Journal of the Operations Research
Society of Japan
Vol. 40, No. 4, December 1997

超高層ビルにおける都市型交通とエレベータ通路

田口　東
中央大学

(受理 1996 年 8 月 29 日；再受理 1996 年 11 月 19 日)

和文概要　本論文では，近い将来出現するであろう，都市生活に関わる多様な機能を収容した超高層ビルにおける交通問題を考察する．このようなビルでは従来型のオフィスビルと異なり，都市内交通のようなタイプの交通が発生すると考えられる．そこで，居住部分とエレベータ通路からなるビルを考え，

・ビル内の人の対に対応して相互に行き来する交通が発生する
・移動距離が長くなるにしたがって交通発生の確率が減少するという距離抵抗が存在する

と仮定し，円滑な交通に必要なエレベータ通路の面積を求めるモデルを導いた．そして，計算例を検討することによって，ビルの高さと距離抵抗の大きさを変化させたときの，ビルの中に収容できる人口とエレベータを通行するトリップの量との関係を調べた．その結果，ビルをより高層にしてより多くの人や活動を収容することは，距離抵抗を大きくすることによりある程度実現可能であることを示した．また，ビルの収容人口とトリップ数の２つの尺度からみたときの適切なビルの高さがあり得ること，移動をより局所的に制限できるほど高いビルが優位になることを示した．

1.　はじめに

高層ビルは多くの人や機能を少ない専有面積で収容することができるので，都市部の狭い土地を有効に利用するために不可欠のものであり，大規模化・高層化に向かっている．このようなビルの中の交通を考えると，上下方向の徒歩による移動は水平方向の移動と比べて格段に時間も労力もかかるため，エレベータの役割は非常に重要である．最新の設備を備えた大規模なビルでは，エレベータ輸送効率化のために，エレベータの箱の移動の高速化をはじめとする機械的な性能の向上がはかられるとともに，乗客の利用状況に適応するように複数のエレベータの運転を制御する群管理システムが導入されている．

もちろんエレベータの面積を十分広く取れば利用者の待ち時間への不満は生じない．しかし，これは有効に利用できる床面積を広く取りたいというビルのオーナーの意図とはそぐわないことになる．したがって，ビル内の交通問題を考える上では，エレベータシステムの固有技術の開発に加えて，各階の床面積を通路のためにどのくらい提供すればよいかという配分問題が重要であることがわかる．奥平[1]は，オフィスビルを対象として，出勤時と退社時に外部との出入口となる階（地上階）と各階のオフィスとの間に交通が集中する場合を想定したモデルを導き，地上階に近くなるほどエレベータ面積を広くとらなければならないという結果を示した．また，田口[6]は，近い将来出現するであろう都市生活に関わる多様な機能を収容した超高層ビルを対象として，ビルの中の人が相互に行き来する交通を考え，人の対が互いの位置に関わらず同一の確率で行き来すると仮定してモデルを導いた．この仮定は，都市計画の分野で用いら

れる，2ゾーン間の交通量はそれぞれの人口の積に比例するというモデルの考え方と類似している．一方，ここでは移動距離，所要時間の抵抗がないとしており，1人が行き来する相手の数はビルの人口に比例することになる．現実の交通を考えるとやや極端な状況であるが，多くの人が集まることによってさらに交流が盛んになるという都市の一つの面を強調する意図があった．

上記[6]ではモデルの計算例により，ビルの規模を大きくしても，ビルの中心付近の階では床面積の多くの部分をエレベータ通路に取られてしまうこと，有効に使えるビル全体の容積はほとんど増えないことを示した．言い換えると，その結論は，上述のような仮定の下では“都市型ビル”が実現不能である事を意味している．そこで，本論文では，交通発生の確率が移動距離が長くなるにしたがって減少するという距離の抵抗を導入してモデルを拡張する．これは，モデルの記述力の点からは，ビルの規模に応じて期待される有効な容積を得ることが出来るようにするものであり，現実を反映させるという点からは，同種の施設があれば近い方を利用するはずであるといったこと，また，関連の深い機能を近くに置くという工夫がなされることを考慮に入れたものである．さらに，ビルに収容できる人口，ビル内のエレベータによって行き来できる人の対の数という2点から，最適なビルの規模を導くことを考える．

