

世界最高速エレベーターを支える高信頼性技術

High-Reliability Technologies for World's Fastest Elevators

中川 俊明

■ NAKAGAWA Toshiaki

西川 孝司

■ NISHIKAWA Takashi

木村 弘之

■ KIMURA Hiroyuki

東芝エレベータ(株)は、2004年12月にオープンした世界一の高さを誇る台北国際金融中心ビル(以下、台北101ビルと呼ぶ)向けに、走行速度1,010 m/minの世界最高速エレベーターを2台納入した。単に世界最高速走行の達成にとどまらず、乗りごち性能と快適性を重視し、更に、安全性や寿命などの信頼性の確保も重要課題であった。

これらを実現するため、検証プロセス、試験ツール及び確認手法を検討し、試作試験やシミュレーション評価を実施した。現地に納めた実機での最終確認により、実測データが、開発検証結果やシミュレーション値と整合性があり、乗りごちや快適性を満足するとともに、安全性や信頼性も確保されていることを確認した。

Toshiba supplied the two fastest elevators in the world to the Taipei 101 Building, which opened on December, 2004. The most important aspects in the development of these elevators were securing safety and reliability as well as a comfortable ride. To realize these requirements, we studied confirmation methods for inspection processes and tools, carried out tests by trial manufacturing, and made estimations by simulations. The final measurement data at Taipei 101 corresponded to the data obtained in the development tests and simulations. As a result, the safety and reliability were verified and it was confirmed that a comfortable ride was achieved.

1 まえがき

世界一の高さ508 mを誇る台北101ビル(図1)の89階の展望台へ直行する2台のエレベーターは、これも世界一の走行速度となる1,010 m/minで、昇降行程382 mを約39秒で駆け上がる。

このエレベーターには、世界初となるかご内気圧制御装置を搭載したほか、ロープ揺れを抑制する振れ止め枠をはじめとする安全性向上のための新規開発装置を設けるなど、単に速いだけでなく、振動や騒音を抑え、快適性や安全性を確保する様々な開発を実施した(図2)。

