

新宿住友ビル納め

# 世界最高速540m/min直流ギヤレスエレベータの開発

## Development of World-highest-speed D.C. Gearless Elevators (540m/min Elevators for Shinjuku Sumitomo Building)

The world's fastest 540 m/min elevators were delivered recently from Hitachi, Ltd. to Shinjuku Sumitomo Building. These DC gearless elevators carry novel speed feedback systems and incorporate the best of Hitachi's noise and vibration prevention techniques. Also, they are provided with safety devices which passed stringent performance tests. In control characteristics, riding quality, and safety, these elevators are fairly comparable with their predecessors of lower speed class.

宮尾英夫\* Hideo Miyao  
 中里眞朗\* Masao Nakazato  
 奈良俊彦\* Toshihiko Nara  
 重田政之\*\* Masayuki Shigeta  
 神谷 清\*\*\* Kiyoshi Kamiya

### 1 緒 言

昭和46年に完成した地上47階の京王プラザホテルをはじめとして、新宿副都心には50階を越える超高層ビルが次々と建設されている。昭和49年3月には、地上52階の新宿住友ビルが完成したが(図1)、これらの超高層ビルには、ビル機能の向上を図るため400~500m/min級の高速エレベータが要求されるようになった。日立製作所では、はやくから高速エレベータに対する研究を重点にとりあげ、霞が関ビル、世界貿易センタービル、京王プラザホテルなどの超高層ビルにおいて、常にわが国最高速度のエレベータ(300~360m/min)を完成してきた。これらの実績をもとにさらに研究を進展させ、今回世界最高速540m/min直流ギヤレスエレベータの開発を完了し、その第1号機を新宿住友ビルに納入した。

### 2 540m/minエレベータの速度制御

540m/minエレベータの速度制御上必要な性能は主として、

- (1) 負荷が変化しても速度が変化しないこと。
- (2) 負荷の変化および運転継続により着床位置が変化しないこと。
- (3) いかなる運転条件(速度および負荷)でも円滑な台形波加減速度特性となること。
- (4) 走行中にかごの上下振動を誘発しないこと。

など、従来のエレベータと本質的に相違するものではないが、エレベータが高速化、高揚程化するに従い、種々の外乱の影響を受けやすくなるから、制御系の補償能力を向上することが必要となる。

#### 2.1 速度微分帰還制御系

エレベータの速度制御上の変動要因には、

- (1) エレベータの乗客数の変動
- (2) 温度上昇によるワードレオナード主回路抵抗の増加
- (3) 電機子反作用による巻上電動機界磁束の減少

などが考えられ、これらの変動を補償して前記性能を満足させるには帰還制御系を採用することが必要である。一般に、帰還制御系では各制御要素に応答遅れがあるため不安定となるので、これを防止する方法に、(a)直列補償、(b)並列補償の2方法がある<sup>(1)</sup>。エレベータのように電動機制御の場合は、



