

260人乗り日立超大形油圧式乗用エレベータ

260-passenger Oil Hydraulic Elevator for
Hitachi Group Pavilion

中 島 宏* 松 田 好 正*
Hiroshi Nakajima Yoshimasa Matsuda

Abstract

One of the world's largest elevators has been installed in the Hitachi Group Pavilion at EXPO '70 now under way in Osaka under the theme "Progress and Harmony of Mankind." The giant elevator, capable of carrying 260 passengers at a time, is of the oil hydraulic type. A special specification was drawn up in view of the running schedule of the elevator and the unusual structure of the pavilion. To meet the specification, careful studies were made from special viewpoints in all aspects of the elevator project ranging from design and fabrication to installation. This paper describes the outline of the unique elevator, considerations for maximum performance, and various characteristics including safety features.

1. 緒 言

日立グループ館(以下日立館と称す)は「追求(未知への招待)」をテーマに開設され、建物の外観は未来科学を象徴した空中に浮かぶ円盤のイメージで構成されている。この館において多数の観客を案内する交通機関としてエスカレータとエレベータとを有機的につなぎ、規則正しい運営をしようという考えは当初から計画されていた。しかし館内へ設置されるエレベータとしては次の制約を受ける。

- (1) 建物の美観をくずさないこと。
- (2) 建築構造にかかる荷重が極力小さいこと。
- (3) 占積率のすぐれていること。
- (4) 建物の階高以内におさまること。

これらの条件をすべて満足するものとして、この種計画には最適である油圧方式が採用されたものである。

一方、館の運営スケジュールの面では多数の観客が効率良く、かつ規則正しく移動する必要があるため、かご仕様は本格的な乗用エレベータとしては世界最大の260人乗り、2階建て、内径6mという超大形となっている。この特殊エレベータについて日立万国博本部をはじめ、関係部署と数次にわたる検討を重ねるとともに、その安全性、制御、構造、意匠など一般品とは観点をかえ一つ一つ検討を加えた結果、所期の条件をじゅうぶん満足しうるエレベータを設置することができた。

以下この特殊エレベータの概要と設計方針、安全性ならびに諸特性につき取りまとめ述べる。

なお国内においては2階建てエレベータは認められていないが今回はこの設備の安全性を裏付けに特例として認可を得たものである。

2. エレベータの概要

表1におもな仕様を、図1に昇降路内構造を示す。駆動方式は建物の美観をそこなうことなく、さらに鉄骨特殊構造の建物上部に荷重をかけることのない油圧駆動の直接押上式を採用している。これにより荷重をすべて昇降路下部のピット面で受け、建物に対する荷重条件を緩和するとともに昇降路スペースを有効に活用している。

* 日立製作所水戸工場

表1 エレベータの仕様

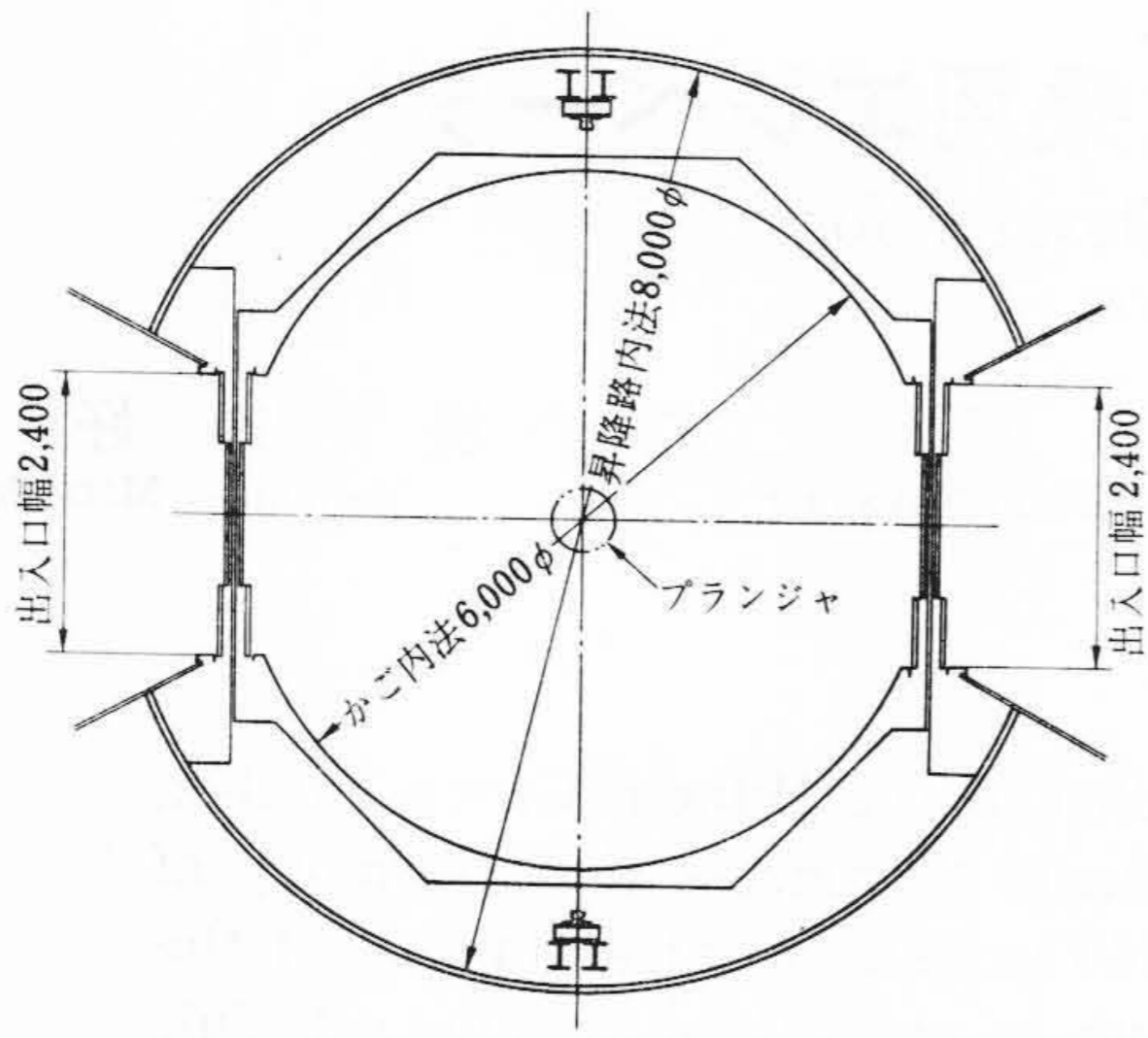
Table 1. Specifications

形 式	油圧駆動直接押上式 (HD形)
運 転 方 式	カースイッチコントロール
積 載 量 (kg) [定員 (人)]	8,350×2 [130×2]
速 度 (m/min)	上 昇 3.5, 下 降 4.5
電 動 機 (kW)	AC 30
行 程 (mm)	5,300
停 止 階 床	4階 (スカイロビー) 3階 (シミュレートホール) 2階 (コンピュータ室)
か ご 構 造	円 形 二 階 建
上 下 か ご 床 間 隔 (mm)	5,300
か ご 寸 法 (mm)	内 法 6,000φ×2
出 入 口 個 数	上かご, 下かごとも各2
出 入 口 寸 法 (mm)	2,400 幅×2,100 高
ド ア 開 閉 方 式	電 動 4 枚 戸 中 央 開

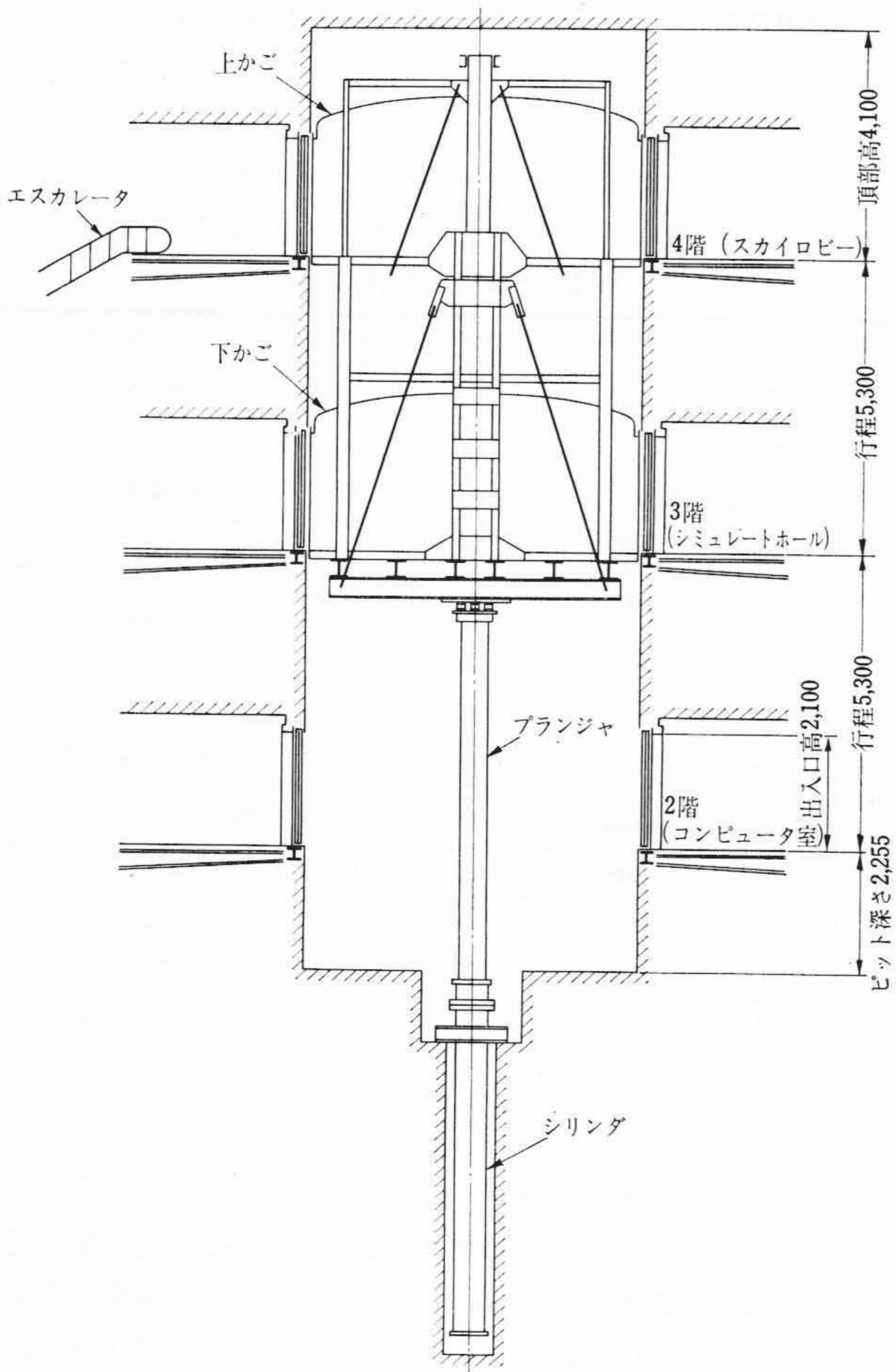
図2は現地の昇降路内部である。

このエレベータは日立館の中央に設置され、かごは円形2階建てからなり、上かごと下かごとにおのおの130人ずつ同時に乗れるようになっている。上昇した状態では上かごは4階、下かごは3階に着床し、下降した状態ではそれぞれ3階および2階に着床する。このエレベータは日立館の観覧ルートの一部をなしており、全員がエレベータにより順次下の階へ移動する。すなわち屋外エスカレータによって地上から一気に4階へ昇った観客130人は、地上40mの眺(ちょう)望を楽しみ、待機している上かごに乗り3階へ降りる。3階でシミュレートトラベルを楽しんだのち、すでに再上昇し3階に待機中の下かごに乗る。この場合、同時に次の130人は4階から上かごに乗りエレベータ下降後はじめの130人は2階へ、次の130人は3階へ降りる。走行時間は運営スケジュールに合わせて上昇1分30秒、下降1分10秒である。

