

ビル内移動システムとエネルギー経済

Transportation Systems in Buildings and Energy Economics

渡辺 英紀*

Eiki Watanabe

1. はじめに

ビル内移動システムとして、エレベータ、エスカレータ等の昇降機は不可欠のものである。第1次、第2次オイルショックの後は一時的に省エネルギーが喧伝されかなりの省エネルギーが達成された。その後石油の価格が安定し、若干省エネルギーのかけ声が低調になった。しかし、最近の中東の情勢や、地球温暖化の警鐘が喧しくなるにつれ、再び省エネルギー問題がクローズアップされてきた。一方超々高層ビルの構想も種々発表されだした。そこで本論文では、昇降機の現状及び将来技術について、省エネルギーの観点をも踏まえて述べてみたい。

2. 昇降機システムとエネルギー経済

ロープ式エレベータは低速の特殊なものを除いて一般的にはつるべ式であって、釣合いおもりは通常かご内乗客が定員の50%の時かご側と釣合いおもり側のトルクがバランスするように設定されている。つるべ式であるので、図-1のごとくかご内容の数と運転方向によって力行、回生の4象限運転をすることになる。例えば満員の乗客を上方階へ運ぶためにエレベータが消費した電力は乗客の位置エネルギーに変換され、再びその乗客が下方階に降りる時に電源側に回生されるので、結局エレベータで消費される電力は図-2のごとく駆動装置、巻上電動機、昇降路等機械システムで消費

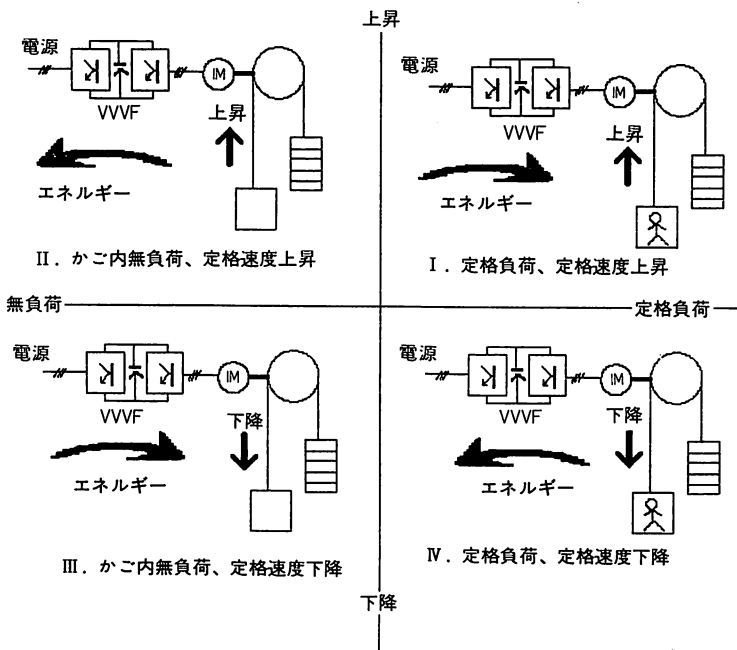


図-1 4象限運転

*三菱電機㈱稲沢製作所技術部部长
〒492 稲沢市菱町1

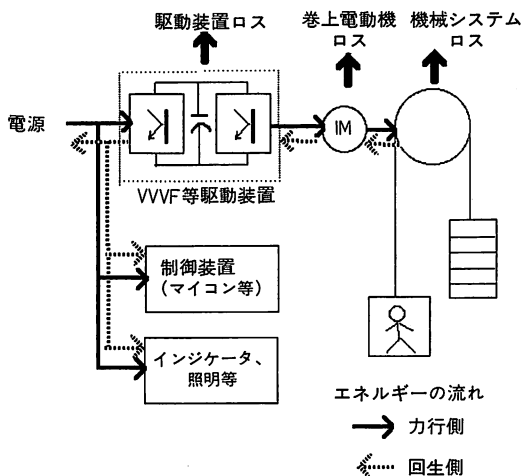


図-2 エレベータのエネルギーの流れ

されるロス分、制御装置等で消費される分、その他照明、表示等の器具に於て消費される分の合計となる。この回生があるということが、エレベータの消費電力が電源設備容量に比べて比較的少ないという大きな理由である。しかし、低速あるいは小容量のエレベータの場合には、この回生エネルギーは小さいので、電源に回生せず、電気回路の抵抗等で消費されるのが普通である。一般には速度105m/分以下のエレベータでは回生されない。