これらの新技術を開発⁽¹⁾するため、研究塔をはじめとす



図1. 台北101ビルの外観 — 高さが世界一となる508 mである。
Taipei 101 Building

る検証ツールのほか、シミュレーションを駆使した評価方法を採用し、最終的に現地での実測値との整合性を確認し、新規技術の信頼性を確認した。

ここでは、世界最高速エレベーターを実現可能にした高信頼性確保の評価プロセスとツール、及び具体的な確認評価例について述べる。

2 性能と信頼性を確保するための評価項目と評価プロセス

2.1 性能と信頼性の評価項目

エレベーターの性能と信頼性を以下の項目に沿って評価

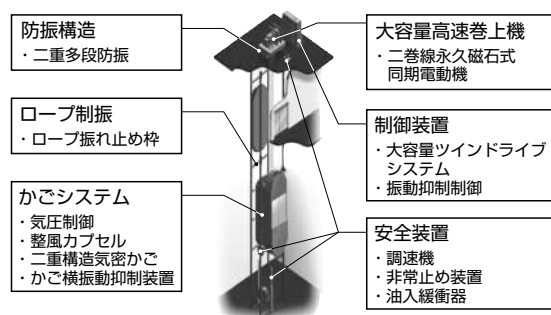


図2. 世界最高速エレベーターの開発項目 — 世界初となる気圧制御装置のほか、様々な新装置を開発し搭載している。

Items in development of world's fastest elevator

して開発を進めた。

- (1) 乗りごこち性能 (振動, 騒音)
- (2) 安全性
- (3) 快適性

これらはいずれもエレベーターにとって欠かせない評価項目であり、後述する開発段階での試作検証や、シミュレーションで目標基準を満足するかの評価検証を実施した。

2.2 信頼性の評価プロセス

性能と信頼性の評価検証を開発時にすべて実施することができればよいが、試作検証できないものもあり、検証・評価のプロセスを図3のように分類して進めた。

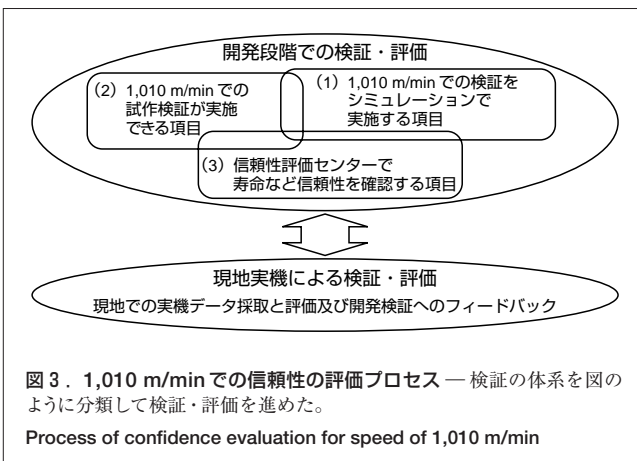


図3. 1,010 m/minでの信頼性の評価プロセス — 検証の体系を図のように分類して検証・評価を進めた。
Process of confidence evaluation for speed of 1,010 m/min

3 開発段階での検証・評価

3.1 1,010 m/minの試作検証ができない項目の評価

加減速度を通常より大きい 1.2 m/s^2 としても1,010 m/min走行を実施するためには、研究塔の昇降行程が280 m程度必要となり、建設費用が膨大となる。そこで加減速度は 1.2 m/s^2 とし、1,010 m/minの1/2以上となる600 m/minまでの走行が可能な研究塔を建設し、その速度までの試作機による実測値とシミュレーションによる値との整合性を確認のうえ、1,010 m/min走行での評価は、そのシミュレーション値が目標基準を満足しているかを評価した。シミュレーションでの評価手法の一例を図4に示す。

シミュレーションで1,010 m/min時の性能評価を実施した項目としては、かご振動、ロープ振動、かご内騒音、タイダウンセーフティなどがある。

3.2 1,010 m/minで試作検証を実施した項目

安全装置などの確実な性能確認が必要とされる装置 (非常止め装置, 油入緩衝器, 调速機など) については、適用最大仕様での実試験にて性能を確認した。非常止め装置は1,010 m/minの1.25倍の速度である1,275 m/minで、約60回に及ぶ落下動作試験により性能を確認した。前記の3種類の装置については、立会い試験のもとエレベーター用安全

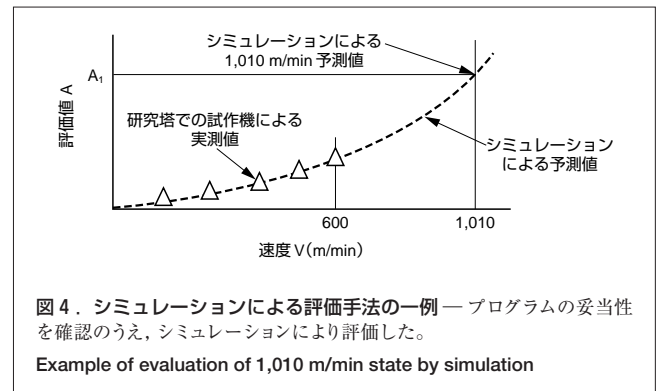


図4. シミュレーションによる評価手法の一例 — プログラムの妥当性を確認のうえ、シミュレーションにより評価した。

Example of evaluation of 1,010 m/min state by simulation

装置の日本国内での公的認可をすべて取得した。

3.3 信頼性評価センターでの信頼性試験

世界最高速エレベーターの快適性や信頼性、及び寿命を確認するため、電気品ユニットの開発や、基板の耐環境試験などの信頼性検証を実施している東芝エレベータ(株)上野原事業所内の信頼性評価センターに、次に示す新規設備を導入した。

3.3.1 減圧試験設備 台北101ビルでは、地上と382 mの最上停止階で約48 hPaの気圧差があり、乗客は、ハイスピードの昇降で生じる耳詰まりを不快に感じる事となる。そこで、かご内気圧制御装置を開発し、世界で初めて適用した。気圧変化のパターンをどのように制御すれば耳詰まりが低減できるかを確認するため、減圧試験設備(図5)を新設し、老若男女30人のモニターを対象に、医師立会いのもとで試験を実施した。その結果、スタートから停止までの気圧変化率を一定とする直線制御が、快適性を高めるパターンであることがわかった。

