

世界最高速 1,010 m/min エレベーター

World's Fastest Elevator (1,010 m/min)

中川 俊明

NAKAGAWA Toshiaki

小原 英也

KOHARA Hideya

関本 陽一

SEKIMOTO Youichi

中垣 薫雄

NAKAGAKI Shigeo

高速かつ快適な乗りごちのエレベーターを目指し、世界最高速である 1,010 m/min の超高速エレベーターの開発を進めてきた。1,010 m/min の高速走行を実現するために、大容量巻上機を駆動するツインドライブ制御技術や、1,000℃ を超すブレーキ摩擦熱にも耐えるエレベーター非常止め装置などを開発した。また、400m 級の高揚程での耳詰まり現象を解消する気圧制御の開発にも取り組んできた。更に、ビルの高層化に対応して、シミュレーションによるロープの拳動解析と制振技術の開発を進めてきた。これら先端技術の集大成として、世界一の高さとなる 508 m の台北国際金融センタービルに当社製エレベーターが採用されることとなり、完成に向け急ピッチで建設が進められている。

We have developed a comfortable, ultrahigh-speed elevator with the world's fastest speed of 1,010 m/min. An elevator emergency safety device was developed that is capable of withstanding high temperatures exceeding 1,000℃ under high-speed operation at 1,010 m/min, and a twin-drive control technique for driving a high-power traction machine was adopted. An atmospheric pressure control technique was also developed to ensure riding comfort in high-rise buildings. In response to the trend toward increasingly tall skyscrapers, simulation analysis of rope vibration was performed to realize a vibration-suppressing control system.

These high-technology features were employed in an elevator installed in the Taipei Financial Center Building, which has a height of 508 m.

1 まえがき

508 m という世界一の高さを誇る台北国際金融センタービルの建設が、台北市内で急ピッチで進められている(図1)。

この高層ビルには、わずか数十秒間で地上から最上階まで乗客を運ぶ、世界最高速 1,010 m/min の当社製エレベーター



図1．台北国際金融センター - 建設工事が進んでいる台北国際金融センター。

Overview of Taipei Financial Center

表1．超高速エレベーターの基本仕様

Main specifications of ultrahigh-speed elevator

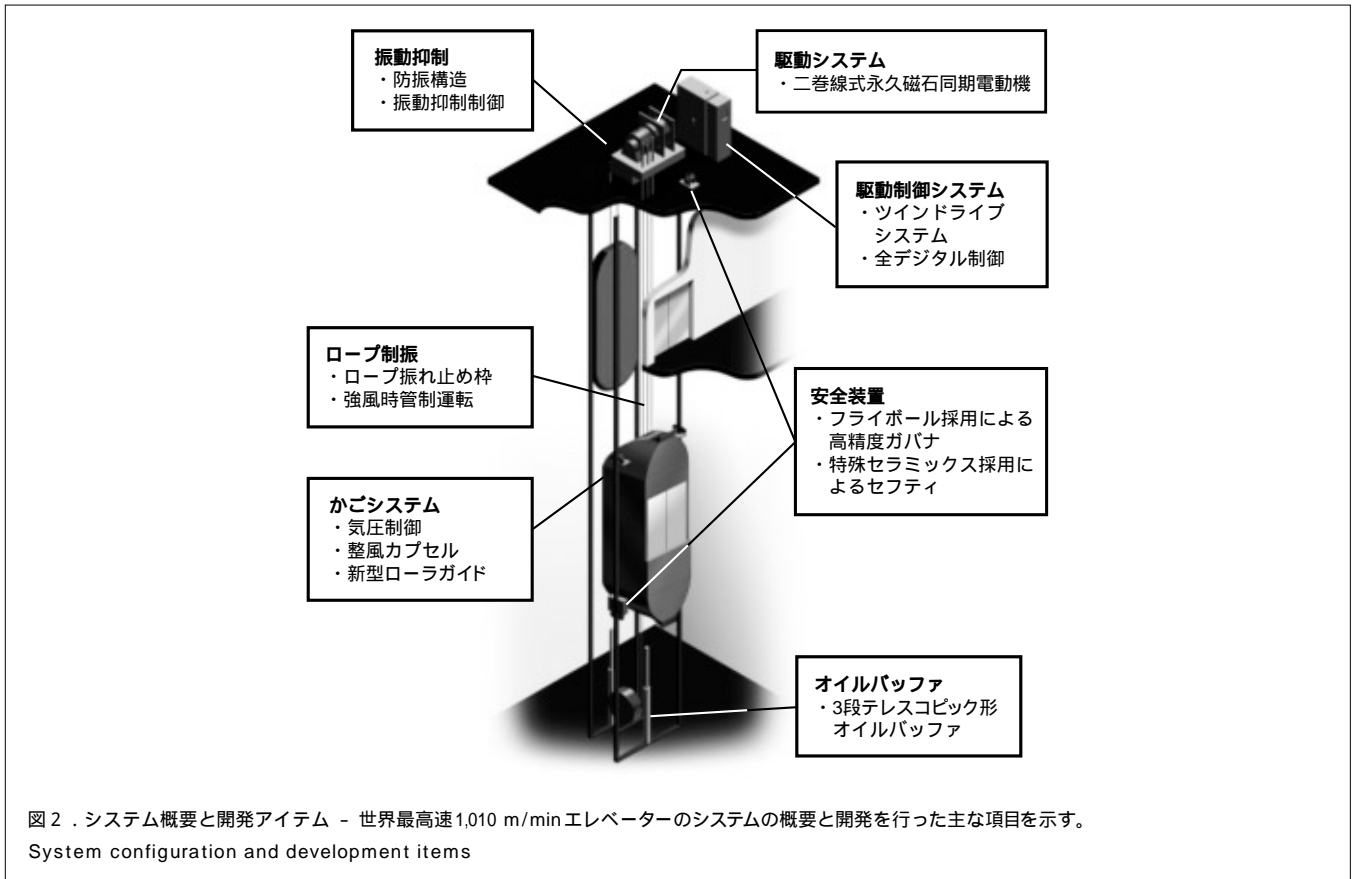
項目	仕様
乗車定員	24人
積載重量	1,600 kg
定格速度	上昇 1,010 m/min 下降 600 m/min
昇降行程	388 m

