

## 〔基調講演〕

### 超高速・超高行程エレベーターを実現した技術と将来展望

東芝エレベーター 藤田善昭

#### 1. エレベーター高速化の歴史

19世紀後半に安全性を向上させた近代的なエレベーターが登場して以来、エレベーターは建物の高層化と歩調を合わせるように高速化の歴史をたどってきた。アメリカ・ニューヨークでは1930年台にエンパイアステートビルに代表される摩天楼が登場し、エレベーターの昇降距離の増加に合わせてエレベーターも高速化を遂げている。1973年にシカゴに建設された高さ442m、当時世界最高層のビルとなったシアーズタワー（現ウィリスタワー）では、分速約540mという世界最高速のエレベーターが設置された。

それ以降は、世界最高速というタイトルを1つの技術のシンボルとして、日系メーカーによってエレベーターの最高速が塗り替えられていく。1978年に竣工した高さ240mの池袋サンシャインシティでは分速600mのエレベーターが納められ、1993年に竣工した高さ296mの横浜ランドマークタワーでは、分速750mのエレベーターが納められた。さらに2004年に台北に竣工した高さ508m、当時世界最高層のビルTAIPEI101では、ついに分速1kmの壁を越えた分速1010mのエレベーターが納入された。これらのエレベーターはそのビルの価値を高めるビルの顔として、多くの人を運んできた。

#### 2. 超高速エレベーターを実現する技術

超高速のエレベーターを実現するためには、単に強力なモーターで高強度のロープを高速で巻き上げればよいというものではない。エレベーターが人を運ぶ乗り物である以上、安全かつ快適であることが絶対条件となる。そして速度が速くなればなるほど、これを実現するには新しい技術や高度な技術が求められる。この超高速エレベーターを実現した駆動、安全、快適の3つの技術について紹介する。

##### 2・1 駆動する技術

エレベーターを駆動する技術は、消費電力を抑えながら安全かつ滑らかに駆動することを求められるために、永久磁石を使用した同期電動機をインバーターで制御する。モーターは巻線を2系統に分け、それぞれを別々のインバーターで駆動する。これによっても1系統が故障してもエレベーターが完全に故障停止とならず、乗客の閉じ込めを回避することができる。しかし一方では、2系統の高精度に同期させる制御が必要となる。

また巻上機（モーター）は低振動・低騒音が求められるため、電磁界解析や構造解析により振動騒音の原因となる電磁振動を抑えている。さらに巻上機の振動が建物に伝わり、建物を加振して居室騒音となることを押さえるため、巻上機の支持構造や防振構造についても、構造解析により最適化の取り組みがなされている。

巻上機の制御では、モーターの脈動やロープの弾性に起因する乗りかごの振動を押さえるため、フィードバックやフィードフォワードで振動を打ち消す制御が行われており、インバーター制御とも相まって滑らかで快適な乗り心地を実現している。

乗りかごを吊り上げ巻上機の駆動力を乗りかごに伝えるロープは、高行程のエレベーターでは如何にロープ本数を抑えるかが重要な課題となる。このため、素線強度が高く、 $\phi 20\text{mm}$ 以上の大径で、素線密度の大きい断面構成をとるIWRCロープなどが採用される。

##### 2・2 安全性を確保する技術

エレベーターの最も基本的な安全装置は、万が一、ロープがすべて切れた場合にも乗りかごを安全に停止させる非常止め装置と、かごが最下階に到達しても停止しなかった場合に衝突の衝撃を安全な水準にまで和らげる緩

衝装置である。

非常止め装置はオーバースピードになった乗りかごの運動エネルギーを、摩擦による熱エネルギーに変えて吸収することで乗りかごを停止させる。具体的には、乗りかごの両側にあり乗りかごをガイドするレールを、摩擦材で強く挟みつけることでかごを停止させ保持する。超高行程の高速エレベーターでは、通常の高速エレベーターと比べて運動エネルギーが数十倍にもなるため、摩擦材の開発が重要となる。耐衝撃性・耐熱性・高摩擦などの特性をあわせもつ特殊なセラミックが適用されている。

