超高層ビル用エレベータシステムにおける占有床面積と消費エネルギーの数理的解析

非会員　田邉　崇（上智大学）
正　員　中野　求（上智大学）
正　員　宮武　昌史（上智大学）

Mathematical Analyses of Elevator Core Area and Energy Consumption of Elevator Systems for High Rise Buildings

Takashi Tanabe (Sophia University)
Motomu Nakano (Sophia University)
Masafumi Miyatake (Sophia University)

Elevator arrangement techniques of building are needed for reducing elevator core area. Zoning, sky lobby and some other configurations are proposed and practically used. However, handling capacity of present roped elevators is limited. Ropeless elevators are needed to overcome the problem in the future super skyscrapers. The ropeless elevators occupy smaller area than roped elevators, but they consume large. The authors aim to analyze the techniques of elevatoring as shown above with mathematical modeling.

A building is mathematically modeled and four types of elevator configurations and specifications are assumed. The height of building needed for the same rentable space is calculated with the model. The results show that ropeless elevators can lower the height of building by more than 20%. The energy consumption became larger, however the energy needed for construction, air conditioning, lighting etc. could be reduced because of the lower height.

キーワード：エレベータ配置方法、ロープレスエレベータ、ロープ式エレベータ、消費エネルギー
Keywords: elevator arrangement, ropeless elevator, rope elevator, energy consumption

１．まえがき

超高層ビルは、平面的に広がった都市をコンパクト化し、交通問題などを緩和する効果を持つ。さらには、立体化により解放された地表面を緑化することで、都市のヒートアイランド現象を防ぐことができるなど、超高層ビルを建てることは、都市が抱えている様々な問題を解決する一つの有効な手段であると言える。

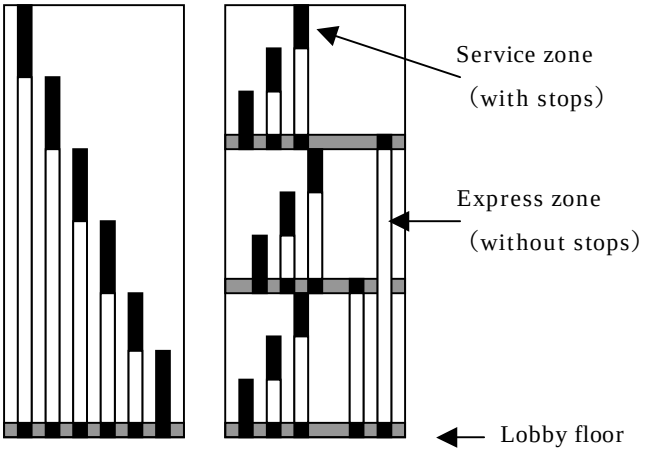
現在、ビル内の鉛直方向の輸送機関として主力的な役割を担っているのはロープ式のエレベータである。しかしながら、ビルが高層化すると、ビルの床面積に対するエレベータ通路面積の割合が増加してしまう問題がある。この問題を解決するためのエレベータの構成方法として、スカイロビー方式や、ダブルデッキエレベータ方式などがあるが、１つのシャフト内に１台のエレベータという原理は変わっていないため、根本的な解決策とはいえない。

高さ 800m にもなる超々高層ビル構想で鉛直方向の輸送手段として最も有力視されていたのが、ロープレスエレベータ[(1)]である。１つのシャフト内に複数のエレベータを配置することが可能なので、ロープ式と比較して高層化時にエレベータの占有面積を大きく減らすことができるといった利点がある。しかし、釣り合いおもりを介さずにかごを直接駆動する必要があるため、消費電力が大きいのが問題である。

このようなことから、都市の高密度化とエレベータ輸送効率向上、エレベータ占有面積の削減、ロープレスエレベータ化による消費電力の増大といった項目の詳細な検討が求められている。そこで本論文ではまず、占有面積と消費電力を解析するための数学的なモデルを導入することとし、そのモデルを用いたシミュレーションにより、ビルの大きさやエレベータの構成方法が占有面積と消費電力に及ぼす影響を数値的に求めることを目的とした。

２．エレベータの配置方法と構造

<2.1>　エレベータの配置方法　高層建築物の床面積を増やすためには、エレベータの省スペース化は重要であり、配置方法についてさまざまな工夫が考えられている。



(a)　zoning method　　(b)　sky lobby

図１　高層ビル用各種エレベータ構成方法
Figure 1　Elevator configurations for skyscrapers.

