

世界最高速エレベーターの要素技術

坂野裕一* 加藤雅樹*
佐久間洋一*
白石直浩*

Key Technologies for The World's Fastest Elevator

Hirokazu Banno, Yoichi Sakuma, Naohiro Shiraishi, Masaki Kato

要 旨

世界規模での建物の高層化が進んでいる。超高層ビルには、多くの場合最上層階に展望階が設置されるため、観光客をより効率よく展望階に輸送する縦の交通の要として、超高速エレベーターが必要である。

三菱電機は、超高速・大容量エレベーターの開発を推進し、キーとなる“安全”“快適”“省エネルギー”を実現しつつ、最高層クラスのビルに適した、世界最高速(注1)となる1,230m/min(20.5m/s)のエレベーター技術を開発した。

世界最高速エレベーターの要素技術は次のとおりである。

(1) 大容量巻上機モータの出力を最大限に引き出す並列駆動制御盤の開発。巻上機の種類とトルクを高精度制御し、

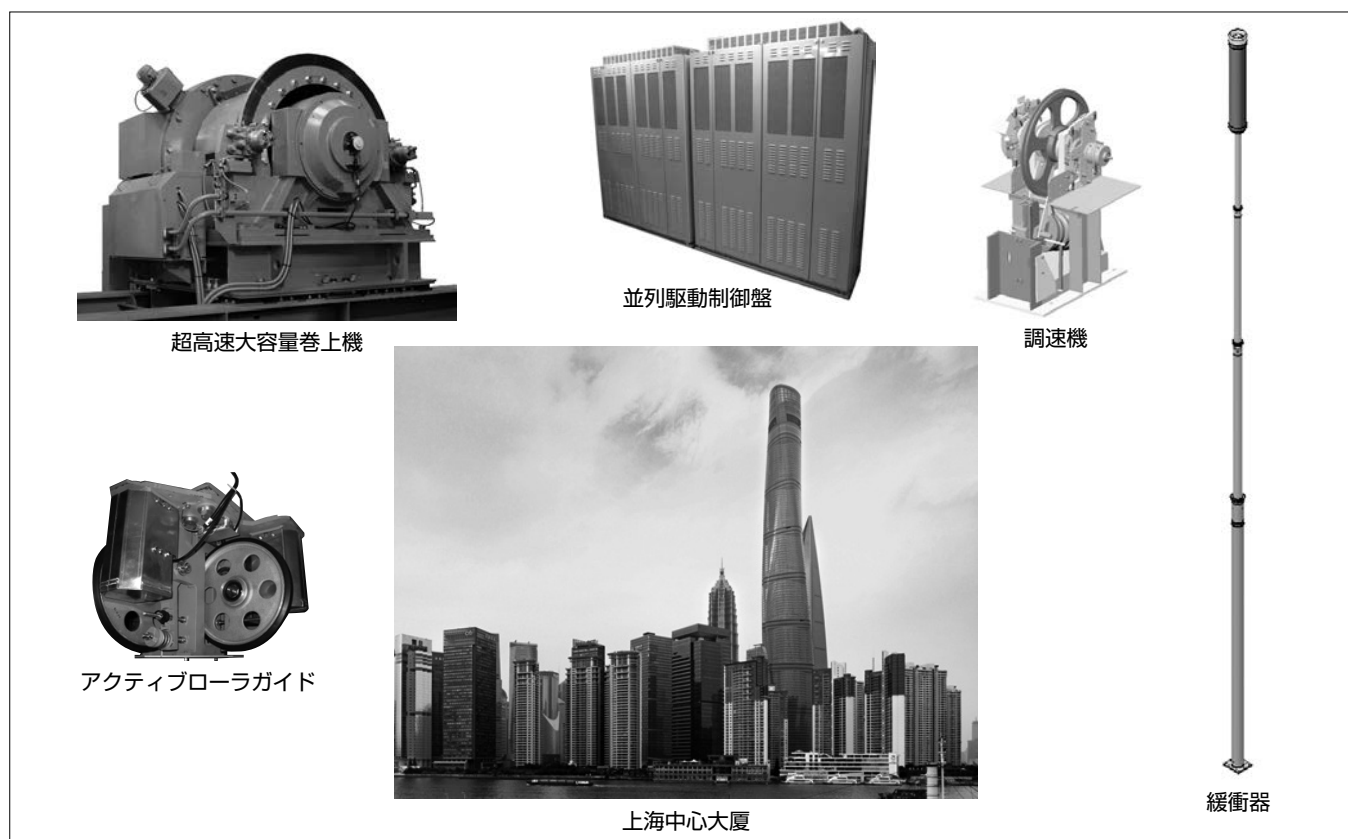
超高速での昇降と滑らかな加減速を実現した。

(2) 超高揚程システムを考慮し、床合わせ時間の悪化防止と高精度な床合わせ制御を実現し、従来の高速エレベーターと同等の乗り心地と床合わせ精度を確保した。

(3) 世界最高速運転に適用可能な調速機・ブレーキ装置・緩衝器などの安全装置を開発し、従来製品と同等の安全性を確保した。

(4) かが室の横揺れを低減するアクティブローラガイドを最適チューニングすることによって、制振性能を向上。世界最高速運転時でも、世界トップクラスの乗り心地を実現した。

(注1) 2016年12月9日現在、当社調べ



世界最高速エレベーターを支える要素機器と上海中心大廈向けエレベーターへの適用

世界最高速となる1,230m/minを実現するために、巻上機・制御盤の大出力化、超高揚程対応の高精度床合わせ、調速機・ブレーキ・緩衝器を代表とする安全装置の開発、アクティブローラガイドの制振性能向上等の要素技術を開発した。これらの技術を中国・上海市の中国最高層ビル“上海中心大廈”(地上632m)向けエレベーターに適用した。世界最高速を実現しつつ、世界トップクラスの乗り心地・安全性を実現した。

1. ま え が き