昇降路のピットに設置される緩衝装置は、安全な減速度で乗りかごを停止させるためには非常に大きなストロークが必要となる。しかし昇降路のピットに長大な緩衝装置を設置するには地下深くピットを掘る必要があるため、建築に対する制約や負担が大きくなる。このため少しでも緩衝装置の全長を短くするために、最下階付近でエレベーターを強制的に減速する制御システムとともに、テレスコピックタイプの緩衝装置が採用される。

### 2・3 快適な乗り心地を提供する技術（騒音低減）

狭い昇降路を超高速で走行するエレベーターでは、走行に伴う風切音が増大する。一般に風切音の音響エネルギーは速度の6乗に比例するとも言われており、分速が1000mを超すような超高速エレベーターでは、風切音低減が大きな技術課題の1つとなる。風切音を抑えるには発生する音自体を下げることで、音がかご内に聞こえないようにすることの2つのアプローチがある。前者では乗りかごの形状を流線形にして乗りかごの周囲での気流の剥離・再付着をなくす取り組みや、局部的な気流の増速を押さえることが有効となる。それには流れの可視化が必要であり、流れ解析や風洞実験をもとに乗りかごや昇降路内の形状を最適化している。また後者では、かご室のパネルの多重化やパネル継ぎ目の徹底した隙間ふさぎなどが有効となる。さらにはかご内の騒音を能動的に消すアクティブ消音技術も、研究レベルでは取り組まれている。

### 2・4 快適な乗り心地を提供する技術（振動低減）

乗りかごの横揺れも速度に比例して増大する。この対策の基本は、如何に乗りかごをガイドするレールをまっすぐに設置するかということになる。このためガイドレールの据付では、レーザー光線や垂下したピアノ線などを基準に、数百メートルにもおよぶ全行程でのズレを2mm以内に抑えている。また長さ5mのガイドレールの継ぎ目はすり合わせを行い、わずかな段差も許容しないように管理している。さらに乗りかごをガイドレールに沿ってガイドする案内装置は、バネと減衰を最適化することでレールに微小な曲がりや段差があっても、乗りかごへの影響が最小になるように設定されている。

以上のような対応を実施しても超高速エレベーターでは隣接するエレベーターとすれ違う場合や昇降路内の大きな段差を通過する際に、過渡的に大きな加振を受ける場合がある。このような加振の影響を抑えるとともに乗りかごに生じた揺れをいち早く減衰させるために、乗りかごに能動的な制振機構を装備するケースもある。現在、製品化されているものとしては、乗りかごの床下に設置した制振質量をかごの揺れを押さえるように制御するマスダンパー方式のものや、自動車のアクティブサスペンションのように、案内装置の支持力をアクティブ制御するものがある。また、磁力によってガイドレールに対して乗りかごを浮上制御し、レール不正の影響を低減したり、揺れの速やかな減衰を目指す装置も研究が進められている。

### 2・5 快適な乗り心地を提供する技術（気圧変化影響の緩和）

超高行程のエレベーターでは、昇降に伴う気圧変化が乗客の聴器に与える影響が大きな問題となってくる。一般に高度が100m上がれば気圧は約12hPa低下し、耳抜きを行わなければ耳詰まりが生じ不快に感じる。例えば東京スカイツリー®の高さ450mの天望回廊までエレベーターで直行すれば約54hPaの気圧差が発生し、頻繁に耳抜きを行わなければいけない。建物自体に気圧制御機能があり建物内部の気圧がすべて均一に保たれていない限り、基本的にこの気圧変化は避けられないものだが、乗客の不快感を少しでも和らげるために乗りかご内の気圧制御を行うシステムがある。エレベーターの速度は加速・定速・減速と変化するが、かご内の気圧もこの速度変化パターンに合わせて変化し、最高速で定速走行しているときに最も気圧変化が大きくなるため頻繁に耳抜きが必要となる。気圧制御の1例としては、スタートから停止まで加速・減速中も含めて一定の割合でかご内の気圧