出入口は上かご、下かごとも正背面2個所に設けられる。電動4枚戸中央開きとして出入口幅を大きくとり、多数の乗客が効率良く乗り降りできるよう配慮してある。



(a) 昇降路平面



(b) 昇降路断面

図1 昇降路据付図

Fig. 1. Installation Diagram of Hoistway

3. 基本設計

このエレベータは法定積載荷重 32t という巨大な円形 2 階建てからなり、従来にない特殊な構造が要求される。さらにこれを支持する油圧ジャッキの総押上荷重は数十トンに及び、ともに設計計画最も検討を要するところである。

3.1 油圧ジャッキの構造

かご自重と積載荷重はかごわくの中央で 1 本のプランジャにより

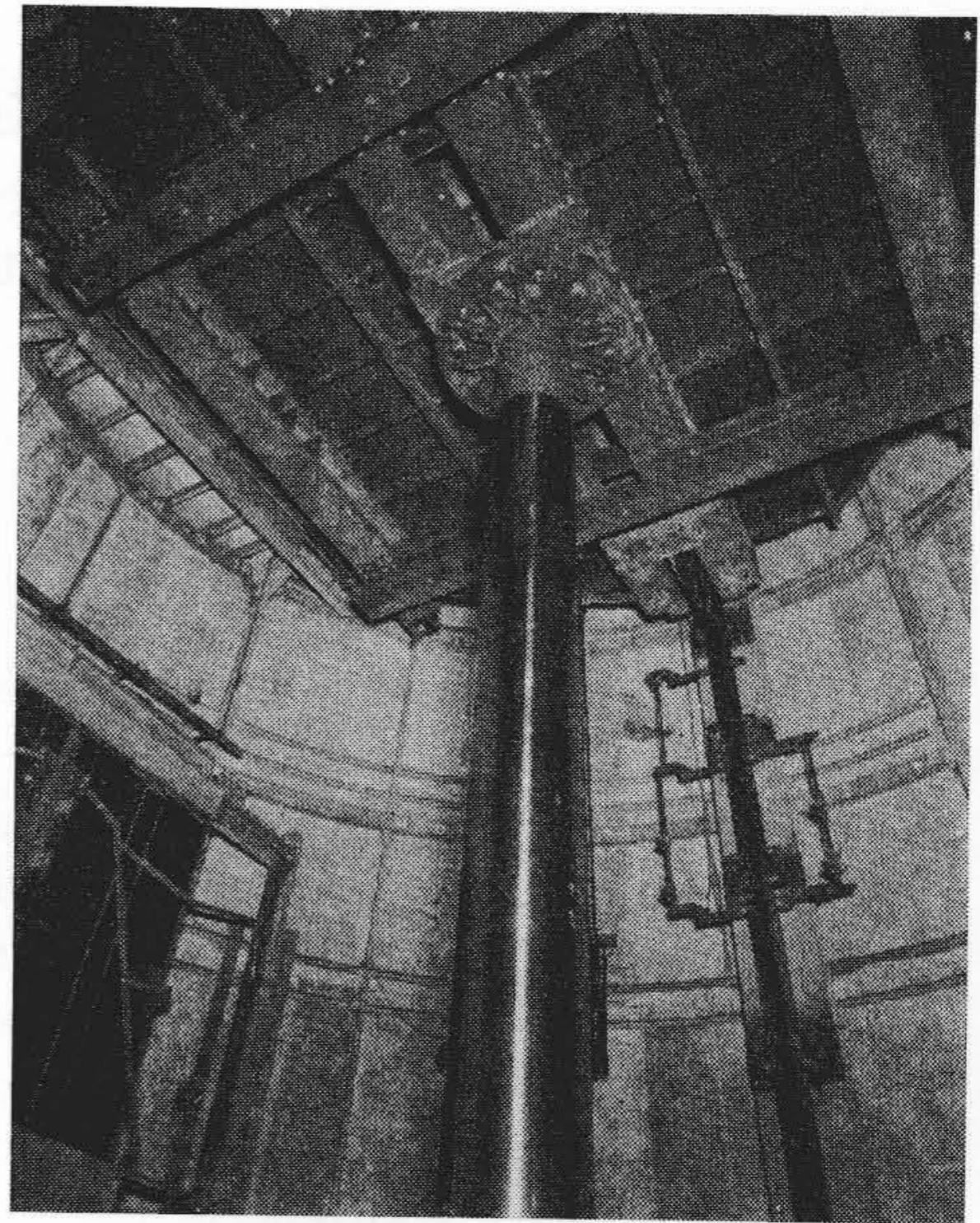


図2 昇降路内部

Fig. 2. Inside View of Hoistway

支持され、許容押上荷重 P (kg) は (1) 式に示すオイラーの座屈式から定められる。

$$P = \frac{n\pi^2 EI}{l^2} \cdot \frac{1}{f_s} \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$\lambda = l \sqrt{\frac{A_p}{I}} \geq 105, \quad A_p = \frac{\pi(D_p^2 - d_p^2)}{4}$$

$$I = \frac{\pi D_p^4}{64} \left\{ 1 - \left(\frac{d_p}{D_p} \right)^4 \right\}$$

ここに、 n : プランジャの支持条件により決まる定数

E : 縦弾性係数 $= 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

I : 断面二次モーメント (cm^4)

f_s : 座屈安全率 l : プランジャ長さ (cm)

D_p : プランジャ外径 (cm) d_p : プランジャ内径 (cm)

A_p : プランジャの受圧面積 (cm^2) λ : 細長比

法規によるとこの座屈安全率は 4 以上と規定されているが、今回はエレベータの特殊性を重視し規定安全率をはるかに上回る値に設計されている。

さらに乗客がある部分に片寄って乗った場合に生ずる偏心荷重による強度を考慮しておく必要がある。本来、偏心荷重については、この転倒モーメントをかごわくの左右上下に取り付けたガイドシュエを介して、ガイドレールに伝達する構造を採用している。ここではガイドシュエの摩耗その他、万一の場合を考慮して、プランジャ自体でも転倒モーメントにじゅうぶん耐える強度としている。最悪の偏心状態として全積載荷重が円形かごの半円に等分布して乗ると仮定した場合、プランジャ応力 σ (kg/cm^2) は次式で表わすことができる⁽¹⁾。

$$\sigma = \frac{D_p \cdot W_L \cdot l_c}{2I} + \frac{W_c + W_L}{\frac{\pi}{4}(D_p^2 - d_p^2)} + \gamma l \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 W_L : 積載荷重 (kg) W_c : かご自重 (kg)

l_c : かご中心から偏心荷重点までの距離 (cm)

γ : プランジャ材の密度 (kg/cm^3)

(2) 式の右辺第 1 項は偏心による曲げ応力、第 2 および 3 項は圧縮応力を表わしている。

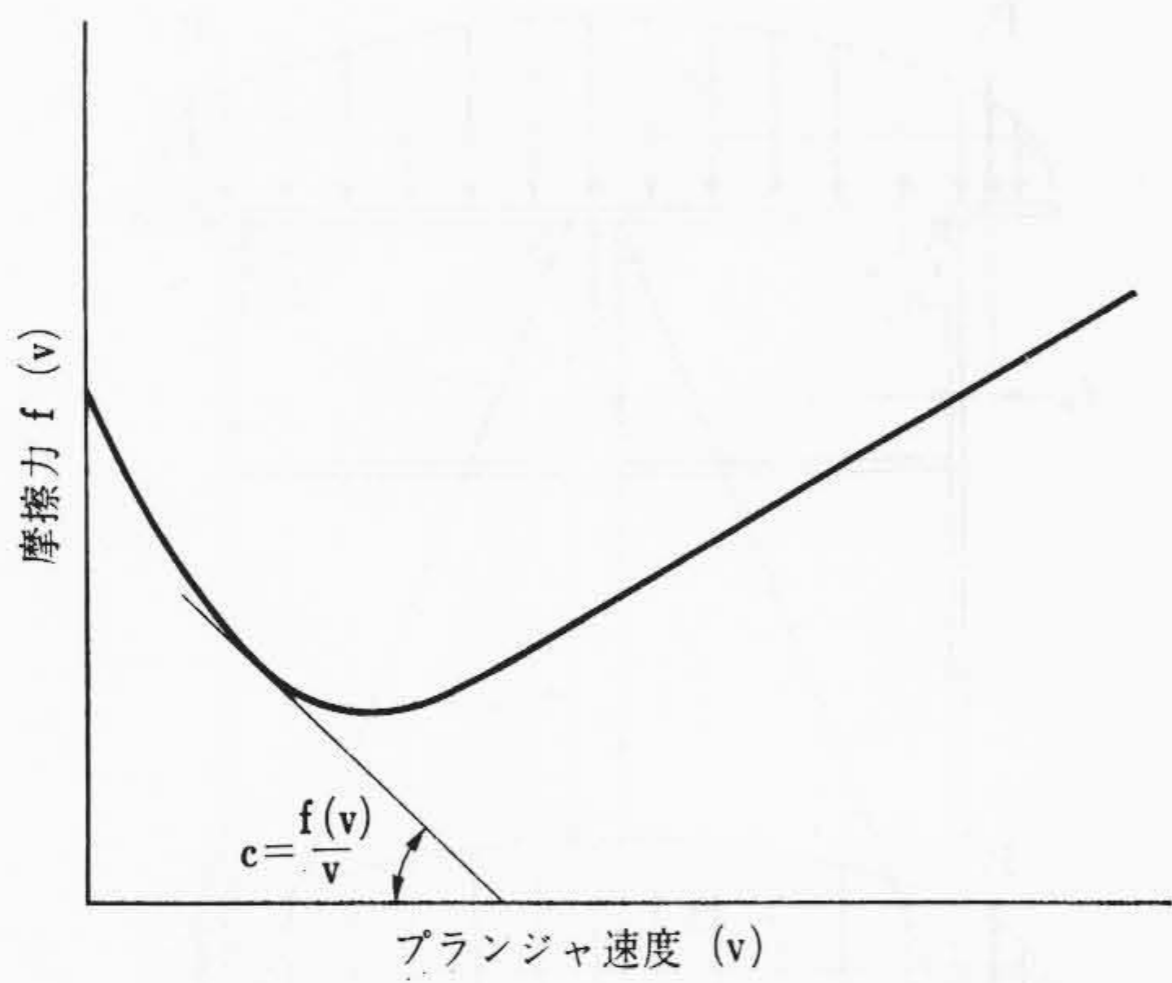


図3 すべり速度に対する摩擦力の関係
Fig. 3. Relation between Sliding Velocity and Frictional Force

