

# 東京スカイツリー® 向けエレベーターの最新技術

Advanced Technologies of Elevators for TOKYO SKYTREE®

田中 和宏      武田 泰明      野田 伸一

■ TANAKA Kazuhiro      ■ TAKEDA Yasuaki      ■ NODA Shinichi

東芝エレベータ(株)は、東京スカイツリー®(注1)(事業主体は東武鉄道(株)と東武タワースカイツリー(株)、設計・管理は(株)日建設計、施工は(株)大林組)向けに大容量・超高速エレベーター4台、並びに昇降行程が国内最長(注2)464.4mの業務用エレベーター2台を開発した。このエレベーターでは、世界最大定格速度のTAIPEI101や中国大陸最高層の上海環球金融中心など、超高層建築のエレベーター技術をベースに、更なる大容量・高昇降行程への対応技術を開発した。また、国内の建築基準法及び関連法令に規定された新安全・新耐震法規への対応を盛り込むことにより、安全性と快適性の向上を実現した。

Toshiba Elevator and Building Systems Corporation has developed four ultrahigh-speed, large-capacity elevators, as well as two elevators accommodating up to 27 passengers with a running path of 464.4 m, the longest in Japan. These elevators were installed in the newly constructed freestanding broadcasting tower, TOKYO SKYTREE®, and started operation in May 2012.

We have developed advanced technologies for elevators with larger capacity and longer traveling distance based on our proprietary technologies acquired through the development of the world's fastest high-speed elevator for the TAIPEI101 Building, superhigh-speed elevators for the Shanghai World Financial Center, which is China's tallest building, and so on. In order to realize a safe and comfortable ride, we have also applied new safety and earthquake-resistance regulations prescribed in the Building Standards Act and related regulations to the design of elevator systems, including unintended car movement protection (UCMP).

## 1 まえがき

東芝エレベータ(株)は、ギネスブック認定の世界最大定格速度1,010 m/minを誇るTAIPEI101向け超高速エレベーターや、昇降行程400mを超える上海環球金融中心向け高昇降行程エレベーターを納入し、これらの開発を通じて超高速、大容量、及び高昇降行程への対応技術を確認してきた。そしてこれらの技術力を生かして、今回高さ世界一の自立電波塔の東京スカイツリー®(図1)向けエレベーターを開発した。

当社は、東京スカイツリー®向けエレベーターに求められる更なる大容量化と高昇降行程化を実現するため、各種コア技術の開発はもとより、安全性及び快適性の実現や、「建築基準法施行令第129条の10第3項第一号」で規定される「戸開走行保護装置」への対応、「昇降機耐震設計・施工指針2009年版」への対応など、様々な技術課題を解決した。

ここでは、開発したエレベーターの先端技術について述べる。

## 2 東京スカイツリー® 向けエレベーターの概要

このエレベーターの主要諸元を表1に示す。

(注1) 東京スカイツリーは、東武鉄道(株)及び東武タワースカイツリー(株)の商標。

(注2) 2011年12月時点、当社調べ。



図1. 東京スカイツリー®—大容量・高昇降行程エレベーターが据え付けられた東京スカイツリー®は、世界一の高さ634mを誇る自立電波塔である。  
TOKYO SKYTREE®

表1. エレベーターの主要諸元

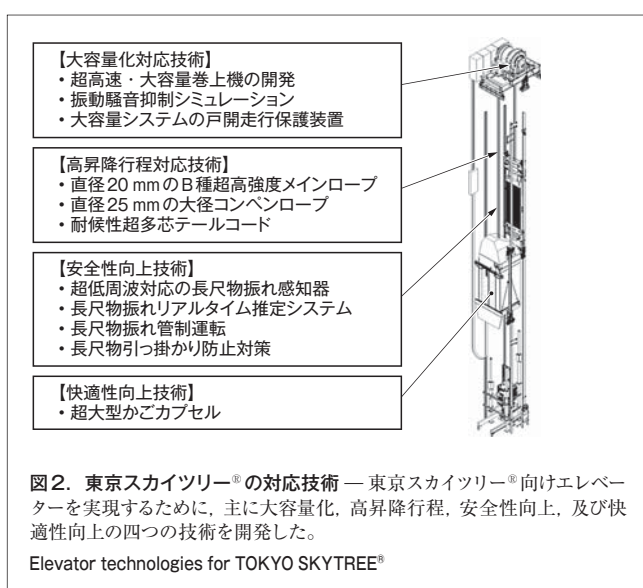
Main specifications of elevators for TOKYO SKYTREE®