3.3.2 地上かご、ドア試験設備 気圧制御を可能とするには、かごの気密性を確保する必要がある。密閉性の高い外かご室の内側に乗客が目にする内かご室を設ける二重かご構造を採用し、気圧変化による内かご室のゆがみを防止した。外かご室の気密性の検証と経年変化状況の確認のため、かご室を単体で製作設置し、加圧及び減圧を繰り返

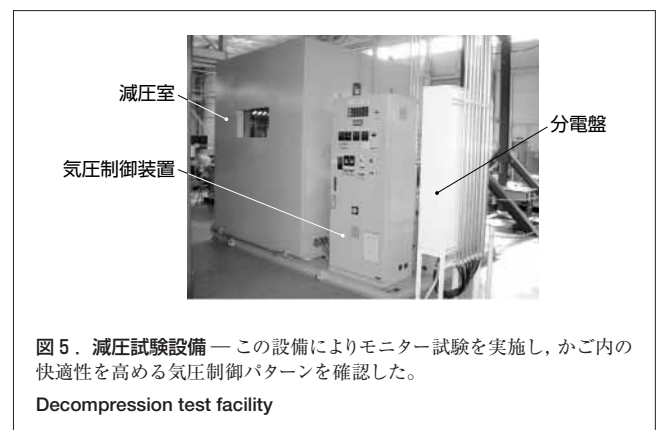


図5. 減圧試験設備 — この設備によりモニター試験を実施し、かご内の快適性を高める気圧制御パターンを確認した。

Decompression test facility

返しかける加速試験を実施した。その結果、気密性は目標とする寿命を確保していることを確認した。

かごのドアについても新機構の気密ドアを開発し、気密性とパッキンの寿命を評価するドア試験装置により繰返し閉閉試験を実施して、目標寿命を達成していることを確認した。

4 シミュレーションと現地実機による評価結果の比較

開発検証時にシミュレーションで1,010 m/minの評価を実施し、最終的に現地実機で実測評価を行ったかご横振動、ロープ揺れのシミュレーションと模擬実験による評価、及び現地実機での気圧制御の調整結果について述べる。

4.1 かご横振動

4.1.1 シミュレーション評価

エレベーターにはガイド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、かご横振動の原因となる。研究塔では1,010 m/minでの走行試験はできないため、シミュレーション結果と研究塔での600 m/minまでの試験結果とを比較することで、シミュレーション手法の妥当性を確認した⁽²⁾(図6)。次に、この手法を用いて1,010 m/min走行時のかご横振動を算出し、0.1 m/s²程度の予測値を得た。この結果を基に、かご防振系の最適化やレール据付け精度の基準を決定した。

また、世界最高速エレベーターは2台が隣接して設置されており、すれ違いの際に風圧によるかご横振動が発生する。このエレベーターには、振動を打ち消す方向におもりを駆動させて振動を低減させるかご振動抑制装置のアクティブマスダンパー(AMD)を備えている。かごすれ違い時の各かごの空力解析値を用いてAMDの動作、非動作時の振動シミュレーションを行った結果、走行速度600 m/minの下降側のかごのほうにより大きな影響を受けて振動することが判明し、AMD動作により20%程度の振動抑制効果が算出された。

4.1.2 現地実機による評価結果

台北101ビルでの1,010 m/min運転時のかご横振動(ドア側から見て前後及び左右方向)の実測結果を図7に示す。かご振動は予測値どおり0.1 m/s²(p-p)程度であり、床に立てたコインが倒れず、乗客

が横揺れをほとんど感じないレベルである。かご防振系の最適化やレザ装置を用いたレール据付け精度の確認により乗りごこち性能を確保できた。

また、図8はすれ違い時の下降側のかごの横振動測定データである。AMD動作時は、シミュレーションで算出されたように約20%の振動低減効果が得られた。以上のように、走行時のかご横振動はシミュレーションで算出した値とほぼ同等で、良好な乗りごこち性能を確保するとともに、シミュレーション評価の信頼性が確認できた。

