

電子応用工業計器について

Electronic Industrial Instruments

河井陽一*

Yōichi Kawai

倉持義徳*

Yoshinori Kuramochi

木下敏雄**

Toshio Kinoshita

猪瀬文之**

Fumiyuki Inose

内 容 梗 概

工業計器も、半導体、磁気素子を使用したいわゆる電子式へと急速に進歩発展しつつある。ここに最も一般的な VKP₃₁ 形電子管式記録計と V₆₁-E 形電子式調節器を採り上げてその概要を説明した。VKP₃₁ 形記録計は日立独特の振幅差変調方式直流増幅器を採用したもので、チョッパのような接触可動片を持たず、外部からの誘導雑音に強い特長を有している。また電位差計電源として簡易、かつ安定な定電圧ダイオードをカスケード接続した定電流装置を採用、平衡モートルも従来品に比し T/J が大きく、すぐれたダンピング特性を有している。V₆₁-E 形電子式 PID 調節器は伝送器からの DC 1~5 mA を受け、同じ DC 1~5 mA で操作器を動作させるもので、入力回路に磁気変調器を使用し、比例、積分、微分の演算にまったく相互干渉のない理想的な調節器である。なお手動と自動の切換時にも全然じょう乱の入らない独特な方式を採用しており、伝送距離に制限を受けないことが電子式調節系の最大の特長である。

1. 緒 言

エレクトロニックスの発達に伴い、これが工業計器に応用されたのは決して新しいことではない。特に温度の記録では、電子管式自動平衡計器は他の追従を許さないその高い精度のため広く利用され、工業計器すなわち電子管式自動平衡計器の感があった。さらにこの電子管式自動平衡計器は PID 調節器と結びつき、自動制御も行えるように発展していった。

一方集中監理用の図示パネル空気式調節系も、その近代的な統一された思想をもつ制御系として、大規模な石油工場などに広く使用されたが、さらに電子式に転換される気運にある。これらは半導体、磁気素子の発達にとともにさらにソリッドステート化に進みつつある。

ここではこれらの電子応用工業計器の代表的なものとして入力直交変換器として磁気変調器を採用している VKP₃₁ 形電子管式記録計と V₆₁-E 形電子式調節器につき、回路を中心としてその概要を紹介する。

2. VKP₃₁ 形電子管式記録計

自動平衡計器の基礎的な考えは H. L. Callender 教授の設計になる継電器形連続自動平衡記録計 (1897) に始まるが、その後機械式自動平衡記録計 (Micromax) の時代を経て、電子管が応用されたのは Numo 記録計 (1938) に端を発し、現在の方式が確立したのが 1940 年ころと考えられる。

電子管式記録計は電位差計方式とブリッジ方式に大別されるが、技術的には電位差計方式に多くの問題を含ん

でいる。たとえば電子管式記録計の発展には直交変換器としてきわめて簡単な、いわゆるチョッパの考案が大きい役割を占めているが、機械的な断続運動によって直交変換を行うもので、おのずから接点の寿命には限度があり、接触率の変化は記録計の特性に直接影響を及ぼす。また電位差計回路には常に一定の電流を供給する必要がある、この電流値の変動は直接記録計の精度を左右する。

日立電子管式記録計は長年にわたり研究が続けられ進歩改良されてきているが⁽¹⁾⁽²⁾、ここに日立製作所独特の磁気変調方式が確立し、理想的自動平衡計器への第一歩を踏み出した。以下この一系列に属する VKP₃₁ 形電子管式自動平衡記録計について述べる。

2.1 VKP₃₁ 形記録計の概要

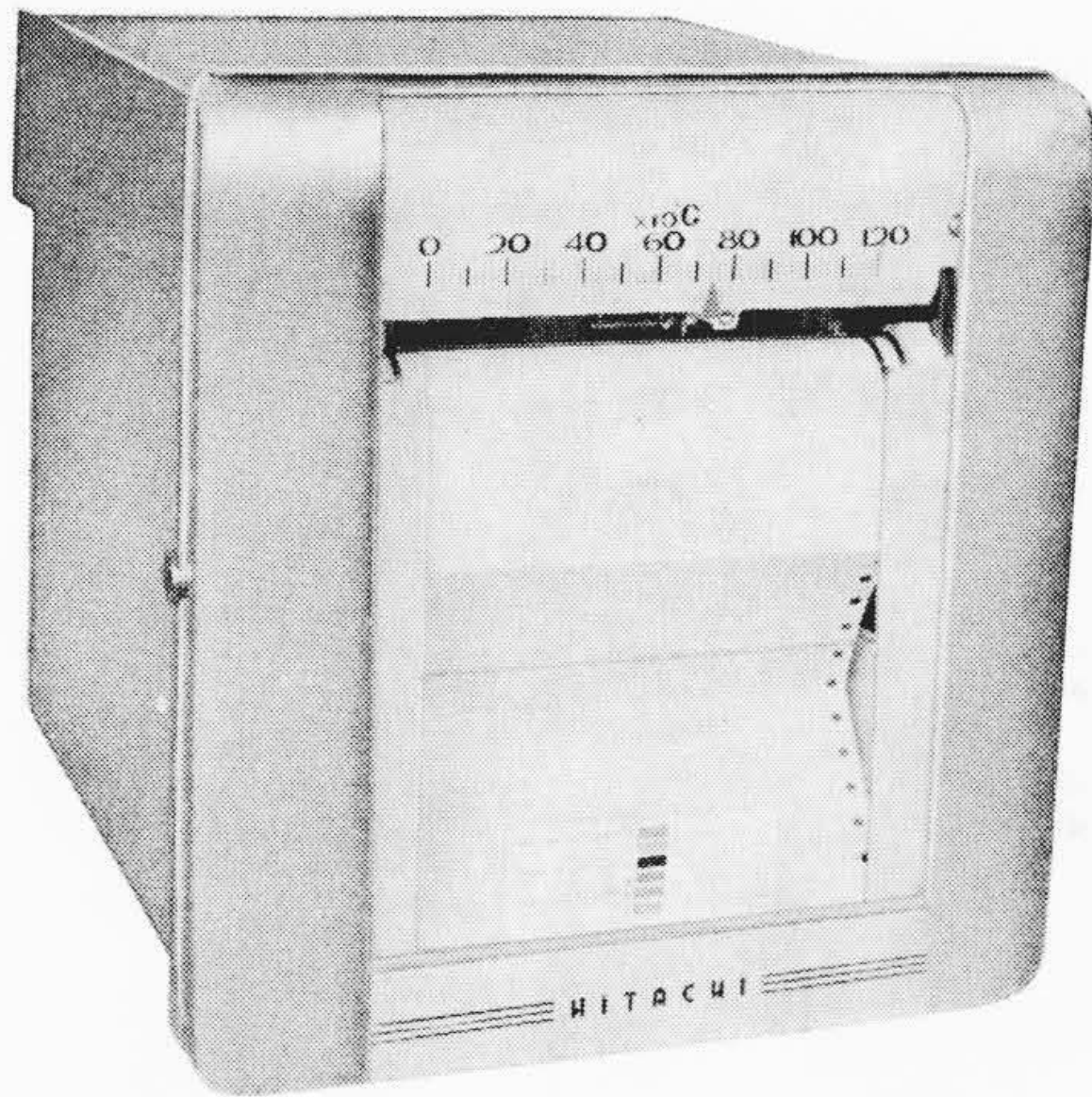
VKP₃₁ 形記録計は直流電位差計方式の自動平衡記録計で、第 1 図にその外観を示す。熱電温度計、輻射高温計、mV 計、各種ガス分析計、イオン濃度計、β線厚み計などに使用される。目盛幅 150 mm 折たたみ式带状記録紙形の記録計で、1 点ペン書式または内蔵切換スイッチにより最大 12 箇所までの直流入力電圧が色別打点記録できる。打点間隔は 7.5 秒、平衡速度約 3 秒を標準としており、目盛板、文字車、記録紙受箱など細部にわたり、運転取扱上の便宜を考慮して設計されている。第 2 図に本器の原理図を示す。振幅差変調方式と称する日立製作所独特の磁気変調形直流増幅器を採用しており、ゼナーダイオードを使用した簡易長寿命の定電流回路や、従来品に比べて小形でトルクが大きい平衡モートルなど種々な特長を有している。

2.2 磁気変調形直流増幅器

振幅差変調方式の理論が最初に実用化されたのは昭和

* 日立製作所多賀工場

** 日立製作所中央研究所



第 1 図 VKR₃₁形電子管式熱電温度記録計

30年春コロンボにおける日食観測のときである。

また第三次南極探検では地球磁界の測定に日立 Q₆ 形記録計が昭和基地で活躍中である。

2.2.1 原 理

強磁性体の B-H 特性は点対称であるため、これを正弦波によって駆動する時に生ずる出力波は奇数高調波からなっていて偶数高調波を含まない。入力信号によって点対称特性から非点対称特性へと動作点がずれる結果、変調器出力の極性別による振幅差が信号入力に比例し、かつその尖頭値が入力に無関係にほぼ一定なことを特長とする新しい変調法を得て、これを振幅差変調法^{(3)~(5)}と名付けた。第3図に変調器素子の点対称な折線状飽和特性 N に対し搬送波 C と入力信号 S、出力信号 M を時間 t に対して示す。図から a-a' を基線とする M の振幅差は

$$B_1 - B_2 = 2 \mu_m H_i \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$\mu_m = B_m / H_m$$

実際の磁気変調器の出力電圧は dB/dt に比例するためこれを積分器にかけて B を再現してから増幅する。したがって B-t 曲線の B の積分値の絶対値が等しい線が零線となる。これを b-b' 基線とすれば

$$B_1' - B_2' = 2(\mu_m H_i - B_0) \cong (2 H_m / \pi H_c) 2 \mu_m H_i \dots\dots\dots (2)$$