図1 新宿住友ビル 新宿副都心に完成した超高層ビル新宿住友ビル(地上52階)の全容を示す。

Fig. 1 Shinjuku Sumitomo Building

制御系の出力側に近いほどパワーが大きくなるので、並列補償法が容易であり経済的でもある。

この並列補償法には図2に示すように、

- (1) 制御系の中間出力から並列補償をとる。
- (2) 制御系の最終出力から並列補償をとる。

\* 日立製作所水戸工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所日立工場

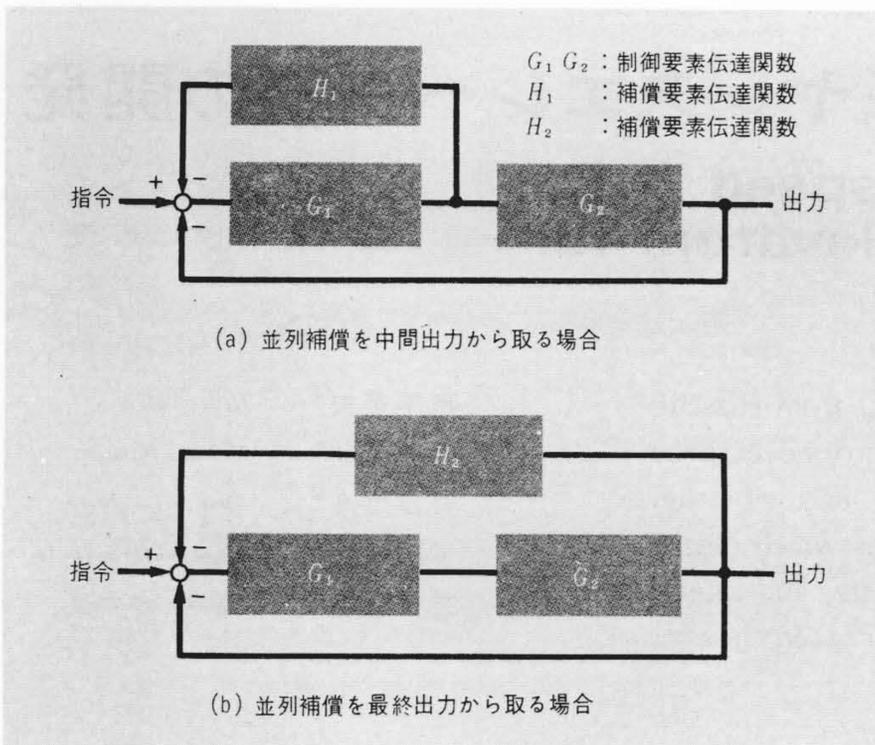


図2 帰還制御系の安定法 制御要素 $G_1, G_2$ には応答遅れをもっているため、制御系の安定を図るため並列補償する。

Fig. 2 Stabilization of Feed Back Control System

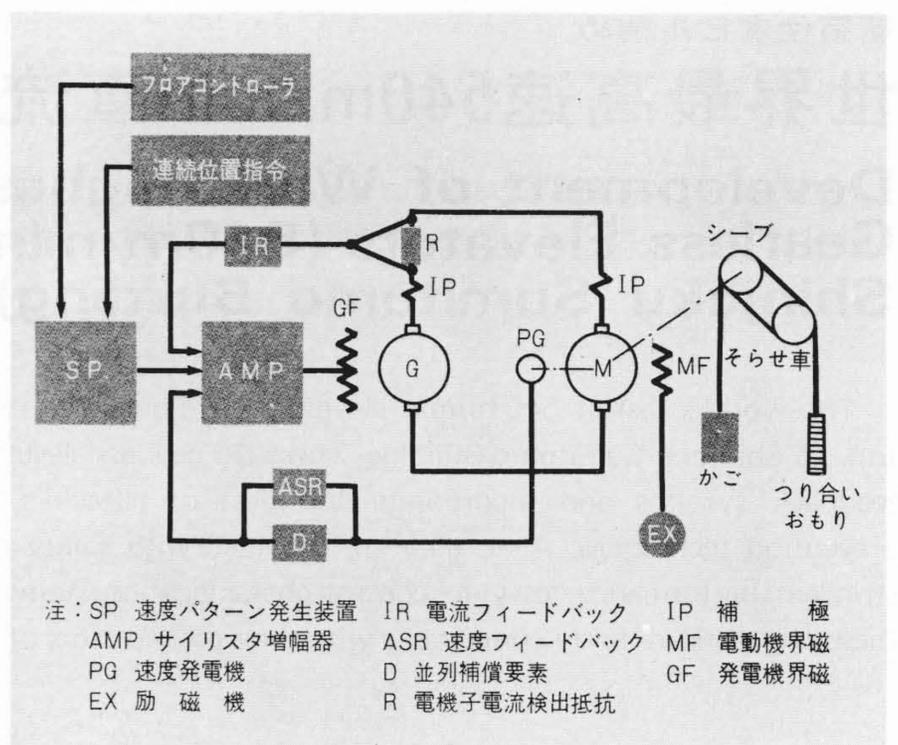


図3 540m/minエレベータの速度制御回路 速度パターンとエレベータ速度を、サイリスタ増幅器で比較することにより円滑な速度特性を得ることができる。

Fig. 3 Speed Control Circuit of 540m/min Elevator

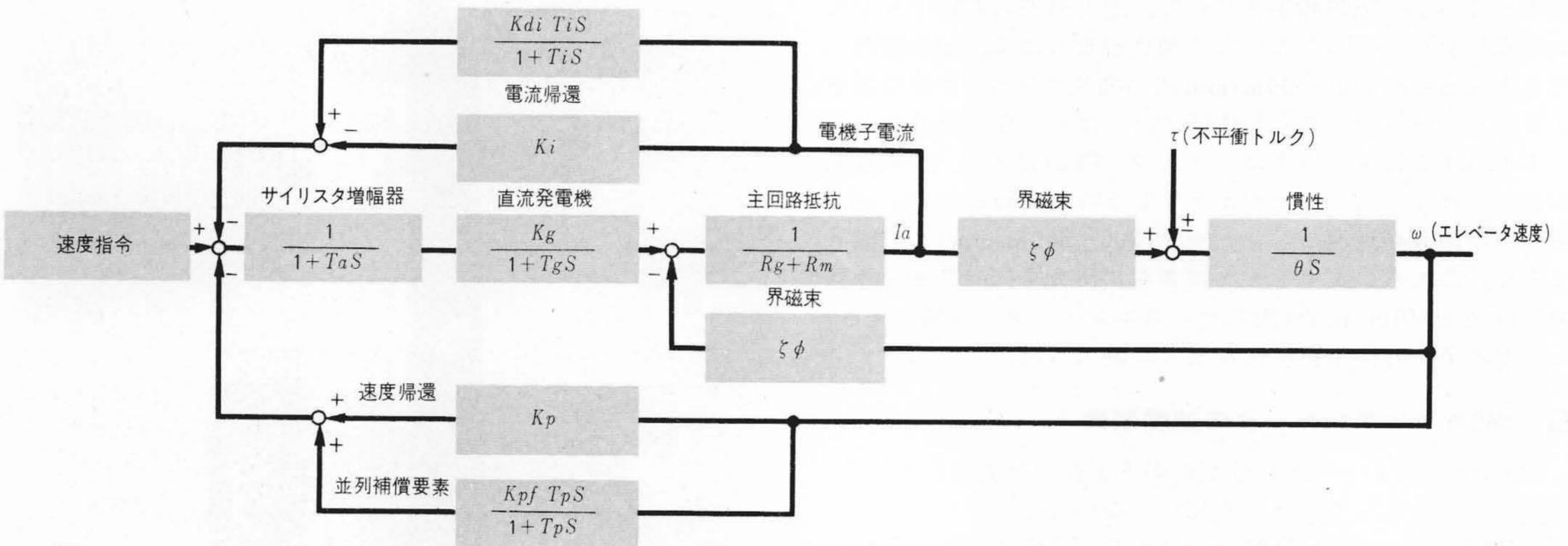


図4 速度微分帰還制御方式ブロック線図 図3の制御回路をブロック線図に展開したものである。

Fig. 4 Block Diagram of Speed Differential Feed Back Control System

の2方法があり、それぞれ指令から出力までの伝達関数 $G$ は、(1)の場合、

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_1 G_2} + \frac{H_1}{G_2} + 1} \dots\dots\dots(1)$$