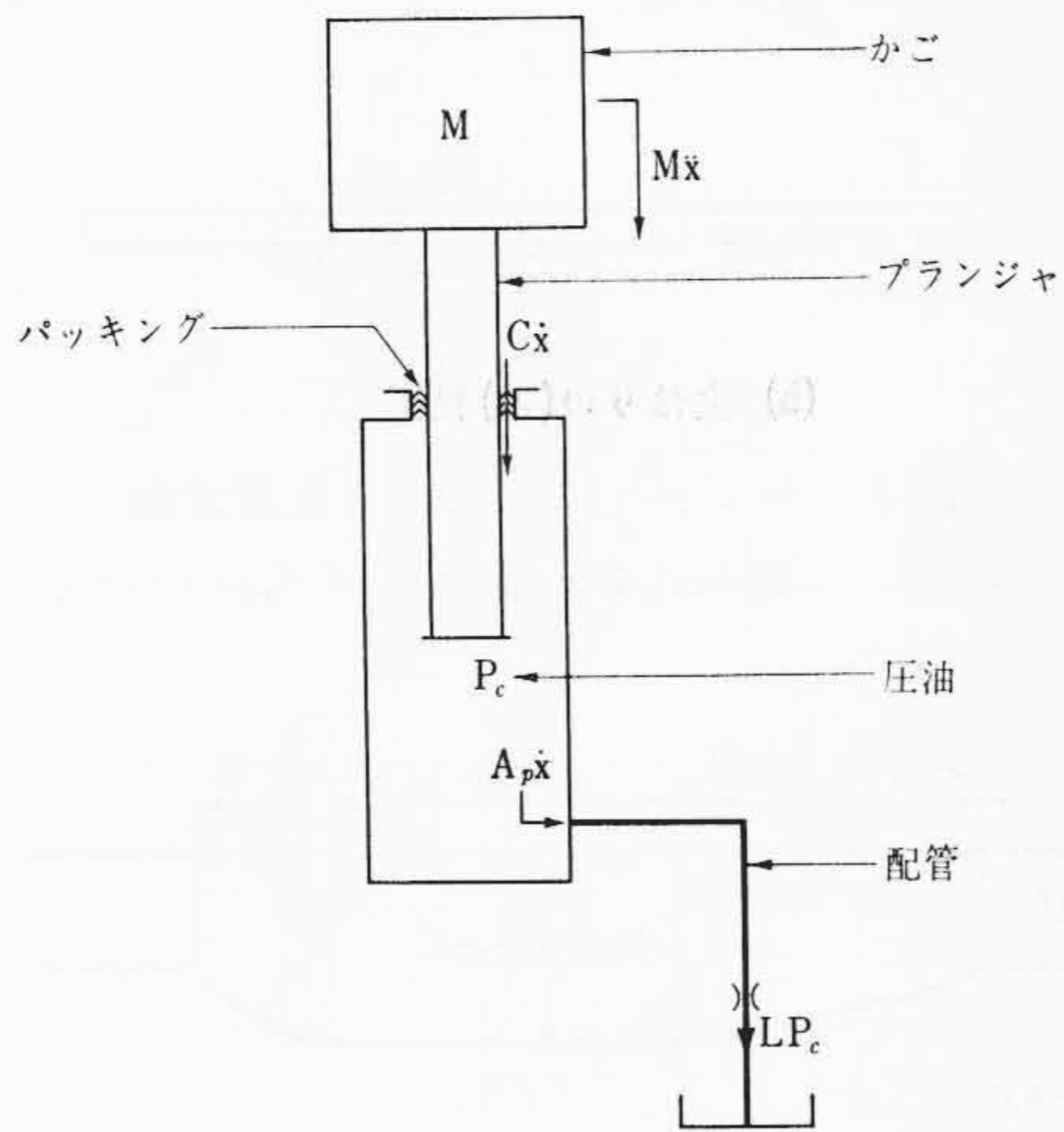


図4 油圧エレベータの振動系
Fig. 4. Vibration System of Oil Hydraulic Elevator

一方、油圧力 P_c (kg/cm^2) は(3)式で示され、これは流量の制御性およびポンプならびに流体騒音などから制限を受ける。従来からの経験によると圧力を 40 kg/cm^2 以下に押えることが望ましく、この圧力条件に(1)~(2)式の関係を加味しプランジャ直径として 455ϕ を採用している。

$$P_c = \frac{W_c + W_L + W_p}{\frac{\pi}{4} D_p^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W_p : プランジャ重量

3.2 自励振動防止

一般にプランジャがパッキングをしゅう動する際には摩擦抵抗が生じ、この抵抗が油圧ジャッキ内における圧油の圧縮性および油圧の制御性と複雑に関係して自励振動を誘発することがある。

振動が発生する程度は図3に示すように、速度の増加に対し摩擦力が負の傾向をもつ場合に限られ、速度が遅いほど摩擦力のこう配が大きいため現われやすい。このエレベータは下降速度が 4.5 m/min と従来にない微速で運転されるためにパッキングの摩擦抵抗を含めた系の振動についてはじゅうぶんな考察が加えられた。

図4の振動系において下降時の運動方程式および流れの状態式は次式で示される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} = A_p P_c \dots\dots\dots (4)$$

$$A_p \dot{x} + L P_c + \frac{V}{B} \dot{P}_c = 0 \dots\dots\dots (5)$$

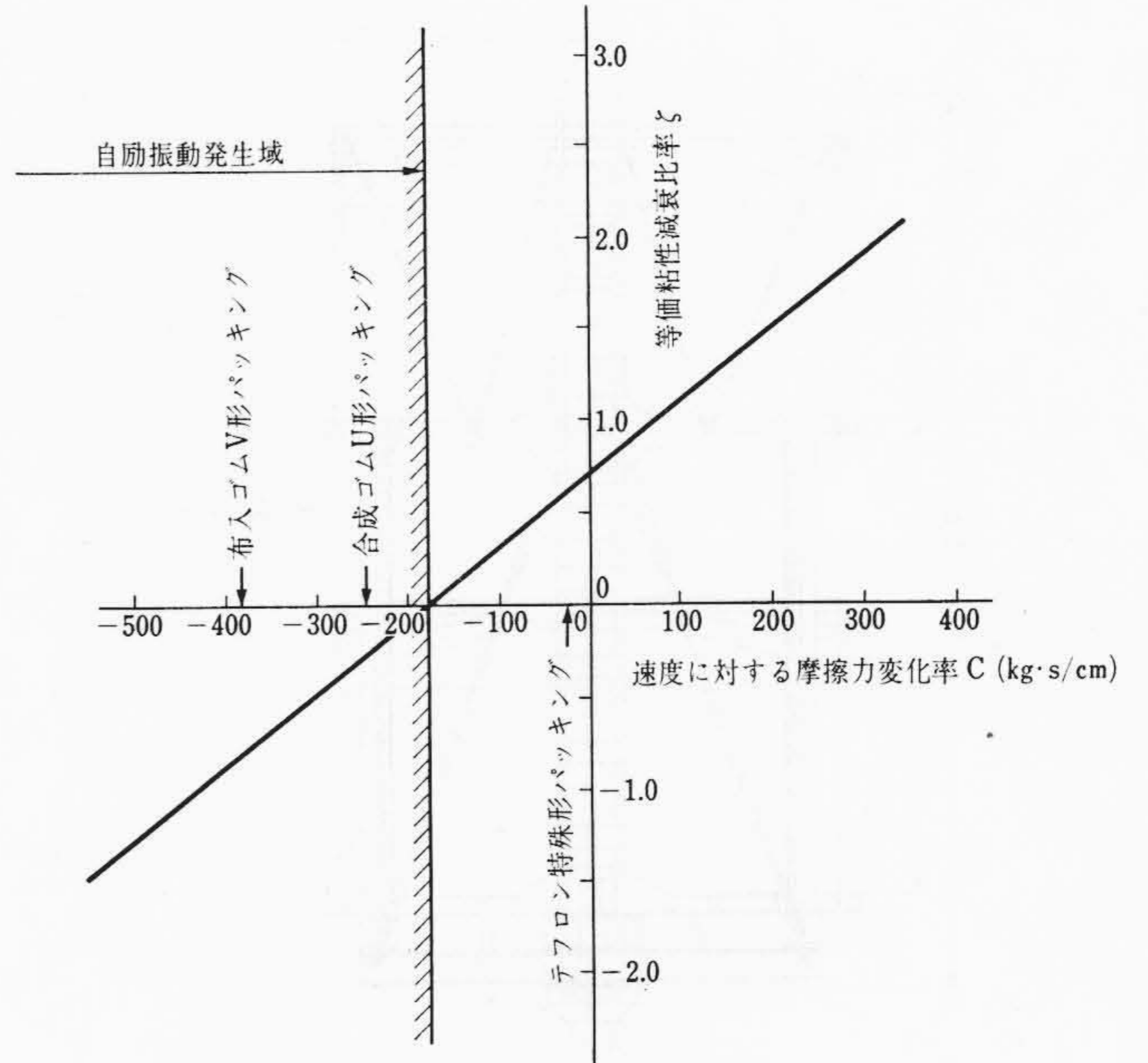


図5 自励振動の発生限界
Fig. 5. Limitation of Self-excited Vibration

- ここに、 x : プランジャ(乗かご)の変位 (cm)
- M : プランジャ, 乗かごの総質量 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)
- C : パッキング摩擦の速度に対する変化率 ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}$)
- A_p : プランジャ受圧面積 (cm^2)
- L : 制御弁のコンダクタンス ($\text{cm}^5/\text{kg}\cdot\text{s}$)
- V : シリンダ内圧油の体積 (cm^3)
- B : 圧油の体積弾性係数 (kg/cm^2)

(4), (5)式をラプラス変換すると

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{C \cdot \frac{V}{B} + M \cdot L}{2\sqrt{A_p^2 + CL} \sqrt{M \cdot \frac{V}{B}}} \\ \omega_n^2 &= \frac{A_p^2 + CL}{M \cdot \frac{V}{B}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

自励振動を発生しないためには等価粘性減衰比率 ζ が正でなければならない。

(7)式の右辺において C を除く項はすべて正でパッキングには無関係に設計条件より決められるが、 C は前述のとおりパッキングの選定により変わりうるものである。

図5は C との関係を表わしたもので、これによると自励振動の発生限界は $C = -177$ のところに存在し、これ以上の値では振動は現われない。一般の布入ゴムV形パッキングをこの条件で使用すると C は約 -380 、合成ゴムU形パッキングの場合は約 -250 であり使用をさげなければならない。これに対し今回採用した特殊形テフロンパッキングはほぼゼロであることを実験で確認しており、これにより自励振動の防止を図っている。

3.3 かごわくの構造

大形のかごわくで留意すべきことは次の諸点である。

- (1) たわみ量を規定以下に押えて、走行特性およびかご室のひずみに影響を与えないように考慮する。
- (2) 計画重量に合致するよう簡潔な軽構造とする。
- (3) 輸送、搬入、組立てなどを検討し、長尺品、重量物、幅広い部品を分割構造とする。

