

高速ギヤレスエレベータ制御系の検討

Analysis of the Control System of High-Speed Gearless Elevators

黒 木 功* 早 瀬 俊 一 郎*
Isao Kuroki Shun'ichirô Hayase

内 容 梗 概

エレベータの速度制御は、ほかのレオナード制御とは異なる特質をもっており、その解析あるいは実際の制御においての技術的なむずかしさの原因となっている。そこで、今回、種々の変動因子を含めた総合的な制御系の解析検討が可能なエレベータ専用の制御用エレベータシミュレータ⁽¹⁾を製作し、これを応用して高速エレベータ制御系に関する二、三の検討を行なってみた。その結果、高速エレベータ用として独自の帰還制御セラコンスタック方式の開発が必要であり、この方式を発展させて今後の高速化も十分達成できる見通しを得た。

1. 緒 言

エレベータの速度制御は乗客の乗りごころから制限された制御条件下にある Time-Speed 曲線によって高い加減速度と速度の積分値である位置制御とを遂行しなければならないため、単なる定値制御やプログラム制御ではみられない技術的なむずかしさがある。このむずかしさは、超高層ビル用高速エレベータでは速度制御範囲が従来の2倍程度以上に大きくなるためさらに増してくる。この問題解決には、エレベータの制御系を根本的に分析し、問題点を抽出する必要がある。したがって、われわれはこの問題解決に対してエレベータ専用のシミュレータを使用して検討した。

本稿では、このエレベータシミュレータ解析結果を主体にしてエレベータ制御系の特質および問題点について述べ、さらに高速化に必要な制御性能についても簡単に言及した。

2. エレベータ制御系のシミュレーション

エレベータはシーケンス制御、かつ定位置制御であるため数式で論ずることは容易でなく、また種々の変動因子(外乱)が解析を複雑にしている。そこで、今回エレベータ制御系のすべての要素をアナログ演算要素でシミュレートしたエレベータシミュレータを製作し、エレベータの理論的解析が容易に行なえるようにした。

このエレベータシミュレータの外観図を第1図に示す。本エレベータシミュレータは一般のアナログ計算機の機能を持っているが、さらに次のような特長を備えている。すなわち、

- (1) 回転機の非線形特性のシミュレーション
- (2) エレベータのシーケンス制御、定位置制御のシミュレーション
- (3) 300 m/min までの高速エレベータのシミュレーション
- (4) 機械系のシミュレーション