2. モデル

図1のように底面積がS，高さhの直方体のビルを考える．そして，ビルの中の人の分布を各階ごとではなく，連続的に密度ρで分布しているものと考える．ここで，密度ρは1人あたりの専有床面積にひとつの階の高さをかけた値の逆数である．また，ビル内の点の地上から測った高さをxとし，高さxの面において床面積からエレベータ通路を除いた面積を$L(x)$とする．$L(x)$を有効床面積とよぶことにする．通路面積は$S-L(x)$である．

ビルの中の交通発生の仕方を考えよう．[6]と同様に人の対に基づいて行き来が生ずるとする．そして，高さ方向の距離がr離れた2点にいる人が行き来する確率が

(2.1) $\exp(-\gamma r)$

に比例するとする．γは正値のパラメータであり，大きな値をとるほど移動距離の短い交通が距離の長い交通よりも相対的に多くなる．γは，長い移動が現われないように施設の配置を工夫するという計画可能な要因と，実際の移動にかかる時間に対する利用者の反応という事後の要因によって定まる値である．式(2.1)は都市計画の分野における空間相互作用モデルの距離抵抗を表わす項のひとつである[2]．

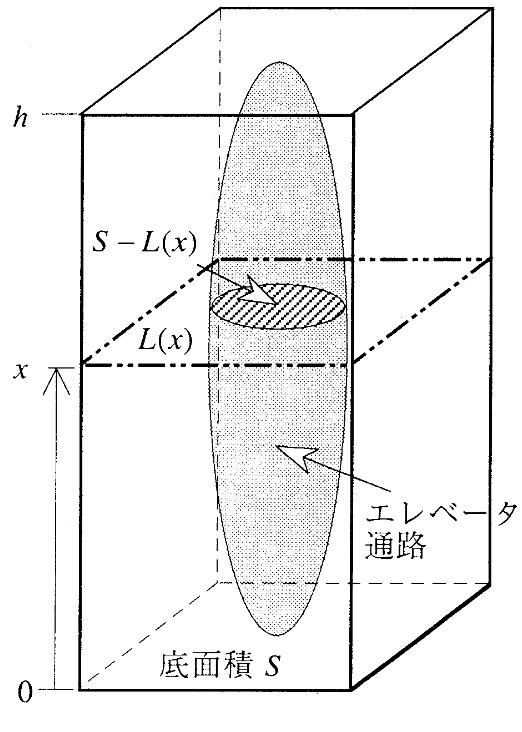

図1　長方形ビル．エレベータ通路の形状は内々交通を想定している．

以上の準備の下に，高さ方向の交通量とその輸送のために必要なエレベータ通路面積の関係を導こう．それぞれ高さx_1，x_2にいる人が単位時間あたりに行き来する確率を(2.1)に

したがって，

(2.2) $$b\exp(-\gamma|x_1-x_2|)$$

とする．bはビル全体の交通量を定めるパラメータである．高さxの面を通過する交通は，xよりも上にいる人と下にいる人との行き来によるものであるから，そのような人の対の数に行き来する確率(2.2)をかけると，面xの通過交通量が次式のように得られる．

(2.3) $$\int_x^h \rho L(x_1)\left\{\int_0^x \rho L(x_2)\ b\exp(-\gamma|x_1-x_2|)dx_2\right\}dx_1$$

一方，単位時間に輸送できる通路単位面積あたりの人数をcとすると，面xにおけるエレベータ面積$S-L(x)$から交通容量が得られる．そして，通過する人数を交通容量に等しいとおいて，方程式

(2.4) $$c(S-L(x))=\int_x^h \rho L(x_1)\left\{\int_0^x \rho L(x_2)\ b\exp(-\gamma|x_1-x_2|)dx_2\right\}dx_1$$

を得る．境界条件は，ビルの上端と下端とで通路が必要ないことから

(2.5) $$L(0)=L(h)=S$$

となる．

式(2.4)，(2.5)の解$L(x)$から，ビルの収容人口

$$P=\int_0^h \rho L(x)dx,$$

ビル内を行き来する人の対の数

$$T=\int_0^h \rho L(x)\left\{\int_0^h \rho L(x_1)\exp(-\gamma|x-x_1|)dx_1\right\}dx$$

を計算することができる．以下ではTを活動量とよぶ．また，ビル内の総交通量は，断面交通量(2.4)をxについて積分することにより，

$$VT=c(Sh-\frac{P}{\rho})$$

として得られる．Pはビルのオーナーにとっての関心事であり，TあるいはT/Pはビルの中に収容する機能を実現するための重要な指標である．また，Tは交通発生パターンがモデル通りであるという仮定の下での，確保されたエレベータの輸送力とみなせることに注意する．