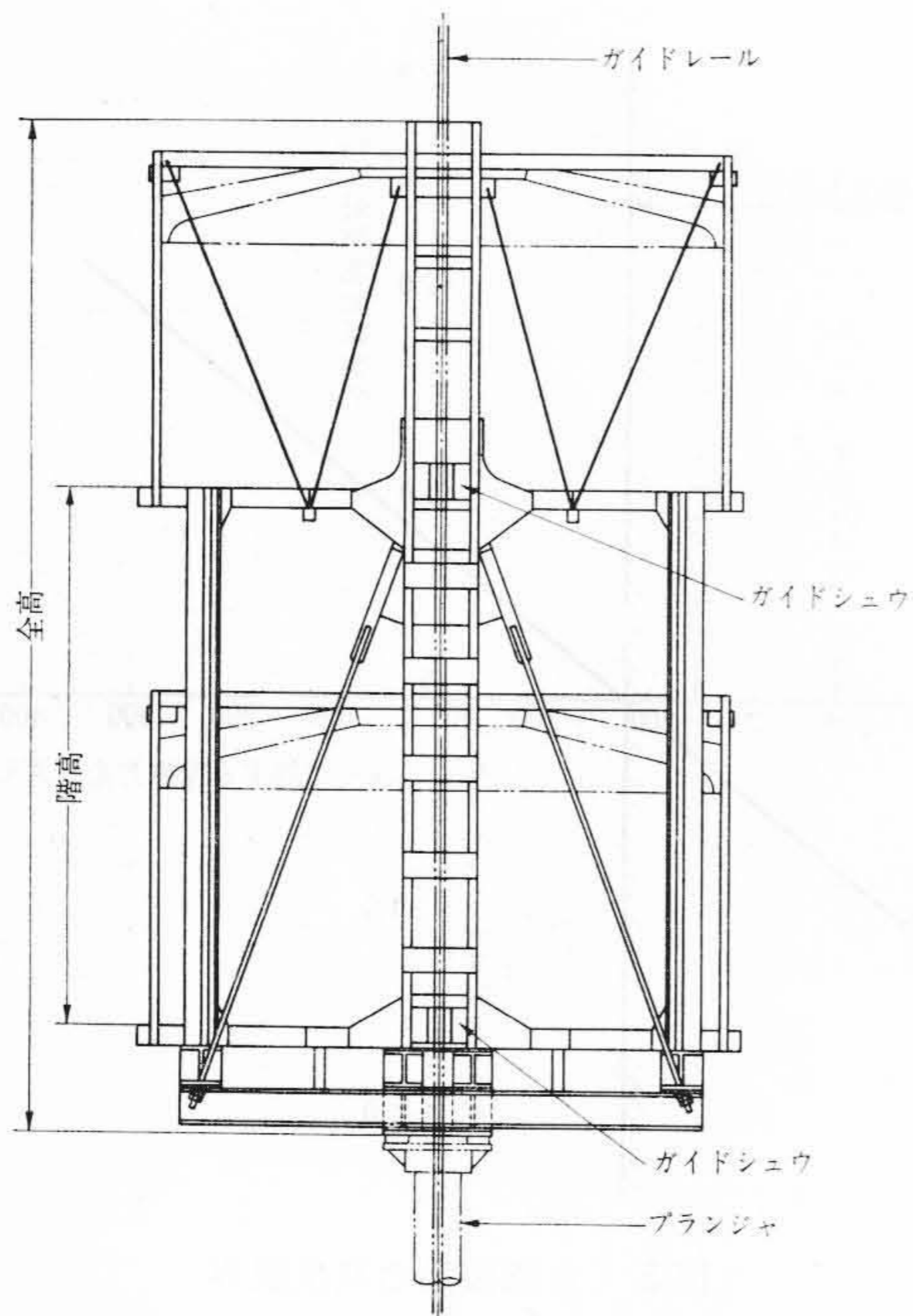


図6 かごわくの構造
Fig. 6. Car-frame Structure

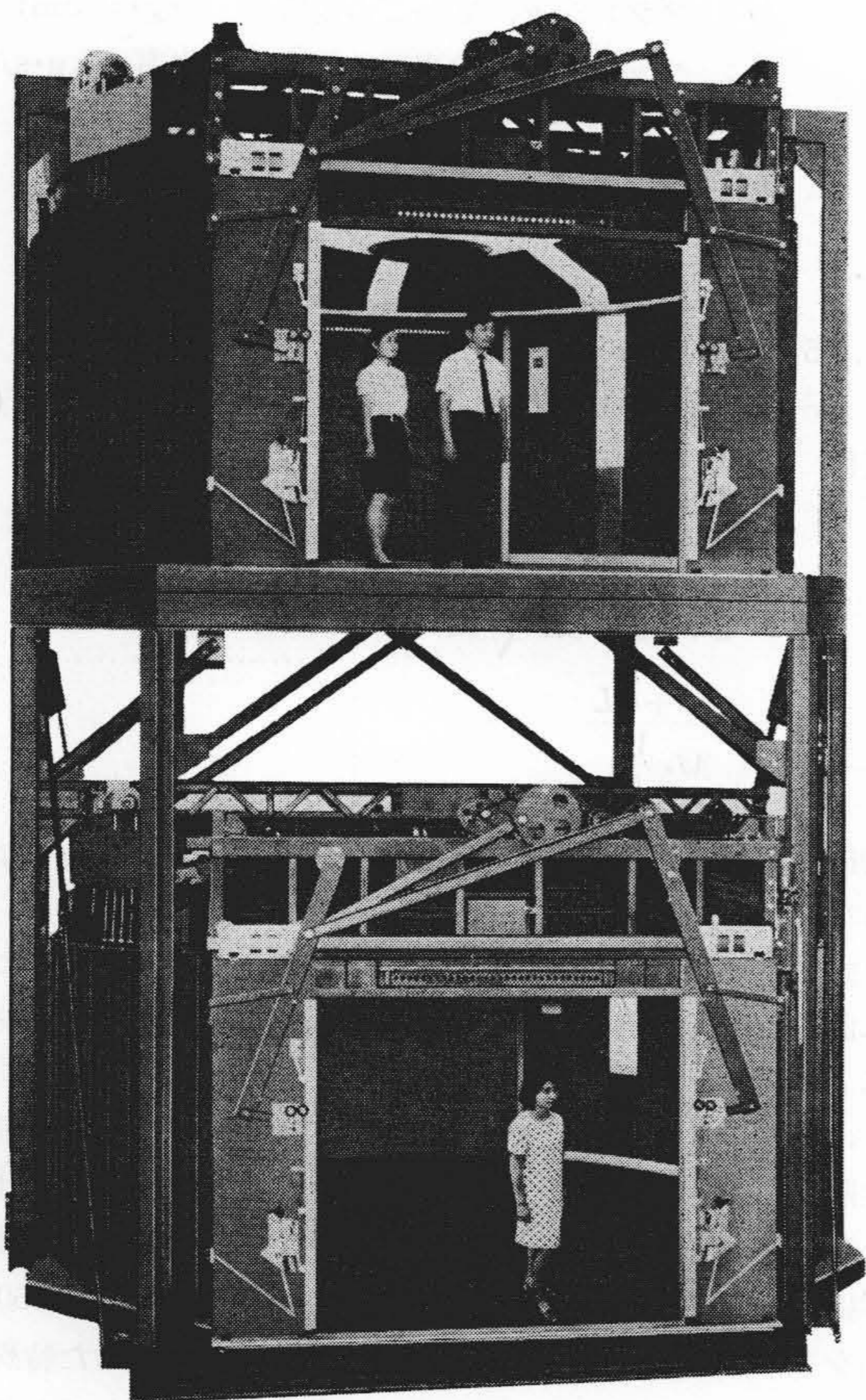


図7 工場完成時のかご
Fig. 7. Exterior of Car-frame

図6はこれらの条件をみたして設計したかごわくの構造を示したものである。図7は工場完成時のかごである。

かごの全重量(かご自重+積載荷重)はこれをプランジャ支持点で受け、偏心荷重などによる転倒モーメントはガイドシューによりガイドレールに保持され安定した姿勢を保つ構造になっている。