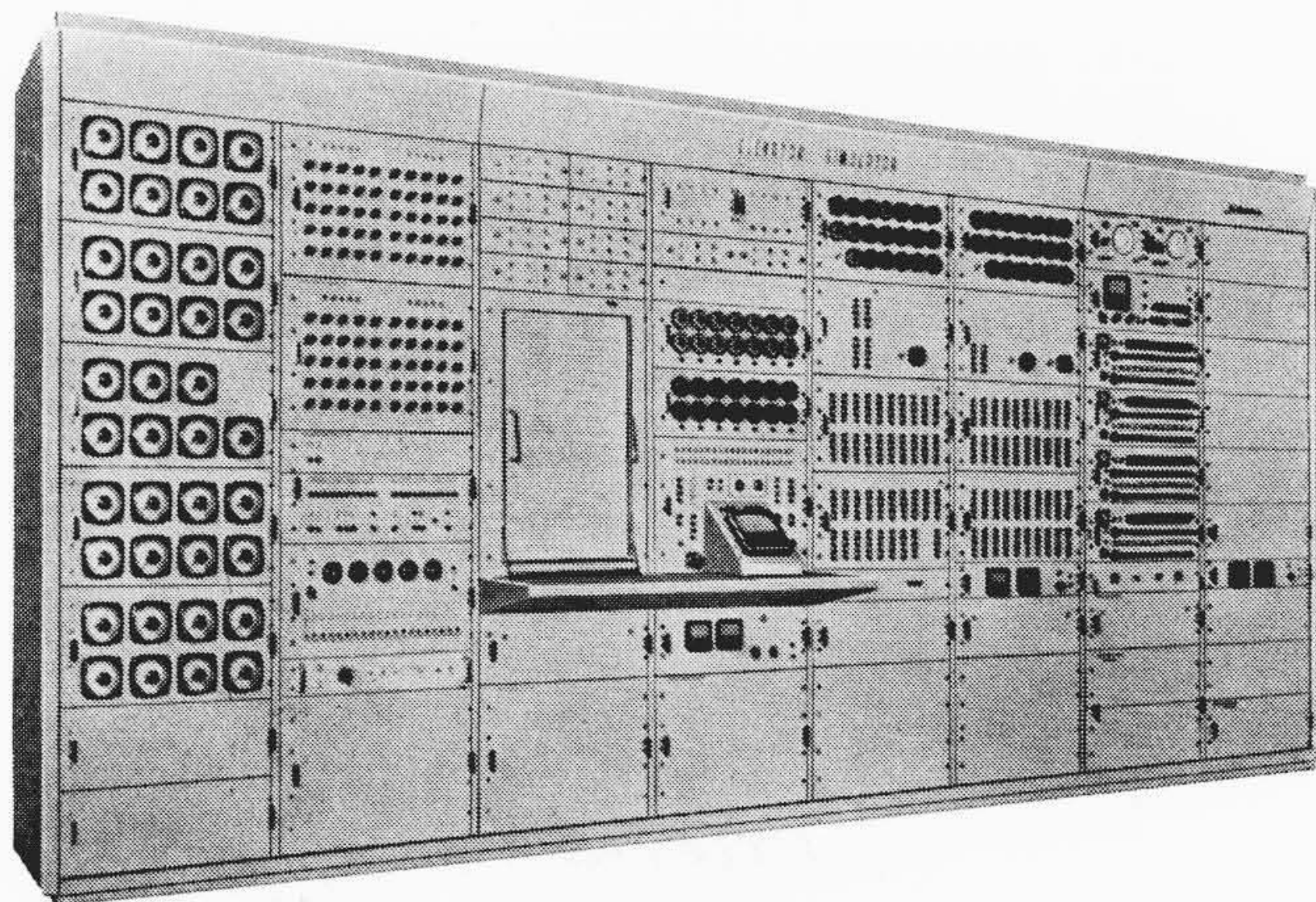
などの機能を持っている。

第2図に第3図の制御系をシミュレートしたエレベータシミュレータのブロック線図を示す。なお、図ではブラインドロップ、電機子反作用その他の非線形特性は省略している。

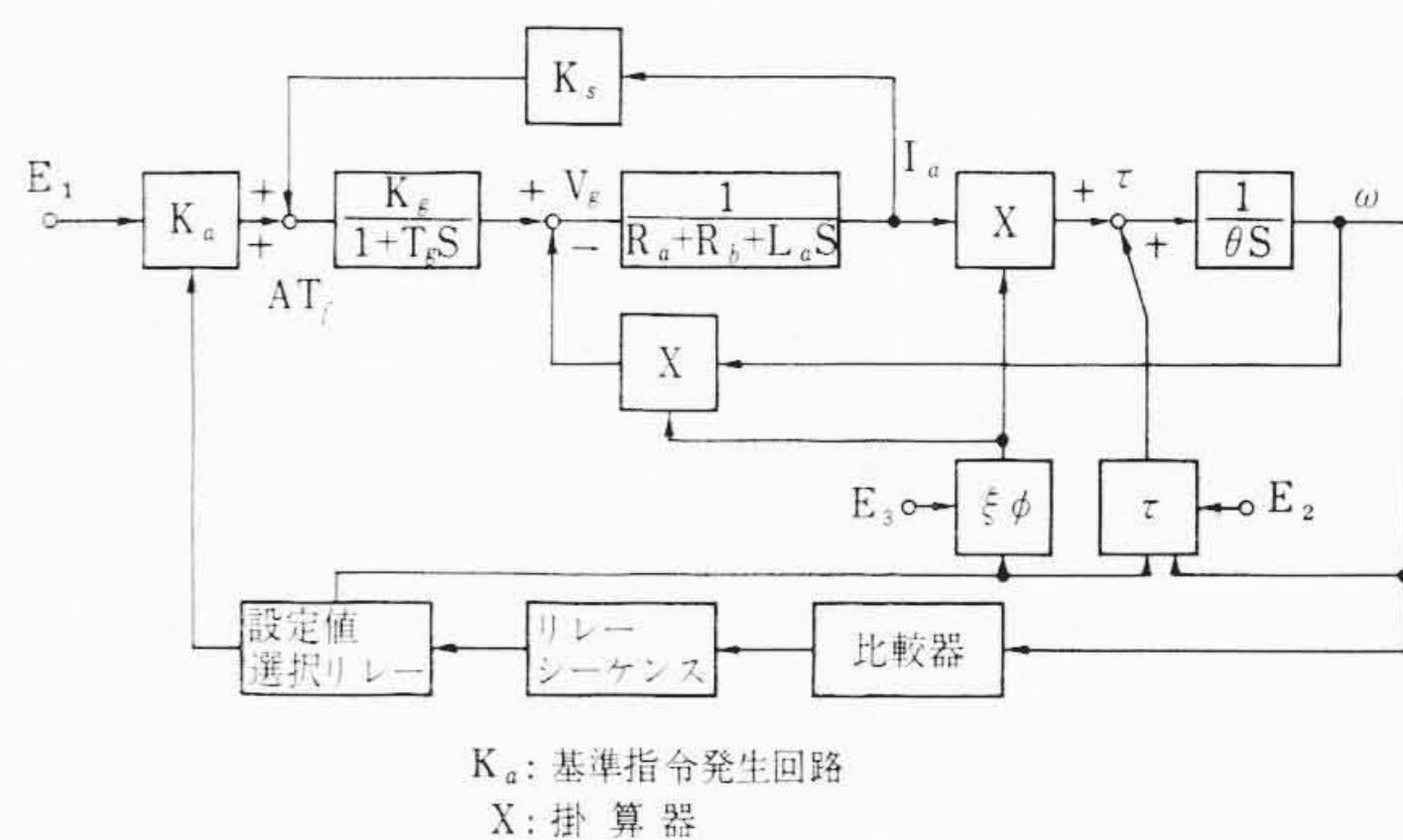
3. エレベータ制御系の特質および問題点

エレベータでは負荷トルクの運転サイクルごとの変化、減速時の定位置制御など、ほかのワードレオナード速度制御とは若干性格を異にした面を持っており、解析に当たってはエレベータの特質を十分に考慮する必要がある。したがって、まず最も単純と思われる開制御系(オープン制御系)について検討し、これをもとに高速エレベータに言及する。

* 日立製作所日立研究所



第1図 エレベータシミュレータ



第2図 シミュレータブロック線図

3.1 エレベータ制御系の特性および問題

ギヤレスエレベータの回路図とそのブロック線図を第3図に示す。なお、第3図は最も単純な開制御方式の概略図である。

図を基にしてエレベータの運動方程式をたてると次式のようにになる。ただし、計算を簡単にするために、電機子回路リアクタンス L_a は無視する。

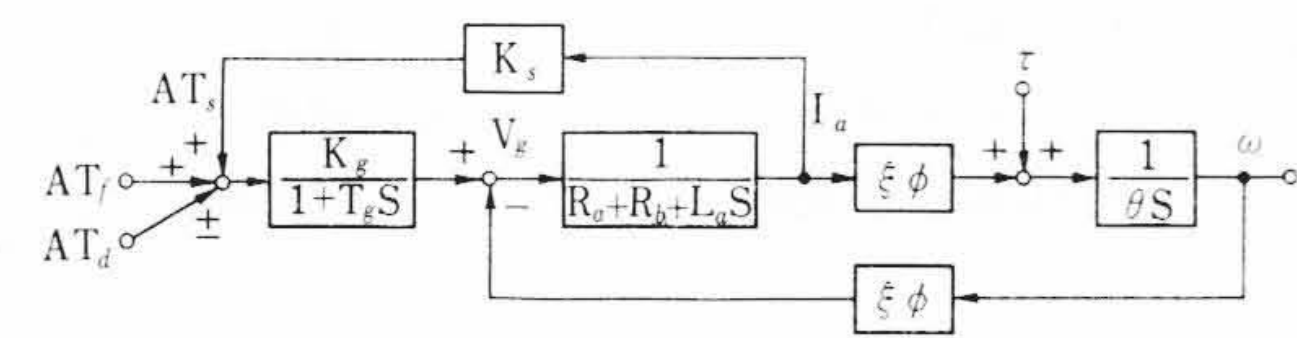
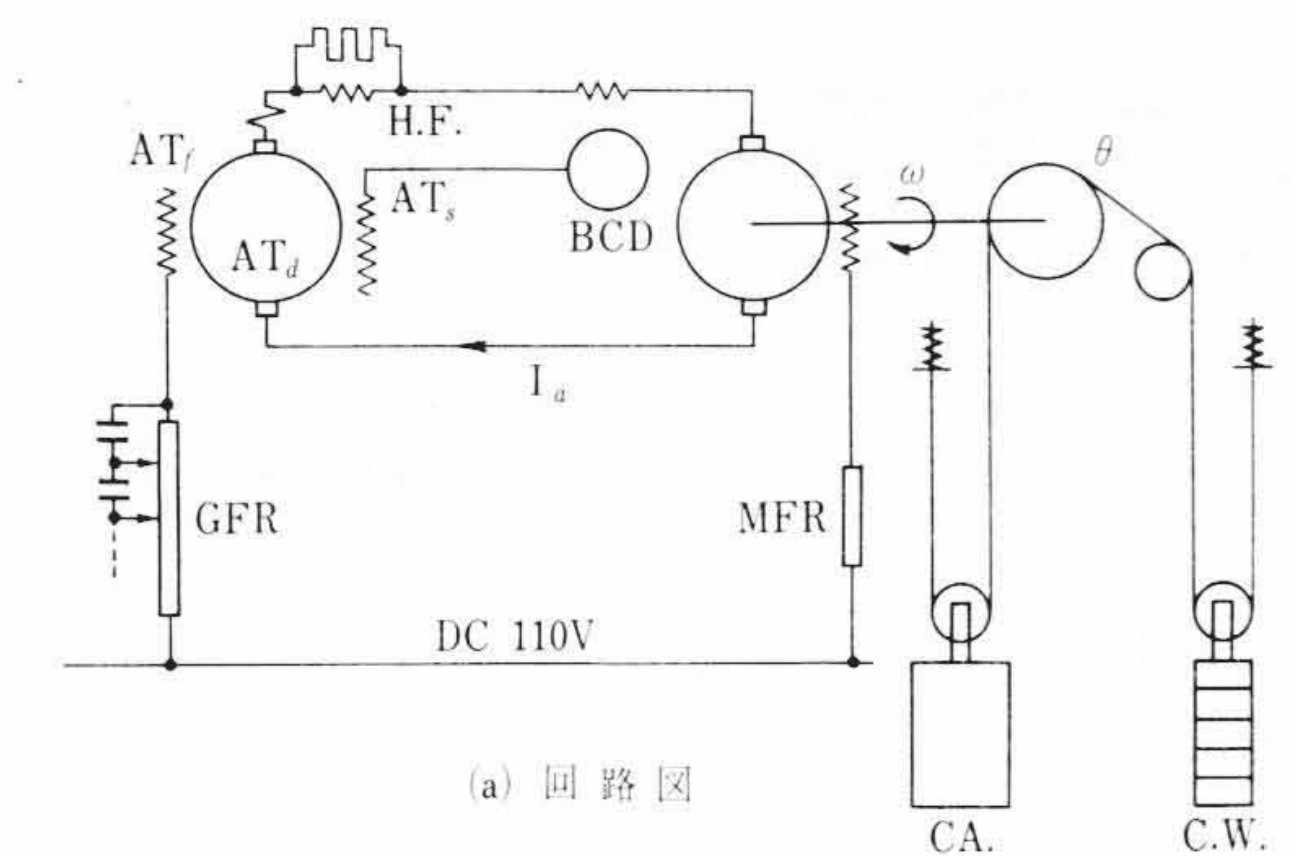
$$T_g \frac{dV_g}{dt} + V_g = K_g (AT_f + AT_a + AT_s) \quad (1)$$

$$\theta \frac{d\omega}{dt} = \xi \phi I_a + \tau \quad (2)$$

$$V_g - \xi \phi \omega = (R_a + R_b) I_a \quad (3)$$

$$K_g AT_s = (R_a + R_b) I_a \quad (4)$$

これらの式を各回路定数を線形とみなしてラプラス変換で整理すると次のようになる。



GFR: 発電機界磁抵抗 HF: 発電機直巻巻線 CA: エレベータケージ K_g: 発電機誘起電圧係数 R_a: 電機子抵抗 L_a: 電機子リアクタンス θ: 慣性モーメント I_a: 電機子電流 τ: 負荷トルク AT_f: 発電機基準指令界磁アンペアターン AT_s: 直巻巻線, BCD の補償アンペアターン AT_d: 発電機内部電圧変動量の等価アンペアターン MFR: 電動機界磁抵抗 BCD: ブラシドロップ補償発電機 C.W.: カウンターウエイト K_s: 直巻巻線, BCD 補償係数 R_b: ブラシ接触抵抗 ξφ: 電動機界磁束 V_g: 発電機誘起電圧 ω: 回転速度 T_g: 発電機界磁時定数

第3図 ギヤレスエレベータの概略図

$$I_a(s) = \frac{K_g \cdot T_\theta \cdot s}{R_a + R_b} [AT_f(s) + AT_d(s)] - \frac{\tau}{\xi \phi} \dots (5)$$

$$\omega(s) = \frac{K_g}{\xi \phi} [AT_f(s) + AT_d(s)] - \frac{\tau}{\xi \phi} \dots (6)$$

$$\text{ここに, } T_\theta = \frac{(R_a + R_b) \theta}{(\xi \phi)^2} \text{ (機械的時定数)} \dots (7)$$