エレベータの場合の輸送コスト（消費電力量）は、ビルの形態、エレベータの台数、ビル内の人員等によって種々変わるので一概に述べることは難しいが、一例として昭和49年に実測された一社占有事務所ビルのデータを紹介しよう¹⁾。

- 階数；B2，B1，1～11階
- 在籍人数；1,030人
- エレベータ設備；17人乗り（1,150kg），150m/分，3台
- エレベータ速度制御方式；ワードレオナード方式
- 実測時間；8時30分～17時30分（9時間）
- 上昇方向に移動した全人数；3,064人
- 同上の平均移動階床；4.2階
（階高3.5mとして14.7m）
- 下降方向に移動した全人数；2,817人
- 走行距離；18.086km/台
- 起動回数；上昇1,010回/台
下降897回/台

平均走行距離/停止；上昇8.95m（2.55階）
下降10.1m（4.0階）

エレベータの消費電力量；58.4kWH/台
175.2kWH/3台

ビル全体の消費電力量；6,400kWH

即ちこの例では上昇方向に移動した全人数は3,064人である。一方乗客の平均体重を55kg/人として3,064人を4.2階床分上昇させるに必要な正味の電力量は次の通りである。

$$\text{所要電力量} = \frac{9.8 \times 3,064 \times 55 \times 14.7}{3.6 \times 10^8} = 6.8 \text{ kWH}$$

これは3台のエレベータが9時間稼働して消費した電力量のわずか3.9%である。このうちの一部分は下降時回生電力として返還されることを考えると、人の上昇、下降に必要な正味電力は極めて僅かであり、エレベータの消費電力の大部分が機械システムを含む駆動部分のロスであるので各部のロスを減らすことが極めて重要である。

3項では省エネルギーの要求に応じていかにロスを減らしてきたかについても述べる。

3. 昇降機技術の現状

3.1 エレベータ

エレベータは駆動原理の違いから、ロープ式と油圧式に大別される。

ロープ式エレベータはロープと駆動綱車との摩擦力によって、つるべ式に懸垂されたかごと釣合いおもりをガイドレールに沿って昇降させるもの（トラクション方式）と、釣合いおもりを持たずにかごを駆動するロープの他端を綱車で巻取る構造のもの（巻胴式）がある。巻胴式のもの速度が30m/分以下の小容量のものに用いられている。

油圧エレベータは圧油を油圧ジャッキ（シリンダとプランジャを組み合わせたもの）に送り込んだり、戻したりし、プランジャによってかごを押し上げたり、下降させるものである。

ロープ式エレベータ

ロープ式エレベータの速度制御方式の現状は表1のとおりである。従来105m/分以下のエレベータでは、巻上機に三相誘導電動機が使用され、120m/分以上のエレベータでは広い範囲に亘って精度の良い制御が要求されるので直流電動機が使用されてきた。しかし近年、交流可変電圧可変周波数（VVVF）制御の進歩によって、交流電動機でも直流電動機と同等の性能

表1 ロープ式エレベータの種類と速度制御方式の現状

分類	速度	方式	巻上機 (ギヤ式減速機)	速度制御方式
	m/分			
小型乗用エレベータ (4人乗り)	30	巻胴式	ヘリカルギヤ使用	VVVF, 又は交流帰還方式 (誘導電動機電圧制御)
低速乗用エレベータ	30~105	トラクション式	ウォームギヤ, 又はヘリカルギヤ使用	VVVF
高速乗用エレベータ	120以上	トラクション式	減速機無し(ギヤレス), 又はヘリカルギヤ使用 (120~240m/分)	VVVF