ター2基を含め当社製のエレベーター61台及びエスカレーター50台が据え付けられる。世界最高速エレベーターの主要諸元を表1に示す。従来のエレベーターの速度を大幅に上回る世界最高速エレベーター実現のため、当社は、過去数年間にわたり種々の研究開発を推進してきた⁽¹⁾。

主な開発アイテムは、次のとおりである(図2)。

- (1) 大容量の巻上機とツインドライブ制御装置から成る駆動システム
- (2) 高速走行時でも快適な乗りごちのかごシステム
- (3) 乗客と設備の安全を確保する安全システム

研究塔での試作機評価などを経て、現在これらの開発は完了し、その成果を盛り込んだ実機の完成を待つばかりとなっている。新たに開発されたエレベーター先端技術について以下に述べる。



2 駆動システム⁽²⁾

駆動システムは、大型の二巻線式永久磁石同期電動機 (PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor) を使用した高速巻上機と、大容量のインバータを並列に構成したツインドライブ駆動制御システムから成る。

2.1 巻上機

巻上機は定格出力180 kW級の大型のものであり、最大755 kN軸荷重に耐える。電磁振動を回避する特殊フレーム構造を採用するとともに磁石形状を最適化して、1,010 m/minでの定格速度運転及び加減速の領域でも、共振を伴わず静かな運転が可能である(図3)。

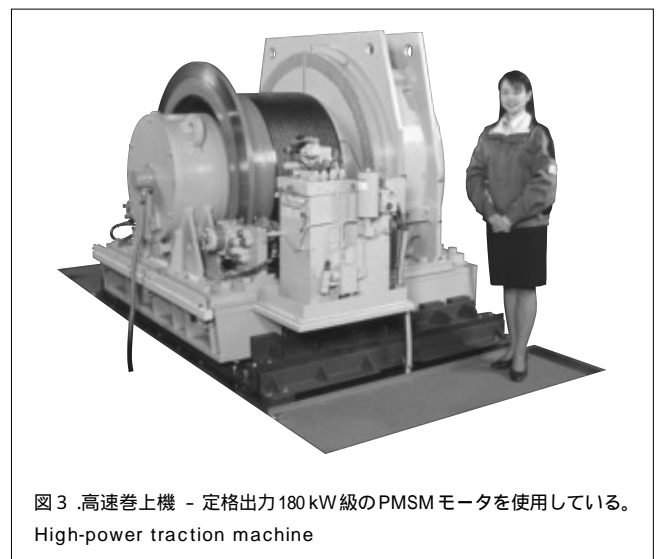
また、巻上機を支持するための二重多段防振構造を開発し、シミュレーション及び実験によって評価を行った結果、従来のほぼ2倍の振動絶縁特性を持つことが確認された。

