

機械室レスエレベータ



エレベータ, 機械室レスエレベータ, 駆動制御, 永久磁石電動機, ロープ



阿部 茂

1. はじめに⁽¹⁾

エレベータの技術革新を振り返ると、1980年代のインバータとマイクロプロセッサの適用、1990年代後半からの永久磁石電動機と機械室レスエレベータ技術が重要であり、エレベータの性能や構造を大きく進歩させたことが分かる。

機械室レスエレベータ (MachineRoomLess Elevator, 以下 MRL と略す) という言葉は初耳でも、近ごろは新築のビルやマンションの屋上が平らになったことに気づかれた人は多いと思う。これは MRL を採用し、屋上の機械室がなくなったからである。また駅などでシースルーの MRL を見かけることも多い。

本稿では MRL の技術開発と技術動向を紹介する。

2. ロープ式エレベータ

エレベータには多くの種類がある。MRL は低速の標準形エレベータに属する。10階程度までのマンションや事務所ビル、商業施設、駅などに広く使われている。MRL が登場する以前は、どのようなエレベータが用いられていたのだろうか。

2.1 エレベータの種類⁽²⁾

エレベータは大きくロープ式と油圧式に分けられ、ロープ式の大部分は図1⁽²⁾のようにかごとつり合いおもりがロープでつるべ式に支持されて、巻上機の綱車(プーリ)とロープ間の摩擦力により駆動するトラクション式である。トラクション式は、油圧ポンプと油圧ジャッキを用いてかごを昇降させる油圧式に比べ、速度が速くかつ所要動力(電動機容量)が小さいのが大きな特長であり、低速から

超高速まで広く使われている。

またエレベータは定格速度により、高速エレベータ (120 m/分以上) と、低速エレベータ (105 m/分以下) に分けられる。乗用エレベータで需要台数が多いのは低速エレベータの中の、速度が 45~105 m/分で積載量が 450~1,000 kg の標準形エレベータであり、2004 年度では需要台数の約 79% を占める。またその 96% 以上が MRL になっている。

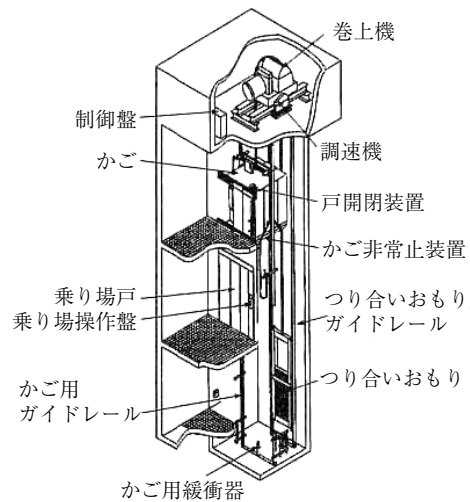


図1 ロープ式エレベータ

あべ・しげる (正員) 1971年東京大学工学部電子工学科卒業。1976年同大大学院博士課程修了。同年三菱電機(株)入社。中央研究所、産業システム研究所で研究開発に従事。1997年同社稲沢製作所エレベーター開発部長。2001年ビルシステム事業本部技師長。2004年4月埼玉大学工学部教授、1985年電気学会論文賞受賞。工学博士。

機種	年代	'70	'75	'80	'85	'90	'95	'00
高速エレベータ	駆動方法	ワードサイリスタ レオナードレオナード		インバータ				
	制御回路	リレー回路		マイクロプロセッサ				
	巻上機(電動機)	一般	ギヤレス(直流電動機)		はすば歯車式(誘電電動機)			ギヤレス(永久磁石式同期電動機)
		超高速	ギヤレス(直流電動機)		ギヤレス(誘電電動機)			
消費エネルギー	100%	95%	72%	62%	57%	54%		
低速エレベータ	駆動方法	交流二段速度制御	一次電圧制御		インバータ			
	制御回路	リレー回路		マイクロプロセッサ				
	巻上機(電動機)	ウォーム歯車式(誘導電動機)			はすば歯車式(誘導電動機)		ギヤレス(永久磁石式同期電動機)	
	消費エネルギー	100%	93%	74%	37%	32%	29%	

図2 駆動制御システムの変遷

高速エレベータの中でも速度が360 m/分以上のエレベータは超高速エレベータと呼ばれている。現在、世界最高速のエレベータは台湾 TAIPEI101 の1,010 m/分（上昇時）のエレベータである⁽³⁾。

