

超高速エレベーターの快適性

飯田真司*
 佐久間洋一*

Passengers' Comfort in Super High-speed Elevators

Masaji Iida, Yoichi Sakuma

要 旨

近年、海外における建築物の高層化は著しく、その高さが800mを超える例もあり、また、1 kmを超える建築物も計画されている。この建物の高層化に併せてエレベーター運行速度の高速化への需要が高まり、それに応えるために、三菱電機では過去に手がけた速度750m/minを大幅に上回る速度1,080m/minの超高速エレベーターを開発した。

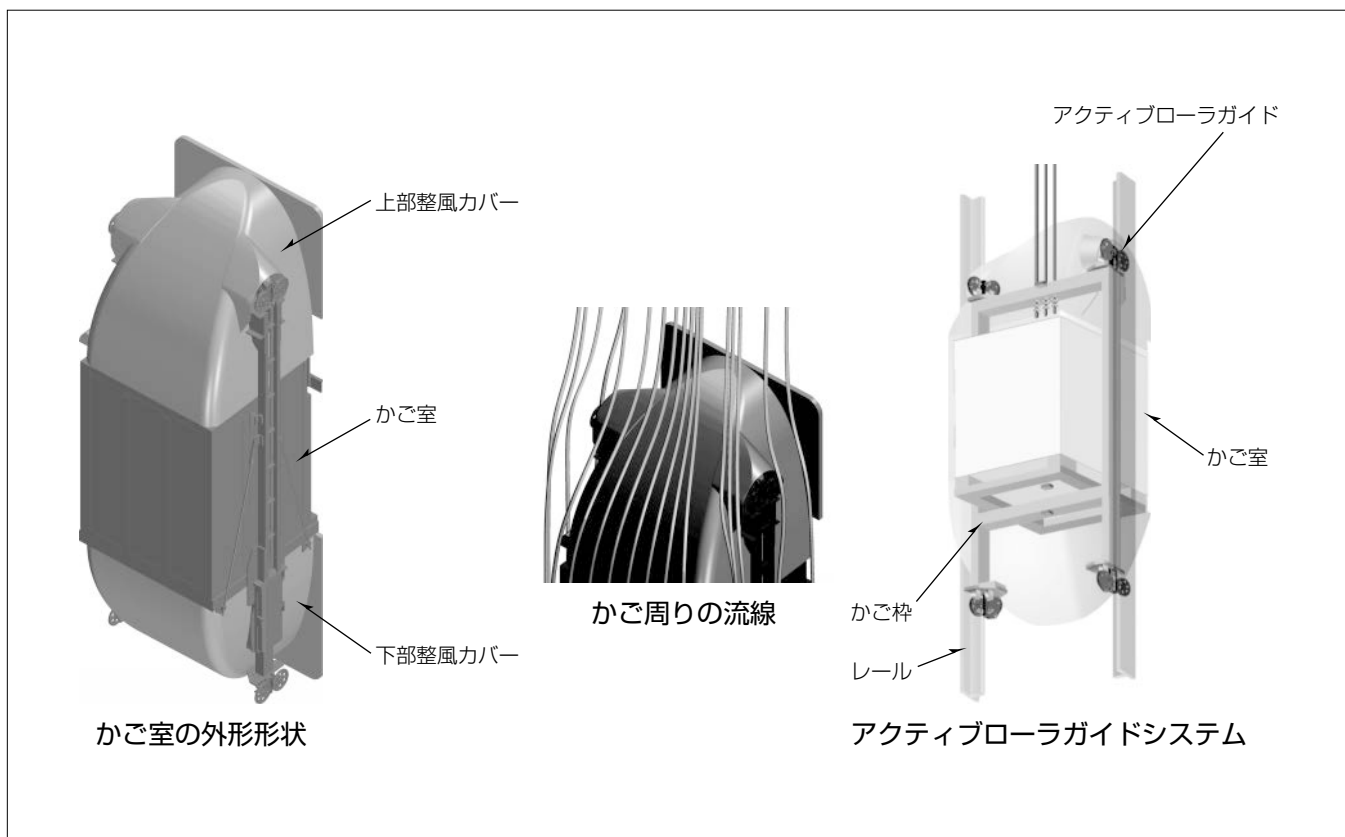
エレベーターを高速化する過程で、従来の速度領域では発生しなかった課題や、超高揚程となることによる課題に多く直面した。それらの課題はエレベーターの機器やシステムのみならず、かご室内の乗客の快適性についても同様に存在した。なお、かご室内の快適性に影響を与える因子