2.2 駆動制御システム

制御装置は、大容量二巻線巻上機をドライブするために、独立したコンバータ/インバータを2系統制御するツインドライブ方式を採用している(図4)。

制御は、パワーエレクトロニクス専用に開発された高性能MPUのPP7による全デジタル制御を採用している。

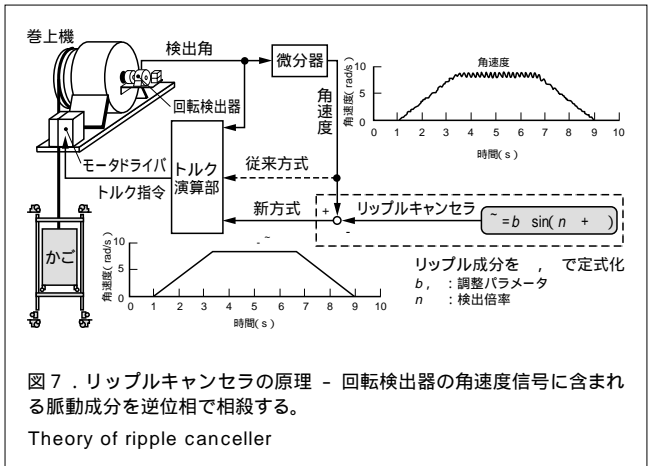
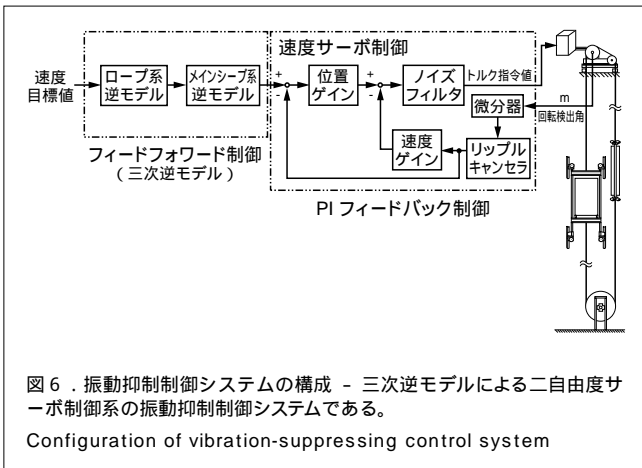
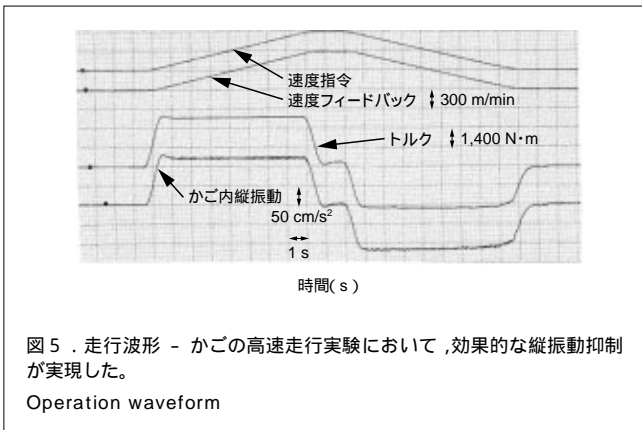
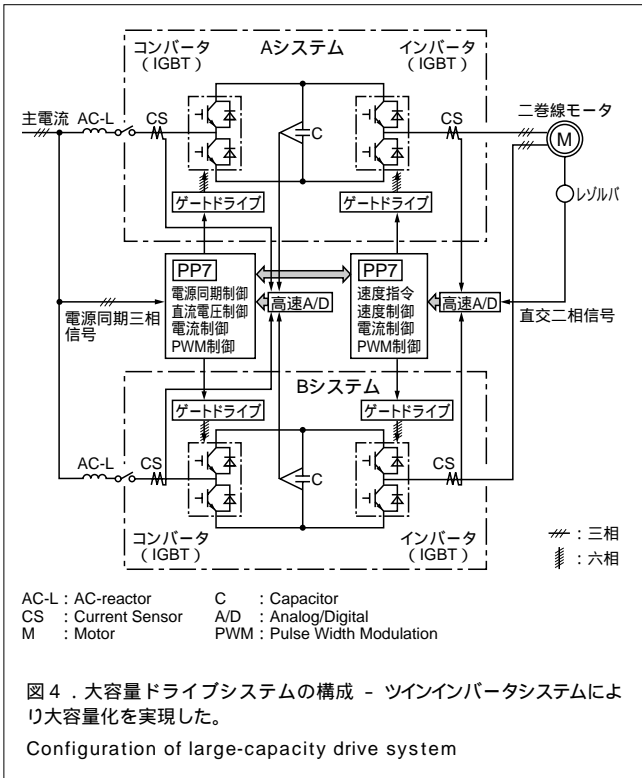
また主回路変換装置は、1,200 V - 600 A級のIGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)素子を6並列接続構成とし、