当社は、1978年に当時世界最高速となる600m/minのエレベーターを、1993年に750m/minのエレベーターを開発・納入しており、これまで国内外を問わず、速度、積載量とも最大クラスとなる仕様のエレベーターを開発してきた。

世界規模で建物の更なる高層化が進み、最高層クラスのビルでは輸送効率の観点から更なる超高速エレベーターや、ダブルデッキエレベーターなどの大容量エレベーターを必要としている。最近では、1,080m/min(上昇方向1,080m/min, 下降方向600m/min)の超高速エレベーター及びダブルデッキとしては世界最高速かつ世界最長昇降行程となるエレベーターを開発・納入した⁽¹⁾。さらに、世界最高速となる1,230m/min(20.5m/s)のエレベーター技術を製品化し、上海市の中国最高層ビル“上海中心大厦”への納入を完了した。

本稿では、世界最高速エレベーターの要素技術と実機での測定結果について述べる。

2. 駆動制御システム

エレベーターを速度1,230m/minの超高速で走行させるには、巻上機とインバータの大出力化が必要である。駆動制御システムの構成を図1に示す。

2.1 二重三相モータ

単純三相モータと同等サイズで大出力化するため、結線分割方式を採用し、二重三相モータを実現した。両群の電気角位相をそろえ、群間の電流アンバランスによる振動を抑えて、群間相互インダクタンスが小さく適切な結線設計を行い、脈動のない滑らかなトルク出力を得ることができる。

2.2 並列駆動制御盤

独立したコンバータ・インバータを持つ駆動制御装置を2台用いる並列駆動制御方式を採用し、二重三相モータを駆動する。駆動制御盤を組み合わせる構成によって、制御盤レイアウト設計の自由度向上や主要機器を量産機種と共通化できるメリットを持っている。

電力変換装置には、定格電流600AのIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールを6個並列接続して使用した。この駆動制御装置単体は、定格速度540m/minで積載量4,000kgのエレベーターを動かす能力があり、超高速1,230m/minに必要な大

出力を実現した。

2.3 制御系の構成

駆動制御系の構成を図2に示す。

規範モデル型の2自由度制御で速度制御を行い、算出されたトルク指令値をトルク分配器によって各電流制御器に分配し、独立に電流制御を行うことで、モータ速度とトルクを高精度で制御している。