ただし

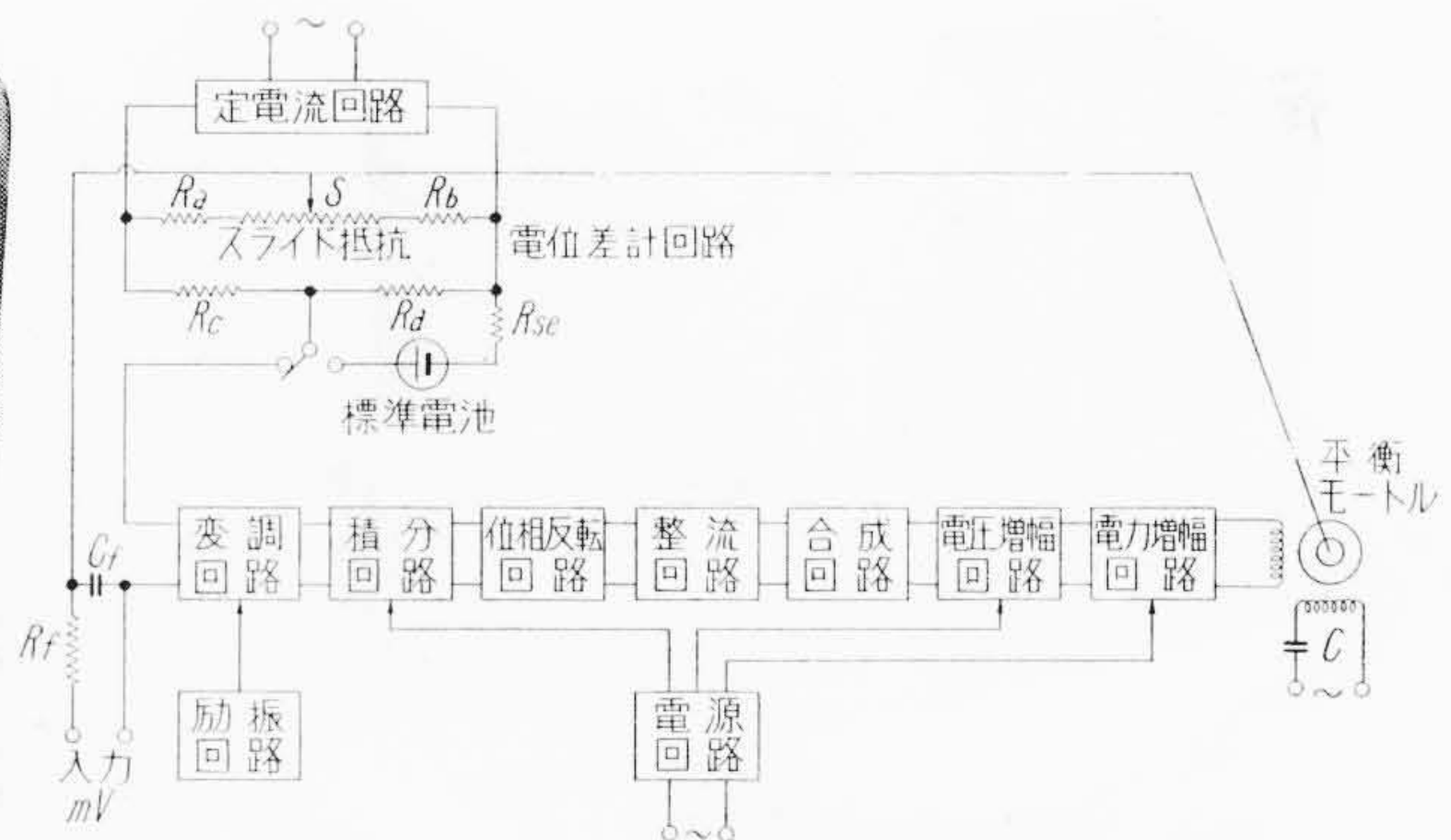
$$|H_i| \ll H_m < H_c$$

$$B_0 = \left(\frac{1}{H_m} - \frac{2}{\pi H_c} \right) B_m \cdot H_i$$

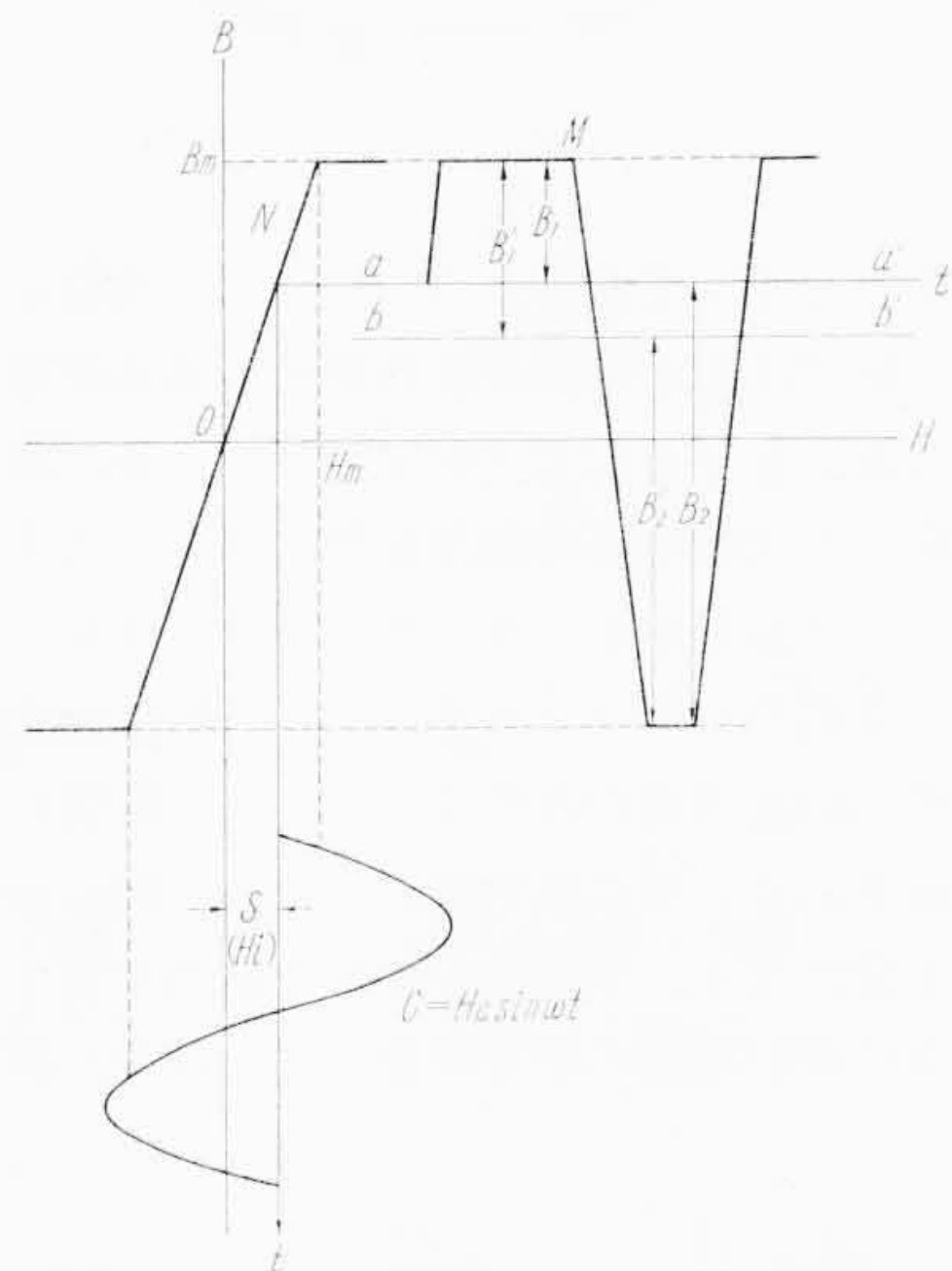
ゆえに理想状態と実際の場合の感度の比は

$$\eta_s = 2 H_m / \pi H_c \dots\dots\dots (3)$$

H_c は H_i による記憶効果やバルクハウゼン雑音を十



第 2 図 VKP₃₁形電子管式記録計の原理説明図



第 3 図 振幅差変調法の原理

分低下するように選ぶため、普通 X_c を数倍以上としなければならないので η_s は 0.1 程度となる。

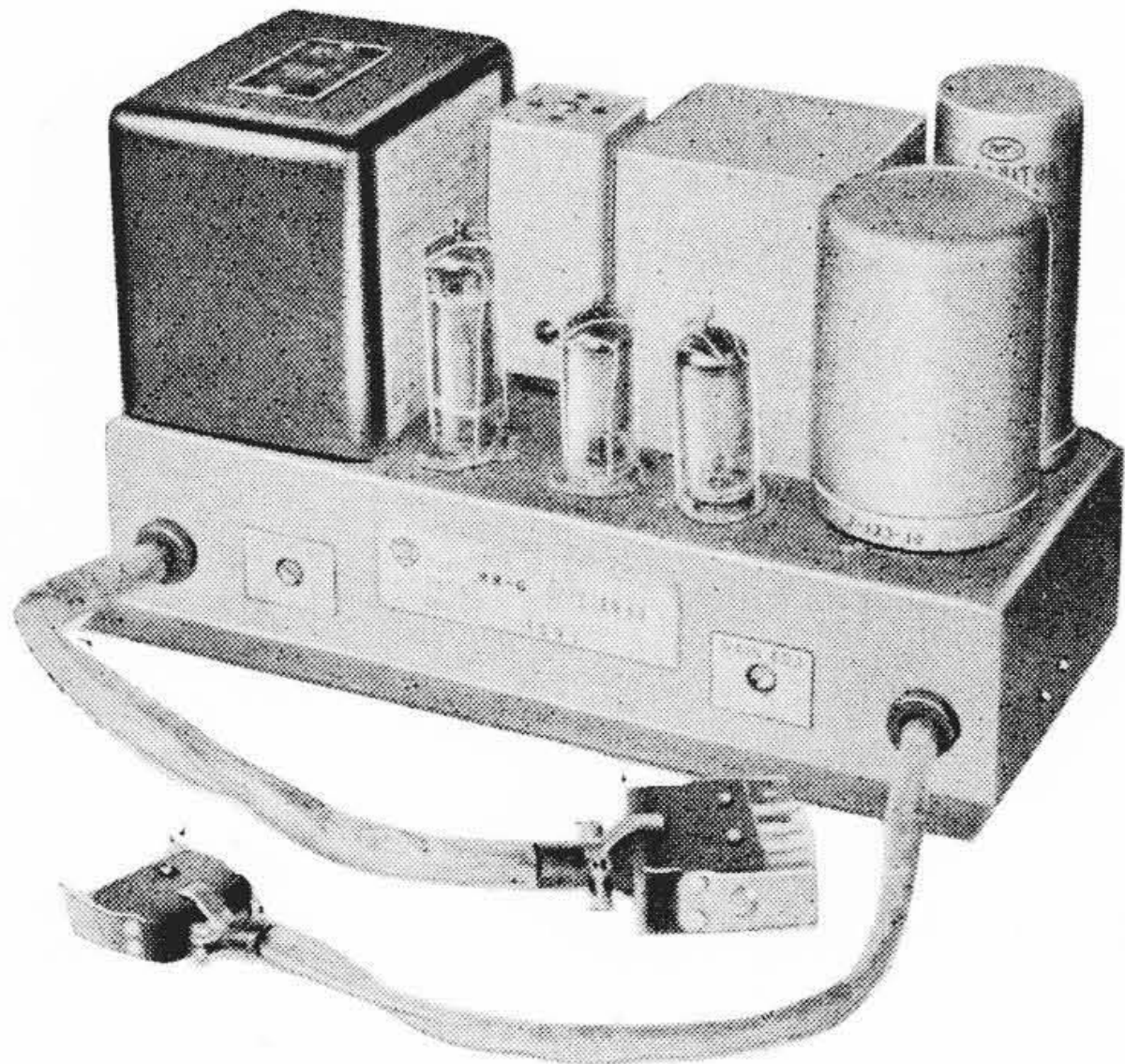
$$\text{変調度 } m_s = 2 \eta_s \mu_m H_i / B_m \dots\dots\dots (4)$$