(2)の場合、

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_1 G_2} + H_2 + 1} \dots\dots\dots(2)$$

となる。(1)式と(2)式を比較すると分母の $\frac{1}{G_1 G_2}$ 項は同一であるが、残る項は(1)式では $\frac{H_1}{G_2}$ となり、 $G_2$ の変動により変化する。(2)式では $H_2$ であり、制御系の変動に左右されない。これは、並列補償では制御系の最終出力側から安定をとるほうが外乱の影響を受けにくいことを示している。

以上の検討結果より、日立製作所は高速エレベータの速度制御方式として、速度制御系の出力部であるエレベータ速度

から並列補償をとる速度微分帰還制御方式(特許出願中)を開発した。本方式の概要は図3に示すとおりである。同図から明らかなように、本方式の制御回路は、高精度な速度パターン発生装置、サイリスタ増幅器、ワードレオナード回路および速度発電機より構成され、速度発電機からエレベータの速度と並列補償要素である速度の微分値が速度指令に負帰還されている。

また、図4は、これをブロック線図で表示したものである。エレベータの速度制御系のインディシャル応答は、乗り心地および着床特性の面から行き過ぎ(オーバシュート)のない臨界減衰とする必要がある、図4の並列補償要素を調整して臨界減衰とすると、同図のブロック線図の速度指令からエレベータ速度までの伝達関数は(3)式で近似できる。

$$G(S) = \frac{A}{1 + BS + CS^2} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 S &= \text{複素角周波数} \\
 A &= \frac{1}{K_p} \left( 1 - \frac{1}{L_g} \right) \\
 B &= \left\{ \frac{(T_a + T_g)\zeta\phi}{K_g} + K_{df} T_p \right\} \left( 1 - \frac{1}{L_g} \right) \frac{1}{K_p} \\
 C &= \left\{ \left[ \frac{1}{K_g} (T_a T_g + T_g T_m + T_m T_a) + \frac{T_m K_{di} T_i}{R_g + R_m} \right] \zeta\phi \right\} \left( 1 - \frac{1}{L_g} \right) \frac{1}{K_p} \quad (4) \\
 L_g &= \text{ループゲイン (一巡利得)} \\
 T_m &= \text{機械的時定数 } \left( \frac{(R_g + R_m)\theta}{(\zeta\phi)^2} \right)
 \end{aligned}$$

次に、直流エレベータの制御定数の変動による着床位置の変動 $\Delta L$ は、(3)式の伝達関数 $G(S)$ のパラメータ $A$ 、 $B$ および $C$ の変動に起因し、エレベータの減速指令を直線（減速度を $\alpha$ ）と仮定すると、

$$\Delta L = \alpha \left\{ 2(B^2 - C) \frac{\Delta A}{A} + 2B \cdot \Delta B - \Delta C \right\} \dots\dots(5)$$

となる。ここに、 $\Delta A$ 、 $\Delta B$ 、 $\Delta C$ はおのおの(4)式の $A$ 、 $B$ 、 $C$ の変動分である。

項初で述べた速度制御上の変動要因(1)~(3)は、図4のブロック線図の(1)慣性能率( $\theta$ )、(2)主回路抵抗( $R_g + R_m$ )、(3)界磁束( $\zeta\phi$ )に対応するが、本速度微分帰還制御系ではこれらの要因が変動しても(4)式からわかるようにサイリスタ増幅器の高利得 $K_g$ が分母にあるためパラメータ $A$ 、 $B$ 、 $C$ はほとんど変化せず、(5)式の着床位置の変動 $\Delta L$ はゼロと考えてよい。また、これは(3)式の伝達関数 $G(S)$ が外乱に対して安定していることを示しており、エレベータは円滑な速度指令に忠実に

に応答することができる。

この結果、新宿住友ビル納め 540m/min エレベータの速度特性は図5に示すように円滑なものとなり、着床特性も図6に示すように安定し、上記の解析結果を立証した。

### 2.2 速度発電機の脈動電圧の影響

前記のように、速度微分帰還制御方式は制御性能が著しく向上するが、速度発電機（以下、PGと称す）の脈動電圧が並列補償要素を通じて入力に帰還されるので、速度制御系に振動を発生させる度合も大きくなる。このためPG本体の脈動電圧を極力小さく押えると同時に、PGの駆動機構から生ずる脈動電圧も低減する必要がある。今回、PGの駆動方式として巻上電動機のブレーキドラム面を利用したローラ摩擦駆動方式（特許出願中）を開発して、PGの脈動電圧によるエレベータの縦振動を8Gal以下とし、乗客には感知できぬ範囲に制御することができた。