4.2 ロープ挙動のシミュレーション

強風時のビルの揺れによりロープ変位が大きくなり、昇降路内機器への絡まりや衝突が発生する可能性がある。そこ

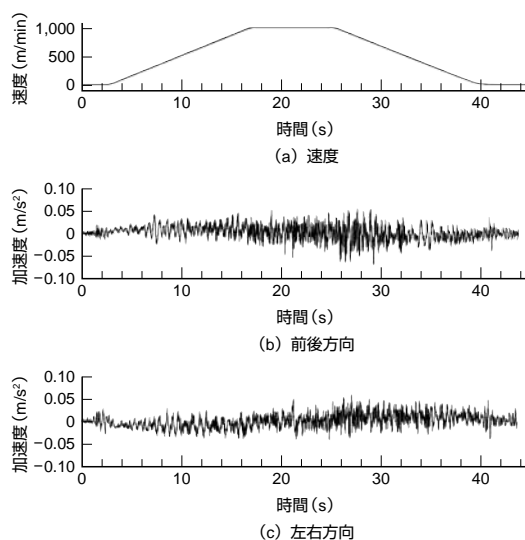


図7. 現地実機での通常走行時のかご横振動測定結果 — 最大でも0.1 m/s²程度の良好な性能を確保した。

Time history of cage horizontal acceleration in normal running

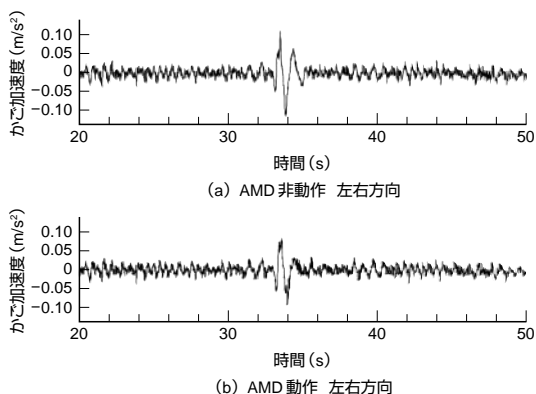


図8. 現地実機でのすれ違い時のかご横振動測定結果 — AMD動作により、下降側かごのすれ違い時の振動は、シミュレーション結果のとおり実機でも20%程度低減することができた。

Time history of cage horizontal acceleration while passing

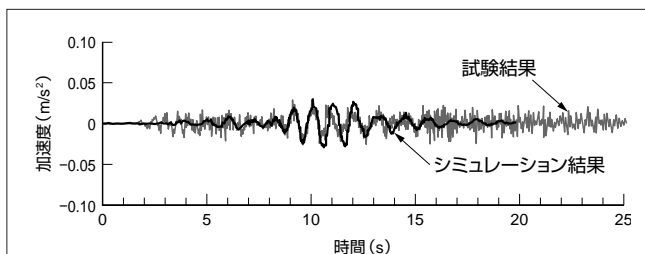
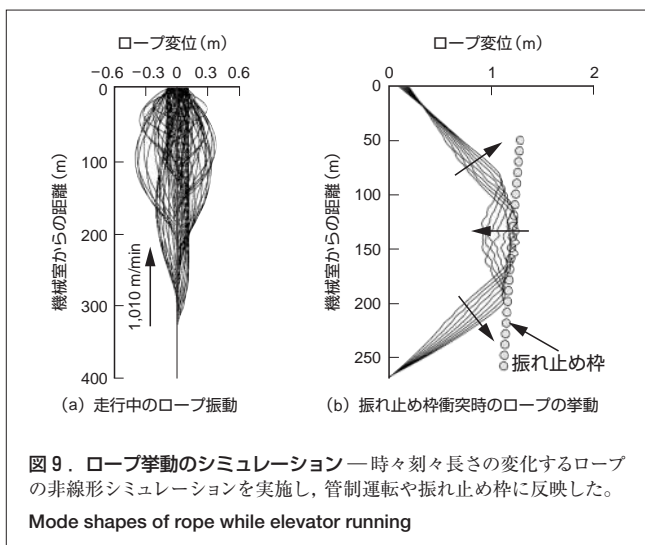


図6. 600 m/min走行時のかご横振動のシミュレーション結果と研究塔での結果 — シミュレーション結果は試験結果とよく一致しており、シミュレーションの妥当性が確認された。