変調度を高めるには μ_m の大きい素子を選ぶことも一方法であるが、二変調器の差動法が使用される。 $H_i = 0$ の場合は差動出力も零となるが、実際には両変調器の特性をまったく等しくすることはできないため、入力に無関係な不平衡電圧を生ずる。すなわち微小入力に対しては著しく S/N が劣下する。振幅差変調方式ではこの欠点となることを逆に利用するために不平衡差動法を採用している。

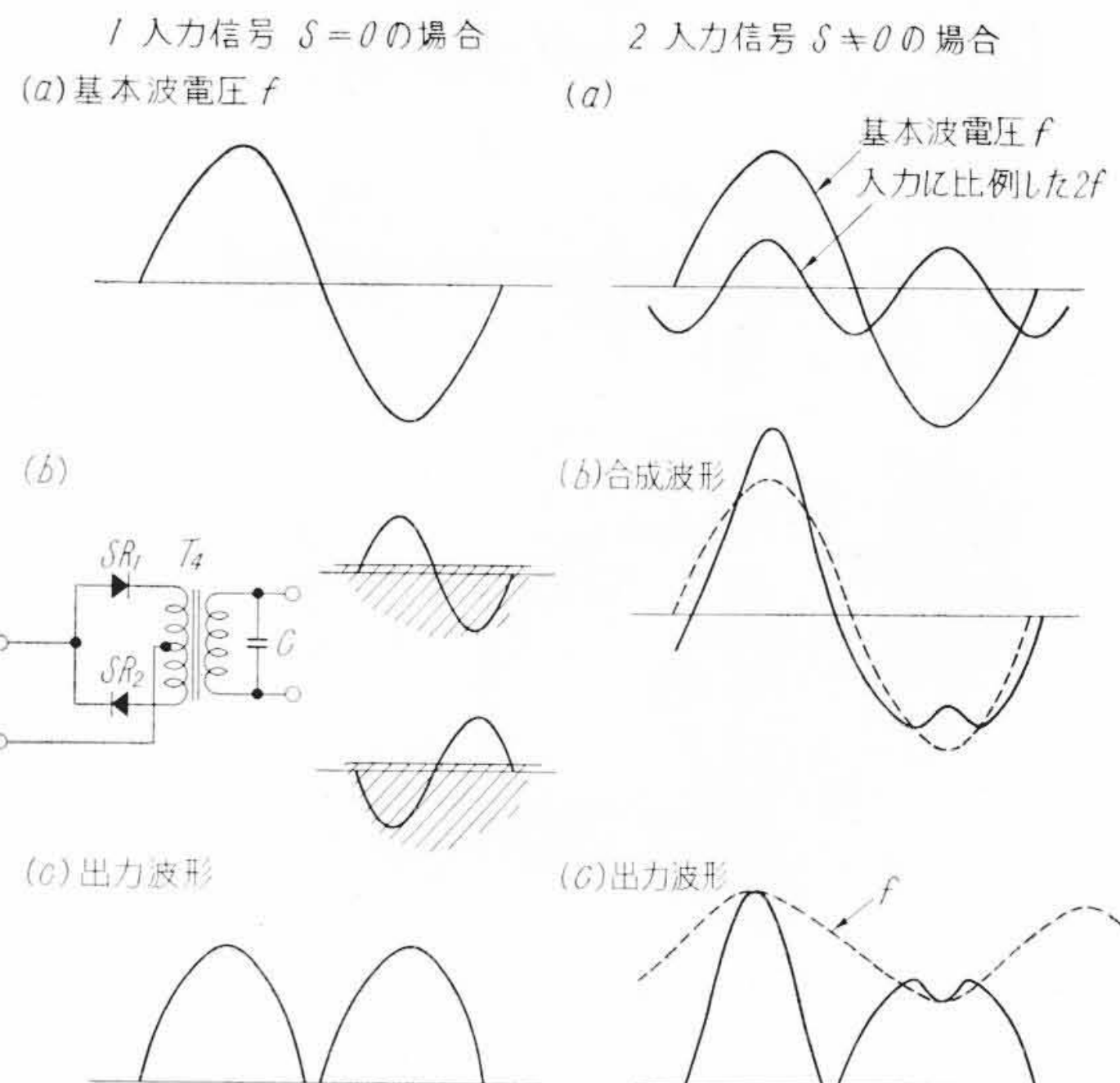
この振幅差変調を受けた変調波を検波するためには、位相反転器を通してそれぞれ正極性波として差を取り出し、基本波出力を得ている⁽⁶⁾。

2.2.2 簡易化された実際回路

第 4, 5 図は VKP₃₁ 形記録計に内蔵されている MM₆ 形増幅器の外観ならびに実際回路を示す。不平衡差動法としては両変調器 T_1, T_2 の出力にあらかじめ適当な

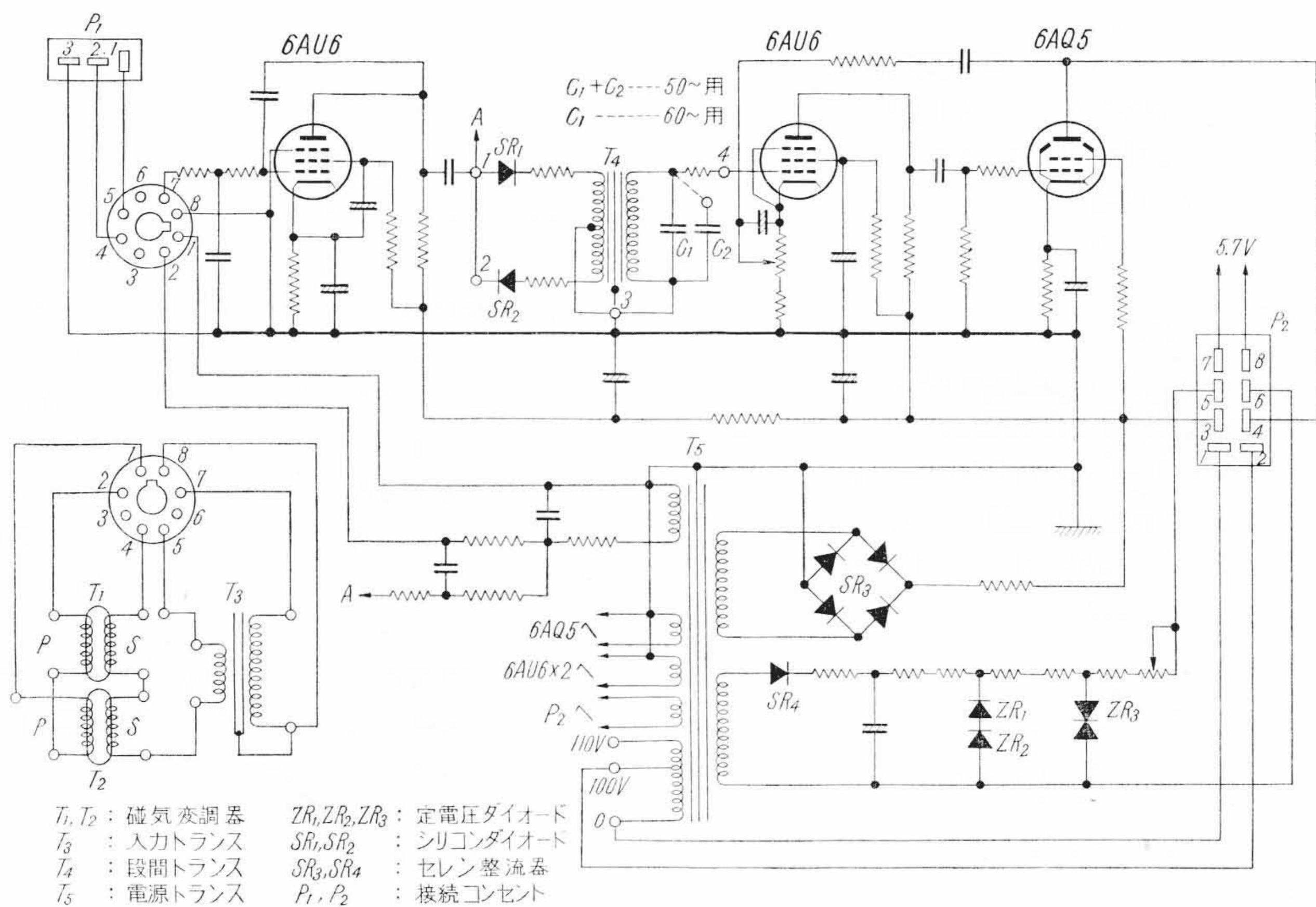
第 4 図 mm₆ 形増幅器

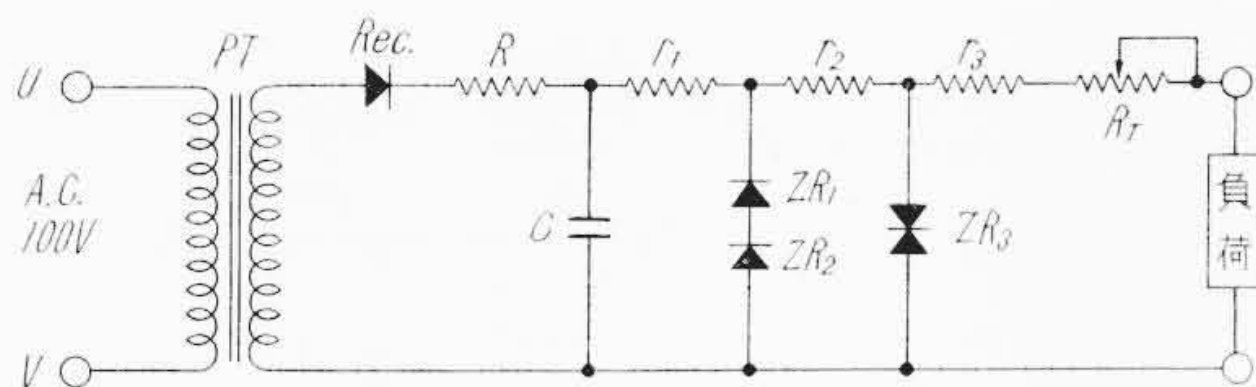
不平衡分を与えておくものであるが、簡易量産化の点で本回路では図示 A 部分に外部から基本波電圧 f （商用周波数）を与える方式を採用している。第 6 図に示す模擬波形で本回路の動作を説明する。入力信号が零の場合に A から与えられる基本波電圧 f を 1 (a) 図に示す。2 組のシリコンダイオード SR_1 、および SR_2 にはおのおの逆方向のみの電流が流れ、段間トランス T_4 で合成される。その出力波形を 1 (c) 図に示す。これには f 分はなく、平衡モータを駆動するトルクはない。電位差計回路に不平衡を生じた場合、磁気変調器

