{i_0 \omega^2 M_0 M_4}{Z_0} \dots (2)$$

$$e_C = \frac{i_0 \omega^2 M_0 (M_3 - M_4)}{Z_0} \dots (3)$$

$$e_B = \frac{i_0 \omega^2 M_0 (M_1 + M_2)}{Z_0} \dots (4)$$

$$i_1 \{ Z_1 + Z_2 + R_{11} + R_{11} (1-n) \} + (i_1 - i_D) R_{11} n = e_B \dots (5)$$

$$i_2 (Z_3 + Z_4) + (i_2 - i_D) R_{12} = e_C \dots (6)$$

$$i_D Z_D - (i_2 - i_D) R_{12} - (i_1 - i_D) R_{11} n = 0 \dots (7)$$

$$Z_B = Z_1 + Z_2 + 2R_{11} \dots (8)$$

$$Z_C = Z_3 + Z_4 + R_{12} \dots (9)$$

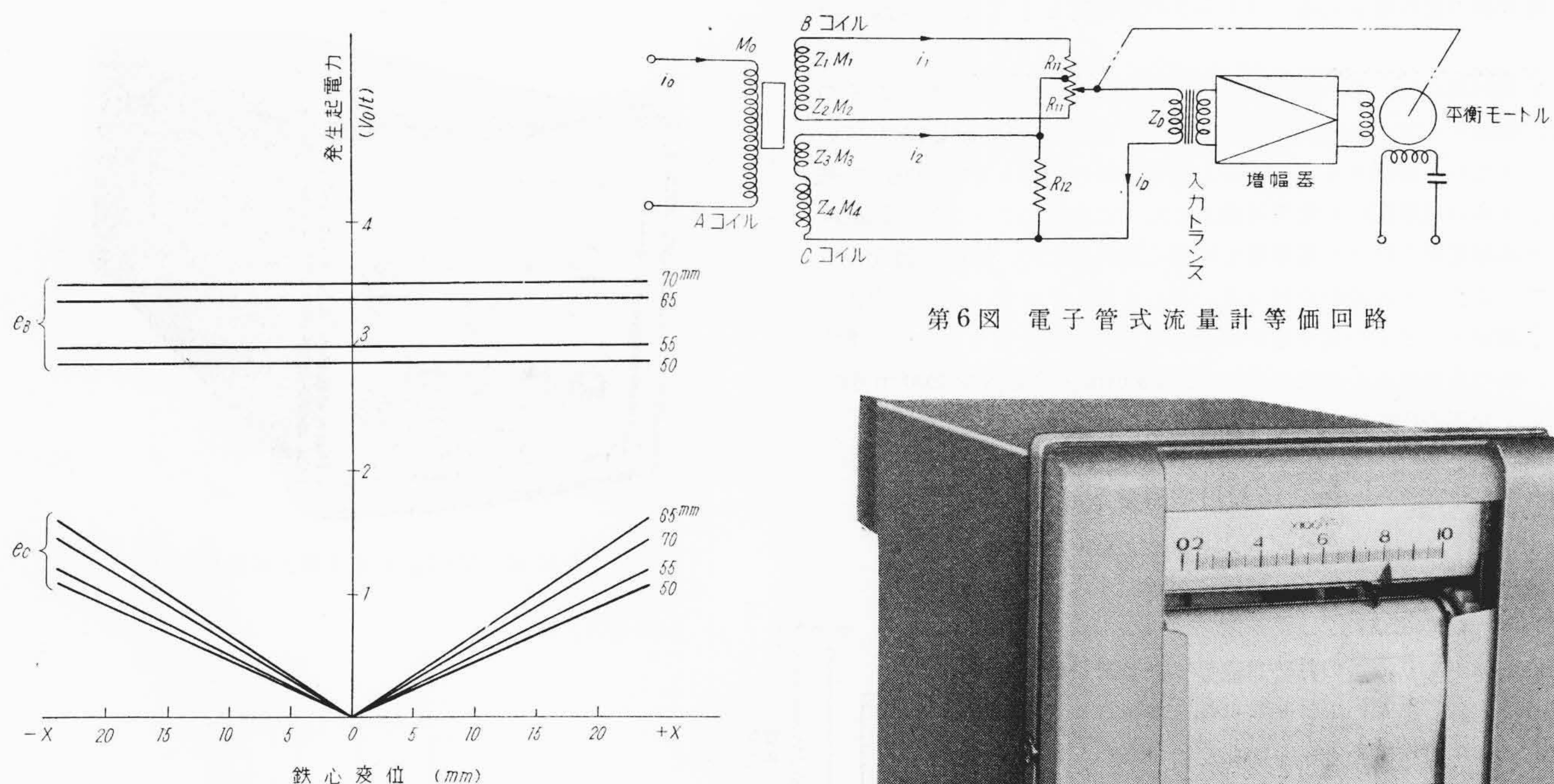
とすれば

$$i_D \left(Z_D + \frac{R_{12}^2}{Z_C} - R_{12} - \frac{n R_{12}^2}{Z_B} + n R_{11} \right) = \frac{e_C R_{12}}{Z_C} + \frac{n e_B R_{11}}{Z_B} \dots (10)$$