2.2 エレベータの駆動制御システムの変遷⁽¹⁾

ロープ式エレベータの駆動制御システムの変遷と省エネの進展を図2⁽⁴⁾に示す。高速エレベータでは減速機のないギヤレス巻上機が主に用いられてきた。低速エレベータではウォーム歯車減速機（効率60～70%）、次にはすば（ヘリカル）歯車減速機（効率95%）のギヤード巻上機が主流であったが、MRLになり巻上機の小型化／薄型化、低騒音化のために、永久磁石同期電動機を用いたギヤレス巻上機に変わった。

高速エレベータは古くはMG（Motor Generator）セットを必要とするワードレオナード方式、次にMGセットが不要のサイリスタレオナード方式が用いられた。低速エレベータは誘導電動機の極数変換による交流二段制御方式、次にサイリスタにより誘導電動機の一次電圧を制御する交流帰還一次電圧制御方式が用いられた。サイリスタ制御の時代に制御回路もリレー回路からマイクロプロセッサに置き換えられた。

1983年にパワートランジスタを用いた交流可変電圧可変周波数（VVVF）制御方式、すなわちインバータ制御方式が高速エレベータで実用化され、翌年には低速エレベータにもインバータ制御方式が導入された。低速エレベータでは一次電圧制御方式に比べ約50%もの省エネになり、乗り心地も高級エレベータ並みとなった。

1996年、高速エレベータで誘導電動機に代わり、より小形で高効率な永久磁石同期電動機が実用化された。低速エレベータもMRLの登場に伴い、永久磁石同期電動機になった。

3. 機械室レスエレベータ（MRL）

MRLはヨーロッパで1996年に、日本では1998年に発表され、市場投入された。MRLが登場する前は、ロープ式エレベータの構造には長い間変化がなく、どのメーカーも図1の機械室のあるエレベータを作っていた。法規で機械室の設置が義務づけられていたからである。しかし規制緩和によりMRLが認められると、知的財産権のため各社独自のMRLを開発し、市場投入するようになった。

日本ではMRLが登場する以前は、標準形エレベータの約30%が油圧式エレベータであり、残りが図1に示す機械室付きのロープ式エレベータであった。油圧式が多かった理由は、日影規制でビルの高さが制限される場合、屋上機械室が不要で、オーバーヘッド（最上階ホール床面と昇

降路天井との間の垂直距離）の小さい油圧式が有利であったためである。標準形ロープ式MRLの登場で、価格と省エネと速度で劣る標準形油圧式がまず姿を消した。また機械室建築コストで劣る機械室付きの標準形ロープ式もMRLにとって代わられた。

以下、年代順に代表的なMRLを紹介し、それらの開発のねらいと特徴を見てみよう。

3.1 ホームエレベータとリニアモータエレベータ

MRLの萌芽は、ホームエレベータとリニアモータエレベータである。

日本では1980年からホームエレベータの開発が進められ、1988年に小型、低速に限り規制が緩和され、駆動装置を昇降路内に設置することが認められた。1988年よりさまざまな方式の機械室のないホームエレベータが実用化された。なかには現在のMRLに近い構造のものもある。

1989年にリニアモータエレベータが開発され、日本市場に投入された⁽⁵⁾。図3にその構造を示す。円筒形のリニア誘導電動機（LIM）が取り付け重りの中に設置されており、2次導体は円柱形で昇降路の頂部と下部で固定されている。巻上機のための屋上機械室は必要ない。LIMは回転形誘導電動機に比べエアギャップが大きくなり、一般に力率、効率が悪くなる。リニアモータエレベータは油圧式エレベータに比べて、速度、消費電力、電源設備容量で勝っていたが、MRLの登場でこれらの優位性がなくなった。

3.2 薄型巻上機を用いるMRL

1996年ヨーロッパで、円盤形電動機の薄型ギヤレス巻上機を昇降路頂側部に設置するMRLが開発され、ヨーロッパ市場に投入された⁽⁶⁾。図4(a)にその構造を示す。開発者Harri Hakalaはリニアモータエレベータの検討から、