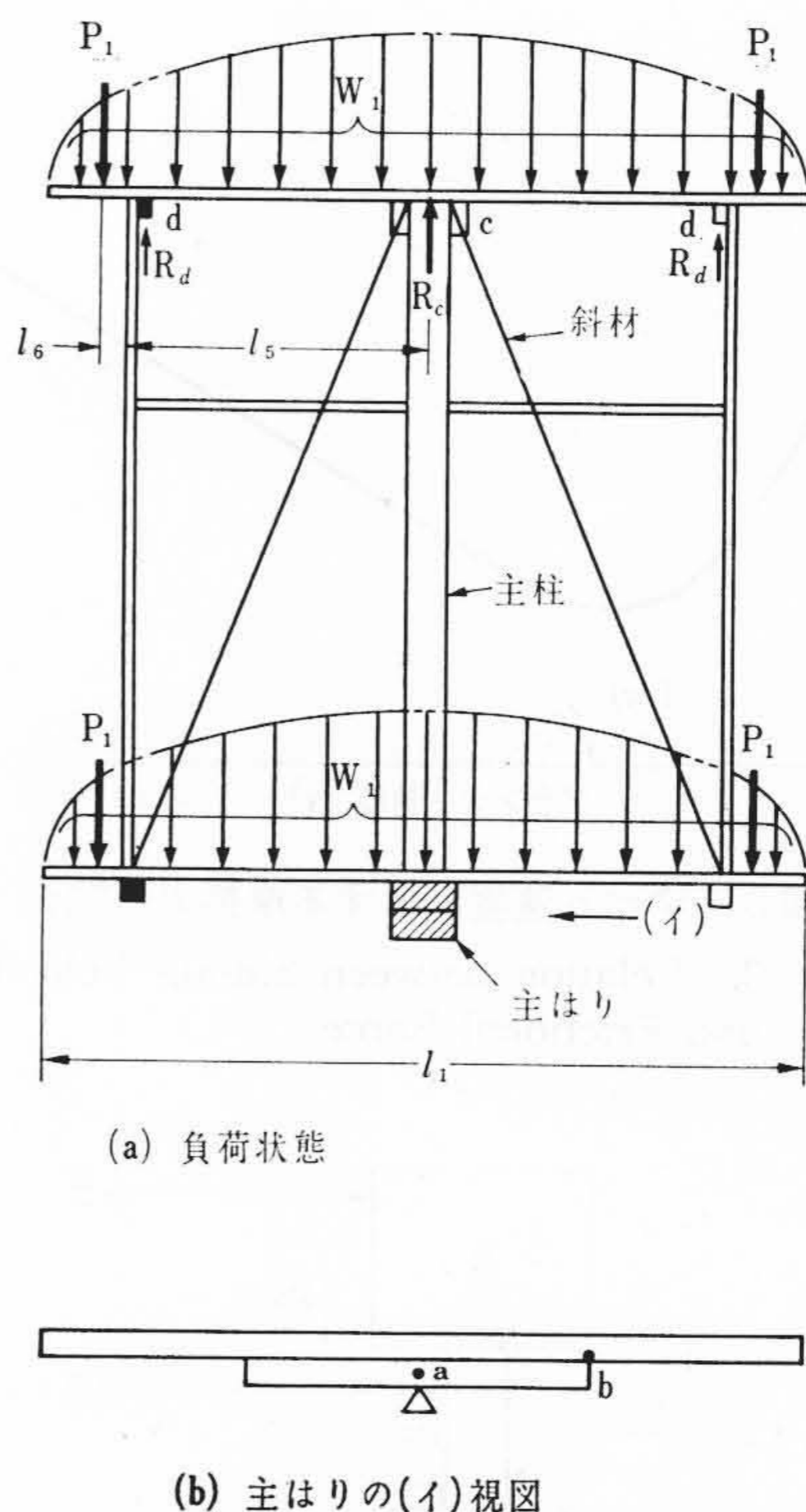


図8 かごわくに作用する負荷状態
Fig. 8. Loaded Condition of Car-frame

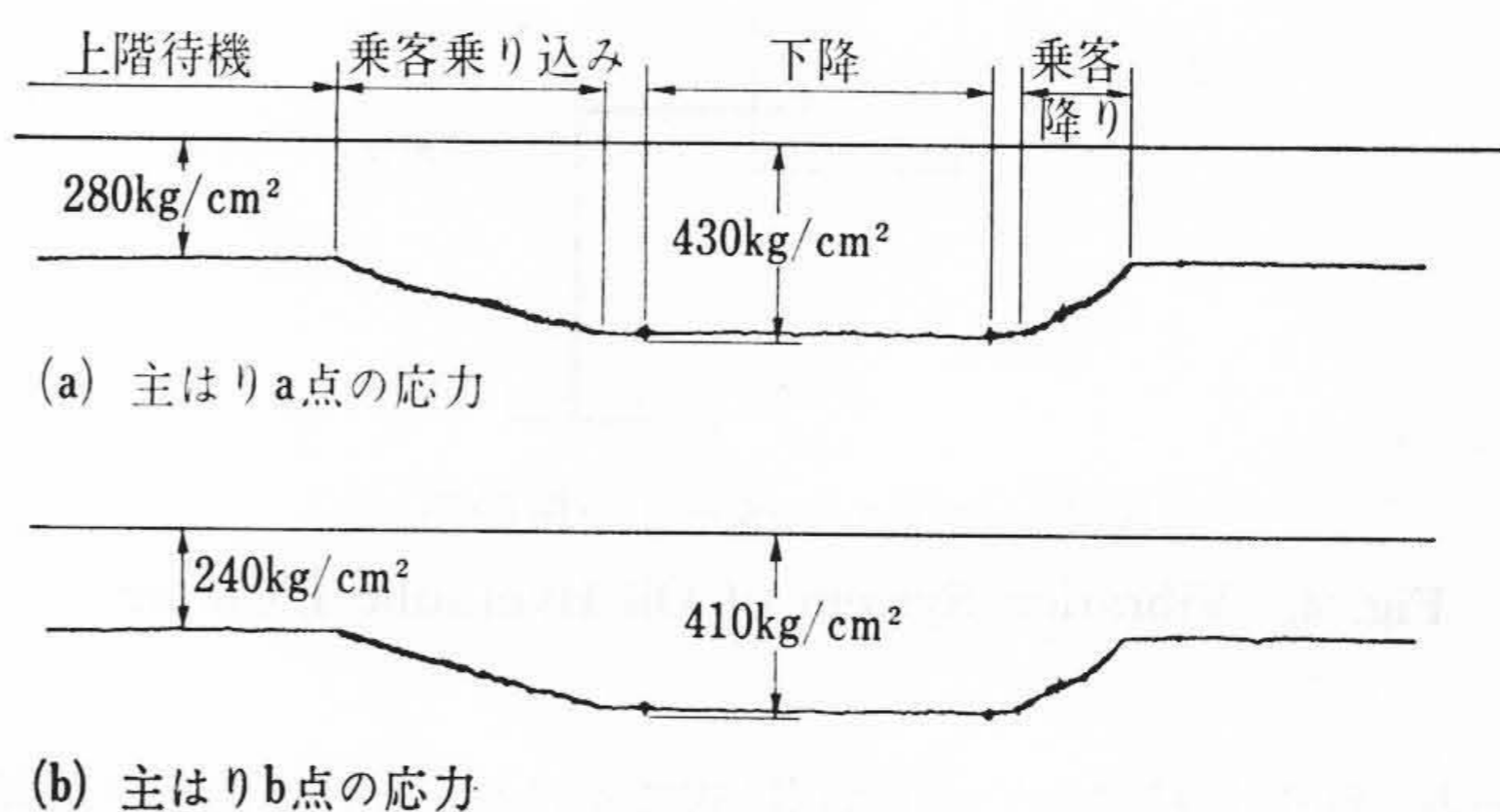


図9 主はりの応力測定結果
Fig. 9. Measuring Results of Stress in the Plank

かごの定員は法規に定められ、(8)式で算出される⁽²⁾。

$$N = \frac{(A_1 - 3) \times 600 + 1,300}{65} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、N: 定員 (人)

A_1 : かご室の内法床面積 (m^2)

日立館のかごは床面積が $27.4 \times 2 = 54.8 m^2$ であり、これから算出される定員は $245 \times 2 = 490$ (人) となる。館内においては、乗降時の混雑、あるいは乗客の心理的圧迫感をさけるために490人分の床面積について、特例として $130 \times 2 = 260$ (人) というじゅうぶん余裕のある定員を採用しているが、かごわくの強度は法定定員490人から定まる積載荷重に基づき計画されている。図8はかごわくに作用する負荷の状態を示すものでc, d点の反力 R_c, R_d は(9), (10)式で与えられる。

$$R_c = \frac{W_1(l_5 - 0.2122l_1) - 2P_1l_6}{l_5} \dots \dots \dots (9)$$

$$R_d = \frac{W_1 + 2P_1 - R_c}{2} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 W_1 : 上かご自重+上かごの積載荷重=下かご自重+下かごの積載荷重 (kg)

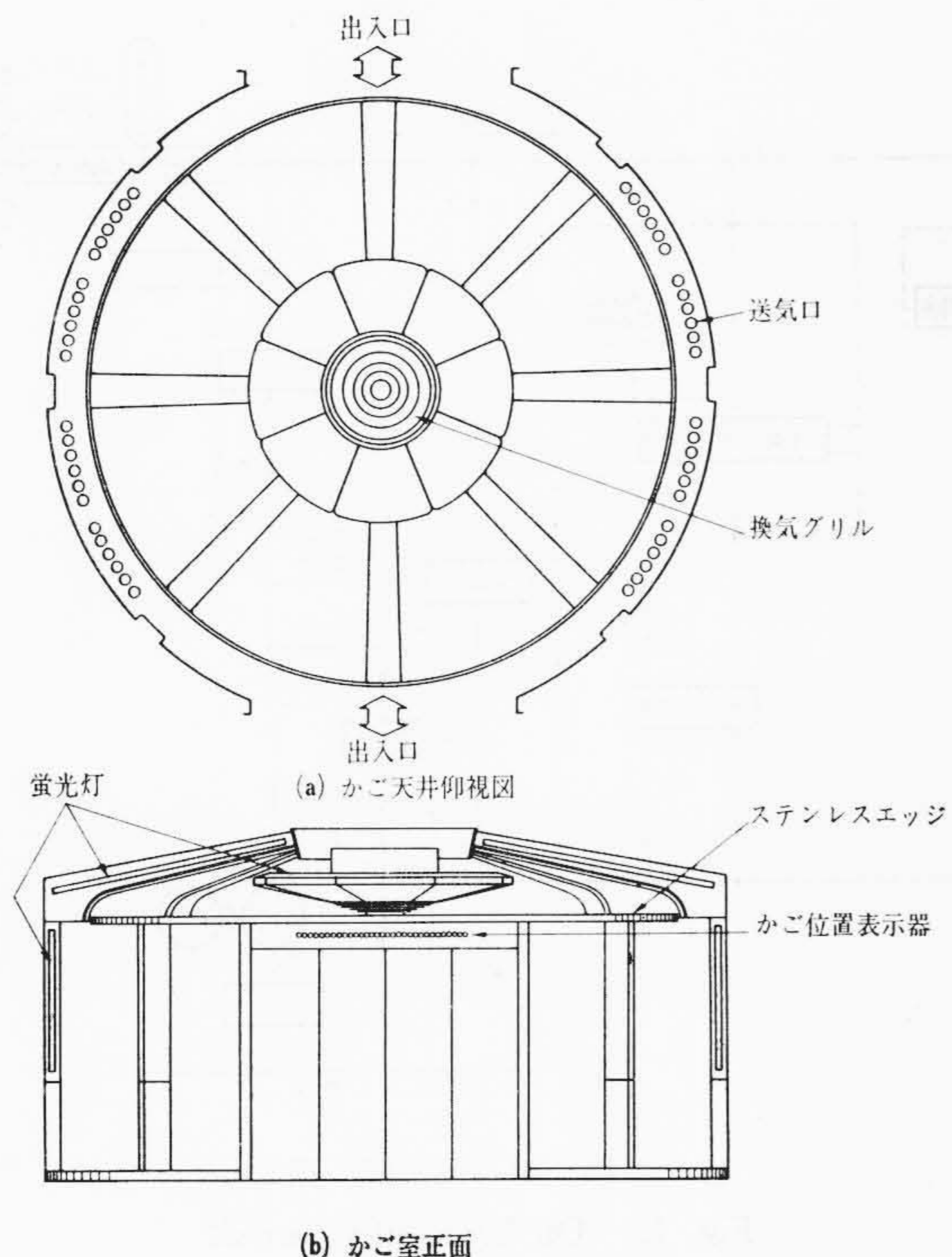


図 10 かご室の意匠
Fig. 10. Interior Design of Car

P_1 : ドアおよび開閉装置重量 (kg)

法定定員を積載荷重として、各強度材の安全率は法規に定められた値以上に設計されている。

図 9 は現地における測定結果の一例として、主はりの a 点および b 点における応力を示したものである。これから算出される安全率は約 10 を有し、じゅうぶんな強度である。

一方、主はりのたわみおよび斜材の伸びは、かごわくの変形に大きく影響すると考えられるので、たわみ 1/1,200、伸び 1/4,000 以内に設計した結果、変形によるかごのきしみはまったく認められず、この種特殊な構造による設計上の問題を解決している。

4. かご室

かごの形状は、館内のレイアウトに最もよく適合する合理的な円形状を呈し、内径 6 m である。

このように従来にない大形のかごに対して観客の期待感がいっそう深められるよう、各所に細心の配慮が払われている。

意匠は、大形のかごとして均衡のとれたものであることを主眼としており、館のふんい気との調和を図るよう計画した。これに作業性、輸送、搬入、組立てなどの製作上の検討を加え、さらに日立万国博本部の意向を取り入れて図 10 に示す意匠にまとめた。図 11 は完成したかごである。

4.1 天井と照明

かご室における照明は意匠上最も重要な部分であり、天井の構造と一体不可分のものである。中央の花弁状照明と、これから周辺に放射する直線照明は躍動感を強調したものであるが、天井の分割構造を容易にする機能をも備えたものである。