が実現できるようになり、すべての速度において直流電動機が駆逐された。このようにVVVF制御方式の導入はエレベータ駆動史を書き換える程の革新であった。

また、120m/分以上のエレベータでは巻上機にギヤを用いて巻上機を小型化することも行なわれた²⁾。ヘリカルギヤ式減速機の効率は95%程度であるが、電動機を高速回転で使用することが出来るために電動機も効率のよいところで使用でき、結局巻上機全体としては従来の減速機なし(ギヤレス)巻上機と変わらない効率が達成されている。

石油ショック以来、わが国の全ての分野で省エネルギーが求められたが、特にエレクトロニクス化の進歩が省エネルギーに大きく貢献した。しかし貢献のし方は高速・高級エレベータと低速・規格エレベータでは異なった様相を示すので、これまでの進歩を振り返りつつ現状の技術を紹介する。

(1) 高速エレベータ (120m/分以上) 分野

昭和50年代まで生産されたMGセットを使用したワードレオナード駆動の直流ギヤレスエレベータではMGセット等駆動部分で60%、リレー等制御管制器で30%、照明等で10%の電力を使用していた。昭和50年代前半にMGセットを廃止してサイリスタレオナード方式が採用され、またリレーが消費電力の少ないマイクロプロセッサに置き換えられて約40%もの省エネルギーが達成された。この間の省エネルギーの経緯を図-3に示す。

その後、サイリスタよりも制御性能の優れたパワートランジスタが出現し、これを利用したVVVF制御技術が急速に進歩した。

図-4は高速エレベータに採用されているVVVF速度制御方式の構成である³⁾。三相交流電源は、トランジスタコンバータで一旦直流に変換され、トランジス

タインバータで可変電圧可変周波数の交流に変換されて巻上電動機に給電される。入力電流と出力電流はPWM変調(パルス幅変調)によって正弦波になるように制御されている。コンバータは出力電圧を帰還信号とするフィードバック制御によって出力電圧を一定

