

中国電力株式会社神野瀬, 滝山川発電所納
自動周波数調整装置用操作量伝送装置
 Operating Signal Transmitter for Automatic Frequency Control

小 沢 重 樹* 平 井 善 一 郎** 竹 村 克 巳***
 Shigeki Ozawa Zen'ichirō Hirai Katsumi Takemura

内 容 梗 概

電力系統の自動周波数調整 (AFC) を中央給電指令所から行う場合、操作信号を搬送装置で伝送することが必要となる。

1 チャンネル式操作量伝送装置はテレメータと同一の通信帯域を 1 個占有するのみで信号を伝送する装置であり、昭和33年中国電力株式会社神野瀬発電所に、ついで滝山川発電所に納入され以後好調に運転されている。

本装置の性能は操作量零におけるドリフトは認められず、約 0.6 秒の速応度をもつものである。現地試験においてもドリフトの生じないことが確かめられ、AFC制御結果として周波数偏差 ± 0.1 c/s以下の結果が得られた。

本論文では装置の概要を説明するとともに、その特性の理論的検討を行った。

1. 緒 言

電力系統の自動周波数調整 (AFC) は系統の容量が大きい場合一つの調整発電所では容量が不足し、複数個の発電所を同時に制御する必要が生ずる。このため中央給電指令所 (以下中給と略す) より遠方の発電所を制御することが要求される。すなわち中給において検出装置を設け、各発電所を制御すべき操作量を求め、これを通信回線を通して遠隔地の発電所に伝送する集中制御の形がとられる。

操作量を伝送する装置としては“2チャンネル方式”と“1チャンネル方式”とが考えられる。2チャンネル方式は操作信号 (ΔV , V) を伝送する方式であり、中国電力株式会社潮発電所、北陸電力株式会社神通川第1, 第2発電所に使用され、これについてはすでに報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。この方式は高速応度を有する点が大きな長所であるが、一方広い帯域幅を占有し、通信回線に余裕がない場合は適用しがたい。1チャンネル方式は操作量を衝流周波数に変換し、テレメータと同じ帯域幅で伝送する方式であり、中国電力株式会社神野瀬発電所、滝山川発電所に納入され、好成績をあげている。以下1チャンネル方式についてその特性を検討した結果について報告する。

2. 装置の概要

2.1 装置に要求される条件

一般に操作量の伝送装置に要求される条件は下記のとおりである。

- (a) 操作量零におけるドリフトの小なること。
- (b) 制御に十分な感度、速応度を有すること。
- (c) 信頼性の高いこと。

(a)は定常状態では操作量が零であるから、ドリフトは制御結果に偏差を生ずる原因となり、(b)は微小な操作量を再現するとともに、全体の制御特性上要求されるものである。(c)は発電所の制御であるから、高い信頼性を必要とすることは当然のことであるが、特に通信回線を使用する点から雑音などによるじょう乱に対し十分考慮されるべきものである。

2.2 1チャンネル方式の動作原理⁽³⁾

本方式は操作量をテレメータと同じく 20~30c/s の衝流周波数に変換するものであり、狭い帯域幅で伝送しうることが大きな特長で

ある。

操作量 $\pm \Delta V$ は交流電圧の大きさ、位相の反転で与えられ、自動平衡計器によりスライド抵抗のブラッシの位置に変換される。このブラッシ位置を系統周波数 f_L と同期した 20~30 c/s の周波数に変換し搬送装置により伝送する。受量側では伝送された上記信号を自動平衡計器により系統周波数と比較して送量側と同一のスライド抵抗のブラッシ位置をうるものである。

第1図に本方式の動作原理を示す。

操作量 $\pm \Delta V$ は自動平衡計器によりスライド抵抗 R_0 のブラッシ P の位置に変換される。抵抗 R_0 には系統周波数 f_L の $1/3$ の周波数 f_0 で動作するコンデンサの充放電電流 $i_0 (= 2f_0 C_0 E_b)$ が流れるから、 $P D$ 間の電圧 E_x は次式のようになる。

$$E_x = 2f_0 C_0 E_b R_v x \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで x はブラッシ P のスライド抵抗 R_0 における分圧比を示す。一方送出される周波数 f により動作する充放電電流 $i (= 2f C E_b)$ は抵抗 R_b を流れるから、 $B D$ 間の電圧 E は次式となる。

$$E = 2f C E_b R_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

E_x と E の差電圧は増幅器により増幅され、位相弁別器により直流電圧に変換され、この電圧がブロッキング発振器の発振周波数を制御し、 E_x と E がほとんど等しくなるような周波数 f を発生する。すなわち平衡状態では閉回路の利得を十分高くとってあるから $E_x \doteq E$ となり (1), (2) 式より次式が成立する。

$$\frac{f}{f_0} = \frac{C_0 R_v}{C R_b} x \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式より x は操作量と対応しているので出力周波数 f は系統周波数 f_L を中介として操作量と正しく対応することがわかる。

受量側は送量側と逆の動作を行う。伝送された周波数 f および系統周波数 f_L の $1/3$ の周波数 f_0 により充放電回路を駆動し、 $P' D'$ および $B' D'$ 間にそれぞれ $E_{x'}$ および E' なる電圧を発生させる。 $E_{x'}$ および E' は次式で表わされる。

$$E_{x'} = 2f_0 C_0' E_b' R_v' x' \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$E' = 2f C' E_b' R_b' \quad \dots\dots\dots (5)$$

$E_{x'}$ と E' の差電圧は増幅器により増幅され、その正負により平衡モータを正逆転させ、ブラッシ P' を $E_{x'} = E'$ となるように動作させる。したがって平衡状態では (4), (5) 式より次式が成立する。