昇降行程500mを超える高揚程エレベーターでは、ロープが長尺になるため系は低剛性化しており、振動による乗り心地の悪化や床合わせ不良の要因となる。したがって、加速度変化時に発生する縦振動に対し、ロープ振動周波数が発生しないようにフィードフォワード制御でかご速度指令を補正することで、かご縦振動を抑制する高精度床合わせを実現した。また、加減速時のロープ伸縮量や振動を考慮し、かご位置を補正しながら床合わせ制御を行うことによって、床合わせ時間の悪化防止と床合わせ精度を確保し、従来の高速エレベーターと同等の乗り心地と床合わせ精度を確保した。ショートラン走行時のかご内乗り心地波形を図3に示す。

2.4 走行波形の測定結果

図4に速度1,230m/minで走行中の速度とモータ電流波形を示す。脈動なく良好な走行性能と正確な床合わせを実現した。

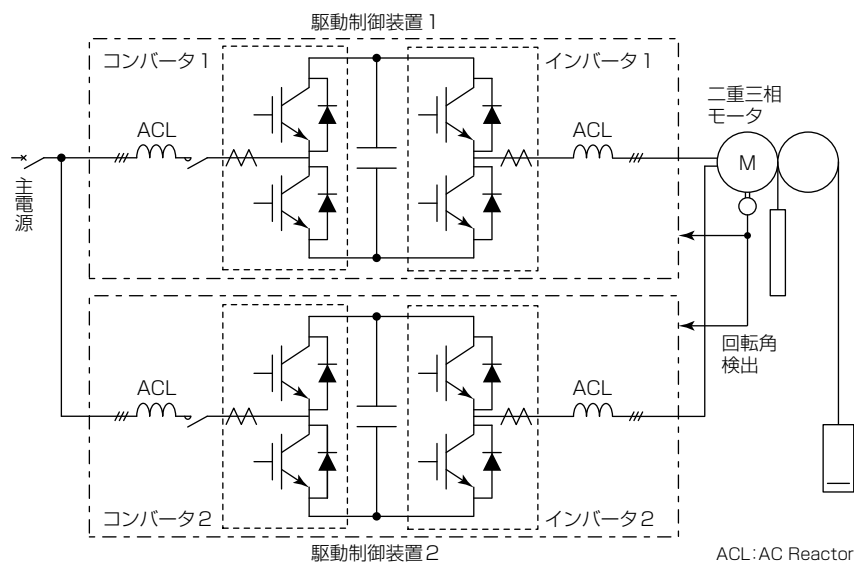


図1. 超高速エレベーターの駆動制御システム構成

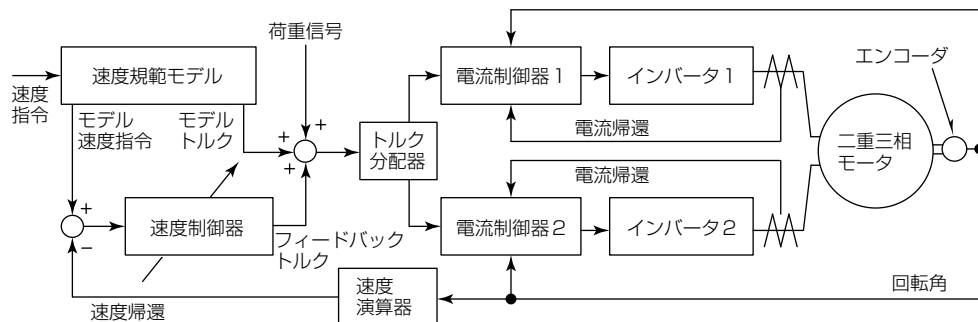