室内の明るさは、スカイロビーのエレベータホールよりも明るい平均的照度 900 ルクスを目標とし、圧迫感のない明るいふんい気になっている。

なお、光源には一般蛍(けい)光ランプのほかに、カラー蛍光ランプが並設されており、カラー蛍光灯の点灯による演出ができるよう考慮されている。

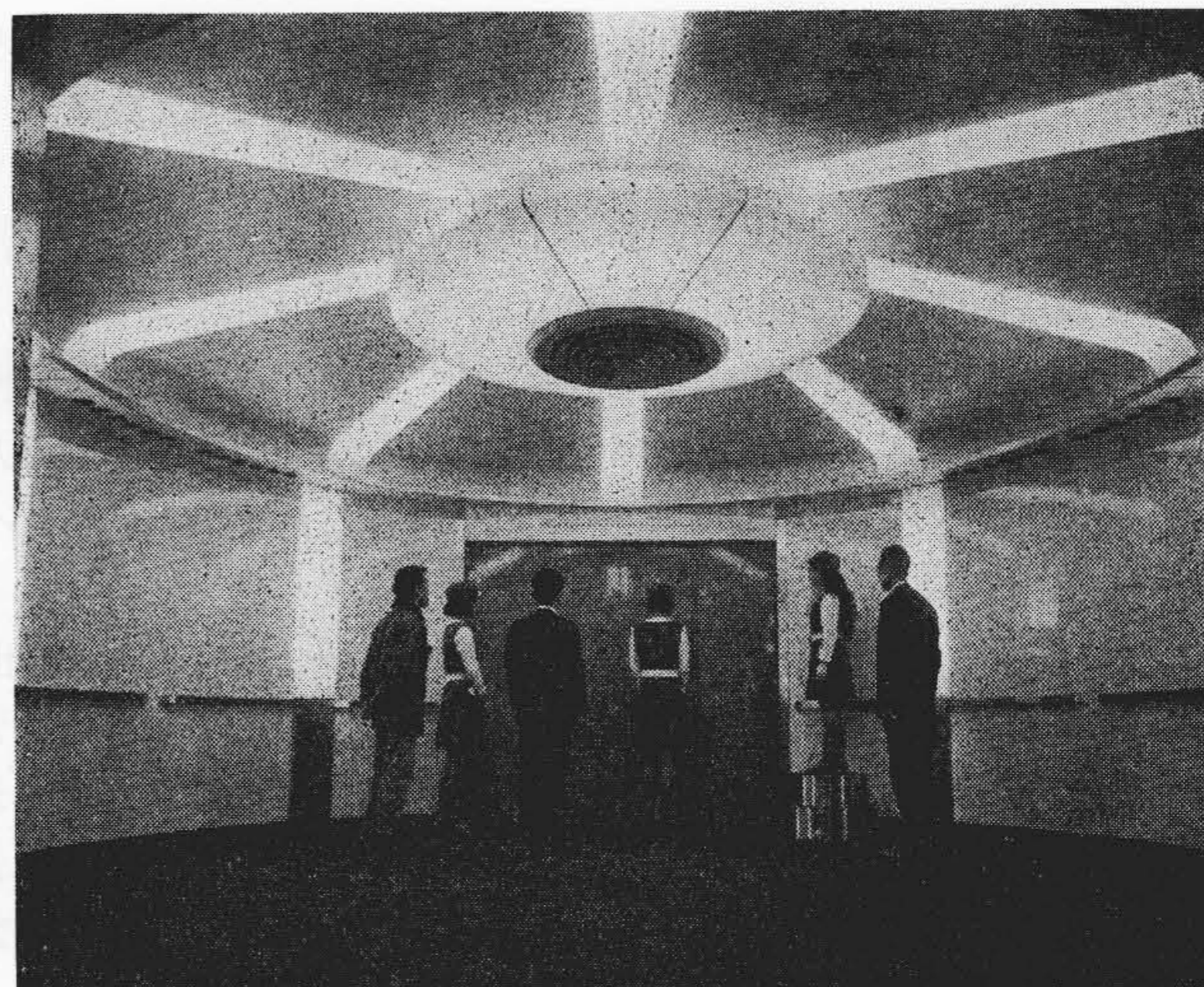


図 11 かご室
Fig. 11. Inside View of Car

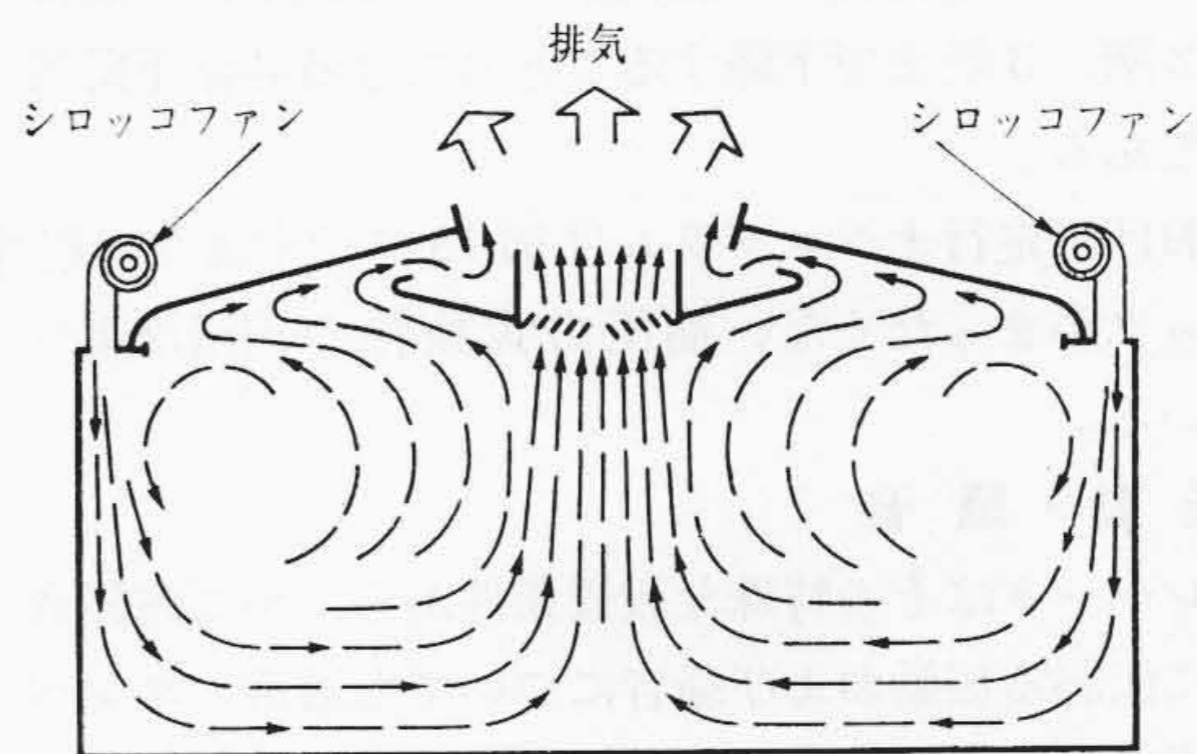


図 12 かご室内の空気流分布
Fig. 12. Ventilation in the Car

表 2 かご室の色彩とランプの組合せ

Table 2. Coloring and Lighting in Car

かご	内 装 色	照明用蛍光ランプ	カラー蛍光ランプ
上 かご	クリームイエロー	白 色	ピ ン ク
下 かご	ライトグリーン	昼 光 色	グ リ ー ン

4.2 かご位置表示器

二つの階を往復するかごの位置表示は、一般には上階と下階の 2 個のレンズで点灯表示されるが、日立館のかご位置表示器に対しては出入口上部に 30 個のレンズを配置して点灯の時間間隔を短縮して、高速エレベータの走行感を盛り込んでいる。

4.3 かご室の換気

かご室には運転者も含めて 130 人の乗客が乗り込むため、換気についてはじゅうぶんな考慮を払っている。

喫煙のない室内における必要空気量は $25.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{人}$ ⁽³⁾とされており、定員満載時のかご室内は、 $25.5 \times 130/60 = 55.25 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上の空気の供給が必要とされる。かご室の換気は、風量 $80 \text{ m}^3/\text{min}$ のシロココファンにより強制換気が行なわれ、必要空気量が供給されている。図 12 はかご室の空気流分布を示したもので、かご室の周辺部から強制送風される空気は室内を流動して天井中央部から排出される。この際、蛍光ランプの放熱も排気とともに排出され、蛍光灯の発熱が室内にこもらないようにしている。

4.4 上下のかごの識別

かご室の塗装は傷つきにくいエポキシ系塗料で行なわれている。表 2 に示す組合せにより上下それぞれ異なる色彩の塗装と照明

が行なわれている。これにより上下のかご室のふん囲気をはっきり区分けし、2階建てであることが識別できるようになっている。

5. 油圧装置およびその特性

5.1 油圧回路およびパワーユニット

エレベータの速度制御にはすでに数百台に適用し、その走行特性の円滑さと安定性にじゅうぶん実績をもつ日立製作所独特の制御方式を採用している。図13は油圧回路、図14はこれを組み込んだパワーユニットである。

上昇回路にはポンプを駆動して定格速度に必要な一定流量を吐出させ、加減速時これを制御弁で絞り、残余の流量をバイパスしてタンクへ戻すブリードオフ回路を用いている。下降は自重降下方式でプランジャのささえるかごおよび乗客の重量に相当した圧力でシリンダの油がタンクへ戻される。加減速時は上昇用と一体となった下降用流量制御弁の開度を連続無段階に変えることにより最適な加速度が得られる(特許出願中)。制御弁は全開の状態では下降定格速度を得るよう決めてある。

停電などの非常な場合には機械室において簡単に手動操作することにより2階、3階まで下降することのできる非常下降用操作ボタンを設けてある。

現地における走行オンシログラムは図15に示すように起動、停止時のショックがまったくない油圧方式独特の円滑な乗りごちが得られている。

5.2 振動・騒音

このエレベータはその特殊な設置条件から、かご内騒音とともにホール側に伝わる振動および騒音についても通常のエレベータに劣らない考慮が必要とされる。

上昇時の最大の騒音源であるパワーユニットの運転音を低減するためポンプには低騒音、低脈動のスクリー形を採用している。下降時は従来にない大流量を制御するため、下降回路には多段絞り機構を設けて各段における差圧を小さくし、絞り部分から発生するキャビテーション騒音の低減を図っている(特許出願中)。さらに上昇、下降の共用回路には膨張空洞形マフラを設置し、これにより圧力脈動を吸収させて騒音の発生を防止している。

走行中のケーシング内騒音およびホール側の騒音とも、ほとんど暗騒音に近い状態となり、きわめて静粛なエレベータになっている。

さらに振動防止策として前述のとおり自励振動を起こさないパッキングを使用するとともにシリンダおよびパワーユニットとの間にはゴム袋式アキュムレータをそう入して低次の油圧振動を吸収⁽⁴⁾させている。この結果走行オンシログラムに示すように走行中の振動はまったく認められない。

この建物にはシミュレータ装置をはじめエレクトロニクスを駆使した装置が多く、これらが外的振動伝播(ば)によって異常動作を起こすようなことがあってはならない。このためシリンダおよび配管支持部分など振動を伝える部分には防振構造を使用し、エレベータ走行による振動伝達を防止している。

6. 安全性

6.1 油圧機器の安全率

油圧式エレベータについてシリンダなど油圧機器の強度安全率は4以上と規定されており、JISでは最高使用圧力の1.5倍で耐圧試験を行なうよう定めている。これに対し今回はエレベータの特殊性を考慮し、規定をはるかに上回る安全率に設計するとともに単品ごとに最高使用圧力の4倍、現地据付完了後は2倍の耐圧試験を行ない安全性を確認している。