第 6 図 MM₆ 形増幅器の動作説明図

の出力にはこの不平衡入力信号に比例した $2f$ が現われ 2 (a) 図 A に与えられた f と合成される 2 (b) 図。1 (b) 図と同様に絶対値化された出力波形は 2 (c) 図となり、ここに入力に比例した f 分が現われ、平衡モータを駆動することができる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

磁気変調器はチョップのように接触可動部を持たず、寿命は半永久的と見なすことができる。また外部誘導など f としてはいつてくる雑音はすべて上述のよ

第 5 図 MM₆ 形増幅器内部接続図



第7図 定電流回路

うにの $2f$ に変換されるで、誘導に強い特長を持っている。ただし磁気変調器は低インピーダンスであるため、高入力インピーダンスの測定には標準方式では不適当であるが、工業計器に使用される検出変換器のインピーダンスは普通数 Ω ～ 数百 Ω であるから実用上はさしつかえない。

電圧増幅管は高利得の 6AU6 を使用し、出力管には 6AQ5 を採用、すべての回路には十分な負帰還をほどこすとともに整流回路には特性のバラツキが大きい整流管は使用せずに半導体整流器を用いている。

2.3 定電流回路

電位差計回路に一定電流を供給する電源としては数年前まではもっぱら乾電池が使用されていたが、最近次第にエリミネータ化されてきている。日立電子管式計器も定電圧標準管 5651 を基準電圧とする差動平衡形定電流回路を用いていたが、本器では第7図に示すように定電圧ダイオード (Zener Reference Diode) をカスケード接続した方式を採用し、簡易長寿命化を計るとともに安定度を高めている⁽⁹⁾。ZR₁ としては内部抵抗が低く、ZR₂ は低温度係数のものが必要であり、特性は下記のとおりである。

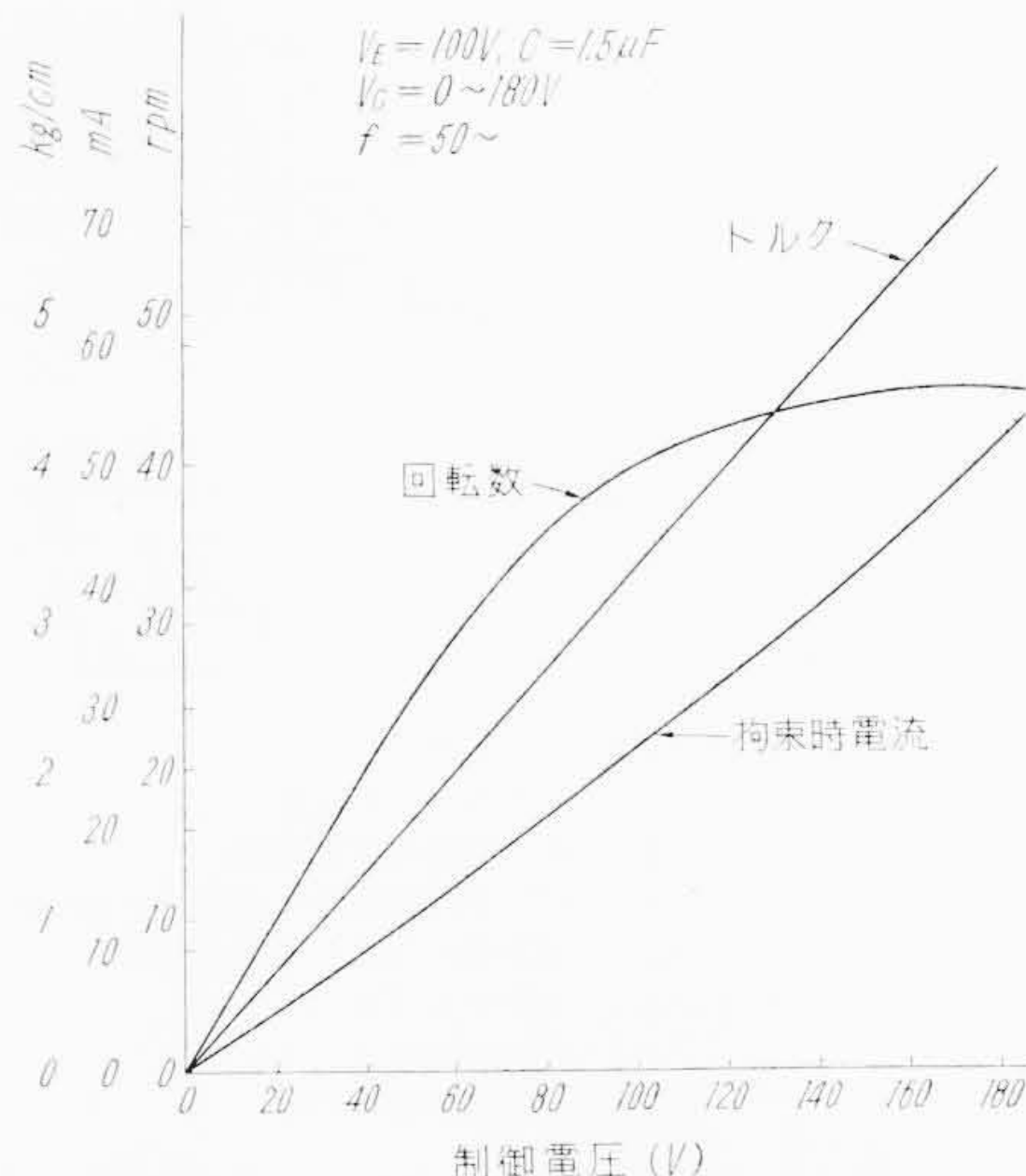
負 荷	約 210 Ω	4.5 mA～5.5 mA
電源電圧	100 V	+10 V -20 V の変動に対し 出力変動 ± 0.005 mA 以下
周囲温度	30°C $\pm$ 30 deg	の変動に対し 出力変動 ± 0.005 mA 以下

2.4 平衡モートル

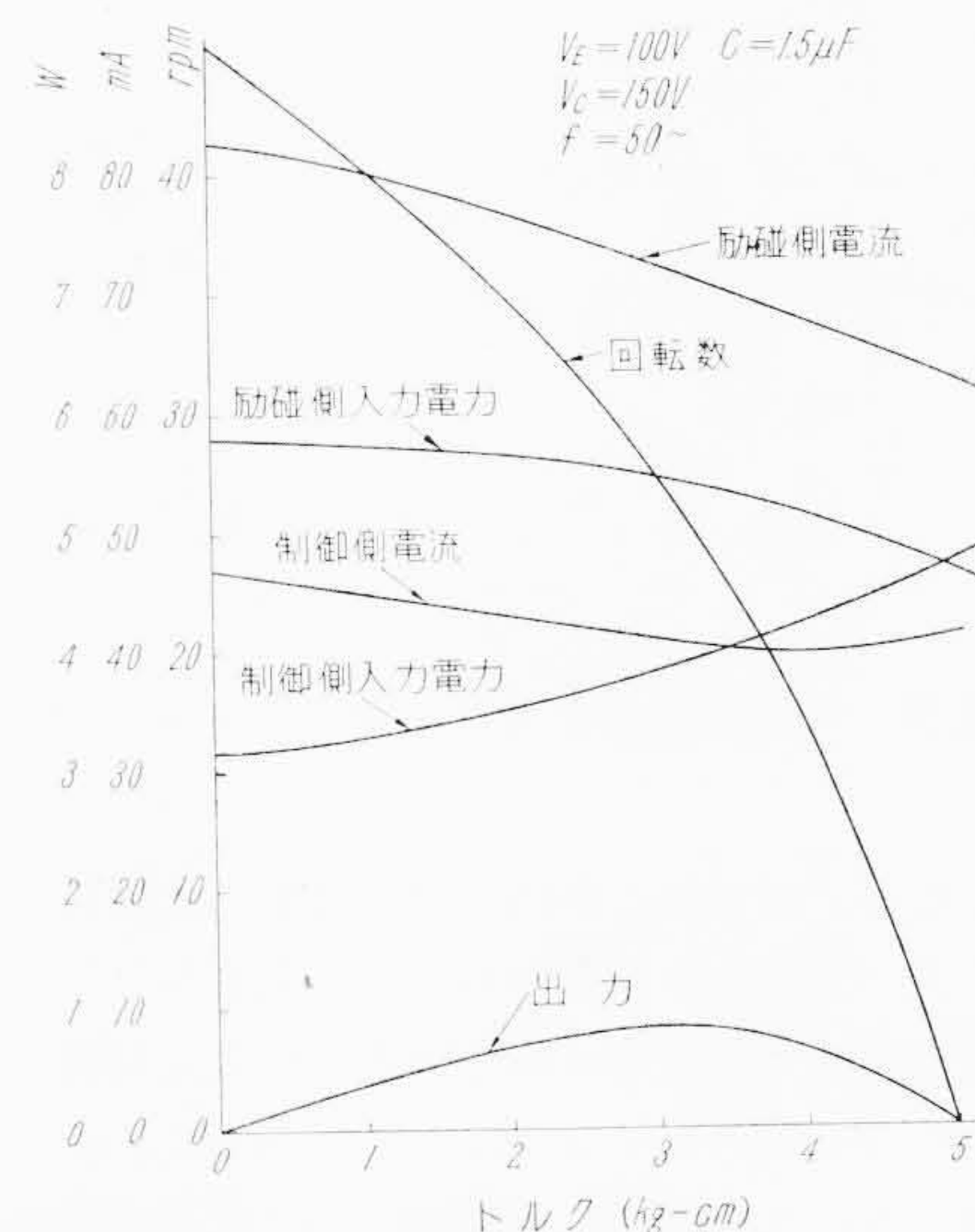
ESA-1-T 形平衡モートルの特性を第8, 9図に示す。従来の平衡モートルに比べてトルクが大きくロータの慣性能率がきわめて小さいので、平衡速度の速いものが得られ、かつダンピング特性が良い。

2.5 総合特性

磁気変調器回路は変調回路であるため、入力低周波信号および変調波信号の両者に対応する2つの伝達関数を考えなければならない。この考えに基づいて検討した VKP₃₁ 形電子管式記録計のブロック線図を第10図に示す。これに実際の数値を入れてボード線図をかけば第11図に示すとおりになる。第11図から明らかなように位相余裕は約50度、利得余裕は 8 dB となっており、この状態で系は安定に動作する。