図2. 超高速エレベーターの駆動制御系

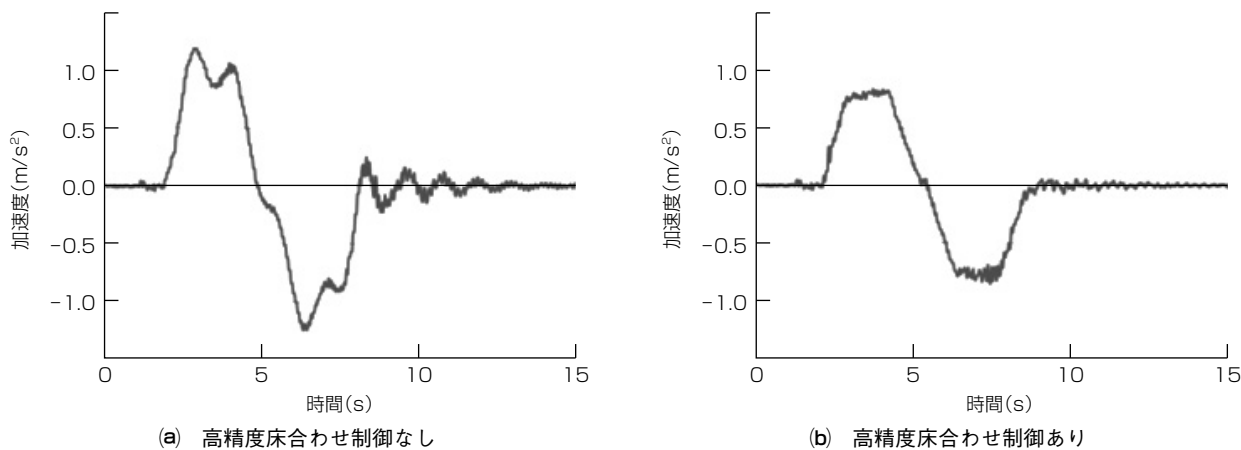


図3. ショートラン走行時のかご内乗り心地波形

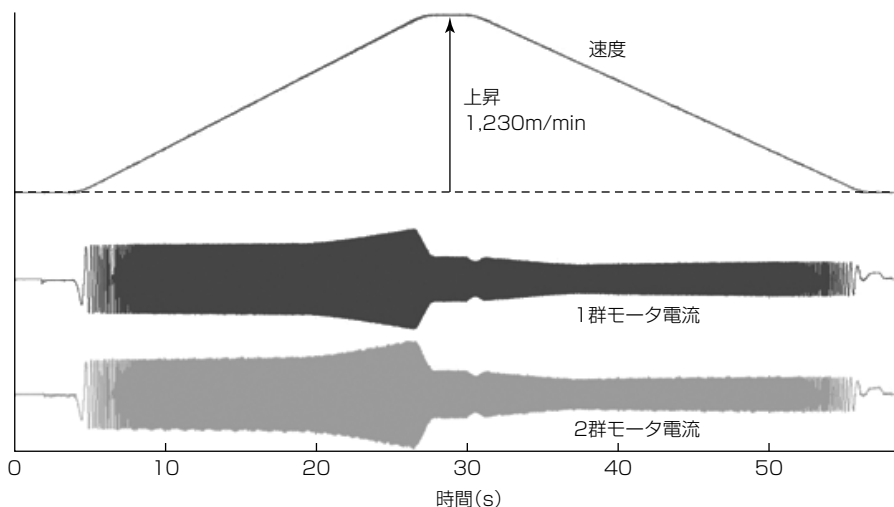


図4. 超高速エレベーターの走行波形

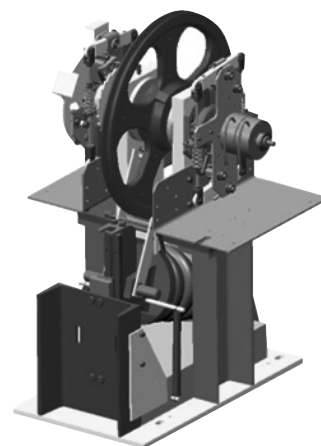


図5. 調速機

3. 超高速・大容量エレベーターの安全装置

エレベーターに設置される機械的な安全装置は主に調速機、巻上機ブレーキ、非常止め装置、緩衝器によって構成されており、その動作は次のとおりである。機械室に設置される調速機はかごの速度を監視し、異常増速を検出すると巻上機のブレーキを動作させてかごを停止させる。万が一、かごを吊(つ)る巻上ロープが破断した場合でも、調速機がかご下に設けた非常止め装置を動作させ、かごを停止させることができる。また、かごが最下階又は最上階を行き過ぎた場合、昇降路のピットに設置される緩衝器がかご又は釣合いおもりを受け止めて緩衝停止させる。