としては次の3つが該当する。

- (1) 高速走行中に発生するかごの振動モードに起因したかご室内振動
- (2) 高速走行中に発生するかご室内騒音
- (3) 高揚程エレベーター乗車時に発生する乗客の耳閉感

この開発では、最適化設計、数値解析や実機評価を実施することで、どちらの因子に対しても、従来の当社高速エレベーターと同等、又はそれ以上の快適性を提供可能とする製品開発を実施した。

本稿では、上記因子に関する技術課題と、それらを克服するための要素技術開発について述べる。



超高速エレベーターの快適性

超高速エレベーターかご室内の快適性に焦点を当て、かご室内振動の抑制、かご室内騒音低減対策について開発した。かご室内振動の抑制技術として、かご室とかご枠の両方に加速度センサを設け、かご室を可観測の状態では制振可能とすることによって、従来構造と同等の乗り心地を提供することが可能となった。また、かご室内騒音低減対策として、整風力バーの形状最適化、かご周りの騒音低減策、遮音かご室の開発を実施し、速度1,080m/minで目標としていたかご室内騒音値を満足するかご室を開発した。

1. ま え が き

近年、海外における建築物の高層化は著しく、その高さが800mを超える例もあり、また、1kmを超える建築物も計画されている。この建物の高層化に併せてエレベーター運行速度の高速化への需要が高まり、それに應えるために、当社では過去に手がけた速度750m/minを大幅に上回る速度1,080m/minの超高速エレベーターを開発した。エレベーターを高速化する過程で、従来の速度領域では発生しなかった課題や、超高揚程となることによる課題に多く直面した。

本稿では、超高速エレベーターの快適性に焦点を当て、かご室内振動の抑制、かご室内騒音低減対策、エレベーター乗車時の乗客の耳閉感緩和策について述べる。また、それらの技術に関する超高速エレベーター特有の技術課題と、それらを克服するための要素技術開発について述べる。

2. かご室内振動の抑制技術

2.1 高速エレベーターの制振技術

エレベーターは昇降路に設けられたレールにガイド装置が追従しながら走行するため、レール単体の微小曲がりや、レール継ぎ目の微小な“くの字”曲がりや、かごに対する加振力として作用する。過去の高速エレベーターでは、レール単体の加工精度向上、据付け精度の管理、パッシブダンパ等を併用することで、良好な乗り心地を達成していた。また、2003年にアクティブラーガイドが登場すると、レールの加振力をアクチュエータで相殺することで、従来の高速エレベーターを上回る乗り心地を提供可能となった。

今回開発した超高速エレベーターにもアクティブラーガイドを採用するが、更なる高速化に伴いかごの振動モードが課題となった。従来のアクティブ制御は、かご枠とかご室が同位相で動く速度領域の制御であり、かご枠に設けた加速度センサで振動を検知し、かご枠に設けたアクティブラーガイドで制振制御を行うシステムであった。しかし、超高速のアクティブ制御は、かご枠とかご室が逆位相で動く速度領域に達するため、従来の手法の延長では対応できず、新たな制御システムの構築に至った。次に、個々の課題と対応について述べる。

2.2 超高速化による課題(1)

エレベーターがレールから受ける加振周波数は、表1のとおり、速度とレール長さの相関(V/L)で決定される。従来は2.5Hz程度の加振周波数が中心であったが、速度の増

表1. レールからの加振周波数

	速度V(m/s)	レール長L(m)	加振周波数(Hz)
超高速(従来)	12.5	5.0	2.5
超高速(開発品)	18.0	5.0	3.6

加に比例して3.6Hz程度まで高周波側へ推移する。この値はレールが“)”のように反っている場合の加振周波数であり、“S”や“W”等複雑な形状に反っているレールを走行するケースでは、更に高周波側の加振が作用することを想定しなければならない。