①サービス階分割方式（ゾーン方式）　　サービス階分割方式（ゾーン方式）とは、図 1(a) のように各エレベータのサービス階を分割し急行運転区間を設ける方式である。サービスするゾーンを細分化することによって、かご一周時間を削減し、輸送力を稼いでいる。少なくとも、ロビー階からは乗り換えなしで目的階へ行くことが可能である。10～15階を１つのサービスゾーンにすると効率的であるとされている。現在の超高層ビルにおいて最も標準的な方式であるが、次に述べるスカイロビー方式と比べてエレベータの占有面積が大きくなる。

②スカイロビー方式　　スカイロビー方式は、図 1(b) のように、超高層ビルの高さ方向を何層かに分割し、エレベータ乗り継ぎのためのスカイロビー階を設ける方式である。各層内はローカルエレベータが、スカイロビー階までは専用のエレベータ（シャトルエレベータ）がそれぞれサービスする。シャトルエレベータは、途中階に停車しないため、かご一周時間を小さくでき、高い輸送能力をもたせることができる。上層へ行く場合、シャトルエレベータとローカルエレベータとの乗り換えが生じてしまう欠点があるが、エレベータシャフトの占有面積を削減する効果的な方法であり、すでに一部の高層ビルでの使用されている。

この他にも、トップダウン方式などが提案されているが、本論文では、一般的な上記２つの方式について検討する。

<2.2>　エレベータの構造　　エレベータの配置方法を変えるだけでは限界があるため、エレベータそのものの構造を変えることによって、エレベータの輸送能力を高め、占有面積を削減する方法が提案されている。

①ロープレスエレベータ　　ロープレスエレベータは、従来のエレベータを駆動させるためのロープを取り去り、エレベータかごをリニアモータ等で直接駆動させることにより、１つのエレベータシャフト内に複数のかごを同時に動作させることを可能としたエレベータである。従来のロープ式エレベータと比べて、シャフトあたりの輸送能力を根本的に向上させることができ、特に高層化するほど効果があるが、消費エネルギーが大きくなる欠点がある。

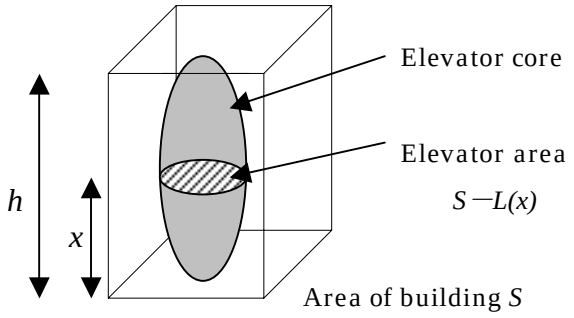


図２　ビルにおけるエレベータ床面積のモデル
Figure 2　A model of elevator area in a building.

②ダブルデッキエレベータ　　ダブルデッキエレベータは、かごを２層構造とし、１台あたりの輸送能力を高める方法である。

本論文では、①のロープレスエレベータについて検討を行い、ロープ式エレベータと比較することとした。

３．ビルの有効床面積

文献(２)において、ビル内の鉛直方向交通に伴うエレベータの通路面積を求める解析モデルが提案されている。本論文ではこれを基本にし、さらに現実の交通需要と輸送能力をモデルに反映して検討することとした。

高さ h、床面積 S の長方形のビルを考える。ビルの床面積は、エレベータの通路と人の居住する部分の２つだけに使われるとする。人の分布密度を ρ、ビル内の点の地上から測った高さを x、高さ x の面における居住領域の面積を $L(x)$、エレベータの通路面積を $S-L(x)$ とする。また、ビル内での人の移動は、次の２つの交通の合計とする。

(ｉ) 出勤時に地上から高さ x の点に到着する人：$a\rho L(x)$

(ii) ビル内で x_1 から x_2 に移動する人：$b\rho L(x_1)\rho L(x_2)$

(ｉ)では、出退勤時に地上と各階の間を行き来する交通量が各階の人口に比例すると仮定した。また、(ii)では、各階間を行き来する交通量が、その２つの階の人口積に比例すると仮定した。本論文では、(ｉ), (ii)を同時に取り扱う。

さらに、エレベータ通路単位面積あたり単位時間に輸送できる人数を c とおく。この輸送能力 c はエレベータ方式によって違った値とし、その値の求め方については４章で述べる。