### 2.3 ロープのばね効果の影響

超高層ビル用エレベータは、高速化とともに高揚程化し、縦振動系の固有振動数が低下する。その結果、速度制御系に内在する微小な繰返し加振力により、かごは不快な縦振動を生じやすくなる。このため、巻上電動機のトルク脈動およびPGの電圧脈動を極力小さくすると同時に、縦振動系の固有振動数に共振しないようにPGの増速比を選定した。

## 3 走行中のかごの振動と騒音

540m/minに高速化することによって、かごの振動や騒音も増大するが、従来の300m/min級の多数の実績をもとにエレベータ研究塔や無響室などの研究設備を駆使して総合研究を行ない、快適なエレベータを実現することができた。

### 3.1 かごの振動

かごの振動に影響する要因としてはガイドレールの真直性、ローラガイドの吸振性能、かごの防振法などがある。

建物を超高層化するとガイドレールの真直性を維持することがきわめて困難となり、またエレベータの超高速化に伴い、ガイドレールの曲がりによる加振力は著しく増大する。ガイドレールの曲がりに対するかごの横振動の解析ならびにエレベータ研究塔において高速走行試験を行なった結果、従来の構造のままで540m/minで走行すると15Gal（全振幅）以上の横振動が発生し、特に乗客が一方に片寄った場合には20Gal以上となり著しく増大し、人間の感知限界8Galを越えることがわかった。そこで実績のある高精度ガイドレールを使用して入念な据付を行なうとともに、ガイドレールの曲がりに影響されにくい吸振性能の向上した250φローラガイドを開発した。さらに偏荷重時においても吸振効果を発揮できるかごの新防振方法（特許出願中）を採用した結果、図7に示すように横振動加速度が8Gal以下となり、良好な結果を得た。

### 3.2 耐震耐風構造

超高層ビルは耐震上柔構造であるため、地震や強風に対して横振れしやすくその結果、エレベータの巻上げロープに横揺れが発生し、かごを加振して50Gal以上の異常な振動を発生することがある。これに対して、ロープ、かごおよび機械室にロープ制振装置（特許出願中）を設け、通常と変わらない乗り心地が得られた。

さらにガイドレールの補強、かごおよびつり合いおもりのガイドレールからのはずれ止め、ロープおよびテールコード類に対する振れ止め、はずれ止めおよび引っ掛かり防止、機械室設置品の移動転倒防止などの耐震耐風構造を採用し、万全の安全性を保障している。