項目	仕様	
	シャトル	業務用・非常用
乗車定員 (人)	40	27
積載質量 (kg)	2,600	1,800
定格速度 (m/min)	600	240 (通常時) 540 (非常運転時)
昇降行程 (m)	334.7 ~ 376.6	464.4
台数 (台)	4	2

表1のうちシャトル4台は、高さ350 mの第1展望台（東京スカイツリー®天望デッキ）への直通エレベーターであり、40人乗りで速度600 m/minかつ行程300 m超という超高速、大容量、及び高昇降行程の仕様である。

業務用・非常用エレベーター2台は各々単独昇降路で、高さ450 mの東京スカイツリー®天望回廊及びその上の業務用フロアに上がるためのエレベーターであり、国内最長の昇降行程464.4 mを走行する高昇降行程仕様が特長である。

東京スカイツリー®向けに採用したエレベーターの主な対応技術は、大容量化対応技術、高昇降行程対応技術、安全性向上技術、及び快適性向上技術の四つから成る（図2）。それぞれの詳細について以下に述べる。

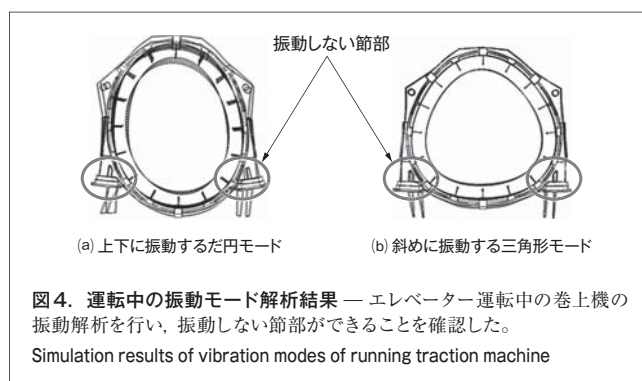
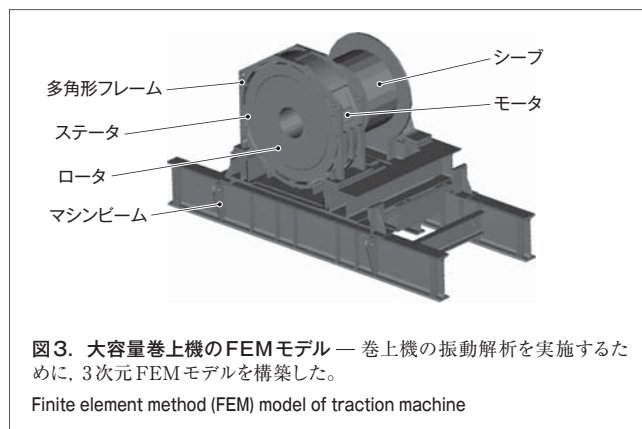


### 3 大容量化対応技術

東京スカイツリー®では、出力220 kWの大容量巻上機を開発した。一般に、巻上機はエレベーター機械室に収めるため小型・軽量化が必要になるが、これに伴い巻上機構造全体の剛性が低下する。また、大容量化に対応する巻上機用モータの大型化に伴って磁束密度が増加し、振動騒音が発生しやすくなる懸念がある。そこで、図3に示すようにマシンビームを含む巻上機全体構造を3次元有限要素法（FEM）でモデル化して振動解析を行うことにより、軽量化と大容量化の二律背反を解決し、低振動と静音化を両立できる構造を検討した。

電磁振動は、モータ部のステータとロータを構成する永久磁石と鉄心の磁気相互作用によって発生する。まず電磁解析を用いて電磁力を計算し、次に軸受力を加える電磁気-構造連成解析を用いて振動応答を計算した。これによって、運転中の巻上機と機械室床面の振動レベルを予測した。