このように仮定すると、ある高さ x における通過交通量と輸送力の関係は次式で与えられる。

$$c\{S-L(x)\}=a\rho\int_x^h L(\tau)d\tau+b\rho^2\int_x^h L(\tau)d\tau\int_0^x L(\tau)d\tau \quad (1)$$

境界条件は、

$$L(h)=S \quad (2)$$

である。上記方程式を微分方程式の形に書き換えるために、地上から高さ x までのビルの居住容積を

$$V(x)=\int_0^x L(\tau)d\tau \quad (3)$$

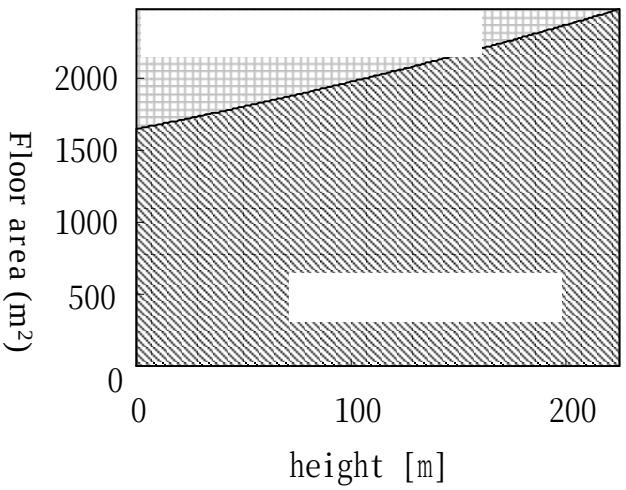


図 3　実在の高層ビルにおける面積の計算結果
Figure 3　Calculated result of areas of an existing skyscraper.

とおき、これを新しい従属変数とする。そして、ビル全体の居住容積

$$V_h = \int_0^h L(\tau)d\tau \tag{4}$$

を新しいパラメータとすれば、V に関する微分方程式

$$c\left(S - \frac{dV}{dx}\right) = b\rho^2\{V_h - V(x)\}V(x) \tag{5}$$

を得る。境界条件は次の通りである。

$$V(0) = 0 \qquad V(h) = V_h \tag{6}$$

これらの方程式の解としてまず V を求め、(3)式から $L(x)$ を求めると、(7)式のようになる。

$$L(x) = \frac{\beta^2}{\alpha}\frac{1}{\cos^2\left(\frac{\beta}{\alpha}x - \arctan\frac{\gamma}{\beta}\right)} \tag{7}$$

このL(x)が、高さxにおける居住面積、すなわちビル内の有効床面積を示す。

ただし、α、β、γ、及びそれらを求めるのに必要なV_hは次式で求められる。

$$\alpha = \frac{c}{b\rho^2} \quad \beta = \sqrt{\alpha S - \frac{1}{4}\left(V_h + \frac{a}{b\rho}\right)^2} \quad \gamma = \frac{1}{2}\left(V_h - \frac{a}{b\rho}\right) \tag{8}$$

$$V_h = \gamma + \sqrt{\alpha S}\sin\left(\frac{\beta}{\alpha}h - \arctan\frac{\gamma}{\beta}\right) \tag{9}$$

なお、6章の計算では、人の分布密度ρ＝0.3 人／m³とした。またビル内を行き来する人の割合は、通勤交通を行わない人のうち 10 万人に１人の割合、つまり、

$$b = 10^{-5} \times (1 - a) \tag{10}$$

とした。この時、１日の交通変化を想定して、通勤交通の割合 a を０から１まで変化させながら $L(x)$を計算し、ある高さ x について最大となるエレベータ通路面積をその高さの所に必要なエレベータの通路面積とした。

実際は、(7)～(9)式を解くことになるが、解析的に解くのは困難なため、数値的に値を求めることとした。本モデルの数値的妥当性は、実在のビルの数値を当てはめることによって検証した。その例を図 3 に示す。