エレベーターのかごの構成を見ると、レールに対してかご枠が防振支持されており、かご室は防振ゴムを介してかご枠に支持されているため、複雑な振動モードを持つことが知られている。図1に解析結果の一例を示すが、かご枠とかご室の関係は、低速領域では同位相、超高速では逆位相の振動モードとなる。従来の制振技術は、かご枠の振動を観測・制振することで、同位相に動作するかご室の振動を抑える手法である。よって、効果的に制振制御を行うためには、かご室の振動検知が必要である。

2.3 超高速化による課題(2)

エレベーターが高速で走行すると、3章に述べるとおり、かご室内騒音が増加するだけではなく、風圧による加振力が作用する。単独走行の条件では大きな影響はないが、隣接号機と高速ですれ違う場合は、千数百Nとなる風圧がかご室の側面に作用するため、単発横振動に対する配慮も必要である。

2.4 超高速用アクティブラーガイド

超高速エレベーター用のアクティブラーガイドは、かご室とかご枠の両方に加速度センサを設けており(図2)、かご室を可観測の状態で制振可能としている。よって、低

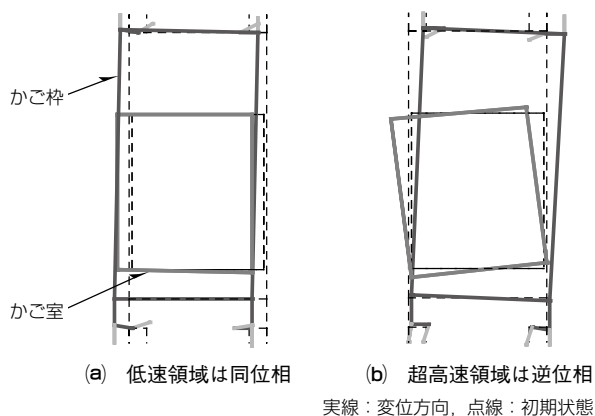


図1. 振動モード解析例

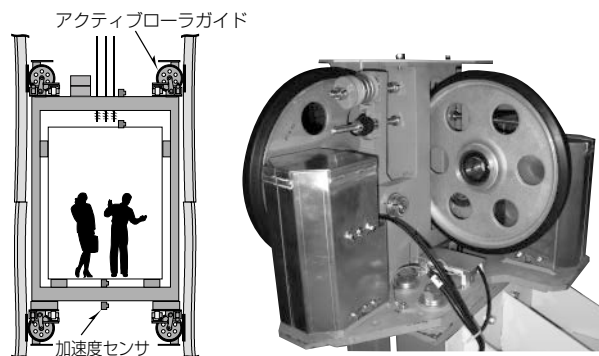


図2. 超高速アクティブラーガイド

速から超高速にかけて変化するかご室の振動モードの影響や、かご室に直接作用する風加振力についても制振制御が可能となっている。また、ローラガイド本体やリニアモータ式アクチュエータも超高速化に併せて最適設計を行っている。

このシステムの導入によって、速度依存によって大幅に悪化する乗り心地を、加減速並びに最高速となる1,080m/minの走行時で、従来のアクティブ制振と同程度まで制振することが可能となった。

3. かご室内の騒音低減技術

走行中のエレベーターかご室内の騒音レベルは、速度増加に伴って増大する。かご室内騒音は、主にロープやレールからの加振による固体伝播(でんぱ)音と、かご室周りで発生する流体騒音(風切音)が空気を伝わる空間伝播(でんぱ)音に分類され、エレベーターの速度が超高速(速度750m/minを超える速度)の領域へ上がるにつれて、かご室内騒音は流体騒音が支配的となる傾向にある。また、この流体騒音は速度の5～6乗に比例すると言われており、当社の既設エレベーターの中で最高速度となる、速度750m/minで走行するエレベーターのかご室を、仮に、速度1,080m/minで走行させた場合に、かご室内騒音は約10dB(A)近くの増加と予測する。この約10dB(A)の騒音増加分をどのように低減させるかが、今回の超高速エレベーター開発の技術的課題であった。