第8図 ESA-1-T 形平衡モートルの特性 (その1)



第9図 ESA-1-T 形平衡モートルの特性 (その2)

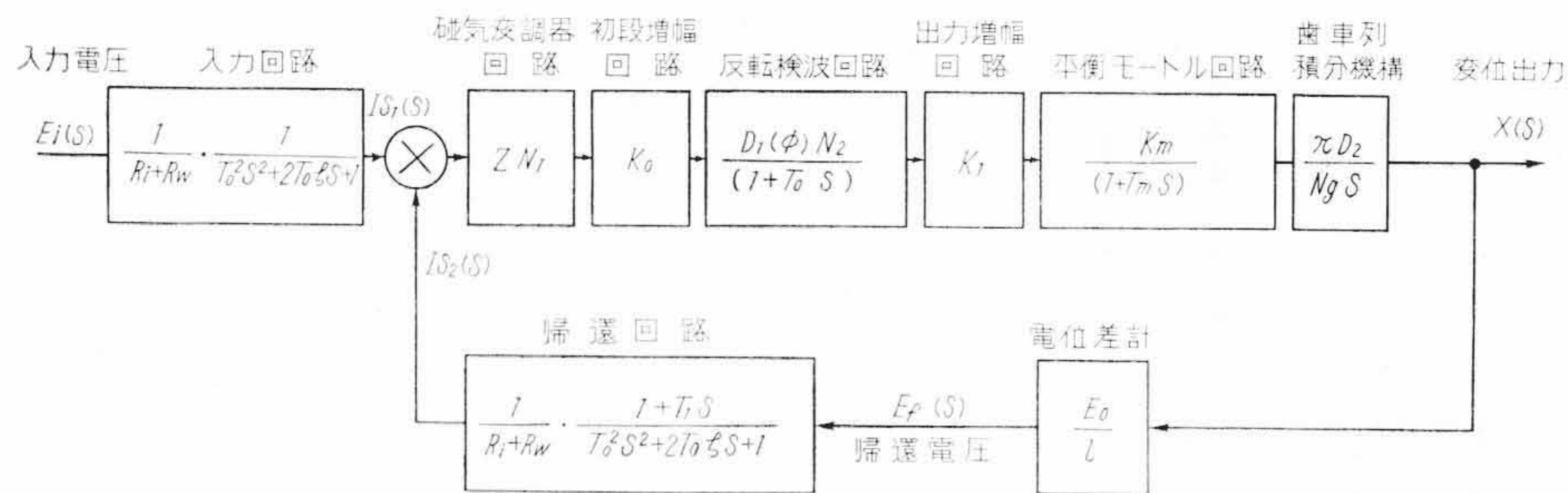
3. 電子式 PID 調節器*

3.1 電子式と空気式の制御系

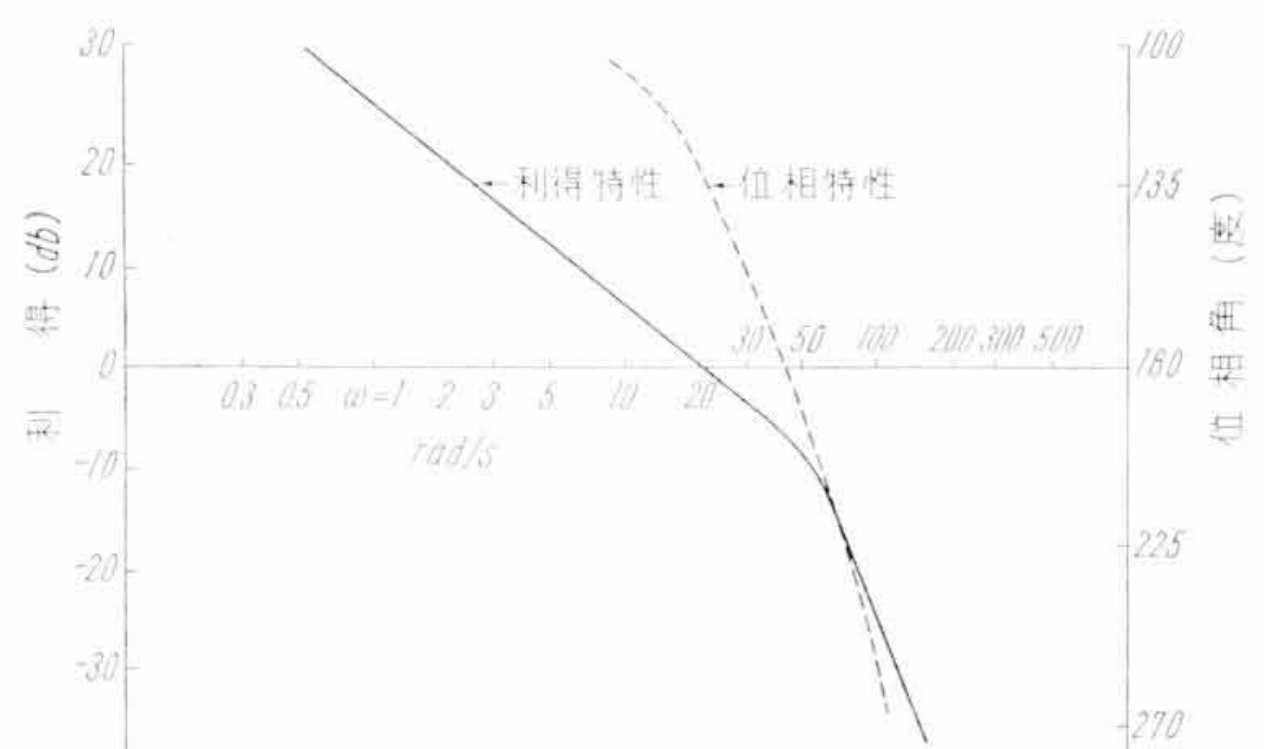
工業プロセスでは温度、圧力、流量などを目標値に保つ自動制御が必要である。

第12, 13図に集中管理用の電子式および空気式の制御系統図を示す。温度、圧力、流量などのプロセスの変量を検出変換器で測定し、統一された測定信号に変換して調節器に送る。ここで目標値設定信号と比較されて誤差信号が作られ、比例、積分、微分の演算が行われて出

* PID 調節器とは比例(Proportional), 積分(Integral), 微分 (Derivative) の3動作を行うブライント式集中管理用のものをいう。



- $R_i + R_w$: 入力回路抵抗
 T_o : 入力回路の時定数
 ζ : 入力回路の減衰定数
 ZN_1 : 磁気変調器回路の変換インピーダンス
 K_o : 初段増幅回路の第 2 高調波利得
 $D_1(\phi)N_2$: 反転検波回路の利得
 T_D : 反転検波回路の時定数
 K_1 : 出力増幅器の利得
 K_m : 平衡モータの利得 (rps/Volt)
 T_m : 平衡モータの時定数
 D_2 : プーリー直径
 N_g : ギヤー比
 l : 電位差計しゅう動子の長さ
 E_o : 全目盛電圧
 S : ラプラス演算子

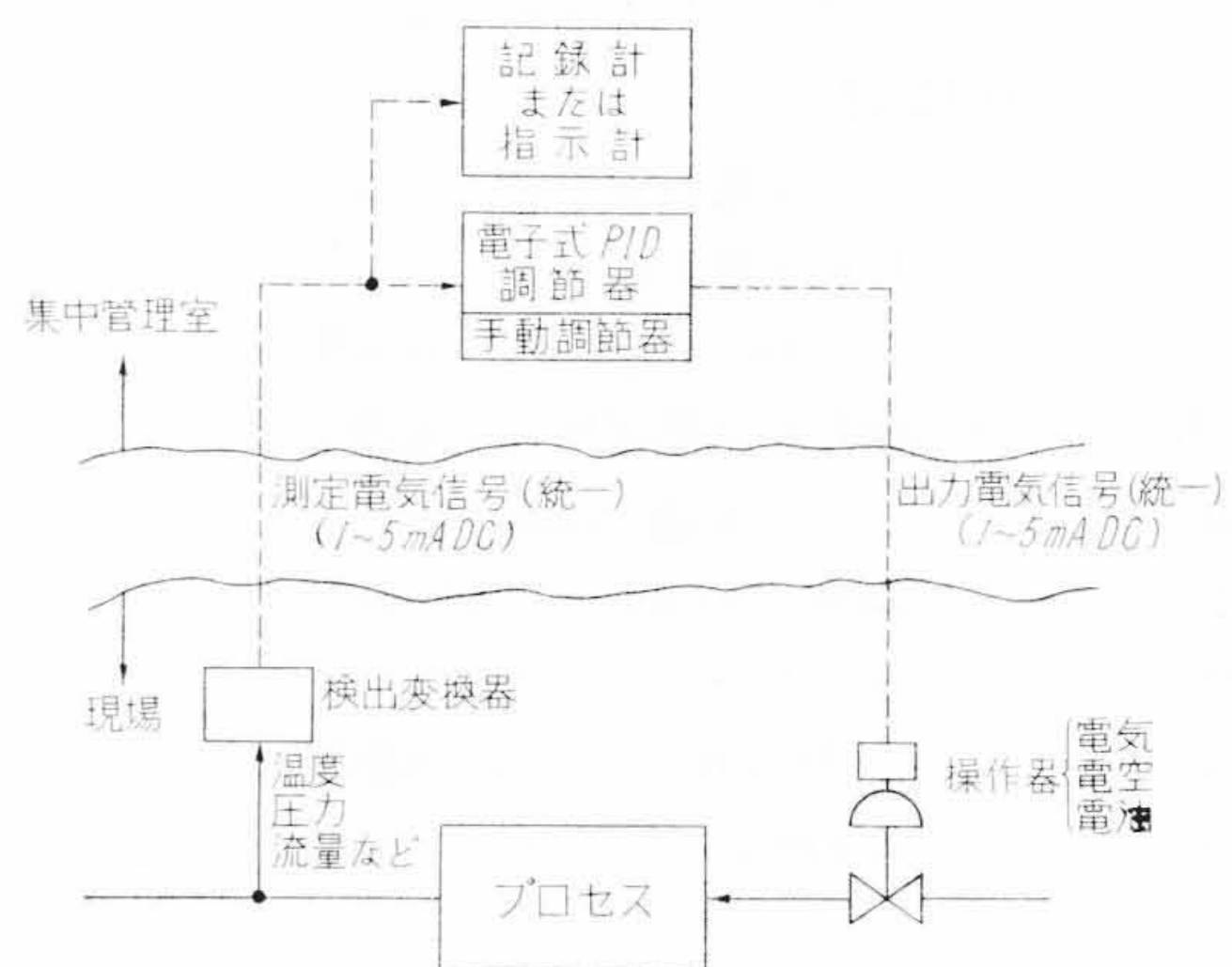
第 10 図 VKP₃₁形電子管式記録計のブロック線図第 11 図 VKP₃₁形電子管式記録計のボード線図