(5)式の電機子電流の式は負荷トルクの変化によって、電機子電流が第4図のように変わること示している。また(6)式の速度の式は回路定数を線形とみなしているから厳密な解析はできないが、速度特性の概略を知るのに便利である。

(5), (6)式の誘導の際、回路定数を線形とみなしたが、実際の回路定数は次のような非線形特性をもっている。なお、 $f_1 \sim f_5$ の関数は非線形関数である。

- (1) R_b (ブラシ接触抵抗) $= f_1(I_a)$
- (2) AT_d (発電機内部電圧変動) $= f_2(I_a, V_g)$
- (3) $\xi \phi$ (電動機界磁束) $= f_3(I_a)$
- (4) K_g (発電機誘起電圧係数) $= f_4(V_g)$
- (5) τ (トルク) $= f_5(\omega, F)$

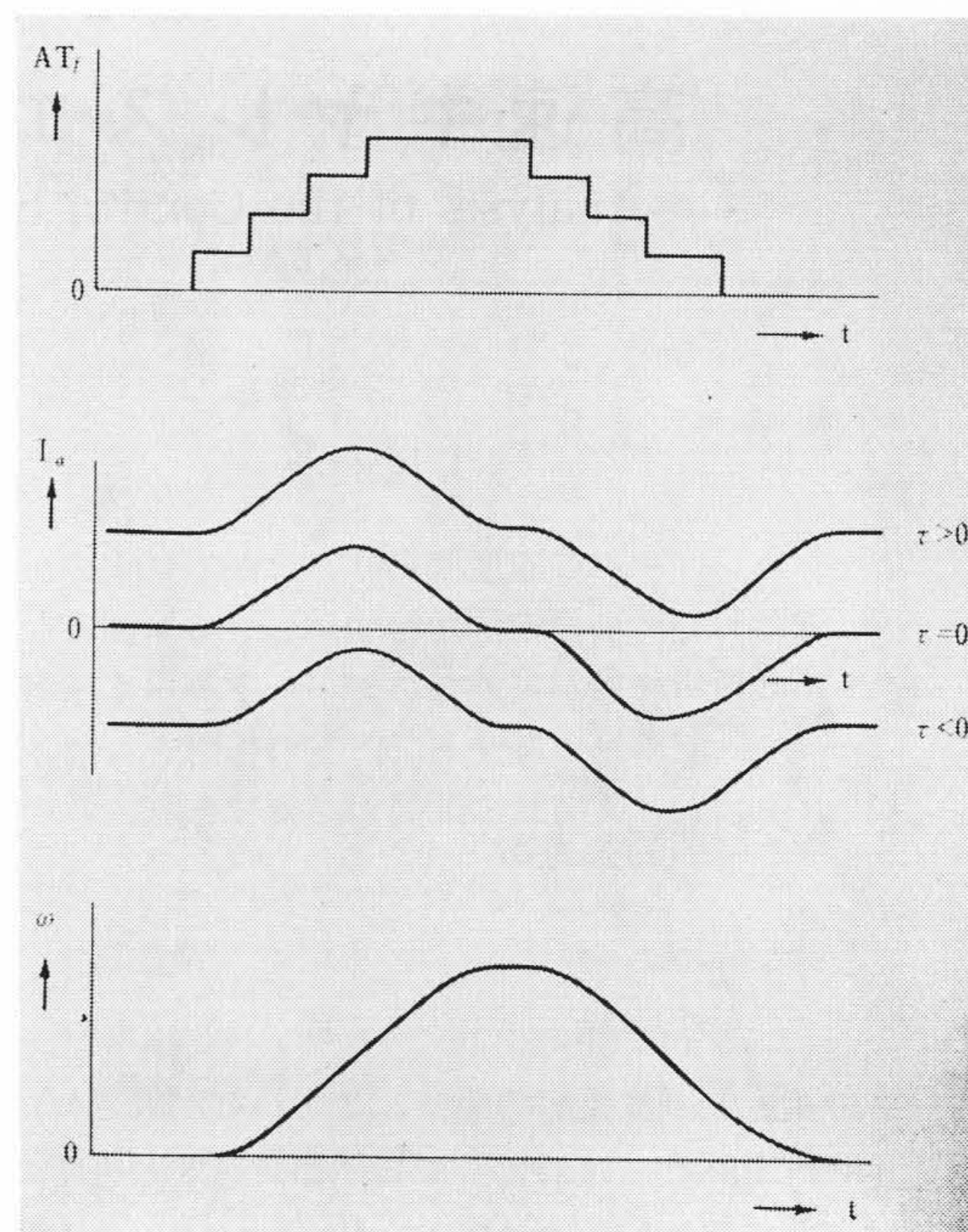
ここに、 F : 機械系の摩擦

これらの非線形特性を考慮すると、 I_a, ω は(5), (6)式のような簡単な式には解けないから数式解析はできなくなる。ところで、エレベータシミュレータでは、これらの非線形特性を含めて実際に則した制御系のシミュレーションができ、理論的解析も容易となった。

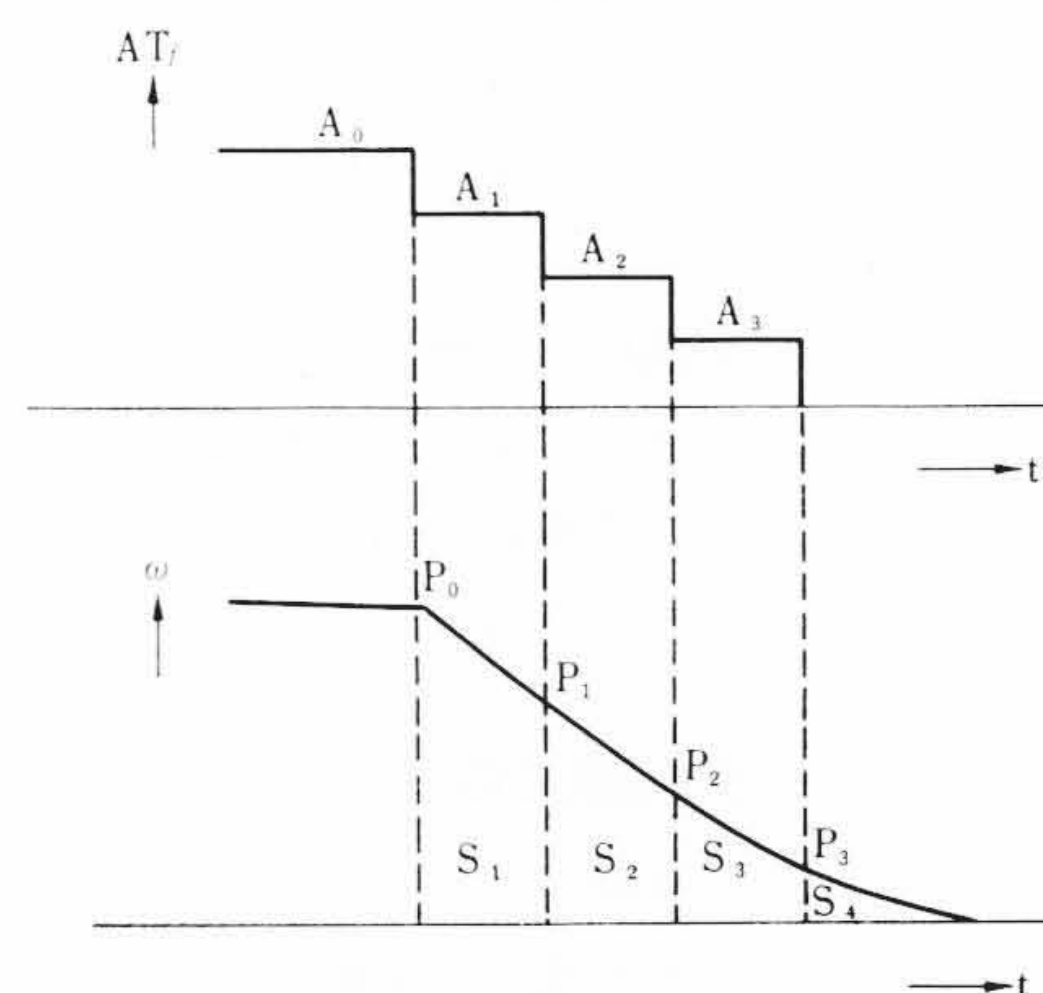
以下には、シミュレータ解析および実験解析から得られた速度特性を外乱の関係について(5), (6)式を参照して簡単に述べる。

(1) ブラシドロップ

負荷トルクの変化で電機子電流の動作点が第4図のように変わることは前述したが、そのためブラシ接触抵抗 R_b も負荷トルクの変化とともに大幅に変わる。したがって(6)式にブラシ接触抵抗の項は直接みられないが、機械的時定数 T_θ にこの項が含まれ