最大650 kWまでの出力を可能とした。この駆動システムでの走行波形を図5に示す。

2.3 振動抑制制御⁽³⁾

このエレベーターは昇降行程が長く高速であるため、加速度変動時に大きな弾性振動がロープに生じる。従来のPI (Proportional Integral) 制御による振動抑制にロープの弾性を補償する二次の逆モデルを追加して、三次逆モデルによるフィードフォワード補償を備えた二自由度サーボ系とし



た(図6)。その結果、ロープ弾性の影響を低減し、快適な乗りごちを提供できることとなった。

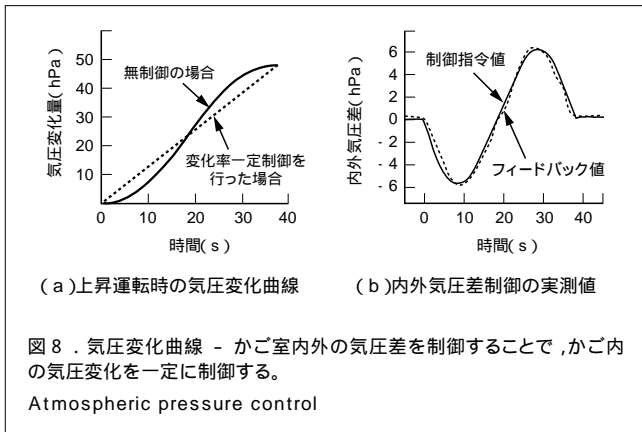
また、回転検出器の角速度信号には脈動成分を含んでいる。この脈動成分を近似した逆位相の正弦波で相殺するリップルキャンセラを開発した。モータのトルク脈動のうち、回転速度に比例して振幅が大きくなるトルクリプル成分を、回転数に無関係に除去することにより、高速運転時の乗りごちが飛躍的に改善された(図7)。

3 かごシステム

3.1 気圧制御⁽⁴⁾
 台北国際金融センターでは、388 mの昇降行程を、上昇時1,010 m/min(約38 s)、下降時600 m/min(約48 s)で走行する。出発階と行先階の気圧差は約48 hPaあり、急速な気圧変化が乗客に耳詰まりの不快感を与えるおそれがある。このため、走行中のかご室内の気圧変化を制御する気圧制御システムを、エレベーターとして世界で初めて搭載する。

まず、減圧試験設備を使って、乗客の快適性を向上させる気圧変化パターンのモニター試験を実施した。無制御時には、気圧は最初ゆっくり変化した後、最大変化率となり、最後はまたゆっくりと変化する。モニター試験の結果から、昇降行程と昇降時間を変えずに快適性を高めるには、スタートから停止まで気圧変化の割合が一定であるパターンが、もっとも好ましいことがわかった。無制御の場合と比べて、気圧変化率を最大2.0 hPa/sから1.26 hPa/sへと37%低減した(図8(a))。

気圧差を発生させる機構として、フェールセーフを考慮し、高圧ブロウを採用した。かご室を構成するパネルは、気密性を高め、加わる気圧荷重に対する変形をなくするために、二重パネル構造とした。実際にかご室内外の気圧制御を行った結果、気圧変化率を一定とする制御指令値に対し、良好な制御性が得られた(図8(b))。