４．エレベータの輸送能力

<4.1>　ロープ式エレベータの輸送能力　本論文では、輸送能力 c は、片道方向にエレベータ通路単位面積あたり単位時間に輸送できる人数としている。

ロープ式エレベータは、基本的に１つのシャフト内に１台のエレベータしか存在しない。この場合、輸送能力 c[人/m²・hour]の計算手法はエレベータ交通計算手法(4)として一般に用いられている。エレベータが１周して戻ってくるまでの時間、周回時間 RTT[秒]から次式のように求められる。

$$c = \frac{r}{RTT} \times 3600 \tag{11}$$

ただし、r はエレベータ単位面積あたりの定員である。現在使用されているエレベータの、シャフト部分を含む面積１m² あたりの定員は約 3 [人]であるが、本論文では通路面積をエレベータホールの面積を含めて考えることから、エレベータホールの面積をシャフト面積と同じだけ必要であると仮定して、r=1.5 [人／m²]とおく。

RTT はエレベータのサービス形態によってもその値が異なる。そこで、サービス階分割方式（ゾーン方式）におけるエレベータと、スカイロビー方式におけるシャトルエレベータとローカルエレベータの、それぞれの場合における RTT の値を求める。

①ゾーン方式のエレベータにおける *RTT*

エレベータの一周時間 RTT は以下のような条件下において計算することとした。

１．ロビー階から乗客がいっせいに乗車する
２．サービスゾーンの開始階までは途中停止なしで走行
３．サービスゾーンの中のいくつかの階で乗客が徐々に降りていく
４．サービスゾーンの最上階まで行ったら、反転し下降
５．１.から３.と逆のパターンで、ローカル区間で乗客を乗せ、ロビー階で乗客を降ろす

このサービス形態では、乗客はロビー階からローカルサービス階へ向かうか、またはその逆のローカル階からロビー階へ向かう乗客しかいないものとしている。つまり、ローカルサービス階同士の行き来は無いものとしている。これは、面積的に大きな影響を及ぼす高層行きエレベータでは、ビルの高さに比べてローカルゾーンの長さが相対的に短くなるため、ローカルゾーン内のみを行き来する乗客の影響は小さいと考え、計算モデルの簡略化を図ったためである。

なお、この時ローカル区間内のある階に停止する確率 f は次式のようになるとされている。

$$f = 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^r \tag{12}$$

また、加速度 a は乗り心地の限界である $0.1g$[m/s²]、最高速度 V は、現在使用されているロープ式エレベータの中で最高速レベルの 15 [m/s]（900 [m/min]）として RTT を計算した。

②スカイロビー方式のローカルエレベータにおける *RTT*

スカイロビー方式のローカルエレベータは、ほぼゾーン方式のエレベータと同じと考えてよい。そのため、周回時間 *RTT* の計算は①のゾーン方式のエレベータと同様に計算を行う。ただしゾーン方式のエレベータに比べて、比較的昇降路長が短いため、その最高速度 V を５[m/s]（300 [m/min]）とする。

③スカイロビー方式のシャトルエレベータ（ロープ式）における *RTT*

ロビー階とロビー階を結ぶシャトルエレベータの周回時間 *RTT* は、①のゾーン方式の計算から、ローカル区間の時間を省き、上層のロビー階での乗降時間を加えたものであると考えることができる。

なお、シャトルエレベータの最高速度 V はゾーン方式と同じ 15[m/s]とする。

<4.2> ロープレスエレベータの輸送能力　ロープレスエレベータは、昇降路の高さが高くなったとしても、シャフト内に存在するエレベータの台数を増やすことが可能であるので、その輸送能力は昇降路の高さにはよらない。

したがって、ロープレスエレベータの最大輸送能力は、輸送能力を T[人/hour]、エレベータ単位面積あたりの定員を r[人]、基準階の出発間隔を s[秒]とすると、

