

東京スカイツリー®に導入されたエレベーターの稼働率を向上させる長尺物振れ抑制システム

Introduction of Rope-Sway Suppression System for Elevators at TOKYO SKYTREE®

田中 和宏

中島 大輝

荻本 真也

■ TANAKA Kazuhiro

■ NAKAJIMA Taiki

■ OGIMOTO Shinya

首都圏では、高層建築物の建設計画が次々と発表されている。高層建築物のエレベーターでは、長周期地震動や強風による建物揺れに伴う長尺物（ロープなど）の引っ掛かりを防止するため、長尺物振れ管制運転により運行を一時停止するケースがある。近年増加傾向にある長周期地震動の頻度を考えると、高層建築物におけるエレベーター稼働率の確保は、安全の確保とともに喫緊の課題と言える。

東芝エレベータ(株)は、高層建築物における長尺物振れそのものを抑制してエレベーターの安全かつ快適な継続利用を可能にする、長尺物振れ抑制システムを開発した。これを、2015年に東京スカイツリー®のエレベーターに導入した結果、長尺物振れ管制運転による停止回数が従来に比べて減少し、稼働率が向上した。また、高さ300 mを超える建築物に適用した場合のシミュレーションにより、このシステムが汎用的に活用できることを確認した。

A number of projects for the construction of high-rise buildings are being planned in the metropolitan area. In elevator systems for such high-rise structures, a rope-sway emergency operation system can temporarily stop operation to prevent rope entanglement due to building sway in the event of an earthquake with long-period ground motion or strong wind. With the increasingly frequent occurrence of long-period earthquakes in recent years, however, both securing the safety of elevators in high-rise buildings and improving their operating rate are important issues to be addressed.

With this as a background, Toshiba Elevator and Building Systems Corporation has developed a system that makes it possible to continuously provide users with a safe and comfortable ride by suppressing rope sway even in high-rise buildings. We have introduced this system at TOKYO SKYTREE® and confirmed that it improves the operating rate by reducing the number of rope-sway emergency operations compared with the conventional system. We have also confirmed the effectiveness of this system through the results of simulations of its application to buildings exceeding 300 m in height.

1 まえがき

東芝エレベータ(株)は、これまで昇降行程400 mを超えるエレベーターの開発を通して高昇降行程対応技術を確立してきた。これらの技術を生かし、高さ世界一の自立式電波塔である東京スカイツリー®（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・監理は(株)日建設計、施工は(株)大林組(図1)のために300 mを超える高昇降行程のエレベーターを開発し、2012年に納入した⁽¹⁾。主要諸元を表1に示す。

表1のうち、乗用シャトルエレベーター4台は、高さ350 mの第1展望台にあたる東京スカイツリー®天望デッキへの直通エレベーターである。また業務・非常用エレベーター2台は、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る。いずれも現在に至るまで順調に稼働している。

このような高層建築物にエレベーターを設置する場合、周期が長くゆっくりとした揺れである長周期地震動や強風に伴う建物の揺れにより、ロープなどの長尺物が振れることがある。一般に、建物の高さが200 mを超えると、建物と長尺物が共振して長尺物振れが大きくなる傾向がある。長尺物が揺れて、昇



写真提供：東武タワースカイツリー(株)

図1. 東京スカイツリー® — 乗用シャトル4台及び業務・非常用2台の東芝エレベータ(株)製の高昇降行程エレベーターが設置されている。
TOKYO SKYTREE®

降路機器への接触や引っ掛かりなどが懸念される場合には、機器保全のためにエレベーターの運行を一時的に停止させる長尺物振れ管制運転（以下、管制運転と略記）に切り替える。

首都圏では200 mを超える高層建築物を多数計画している。また近年、国内での地震発生回数が増えていることに伴い⁽²⁾長周期地震動の発生頻度が増加傾向にあることから、高