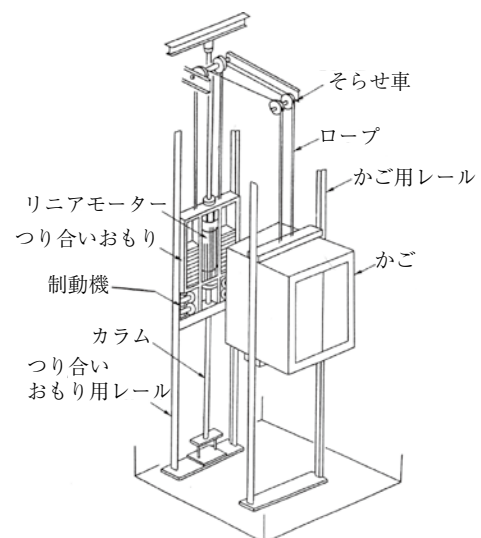


図3 リニアモータエレベータ

薄型回転式モータをつり合い重りに設置することを考え、永久磁石を用いることでモータを薄くできること、またつり合い重りにモータを設置すると故障時にアクセスの問題があることなどに気づき、最終的に図4(b)のような薄型巻上機を昇降路頂部のかご移動空間と昇降路壁との間に置くMRLを開発したと述べている⁽⁷⁾。

それまで世界的にエレベータは、主に保守と故障時の乗客救出のために機械室が必要との規制があった。しかし、規制緩和の流れの中、ヨーロッパ、日本ともにMRLが認められるようになり、世界はMRLの時代に入った。したがってMRLでは機械室を無くすために、まず安全な保守方式や故障時の閉じ込め救出方式などが開発された。

1998年に日本で円筒形電動機のギヤレス巻上機を昇降路ピットに設置したMRL⁽⁸⁾が、2001年には円筒形電動機の薄型巻上機を昇降路下側部に配置する新機種⁽⁹⁾(図5(a))が実用化された。新機種は関節形連結鉄心(図5(c))を用いた永久磁石電動機を用いている。

巻上機を昇降路内に設置するには小型化/薄型化と騒音低減が不可欠で、巻上機は誘導電動機を用いたギヤード方式から、希土類永久磁石電動機を用いたギヤレス方式に変わった。しかしギヤレス方式のためギヤード方式に比べ、電動機トルク、プレーキトルクが大幅に増大し、2:1ローピング(かごが動滑車でするされるため、図1の1:1ローピングに比べ電動機の回転数は2倍となるが、トルクは1/2となる方式)を用いても巻上機が高価になった。

3.3 MRL用永久磁石電動機

ヨーロッパで開発された円盤型薄型永久磁石電動機(図4(b))⁽⁶⁾⁽⁷⁾はアキシアルギャップである。高速大容量エレベータ用では固定子と回転子間の吸引力が大きいため、電動機2台の間に綱車を入れた巻上機とし、吸引力を相殺する構造にしている。

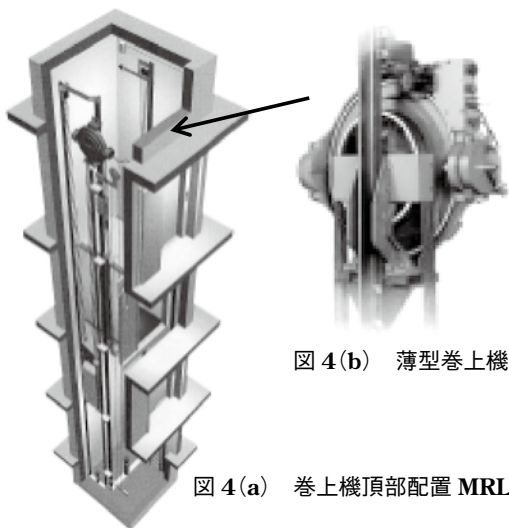


図4(a) 巻上機頂部配置 MRL

図4(b) 薄型巻上機

巻上機すなわち永久磁石電動機を廉価にするには、高価な磁石の使用量削減と巻き線の自動化(機械化)が不可欠である。これらを可能にしたラジアルギャップの円筒型薄型電動機(定格3.7kW, 93rpm)を図5(b)に示す⁽¹⁰⁾。磁束密度が同じであれば、電動機のトルクは回転子径と磁石面積の積におよそ比例するため、電動機を大口徑薄型にし磁石の使用量を削減している。また巻き線を自動化するために、固定子鉄心に関節形連結鉄心方式(図5(c))を採用し、固定子巻き線は集中巻でスキューなしとしている。磁極集中巻きは分布巻に比べコイルエンド部の巻き線が重ならず軸方向の薄型化に有利である。関節形連結鉄心は従来の一体形鉄心に比べ、スロット内の巻き線密度を上げることが可能で、これも軸方向の薄型化に効果がある。トルクリプル低減のために、最適な極数・スロット数の選択、固定子ティース形状及び永久磁石形状の最適化を行っている。