第4図 負荷トルクと電機子電流の関係



第5図 定位置制御の説明図

ており、 R_b の変化とともに制御系の過渡応答も変動する。

(2) 発電機内部電圧変動

(5), (6)式において AT_d で示しているもので、発電機のブラシ短絡電流⁽²⁾、電機子反作用などによって生じ、複雑な変動要因である。

(3) 電動機の内部磁束変動

この変動のおもなるものは電機子反作用である。この変動はその性質上、高速度での速度特性の変動原因となる。

(4) 発電機のヒステリシス特性および残留電圧

(5), (6)式では本項は省略しているが、低速特性、特に着床速度に影響する。

(5) 温度変化などによる定数の変動

基準指令 AT_f 、電動機の界磁束 $\xi \phi$ などが温度上昇あるいは電源電圧の変動などで変化し、速度特性を全体的に変動させる。

以上のように外乱は制御系の過渡的、定常的な速度特性に変動をもたらす、着床誤差あるいはばらつきの原因となる。

3.2 定位置制御

現在の直流エレベータの定位置制御は、減速時に数個の位置検出継電器により、非連続な定位置制御を行なうもので、第5図のようにエレベータケージが目標階の手前の所定位置 P_0 に達すると、第1の位置検出継電器が動作して基準指令が A_0 から A_1 に切り替わり、エレベータは減速を開始する。さらにエレベータケージが進んで、 P_0

の点より距離 S_1 の位置 P_1 に達すると第2の位置検出継電器が動作し、基準指令は A_2 に切り替わり減速を続ける。このように逐次エ

レベータは減速し所定位置に着床停止する。

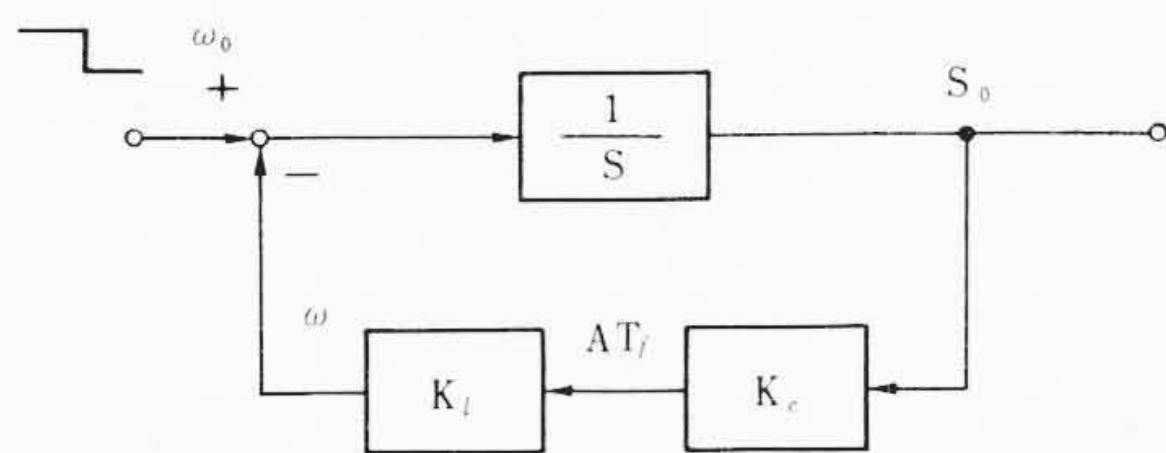
この定位置制御は位置検出継電器が有限個であるから非連続定位置制御であるが、以下の解析では解析を簡単にするために連続定位置制御について検討する。

3.2.1 定位置制御のブロック線図

従来、エレベータの定位置制御については、あまり論じられていないが、定位置制御を制御系の一部として考えてみると、きわめて興味ある特性をもっており、これをうまく利用すれば、エレベータの着床性能、乗りごころの向上の一手段になるものと考えられる。

定位置制御を含めて、制御系のブロック線図を描くと第6図となる。このブロック線図では速度指令 ω_0 (ステップファンクション) に対する位置偏差 S_0 の追従性が直接みられるから定位置制御の評価がしやすい。すなわち、 ω_0 から零への階段状の減速指令に対する位置偏差 S_0 の零への収れん速度、収れん誤差が実際のエレベータの着床時間、着床誤差に相当する。

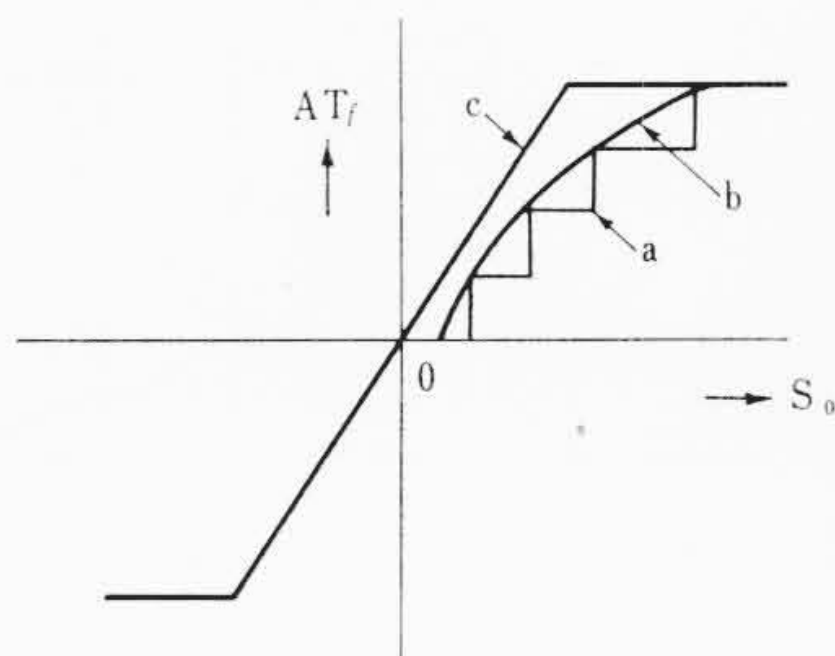
第6図のブロック線図を用いてエレベータシミュレータで求めた定位置制御の特性の一例を第7図に示す。ただし、位置—基準指令変換要素 K_c は直線とし、エレベータが行き過ぎた場合にも定位置制御の効果が生ずるように第6図(b)の曲線cの特性を用いている。また、エレベータの回転機部分の制御系 K_l は簡単のため1次系とした。第7図に示すように、 K_c のゲインが変わると定位置制御の効果が変わり、位置偏差 S_0 の零への収れん速度、収れん状態が変わっている。なお、この場合位置偏差 S_0 の収れん値 S_{00} は定位置制御の効果で必ず零になる。



K_c : 位置—基準指令変換要素

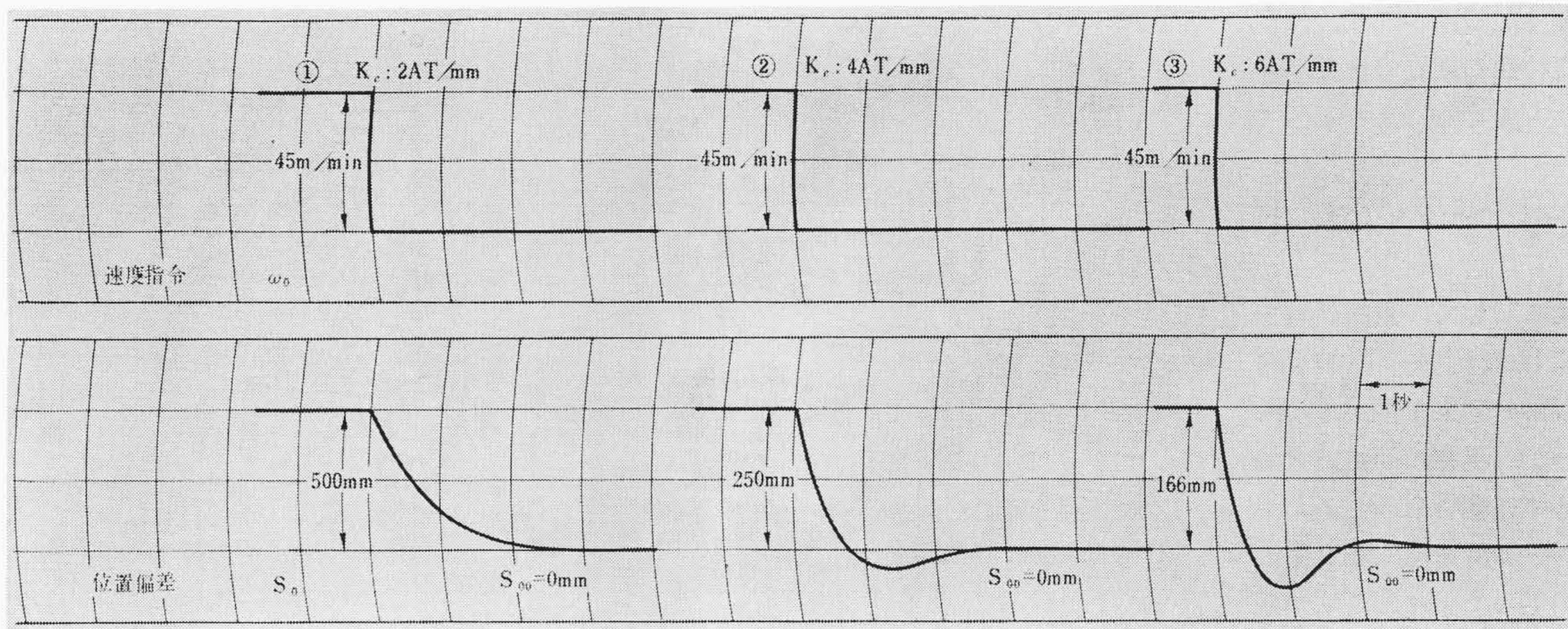
$$K_l: \frac{K_g / \xi \phi}{T_g T_s S^2 + T_g S + 1} \approx \frac{K_g / \xi \phi}{T_l S + 1}$$