$$\frac{f}{f_0} = \frac{C_0' R_v'}{C' R_b'} x' \quad \dots\dots\dots (6)$$

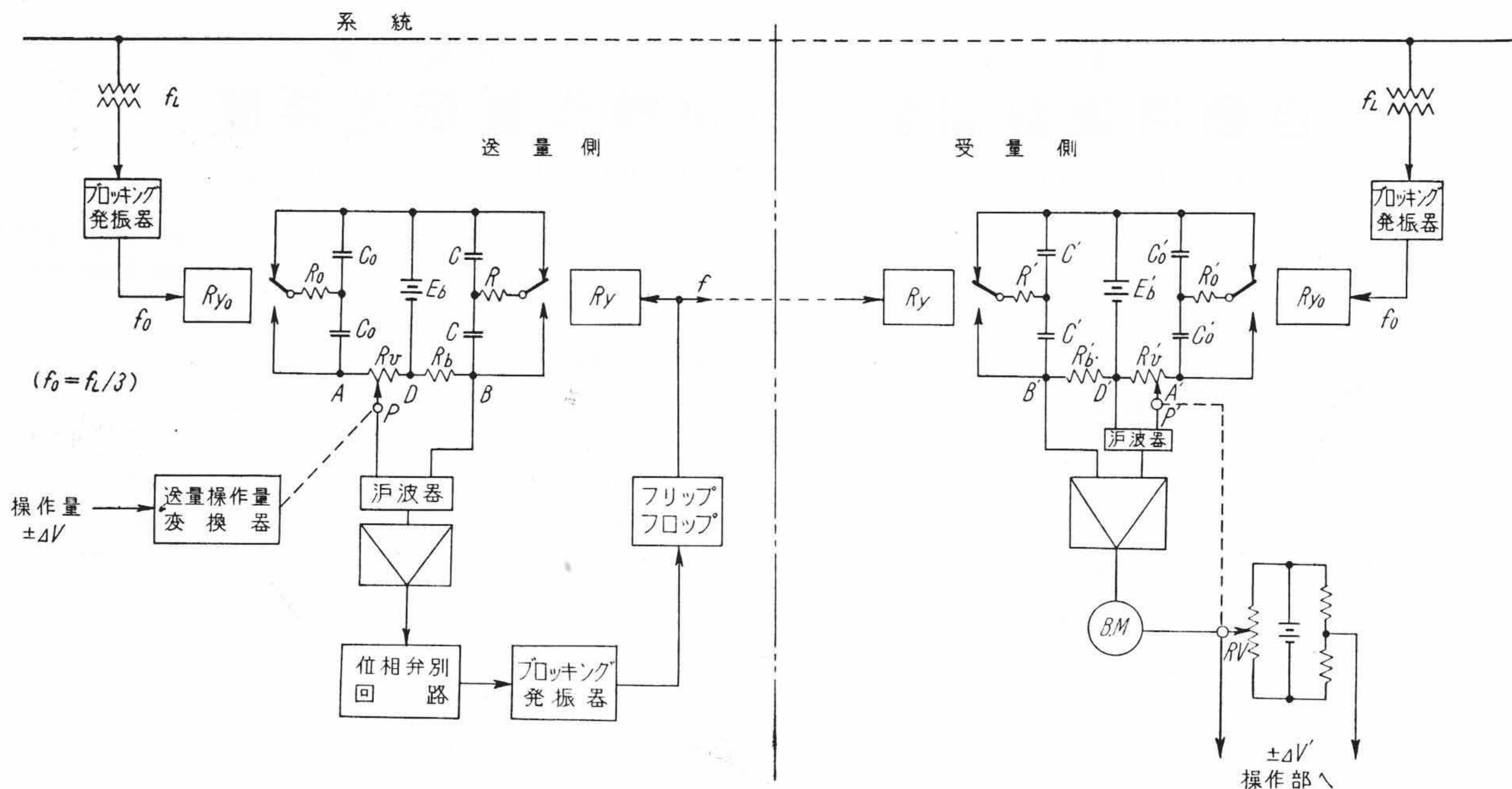
(3), (6) 式より

$$x' = \frac{C_0 R_v C' R_b'}{C R_b C_0' R_v'} x \quad \dots\dots\dots (7)$$

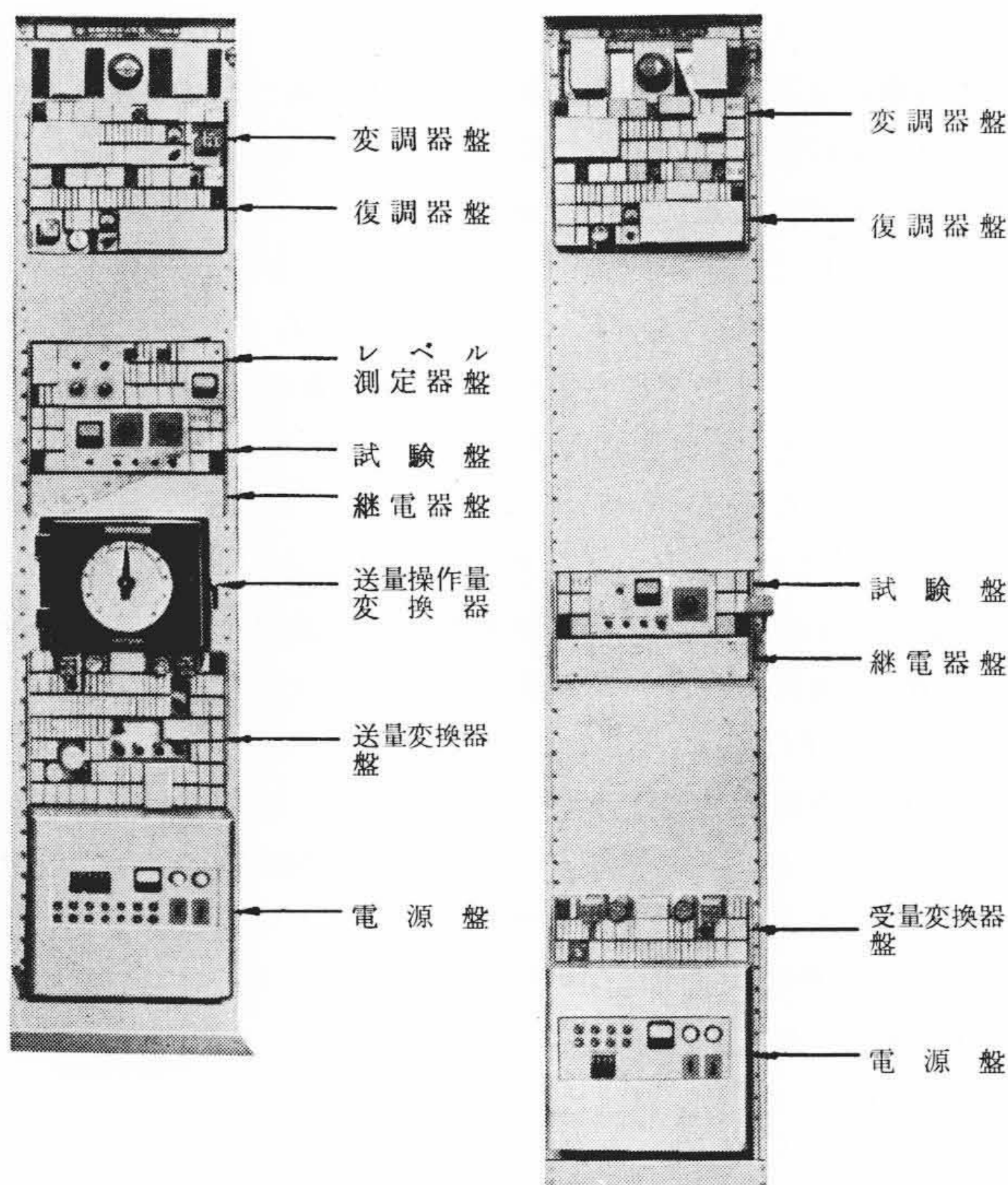
* 日立製作所多賀工場

** 日立製作所国分工場

*** 日立製作所日立研究所

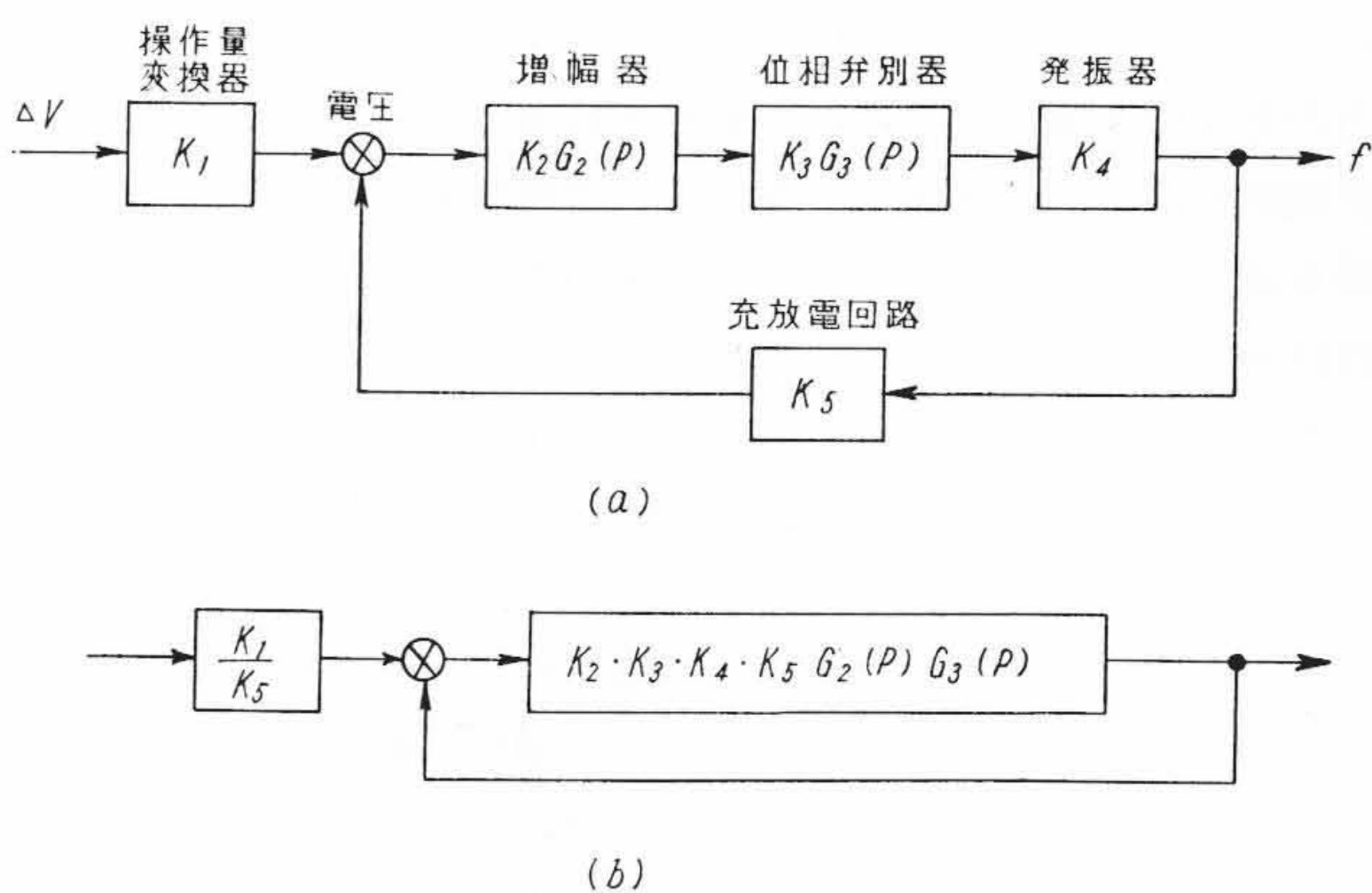


第1図 操作量伝送装置原理図



第2図 送量装置
(中給)

第3図 受量装置
(神野瀬発電所)



第4図 送量装置ブロック線図

3.2 影響値試験

(a) 操作電源電圧の影響

定格電圧の $\pm 10\%$ の変動に対し影響なし。

(b) 操作電源周波数の影響

周波数 56~61c/s の変動に対し影響なし。

3.3 速応度

総合にて約 0.6 秒。

3.4 レベル変動試験

瞬間レベル変動 ± 10 dB 以下に対し指示に変化なし。

3.5 雑音試験

SN 比 10 dB 以上で指示に変化なし。

4. 特性の検討

4.1 送量装置

4.1.1 ブロック線図

第4図(a)に送量側装置のブロック線図を示す。第4図(a)は(b)のように書き換えられる。安定度、過渡応答などの検討は(b)図閉ループ部で行えばよいことは明らかである。

4.1.2 充放電回路

第5図は充放電回路図である。

変換された衝流周波数 f は操作信号 $-10 \sim 0 \sim +10$ に応じて

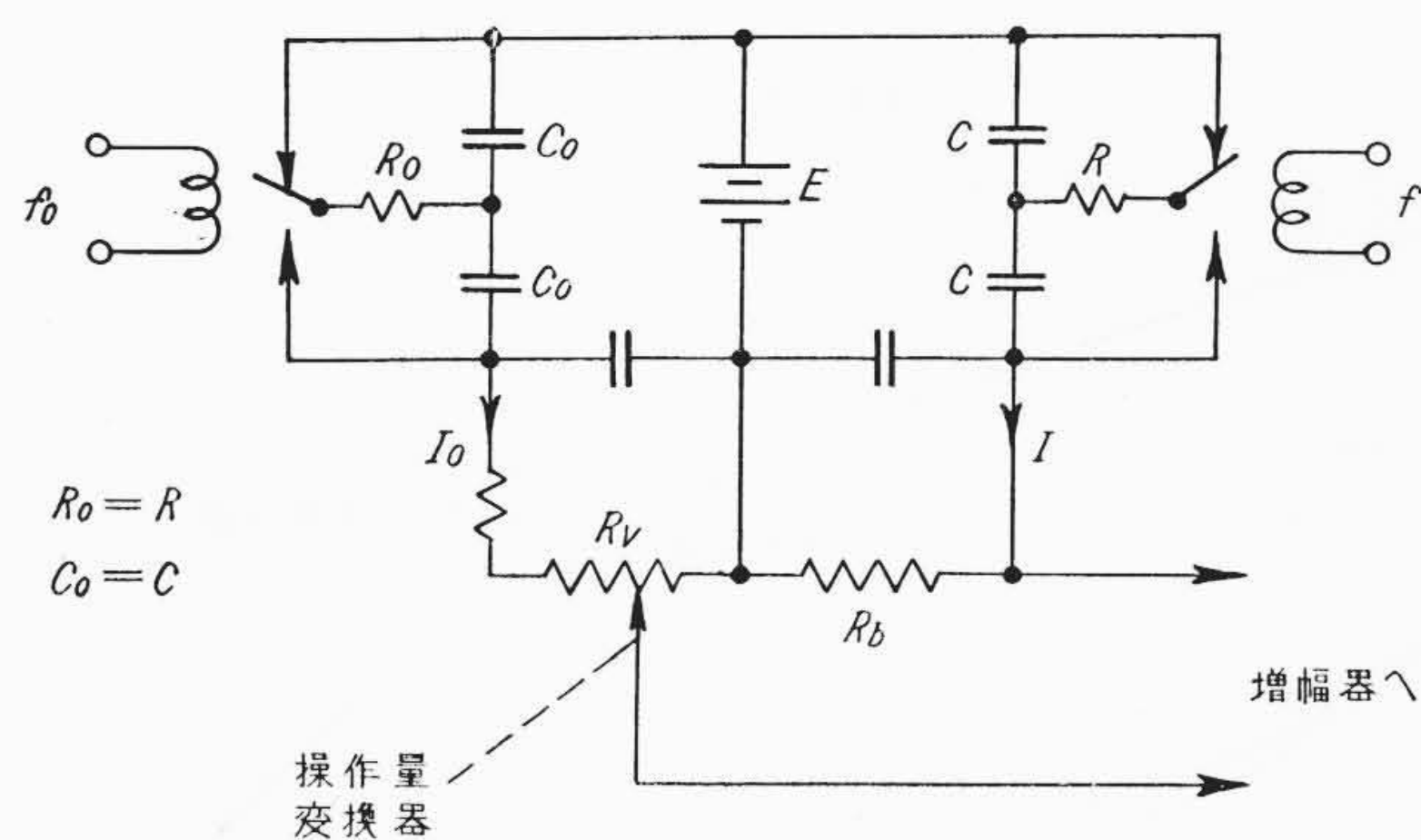
(7)式において $\frac{C_0 R_v C' R'_b}{C R_b C'_0 R'_v}$ は一定であるから受量側のブラシ P' の位置は送量側のブラシ P の位置とまったく対応する。ブラシ P' と連動するスライド抵抗 R_v によるブリッジ回路の直流出力電圧 $\pm \Delta V'$ が操作量として操作部に加えられる。

第2図および第3図はそれぞれ中給および発電所側装置の外観を示したものである。

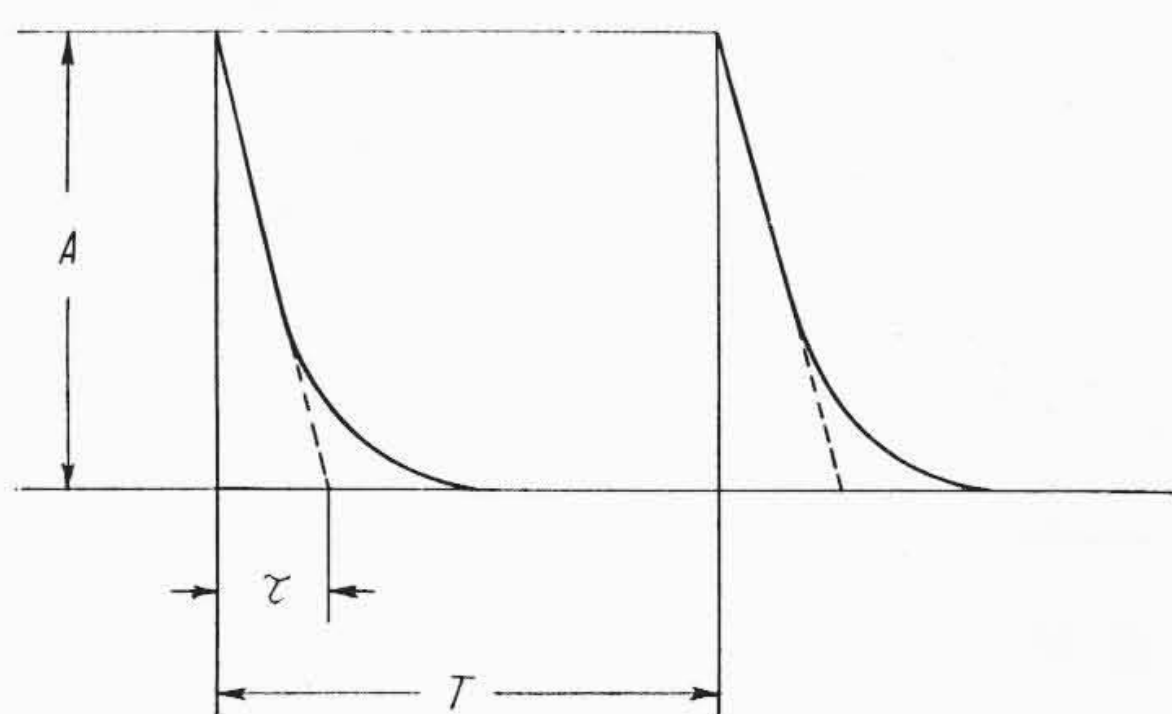
3. 装置の性能および特性

3.1 誤差試験

標準状態における送受総合誤差は 0.5% 以下。ただし操作量零において誤差なし。



第5図 充放電回路



第6図 充放電回路の出力波形

20～25～30 c/s と変化する。一方系統周波数 f_L に同期した f_0 は $1/3 f_L$ に選ばれるから、 f_L が 60 c/s とすると 20 c/s になる。充放電電流は $I=2fCE$ であり、充放電回路の出力は抵抗 R_b における電圧降下であるからその利得 K_5 は下記により求められる。

$$K_5 = 2CE R_b \dots\dots\dots (8)$$

4.1.3 増幅器

増幅器の入力、すなわち充放電回路の出力は第6図のような波形であり、多くの高調波を含んでいる。これらの高調波は直交変換する前に除去しないと誤差あるいは引込現象の原因となる。

第6図の波形をフーリエ級数に分解し、その直流分および基本波成分を求めると次式のようなになる。

$$\text{直流成分 } b_0 = \frac{A\tau}{T} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{T}{\tau}}\right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{基本波成分 } C_n = \frac{2A(1 - \varepsilon^{-\frac{T}{\tau}})}{\sqrt{(2n\pi)^2 + \left(\frac{T}{\tau}\right)^2}} \dots\dots\dots (10)$$

低域フィルタの減衰を考える場合交流分 C_n の直流分 b_0 に対する比率を考えればよいから C_n/b_0 を求めると下記のようなになる。

$$\frac{C_n}{b_0} = \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2n\pi}{\frac{T}{\tau}}\right)^2}} \dots\dots\dots (11)$$