$$T = \frac{r}{s} \times 3600 \tag{13}$$

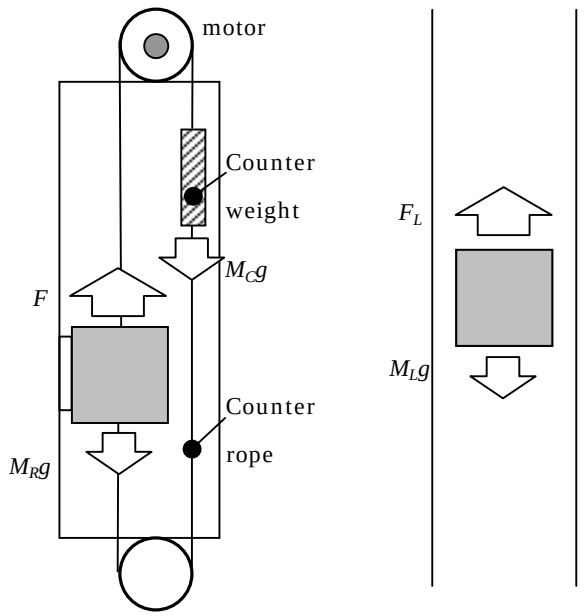
と表すことができる。

このようにおくと、ロープレスエレベータの輸送能力の値は、使用形態によらず一定である。

本論文では、この先、単位面積あたりの定員 r をロープ式の１／1.3 倍（これは、ロープレスエレベータの床面積がロープ式の 1.3 倍であることを表している）とおく。これは、側壁のリニアモータ等の分を考慮したものである。よって、r＝1.5／1.3＝1.15 人とし、出発間隔を 120 秒、とする。したがって、ロープレスエレベータの輸送能力は T＝34.6[人／m²･hour]として計算を行う。

<4.3> 輸送能力のまとめ　１つのシャフト内に１台のエレベータしか存在しない従来のロープ式エレベータの輸送能力は、エレベータ１台が一周する周回時間ＲＴＴを計算することにより求めることができる。エレベータの昇降路の高さが高くなると、走行時間が長くなるため輸送能力は低下する。

ロープレスエレベータの場合は、１つのシャフト内に複数のエレベータを設置することが出来るので、輸送能力は各々のエレベータの運行間隔と定員から求めることができる。つまり、昇降路の高さに依存しない。



(a) ロープ式エレベータ Roped elevator　(b) ロープレスエレベータ Ropeless elevator

図 4：エレベータ駆動装置の概略

Figure 4. An outline of an elevator drive system.

こうして求められた、各々停車パターンや構造が異なるエレベータ１台ごとの輸送能力の値から、それらを組み合わせることにより、複数のエレベータを配置したビル全体のエレベータ輸送能力を求めることができる。解析で用いる値 c については、予めエレベータ方式を仮定した上で、全エレベータの平均値を用いることとした。

５．消費エネルギー

超々高層ビルにおいて、ロープ式エレベータとロープレスエレベータのそれぞれの場合における消費エネルギーを求めてみる。図 4 に超々高層ビルに用いるエレベータの概略を示す。なお F_R はロープ式の推力、F_L はロープレス式の推力である。ロープ式エレベータを超々高層建築に用いる場合、かごの位置によりロープ式重量の不釣合いが生じるため、図 4(a)のようにかごの下部に釣合ロープを取り付けて、ロープ重量の問題を解決する方法がとられている。

表２にここで用いる数値[(4)(5)]を示す。ロープ式とロープレスのかごの重量は、それぞれ積載量 2000kg(30 人)を含む。釣合おもりの重量は、かご重量と積載量の半分(1000kg)との和で設定されている。

ロープ式エレベータ、ロープレスエレベータのそれぞれについて必要となる推力を算出すると、次の(14)式と(15)式のようになる。

$$F_R = (M_R - M_C)g + \left(M_R + M_C + 2\rho h \frac{KM_R}{Z - \rho hK}\right)a \tag{14}$$

$$F_L = M_L g + M_L a \tag{15}$$

ただし、F_Rはロープ式の推力、F_Lはロープレスの推力、hは昇降路長を示す。なお、支持機構との摩擦、ロープ振動、加々速度は考慮していない。

上式より、ロープレスはかご重量と加速度によって決定されるが、ロープ式はさらに昇降路長によって変化するロープ重量の項が関係してくることが分かる。

エレベータの運行パターンを決めれば、この推力に移動距離を掛けることにより、必要となるエネルギー量を算出できる。さらに、モータ効率から、投入するエネルギーを計算できる。エネルギーが負となる時は、そのエネルギーをすべて回生できるものとして、この後の計算を行う。

さらに、２章および３章で求められるビルの有効床面積を用いれば、エレベータが消費するエネルギーのビル内へ通勤する人１人あたりの平均値を求めることができる。

表２　エレベータ仕様

Table 2. Specification of Elevator

項目	数値［単位］
ロープ式かご重量 M_R	6500[kg]
釣合おもり重量 M_C	5500[kg]
リニア式かご重量 M_L	8000[kg]
重力加速度 g	9.8[m/s^2]
かごの加速度 a	-0.1g、0、0.1g[m/s^2]
かごの定格速度 v	10[m/s]
ロープの直径 ϕ	18[mm]
ロープの切断荷重 Z	14800[kg]
ロープの重量 ρ	1.18[kg/m]
ロープの安全率 K	10
ロープ式のモータ効率	0.95
ロープレス式のリニアモータ効率	0.8