(a) ブロック線図



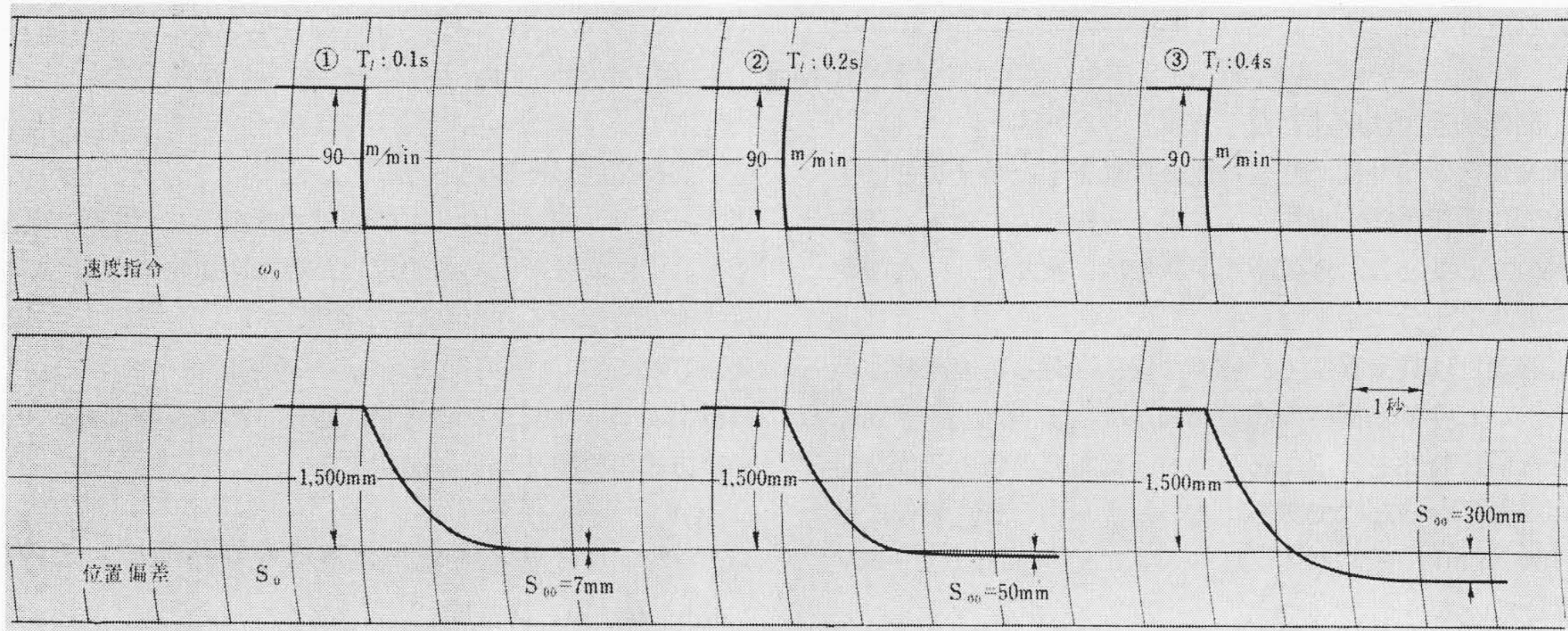
(b) K_c の特性

第6図 定位置制御のブロック線図



(T_l : 0.3 s の場合)

第7図 K_c のゲインと位置偏差の関係



(K_c は第6図の曲線 b の場合)

第8図 応答速度と位置偏差の関係

本件に関しては K_c , K_i をパラメータに検討していくと興味ある結果が得られるが本稿では省略する。

3.2.2 定位置制御と応答速度の関係

第8図は K_i の応答速度 T_i と位置偏差 S_0 の収れん誤差 S_{00} の関係を求めたものである。ここでは位置—基準指令変換要素 K_c に第6図(b)の曲線 b の定減速度曲線を用いている。したがって図でも明らかのようにエレベータが行き過ぎると基準指令が零になってしまっ、エレベータは反転せずそのまま収れん誤差となる。

第8図から系の応答が遅くなると基準指令 AT_i に対する追従性が悪くなって、定位置制御の効果が十分に生かされず、収れん誤差 S_{00} が生ずることがわかる。すなわち、このことは応答の速い制御系であれば外乱で速度特性が変動しても定位置制御の効果によって着床特性への影響は少ないが、系の応答が遅くなるにつれて、外乱による速度特性の変動の影響が着床特性に及んでくることを示している。

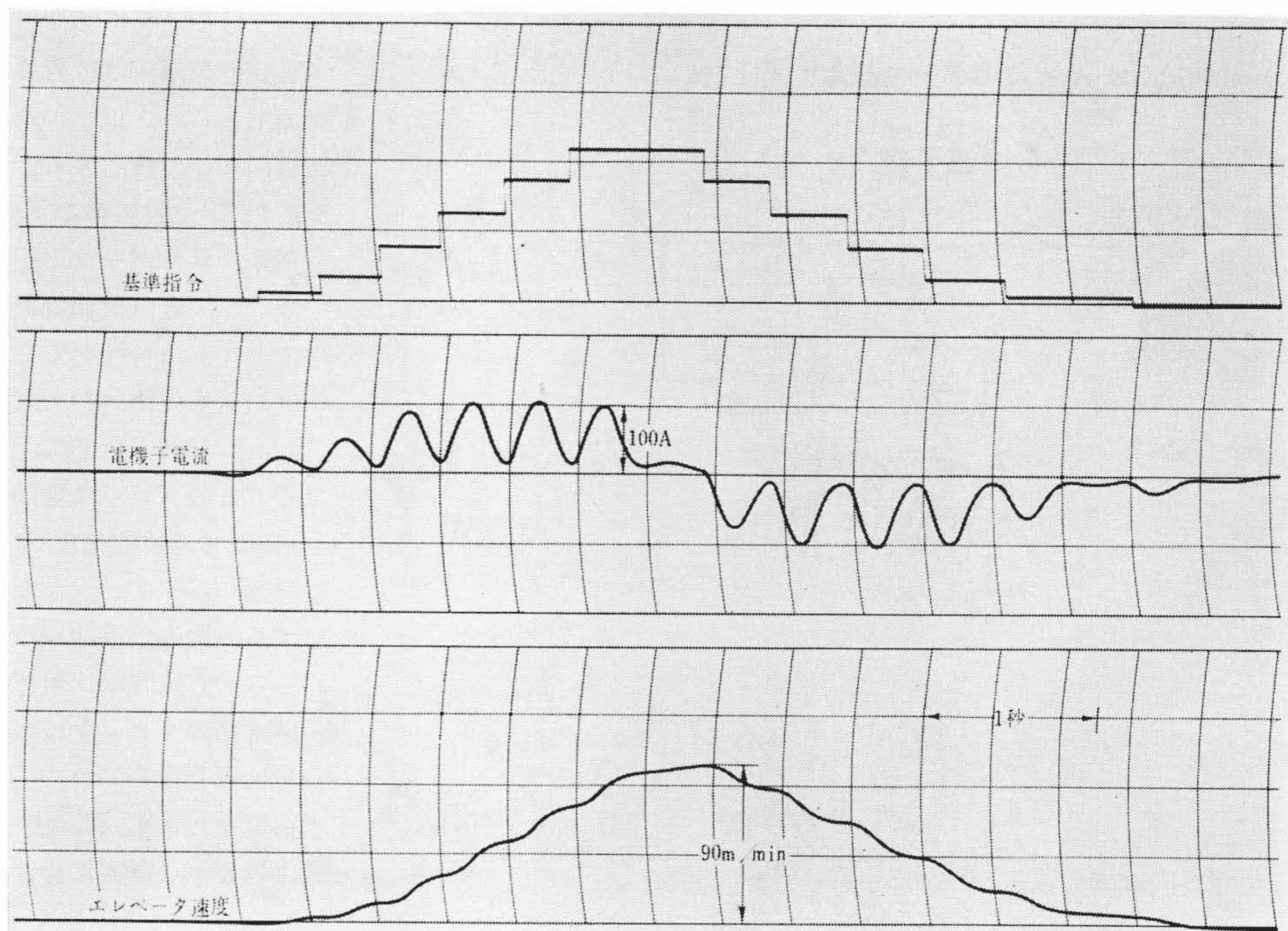
3.3 高速エレベータの必要な特性

種々の外乱に対して、着床誤差を少なくするには制御系の応答を速め、定位置制御の効果を生かすのも一方法であるが、現在の回路方式では階段状の基準速度指令のために、応答を速めると加減速時に第9図のような脈動が生じて乗りごちが悪くなる。したがって、現状の回路方式では制御系の応答を適当に遅くするか、ないしは基準指令を遅くして第10図程度の速度特性にする必要がある。