田口[6]は式(2.4)において$\gamma=0$とおいたときの解析解を求めた，しかし，$\gamma\neq 0$の場合に解析解を求めるのは難しい．次の計算例では高さ方向に適当な数の節点をとって$L(x)$を折れ線関数で近似し，それを上の方程式に代入して数値計算によって近似解を求める．付録にこの計算方法を述べる

3. ビルの収容人口と内々交通量

エレベータの交通容量c，人口密度ρ，ビルの底面積Sはすべての計算を通して次のように選んだ．

$$c:20\text{人}/m^2/\text{時},\quad \rho:0.03/m^3,\quad S:100m\times 100m.$$

残りのパラメータb，h，γを与えて式(2.4)，(2.5)を解くと，有効床面積の分布$L(x)$が得られ，ビルの収容人口Pと，ビル内を行き来する対の数（活動量）Tが得られる．しかし，計算例を検討する過程ではパラメータbを明示的には扱わずh，γを与えて，Pが指定した値になるようにbを調整して解を求めるようにした．このとき，Pが指定さ

れた値になるようにbを見つける効率の良い方法はなく，bをねらいをつけた値の付近で動かしてPを計算してみるといった強引な手段にたよった．また，計算結果を整理する際に，ビルに収容すべき人口Pが与えられ，そのときに実現される1人あたりの活動量T/Pが多い方が望ましいという見方をとった．ビルの高さh，距離抵抗の大きさγ，ビルの収容人口Pを次の範囲で変化させた．

$\gamma : 1/100 \sim 1/10000\mathrm{m}^{-1}$，$h: 200 \sim 1000\mathrm{m}$，$P: 20000 \sim 200000$人．

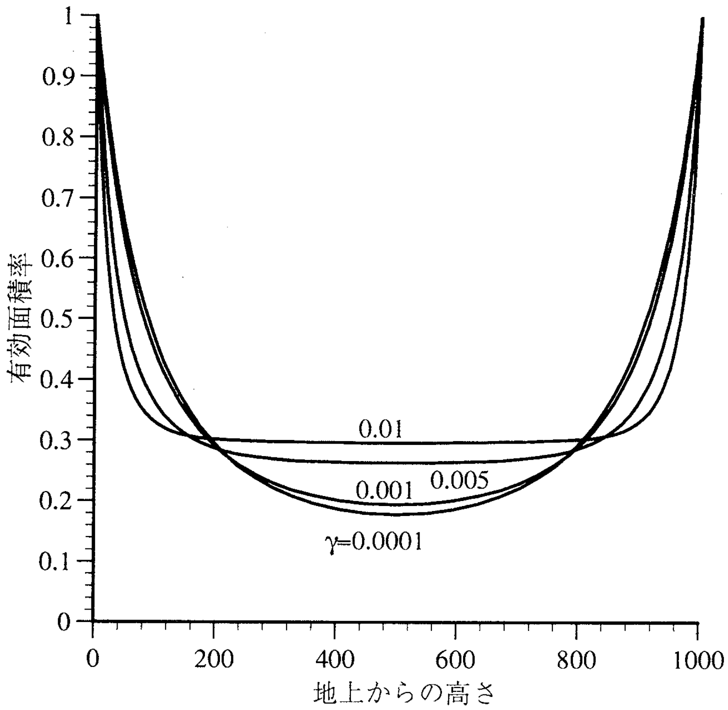

図2　高さ1000m，収容人口100000人のビルの有効面積率

図2に，距離抵抗γの大きさを変えたとき，ビル内の有効床面積の分布がどのように変化するのかを$h=1000$，$P=100000$を例として示す．地上からの高さxが横軸，$L(x)/S$が縦軸である．境界条件が指定された上端と下端を除いて，γが大きくなるほど有効床面積が一様になっていることがわかる．これは，移動する相手が局所的になるほど，各面を通過する交通量が高さによらず一定に近づくためである．

図3に，ビルの収容人口Pを与え，距離抵抗γを横軸，1人あたりの活動量T/Pを縦軸としてビルの高さごとにかいたグラフを示す．$P=20000$の場合をみると，γが小さい場合には，ビルの高さによるT/Pの差がほとんどなく，ビルを高くしても1人あたりの活動量は増やせない，一方，γが大きい場合には，ビルの高さを高くすることによって1人あたりの活動量を増やせることが分かる．これは，距離抵抗が大きいと距離の短い移動の割合が多くなり，同じ通路容積でも行き来する対の数を多くとれること，ビルが高いがゆえに距離の長い移動が発生して広い容積を占めるということが起きにくいことによる．1.はじめにで述べた都市型ビルの特徴にならって，図中の（$P=50000$，$h=200$）のa点に対して，人口を2倍とし1人あたりの活動量もPに比例して2倍となるとした状態は，$P=100000$のグラフのA－Bの範囲にあるhとγの組合せによって実現可能である．$P=50000$において$h=200$のカーブが他から離れているのは，Pがこのビルの最大収容人口60000人に近いからである．