表1. エレベーターの主要諸元

Main specifications of elevators for TOKYO SKYTREE®

項目	仕様	
用途	乗用シャトル	業務・非常用
最大定員	40人	27人
定格積載	2,600 kg	1,800 kg
定格速度	600 m/min	240 m/min (通常運転時) 540 m/min (非常運転時)
昇降行程	334.7 ~ 376.6 m	464.4 m
台数	4台	2台

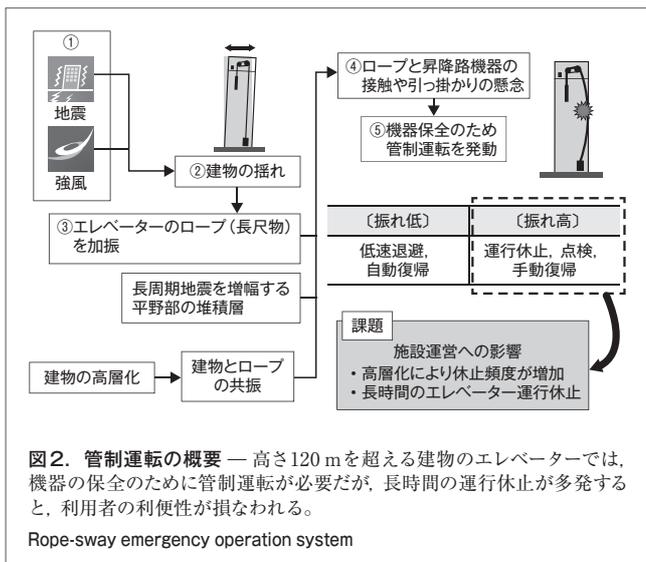
層建築物に設置されるエレベーターで長尺物振れ管制運転による運行の一時停止の回数を抑えて、十分な稼働率を確保することは喫緊の課題である。

そこで当社は、高層建築物における長尺物振れを抑制し、エレベーターの安全で快適な継続利用を可能にする長尺物振れ抑制システム（以下、抑制システムと略記）を開発し、東京スカイツリー®のエレベーターに導入した。ここでは、その最新技術について述べる。

2 課題と対策

管制運転は、主に高さ120 mを超える建物のエレベーターに適用されている。

一般財団法人 日本建築設備・昇降機センターが発行している2009年版以降の“昇降機耐震設計・施工指針”に、振れ量の感知レベルが“〔振れ高〕^(注1)”の場合は機器損傷が懸念されるので、点検後には手動復帰させることが規定されている(図2)。このため、運行休止時間が長くなる。



(注1) 〔振れ高〕は、長尺物が昇降路機器と強く接触し昇降路機器が変形する可能性のある振れ状態を示す感知レベル。“〔振れ低〕”は、〔振れ高〕の50～70%程度の振れ状態を示す感知レベル。

ロープは、建物とロープの固有周期が近いほど、共振で振れやすくなる(図3)。建物の高さが200 mを超えると、ロープと建物揺れの固有周期が、振動工学では避けるべきとされる±10%以内の共振域と重なる。そのため、建物が揺れるとロープ振れの応答が大きくなる。建物の揺れ量も大きくなるため、ロープの加振量も増加し、ロープ振れが級数的に増大する。結果として、高さ200 mを超える建物では管制運転が発動される頻度が増加し、エレベーターの稼働率低下につながる。高層建築物における近年発生した地震によってエレベーターの管制運転が発動した例を表2に示す。東京では震度1まで減衰するような遠方の長周期地震動でも影響が出ている。