今回、エレベーターの更なる速度UP要求に対し、上昇方向1,230m/min、下降方向600m/minでの運行に対応した安全装置を開発した。

3.1 調速機

調速機はかごの昇降に伴って回転する速度検出機構に生じた遠心力を利用して、機械的にかごの速度を監視する。安定した速度検出を行うためには、機構の円滑な動作が必要である。しかし、1,230m/minのエレベーターに適用す

る調速機の開発では、速度検出機構に生じる遠心力が、既存品(1,080m/min)の約1.3倍になり、各部摩擦抵抗の影響によって速度検出精度が低下した。

そこで、遠心力による各部摩擦抵抗の発生を最小限に抑えたメカニズムを構築するとともに、構成機器の摩擦抵抗を低減するため特殊材料を採用した。これによって、1,230m/min運行時でも安定した機構動作を可能とし、要求される速度検出精度を満足させることができた。また、既存品と同じサイズの綱車で機構を構成しているため、機器占有スペースを既存品と同等に抑えることに成功した(図5)。

3.2 電子安全装置

緩衝器ストローク短縮のために用いられている終端階強制減速(Emergency Terminal Slowdown: ETS)装置としてSETS(Smooth ETS)装置を用いた。終端階位置に対し電的に過速度を無段階監視できるため、より早い検出が可能である。

電子化安全装置に関する国際規格 IEC61508(International Electrotechnical Commission 61508)に準拠するように設計を行い、納入先に応じた電子安全装置の安全規格や法規に、速度1,230m/minまで対応可能な開発を行った。

表1. 緩衝器の仕様

項目	既存品	開発品
最大衝突速度	717m/min	817m/min
最大適用質量	8,000kg	7,500kg
ストローク	7,300mm	9,450mm
減速特性	平均減速度1.0G以下、2.5G超時間0.04s以下	

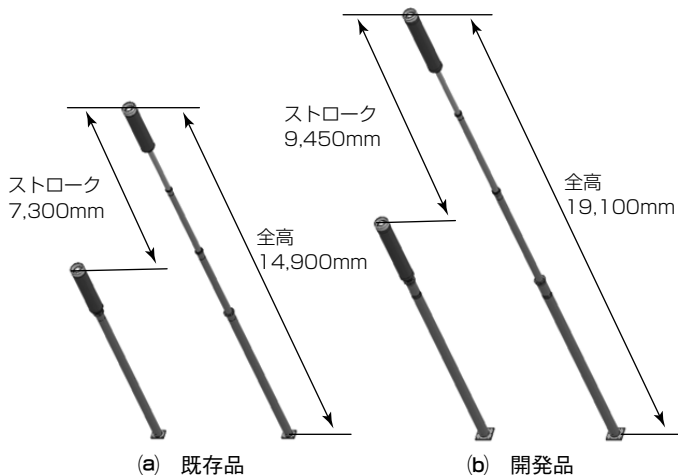


図6. 油入緩衝器

3.3 巻上機ブレーキ

昇降行程の長さに応じた主ロープやケーブルの質量増大、遮音性を高めたかごと対応するおもりによってシステム全体の慣性モーメントはかなり大きい。

超高速用巻上機ブレーキとして、大きな制動力が発生可能な油圧開放式のクランプ式ディスクブレーキを採用している。高速走行から緊急停止させた場合、制動時に発生する摩擦熱によるブレーキディスク及びブレーキパッドの温度上昇は大きい。1,230m/min対応では、更なる巻上機回転速度の高速化に伴い走行エネルギーが増大するため、温度上昇はもちろんブレーキ制動能力にも影響を与える。