力信号となる。測定および出力信号は電子式制御系の場合その形式、大きさは各社まちまちであるが⁽¹⁰⁾、(しかし同一社の製品では統一されている)空気式制御系においては $0.2 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 、あるいは $3 \sim 15 \text{ psi}$ と国内外各社とも統一されている。日立製作所では電子式調節系の測定および出力信号は $1 \sim 5 \text{ mA}$ の直流電流方式を採用している。

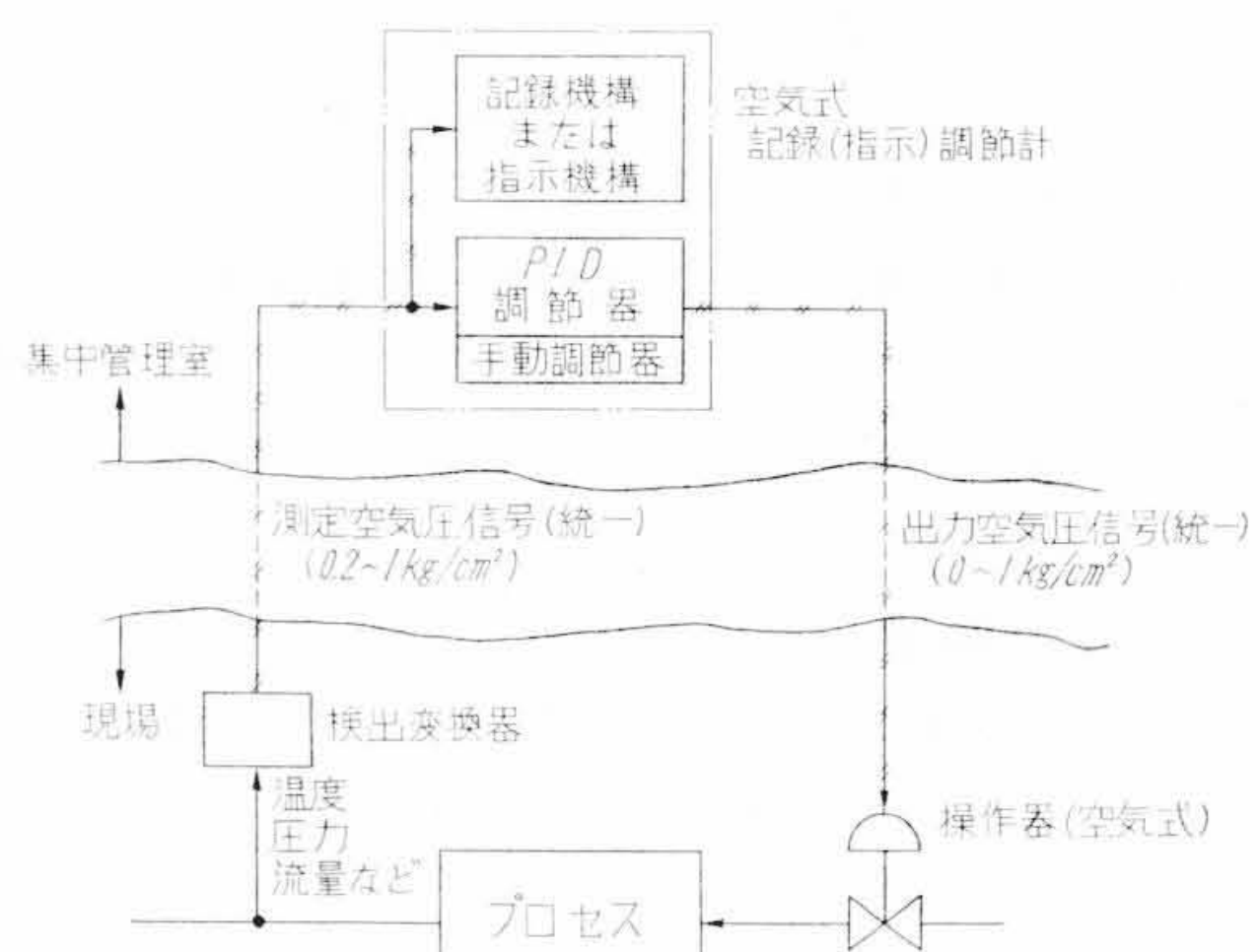
操作器には電子式制御系の場合、電気、電空、電油などの各種操作器が使用され、空気式の場合は空気式操作器が使用される。

これら電子式および空気式の制御系に共通したことはプロセス変量が統一された電気または空気圧信号として取扱われるため、PID 調節器、記録計、指示計などはプロセス変量に無関係に同一種類のものでよく、また記録計、指示計などが制御ループの外に置かれているので、それらの応答速度その他の性能に影響されないなどである。

以上のべた制御系のほか、電子管式自動平衡計器を母体として発達したものがあり、前の二者より歴史的にはかなり古い。第 14, 15 図にその電子式と空気式の場合の

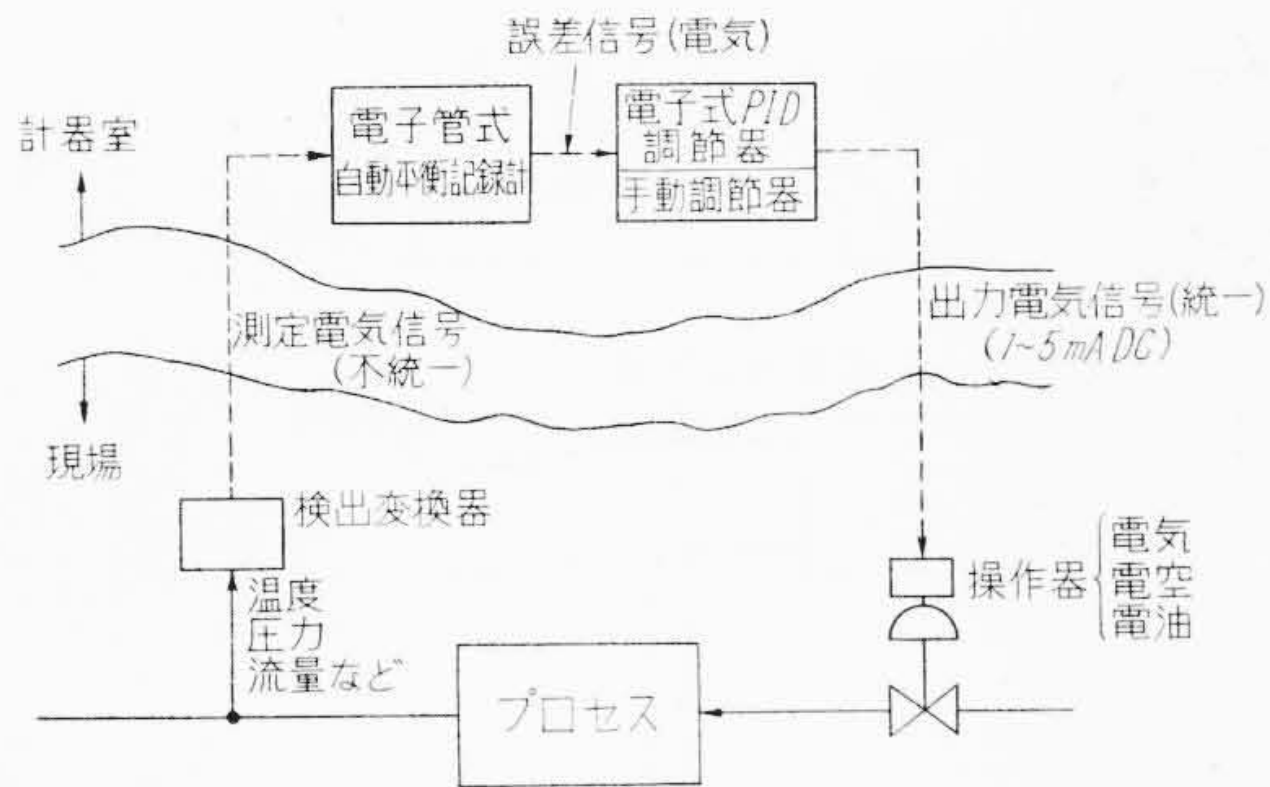


第 12 図 集中管理用電子式制御系系統図

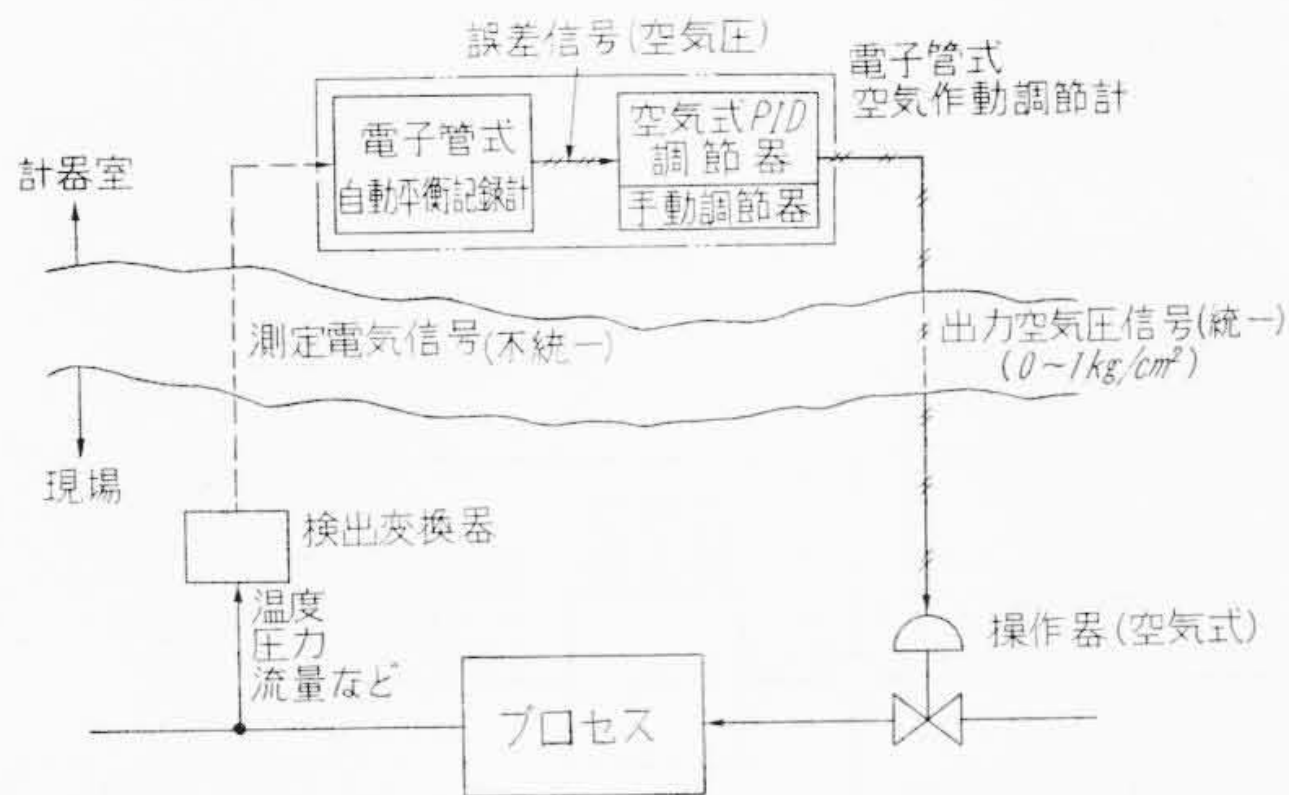


第 13 図 集中管理用空気式制御系系統図

制御系統図を示す。自動平衡計器でプロセスの変量を測定し、誤差信号をそれぞれ空気圧または電気を受けて演



第14図 自動平衡記録計用電子式制御系系統図



第15図 電子管式空気作動制御系系統図

算する。それ以後は第12図または第13図の場合とまったく同様である。

これら第14図および第15図に示した制御系では、制御ループ内に自動平衡形記録計を直列に配置しているため、記録計の応答速度、機械系のガタ、ヒステレシスが制御動作に影響する。しかし従来の記録計に誤差信号発生機構を付加することにより、簡単に調節器と結び合わせる点で、記録を重要視する温度の制御系などに好んで用いられてきたものである。