長尺物振れの抜本的対策としては、ロープ振れ応答を低下させる、すなわちロープと建物の固有周期をできるだけ大きくずらすことが考えられる。建物の固有周期は主に構造と高さで決定され、調整が困難である。そこで、ロープの固有周期を建物から離すことが現実的である。ロープの長さを l (m)、線密度を ρ (kg/m)、張力を S (N)としたとき、ロープの弦の1次固有周期 T (s)は単純化して次のように求められる。

$$T = 2l \sqrt{\frac{\rho}{S}} \quad (1)$$

式(1)よりロープの固有周期は、 l と、 ρ の平方根に比例し、 S の平方根に反比例する。 l は建物の高さやかごの位置によって

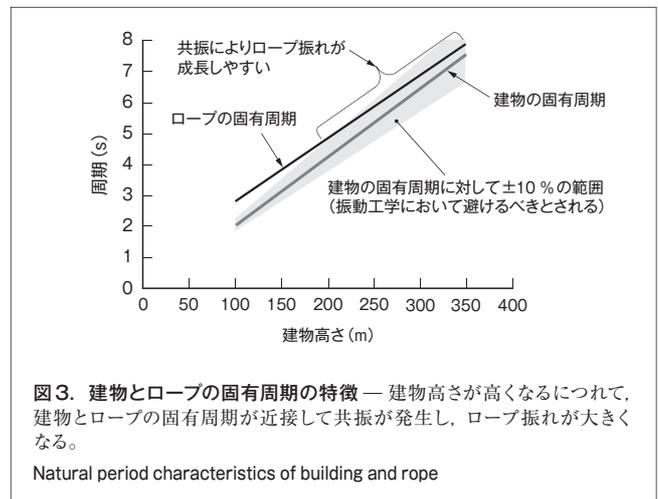


表2. 高層建築物で管制運転が発動した例
Past cases of rope-sway emergency operation

地震名	発生日	震源地の最大震度	東京の震度	管制運転発動状況
福島県沖地震	2014年7月12日	震度4	震度2	〔振れ高〕
長野県北部地震	2014年11月22日	震度6弱	震度2	〔振れ高〕
小笠原諸島西方沖地震	2015年5月30日	震度5強	震度4	〔振れ高〕
熊本地震(本震)	2016年4月16日	震度7	震度1	〔振れ高〕

変化するため調整が不可能であり、またSはかごや昇降行程の仕様を満たすために、一定値以下にはできない。そこで、軽量で高強度なロープを採用して大きなSを掛けることでTを低下させ、建物の固有周期から大きくずらすことが対策として有効である。その結果、ロープ振れ応答の低下、ロープ振れ量の抑制、及び管制運転発動頻度の低減が期待できる。

3 抑制システムの概要

東京スカイツリー® 乗用シャトルエレベーターの管制運転発動を抑制するシステムの概要を、図4に示す。システム全体の質量を軽量化し、その分をおもりとして最下端に付加し、ロープ張力を増加させている。また、かごの軽量化により快適性が損なわれないような振動対策も実施している。

3.1 ロープ類の軽量・高強度化

抑制システム実現のうえでもっとも重要なメインロープには、JIS G 3525 (日本工業規格 G 3525)「ワイヤロープ」に規定されているなかで、もっとも強度の高い種別であるT種を超える特殊な高強度線材を採用した。また、ロープの芯に特殊な軽量材を用いることで、20%の軽量化を実現しながら破断荷重を4%向上させた。メインロープの構造を図5に示す。