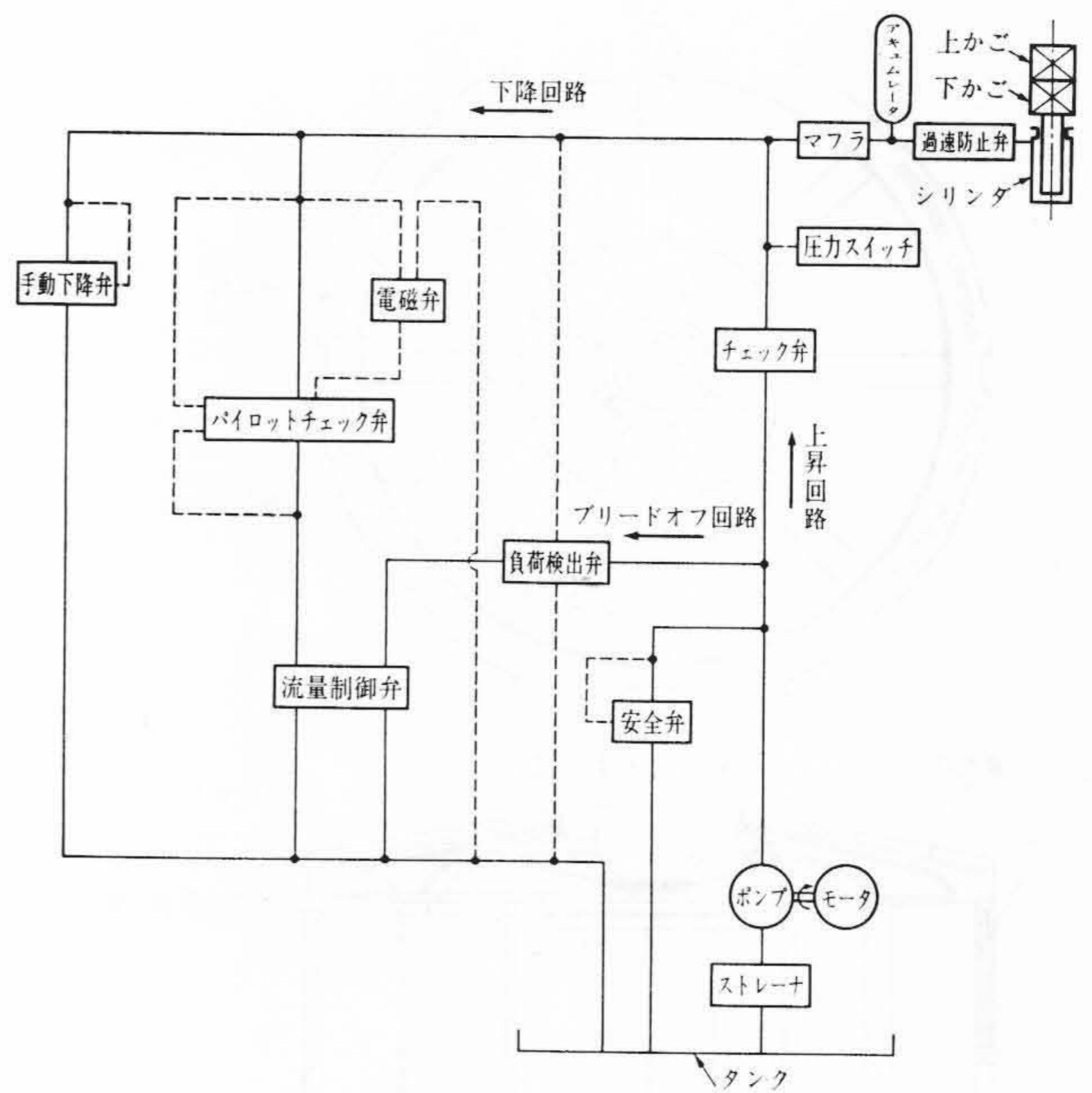


図13 油圧回路

Fig. 13. Oil Hydraulic Circuit

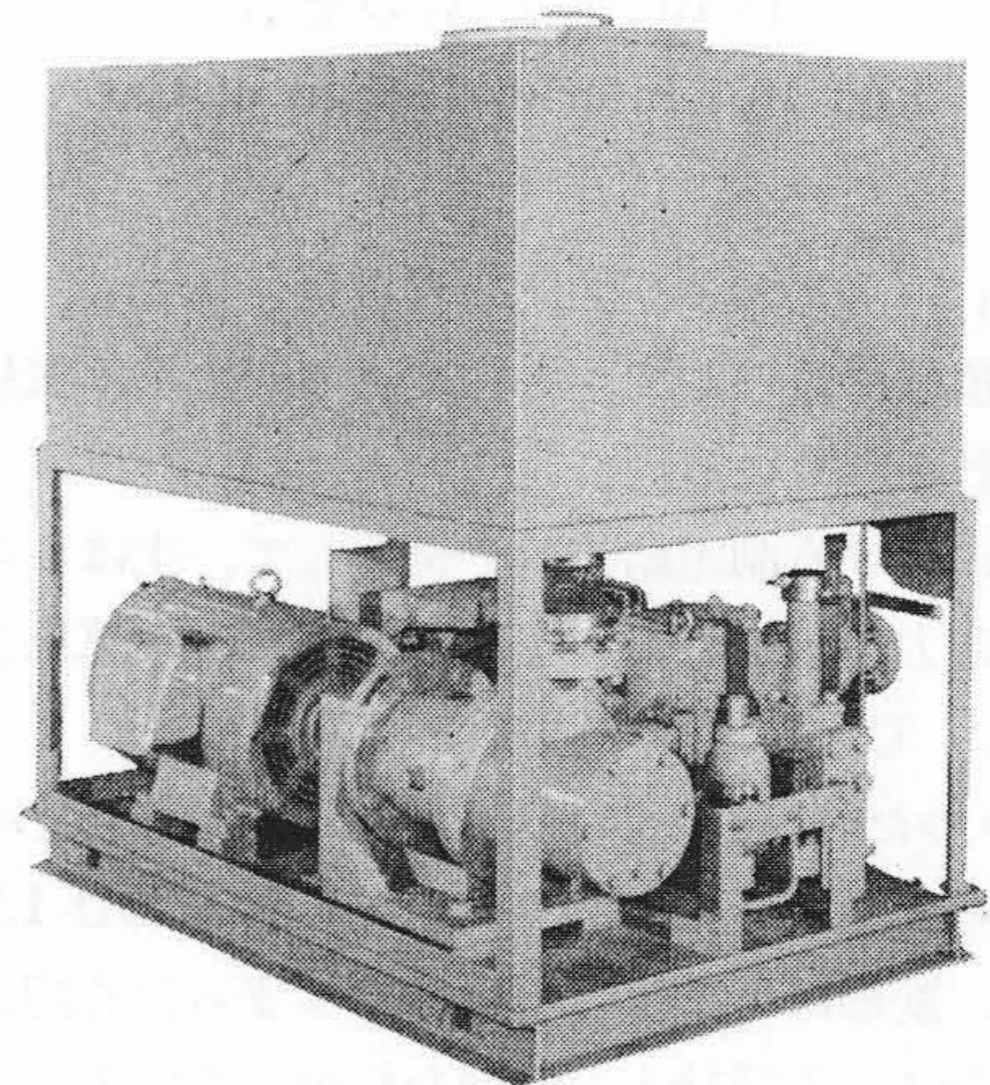


図14 パワーユニット

Fig. 14. Hydraulic Power Unit

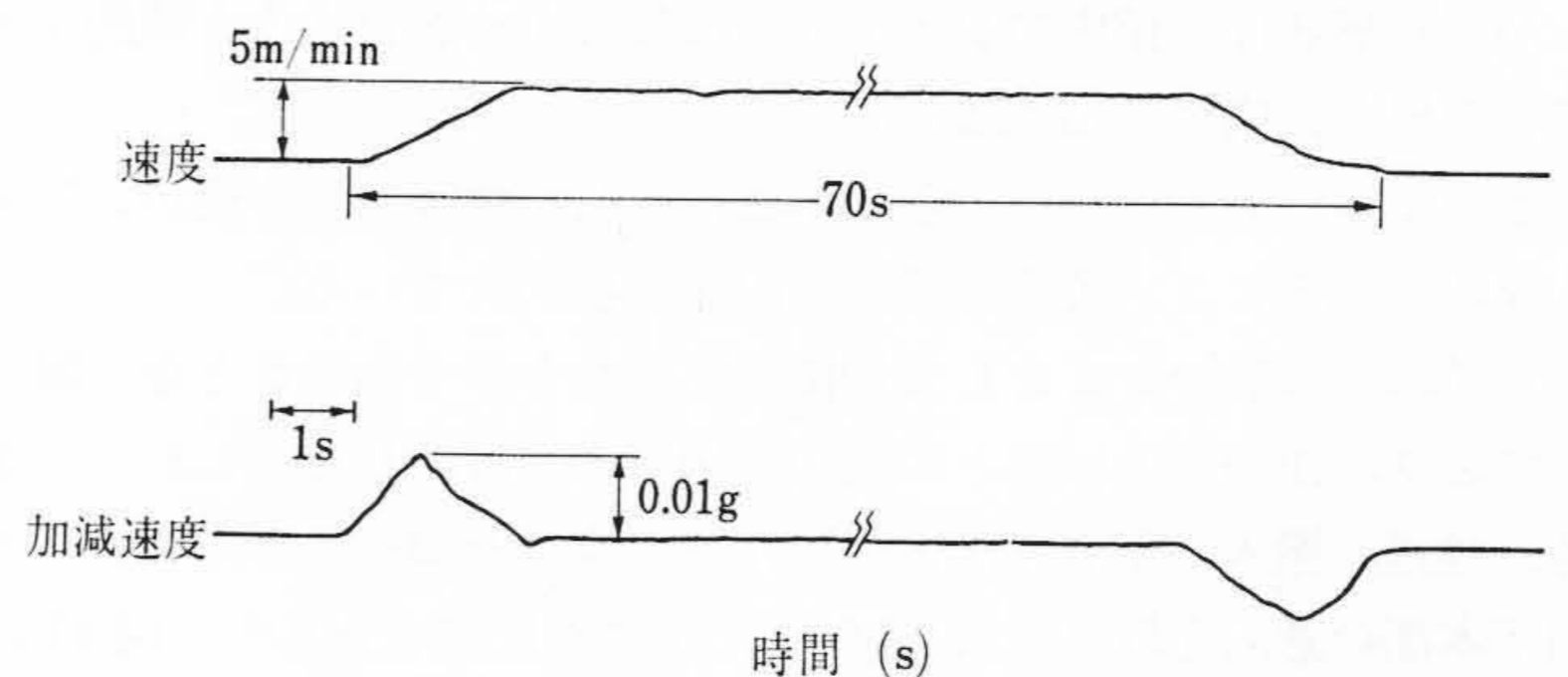


図15 全負荷下降時の走行特性

Fig. 15. Characteristic Curve in Down Running at Full Load

6.2 過速防止弁

一般に油圧エレベータの下降は自重降下式であるため、速度は圧力と制御弁の最大開度により機械的に決まる。このためこの種油圧式エレベータでは過速降下のおそれはない。しかしこのエレベータは前記のように超大形特殊品であることから予測しがたい原因により、たとえば配管の一部が破損した場合などによる過速降下についても配慮することが望ましい。その解決法として一般のロープ駆動式エレベータでは過速降下時にガイドレールをつかんで、かごを停止させる安全装置がある。しかし今回のように総重量が数十トンに