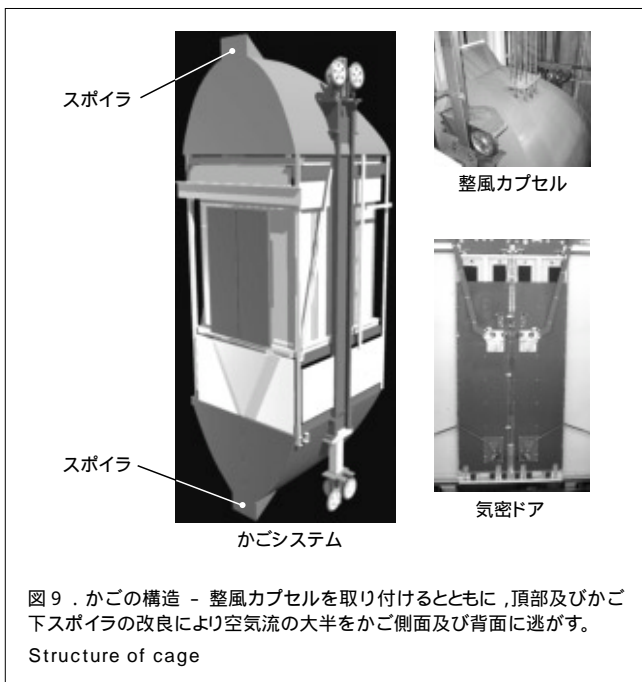


3.2 整風カプセル

エレベーターの走行により生じる風切り音は、走行速度の約6～8乗に比例すると言われている。このため、一般にはほとんど気にならない風切り音が、1,010 m/minの超高速で走行すると、非常に大きくなり無視できない。そこで、かが走行時のカプセル表面の圧力解析を行い、形状の最適化を図った整風カプセルをかがに取り付けて、全体の流線度を向上させ、風切り音の低減を図った。

特に出入口部は、ドアパネルの開閉動作を行うため密閉度が相対的に低く、外部騒音がかが室内に進入しやすい。このため、上下カプセルの端部に取り付けられるくさび形状の頂部スポイラを改良し、かがの走行により生じる空気流の大半を、かが横及び背面に逃がすようにした(図9)。

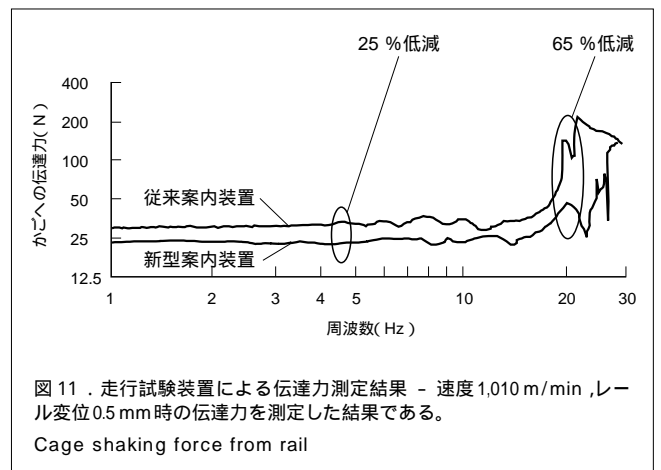
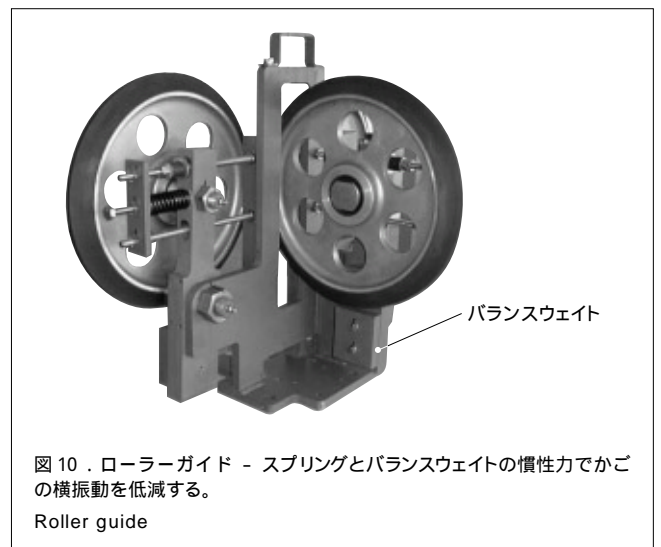
解析及び実験の結果、既存の600 m/min機並みのレベルまで騒音を低減した。