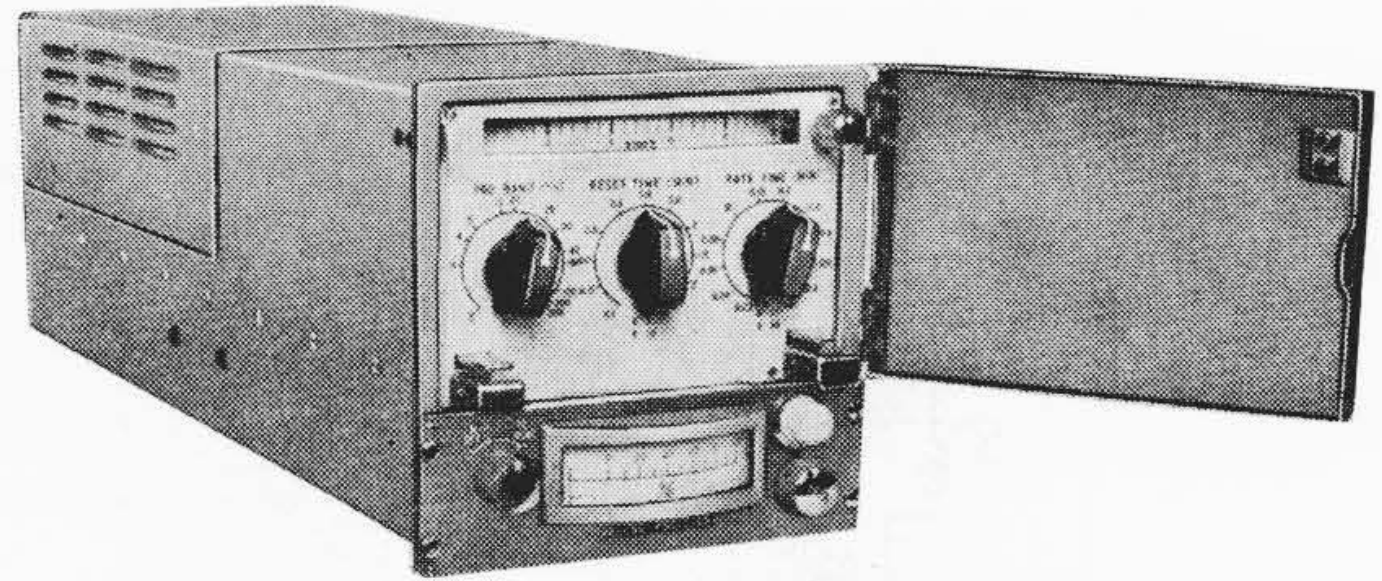
本稿で述べる電子式PID調節器は上述の集中管理用と、自動平衡記録計用と同じ構成でよい特長をもつ。すなわち集中管理用のPID調節器の入力の磁気変調部分を取り除き、VKP₃₁形記録計の発信用しゅう動抵抗からの交流誤差信号を受けとるようにすれば、自動平衡形記録計と結合できるものである。

なおこのような電子式のものは最近、その遠隔性、隔通性、および計算機制御を含む将来性のため特に注目をあびているものである。

以下集中管理用のV₆₁-E形電子式PID調節器について述べる⁽¹¹⁾。

3.2 V₆₁-E形電子式PID調節器

V₆₁-E形PID調節器も入力の直交変換器として磁気変調器を使用している。このため入出力回路は絶縁でき、接地点より浮かすことができる。また高出力抵抗の検出



第16図 V₆₁-E形PID調節器外観

変換器からの出力信号電流に影響を与えぬよう入力抵抗を50Ω以下という低い値にすることができ、さらに外部誘導に強いこと、機械的な可動部がなく、寿命が長いことなどの磁気変調器の一般的な特長を持っている。

第16、17図はV₆₁-E形電子式PID調節器の外観ならびに回路図を示す。検出変換器の測定信号電流は調節器の入力端子に加えられる。入力回路で、測定信号電流と設定電源からの目標値設定信号電流との差が作られる。すなわち両信号電流は磁気変調器の一次巻線を互に逆方向に流れる。ポテンショメータR_pは比例帯調整用で、2~300%の比例帯を連続的に変化させることができる。磁気変調器で誤差信号電流はその大きさに比例した変調交流信号に変換される。この変換機構は前章のVKP₃₁形自動平衡記録計の増幅器とまったく同様である。交流信号電圧は増幅され同期整流される。同期整流回路の出力直流信号は並列に配置された微分、積分回路を通り、加算回路でふたたび加え合わされて出力電流となる。出力電流は出力回路のスイッチにより、手動調節器からも手動操作でうることができる。この調節器回路をブロック線図で書き表わすと第18図のようになり、全体の伝達関数をG(s)とすれば、

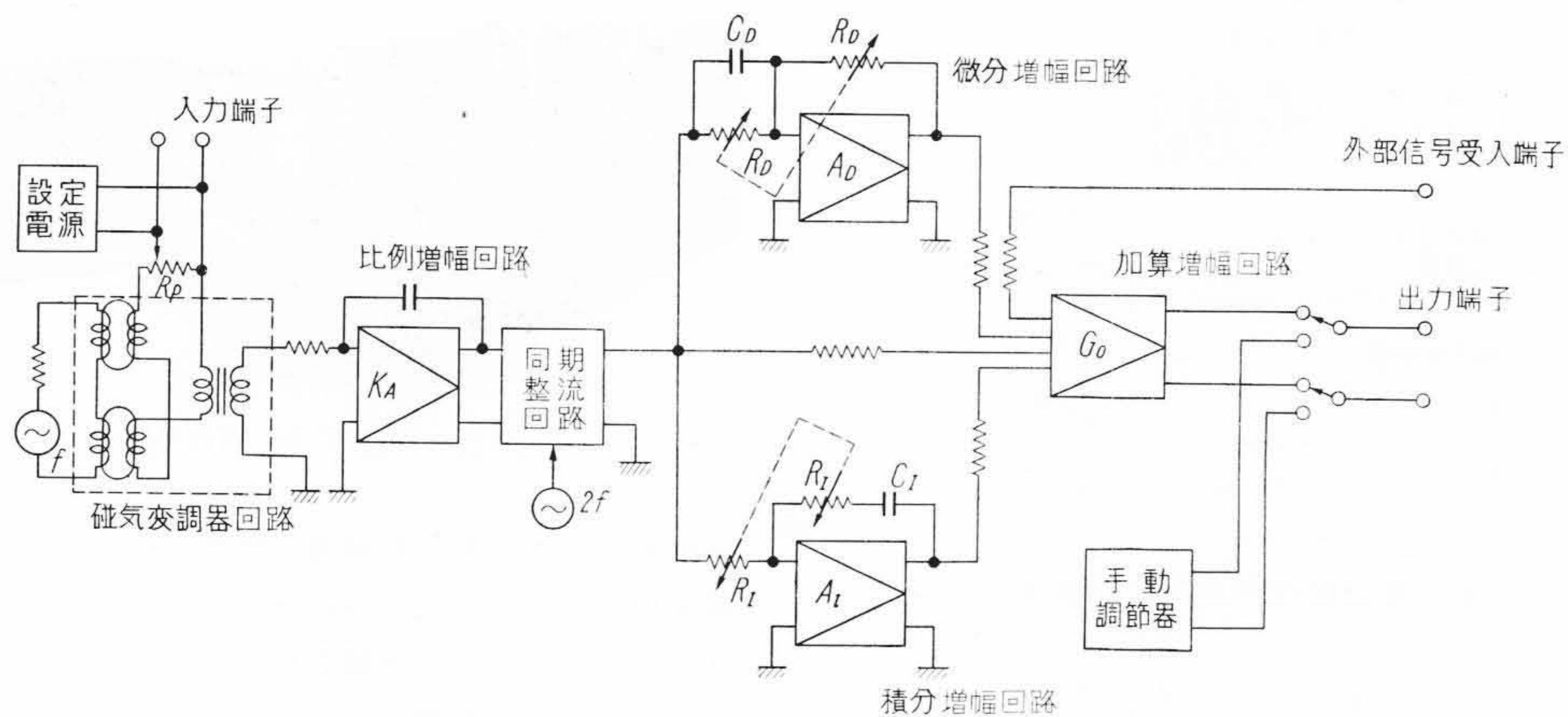
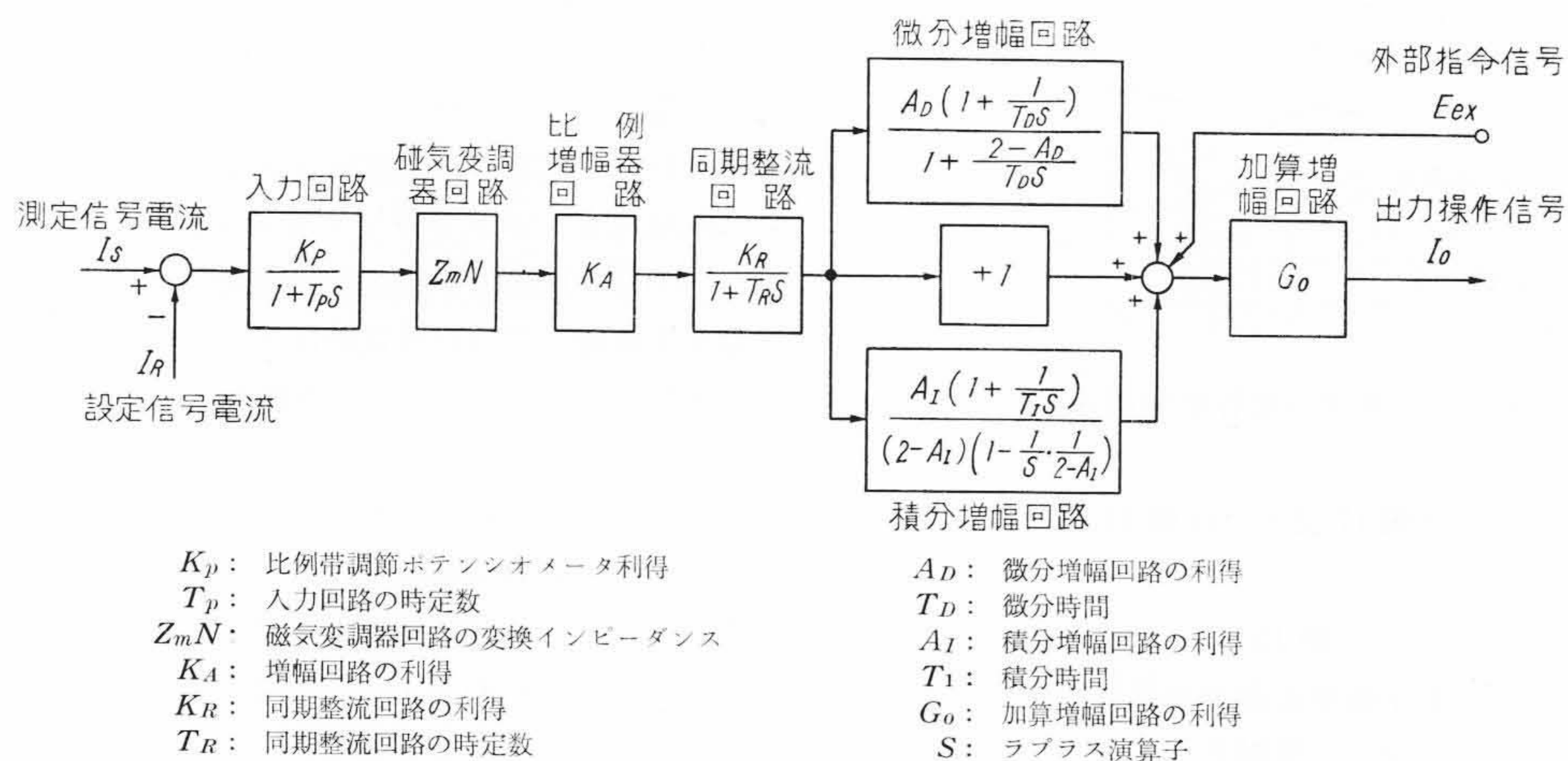
$$G(s) = \frac{K_p R_m N K_A K_R G_O}{(1 + T_P S)(1 + T_R S)} \cdot \left\{ 1 + \frac{A_D \left(1 + \frac{1}{T_D S}\right)}{1 + \frac{2 - A_D}{T_D S}} + \frac{A_I \left(1 + \frac{1}{T_I S}\right)}{(2 - A_I) \left(1 + \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{2 - A_I}\right)} \right\} \quad (5)$$