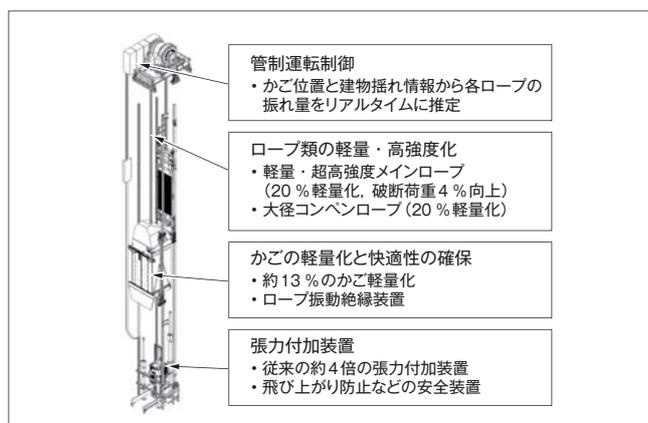


図4. 抑制システムを実現するための技術 — 長尺物振れ自体を抑制し、管制運転の頻度を減らすための要素技術である。

Technologies to suppress rope-sway emergency operation of elevator

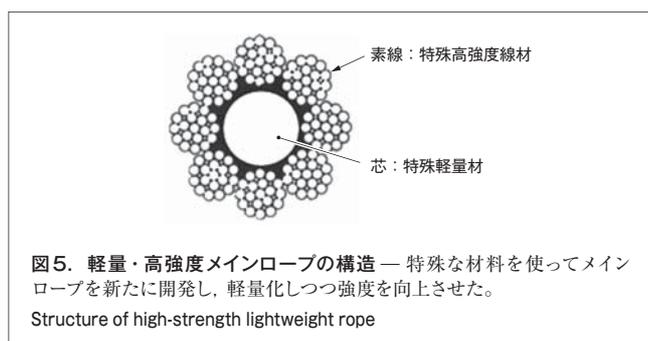


図5. 軽量・高強度メインロープの構造 — 特殊な材料を使ってメインロープを新たに開発し、軽量化しつつ強度を向上させた。

Structure of high-strength lightweight rope

メインロープとの質量バランスを取るためのコンペンロープについても、従来に比べて20%の軽量化を実現した。

3.2 かごの軽量化と快適性の確保

かごは構造や外層板の最適化により軽量化した。

高速走行中に終端階付近でロープ振れによる横加振が発生する懸念がある。そこで、ロープ振動絶縁装置をかご上下に設置して、メインロープ及びコンペンロープの横揺れ加振力をかごに伝えない構造とし、利用者の快適性を確保した(図6)。

振動するロープからかご上下端部に作用する水平方向の荷重は最大7,500 Nを想定し、材料に軽量・高強度アルミニウム合金を採用した。この結果、必要な強度と剛性を確保しつつ、システムの性能向上に必要な約13%のかご軽量化を実現した。

3.3 張力付加装置

ロープ類やかごを含むシステム全体において、材料や構造の最適化で軽量化した分の質量を、システムの最下端にあるコンペンシーブにウェイトとして追加し、ロープ全体の張力を増加させた(図7)。この結果、コンペンシーブ本体や飛び上がり防止装置を含む自重は従来の約4倍となり、ロープ振れ応答の抑制に寄与している。