3.3 新型ローラガイド

エレベーターにはレールの微小なたわみによる強制変位や空気力学的な力が作用し、かがの横振動の原因になる。一般に、かがの振動は速度とともに増加するので、1,000 m/min級で走行する場合には、従来のエレベーターの防振構造だけでは十分な横振動抑制ができず、新たな防振装置が必要になる。

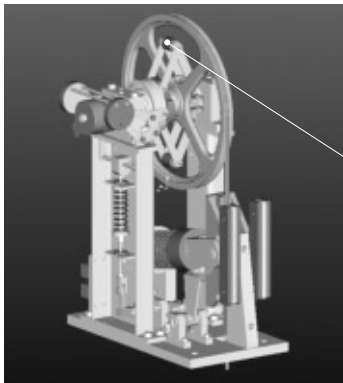
図10は、超々高速エレベーター用に開発した新型の案内装置を示したものである。高速で走行すると、ガイドレールから案内装置に入力される強制変位の周波数も高くなる。このため、バランスウェイトをガイドローラのレバーの下側に搭載し、高周波の入力を機構的に打ち消すようになっている。また、ガイドローラから作用する力をすべてバネで受け、レバーの揺動軸(ベアリング)には力が作用しないような工夫もなされている。この案内装置を搭載することによって、加振力の伝達を従来のものに比べ～10 Hzでは25%、～30 Hzでは65%に低減できることが確認できた(図11)。



4 安全システム

4.1 ガバナ

かごが過速となった場合に非常止め装置を動作させるガバナは、従来の歯車機構に替え、軽量化したフライボールをシーブ内部に直接取り付けて、フライボールとシーブが一体となって回転することで遠心力を検知する機構を採用した。これにより、構造を簡素化するとともに、増大する遠心力を低減し、速度変化を精度よく伝達できる動作機構を実現した(図12)。



フライボール

図12. ガバナ - フライボール使用により、簡素化され高性能となった。
Governor

4.2 非常止め装置

ガバナと連動してガイドレールを挟み、かごを制動停止させる非常止め装置は、動作速度1,275 m/min、適用最大質量22.7 tの能力を確保した。最大制動エネルギーは13.7 MJとなり、当社最大容量のものと比較して、約3.1倍となった(図13)。

非常止め装置

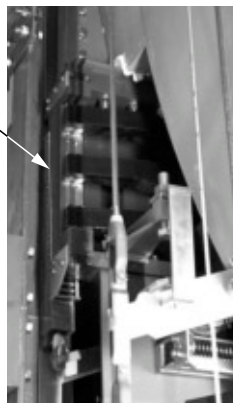


図13. 非常止め装置 - 高速走行に耐える高い摩擦係数のシュー材を使用している。

Emergency safety device

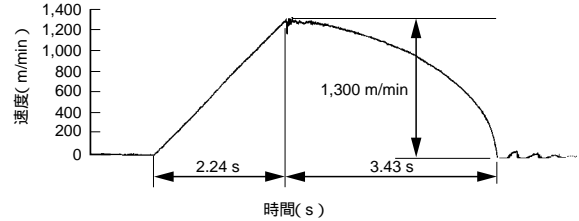


図14. 非常停止時の制動波形 - 高速走行で非常止め装置が働いたときの制動実験結果であり、十分な制動特性が得られている。

Result of drop test

非常止め装置が作動後、制動停止までの距離は約40 mであり、摩擦材の表面温度は1,000℃を超える。このため耐熱性、耐摩耗性に優れた特殊窒化けい素セラミックスを開発し、表面に特殊加工を施して、衝撃に強く高い摩擦係数を確保した。60回に及ぶ落下試験により、摩擦材の配列形状及び動作ばね力を最適化し、十分な制動特性と耐久性が得られた(図14)。

4.3 オイルバッファ

最下階を行き過ぎた場合にかごを緩衝して停止させるオイルバッファは、従来の単段プランジャ構造では全長が17 mにもなり、非常に深いピットが必要となる。このため、3段に伸縮するプランジャを持つテレスコピック形オイルバッファを開発し、全長10.65 m、ストローク6.57 mに縮小し、全長を約40%小形化した(図15)。緩衝能力は、最大衝突速度679 m/min、最大衝突質量11.4 tを確保した。