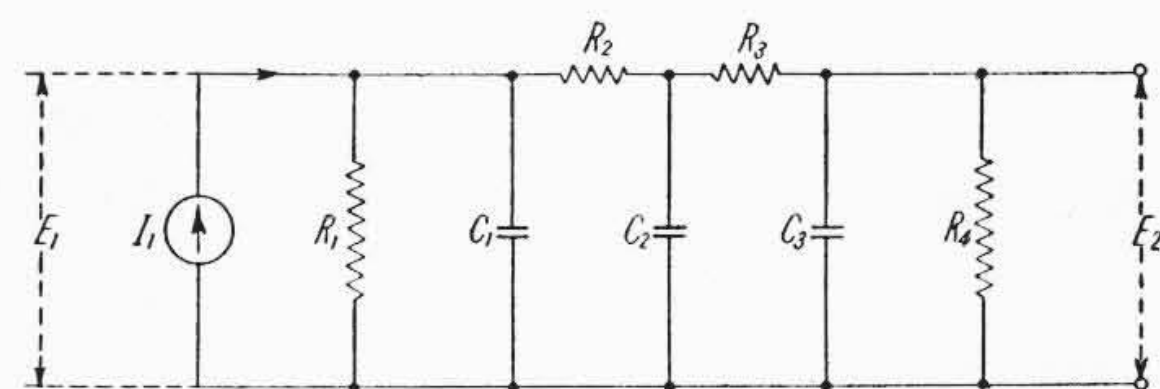
ここで衝流周波数として最小の 20 c/s において充放電電流の基本周波数は 40 c/s になるから $T=1/40$ である。また τ は第5図の R, C により定まる時定数である。

C_n は $n=1$ の場合が最大になるから、低域フィルタとしては $n=1$ の場合、すなわち基本波についてのみ考えればよいことになる。

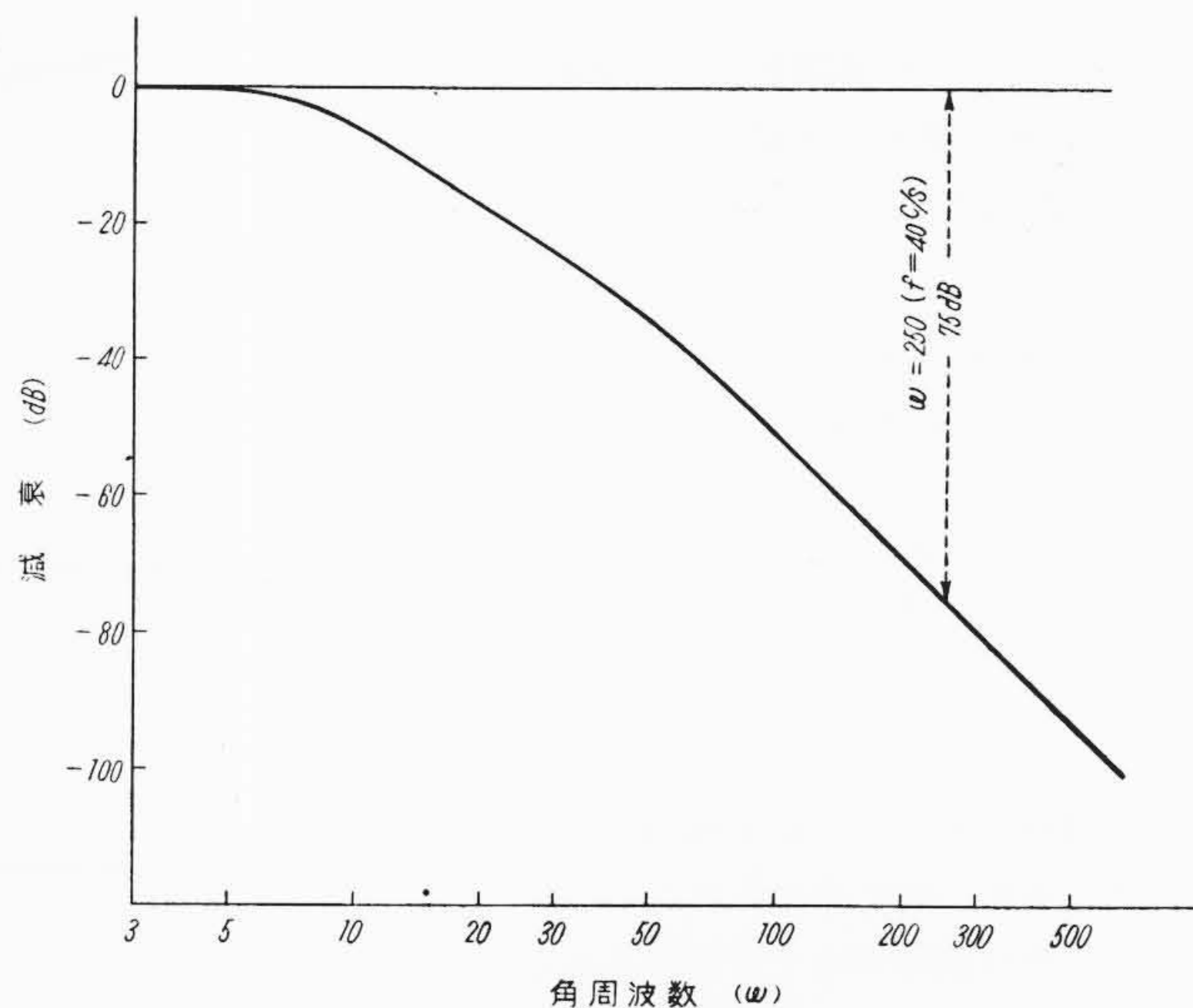
(11)式より計算すると

$$C_1/b_0 \doteq 2 \dots\dots\dots (12)$$

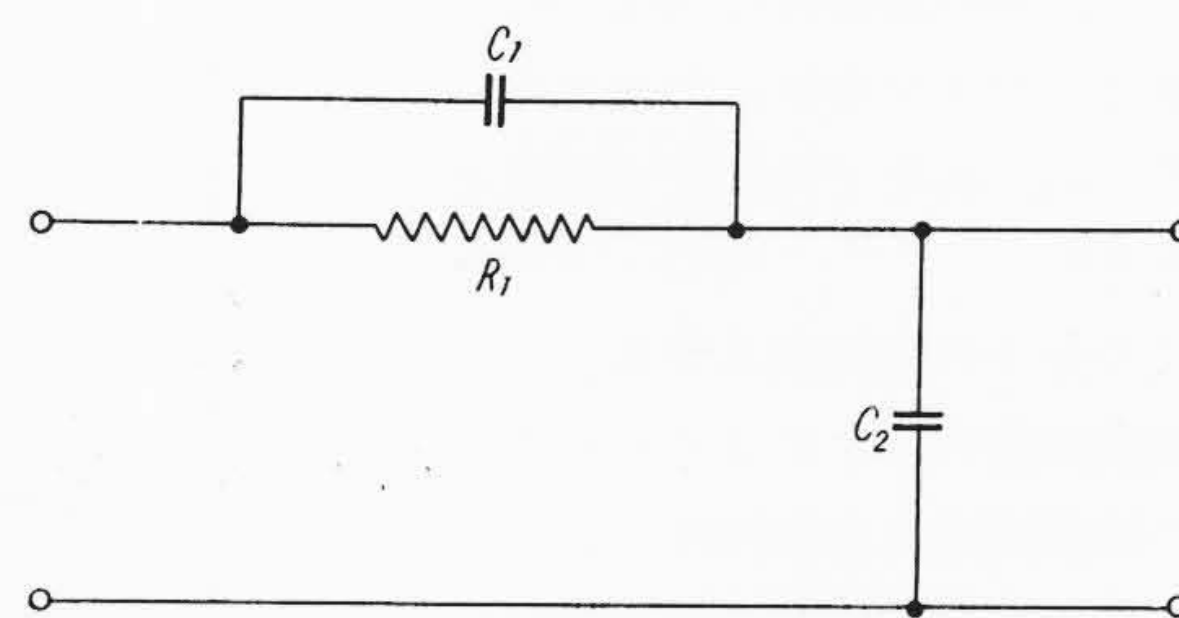
交流分の振幅を直流分の変動範囲に対し 0.1% 以下になるよう低域フィルタの減衰度を求めれば、誤差の点で問題ないと考えてよい。



第7図 低域フィルタ回路図



第8図 低域フィルタの減衰特性



第9図 補償回路

減衰度を α とすると

$$\frac{b_0}{2} \times 10^{-3} \geq C_1 \alpha$$

$$\alpha \leq \frac{b_0}{2C_1} \times 10^{-3} = \frac{1}{4,000} (= -72 \text{ dB}) \dots\dots\dots (13)$$

第7図は低域フィルタの等価回路である。

第7図において E_2/E_1 は次式のように表わすことができる。

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K'_2}{(T_1P+1)(T_2P+1)(T_3P+1)} \dots\dots\dots (14)$$

ここで $P=j\omega$ である。

第8図に低域フィルタの減衰特性を示す。基本周波数 40 c/s における減衰は 80 dB であるから、十分余裕ある減衰特性を持っていることがわかる。

次に低域フィルタを含めた増幅器の利得を K_2 とすると、この伝達関数 $K_2 G_2(P)$ は次式となる。

$$K_2 G_2(P) = \frac{K_2}{(T_1P+1)(T_2P+1)(T_3P+1)} \dots\dots\dots (15)$$

4.1.4 位相弁別器

これは増幅器出力をその位相の反転に応じて正負の直流電圧に変換するものである。

出力には第9図のような補償回路が付加されているが、これは安定度および過渡応答の改善を行うものである。この回路の伝達関数は次式となる。

$$K_3 G_3(P) = \frac{K_3(T_5 P + 1)}{T_4 P + 1} \dots (16)$$

4.1.5 発振器

位相弁別器の直流出力に応じて20～30 c/s の発振周波数をうるものであり、ブロッキング発振器のバイアス電圧を変化することにより行っている。

4.1.6 ループ伝達関数および制御

特性に関する考察⁽⁴⁾⁽⁵⁾

4.1.2～4.1.5 よりループ伝達関数を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} G(P) &= K_2 K_3 K_4 K_5 G_2(P) G_3(P) \\ &= \frac{K_2 K_3 K_4 K_5 (T_5 P + 1)}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)(T_3 P + 1)(T_4 P + 1)} \\ &= \frac{K (0.1 P + 1)}{(10 P + 1) \left(\frac{P}{5} + 1\right) \left(\frac{P}{17} + 1\right) \left(\frac{P}{21} + 1\right)} \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

制御特性としては安定度、定常応答、過渡応答が一般に考えられる。

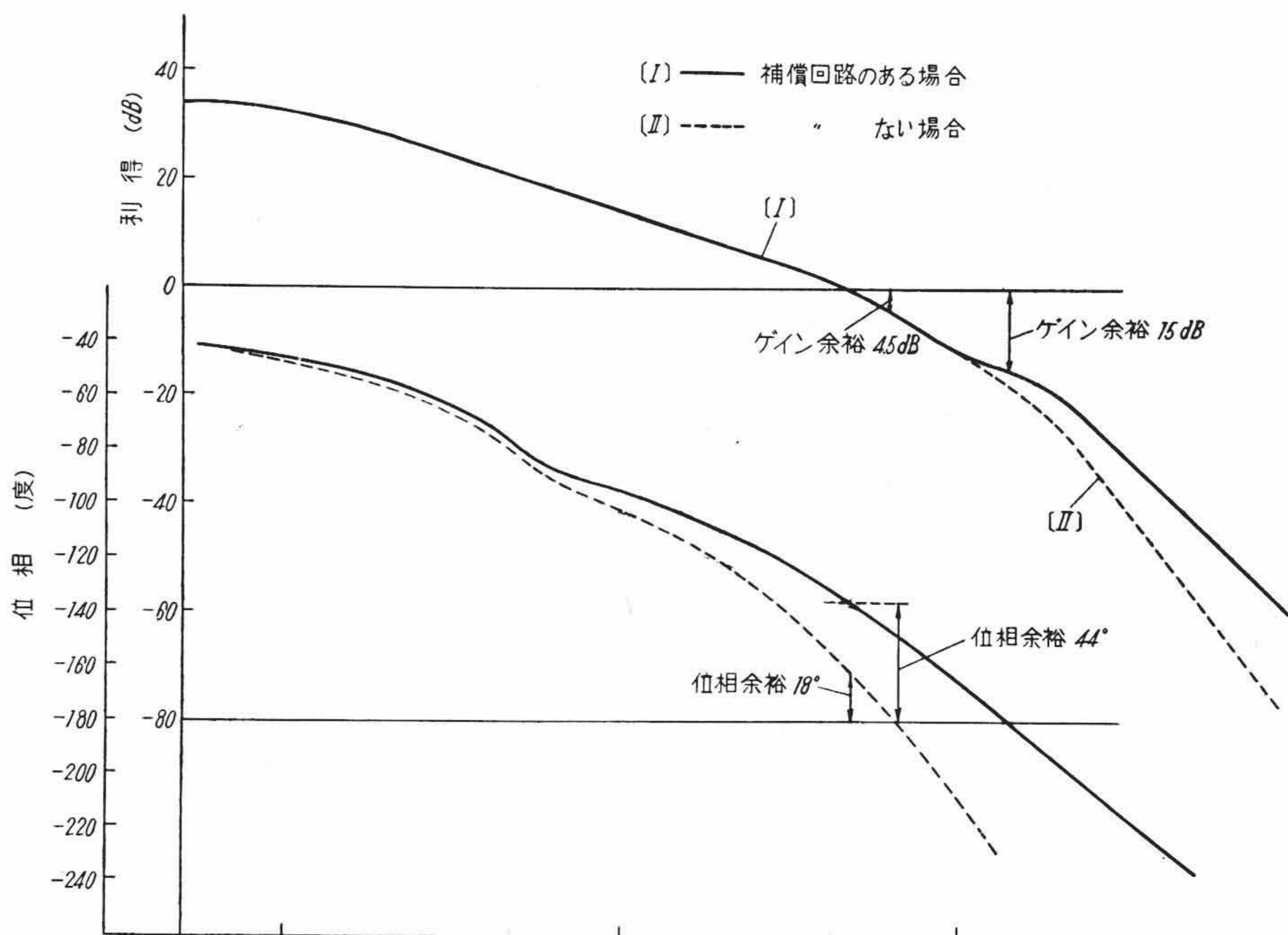
安定性は制御系にまず要求される条件であるが、これに関連して定常、過渡応答の諸特性を向上することが必要である。これらの諸特性は M_p , ω_p , 減衰係数 ξ , ゲイン余裕, 位相余裕, 定常偏差, ω_0 , φ_0 などによりつかむことができる*。