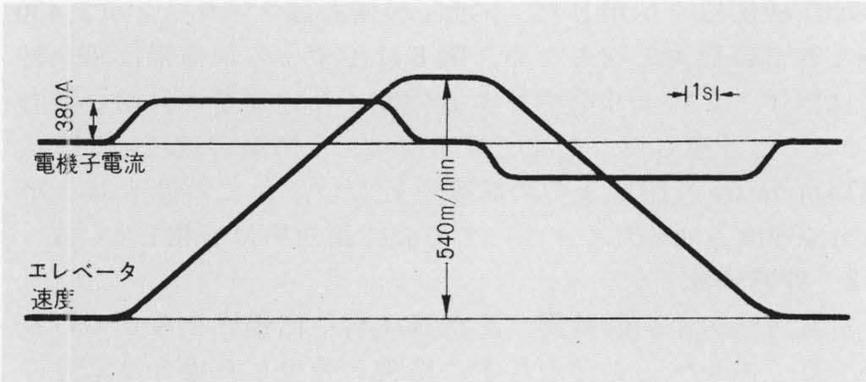


図5 540m/minエレベータの速度特性 加速、減速とも脈動がなく、円滑な台形波加減速特性が得られている。

Fig. 5 Speed Characteristic of 540m/min Elevator

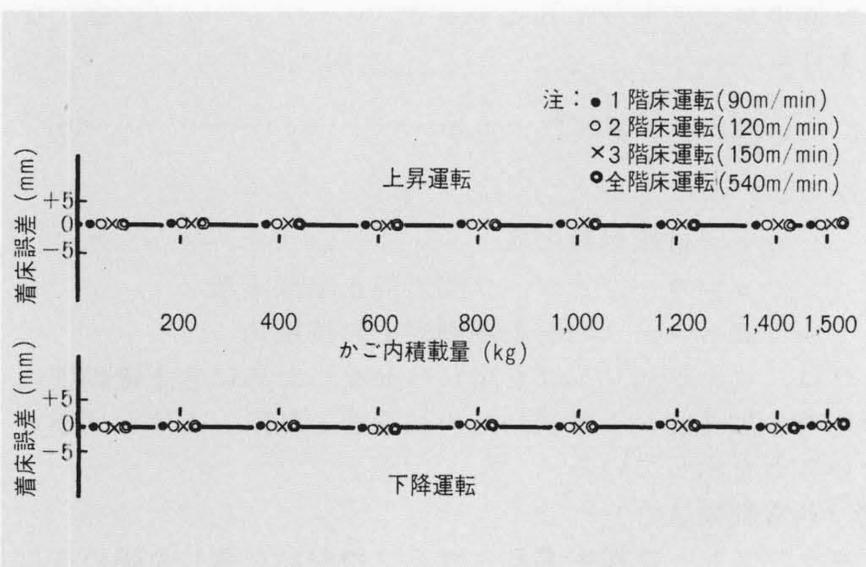


図6 540m/minエレベータの着床特性 最大負荷(1,500kg)まで、±1mm程度の着床特性となっている。

Fig. 6 Landing Characteristic of 540m/min Elevator

### 3.3 かごの騒音

エレベータは周囲を仕切られた狭い昇降路を走行するため、かご周囲を流れる空気は乱流域となり渦流を生じる結果、これが騒音となってかご内に伝わる。従来のかご構造では 540 m/min で走行すると、かご内の騒音は60ホン(A)を越え、またかごとつり合いおもりとのすれ違い時には列車どうしのすれ違いに似た異常音が発生し、相当に耳ざわりである。そこで従来のかごに比べて10dB以上の遮音度を得ることを目標として、無響室における実物大のかごによる騒音実験、モデルかごによる風洞実験ならびにエレベータ研究塔における高速走行試験などを行ない、渦流が発生しにくく、また、遮音度の大きい二重構造のかご(特許出願中)を開発した。その結果、かご内騒音は52ホン(A)以下となり、従来の300m/min級のエレベータと同等の静かなエレベータを得ることができた。

## 4 安全装置と非常停止

ビルの縦の交通機関であるエレベータは、異常時に安全に停止しなければならない。特に 540m/min に高速化するとエレベータの持つ運動エネルギーはじん大となるから、非常制動機能をつかさどる制御機器は従来にまして高信頼性と円滑な動作が必要である。

### 4.1 安全装置

#### (1) ガバナ

高速エレベータは、安全上いち早く異常加速を検知し、非常制動をかける必要がある。このため、540m/min用ガバナは回転機構の摩擦を極力少なく設計し、速度検出精度の向上および動作時間の短縮を図った。また、本ガバナが動作したときは、ガバナロープのすべり距離が従来のものに比べ大きくなるので、ガバナキャッチカムが摩耗しロープ保持力が減少する。このため、キャッチカムの材質およびプロフィールを改良して、エレベータの停止まで十分なロープ保持力を確保することができた。

#### (2) 非常止め装置

540m/minエレベータの非常止め装置は、作動速度が600m/minを越えるためその制動エネルギーが非常に大きなものとなる。その結果、制動子の摩耗が多くなり、接触摩擦熱により制動子摩擦部分の組織が変質し、摩擦係数が低下する。このため、制動子の材質に特殊鋳鉄を採用、くい込みこう配の改良を図り、エレベータ制動距離、最大減速度およびかごの