T_p、T_rはT_DおよびT_Iに比較して十分小さく、これを無視しA_D、A_Iを十分大きくすれば、(5)式は次のようになる。

$$G(s) = -K \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (6)$$

$$\text{ここに } K = K_p R_m N K_A K_R G_O \quad (7)$$

(6)式は比例、積分、および微分動作の間に相互干渉のない理想的な調節器の伝達関数であり、理想的な制御動作を行わせることができる⁽¹²⁾。第19図(a)~(c)に調節器のステップ入力に対する出力応答を示す。微分および積分時間はR_DおよびR_Iを変えることにより、0.03~10分、0.1~30分の設定が可能である。

第 17 図 V₆₁-E 形 PID 調節器回路図第 18 図 V₆₁-E 形 PID 調節器のブロック線図

また、加算回路の入力は 3 入力のほかに外部信号受入端子⁽¹³⁾があり、外部からの指令により複合制御を行うことも可能である。

手動調節器は手動操作用電源、手動—自動切換えスイッチ、手動操作用つまみ、出力電流計などから構成され運転開始、停止、PID 調節器の保守点検時などに使用される。第 16 図の下部の二つのつまみ、および中央の電流計がそれで、上部の PID 調節器を抜き去っても手動調節器のみは残り、手動操作ができる。手動操作から自動操作へ、またその逆の自動操作から手動操作に切換えた場合、常にその両出力が等しくないと、その差に等しい外乱が切換えのために制御系に入ることになり、好ましくない。本調節器では、いずれの方向にも制御系に外乱を入れることなく切換えることができるように考慮されている⁽¹⁴⁾。

以上述べたほかに磁気変調器に第 3 巻線をほどこし、それへの負帰還回路で PID 演算を行う形のものもある

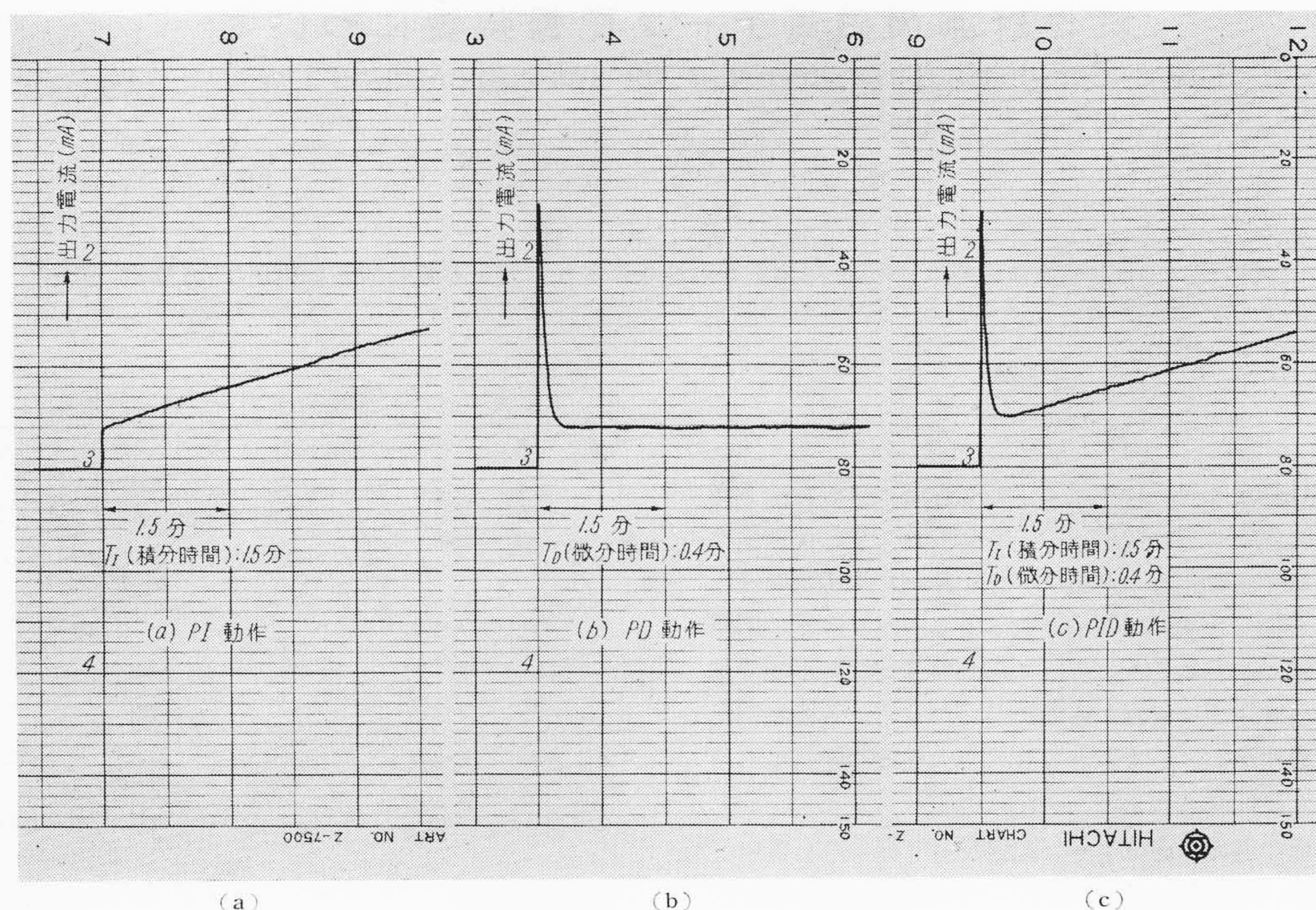
が、これについての説明は省略する。

4. 結 言

現在工業計器の相当数は電子応用計器といえる。生産管理、中央集中化の徹底、データー処理、電子計算機の普及などに伴い、電子応用計器は今後の電子工業の大きな部門となりつつある。ここに各種の電子応用工業計器のうちから磁気変調器を使用した製品を選び、しかも長年の技術の成果に基く最近の新技术によって完成された VKP₃₁ 形電子管式記録計と V₆₁-E 形電子式調節器を採り上げその概要を説明した。詳細については改めて発表する予定である。

この分野の技術進歩は日進月歩であり、次々に新しい工業計器が開発され改良されている。われわれは需要家各位のご批判とご指導により、常に理想的な工業計器を目標に時代の要求にそった計器の製作を念願している。

終りに臨み本研究に際し種々ご指導、ご激励を賜った



第19図 調節器のステップ応答

日立製作所中央研究所阿部(善)主任研究員はじめ、日立製作所多賀工場、中央研究所の上司ならびに関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 河井：日立評論 別冊 No. 3 125 (昭 28-6)
- (2) 伊藤，河井：日立評論 別冊 No. 10 93 (昭30-8)
- (3) 特許 公告番号 昭 30-2590
- (4) 特許 公告番号 昭 30-4291
- (5) 阿部：昭 30 電三学連大 837 (昭 30)
- (6) 阿部，木下，河井，早川：昭 34 電四学連大 981 (昭 34)
- (7) 木下，猪瀬，阿部：昭 34 信学全大 387 (昭 34)
- (8) 特許出願中
- (9) 木下，阿部，加藤：昭 34 電四学連大 105 (昭 34)
- (10) H.R.Karp：Control Eng：5, 81(Nov., 1958)
- (11) 木下，高見，倉持：昭 34 電四学連大 207 (昭 34)
- (12) 特許出願中
- (13) 特許出願中
- (14) 特許出願中