(17) 式の分子の位相進み要素は位相弁別器補償回路の C_2 によるものであり、この補償回路は制御特性の改善に役立っている。補償回路のない場合のループ伝達関数は次式のようになる。

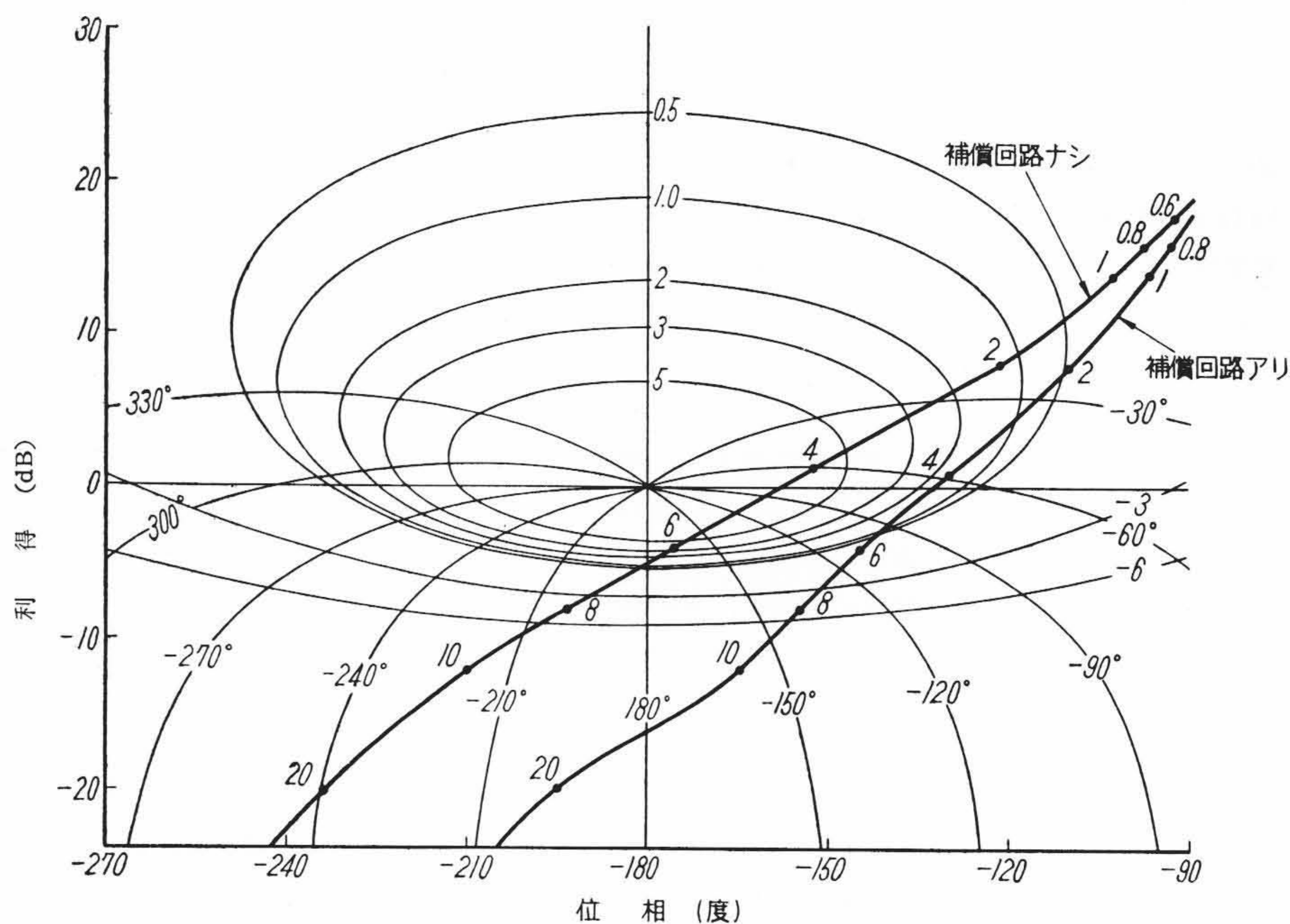
$$\begin{aligned} G(P) &= \frac{K}{(10 P + 1) \left(\frac{P}{5} + 1\right) \left(\frac{P}{17} + 1\right) \left(\frac{P}{21} + 1\right)} \\ &\dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

(17) 式および(18)式よりボード線図を画くと 第 10 図 が得られる。点線は補償回路のない場合を示している。

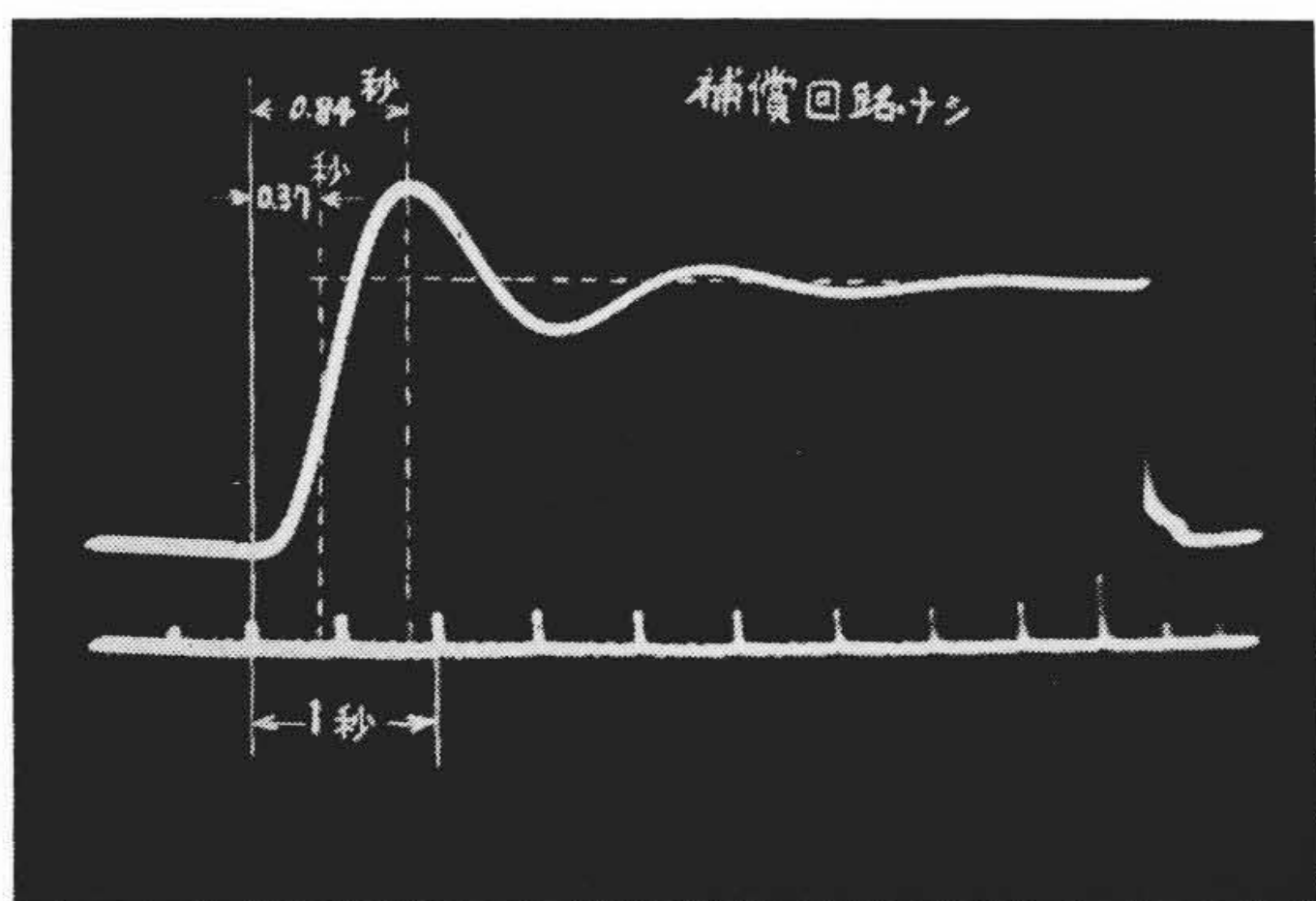
第 10 図よりニコルズ線図第 11 図を



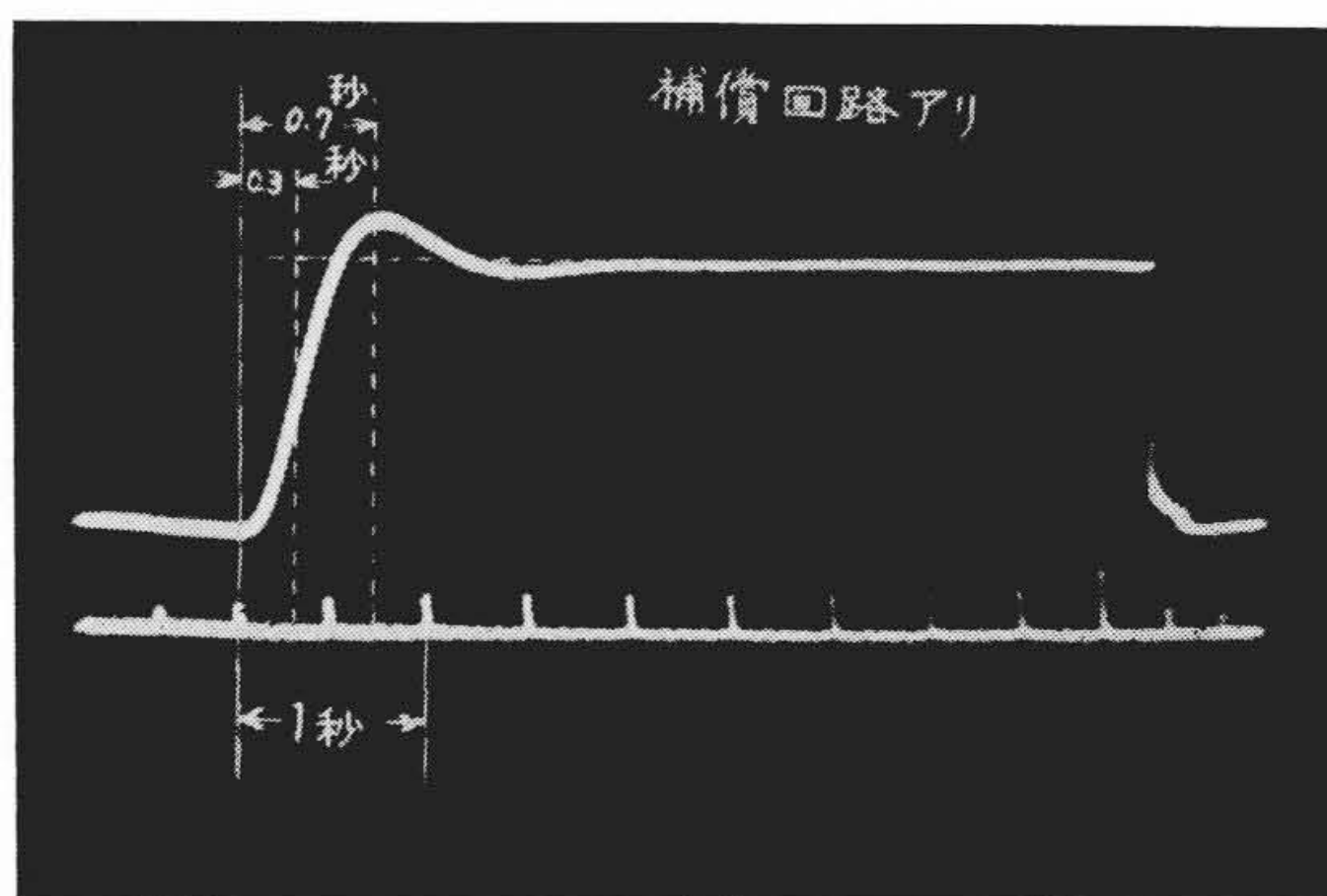
第 10 図 送量装置のボード線図



第 11 図 ニコルズ線図



(a)



(b)

第 12 図 送量装置のインディシャルレスポンス (アナコン解析結果)