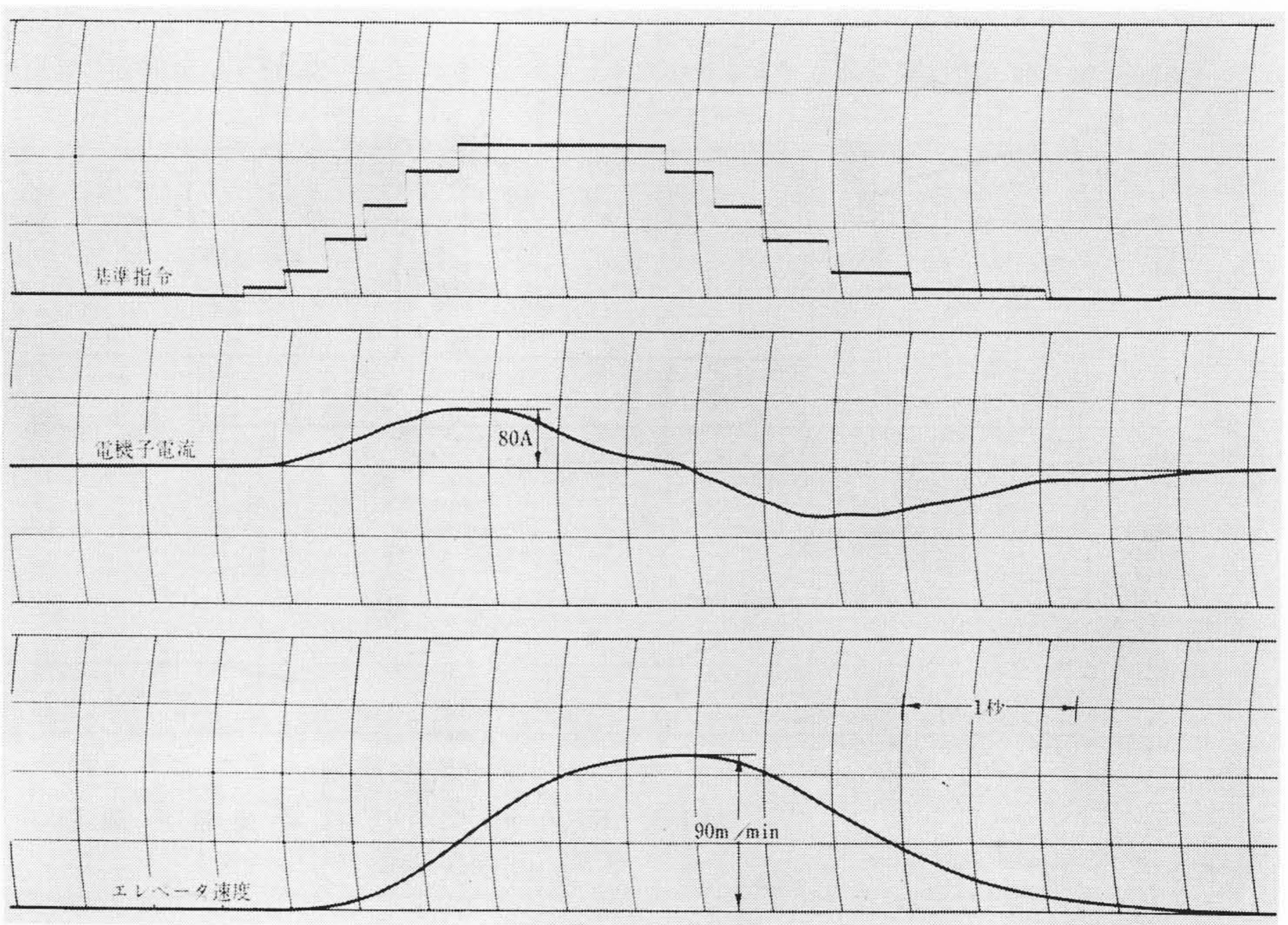
ところで、開制御系では前述したように、負荷変化などの外乱が速度特性の変動をもたらすことは避けたい。そこで着床誤差を少なくするのに着床前にのろのろ運転(クリープ運転)を必要とし、運転時間が必然的に長くなり、高能率エレベータの要求に十分に沿えない。

そこで、応答速度は従来程度で、種々の外乱に対して速度特性の変動の少ない、いわゆる制御性の高い制御系にして、クリープ運転を要せず良好な着床特性をうることができ、高能率運転の可能な帰還制御方式が必要になるわけである。この観点から、日立製作所では、すでに 150 m/min ギヤレスエレベータに帰還制御方式(FV方式)を適用している。

ところで、超高層ビル用高速エレベータになると制御条件はさらにきびしくなる。すなわち、高速エレベータになればなるほど、速



第9図 応答が速い場合の速度特性



第10図 応答が遅い場合の速度特性

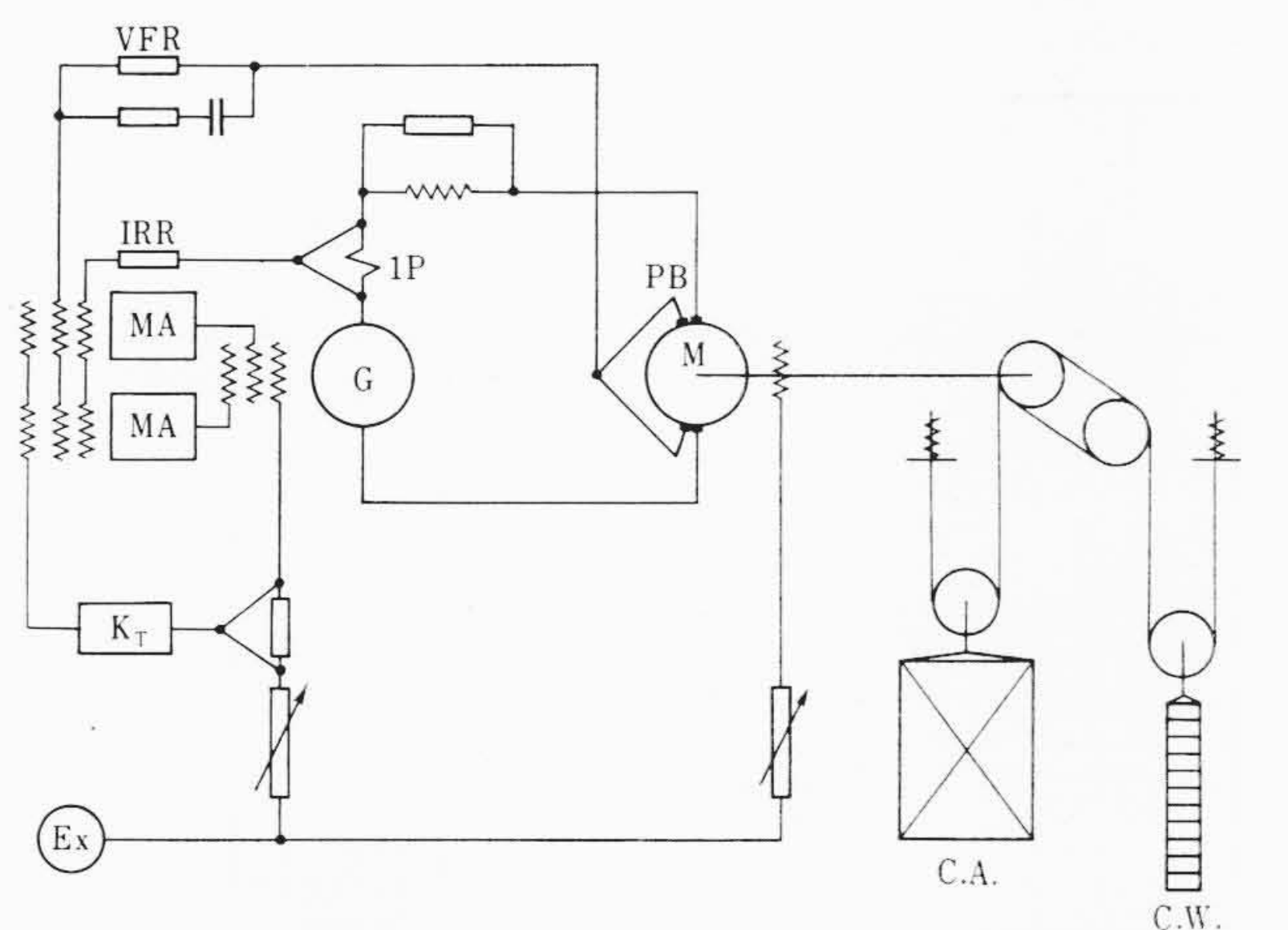
度の制御範囲が広範囲となり、したがってブラシドロップ、残留電圧、ヒステリシス特性および機械的摩擦などの影響が相対的に大きくなって、着床のための安定した微速度運転特性あるいは均一な過渡的速度特性をうるためには従来のFV方式以上の高い制御性が要求される。