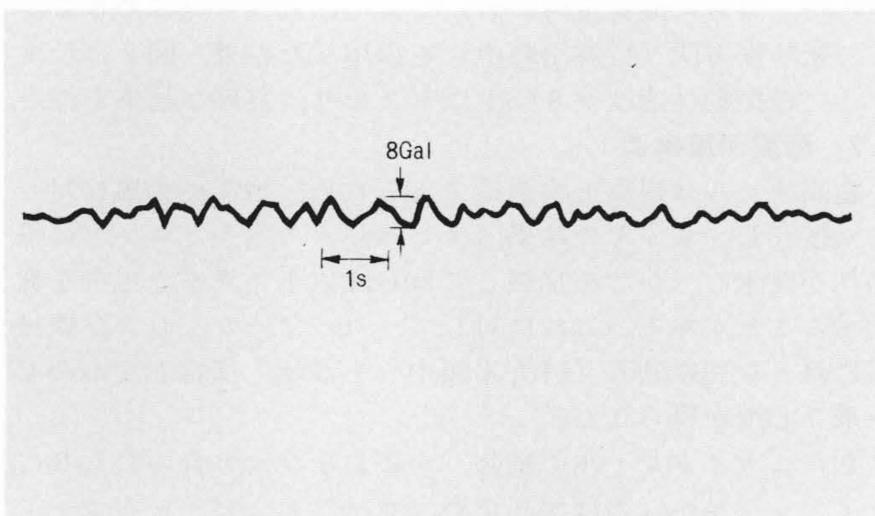


図7 540m/minエレベータ横振動加速度オシログラム 540m/min 走行中で人間の感知限界8Gal以下に抑えることができた。

Fig. 7 Oscillogram of Lateral Vibration of 540m/min Elevator

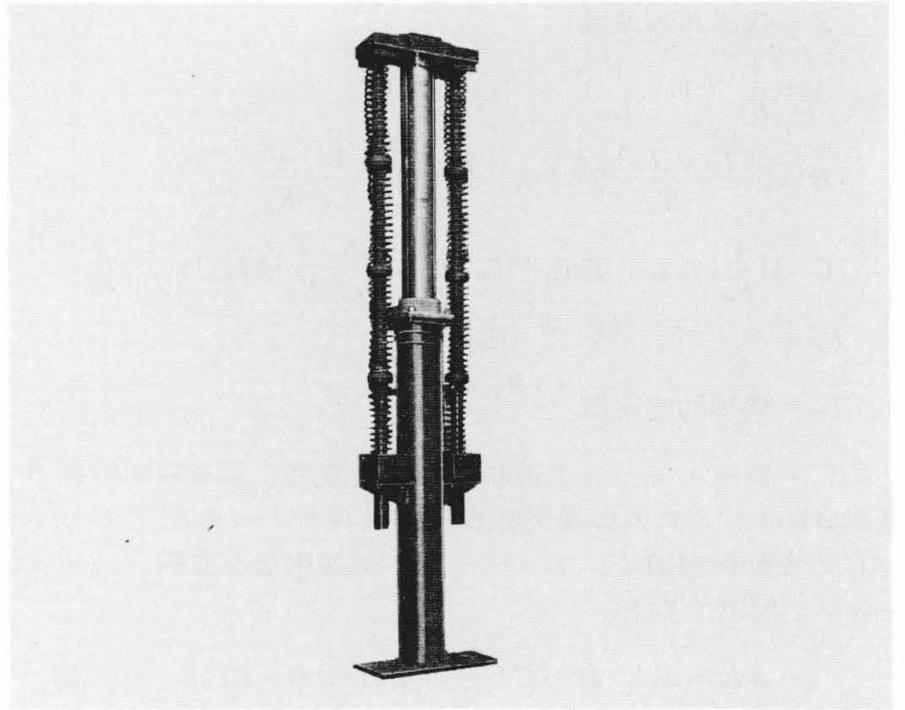


図8 油圧緩衝器 復帰ばねを外部に押し出し、緩衝器の全高を1m程度低減した。

Fig. 8 Oil Buffer

傾きとも国内法およびANSI(American National Standards Institute)の規定値以内に従来のもの同等以上の余裕をもって安全確実に動作することを確認した。

#### (3) 油圧緩衝器

540m/minエレベータの緩衝器は、ピットの深さを低減するため、端階強制減速装置<sup>(2)</sup>を設けて定格衝突速度 360m/minの油圧緩衝器を採用した。本油圧緩衝器はストロークが2,430mmと非常に長大となるため、図8に示すように復帰ばねを外に出すことにより全高を1m強低くし建築費の低減に寄与することも考慮した。本油圧緩衝器は、定格衝突速度の115%(414m/min)の速度までの試験を行ない、かごの最大および平均減速度、油漏れなどすべての面で諸規格に合格している。

### 4.2 非常停止

エレベータの制御装置はそれ自体高い信頼性を有しているが、万一エレベータが走行中に異常が発生した場合は緊急に非常停止させることも必要である。

#### (1) 駆動ロープのスリップ限界

高速エレベータはロープスリップの少ない全掛式のロープ掛けを採用している。かご側のロープ張力を $T_1$ 、つり合いおもり側のロープ張力を $T_2$ とすると、ロープスリップの生じない条件は、

$$\frac{1}{e^{\mu\beta}} \leq \frac{T_1}{T_2} \leq e^{\mu\beta} \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここに、

- $e$  = 自然対数の底
- $\mu$  = ロープとシーブ間の静止摩擦係数
- $\beta$  = ロープの巻上電動機上の接触角

これは、ロープスリップを生じさせないために巻上電動機の駆動時の加速度および制動時の減速度を制限しなければならないことを示している。

#### (2) 非常制動法

ロープスリップが生ずるとロープの寿命を著しく縮めるだけでなく、一般に、「すべり摩擦係数<静止摩擦係数」であるので、非常制動距離も著しく長くなり危険である。

日立製作所は、電磁ブレーキの摩擦制動力と電氣的回生制

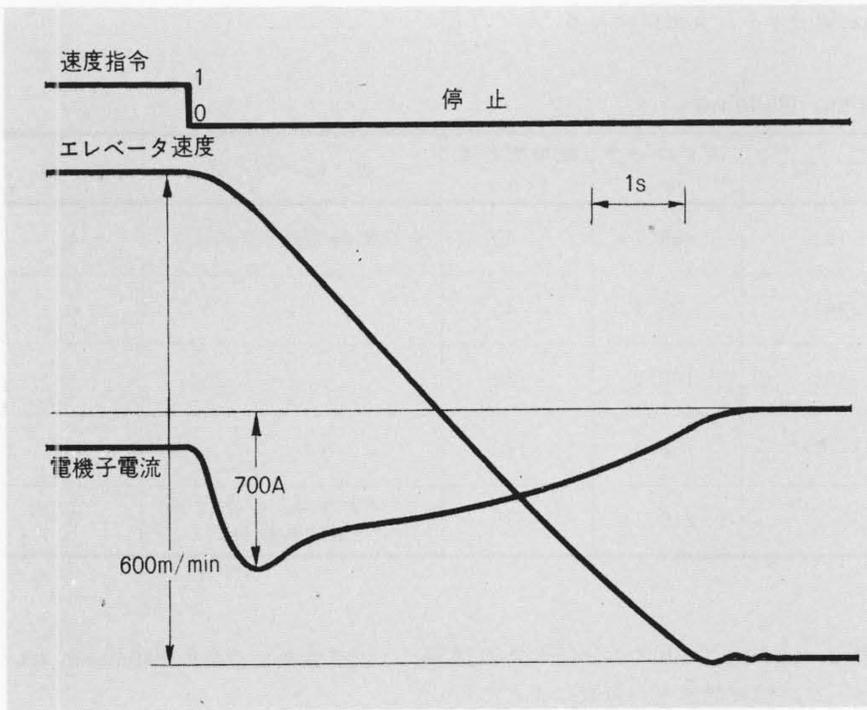


図9 非常停止時のエレベータ減速特性(全負荷下降運転) 600 m/minの高速から、減速度0.2gで減速しロープスリップは発生していない。  
Fig. 9 Characteristic of Deceleration of Elevator During Emergency Stop (Full Load Down)