* ω_0 , φ_0 は制御系を理想フィルタに近似した場合の遮断周波数, 位相である。

画いて検討した結果、安定度、精度、応答度のいずれをも満足させるため、補償回路を付加することになった。

第12図(a)および(b)は補償回路のある場合、およびない場合のインディシャルレスポンスをアナコンにて解析したものである。

第13図(a)および(b)は第12図と同一条件でレスポンスをオシログラフで実測したものでアナコン結果とよく一致していることが実証されている。

4.2 受量装置

4.2.1 ブロック線図

第14図は受量側装置のブロック線図を示す。

第14図(a)は(b)のように書き換えられる。このブロック線図は従来の電子管式平衡計器とまったく同一のものである。

4.2.2 充放電回路

この回路は送量側の第5図とまったく同一である。

4.2.3 濾波器

送量側濾波器と同様に充放電回路の出力に含まれる交流分を除くためのもので、等価回路は第7図と同一であり、その伝達関数も(15)式で表わすことができる。

第15図は濾波器の減衰特性であり、基本周波数40 c/sにおける減衰は75 dBであるから4.1.3で述べたように十分な減衰特性をもっていることがわかる。

4.2.4 閉ループ回路

これは一般の自動平衡計器であり、その諸特性についてはすでに多くの報告が出されている。

ループ伝達関数 $KG(P)$ は第14図(b)より次式で与えられる。

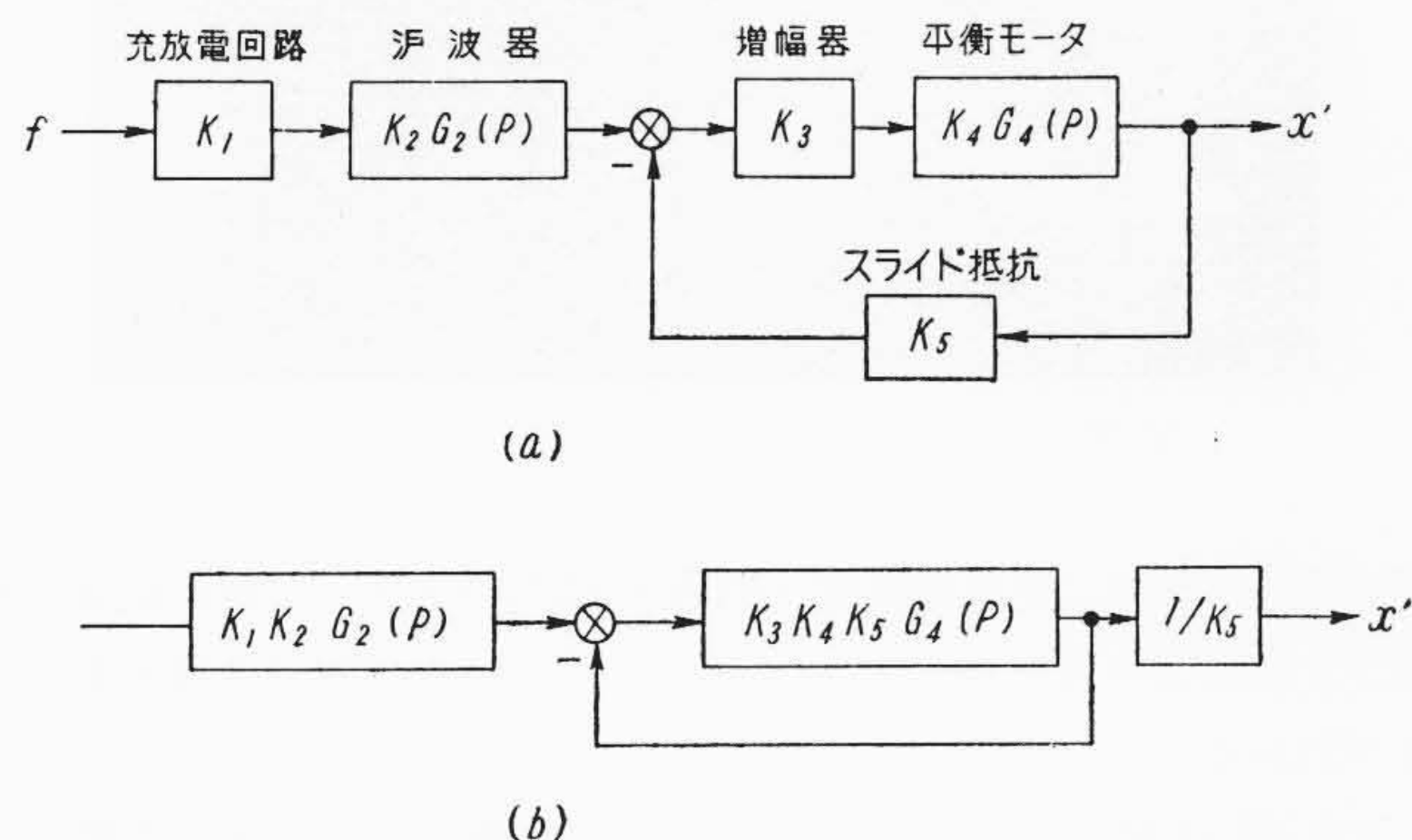
$$KG(P) = \frac{K_3 K_4 K_5}{P(TP+1)} \quad (19)$$

$K_3 K_4 K_5$ はループの定常利得であり、 T は平衡モータの時定数を表わす。

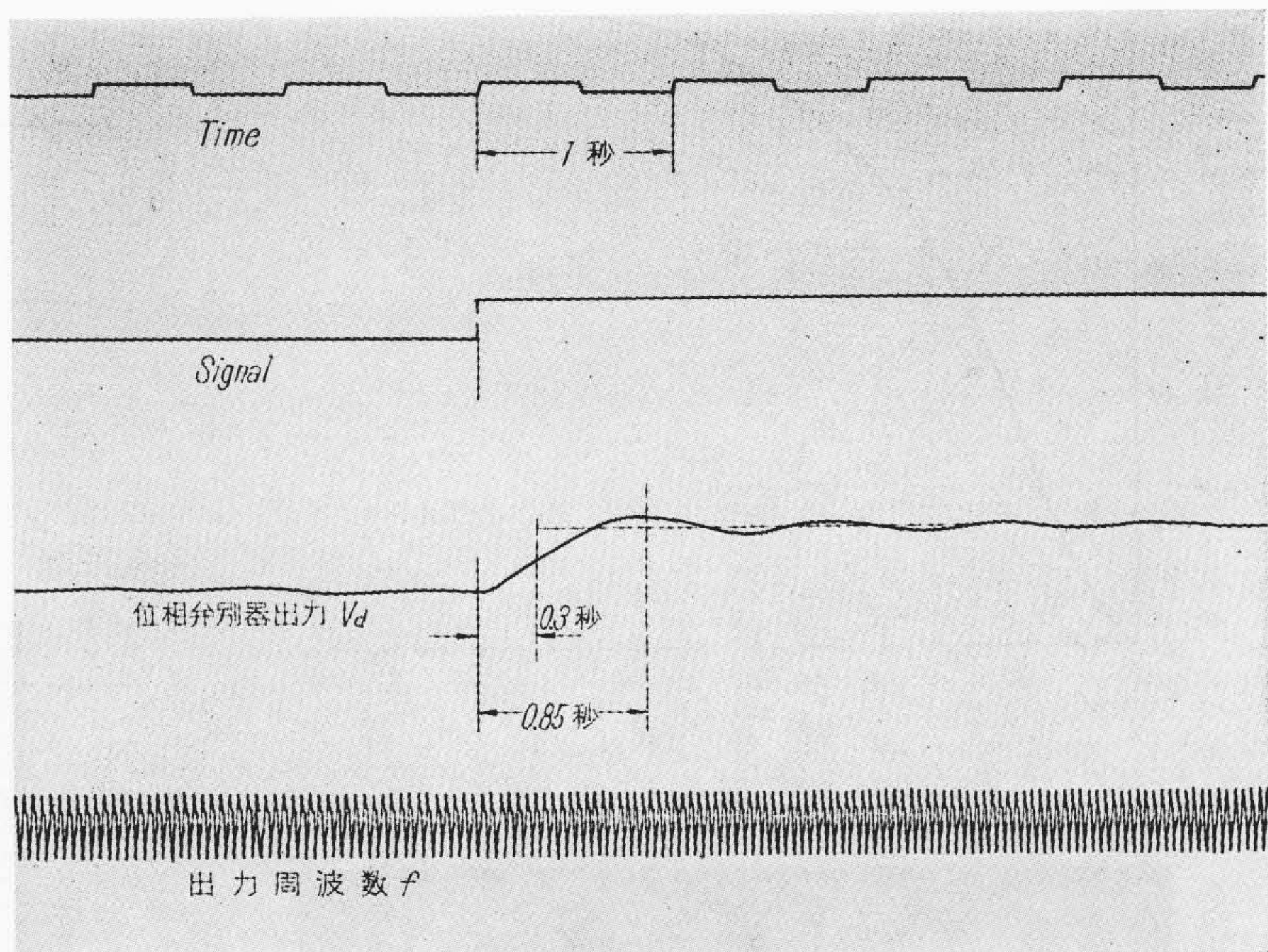
4.2.5 過渡特性

受量装置の過渡特性は第14図(b)より明らかにように充放電回路および濾波器と平衡計器部とに分けて考えることができる。平衡計器部の追従速度は相当速いから、装置のレスポンスはほとんど濾波器によって決定されると考えてよい。