以上のような観点から新たに開発した帰還制御方式セラコンスタック方式の概要を以下に説明する。

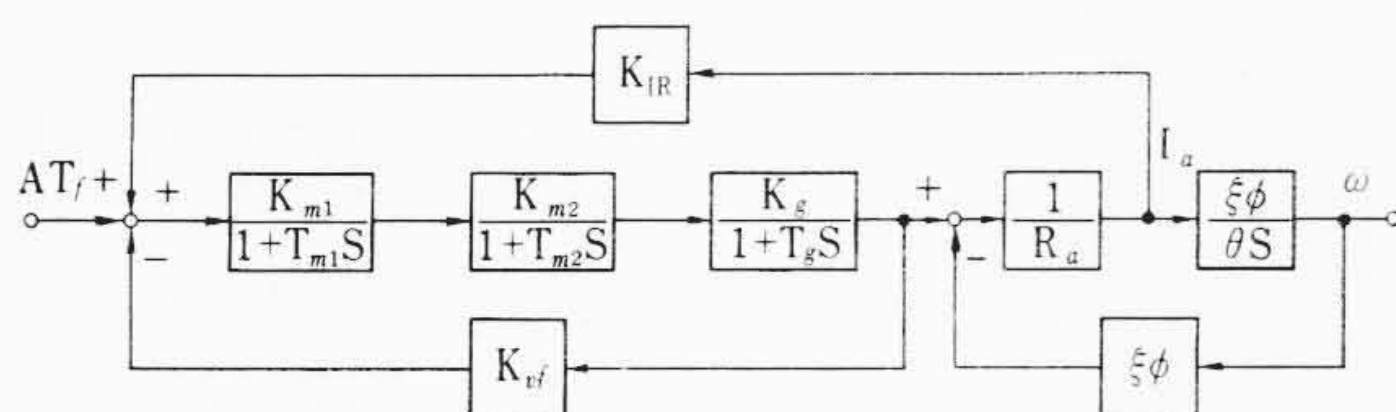
4. セラコンスタック方式の回路構成とその特色

4.1 回路構成

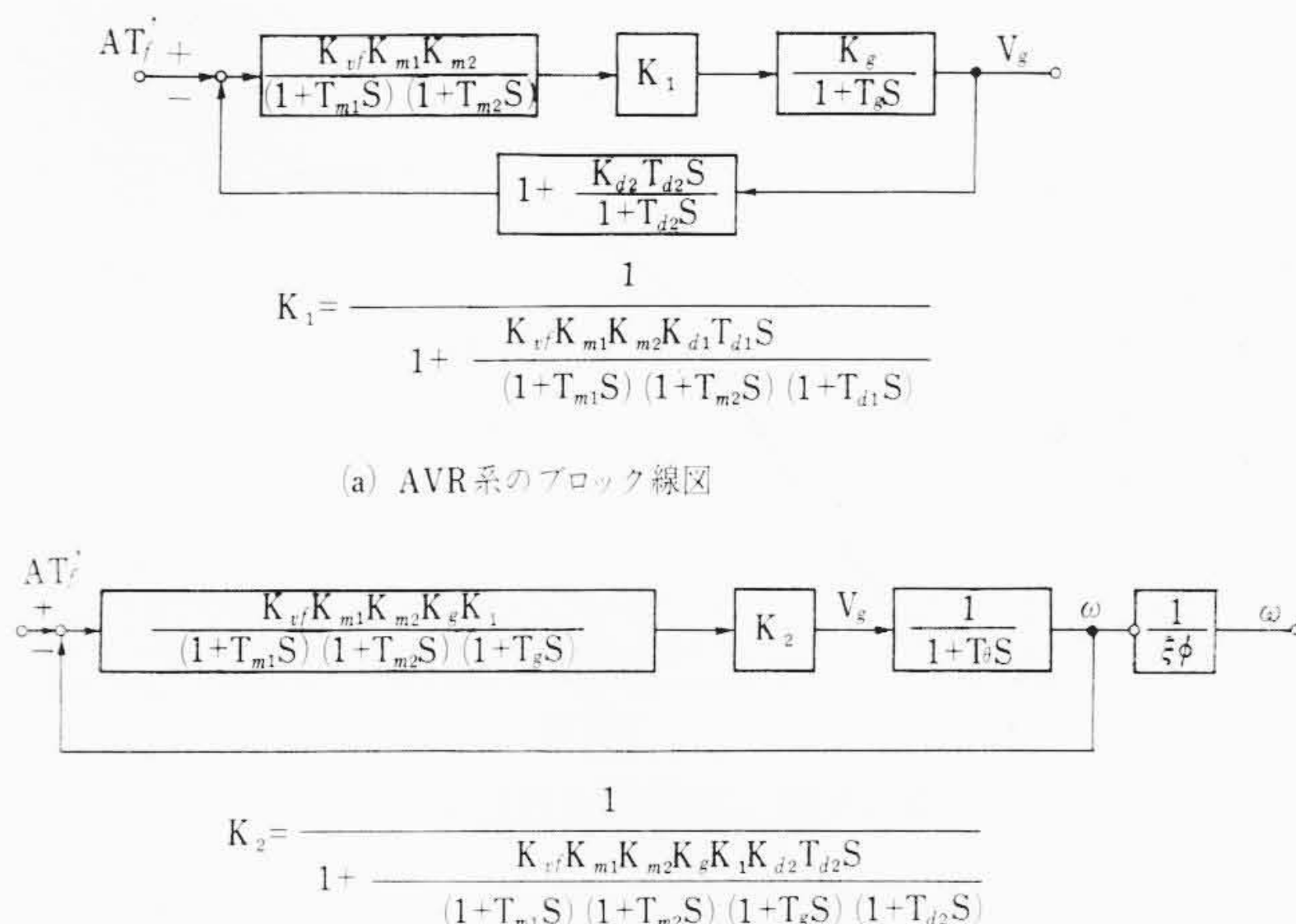
帰還制御セラコンスタック方式は、一般に逆起電力形あるいはAVR-IR方式といわれる速度制御方式で、その回路構成は第11図



G : 発電機 IP : 発電機補極 VFR : 電圧フィードバック抵抗
M : 電動機 PB : パイロットブラシ IRR : 電機子電流フィードバック抵抗
Ex : 励磁機 MA : 磁気増幅器 K_T : 基準指令遅延要素