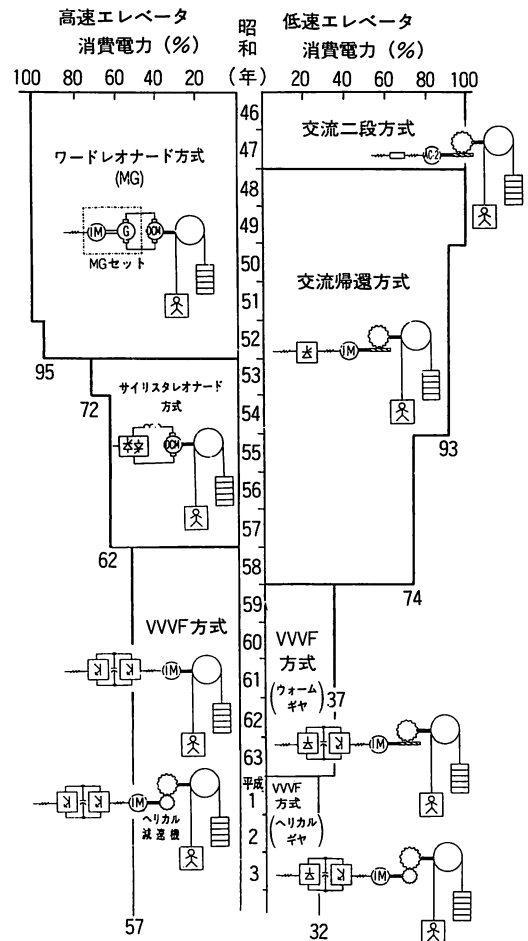


図-3 ロープ式エレベータの省エネルギーの経緯

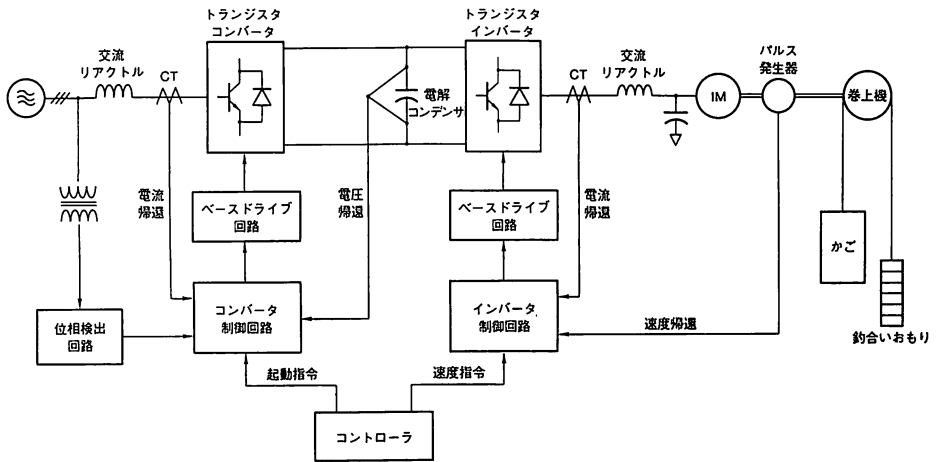


図-4 高速エレベータ用VVVF制御方式の構成

値に制御し、かつ電源電圧の位相を検出して入力電流の力率を、力行時は1に、回生時は-1となるように制御している。インバータは速度帰還にパルス発生器を使用するとともに、電流マイナーループを設け応答の速い制御を行なっている。この方式は電圧型VVVF方式とも呼ばれる。

高速エレベータに採用されているVVVF制御方式としては、図-4の方式の他に電流型と呼ばれる方式も採用されている¹⁾。

VVVF制御方式は省エネルギーに加え、電源力率を改善する特性を備え、結局5～10%の省エネルギーと約20%ものビル電源設備容量の低減が図れた。

(2) 低速エレベータ (105m/分以下) 分野

昭和40年代後半に、従来使用されてきた交流二段速度制御方式に代わって、サイリスタを用いて電動機の一次電圧を制御する交流帰還制御方式が実用化された。この方式では定格速度以下の低速走行時の電動機効率が低く、リレーのマイクロプロセッサ化を含めても省エネルギーは20%程度であった。昭和59年頃から低速エレベータの分野にもVVVF方式が導入された。低速エレベータの場合には、電動機出力が小さく、従ってVVVF速度制御装置も小容量でよいのでコンバータ部にはトランジスタの代わりにダイオードを用いている。このためエレベータからの回生電力は電源に回生されず、電動機²⁾あるいはVVVF装置で消費される。VVVF方式では、低速でも電動機の効率が高いままで運転できるので図-3に示すように、それまでの交流帰還方式に比べて約50%の省エネルギーが達成できた。

更に、平成元年からこの分野のエレベータに、従来のウォームギヤ式減速機に代わってヘリカルギヤ式減速機が採用され、更に15%の省エネルギーが図られたものも出現した³⁾。

油圧エレベータ

近年都会地での日影規制等の影響から、ビルの屋上にエレベータ機械室の不要な油圧エレベータの伸びが著しい。

油圧エレベータの駆動方式には、間接式と直接式がある。間接式は油圧ジャッキを昇降路内に設置し、かごとの間にロープを介して駆動する方式である。また直接式は昇降路直下に油圧ジャッキを設け、かご底部に直結する方式である。いずれの方式にせよ、油圧エレベータにおいては積載荷重を含めたかご側総重量を上下させるので、ロープ式エレベータに比べて電動機容量は大きい。しかも上昇運転時のみ油圧ポンプを駆動し、下降時は自重下降方式をとるので、位置エネルギーは全て熱となる。このため電力消費量はロープ式より大きい。

従来の油圧エレベータでは、流量制御バルブ内の制御弁がかごの速度を制御している。上昇運転時には、上昇制御弁が一定速度で回転する油圧ポンプの吐出する圧油流量を制御する。また下降運転時には、かごの重量によって油圧ジャッキから油タンクに還流される圧油流量を、下降制御弁が制御する。この方式では、かご内の乗客数や油温、すなわち油の圧力や粘度によって制御弁の開閉動作が変わり、かごの加速時間や減速時間が変化する。