６．シミュレーション

３章から５章で挙げた方法により、実際に様々な大きさのビルにおいて、ビル内の延べ居住床面積と消費電力を計算した。ここでは床面積Sが10000m^{2}の結果を図５に示す。

なおエレベータの配置方法は、次の４種類について、それぞれ計算を行っている。

Case 1 : 全エレベータがロープ式のゾーン方式

Case 2 : 全エレベータがロープ式のスカイロビー方式

Case 3 : 全エレベータがロープレス式のゾーン方式

Case 4: シャトルエレベータがロープレス式で、ローカルエレベータがロープ式のスカイロビー方式

ただし、ゾーン分割方式は、１台のエレベータでローカル階を１３階サービスするものとし、スカイロビー方式は、ローカルエレベータについてはゾーン分割方式と同じように１台のエレベータでローカル階を１３階サービスし、ローカルサービス区間が３ゾーンにつき１つのロビーを設置するものとした。

さらに、ビル内の延べ居住床面積は、１階あたりの高さを4[m]として計算を行っている。消費電力は、大きさの異なる複数のビル同士の比較を容易にするため、ビルの外からビルの中のある階へ往復する時の１人あたりの平均消費エネルギーを示した。なお、この平均消費エネルギーにビルの通勤人口を掛ければ、そのビルの通勤と退勤に必要な全消費エネルギーを算出できる。

図５の結果を見ると、ビルの高さが高くなるのに伴い、ビルの延べ居住床面積の増加が鈍くなっていることがわかる。これは、居住床面積が増えるにしたがって、ビル内の交通量も増加してしまうためである。また、さらに高くなると、ビルの延べ居住床面積が減少してしまうという現象が生じている。これは、ロープ式の場合には、ビルが高くなることに伴いエレベータの輸送能力が低下してしまうことが原因である。

なお、図５の結果において、スカイロビー方式のグラフに不連続な部分があるが、これはこの不連続な点でロビー数が変わっているためである。また図２において、消費エネルギーのグラフが1250mまでとなっているが、これは1250m以上になるとロープ式の消費エネルギーがロープの自重により値が発散してしまうため、その付近までの値のみを掲載したためである。

図５の結果から、例えばロープ式エレベータによるゾーン方式を用いた高さ500mのビルと総有効床面積を同じにする場合、他のエレベータ構成を用いるときに必要となるビルの高さと消費エネルギーを示したのが図６である。

図６からエレベータの構成を変えることによって、ビルの高さが低く抑えられることが分かる。さらに高さが抑えられたことによって、消費エネルギーも低くすることができることが分かる。ところがロープレスエレベータを用いた場合には、消費エネルギーが約17倍になっている。これはロープレスエレベータの瞬時電力が大きいこと、およびリニアモータの効率の悪さが原因となっている。しかしながらビルが高くなればなるほど、ロープ式はロープの重量が増大し、またエレベータの走行時間も長くなるために輸送能力が低下するので、この消費エネルギーの差は小さくなる。

なお、現在のビルではエレベータ等の消費電力はビル全体の５％程度であり、エレベータの消費エネルギーが増えても、ビルをコンパクトにできることによる建設時・照明・空調などのエネルギー削減効果により、ビル全体のエネルギーには大きく影響しないものと考えられる。

７．結論

本論文では、超高層ビルにおけるエレベータの配置方法について、消費電力と占有面積の両方を関連付けて、数理的モデルを導入して検討した。今回は数学的なモデルに乗せやすい形で検討を行ったため、輸送能力cの求め方やエレベータ構成の仮定等に改善の余地があるが、これによりいくつかの重要な知見が得られた。