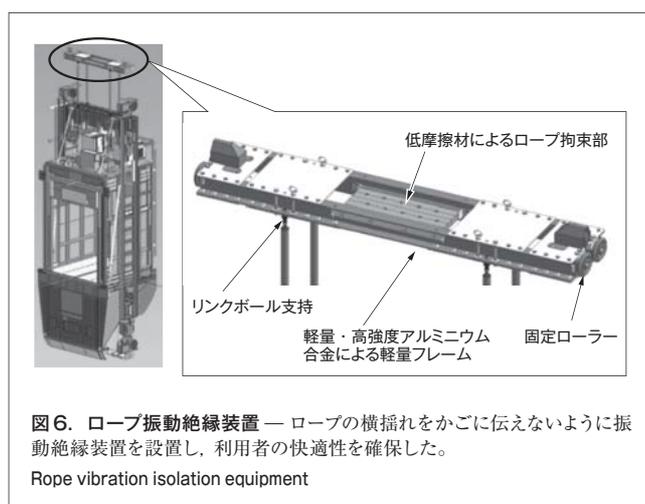


図6. ロープ振動絶縁装置 — ロープの横揺れをかごに伝えないように振動絶縁装置を設置し、利用者の快適性を確保した。

Rope vibration isolation equipment

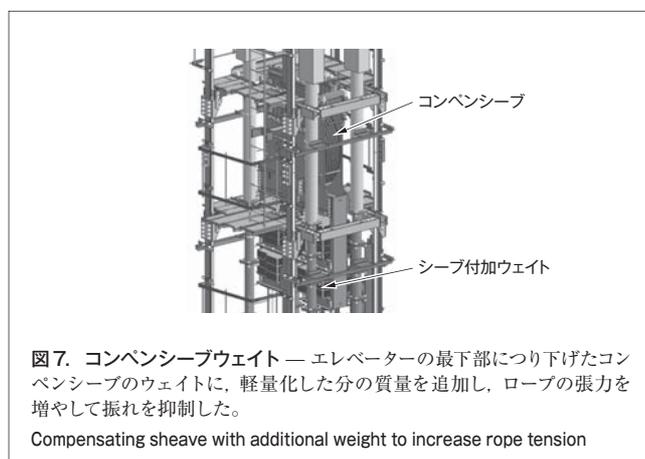
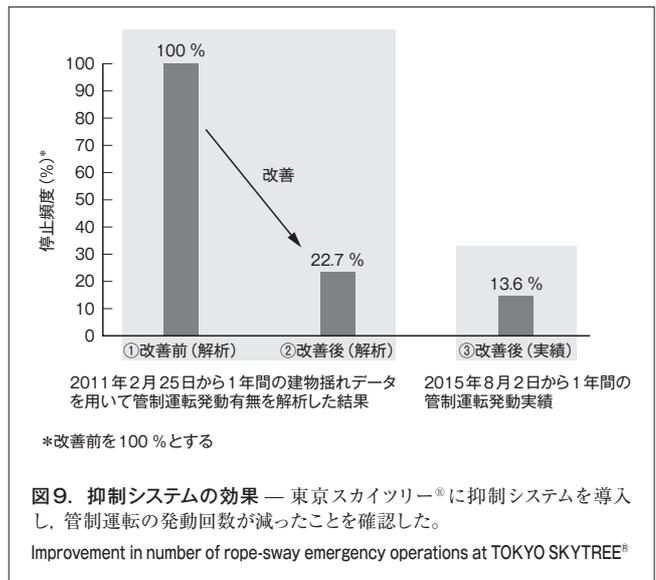
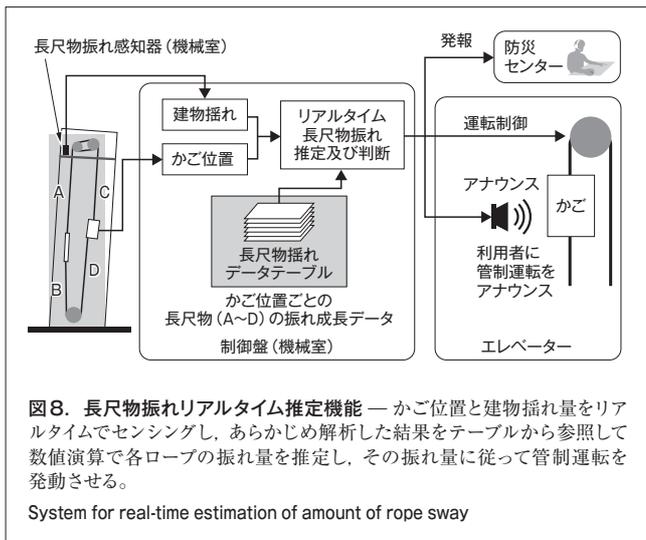


図7. コンペンシーブウェイト — エレベーターの最下部につり下げたコンペンシーブのウェイトに、軽量化した分の質量を追加し、ロープの張力を増やして振れを抑制した。

Compensating sheave with additional weight to increase rope tension



3.4 長尺物振れリアルタイム推定を用いた管制運転制御

各部の質量仕様を基に、建物の揺れ量とかが位置から各ロープの振れ量をリアルタイムで推定し、管制運転発動を判断する機能を搭載している。エレベーターの制御装置でロープ振れ解析をリアルタイムで実施することは、処理速度的に困難である。そこで、全てのかご位置で停止した条件をあらかじめ想定して、ロープ振れ量の時系列解析を実施し、データテーブルに格納しておく(図8)。そのデータを基にテーブルルックアップ方式で数値演算を行い、各ロープの振れ量をリアルタイムで推定する。