そこで最近では、従来の油圧バルブによる流量制御

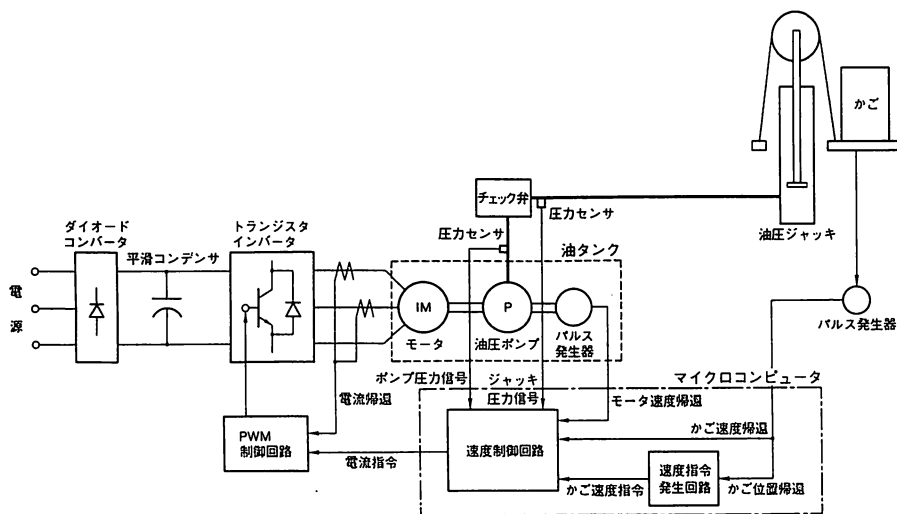


図-5 VVVF速度制御油圧エレベータの構成

に代えて、VVVFインバータによる油圧ポンプモータの可変速制御を採用したのもも発表されている⁷⁾。

この方式では、VVVFインバータ制御の採用により、着床前のクリープ走行が無くなり、滑らかに高精度の速度制御特性が得られる。この結果、階間走行時間が約20%短縮するとともに消費電力も約15%低減した。

図-5はVVVF速度制御を採用した油圧エレベータの構成である。三相交流電源から給電された交流電圧は、ダイオードコンバータと平滑コンデンサによって一旦直流電圧に変換された後、インバータでPWM変調することにより、可変電圧可変周波数の交流に変換されて油圧ポンプ駆動用電動機に給電される。電動機には回転速度検出用のパルス発生器が直結されており電動機の回転速度はこのパルス発生器が検出する速度信号によってフィードバック制御される。その結果、電動機の回転速度はかご速度の指令値に応じて変化し上昇運転時に油圧ポンプから油圧ジャッキに送出、あるいは下降運転時に油圧ジャッキから油圧ポンプへ還流する圧油の流量、すなわちかごの速度が起動から着床まで滑らかに制御される。

3.2 インテリジェントビル対応のエレベータ

近年ビルのインテリジェント化が進むにつれ、エレベータにも従来よりも高度で多様な機能が求められるようになってきた。ここではインテリジェントビル対応のエレベータの、特に群管理機能及びマンマシーンインタフェース機能の進歩と現状を紹介する。

群管理機能

エレベータが一つのビルに複数台設置されると、各エレベータの運行を適切に管理し、グループとしての輸送効率・サービス効率を維持・向上するのに群管理機能は重要な役割を担っている。

群管理方式の変遷を図-6に示す。昭和40年代前半までは、循環式群管理方式をリレー回路で構成していた。40年代後半にはゾーン割当方式が、ついで53年頃から個別割当方式が導入された。この間、最適かごの選定に要する計算量は激増し、ゾーン割当方式ではICが、個別割当方式にはマイクロプロセッサが応用され、心理的待ち時間評価方式や学習方式の採用によってここで初めて高級群管理が実現できた。