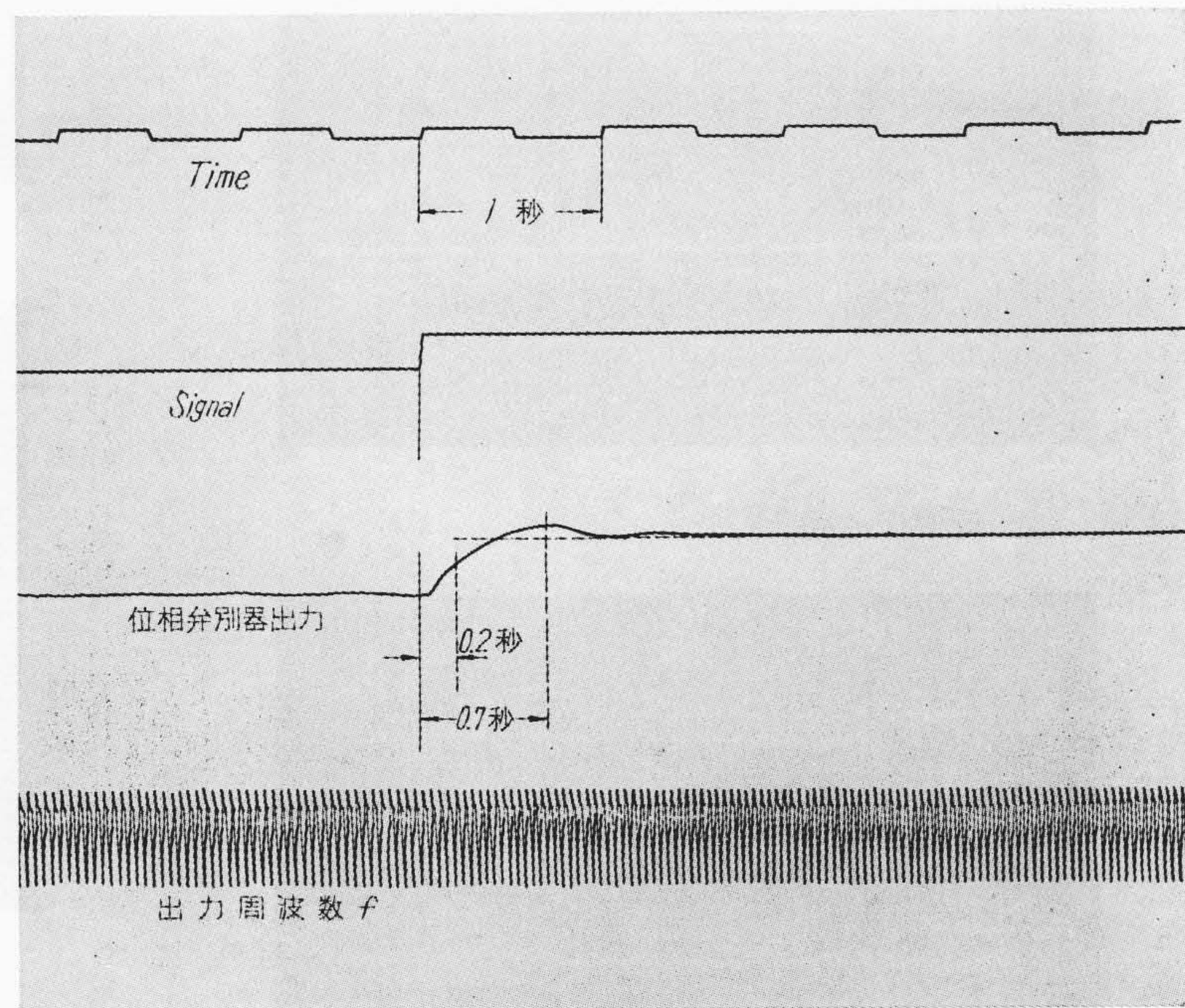
入力に単位関数的変化があった場合の濾波器の出力 $x(t)$ は次



第14図 受量装置のブロック線図

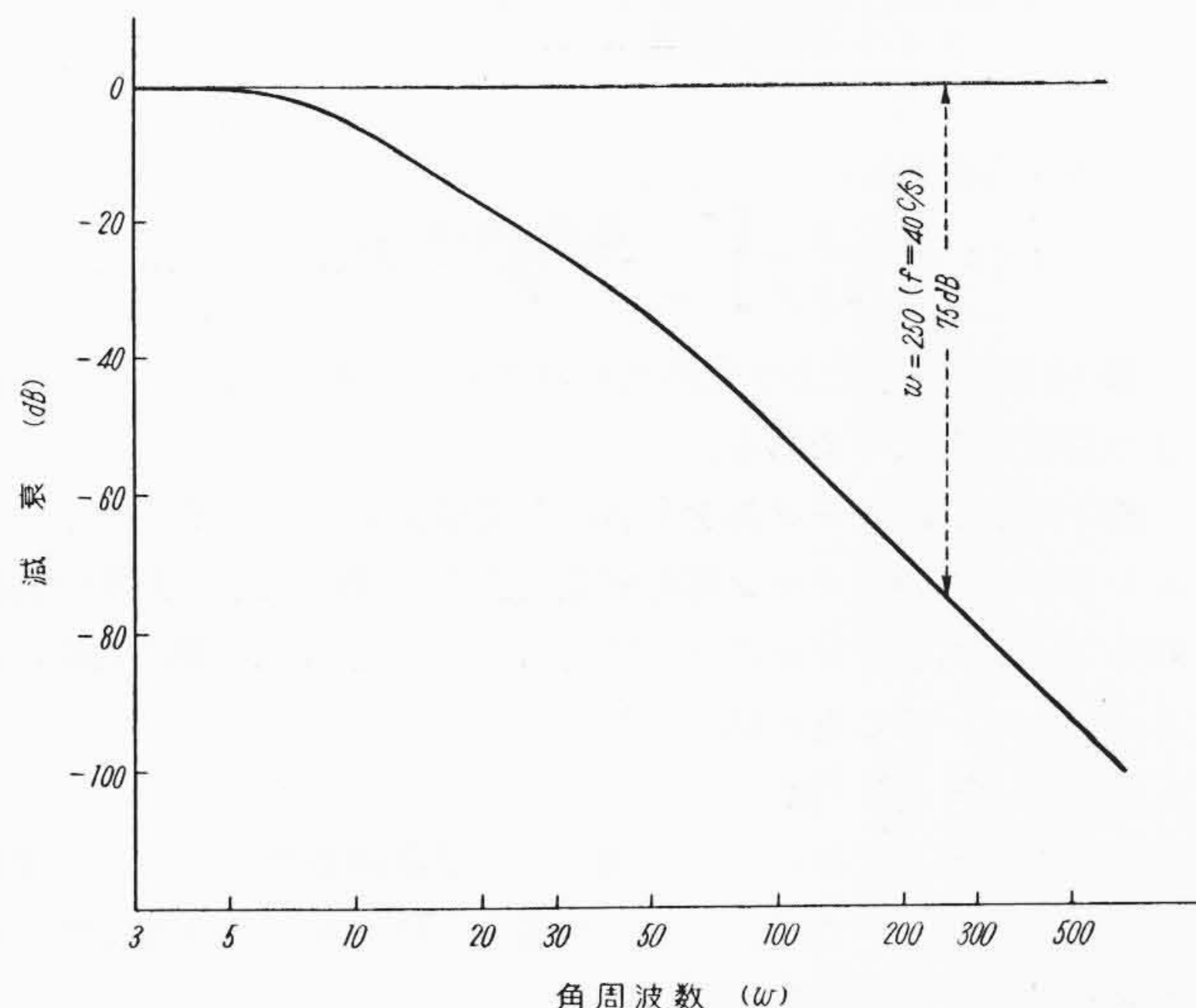


(a) 補償回路ナシ

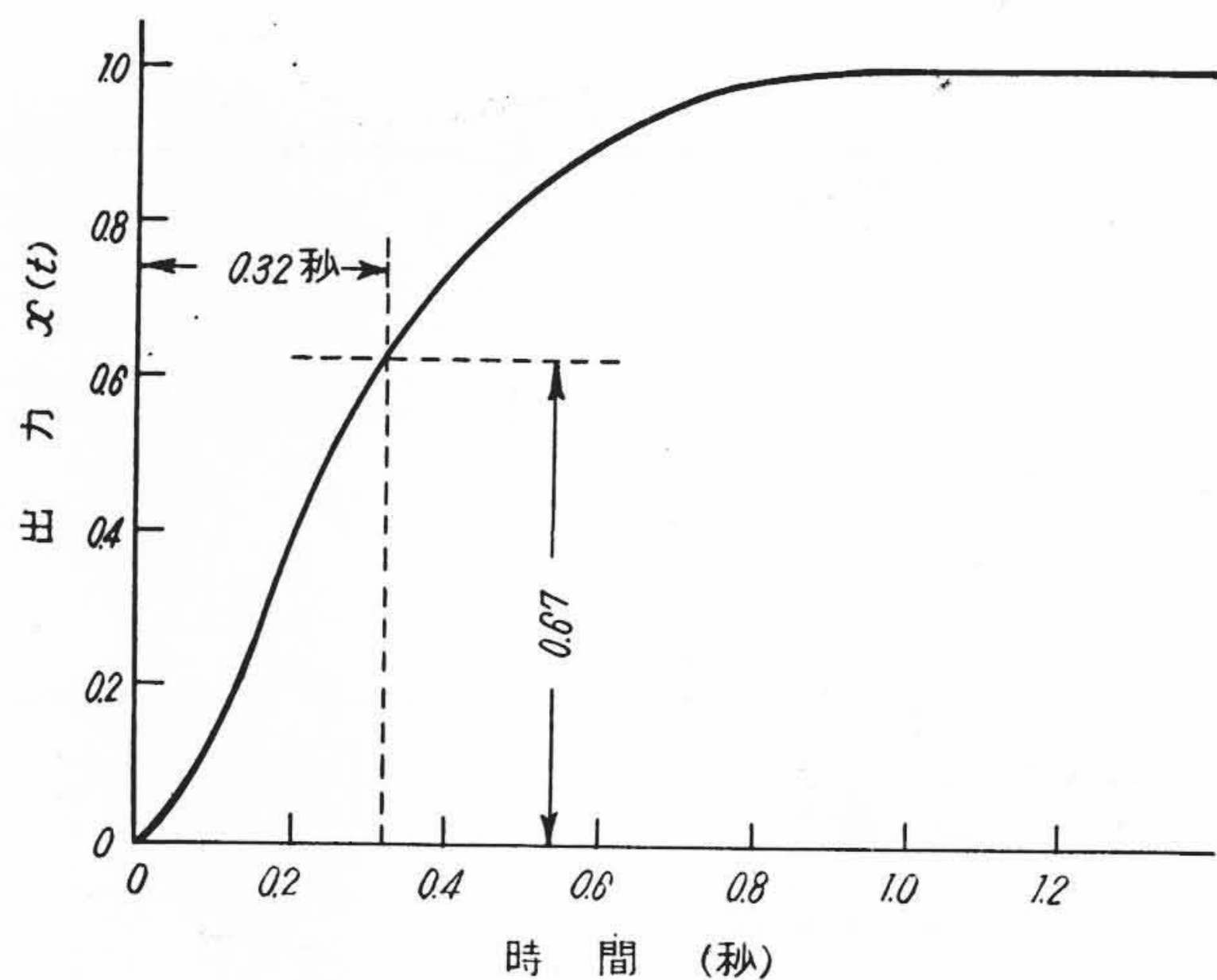


(b) 補償回路アリ

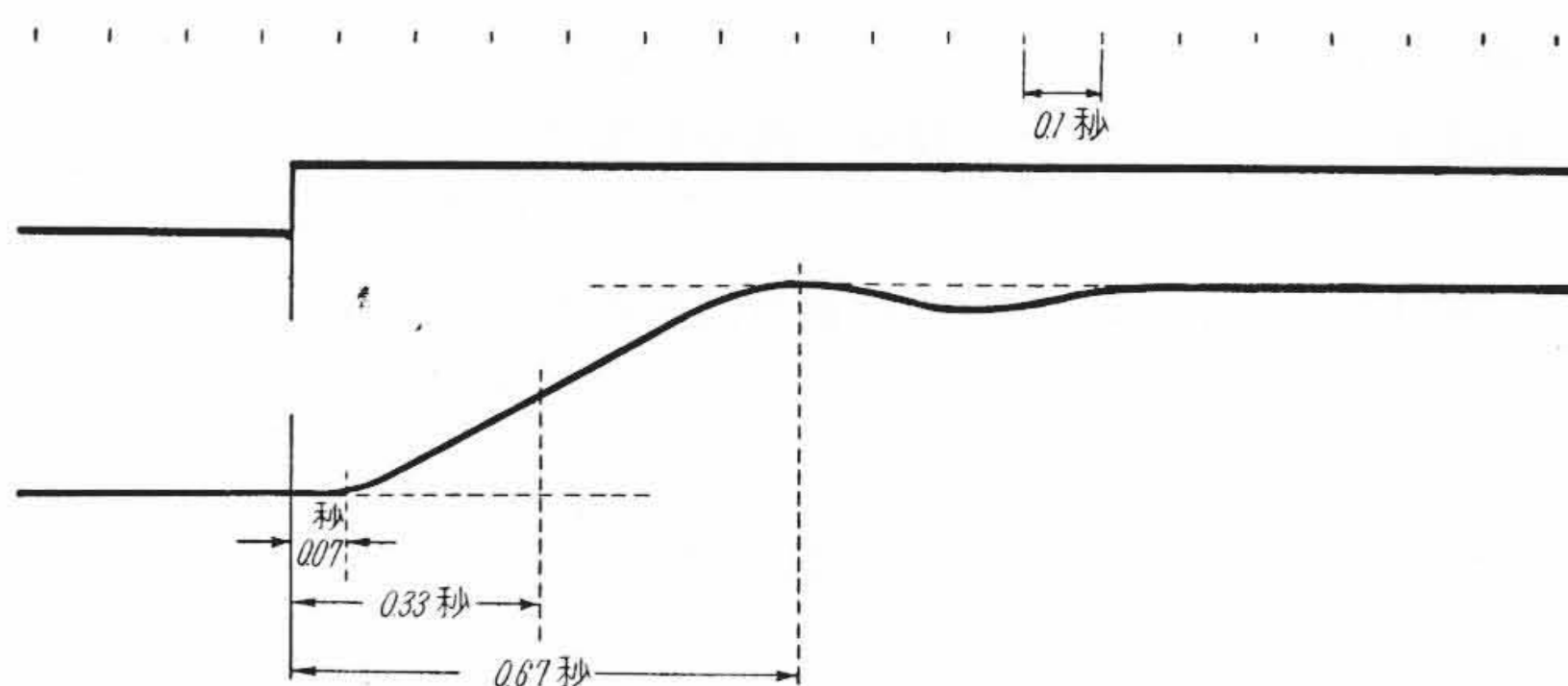
第13図 送量装置のインディシャルレスポンス(オシログラフ)