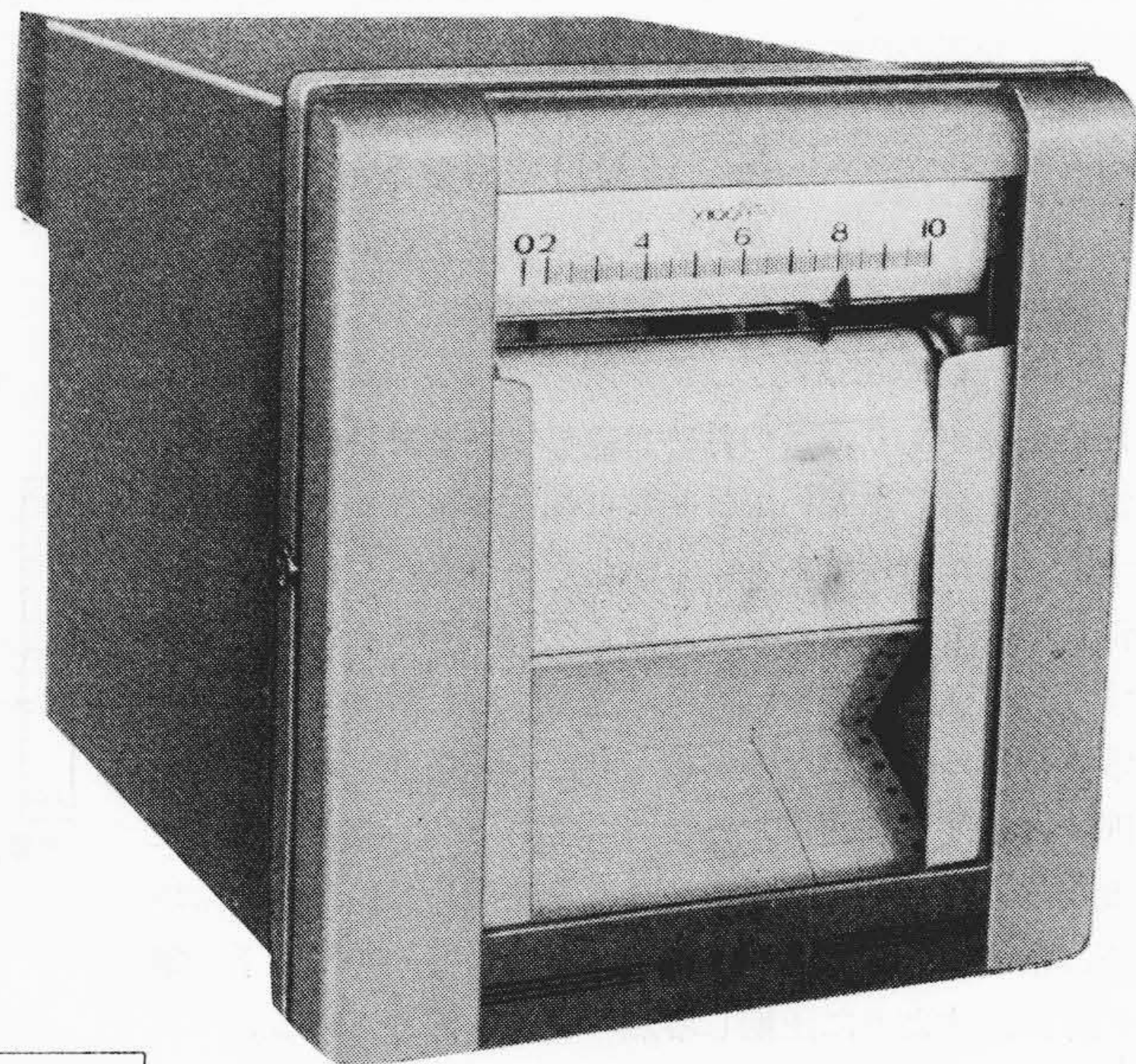