Cage horizontal vibration while elevator running

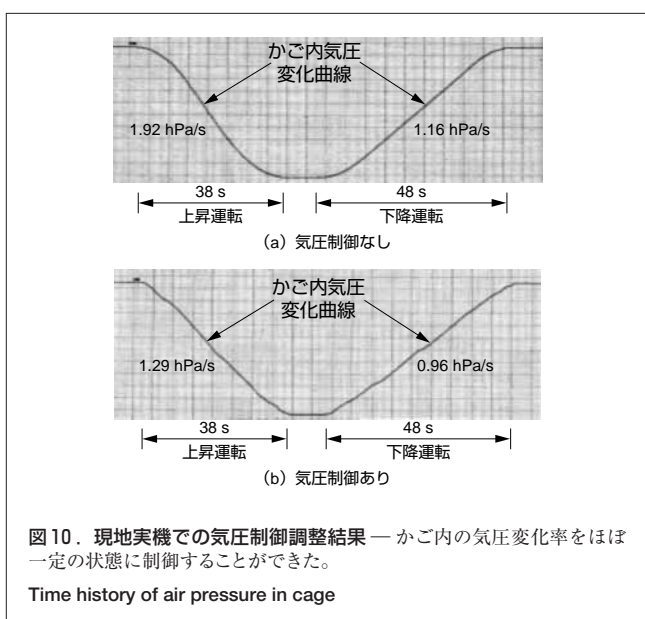


で、ビル揺れによって加振されるロープの挙動をシミュレーションし、この結果を基に、昇降路内機器へのロープの絡まり防止策としてロープ振れ止め枠の設置や、強風時の減速運転及び停止といった管制運転などの安全対策を行っている。

図9 (a)は、かごの上昇に伴いロープ長さが時々刻々変化するときのロープの非線形挙動シミュレーション例⁽²⁾であり、これにより、ビルの揺れ量とロープ変位との関係が明らかとなった。また、ロープ振れ止め枠にロープが衝突する時の挙動シミュレーション(図9(b))により、振れ止め枠に作用する荷重や必要設置個数を求めた。ロープが昇降路機器に衝突する際の複雑な挙動は模擬実験により評価し、このシミュレーションの有効性を確認した。

4.3 気圧制御の現地調整結果

かご内の気圧は最初緩やかに変化した後、速度が最高速



に達したとき最大の変化率となり、最後はまた緩やかに変化するS字カーブを描く。モニター試験の結果、スタートから停止まで一定の気圧変化率とする直線制御が快適性を高めることがわかった。これを実現するため、かご内の気圧の加圧と減圧は、吸気ブローと排気ブローにより行う構成としており、気圧制御を行わない状態での最大気圧変化率が約1.9 hPa/sであるのに対し、直線制御時の気圧変化率の目標値を1.5 hPa/s以下と設定した。

現地の実機で気圧制御を調整した結果を図10に示す⁽³⁾。制御なしの場合と比べて最大気圧変化率を1.92 hPa/sから1.29 hPa/sへと目標値まで低減でき、耳詰まりの不快感を低減することができた。

5 あとがき

開発検証段階で信頼性評価のプロセスを検討し、試作機での実走行試験ができない1,010 m/minまでの範囲についてはシミュレーション評価を実施し、最終的に現地の実機による実測結果との整合性を確認した。単に速いだけの世界最高速エレベーターではなく、乗りごち、安全性、快適性のいずれにおいても完成度が高く、かつ信頼性の高いエレベーターに仕上げることができたと自負している。今後は、シミュレーション技術や検証ツールを活用した高信頼性技術を、一般の機種にブレークダウンすることを目指していく。

文献

- 中川俊明, ほか. 世界最高速1010 m/minエレベーターの開発. 東芝レビュー. 57, 6, 2002, p.62-67.
- 木村弘之, ほか. 昇降機のシミュレーション技術. 東芝レビュー. 58, 12, 2003, p.42-45.
- 藤田善昭, ほか. “台北101向け速度1010 m/minエレベーター”. 日本機械学会講演論文集(昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩). 東京, 2005-01, (社)日本機械学会. p.31-34.



中川 俊明 NAKAGAWA Toshiaki

東芝エレベータ(株) 研究開発センター主幹。エレベーターシステム及び機械品の開発業務に従事。日本機械学会会員。Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



西川 孝司 NISHIKAWA Takashi

東芝エレベータ(株) 品質保証部 信頼性評価センター長。エレベーターの電気品開発及び信頼性評価に従事。Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



木村 弘之 KIMURA Hiroyuki, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会技術開発センター 電機応用システム開発部主務, 工博。昇降機の研究・開発に従事。日本機械学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center