この超高速エレベーターのかごの騒音低減技術としては次の2つがテーマとなる。

- (1) かご周りの騒音源の低減策
- (2) かご室構造の遮音性向上

次に、これらのテーマに関する技術課題とその解決に向けた開発内容について述べる。

3.1 かご周りの騒音発生メカニズム

一般的に、騒音源となるのは圧力変動が大きいところである。そのため、かご周りの圧力変動をできるだけ小さくなるような外形形状を検討することが、この開発の第1歩であった。具体的には、高速走行時に、かご室の上部にある整風カバーの先端部に当たる空気が、整風カバーやかご室表面からの流れの剥離を最小限に抑えながら、かご室の後方に流れていくような理想的な流線形状の検討である。従来の構造では、上部整風カバーの外形形状は先端部を水平面とする曲面形状であり、さらに、かご枠の上梁(じょうりょう)部が突出していたために、かご室よりも上流部で流れが乱れやすい構造になっていた。そこで、この開発では、整風カバー先端部の流線形状を最適にすることと、かご周りの突起部分を最小限にすることに重点を置き、理想的な外形形状を検討することにした。

3.2 かご周りの音源探査

かご周りには大小含め、数多くの突起部分が存在する。エレベーター走行中に、かご周りを通る空気流が突起部分で剥離して渦が発生すると、その場所で大きな圧力変動が発生して騒音源となる。そこで、大きな騒音源となる場所を特定して、あらかじめ対策を講じておく必要があった。かご周りの流れ場で圧力変動の大きな場所を、流体の数値シミュレーションによって見つけ出し、かご室の縮小模型を用いた風洞試験によって、その圧力変動が発生している場所近傍の騒音レベルを確認した。それらの結果から、かご室周囲で大きな音源となっている位置は、かご枠の上端に取り付けられたアクティブローラガイド近傍であることが特定された。

3.3 かご周りの騒音低減策

先に述べたように、かご周りの騒音低減策としては流れを整流化させる流線形状の整風カバー取付けが主体となるため、その流線形状の最適化を実施した。また、超高速の領域で騒音源になると特定されたアクティブローラガイド近傍への対策も検討した。整風カバーの流線形状検討には流体の数値シミュレーションを使用し、整風カバーの長さや先端部の形状、曲面部の曲率半径等を変化させた数パターンのかご形状モデルで計算を行った(図3)。

その結果、突出していたかご枠の上梁部を始めとする、かご室上部にある機器を整風カバーで覆うことに最も整流効果があることが分かった。また、整風カバー先端部に作用する圧力を分散させるために、先端を尖(とが)った形状に変更した。そのため、整風カバーの長さは従来構造と比較して延長が必要となったが、理想的な流線形状を決定した。また、アクティブローラガイド近傍の対策としては、その機器を覆う小型のアクティブローラガイドカバーを新規開発した。上部整風カバーに付加する構造にすることで、走行中のアクティブローラガイド付近の流れを上手(うま)く後方に流し、騒音源をなくすことが可能となった。