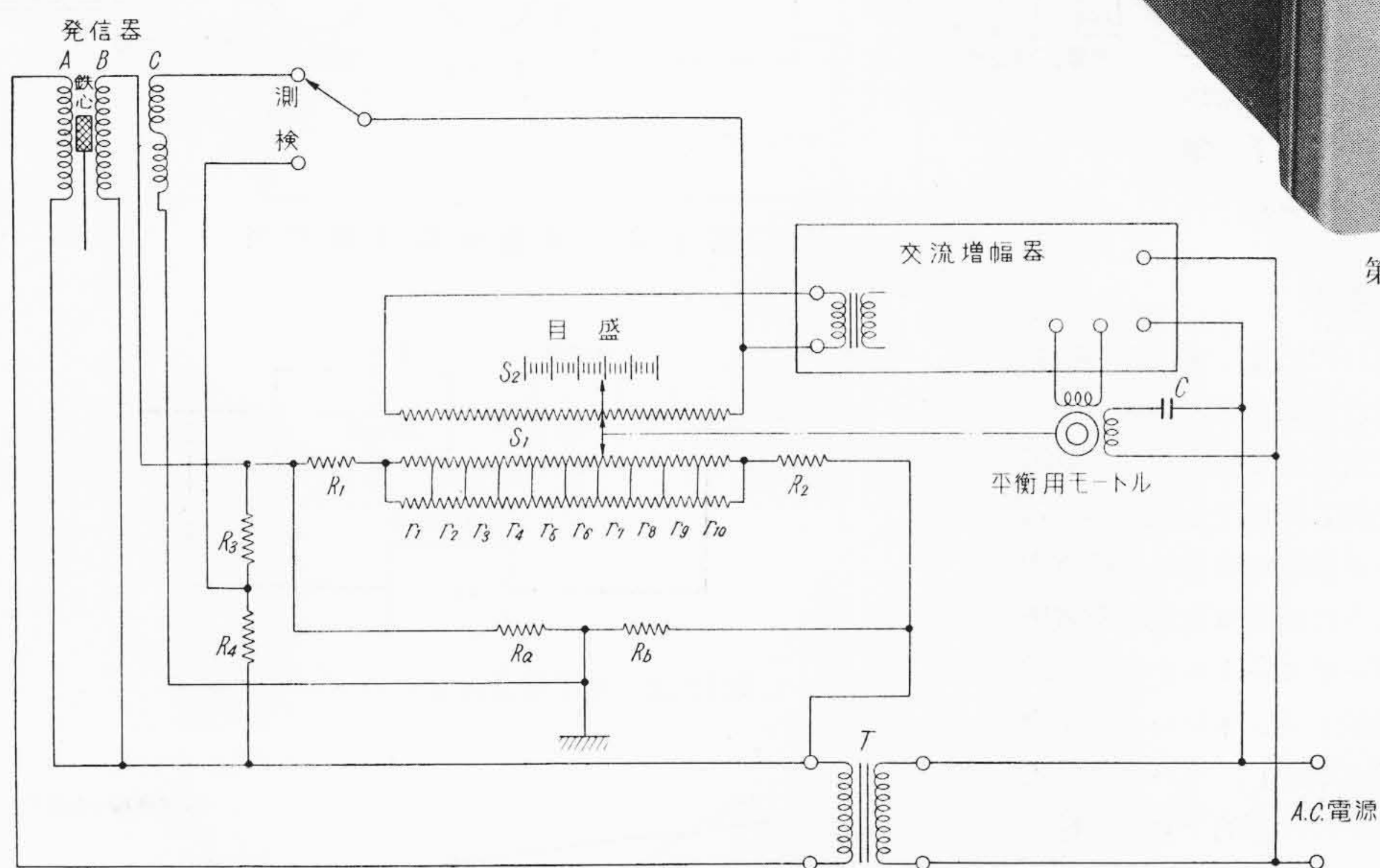
$i_D = 0$ のためには