さらに平成元年にはファジー制御やエキスパートシステムを搭載した人工知能応用のエレベータが出現した⁸⁾。

図-7はその機能構成の一例である⁹⁾。設計技術者や保守技術者などの群管理の専門家は、各交通状態に対

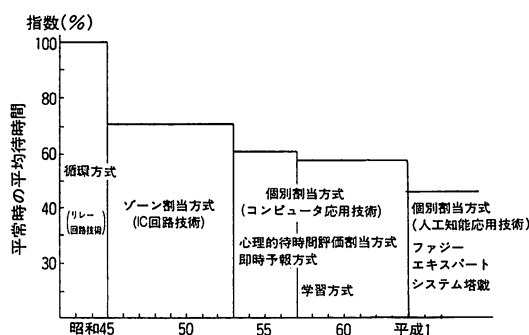


図-6 群管理方式の変遷

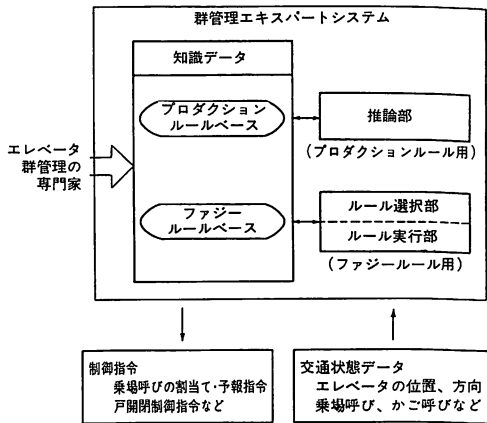


図-7 エキスパートシステムの構成

してどのようにしたら待ち時間が短くなるか、エレベータに乗り降りしやすくなるかなどの豊富な知識・経験を持っている。しかし専門家の知識には、断片的で整理しにくかったり、曖昧な概念を伴っていたり、計算式が複雑になりすぎるものがあるため、従来のソフトウェア技術やハードウェア技術ではその知識を製品に組み込むことは困難であったが、32ビットマイクロプロセッサに代表されるハードウェアの進歩と、エキスパートシステムとファジー理論の応用が可能になり、専門家の知識・経験則を知識データとしてルールベースに記憶させ、これらに基づいて群管理制御を行なっている。

この群管理は、各乗り場での利用者の待ち時間を最小にすることを最大の目標にしている。ビル固有の交通状況も群管理の判断材料に取り入れるため、群管理装置の割当制御部から交通情報を取り出して集積・分析を行い、近い将来の交通を予測してエレベータの運行を制御している。

この結果、従来のシステムに比較して、平均待ち時間を15~20%、60秒以上の長待率を30~40%削減できた。

このような群管理制御は、エレベータ利用者の移動時間を短縮させることができ、間接的にオフィス業務の効率化につながり、また迅速なサービスで利用者に

表2 閑散時の省電力運転(シミュレーション結果例)

	4台 240m/分	4台 150m/分	3台 240m/分
待時間(比)	1	1.5	1.9
消費電力(比)	1	0.63	0.89

いらいら感をもたせない。

さて省エネルギーのためには、先ず駆動系の省エネルギーが図られることは当然であり、これには今後もパワーエレクトロニクス、マイクロエレクトロニクスの進歩が寄与しよう。

しかし複数台のエレベータが一群として管理されるいわゆる群管理エレベータの場合には、別の観点からの省エネルギー運転も可能である。この一例を以下に紹介する¹⁰⁾。

省電力のため、朝夕のラッシュ時以外は一部のエレベータを休止させることがある。しかしこれは乗客へのサービスを低下させる。この提案として閑散時にはエレベータの速度を若干低下させて走行させるとサービスをあまり低下させずに省電力になる。一例として4台群管理の240m/分エレベータで閑散時1台休止した場合と、休止する代わりに150m/分に速度を低下させた場合とのシミュレーション結果を表2に示す。速度を変えずに1台休止した場合に比べ、速度だけ低下した方が乗客へのサービス、消費電力の面で優れていることがわかる。