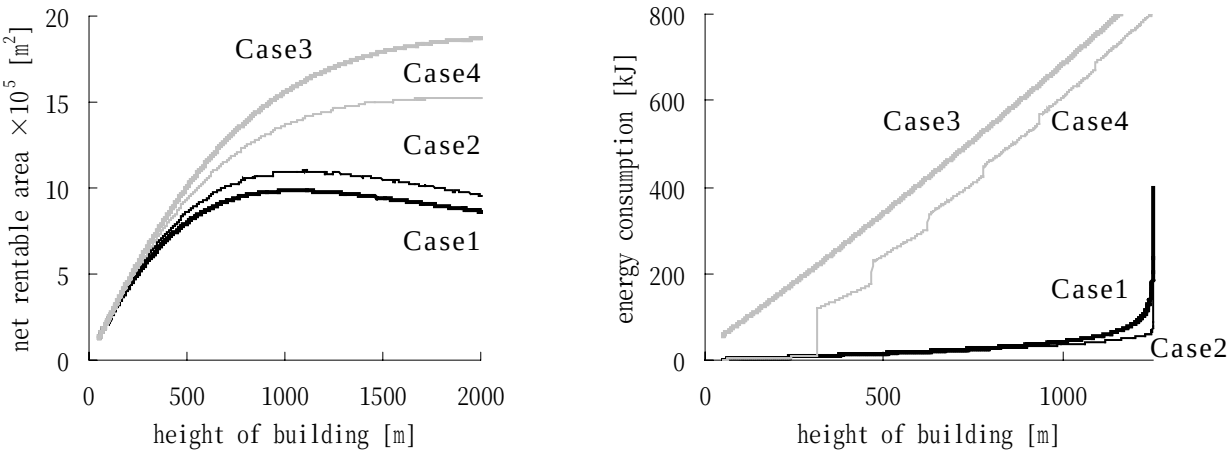


図 5：ビル内の延べ居住床面積と消費エネルギー

Figure 5. Total rentable area and energy consumption of buildings.

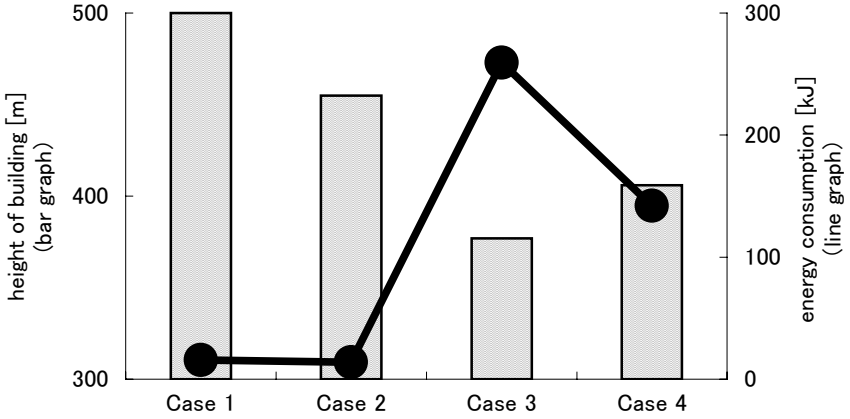


図 6：総有効床面積を同じにするビルの高さと消費エネルギー

Figure 6. Height of building and energy consumption when total rentable area is equal.

その結果、現在多くのビルで採用されているロープ式エレベータによるゾーン方式よりも、スカイロビー方式やロープレスエレベータのエレベータ占有面積削減効果が定量的に示された。

特に、本論文では、居住床面積を一定として各エレベータ方式の比較をしたのが新しい点である。その結果、ロープレスエレベータによってビルの高さが２割以上低くできることを示した。ロープレスエレベータのエネルギー消費は増えるものの、ビルがコンパクトになることによる建設費削減、輸送以外のエネルギー消費削減などの効果が期待できる。

さらに、ロープ式のゾーン方式は、他の方式に比べて高さを高くすればするほど輸送能力は低下するため、エレベータの配置方法を変更することによって得られる効果は大きくなる。また、ビルが高くなればなるほど、ビル内の消費エネルギーに対するエレベータの重要度は大きくなる。したがって、超々高層ビルにおけるエレベータの配置方法についての検討は非常に重要である。

文献

（1） 宮武 他：「ロープレスエレベータシステムの提案とその有効性評価」電学論Ｄ、119-11、pp.1353-1360、1998

（2） 田口東：「大規模超高層ビルにおける内々交通とエレベータ通路」*Journal of the Operations Research Society of Japan*、Vol.37、pp232-241、1994

（3） 日本エレベータ協会：「昇降機計画指針」1992

（4） 「ﾛｰﾌﾟﾚｽｴﾚﾍﾞｰﾀへのリニアモータの応用に関する研究」電気学会 縦型リニアドライブ協同研究委員会 報告書, 1993

（5） 樋田憲一 他：「エネルギー消費から見たロープレスエレベータの実現可能性」、電学研資 TER-96-26、pp19-28、1996