永久磁石電動機を廉価かつ小型にするもう一つの方法は、電動機の回転数を上げ、トルクを下げる方法である。

3.4 長軸小径巻上機を用いる MRL

電動機の回転数を上げ、トルクを下げるには、巻上機の綱車(プーリ)の径を小さくする必要がある。現在の鋼製ロープに代わる新しいロープを開発し、ギヤレス巻上機を小型化しようという動きが出てきた。ロープ式エレベータは、つるべ式になっていて、かごとつり合い重りとは、定員の40~50%の乗客が乗った時にバランスし、巻上機の綱車の摩擦力でロープを駆動する。この摩擦力の確保とロープ寿命から、鋼製ロープでは綱車の径はロープ径の40倍以上と決められてきた。綱車の径を小さくできれば電動機トルクを下げ、電動機およびブレーキを小型化・低廉化できる。この場合綱車で摩擦力の確保が安全上重要となる

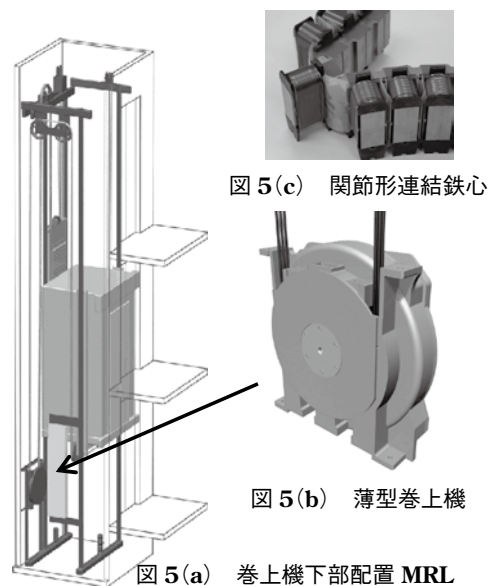


図5(c) 関節形連結鉄心

図5(b) 薄型巻上機

図5(a) 巻上機下部配置 MRL

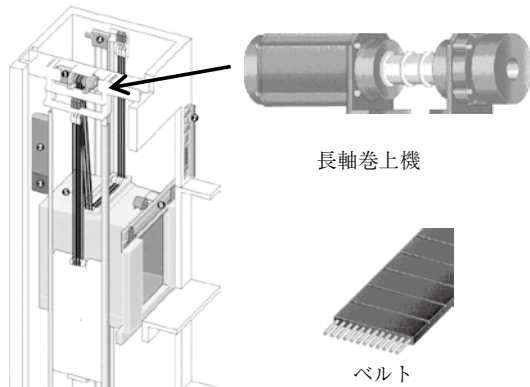


図6 ベルトを用いた MRL

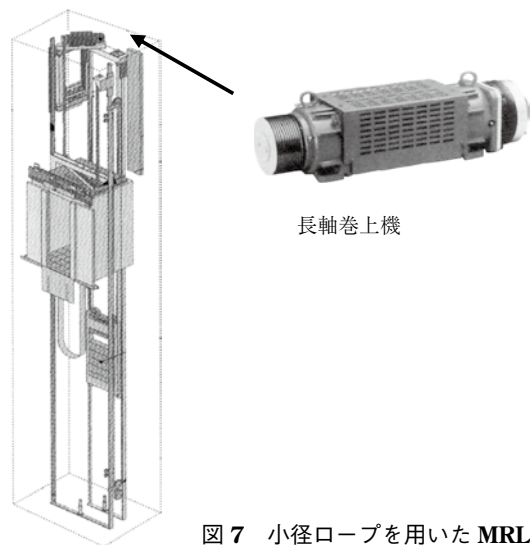


図7 小径ロープを用いた MRL

る。また従来ロープと同等以上の寿命も要求される。

2000年、アメリカでポリウレタン被覆鋼心ベルトを用いる MRL が開発され、市場投入された⁽¹¹⁾⁽¹²⁾(図6)。このベルトは幅 30 mm 厚さ 3 mm の鋼心入りのポリウレタンベルトである。このベルトの採用で、巻上機の綱車直径は 100 mm となり、通常の 10 mm 径鋼製ロープを用いた綱車の 1/4 を実現し、それに応じて電動機を含む巻上機の寸法は大幅に小さくなっている。ポリウレタンを用いることで摩擦係数を高め摩擦力を確保している。