$$\frac{(M_4 - M_3) R_{12}}{Z_C} = \frac{(M_1 + M_2) n R_{11}}{Z_B} \dots (11)$$

M_1, M_2, M_3, M_4 が鉄心の変位に対し比例的に変化すると仮定し Z_B, Z_C が一定であるとすれば、 $M_1 + M_2$ は一定となり、 n は $M_4 - M_3$ に比例するから指示は鉄心の変位に比例する。 Z_B, Z_C にはインダクタンス L_1, L_2, L_3, L_4 が存在し鉄心変位に対し比例的に変化すると仮定すれば、 Z_B は一定となり Z_C は鉄心変位に対し変化することになり残留電圧を生ずるが、 R_{12} を大きく取ることにより十分残留電圧を小さくすることが可能である。以上の考察は各種の変化を一応線形として考えたが、非線形的要素を多数含み実際の現象はさらに複雑となっている。すなわち測定回路においてBコイルの出力電圧は鉄心変位に対し位相は変化し、Cコイルの出力電圧の位相も変化する。Bコイルの位相は基準電源に対し正確に測定することが困難であるが、数分程度変化しCコイルの位相もBコイルの位相と同様な傾向を持って多少大きく変化している。両者の位相差も中心付近にて最小となり、変位にしたがって大きくなるが鉄心変位が測定範囲内においては最大10分程度である。



第6図 電子管式流量計等価回路

第9図 VKB₃₁形電子管式流量記録計

第8図 電子管式流量計測定回路

4. コイル構造および特性

コイルの幾何学的構造が対称でないと中心付近における残留電圧が大きくなり、その付近における精度が不安定となるため、残留電圧を十分小さくする必要がある。このためCコイルをボビンの最初に、設計上許すかぎり太めの巻線を巻装し巻線の工作精度を良くするよう考慮し、次に均一性を必要とするBコイルの巻装を行う。

鉄心の最適寸法を求めるため、鉄心寸法を変化し、変位と出力電圧との関係を求めた結果を第7図に示す。図より明らかなようにコイル長の約1/2の長さにて差動コイル(Cコイル)からの出力電圧の鉄心変位に対する感度が最良となる。すなわち最高感度をうるのに適当な鉄心寸法があり、それよりも長くとも短かくとも感度が減少する。これはAコイルの磁束をCコイルが切る割合はコイル中に鉄心が1/2はといった状態で最大になるためと考えられる。Bコイルは鉄心が長くなるにつれてコイルに鎖交する磁束数が増大し発生電圧は増

加する⁽³⁾。

コイルの温度変化に対する影響は、励磁コイルと基準電圧発生コイルとを同一ボビンに巻装してあるため、励磁コイルのインピーダンス変化による励磁電流の変化は完全に補償される。また基準電圧発生コイルの変化は負荷抵抗を大きくすること、および内部インピーダンスを低下させることにより十分補償できる。電源電圧の変動、電源周波数の変動、外部磁界よりの影響、電源波形の影響による誤差は3個のコイルを同一ボビンに巻装し完全に補償しうる。

上述のような構造を持ったコイルは、均一な特性を有する製品を製作するのに容易である。このため多点の流量計、圧力計などを製作することが可能である。

5. 測定回路

実際に使用している測定回路を第8図に示す。図で R_1, R_2 は振幅調整抵抗、 $r_1, r_2, \dots, r_{10}$ は関数抵抗として使用され、 R_3, R_4 は

平衡計器の動作検定回路のブリッジの抵抗辺として使用されている。

工業計測において一般に発信器と計器間の距離は相当長くなるので、接続ケーブルの経費減少のため線数を減少させた回路としている。すなわち励磁コイルの回路と基準電圧の回路とを同一線にて共用し5本の連絡線にて使用可能とした。このためケーブルの抵抗による励磁電源の降下が基準電圧回路に加わるため、励磁電流を小さくするようコイル設計を行っている。また、ケーブルの長さ変化により測定スライドの基準電圧が変化することを防止するため、基準電圧回路の各抵抗を十分大きくとり、1.6 mmφの配線を200 m引いても十分誤差内にはいるよう考慮している。

6. 流量計の目盛形状

オリフィスあるいはベンチュリーなどを使用した流量計は流量 Q 、発生差圧 h 、比例定数 K とすれば

$$Q^2 = K h \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる関係があり、このため目盛形状は2乗目盛となるが電子管式計器においては関数抵抗を使用して平等目盛とすることが可能である。しかし平等目盛とした流量計は流量の小さい部分において鉄心変位に対する指針の動きすなわち感度が非常に大きくなる。したがって発信器の零点付近のわずかな不安定も計器の零点は、実際測定範囲では精度上問題にならないのであるが、非常に不安定となる。しかしオリフィスなどを使用した場合、20%以下は精度を保証できないため、計器目盛の20%以下を第9図に示すように圧縮し零点の安定を行っている。