動力を組み合わせ、図9に示すように600m/min (540m/min × 1.11) の高速からロープスリップ限界内で制動距離の短い非常制動法を考案した。本考案は、エレベータが走行中に停電事故が発生したときも同様に動作するようにし安全性を高めている(特許出願中)。

### 4.3 防災体制

超高層ビルにおけるエレベータは、ビル唯一の交通機関として重要な位置をしめているから、地震、火災、停電などの非常時における防災上の配慮も十分にしておかなければならない。3.2で述べた耐震構造は、地震時におけるビルの揺れからエレベータの挙動を解析し安全増を図ったものである。

一方、エレベータ設備能力は、一般にはビル内の人員を短時間で処理できるほど十分ではないから、地震、火災などの非常時にエレベータを利用して避難することは能力的に不十分であり、パニック状態をひき起こすなど二次的災害をも注意しなければならない。したがって、災害時の対処のしかたは建築設計と共同して総合的に検討しておく必要がある。

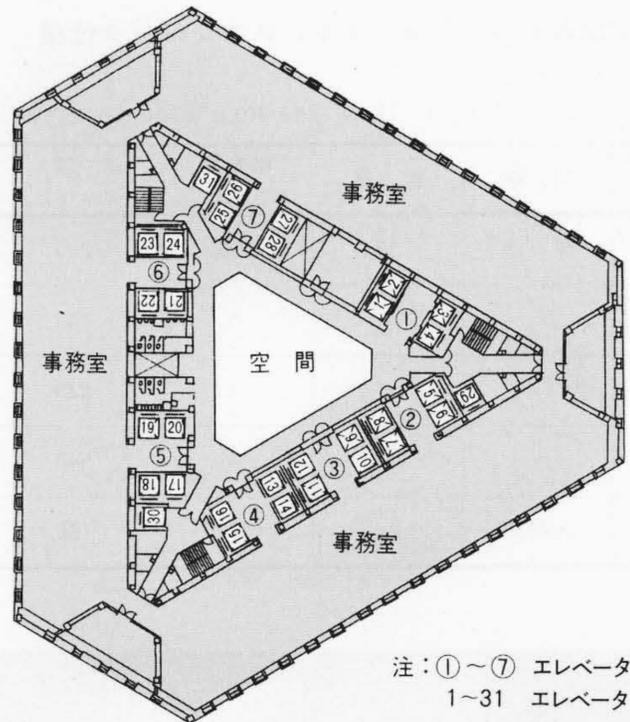
新宿住友ビルにおけるエレベータ群は、防災センターに直結した監視および指令体制下に置かれて、運転の停止、避難階への帰着、自家発電設置への切替えなどの制御が行なえるようにされているほか、地震の自動検知による運転の停止、急行ゾーン内に停止したかごへ隣接エレベータを横づけして乗客を移動救出するシステム<sup>(2)</sup>なども備えて安全性に万全を期している。

## 5 新宿住友ビル納め540m/minエレベータ

### 5.1 新宿住友ビルのエレベータ群

新宿住友ビルは地上52階の大事務所ビルである。図10に示したエレベータ計画図からわかるように、ビルの中心部に設けられた7グループ、合計28台のエレベータは、エレベータの運転効率を高めるためにグループ別に行先階が定められており、高層階用エレベータの速度は540m/minとし、低層階と変わらない輸送能力、待ち時間になるよう計画されている。

日立製作所が納入したエレベータの仕様は、表1に示すとおりである。



注：①～⑦ エレベータホール  
1～31 エレベータ

(a) 平面図

52								○	○
51								○	○
50								○	○
49								○	○
48								○	○
47								○	○
46								○	○
45								○	○
44								○	○
43								○	○
42								○	○
41								○	○
40								○	○
39								○	○
38								○	○
37								○	○
36								○	○
35								○	○
34								○	○
33								○	○
32								○	○
31								○	○
30								○	○
29								○	○
28								○	○
27								○	○
26								○	○
25								○	○
24								○	○
23								○	○
22								○	○
21								○	○
20								○	○
19								○	○
18								○	○
17								○	○
16								○	○
15								○	○
14								○	○
13								○	○
12								○	○
11								○	○
10								○	○
9								○	○
8								○	○
7								○	○
6								○	○
5								○	○
4								○	○
3								○	○
2								○	○
1								○	○
B1								○	○
B2								○	○
B3								○	○
B4								○	○
速度(m/min)	180	210	240	300	420	540	540	180	
メーカー	他社	日立	日立	他社	日立	他社	日立	日立	
グループ	1	2	3	4	5	6	7	非常用	

注：○はサービス階

↑は不停止階

(b) グループ別先行階

図10 新宿住友ビルエレベータ計画図 ビルの中心部にエレベータ群が集められ、効率のよい運転ができるよう配慮されている。

Fig. 10 Elevator Plan of Shinjuku Sumitomo Building

表1 新宿住友ビル納め直流ギヤレスエレベータ仕様 新宿住友ビル納め直流ギヤレスエレベータの仕様を一覧表にして示した。

Table 1 Specification of D. C. Gearless Elevators for Sinjuku Sumitomo Building

エレベータグループ	用途	定員	積載量(kg)	速度(m/min)	サービス階	ストローク(m)	電動機容量(kW)	運転方式	台数
No. 2	乗用	23	1,500	210	11 (1, 5, 10~18)	66.7	40	全自動群管理(CIP/IC)	4
No. 3	"	"	"	240	11 (1, 5, 18~26)	96.3	45	"	"
No. 5	"	"	"	420	10 (1, 5, 33~40)	148.1	82	"	"
No. 7	"	"	"	540	9 (B1, 1, 5, 47~52)	198.0	100	"	"
非常用	人荷用	24	1,600	180	56 (B4~52)	210.3	35	シグナルコレクティブ(消防運転付)	3