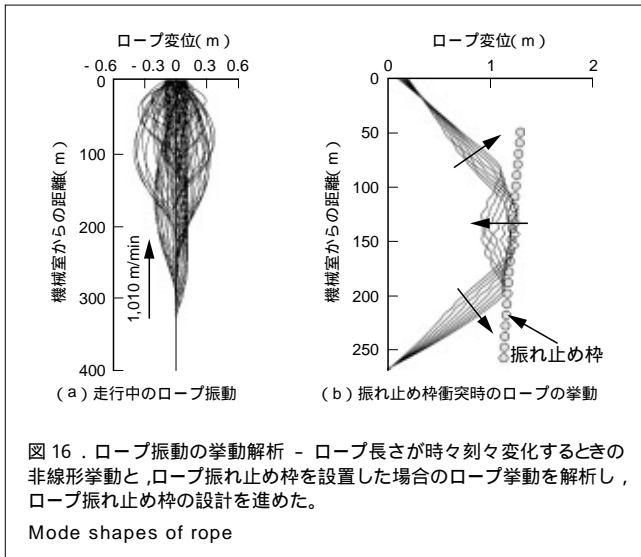
4.4 ロープ制振⁽⁵⁾

超高層ビルは、一般のビルに比べてその固有振動数が低くなる。一方、エレベーターのロープは、かご走行中に長さが増えるため、ビルの固有振動数とロープとの共振により、



図15. オイルバッファ - 3段テレスコピック形のオイルバッファを開発し、小型化を実現した。

Oil buffer



昇降路内機器への絡まりや衝突が問題となる可能性がある。そこで、強風時のビルの揺れによって加振されるロープの横振動解析を行い、この結果を基に、昇降路内機器へのロープの絡まり防止策(ロープ振れ止め枠の設置)や管制運転(強風時の減速運転、停止)などの安全対策をとっている。

図16(a)は、かごの上昇に伴いロープ長さが時々刻々変化する時のロープの非線形挙動を解析した例である。このような解析を行うことにより、ビルの揺れ量とロープ変位との関係が明らかになった。また図16(b)は、ロープ振れ止め枠にロープが衝突するときの挙動を解析した例である。この解析により、枠に作用する荷重、必要な設置個数などを求め、枠の設計に反映させた。

5 あとがき

以上述べてきた項目のほかにも、かごの横揺れ防止のためのかご防振系や減衰装置、縦揺れ防止のための主ロープ系の最適化などを開発し、実機への適用を予定している。アジア圏の国々でも一般化しつつある都市の過密化に対処するため、建物の高層化は必至の状況にある。こうした背景の

下、都市空間で唯一の縦の交通手段であるエレベーターに対して、今後ますます高速・高揚程化の要求が強まってくることが予想される。当社は、台北国際金融センター向けの世界最高速エレベーター開発で培われた技術を生かし、安全性と快適さと利便性を備えたエレベーターを提供していく。

文献

- (1) 飯島 厚,ほか . 超高層・大規模ビルディングを支えるエレベーター技術 . 東芝レビュー . 53, 9, 1998, p.9 - 12 .
- (2) 飯島 厚,ほか . 昇降機における最新のドライブ技術 . 東芝レビュー . 55, 7, 2000, p.30 - 32 .
- (3) 森下明平,ほか . “リニアドライブに利用されるサーボ制御技術” . 電気学会リニアドライブ研究会資料 . LD-01-51, 2001, p.7 - 12 .
- (4) 藤田善昭,ほか . “エレベーター用気圧制御システムの開発” . 日本機械学会 昇降機・遊戯施設等の技術と進歩 技術講演会講演論文集 . 日本機械学会 . 2002-01, p.29 - 32 .
- (5) 木村弘之,ほか . “エレベーター・ロープの横振動解析” . 日本機械学会 東海支部第50期総会・講演会 講演論文集 . 日本機械学会 . 2001-03, p.19 - 20 .



中川 俊明 NAKAGAWA Toshiaki

東芝エレベータ(株) 研究開発センター 機械開発担当主査。
エレベーターの開発・設計に従事。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



小原 英也 KOHARA Hideya

東芝エレベータ(株) 生産本部 府中工場 設計部機械システム設計担当グループ長。エレベーターの開発・設計に従事。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



関本 陽一 SEKIMOTO Youichi

東芝エレベータ(株) 研究開発センター 電気開発担当主任。
エレベーター制御装置の開発・設計に従事。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



中垣 薫雄 NAKAGAKI Shigeo

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 昇降機技術開発センター長。昇降機に関する技術開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center