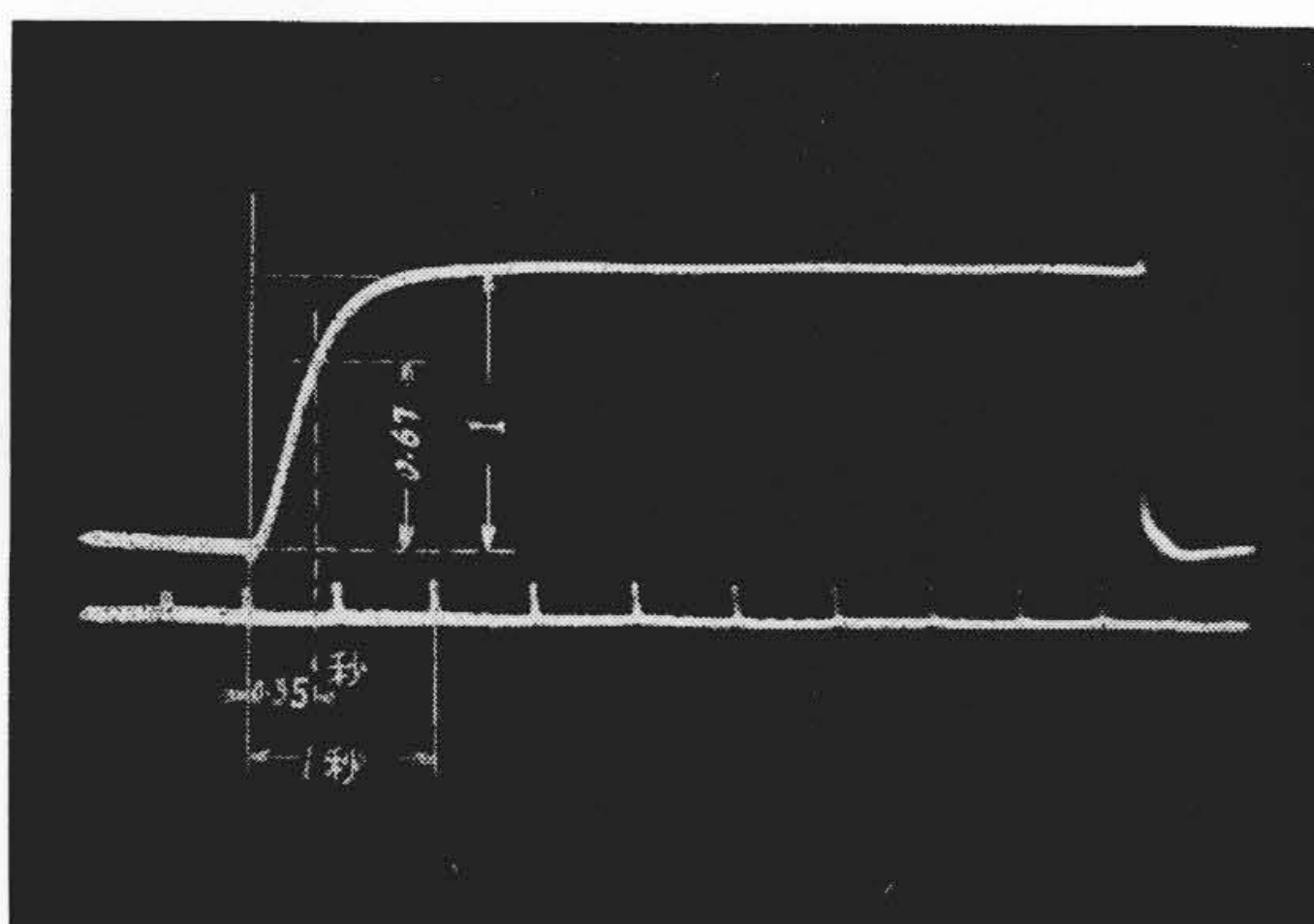
第15図 濾波器の減衰特性



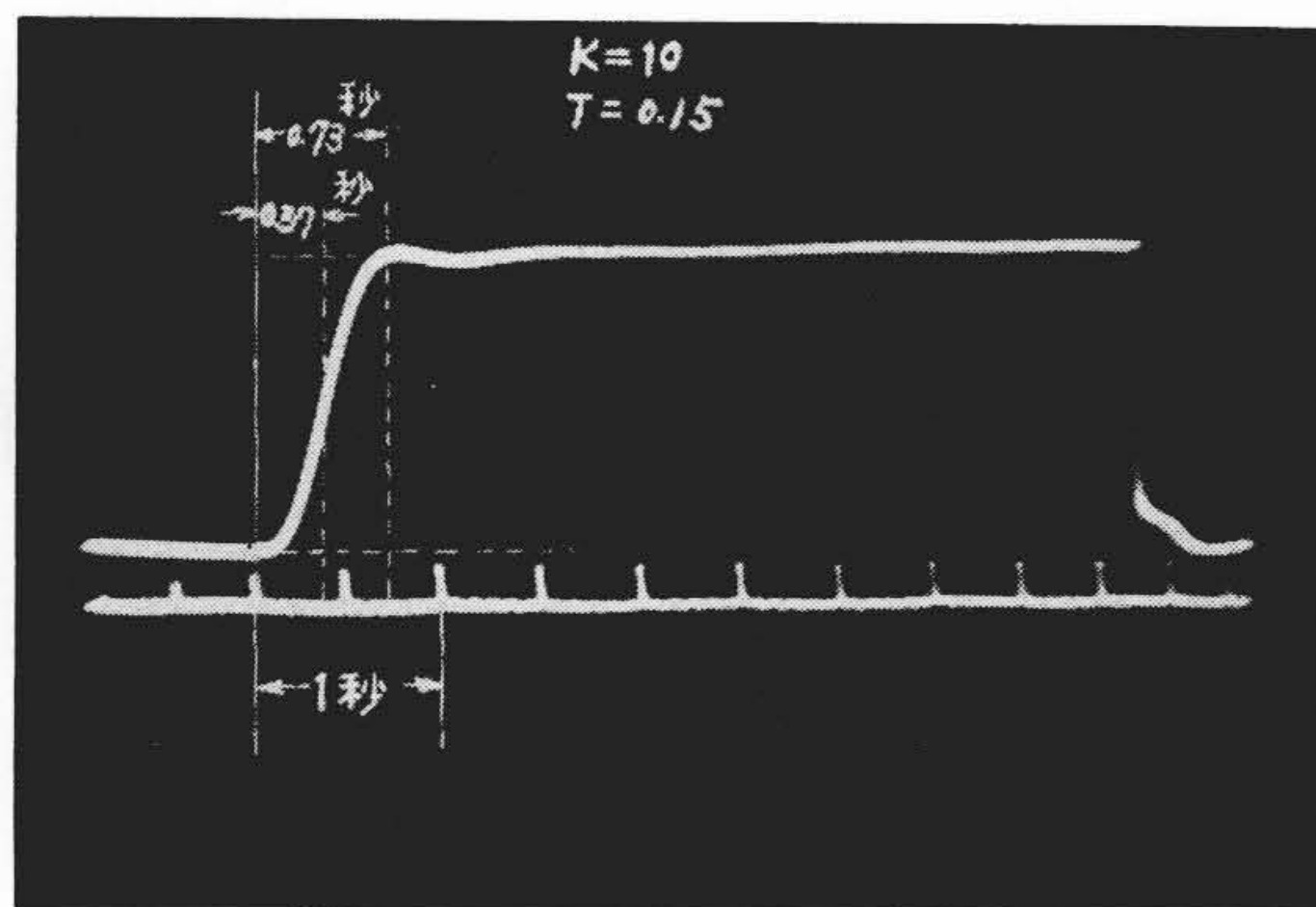
第 16 図 濾波器のレスポンス



第 19 図 受量装置のインディシャルレスポンス (オシログラフ)



第 17 図 濾波器のインディシャルレスポンス (アナコン解析結果)



第 18 図 受量装置のインディシャルレスポンス (アナコン解析結果)

式で求められる。

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_2 G(P) \varepsilon^{pt}}{P} dt \dots\dots\dots (20)$$

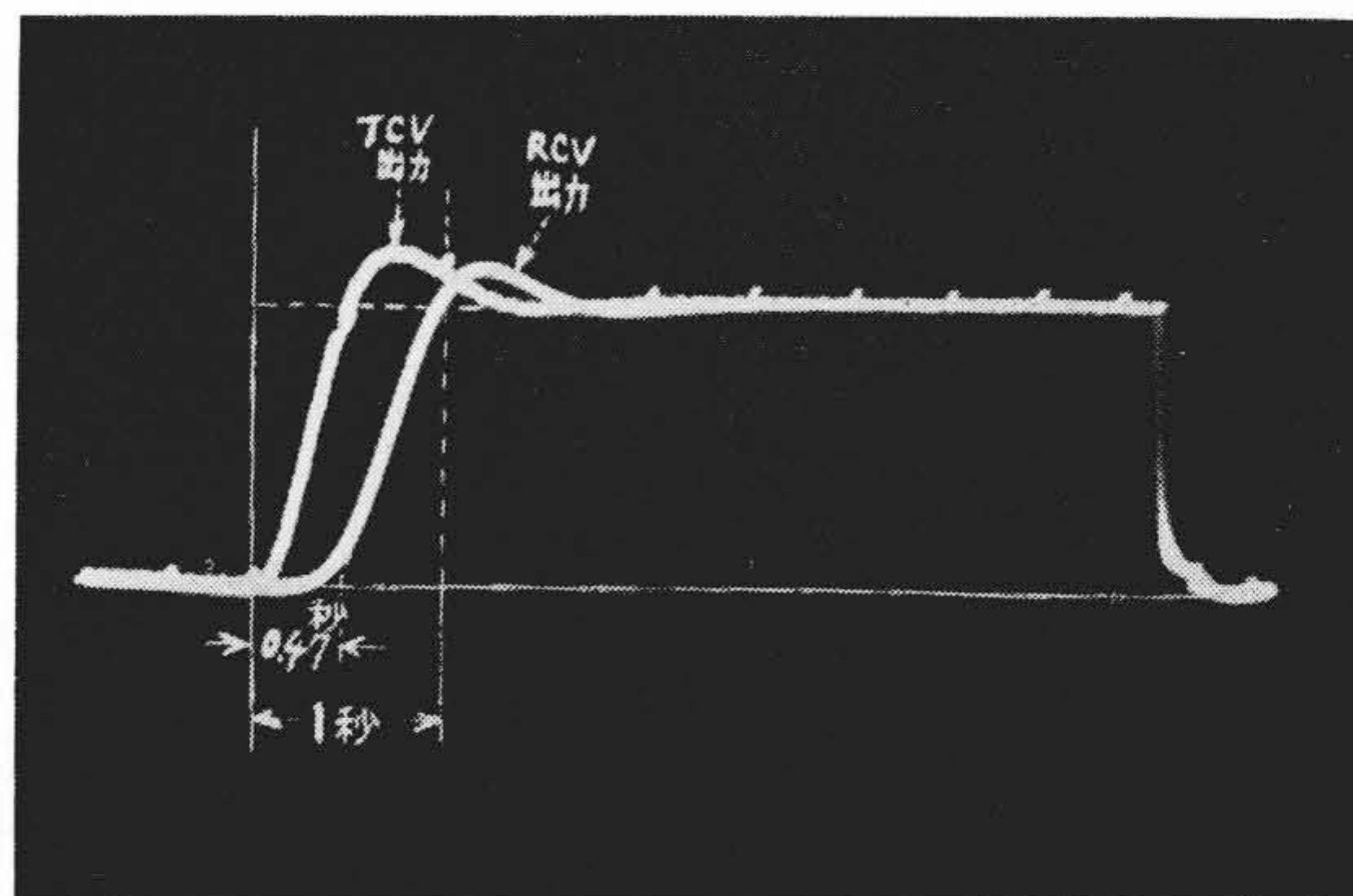
第 16 図は計算により求めたものであり、第 17 図はアナコンにより解析したものである。

第 18 図は閉ループ部をも含めた受量装置全体のインディシャルレスポンスのアナコン解析結果である。第 19 図は実際の装置のレスポンスをオシログラムにとったものであり、第 18 図とよく一致していることが認められる。