そこで、電氣的に制動力を補う方式を採用した。緊急停止時には、主電源を切り離し、巻上機モータから発生するエネルギーを抵抗経由で熱消費する回路を追加することで、ブレーキパッドの温度上昇を抑えつつ、安定した制動能力が得られた。

3.4 緩衝器

開発した緩衝器の仕様を表1に示す。1,230m/minのエレベーターに適用する緩衝器は1,080m/min用を基に開発した。ストロークは、法規上の構造要件によって延長が必須であった。ストロークの延長に伴い、全高も増大した(図6)。また、各プランジャに適切な減速力を与えるためにプランジャ径を拡大した。

これらの構造変更による各プランジャの質量増加は緩衝器に求められる復帰性能要件に影響し、十分な復帰動作力を確保するため、各種部品に求められる性能に適した素材を再選定し、構造最適化を行った。

表2. 減速試験の測定結果

項目	測定値
試験温度	17.9℃
最大衝突速度	828m/min(>817m/min)
最大適用質量	7,500kg
ストローク	9,450mm
平均減速度	0.26G
2.5G超継続時間	0.007s
復帰時間	86s

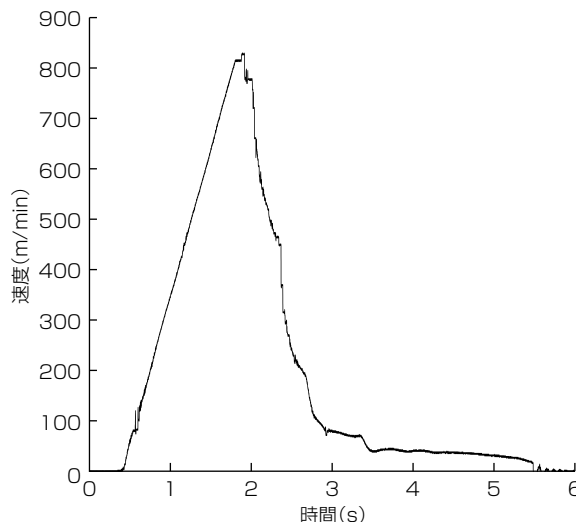


図7. 減速試験の測定結果

減速性能の設計は、1,080m/min用緩衝器の開発時と同じシミュレーションを用い、1,230m/min対応の減速性能は初回の試作で所要の性能を満足する試験結果が得られた。表2と図7は試験結果の一例である。

4. 超高速エレベーターの快適性

当社はエレベーターの乗り心地を向上させる制振装置“アクティブローラガイド(ARG)”を開発し、300~540m/minの高速エレベーターに標準適用している(海外はオプション)⁽²⁾。1,000m/minを超える高速化対応に際しては、技術課題を次のように設定して検討を行っている。

- (1) レール変位加振力の増加、加振周波数の変動幅
- (2) かご室・かご枠が持つ固有振動と振動モードの影響
- (3) 釣合いおもりとのすれ違いによる風圧の影響

これらの課題については“超高速用アクティブローラガイド(HARG)”の開発によって道筋をつけたが⁽³⁾、エレベーターは据付け調整を経て製品となるため、特定部品の性能で製品の品質保証ができる訳ではない。また、同じ仕様のエレベーターであっても、かご振動という現象に対する原因が同じとは限らないため、実機の状態を確認しながらの対応、現場で初めて顕在化した課題への対応などを、地道に積み重ねる必要があった。