第13図 第12図のブロック線図を簡略化した結果



られている。

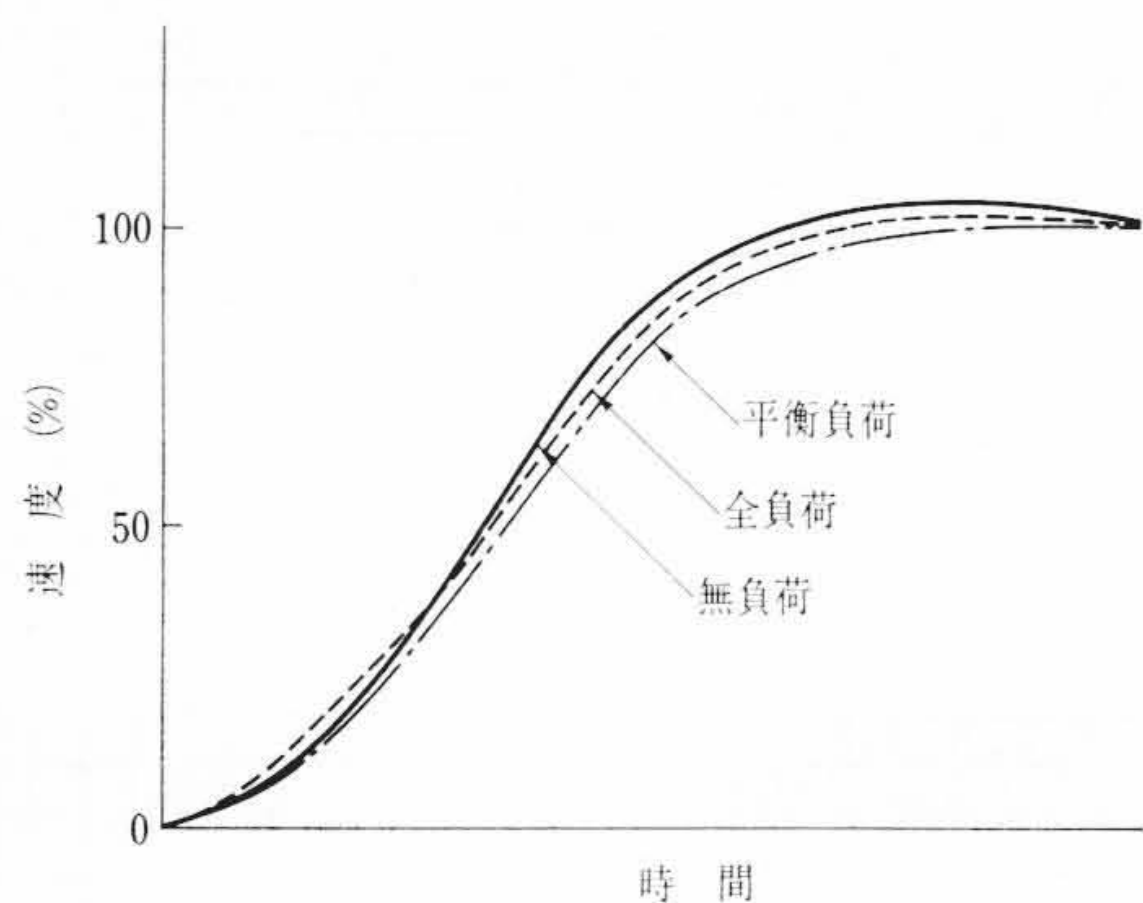
4.2 安定度の検討

セラコンスタック方式では高い制御性のため従来のFVエレベータの制御系以上に系の安定度については考慮を要する。そこで、本方式を適用するに当たってはエレベータシミュレータなどを用いて検討を加え最適条件を求めたが、以下には、ゲイン曲線によって本方式の安定度を示す。

$$\log K_1 \doteq \begin{cases} 0 & (|K_p| < 1) \\ -\log |K_p| & (|K_p| > 1) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\log K_2 \doteq \begin{cases} 0 & (|K_q| < 1) \\ -\log |K_q| & (|K_q| > 1) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

なお、ゲイン曲線による安定度の判別はゲイン曲線を描く際にいくつかの仮定を設けており、厳密なものでないが、安定条件を簡単に知ることができ、シミュレータ解析のための予備的な解析の役割を果たしてくれる。



第15図 速度と過渡応答

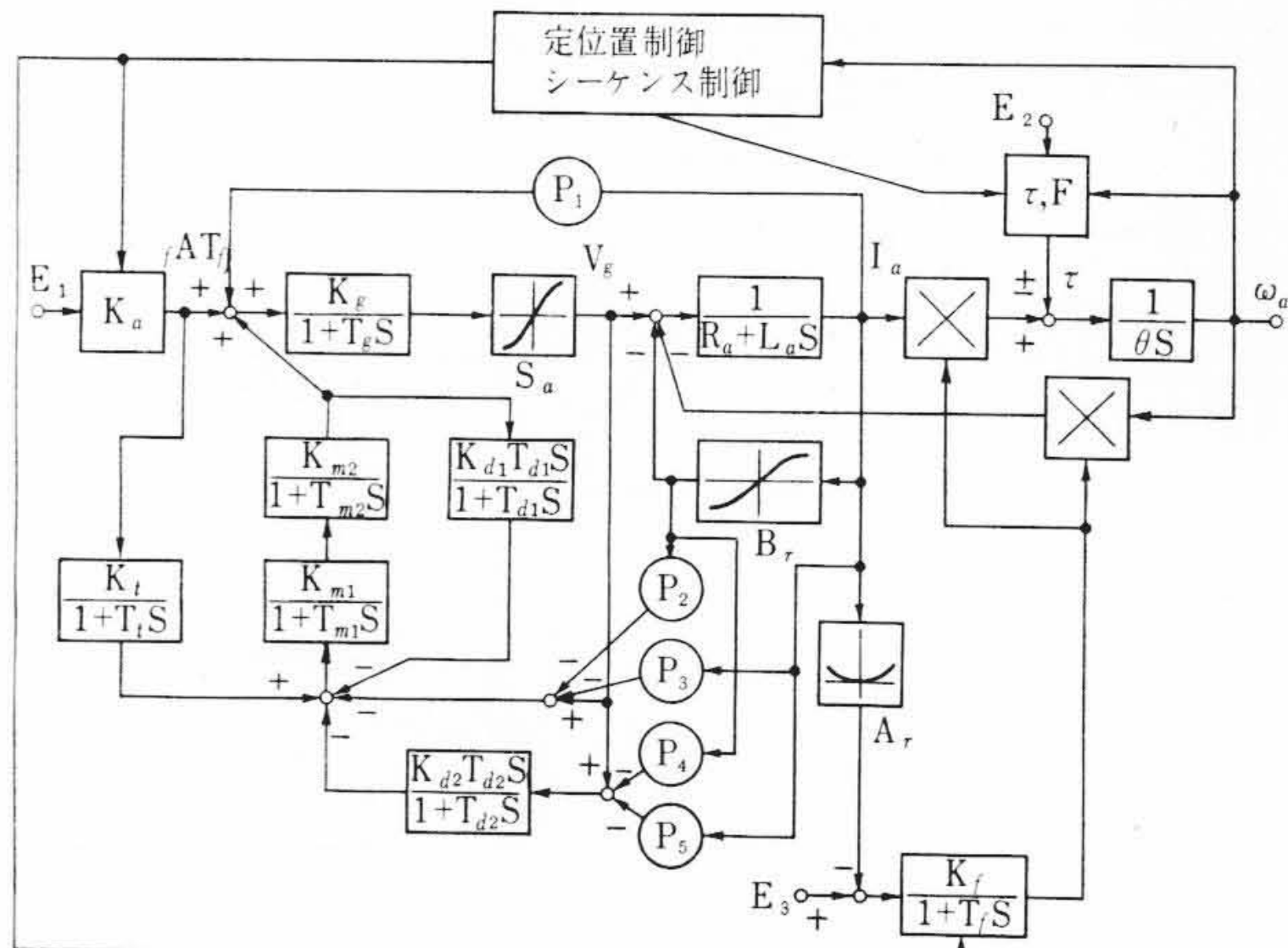
4.3 過渡特性

セラコンスタック方式は、高利得制御であるため、定常特性のみならず過渡特性もすべての外乱に対してほとんど変化しない。しかも適切な回路定数の選定により、エレベータ制御系にマッチした過渡応答を得ている。一例として、第15図に負荷を変化した場合の速度過渡応答を示した。したがって、すべての階床運転およびエレベータ速度に対して、エレベータは速度指令値どおりに追従し、位置制御と相まって高性能な速度特性をうることができる。

このことを立証するために、エレベータシミュレータにより 300 m/min エレベータの速度特性を検討した。第16図に本解析のためのシミュレータ用ブロック線図を示した。本解析の結果、速度曲線、着床特性および運転時間の三つの条件とも良好な結果をうることができ、300 m/min 高速エレベータの製品化も十分達成できる見通しを得た。

5. 結 言

以上、エレベータシミュレータ解析および実験解析によりエレベータ制御系の特質を検討したが、さらにそれから導出される高速



S_a : 飽和特性関数発生器
 B_r : ブラシドロップ関数発生器
 A_r : 電機子反作用関数発生器
 $P_1 \sim P_5$: ポテンシオメータ
 K_t, T_t : 基準指令遅延回路ゲインと時定数
 K_f, T_f : 電動機界磁束回路ゲインと時定数
 F : 機械系の摩擦

第16図 セラコンスタック方式シミュレータブロック線図

エレベータとしての条件およびこの条件に合う制御方式として開発されたセラコンスタック方式の特性について簡単に説明した。また、本方式をさらに発展させることにより、今後の高速化も十分に達成できる見通しを得た。

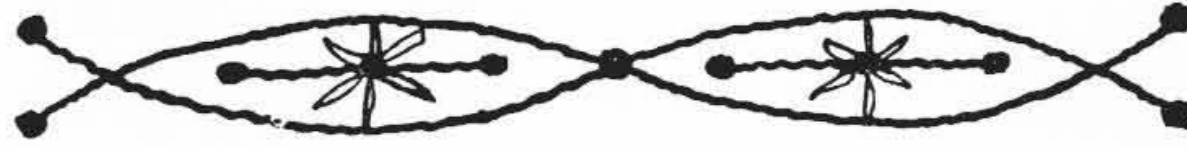
参 考 文 献

- (1) 特許出願中
- (2) 川野：電気学会誌 84, 933 (昭39-6)
- (3) 宮沢ほか：磁気増幅器の設計と応用 87~109 (1960, オーム社)
- (4) 小沢ほか：自動制御理論 59~65 (1960, 近代科学社)



実用新案 第717033号

新 案 の 紹 介



小 泉 直 彦

電 子 管 用 籠 型 グ リ ッ ド

この考案はグリッド縦線にタングステン線を、グリッド横線に白金被覆モリブデン線を用い、さらにこれらの表面に白金をたとえばメッキにより被覆したものである。このように構成することによりグリッド縦線とグリッド横線の溶接の際に、グリッド横線に被覆されている白金がフラックスとなって容易に良好な溶接ができ、グリッド縦線のタングステン線によって強度的にも満足すべき結果が得られ、表面の白金被覆の状態を適当な粗面にすることによって二次電子放射も十分小さくすることができ、しかも安価に製作することができるという利点がある。(福田)