7. 電子管式流量積算計

流量は指示記録のほか、ある時間内に流れた流量、すなわち積算値を知る必要がある。積算方式には機械式、電気式などが存在するが、第10図に示す流量積算計は電子管式流量計と組合わせて使用する積算計で、電子管式流量計に流量に比例した電圧を発生させる発信スライドを設け、その発信電圧をサーボ機構を使用して積算する方式である。すなわち第11図に示すように流量に比例した電圧は増幅器にはいり、増幅器の出力によりサーボモートルが回転し、それに直結した交流タコジェネレータが回転しジェネレータの出力を増幅器の入力にフィードバックさせ、系は平衡し、モートルは入力信号に比例した回転数で動作する。いまその理想的ブロック線図をかけば第12図のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{C}{R} &= \frac{G}{1+GH} = \frac{K_1 \frac{K_2}{JS^2+BS}}{1+K_1 \frac{K_2}{JS^2+BS} K_3 S} \\ &= \frac{K_1 K_2}{JS^2 + (K_1 K_2 K_3 + B) S} \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

K_1 を十分大きくすれば

$$C = \frac{1}{K_3 S} R \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{C}{S.C.} = \int \frac{r}{K_3} dt \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに

K_1 : 交流増幅器の利得

K_2 : サーボモートルの利得

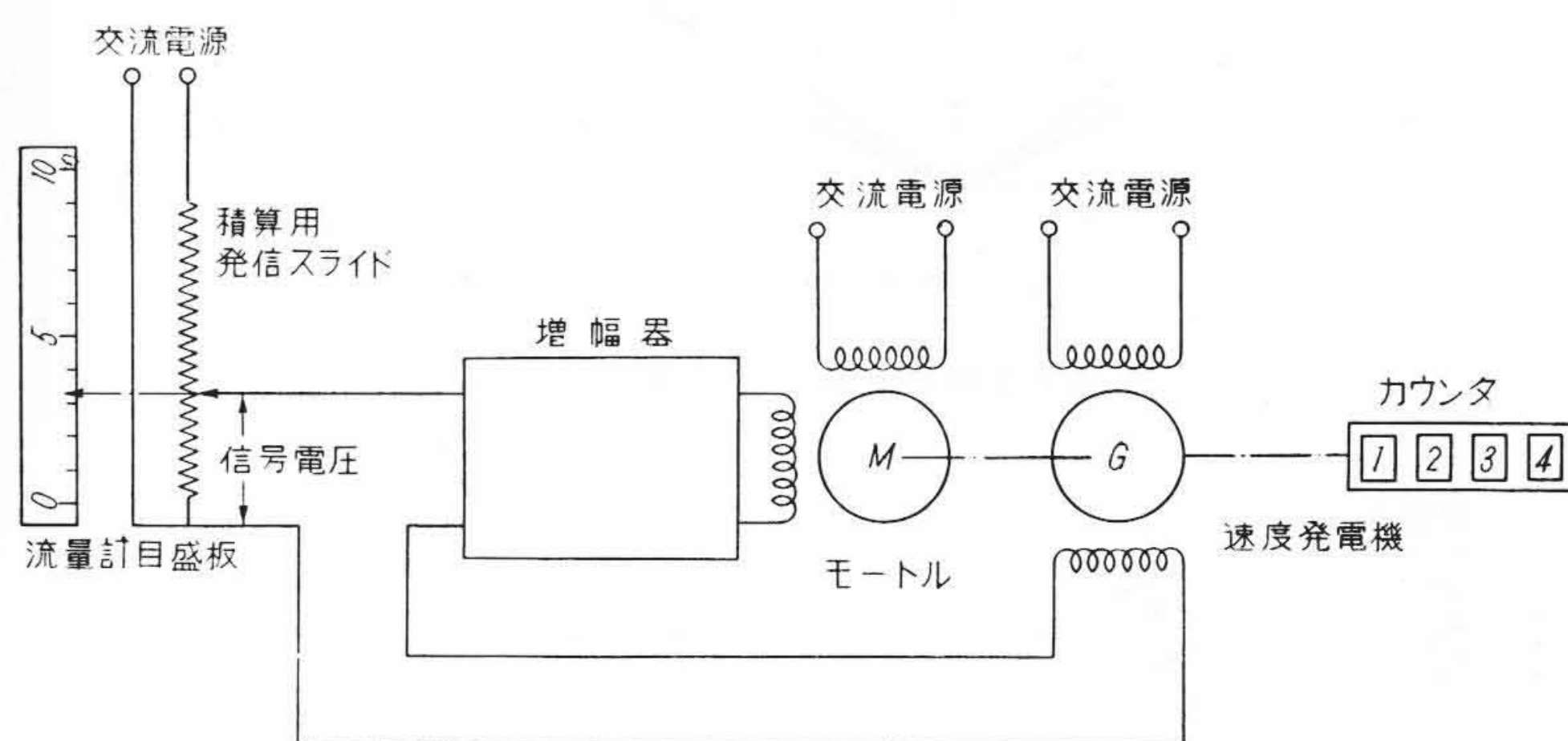
J : サーボモートルの可動部の慣性

B : サーボモートルの粘性

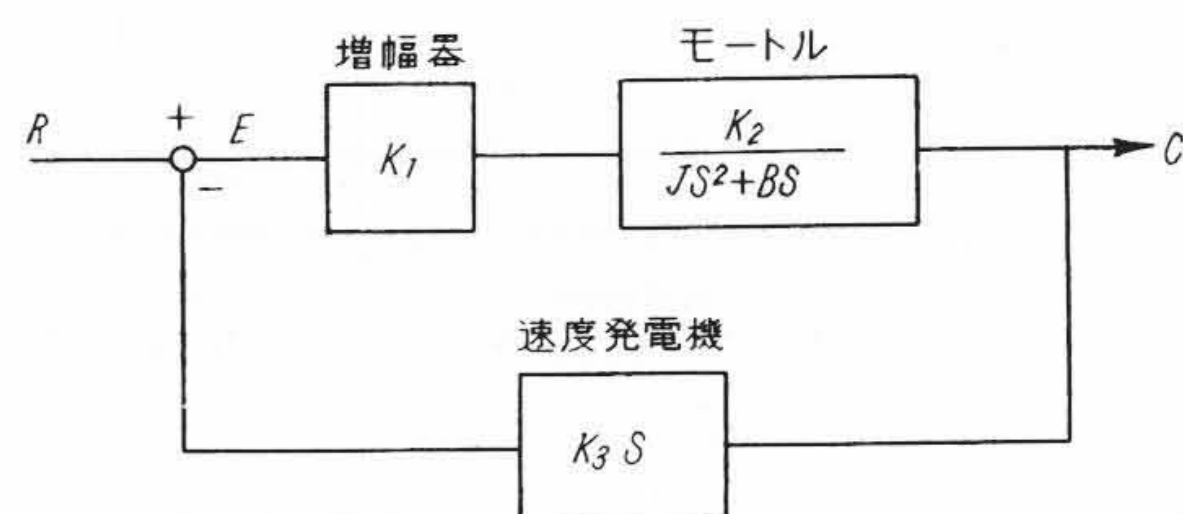
K_3 : ジェネレータの利得



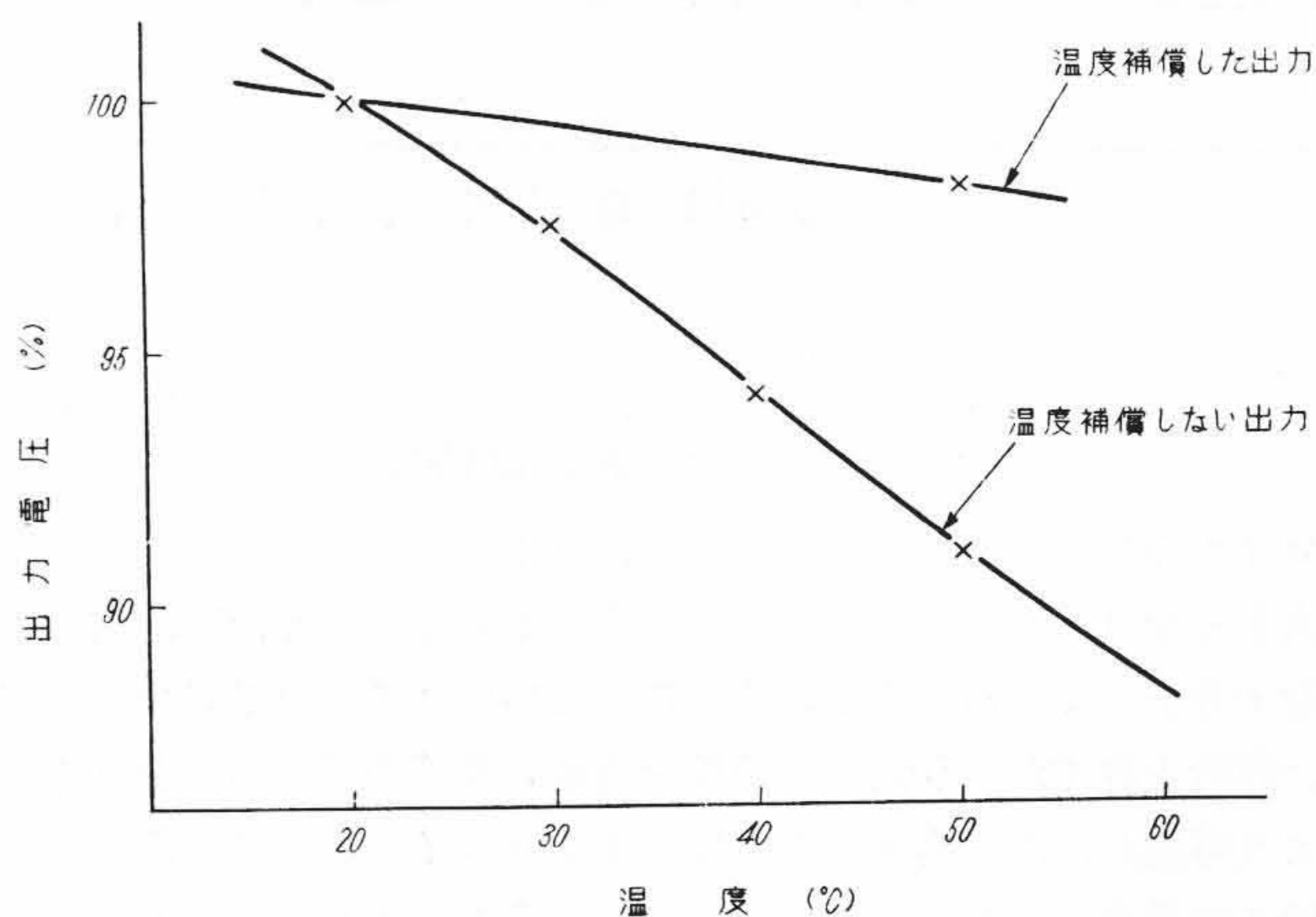
第10図 VST₆₁形電子管式流量積算計



第11図 電子管式流量積算計原理図

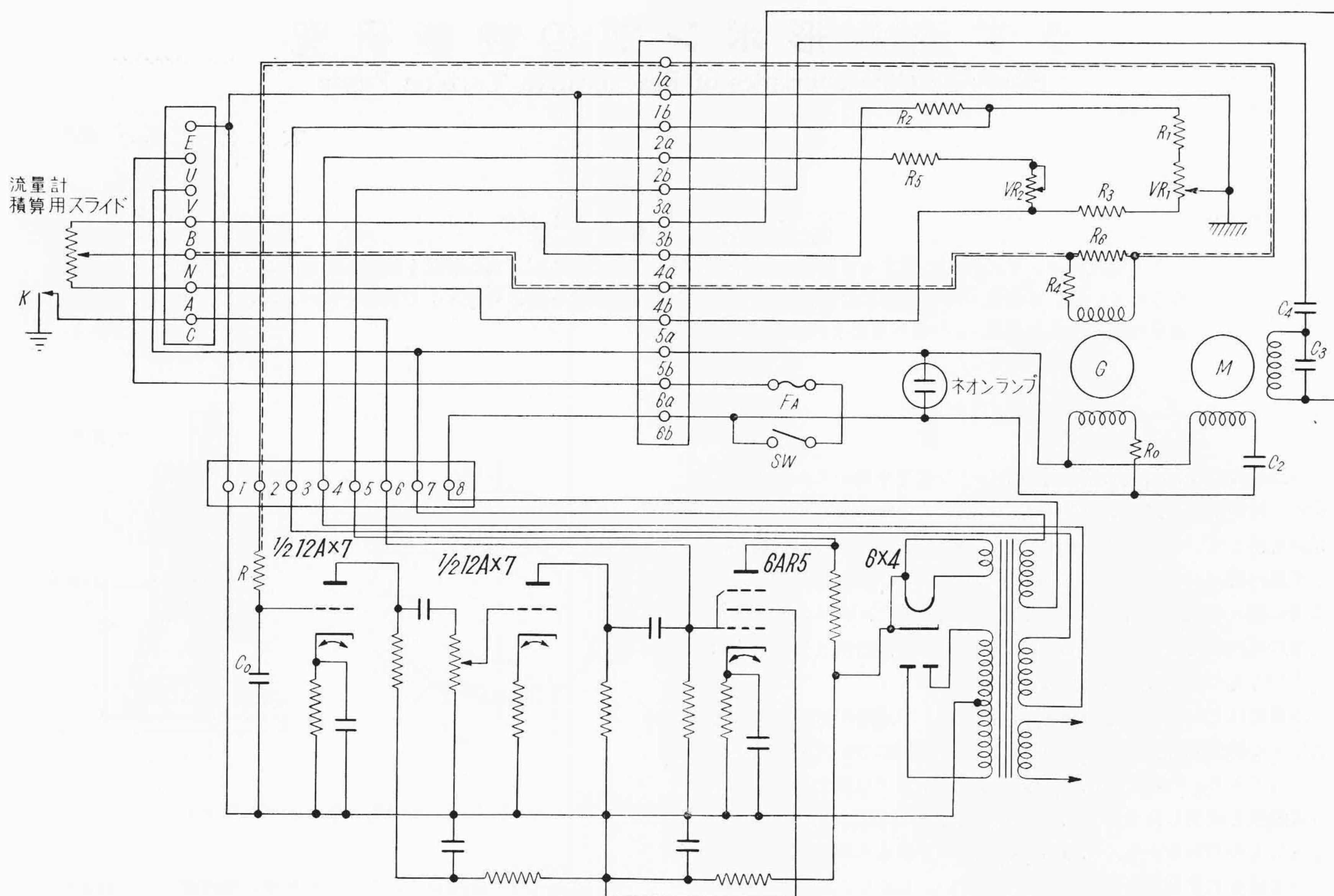


第12図 電子管式流量計のブロック線図



第13図 交流タコジェネレータの温度と出力電圧との関係