図8に速度1,080m/minで実測したかごの振動波形を示す。走行中の単発振動は0.1m/s²を下回り、レール曲がり

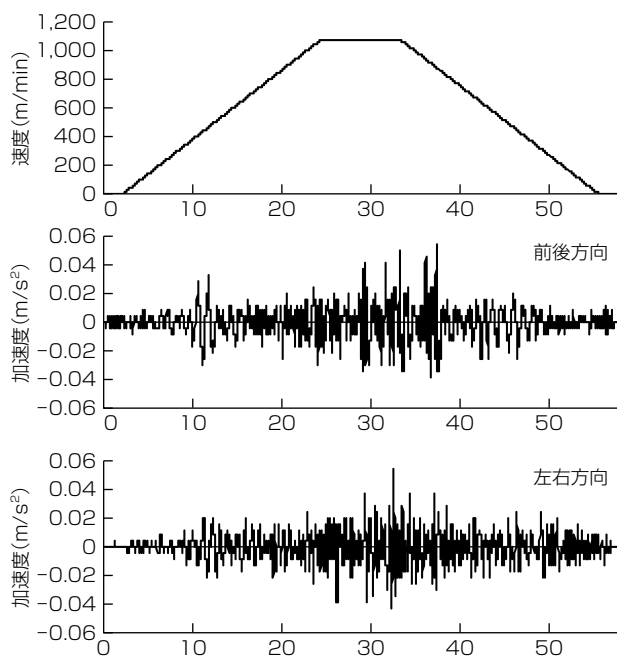


図8. 1,080m/minの超高速エレベーターのかご振動

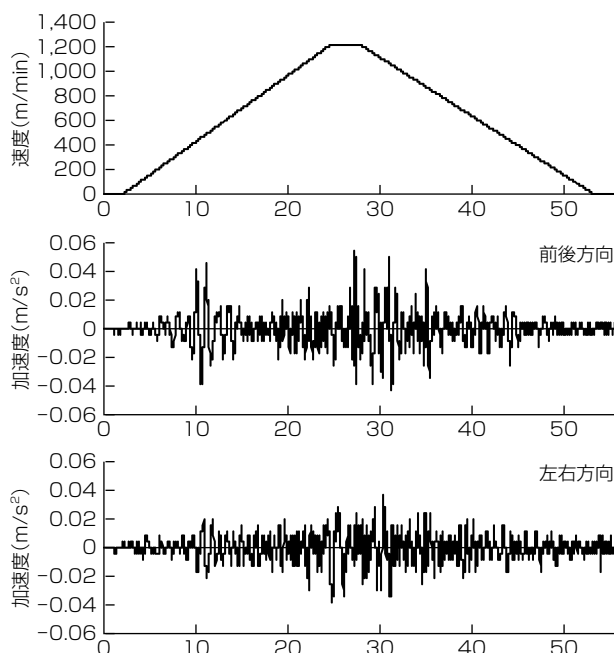


図9. 1,230m/minの超高速エレベーターのかご振動

に起因する加振，釣合いおもりとのすれ違いによって発生する風加振(29秒附近の前後方向)ともに，制振効果が得られていることが確認できる。

ローラガイドの防振機構，かごの振動伝達系，風圧による機器の自由振動を補強の追加で抑制し，HARGの制御パラメータの最適化などを経て，エレベーターの超高速化と良好な乗り心地を実現した。

1,230m/minへの更なる高速化に際しては，対応策を更に次のとおり設定し，実機へ適用した。

(4) かご振動伝達系の再調整

(5) 支配的な振動周波数のゲイン調整機能の追加

機械系の微調整に加え，かご振動で支配的となる周波数の制御を強化する機能拡充などによって，図9のようにかご振動は 0.1m/s^2 を下回っている。ARGの倍以上の速度で同等の制振性能を目指した目標を満足する形で，製品の実用化に結び付けることができた。

5. むすび

継続的に行っている超高速エレベーターの開発の中で，世界最高速エレベーターの要素技術と実機での測定結果について述べた。個々の技術を追求することはもちろん，それらの技術を製品へ昇華させた。今回の経験を基に，超高層ビルからのニーズに対して魅力ある製品を提供し続けるとともに，今後も超高速エレベーターの理想形を追求していく。

参考文献

- (1) 加藤 覚，ほか：超高速エレベーターの駆動制御システム，三菱電機技報，86，No.8，424～428(2012)
- (2) 宇都宮健児，ほか：アクティブローラガイド，三菱電機技報，79，No.10，649～652(2005)
- (3) 飯田真司，ほか：超高速エレベーターの快適性，三菱電機技報，86，No.8，433～436(2012)