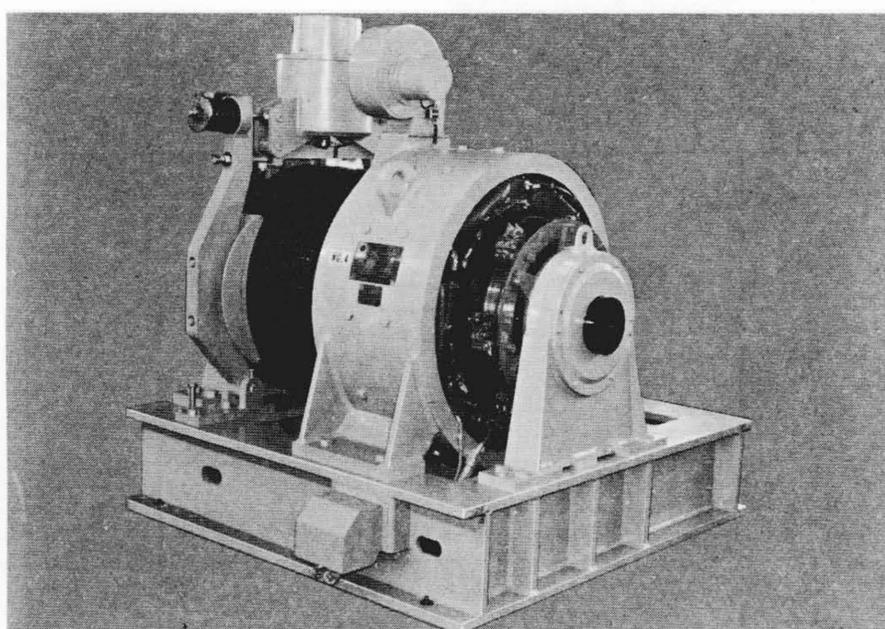


図11 540m/minエレベータ用巻上機(出力100kW) 強制空冷ファンを設けて小形化を図っている。

Table 11 Traction Motor of 540m/min Elevator (Output 100 kW)

## 5.2 540m/minエレベータ用制御装置

### (1) 巻上機

540m/minエレベータ用巻上機の外観は、図11に示すとおりである。強制空冷方式を採用して重量を低減し、エレベータ機械室への搬入を容易にした。

### (2) 速度発電機

速度発電機は速度制御の中核であるので、従来から実績のあるGTY形速度発電機とした。また、その駆動方式は前述したようにローラ摩擦駆動とし脈動電圧を抑制した。速度発電機および駆動方式には十分な信頼性試験を行なったうえ、万が一スリップなどの事故が発生したときは、これを検出する装置(特許出願中)を設けて万全を期している。

### (3) 制御盤

日立製作所は従来から、直流発電機および巻上電動機の界磁電流をサイリスタにより制御しているので、回転機制御電流が増大しても制御盤は比較的小形である。その結果、540m/minエレベータ用制御盤は従来の日立製作所の標準機種であるSV形直流エレベータの制御盤と同一据付面積とすることができた。

## 5.3 現地据付結果

新宿住友ビルにおける540m/minエレベータの据付の結果、速度制御、振動および騒音の低減とも所期の目標を達成することができた。表2は、新宿住友ビル納め540m/minエレベータの性能値をまとめて示したものである。

表2 540m/minエレベータの性能 新宿住友ビル納め540m/minエレベータの諸性能値を一覧表にまとめて示した。

Table 2 Performance of 540m/min Elevator

項目	性能値
起動時の加速度	0.01g以下
停止時の減速度	0.01g以下
加速時の加速度	0.15g以下
減速時の減速度	0.15g以下
加減速時の生理定数	1.5m/s <sup>3</sup>
着床誤差	±3mm以下
ドリフト	3mm以下
走行中の上下振動	10Gal以下
走行中の横振動	8Gal以下
走行中のかごの騒音	52ホン(A)以下

注: g 9.8m/s<sup>2</sup>

## 6 結 言

新宿住友ビル納入の世界最高速540m/minエレベータを中心に、日立製作所が独自に開発した速度制御方式、かごの防振、防音および安全装置について、その概要を述べた。

これらの新技術は、地上55階建新宿三井ビル納入の540m/minエレベータ7台をはじめとして、今後日立製作所が受注する高速エレベータにも適用される。

わが国のビル建築の超高層化計画は、今後ますます発展するものと思われるが、本稿が関係各位に対していくぶんなりとも参考の資となれば幸いである。

最後に、本エレベータの完成にあたり、ご指導とご協力をいただいた住友不動産株式会社、住友生命保険相互会社、住友商事株式会社、日建設計事務所および新宿住友ビル新築工事共同企業体の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げますとともに、現地での据付けおよび調整にご協力いただいた関係各位に謝意を表わす次第である。

## 参考文献

- (1) 高井, 「自動制御理論」オーム社(昭36)
- (2) 弓仲ほか, 「AS形360m/min高速エレベータ」日立評論54, 704(昭47-8)