変化させることで、定速走行中の気圧変化の割合を和らげて不快感を緩和する装置があり、TAIPEI101のエレベーターに装備されている。

乗りかご内の気圧制御を実現するには制御システムに加えて、開閉するドア回りを含め乗りかごの気密化や気圧荷重に耐えるかごの構造など様々な課題がある。航空機や高速車両では実現されている技術ではあるが、基本的なエレベーターのかご形状を維持しながらの実現には高いハードルがある。しかしこの気密構造を実現すれば、同時にかご内騒音の低減にも大きな効果がある。

### 3. 東京スカイツリー®のエレベーター

今年5月22日、日本中の注目を集める中、東京の新しいランドマークとして東京スカイツリー®がオープンした。主な昇降機設備として、高さ350mの天望デッキへ乗客を運ぶ4台のエレベーター、天望デッキと高さ450mの天望回廊を結ぶ2台のエレベーター、そして業務用に使われる昇降行程464.4mの2台のエレベーターがある。天望デッキへ向かうエレベーターは40人乗りのシャトルエレベーターながら、速度は600m/分の超高速エレベーターであり、業務用エレベーターの昇降行程は日本では最高、世界でも2番目の長さである。

このような超高行程のエレベーターの新たな課題となるのが、吊ロープやケーブルなどの長尺物の揺れである。高さが数百メートルの建造物は、地震はもとより台風などの強風の影響で揺れが生じる場合がある。一般にこのような建物の揺れの固有周期は5秒から10秒以上と長周期のため居住者はほとんど気にならないが、エレベーターにとっては長尺物が上部の吊元で揺られていることになる。このため乗りかごの位置などによってロープの揺れの周期がちょうど建物揺れの周期と一致する場合には、ロープは共振して昇降路内の機器や突起に接触し引っ掛かる恐れもある。東京スカイツリー®の開業初日に荒天の影響で長尺物に揺れが発生し、運営側の判断で万全を期して一時エレベーター運転が休止となったのは記憶に新しい。

この長尺物揺れに対する安全対策では、ロープの揺れを検出する技術、その検出した揺れに基づきエレベーターの安全を確保する運行制御、そしてロープの揺れを抑制したり昇降路内機器に接触しても引っ掛かりを防止する保護対策などが必要になる。ロープ揺れの検出方法には、位置センサーや画像解析によってロープの変位を直接把握する方法や、建物揺れをもとにロープの挙動をシミュレーションで予測する方法がある。いずれの方法でも重要なことは、精度よく揺れを把握することによってエレベーターのサービス継続の可否をより的確に判断することである。

### 4. エレベーター高速化の将来展望

今年の初め、2014年に中国・上海に竣工する完成時には中国最高層となるビル「上海中心大厦」に、日系メーカーが現在の世界最高速を更新する1分間に1080mの速度のエレベーターを納入することを発表した。発表によれば、同時に昇降行程が578.5mの世界最長行程のエレベーターも納入するとのことである。技術的にはやはり駆動・安全・快適の3つがキーポイントとなり、TAIPEI101納入のエレベーターと同じような技術課題への取り組みが行われている。

今後、エレベーターの高速化・高行程化はどこまで進むのだろうか。高速化するにはその速度まで加速し減速するための距離が必要となるので、速度の限界は自ずと行程の限界によって決まってくる。では行程はどこまで伸ばすことができるのだろうか。この質問に答えを出すには2つの大きな課題がある。1つは吊素材の比強度がどこまで上げられるかということであり、もう1つはエレベーターを利用する人が1分前後の乗車時間に耐えられる気圧の変化量はどのくらいかという問題である。

#### 4・1 吊材料の技術

まず吊素材であるが、現在のエレベーターの吊素材はほぼすべてのものが鋼線をより合わせたものである。素線強度は規格で種別が定められており、TAIPEI101では引張強度が1620N/mm<sup>2</sup>級のA種ロープが採用され、東京スカイツリー®では1770N/mm<sup>2</sup>級のB種ロープが新開発されて採用された。しかしこのような昇降行程が400mを超えるようなエレベーターではロープ自身の質量が増大し、ロープが加わる荷重はロープ自重が最も大きな割