マンマシーンインタフェース機能

エレベータは不特定多数の人が利用する交通機関であるので、利用者との接点である操作機器や表示機器などのマンマシーンインタフェース機能にも多くの配慮が払われている¹¹⁾。例えば、複数のエレベータの群管理では、乗り場呼び登録時に予約割当したエレベータを表示する即時予報のホールランタンや到着時間表示、エレベータの到着時の音声による階床名案内などエレベータを気持ち良く使ってもらうための工夫がなされている。

3.3 エスカレータ

昭和54年に駆動機を分散配置したモジュラー型エスカレータが市場に現れ、従来型に比べ約30%の省エネルギーと10%強の省スペースが実現された¹²⁾。これ以降、省エネルギー型エスカレータは我が国の主流になった。しかし、エスカレータは機械技術に基盤を置く製品でありエレクトロニクス技術大躍進の恩恵を受けにくく、もっぱら機械装置の改良で省エネルギーが達成された。

エスカレータは、エレベータに比べて開放感のある従の輸送機関であり、建築のインテリアとしても重要な役割を担っている。特にアトリウムなど建築内部のアメニティ広場にはエスカレータが設置されることが多い。エスカレータで中間部に一度水平部分を持たせ

た、いわゆる中間踊り場付きエスカレータも出現している。またスパイラルエスカレータ¹³⁾は螺旋曲線に沿って昇降するエスカレータで、通常の直線エスカレータに比べ、配置・組合せのバリエーションに富む。

更に最近では弱者に対する福祉施設の充実が推進されつつあり、建物へのアクセス用として設置されたエスカレータに車椅子の人も利用出来るように車椅子搭載用の特殊ステップを設けたものも使用されている¹⁴⁾。

さらに、ビルとビルの間、あるいは駅からビルへのアクセスなどの動線は再開発計画の大規模化に伴い、重要視されつつある。このため近距離水平輸送手段としてトラベーター等の商品名で呼ばれる動く歩道が設置されていることがあるが、手すり間を1,600mmと従来より400mm広げたものも出現している¹⁵⁾。輸送能力の向上と共に、幅が広いので手荷物を持った人でも乗りやすい。

4. 今後の動向

安全装置付きの近代エレベータが世の中に出て約100年、エスカレータが発明されて約90年経った。今世界中では約400万台のエレベータ、エスカレータが稼動していると推定される。今ではエレベータ、エスカレータは単なる輸送手段ではなく、安全性は勿論、エネルギーの低消費、ファッション性も重要になってきているのは既に述べた通りである。

一方、超高層ビルブームの再来ともいえる時期を迎え、エレベータもインテリジェントで且つ超高速のものが要求されている。また21世紀には1,000m以上の空中や大深度地下の利用が考えられており、エレベータ、エスカレータも従来とは相当異なるものが要求されよう。

まず、将来1,000m以上の超高層のビルが出現した時には、従来のごとく、一つの昇降路（シャフト）に1台のエレベータしか配置できないと、ビルの大部分のスペースが昇降路で占られてしまう。そこで一つの昇降路内に数台のエレベータを走行させる、いわゆるワンシャフトマルチカー方式にして、ビルの有効使用スペースを増すことが考えられる¹⁶⁾。

この実現のためにはロープを使わない駆動方式が必要であり、必然的にリニアモータ駆動となろう。図-8はその一つのアイディアである¹⁵⁾。しかし安全性との関わり合いや、経済性の問題等解決すべき点が多々あり電気設備学会統計調査委員会の予測¹⁶⁾では、2005年頃となっている。このようなロープの無いエレベータで