解析結果から、この巻上機には振動伝達力を低減するため



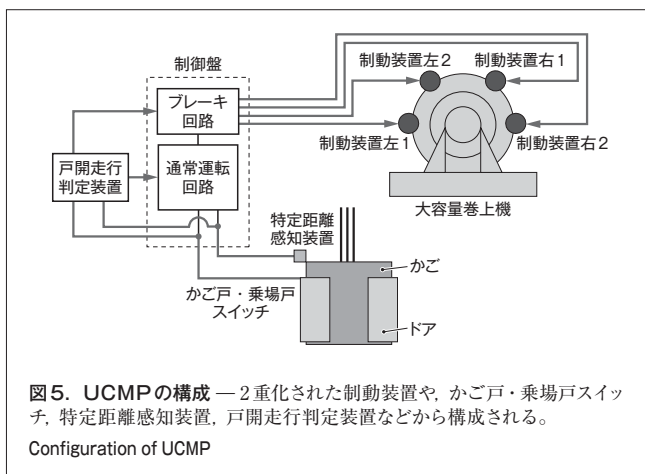
の最適形状として、多角形フレーム構造を適用した。運転中の振動モードは振動が振れまわる回転モードにはならず、振動しない節部ができることを確認した（図4）。この節部を巻上機の脚部とすることにより、マシンビームから機械室床面への振動伝達を10 cm/s<sup>2</sup>（正負ピーク間）以下に抑制した。また、機械室の壁に振動伝搬しないことから、静音化も確立した。

東京スカイツリー®は、2009年9月に施行された建築基準法施行令の改正で義務化された「戸開走行保護装置」（以下、UCMPと記す）の設置対象外であったが、利用者の安全性向上のためUCMP機能を装備した。

UCMPは、エレベーターの駆動装置や制御装置が故障して、戸が閉じる前にかごが所定の範囲を超えて昇降したときに、自動的にかごを制止させる安全装置である。UCMPを適用する際の主な技術課題を、以下に示す。

- (1) 220 kW大容量巻上機の制動装置の2重化
- (2) 戸開走行判定装置へのツインインバータシステムの適用
- (3) かご戸・乗場戸スイッチの溶着対策
- (4) 停止階乗場からのかご移動を確実に感知する特定距離感知装置

これらの技術課題に対して、図5に示す機器構成を実装することにより、挟まれ防止クリアランス及び転落防止クリアランスの基準を満足する機能を実現し、大臣認定を取得した。これらの結果、戸開走行に対する安全性の向上を実現した。



#### 4 高昇降行程対応技術

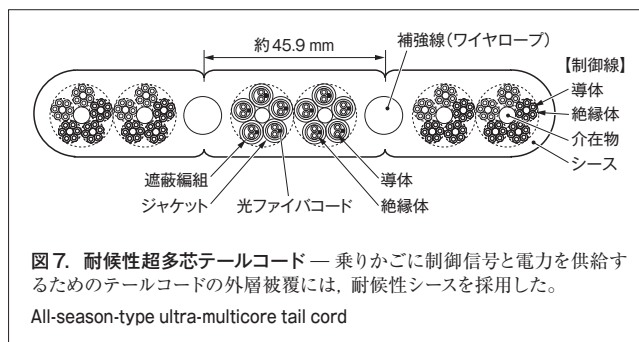
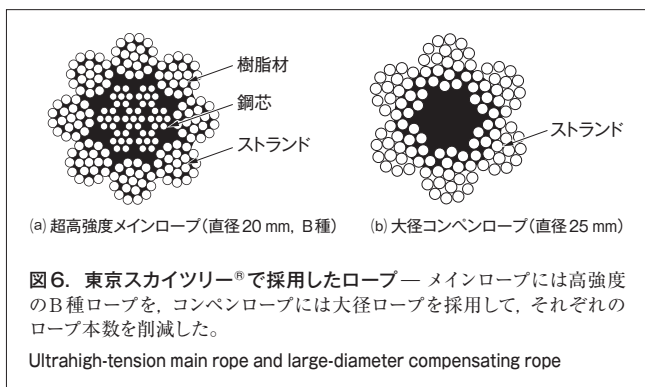
エレベーターの高昇降行程化に伴い、かごをつり下げるメインロープの自重が増加すると、ロープでロープ自身をつる状態になり、必要な強度を得るためのロープ本数が増える。

この対策として、直径20 mmの強度区分B種の超高強度メインロープ(図6(a))を10本使用することによって、一般的な強度区分であるA種ロープに比べてロープ本数を2本削減した。また、後述のコンペンロープの削減と合わせて、システム全体で約17%の軽量化に成功した。