合を占めるようになる。昇降行程が 500m、600m となればこの傾向はより顕著になり最後はロープがロープ自身の重さを支えられなくなる。現在、エレベーター用鋼線ロープの素線強度は 2000~2500N/mm<sup>2</sup> 程度まで実用化されているが、その先はアラミド繊維などを素材とした合成繊維ロープや近年実用化が進みつつあるカーボンナノチューブなどが使用される時代が来るかもしれない。しかし製造性・安全性はもとより、実用化までにはまだまだ多くの課題がある。

#### 4・2 気圧変化量の限界

高行程化のもう 1 つの課題である気圧変化の聴器への影響についてはさらに難しい課題となる。1973 年に竣工したシアーズタワー（現ウィリスタワー）の展望階へ直行するエレベーターは、当初は分速 549m（1800ft）で開業したが、その直後に気圧変化の影響で 1 人の乗客が聴器を損傷するという事故が発生し、それ以後速度を 488m（1600ft）に減速して営業することとなった。このため昇降機業界には、気圧変化量と乗客の安全性は昇降行程と速度の 2 つが大きく影響し、昇降行程 410m の同エレベーターでは安全速度と危険速度の境が 488m/分と 549m/分の間にあると考えられてきた。

この影響で、以後の世界最高速エレベーターでは、常にその速度での安全性が検証されてきた。TAIPEI101 では、エレベーター走行に伴う実際の気圧変化を再現する減圧室を用いて、モニター試験を実施し安全性の確認を行っている。このような研究を通じて現在では、1 分前後の短時間では気圧の変化速度よりも変化の絶対量が安全性を決める主要因と考えられている。気圧変化の大きさは、耳抜きなどが行える人にとっては安全上の大きな問題とはならないが、体質やそのときの健康状態などによって耳抜きが十分行えない場合、航空性中耳炎を発症する可能性がある。その安全上の限界がどこにあるかという議論は、個人差もあり簡単に結論を出せないが、誰もが快適にエレベーターを利用するという意味では、行程 600m がある程度限界に近いと考えられる。また 600m の昇降行程での適切なエレベーター速度は最大でも 1200m/分程度であり、従来のエレベーターの延長としては、既にかなり限界に近づいているものと考えられる。

### 5. 未来のエレベーター

ここまで現在のエレベーターの形でエレベーターはどこまで進化できるかを述べてきたが、最後に気圧変化等の制約を外して将来の垂直移動システムについてこれまで提案されているものを 2 つ紹介する。

最初は 1990 年前後に提案された磁気浮上技術によるロープレス自走式エレベーターである。これは当時の社会背景としてハイパービルと呼ばれる高さ数千mの建築物構想が相次いで発表され、その一方で超伝導技術が目覚ましい進歩を遂げたことで室温超伝導が実現する日も近いと考えられた。ロープの制約を受けずに磁気浮上によって自由自在な移動を可能にしようとしたもので、各メーカーではいろいろな基礎検討が進められた。しかしその後のバブル崩壊や技術的な難しさから、現在ではあまり新規の検討はなされていない。

もう 1 つは 21 世紀に入って注目を集めている宇宙エレベーターである。従来、実現可能な比強度を持った吊索材がないため不可能と考えられてきたが、カーボンナノチューブの発明によって実現への課題の 1 つに解決への可能性が見えたとされている。宇宙エレベーターは宇宙の静止軌道上のステーションと地上をつなぐ移動手段との位置付けであり、昇降機というよりは宇宙開発そのものといってよい。したがってエレベーターとは異なる様々な課題があるが、あえてエレベーターの立場から言及すれば、空間に浮かぶ不安定な軌道上を如何に乗り心地よく安定して安全に走行できるかが大きな課題といえる。

### 6. 結 語

エレベーターは、近代エレベーターが 19 世紀後半に発明されて以来、その基本的な形態を変えずに様々な進歩を遂げてきた。向こう 10 年間に世界では高さが 500m を超える建築の計画が数多く発表されている。当面はこれまで説明した技術をさらに進化させ、これらの建物に安心・安全で快適なエレベーターを提供していきたい。