となり、カウンタの読みは流量の積算値を示す。(15)式より明らかなように K_3 の値が変動することは、積算計の誤差として表われるため、 K_3 を一定にすること、すなわち回転速度と出力電圧の関係を一定にすることが重要な問題となる。またフィードバックのため

第14図 VST₆₁形電子管式流量積算計内部接続図

ジェネレータの出力電圧を信号電圧の位相と合わせる必要もある。

ジェネレータの温度が変化すると、巻線その他のインピーダンス変化によって、発生電圧は第13図のような出力特性を示す。この変化を補償するため、第14図の回路中に温度により可変する抵抗 R_0 を設けてこれをジェネレータに取付け、抵抗分割の比を温度により可変として補償を行っている。

電源周波数の変動によりインピーダンスが変化し、出力電圧が変化するが、励磁回路に高抵抗 R_0 をそう入しこの影響を十分小さくしている。

信号電圧とジェネレータの出力電圧との位相差は、ジェネレータの励磁側に半固定の抵抗 R_0 により位相を合わせることが可能である。

ジェネレータの S/N 比は、負荷抵抗を適当に選び最小になるよう改善しているが、信号の小さいところでは十分の精度をうることは困難である⁽⁴⁾。しかし流量積算として使用する場合、低流量の計器精度から考察し十分使用可能である。また零点での S/N 比の悪化、計器の零点の多少の不安定による積算を防ぐため、流量の10~15%程度になれば第14図に示す回路中の接点 K が閉じ、増幅器の入力が接地されクリープを生じないようにしている。

8. 結 言

以上は電子管式流量計および積算計の概要であるが、交流電位差計方式の流量計は位相関係、電源電圧の影響、残留電圧の問題、周波数の影響、温度変化の影響、互換性の点などすべての特性に対して良結果が得られ、測定スライド抵抗を有する平衡計器を大幅な改造を行わなくて十分な特性をうる事ができた。

本測定方式は工業計測の変換器として流量計以外に液面計、圧力計、厚み計、変位計などに応用することが可能である。

交流タコジェネレータを使用した積算計は構造簡単で工業用流量積算計としてジェネレータの出力特性に十分考慮を払えば高性能の積算計が製作可能である。

終りにあたり、終始ご指導を賜った上司ならびにご援助をいただいた関係各位に厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 松原：特許出願中
- (2) D, Murry: J. S. I. 36, 312 (July, 1959)
- (3) 西口：計測 6, 53 (昭 31-2)
- (4) 須藤：電学誌 78, 1203 (昭 33-9)