一方、メインロープとの質量バランスを取るためにかご下につり下げるコンペンロープは、昇降路最下部に設けたシーブおもりで加重しているが、ロープ1本当たり作用する張力がメインロープと比べて少ない。このため振れやすく、また本数が多いため、ロープどうしの交差や絡まりの懸念がある。

この対策として、直径25 mmの大径コンペンロープ(図6(b))を採用した。これにより、従来の直径20 mm×13本つり構成から直径25 mm×6本つり構成に本数を大幅に削減するとともに、ロープの配置間隔を広げることによってロープどうしの交差や絡まりを抑制した。

かごへの電力供給及び制御信号の伝達には、かご下につり下げられたテールコードを用いている。高昇降行程化により



テールコードの自重は最大数トンにも達するため、かご下のつり下げ配置によってはかごの水平バランスが著しく崩れ、乗り心地に大きな影響を与える。またテールコードは、下端に加重用シーブを設けることができないため、テールコードの振れ、絡まり、及び昇降路機器への引っ掛かりも懸念される。更に、昇降路壁がガラス張りであるため、直射日光による温度変化や紫外線による被覆の劣化も想定される。

これらの対策として、高昇降行程向けに耐候性超多芯テールコードを採用した(図7)。一般的な高速エレベーターに使用するテールコードと比較して3倍以上の超多芯ケーブルとすることによって、本数を2本に抑えた。更に、かごに対して左右対称に1本ずつ均等配置することにより、かごの高さ位置によらず水平バランスが保たれるようにするとともに、テールコードどうしの絡まりが発生しにくい構造とした。外層被覆には屋外電線用の耐候性シースを採用し、温度変化や紫外線による劣化を低減した。

また、かごの高さ位置によるメインロープ、コンペンロープ、及びテールコードの質量バランス変化を極力抑制し、巻上機トルクの変動を極小化するように、これら長尺物の単位質量公差を±1%以下で管理した。かご水平方向バランスもコンペンロープとテールコードのかご下つり下げ配置を最適化し、かご水平バランス変動を抑制することによって、快適な乗り心地を実現した。

#### 5 安全性向上技術

東京スカイツリー®のような塔状の超高層建築物では、地震や強風により建物揺れが発生する。それに伴ってメインロープなどの長尺物にも振れが発生し、昇降路機器への引っ掛かりが懸念される。また、建物揺れの固有周波数は0.1 Hz以下の超低周波(建物揺れの1往復の周期が10秒以上)であるため、一般的な振動センサでは建物揺れを検知することが困難となる。

このため、0.08 Hzまでの建物揺れを検出可能な超低周波対応の長尺物振れ感知器(図8)を新たに開発し、水平2方向の建物揺れ量を電圧値で常時測定できるようにした。また、



図8. 超低周波対応の長尺物振れ感知器 — 水平2方向の建物の揺れを、常時測定可能である。  
Rope-sway sensor for ultralow frequency

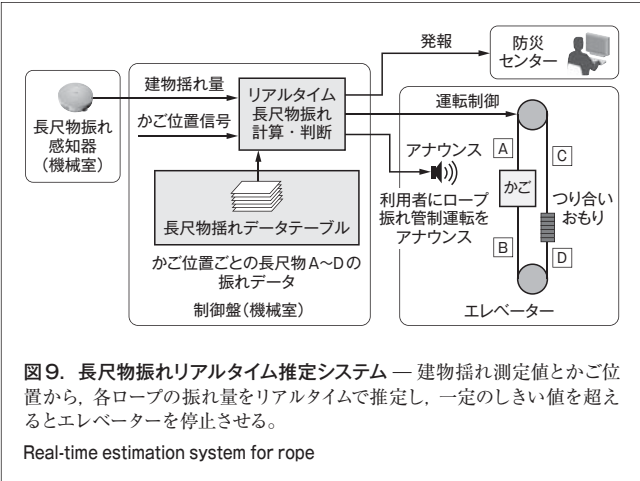


図9. 長尺物振れリアルタイム推定システム — 建物揺れ測定値とかご位置から、各ロープの振れ量をリアルタイムで推定し、一定のしきい値を超えるとエレベーターを停止させる。  
Real-time estimation system for rope