ベルトを用いる方式は、巻上機が安価になる反面、ロープが高価になると言われている。また摩擦係数を高くするためベルトに油などがつかないように注意する必要がある。

2003年、日本で従来の半分の径 5 mm の高強度のワイ

ヤーロープを用いて巻上機を小型化した新しい MRL が開発され、市場投入された⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾(図7)。巻上機の綱車直径も約半分の小径になり、巻上機の重量は従来の薄型大径巻上機に比べ 35~40% 軽量化されている。高強度 5 mm ロープの強度は従来の 10 mm ロープの 55% あり、ロープ本数は増加するが、増加量の抑制に効果があると考えられる。

4. おわりに

1990年ごろには技術的に成熟したと見られていた標準形エレベータが、規制緩和と永久磁石式電動機などの技術革新によって、さまざまな方式の機械室レスエレベータに生まれ変わった。この背景に世界的な規制緩和があり、知的財産権を重視する開発競争がある。機械室をなくすため、また新しいロープを採用するために、さまざまな安全対策や試験、技術審査が行われたことは言うまでもない。

(平成 18 年 7 月 27 日受付)

文 献

- (1) 阿部茂・渡辺英紀：「エレベータの歴史と今後の課題」, 電学論 A, **124**, 8, pp. 679-687 (2004)
- (2) 国土交通省住宅局建築指導課・(財)日本建築設備・昇降機センター・(社)日本エレベータ協会編：昇降機技術基準の解説 (2002 年版) (2002)
- (3) 岡本正勝・中川俊明・海田勇一郎・関本陽一・藤田善昭：「世界最高速エレベーター」, 日本機械学会昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩技術講演会講演論文集, No. 02-56, pp. 17-20 (2003)
- (4) 久保田猛彦・小松孝教・荒木博司：「エレベーターの省エネルギー技術」, 三菱電機技報, **76**, 5, pp. 10-13 (2002)
- (5) 中井恵一郎・藤澤紀彦：「リニアモーターエレベーター」, 日本エレベータ協会 40 周年記念講演論文集, pp. 88-97 (1990)
- (6) 小田恭志・Marko Karppinen・Thomas Hietto：「省スペース, 省エネルギータイプエレベーター」, 日本機械学会講演会講演論文集, No. 97-76, pp. 25-28 (1997)
- (7) Johannes de Jong and Harri Hakala：「The Advantage of PMSM Elevator Technology in High Rise Building」, Elevator Technology 10, pp. 284-289 (2000)
- (8) 杉田和彦・本田武信・安藤英司・山川茂樹・安江正徳：「三菱機械室レスエレベーター “ELEPAQ”」, 三菱電機技報, **72**, 10, pp. 13-16 (1998)
- (9) 林 美克・山川茂樹・湯村 敬：「三菱機械室レスエレベーター “ELEPAQ-i”」, 三菱電機技報, **75**, 12, pp. 6-11 (2001)
- (10) 大穀晃裕・橋口直樹・三宅展明・池島宏行・井上健二・安江正徳・小松孝教：「機械室レス・エレベーター巻上機用永久磁石式薄型モーターの開発」, 電学回転機研資, RM-01-113, pp. 37-42 (2001)
- (11) Hugh J O'Donnell：「New Lift Rope Technology-Coated Steel Belts」, Elevator Technology 11, pp. 104-112 (2001)
- (12) 小野田立志・笠原直紀・石毛謙三・吉原誠：「新駆動方式機械室無しエレベータ」, 日本機械学会昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩技術講演会講演論文集, No. 04-57, pp. 39-42 (2005)
- (13) 石井隆史・松岡寛晃・染谷誠一：「革新を続けるエレベーター」, 東芝レビュー, **58**, 12, pp. 28-31 (2003)
- (14) Kazuhiko Izumi, Hiroaki Matsuoka, Hiroshi Sano and Akira Osada：「The New Type Machine Room-Less Elevator」, Elevator Technology 15, pp. 90-97 (2005)