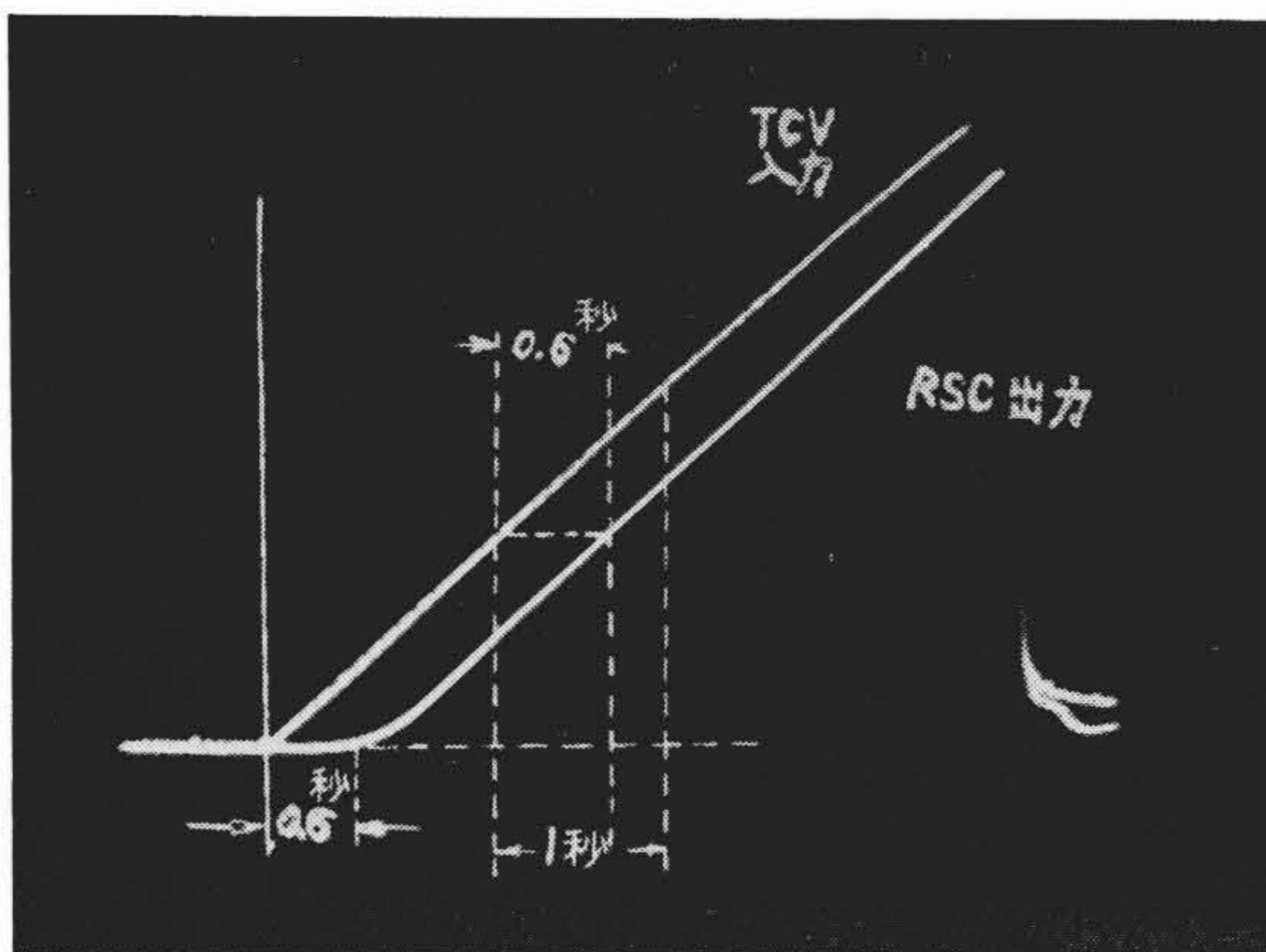
4.3 総合特性

4.1 および 4.2 において送量側および受量側装置のそれぞれ単独の特性について述べたが、これらが総合された場合の過渡特性は本装置の性能の重要な要素である。

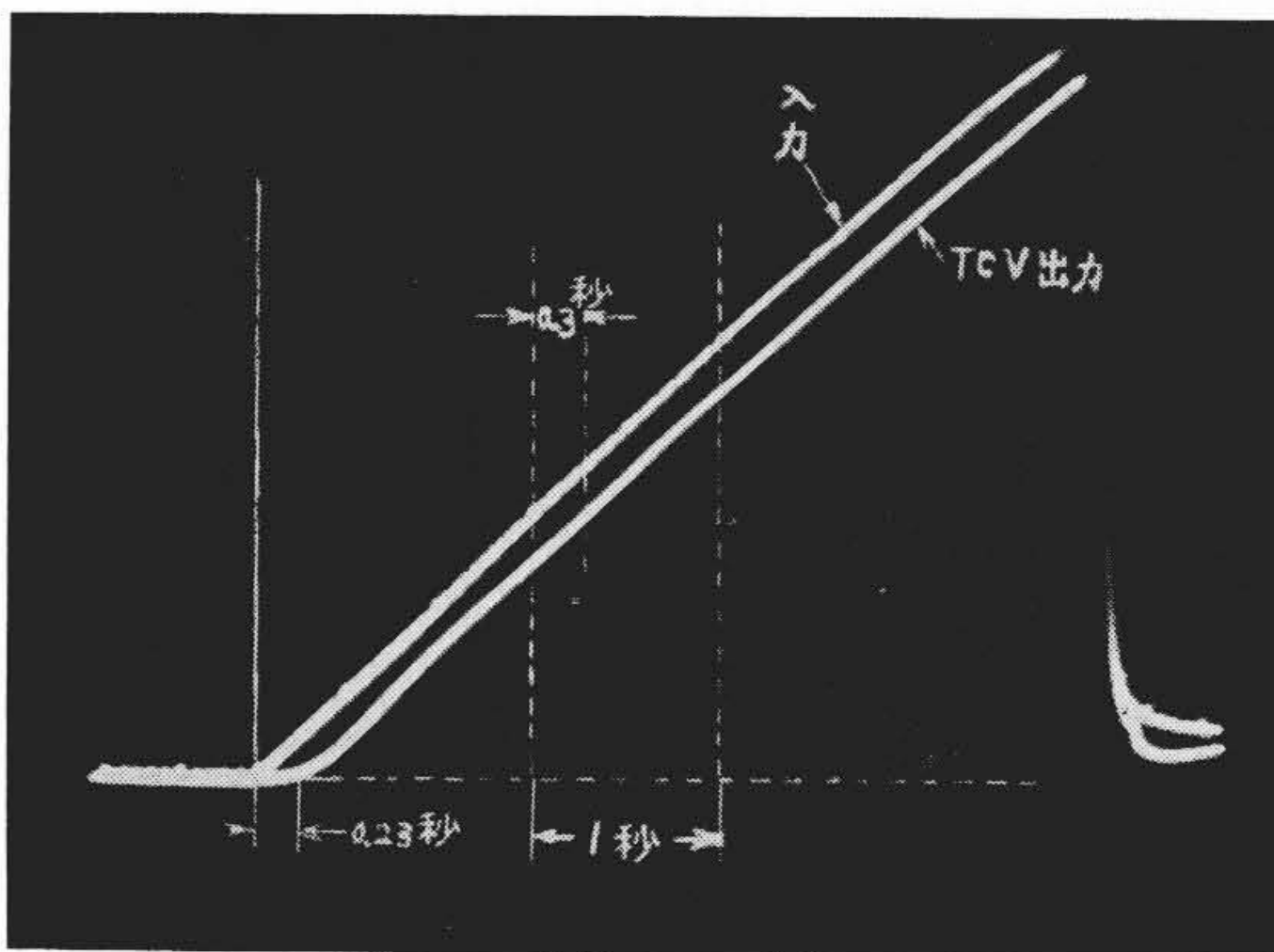
第 20 図は送量側装置に階段的入力を加えた場合の送量側装置



第 20 図 総合過渡特性 (アナコン解析結果)



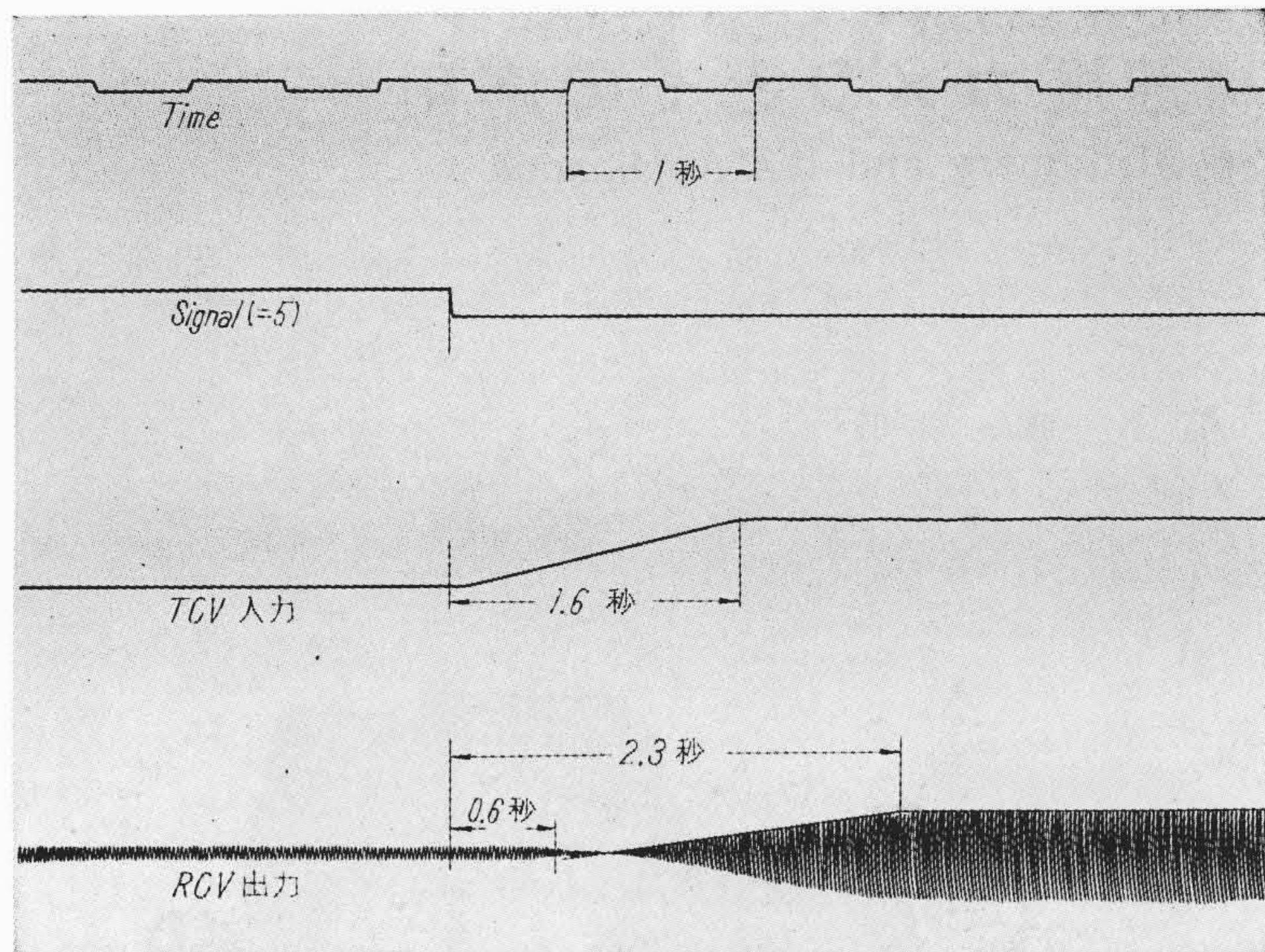
第 21 図 (a) 直線的入力の場合の過渡特性 (アナコン解析結果)



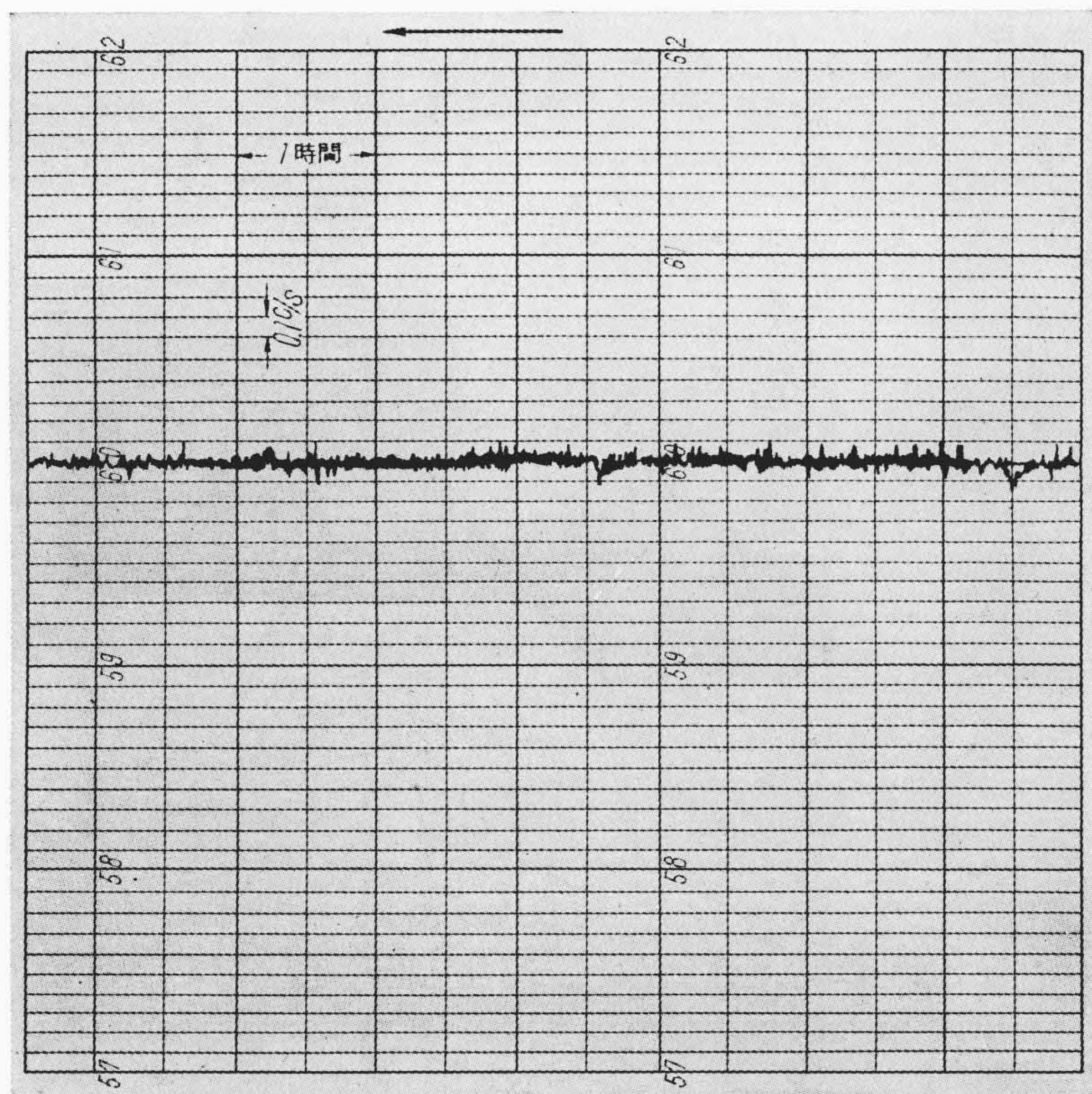
第 21 図 (b) 送量装置の応答

(TCV) の出力、受量側装置 (RCV) 出力のアナコン解析結果である。これにより死時間 0.5 秒、最大値に達する時間 1.2 秒であることがわかる。

また第 21 図 (a)(b) は送量側装置に直線的入力を加えた場合の送量装置 (TCV) 出力および受量装置 (RCV) 出力をアナコンで解



第22図 直線的入力の場合の総合過渡特性 (アナコン解析結果)



第23図 周波数制御結果

析したものであり、第22図は同じ条件においてオシログラフで実測したものである。この場合死時間0.6秒、追従おくれ0.7秒でアナコン結果とよく一致していることがわかる。

5. 現地試験

本装置は昭和33年4月中国電力神野瀬発電所、ついで滝山川発電所に納入され、以後好調に運転されている。

また長期の安定度を見るために約1箇月間中給からの信号の記録を発電所側で行ったが、ドリフトなく十分制御装置に使用することが確かめられた。

第23図は本装置を使用したAFCの制御結果を示すものであり、周波数偏差 $\pm 0.1\text{c/s}$ 以下にはいり操作量伝送装置として十分その目的を達しうるものであることが認められる。

6. 結 言

AFCにおける遠方制御方式としてまず2チャンネル方式を開発し、ついで本報告の1チャンネル方式を完成したが、それぞれの特長を生かして方式選択を行うことによりAFCの各種条件に対処することが可能となった。

本論文では特性の検討を主とし、自動制御理論によりその性能が理論と一致することを確認した。しかし理論式の誘導には実用的観点から相当近似を行っており、不備な点が多々あることと思われるが、有識者のご助言をいただければ幸いである。

最後に本装置の完成に際し種々ご指導ならびにご協力をいただいた関係者各位に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 静間, 磯崎, 小沢: 日立評論 40, 922 (昭33-8)
- (2) 宮崎外4名: 日立評論 41, 386 (昭34-3)
- (3) 井沢, 河井, 小沢: 日立評論 別冊 No. 26, 46 (昭33-10)
- (4) G. S. Brown and D. P. Campbell: Principles of Servomechanisms
- (5) 伊沢: 自動制御入門

Vol. 42 日 立 評 論 No. 9

目 次

◎アルミニウム精錬用 320V 112,500A シリコン整流器
 ◎脱気器性能に関する考察
 ◎東京電力株式会社北東京変電所納配電盤
 ◎最近の高圧気中電磁接触器
 ◎全低圧式空気分離装置と組合せた深冷室素洗滌装置
 ◎日立標準形自動車用充電発電機
 ◎無圧開放形ファンに関する研究

◎チ タ ニ ウ ム の 熔 接
 ◎客電車車体の軽量設計に関する考察(第3報)
 ◎大阪ガス株式会社納粗製都市ガス高圧圧送装置
 ◎接点保護用サージサプレッサ
 ◎ハイミックス電線(無機絶縁電線)の諸特性
 ◎鋳鋼の疲れ強さに及ぼす鋳肌の影響
 ◎真空アーク溶解せる Nimonic 80A の諸性質について

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京 71824 番
 取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座東京 20018 番