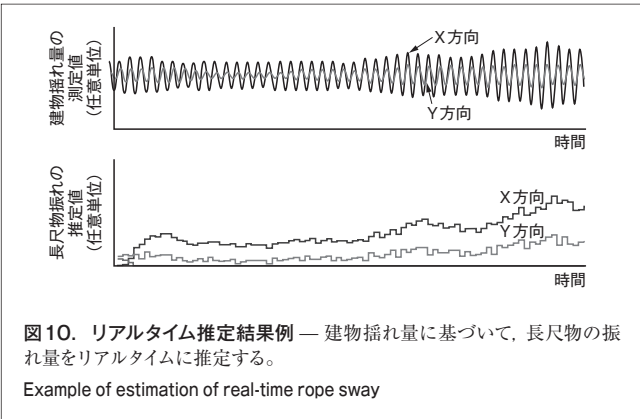


図10. リアルタイム推定結果例 — 建物揺れ量に基づいて、長尺物の振れ量をリアルタイムに推定する。  
Example of estimation of real-time rope sway

この情報から各長尺物の振れ量を推定する長尺物振れリアルタイム推定システム (図9) も開発し導入した。

このシステムでは、想定される全てのかご位置及び建物揺れ量に対して図9に示す長尺物であるロープA～Dの振れ量成長推移をあらかじめシミュレーションによりテーブル化しておく。そして、現在のかご位置情報と建物揺れ情報からテーブルを参照し、各長尺物の振れ量を常時演算して推定するのである。

長尺物振れ推定結果 (図10) に応じて4段階の長尺物振れ管制運転モードから常時最適なものを選択し、必要に応じてかごを一時的に退避させるなど、安全性を向上させた。

また、ハード面での引っ掛かり防止対策については、「昇降機耐震設計・施工指針2009年版」に記載されている長尺物引っ掛かり防止対策の全項目に加えて、全ての昇降路内突起物に対して引っ掛かり防止対策を施した。

## 6 快適性向上技術

超高速走行時に発生する風切り音の対策として、大容量かごに合わせて超大型の整風カプセル (図11) を設置し、一般的な高速エレベーターと同等の静粛性を確保した。

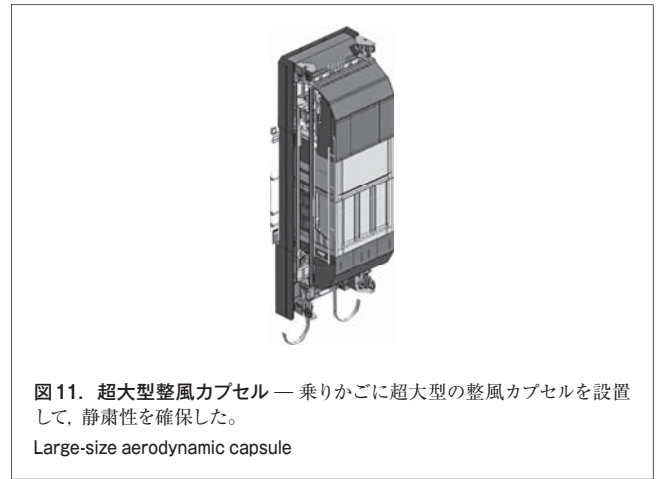


図11. 超大型整風カプセル — 乗りかごに超大型の整風カプセルを設置して、静粛性を確保した。  
Large-size aerodynamic capsule

## 7 あとがき

既開発の技術を継承しつつ、更なる大容量化、高昇降行程化、安全性向上、及び快適性向上を実現し、東京スカイツリー®向けエレベーターに実装した。

当社はこの開発で培われた先端技術を生かし、今後も市場ニーズに応えられるエレベーターを提供していく。



田中 和宏 TANAKA Kazuhiro  
東芝エレベータ (株) 技術本部 開発部参事。  
エレベーター機械系の設計・開発に従事。日本機械学会会員。  
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



武田 泰明 TAKEDA Yasuaki  
東芝エレベータ (株) 技術本部 開発部参事。  
エレベーター電気系の設計・開発に従事。情報処理学会会員。  
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



野田 伸一 NODA Shinichi, Ph.D.  
電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池  
応用・パワエレシステム開発部主幹, 博士 (工学)。交通車両用モータ  
の研究・開発に従事。日本機械学会, 電気学会, 日本音響学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center