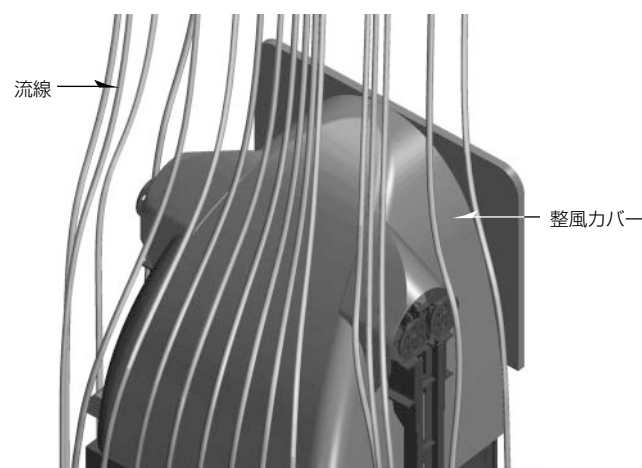


図3. かご周りの空気の流れ

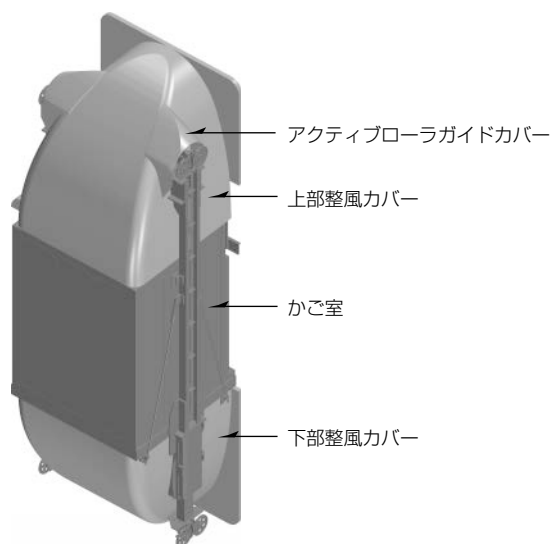


図 4. かごの外形状

このように、整風カバーの外形状の最適化、及び、かご周囲の音源対策から、図 4 に示すような超流線形の形状が完成した。かご室上部の機器を整風カバーで覆うことで突起部分を最小限にする形状として、新規アクティブローラガイドカバーを上部整風カバーと融合させる形状にすることで、かご周りを理想的な流線形状にしたことが最大の特徴である。最適化された整風カバーは、長さが従来構造の約 1.4 倍になるが、かご周囲の圧力変動を従来構造と比較して大幅に低減できた。

3.4 遮音かご室の開発

エレベーターが高速走行中に、かご周りで発生している騒音が、かご室内へ侵入するのをどのように遮音するかによって、かご室内の乗客の快適性(かご室内騒音)は大きく左右されてしまう。その対策技術としてかご室の遮音性向上がある。速度増加によってかご室外騒音は増加するため、超高速エレベーター向けとしては更なる遮音性の向上が必要となった。一般的に、遮音性を向上させるには構造部材の板厚増加などによって重量を増加させる方法があるが、かご室の重量増加はエレベーターシステムに影響が出るため実施が難しかった。そこで、かご室壁の 2 重構造を構成する板間の距離(空気層)に着目して、その距離の拡大による遮音性向上を検討した。この空気層拡大検討によって、重量を増加させずにかご室の遮音性を向上させることに成功した。また、かご室壁の遮音性向上の他に、かごの戸周りの気密対策を従来構造よりも強化するなどして、かご室全体の遮音性を向上させている。これらの構造を適用したかご室での実機評価から、速度 1,080m/min で目標としていたかご室内騒音値を達成した。

4. 耳閉感の緩和

超高層ビルやタワー向けのエレベーターでは、耳閉感と呼ばれる乗車時の耳の不快感を無視することができない。耳閉感とは、周囲気圧の変動によって周囲気圧と中耳内の圧力との間に圧力差が生じ、鼓膜が膨張することによって発生する不快感のことである。エレベーターは縦方向の移動手段であるため、昇降時の耳閉感は標高差による気圧変化から発生する。例えば、高さ 500m のビルでは、下層階と上層階の気圧差は約 6,000Pa になる。耳閉感は気圧差によって生じるため、昇降行程(建築物の高さ)に大きく依存するが、発生する不快感を完全になくすことはできない。そこで、不快感を少しでも緩和させるために、エレベーターかご室内の気圧変化を制御する方式(気圧変化曲線)を独自に開発した。また、その気圧変化曲線に沿って、かご室内気圧を制御するために気圧制御装置を新規開発し、耳閉感の緩和策として製品化につなげた。

5. む す び

超高速エレベーターの快適性に焦点を当て、かご室内振動の抑制、かご室内騒音低減対策、エレベーター乗車時の乗客の耳閉感緩和策について開発し、次のような結論を得た。

- (1) かご室内振動の抑制として、超高速エレベーター用のアクティブローラガイドを開発し、従来のアクティブ制御と同等の乗り心地を提供することが可能となった。
- (2) かご騒音低減対策として、整風カバーの形状最適化、かご周りの騒音低減策、遮音かご室の開発を実施し、速度 1,080m/min で目標としていたかご室内騒音値を達成した。
- (3) エレベーター乗車時の乗客の耳閉感緩和策として、当社独自の気圧変化曲線、及び、気圧制御装置を開発し、製品化につなげた。

参 考 文 献

- (1) 寺園成宏，ほか：エレベーターハイテク技術～世界最高速度への挑戦～，オーム社，95～99（1994）
- (2) 宇都宮健児，ほか：消費電力低減を考慮した高速エレベーター用アクティブ制振装置の開発，日本機械学会論文集 C 編，72，No.719，2048～2055（2006）
- (3) 船井 潔，ほか：超高速エレベーター走行時の耳閉感と鼓膜挙動，昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩，No.04-57，技術講演会講演論文集（2005）