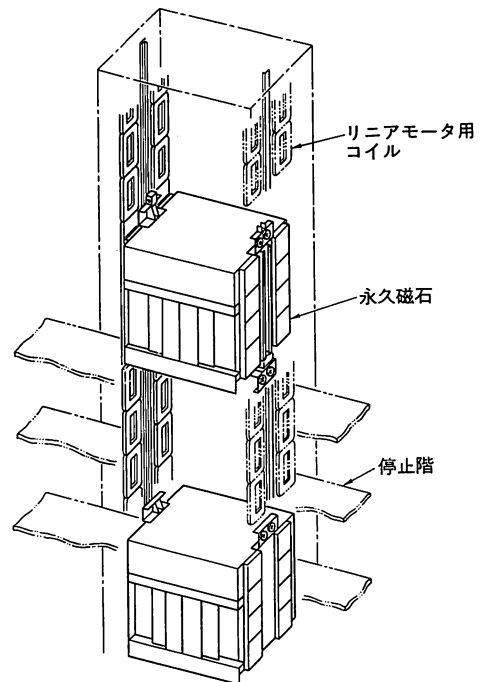


図-8 ロープレスリニアモータ駆動エレベータのアイデア

は当然制御ケーブルも用いられず、かごの制御には無線あるいは光が用いられよう。また高温超電導を利用したリニアモータやかご用のエネルギー蓄勢装置が実用化されれば、現在のエレベータシステムの構造も相当変革されよう。

一方目を転じて、エスカレータや移動通路はどうであろうか。欧米ではエスカレータの輸送力を上げるために速度が最高54m/分のものや、傾斜角35度のもも実用化されている（因みにわが国では法規上から速度は通常30m/分、特別な場合でも40m/分、また傾斜角は30度迄しか許されていないが、将来は欧米並のものも実現するであろう）。特に安全性確保から乗り込み、降車時の速度はあまり速くはできないが、乗り込んだ後の中間部の速度を速くしたいという願望は昔からあった。フランスでTRAXの名で開発されていると言われている移動通路がその一例である¹⁷⁾。しかし安全性確保等の技術的問題点が解決されておらず未だ実用にはなっていない。

5. おわりに

以上昇降機の現状と動向について一端を紹介した。昇降機は、ビルの形態や高機能化に対応して変革していく。特に最近の超々高層ビル、あるいは超高層住宅

等の出現に対して、快適性・利便性を損なわずに如何にエネルギーが少なく、換言すれば電源設備容量や消費電力が少なく、人を輸送するかという命題に対して今後其研究が続けられよう。

参 考 文 献

- 1) 三浦；エレベータの消費電力，エレベータ界，No. 37 (1975-1)，12～18
- 2) 渡辺ほか2名；エレベータ用制御・駆動装置の新技術，日本機械学会誌，88巻，804号 (1985)，39～45
- 3) 棚橋ほか5名；インバータ制御を用いた超高速エレベータ，三菱電機技報，64巻，10号 (1990)，27～32
- 4) 坂井ほか4名；インバータ制御超高速エレベータの開発；日立評論，70巻，10号 (1988)，1～6
- 5) 野村ほか5名；再生電力制御VVVF方式の研究，昭和61年電気学会全国大会 (1986)，629
- 6) 米本他4名；新シリーズエレベータ《グランディ》，三菱電機技報，64巻，10号 (1990)，6～10
- 7) 下秋ほか5名；油圧式エレベータ用新駆動制御システム，三菱電機技報，64巻，10号 (1990)，17～20
- 8) 坂井ほか2名；エレベータの群管理制御の動向と課題，電気学会論文誌D，109巻，9号 (1989)，618～621
- 9) 匹田ほか5名；エキスパートシステムを応用したエレベータ群管理システムAI-2100，三菱電機技報，63巻，2号 (1989)，54～57
- 10) 渡辺；エレベータにおける省エネルギー技術，日本機械学会第498回講習会教材 (1980)，43～58
- 11) 田辺；インテリジェントビルにおける昇降機，三菱電機技報，63巻，6号 (1989)，20～26
- 12) 鬼頭ほか3名；三菱モジュラーエスカレータ，三菱電機技報，53巻，8号 (1979)，618～622
- 13) 松倉ほか3名；スパイラルエスカレータ，日本機械学会誌，89巻，255号 (1986)，61～67
- 14) 山村；電気学会100年の回顧と展望，電気学会誌，108巻，8号 (1988)，740～747
- 15) 渡辺；昇降機技術の展望，三菱電機技報，64巻，10号 (1990)，2～5
- 16) 電気設備の技術動向調査報告書，電気設備学会誌，1987-2，89～126
- 17) World's First Accelerating Walkway Will Enter Service in 1981, Elevator World, 22 (March 1980)