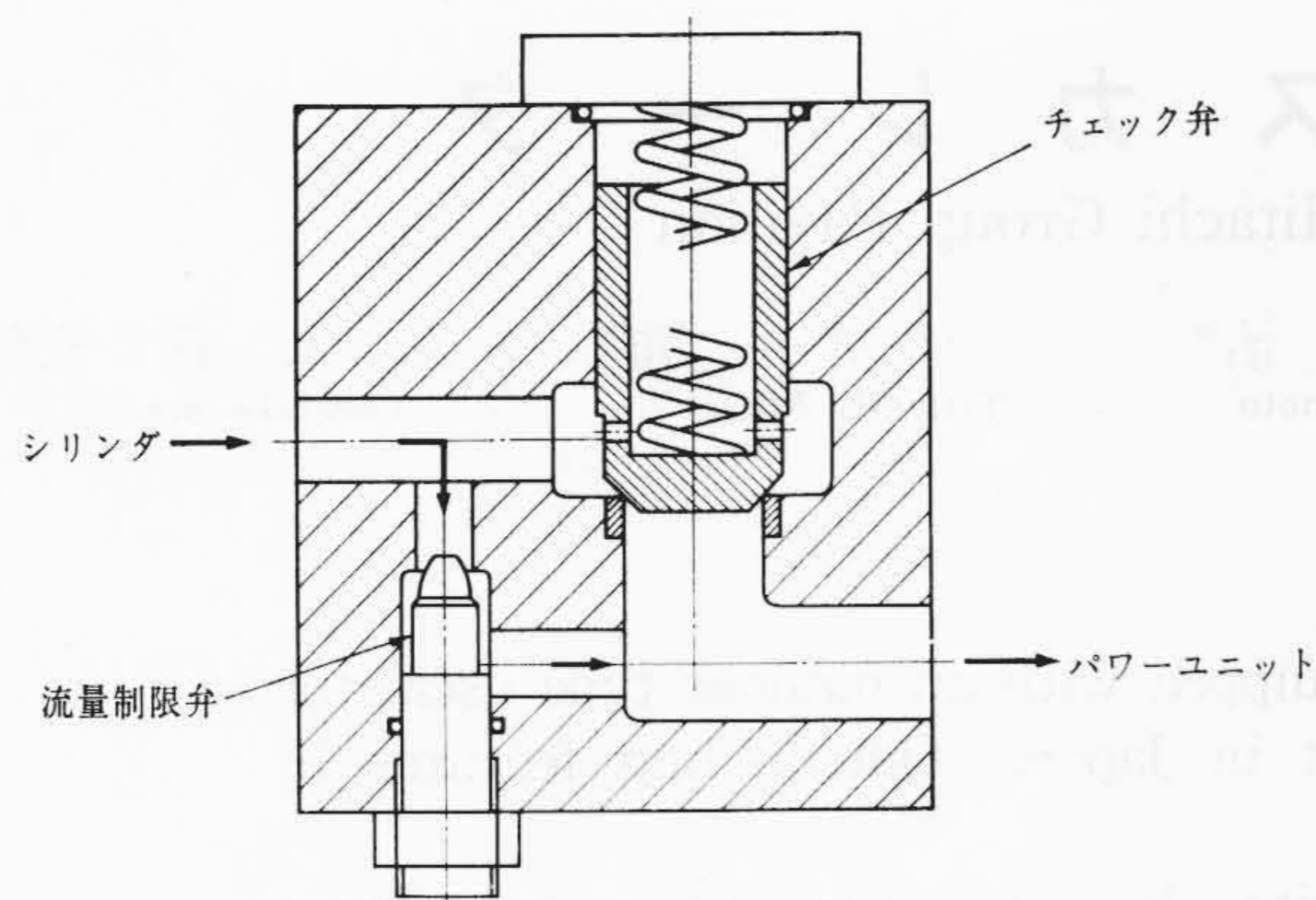


図 16 過速防止弁の構造
Fig. 16. Valve Against Overspeed of Car

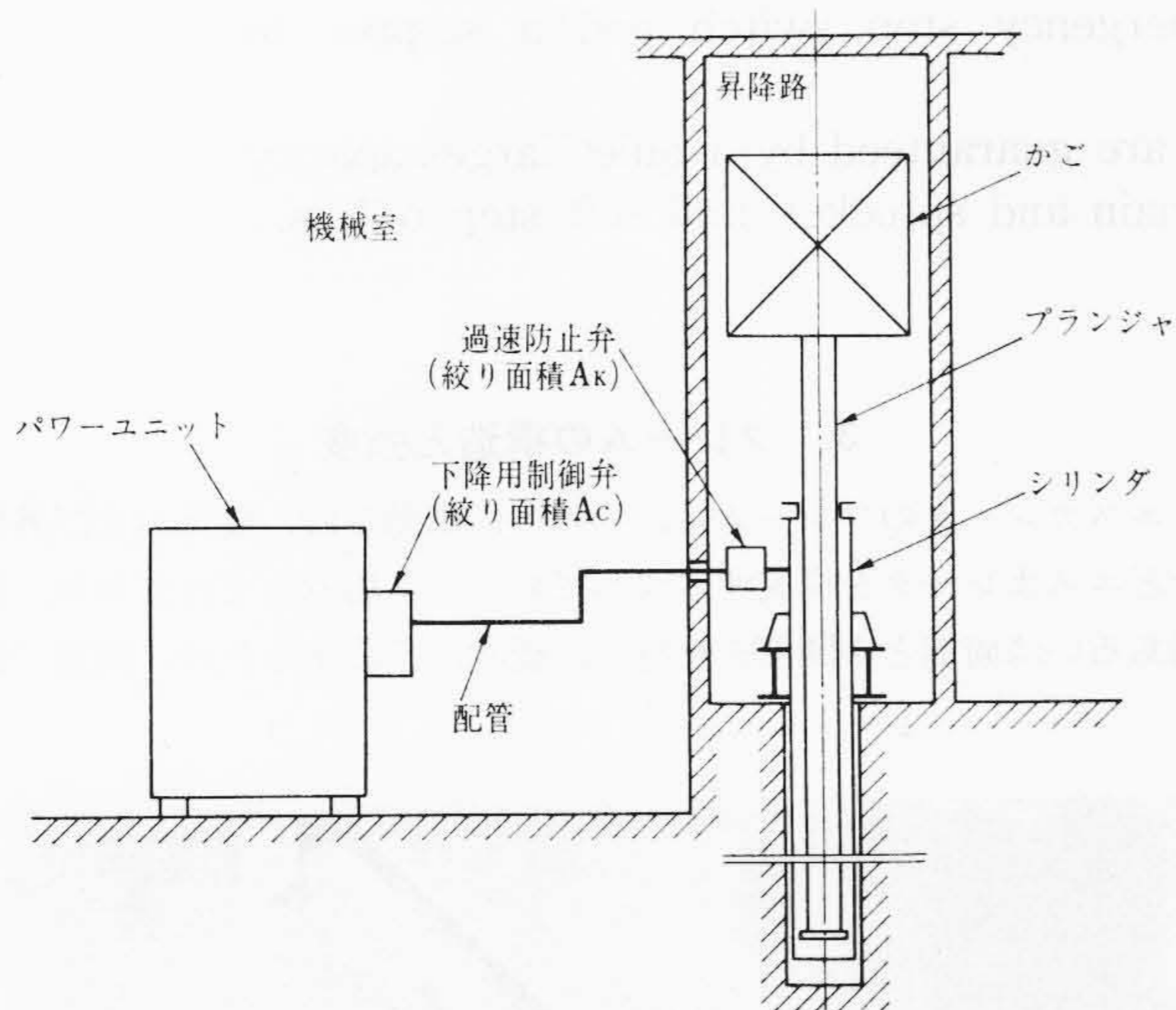


図 17 過速防止弁の配置
Fig. 17. Disposition of Valve Against Overspeed of Car

及ぶ場合この方法では安全装置が想像以上に大形化するうえ、動作時に建物は異常に大きな衝撃力を受けることになり、日立館の場合構造上極端に不利である。そこで建物にはまったく力を加えず、油圧的に過速降下を防止できる過速防止弁を新たに開発した(特許出願中)。図 16 は過速防止弁の構造、図 17 は配置例を示したものである。

エレベータの下降速度は流量に比例し、その流量は(11)式に示すことができる。

$$Q_c = \left\{ 1 - \frac{1}{\left(\frac{A_c}{A_K}\right)^2 + 1} \right\} Q_x^2 \dots\dots\dots (11)$$

- ここに、 Q_c : 定格下降時の流量 (lit/min)
- Q_x : 過速防止弁と下降用流量制御弁との間で漏れが生じた場合の流量 (lit/min)
- A_K : 過速防止弁の絞り面積 (cm^2)
- A_c : 下降用流量制御弁の絞り面積 (cm^2)

これより A_K, A_c を適切に選定しこの弁と下降用制御弁との間で漏れが生じたときの速度を任意に押えることができる。定常走行時の特性ならびに安全性の両面から、 $A_K = A_c$ とおいて

$$\sqrt{2} Q_c = Q_x \dots\dots\dots (12)$$

と決め、異常時の速度を定格速度の約 1.4 倍に押えている。

6.3 圧力スイッチ

日立館の運営スケジュールによると、このエレベータには常に総

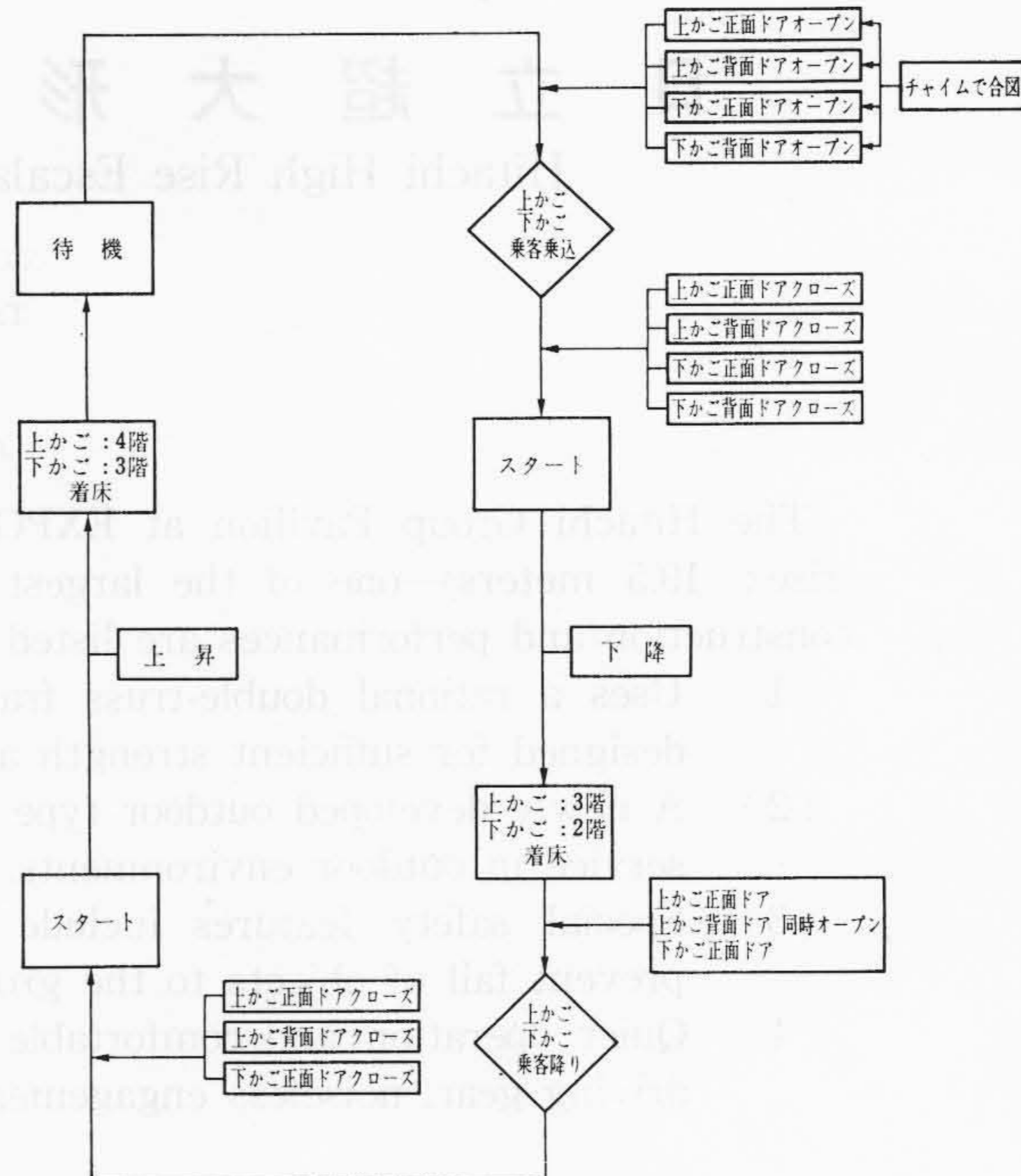


図 18 エレベータ運転スケジュール
Fig. 18. Operating Schedule

定員 260 人が乗ることになるが、なんらかの理由によりこれを大幅に越える乗客が乗り込んだ場合には安全性を確保し、機器を保護するため圧力スイッチを設けている。これは定格積載時圧力の 125% を検出し、これが動作すると運転盤に重量超過を明示するとともに定格積載量になるまで運転不能となる。

7. 運転方式

エレベータは日立館全体を合理的に運営するため 2 階建てとし、出入口はおのおの 2 箇所という特異な形がとられており、図 18 に示すダイヤグラムにより運転される。上かご、下かごの正面側出入口にそれぞれ 1 名ガイドがつき、背面側はホール出入口にそれぞれガイドがついている。各出入口ドアの開閉は正面側はかご内運転盤、背面側はホールのキースイッチにより操作される。昇降操作は上かご正面側の主運転盤のみで行なわれ、運転盤上の表示灯により各出入口ドアがすべて閉じたことが別々に確認されたのち、昇降操作にはいるようになっている。なおこの表示灯の確認を誤って昇降操作しても動かない回路になっている。2 階では観覧ルートが正面側より回るようになっているため背面側は開かれない。

8. 結 言

以上、日立館納め超大形油圧式エレベータの概要について述べた。このエレベータの特殊仕様については細心の検討を行ない解決した結果、安全性および走行性能ともじゅうぶん満足すべきものが得られ、日立館運営上の重要な交通機関として所期の目的を果たしている。

今回の完成により特殊品のみならず一般品にも適用できる新たな技術を多数獲得した。

参 考 文 献

- (1) 高橋: 日立評論 45, 950 (昭 38-6)
- (2) 昇降機法令解説 46 (昭 40-11, 社団法人, 日本エレベータ協会)
- (3) 井上: 空気調和ハンドブック 61 (昭 32-10, 丸善株式会社)
- (4) 一柳ほか 2 名: 日立評論 49, 990 (昭 42-10)