4 抑制システムの効果

開発した抑制システムを、東京スカイツリー®乗用シャトルエレベーター「冬」号機へ適用した場合、管制運転発動回数を従来と比較した結果を図9に示す。左の二つのデータ①及び②は、2011年2月から1年間の東京スカイツリー®の建物揺れデータを用いた解析結果で、管制運転発動回数を算出したものである。右のデータ③は、システム入替後の2015年8月から1年間の、実際の管制運転発動回数を示す。管制運転による停止回数は大幅に減少しており、ほぼ解析どおりの実績が得られた。

5 300 m級高層建築物への展開

世界の高層建築物の数は増加傾向にあり、わが国でも300 m級の計画が複数ある。一般オフィス向けエレベーターは、定員が24人以下のかごが多く昇降路面積も小さいため、特に釣合おもり側のロープと昇降路機器との距離が近い。したがって、このような構造的な要因に加え、ロープがもっとも振れやすいかご位置での解析結果を基に安全性の高い管制運転し

かご停止位置	管制運転発動状況*	
	改善前	改善後
61~64階	あり (振れ高)	なし
51~60階		
41~50階		
31~40階		
21~30階		
11~20階		
1~10階	あり(振れ低)	
B5~B1階		

B: Basement

*過去の長周期地震(福島県沖地震(2014年), 長野県北部地震(同年), 熊本地震(2016年))の観測波と同程度の揺れを建物の機械室に連続で与えた場合

図10. 300 m級高層建築物での管制運転発動のシミュレーション結果 — 従来は、かが位置によらず管制運転が発動されていたが、長尺物振れリアルタイム推定機能の効果で管制運転の発動回数が抑制された。

Result of simulation of improvement in occurrence of rope-sway emergency operations at 300 m-class high-rise building

きい値を設けているので、管制運転が発動しやすい(表2)。

一方、近年長周期地震動の発生頻度が増加しており、高層ビルにおけるエレベーター稼働率を十分に確保することは、行政や業界だけでなく一般の利用者からも強く求められている。そこで、長尺物振れリアルタイム推定機能の導入、及びオフィスビル特有の釣合おもり側ロープ空間の確保を実施した。その効果をシミュレーションにより確認した結果を図10に示す。これにより、かごの停止位置によらず、ほぼ管制運転発動が抑えられることを確認した。

大がかりな工事を伴わない長尺物振れリアルタイム推定機

能を導入するだけでも一定の稼働率改善効果が見込めることから、長周期地震動発生時の早期復旧対策として、既設の物件に対しても適用の拡大を推進している。

6 あとがき

安全性と快適性を維持しながら、長周期地震動や強風があってもエレベーターの運行を継続できる抑制システムを開発し、東京スカイツリー®に納入して実際に改善効果を確認した。また、300 m級の建築物への適用効果についてもシミュレーションで確認した。いずれも管制運転の発動を大幅に抑制でき、長周期地震動や強風のときも稼働率の確保が可能になる。

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るエレベーターを提供していく。

文 献

- (1) 田中和宏 他. 東京スカイツリー®向けエレベーターの最新技術. 東芝レビュー. 67, 11, 2012, p.16-19.
- (2) 気象庁. “震度データベース検索”. 気象庁. <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>>, (参照 2017-03-10).

・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。



田中 和宏 TANAKA Kazuhiro

東芝エレベータ(株) 技術本部 開発部参事。
エレベーター機械品の開発・設計に従事。日本機械学会会員。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



中島 大輝 NAKAJIMA Taiki

東芝エレベータ(株) 東京支社 営業技術部。
エレベーター及びエスカレーターの引合いから引渡しまでの工
務業務に従事。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



荻本 真也 OGIMOTO Shinya

東芝エレベータ(株) 生産・建設本部 設計部主任。
国内ギアレスエレベーターの機械品生産設計に従事。
Toshiba Elevator and Building Systems Corp.