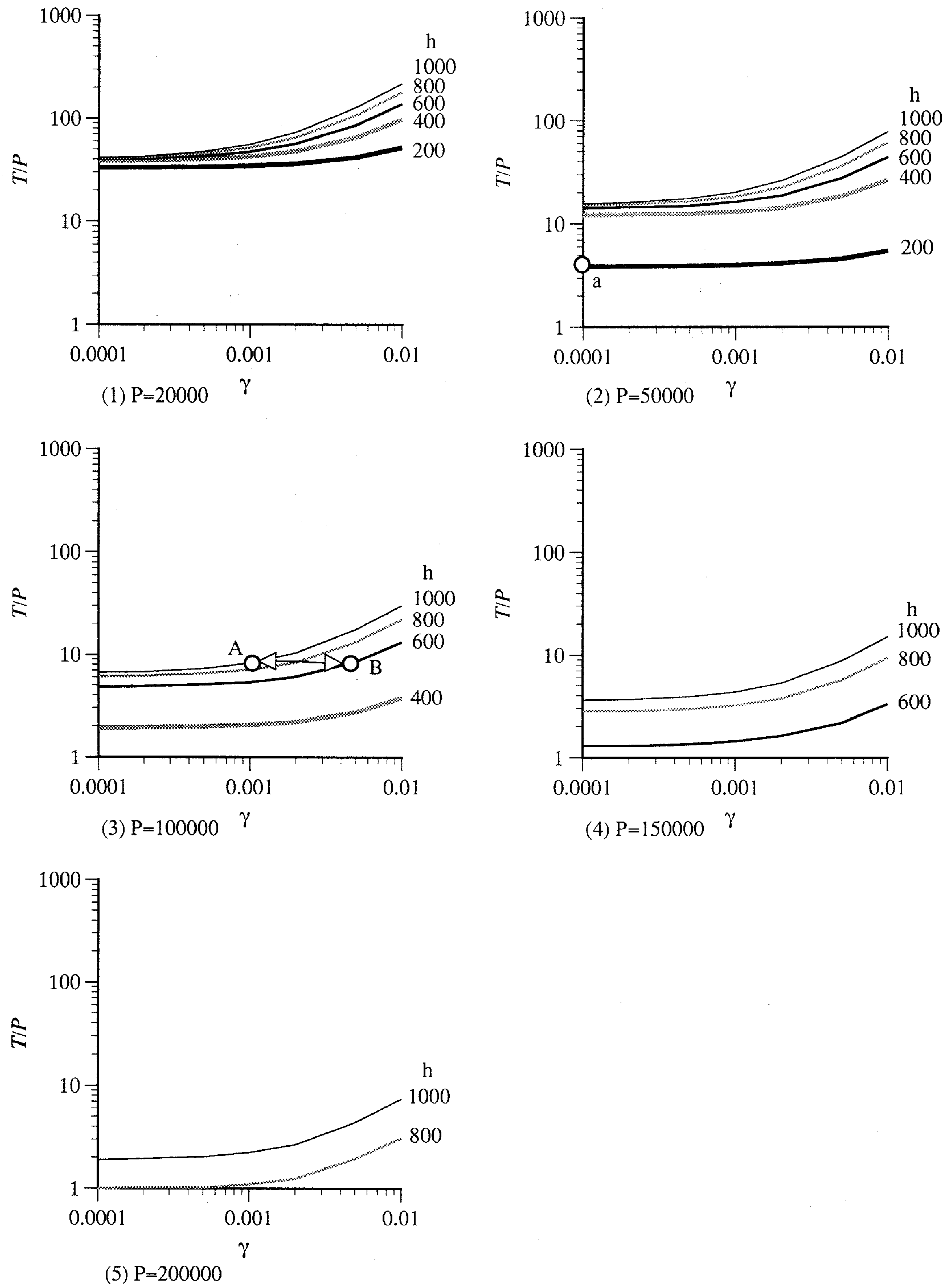

図3　距離抵抗γと１人あたりの活動量T/Pの関係，Pは収容人口，hはビルの高さ

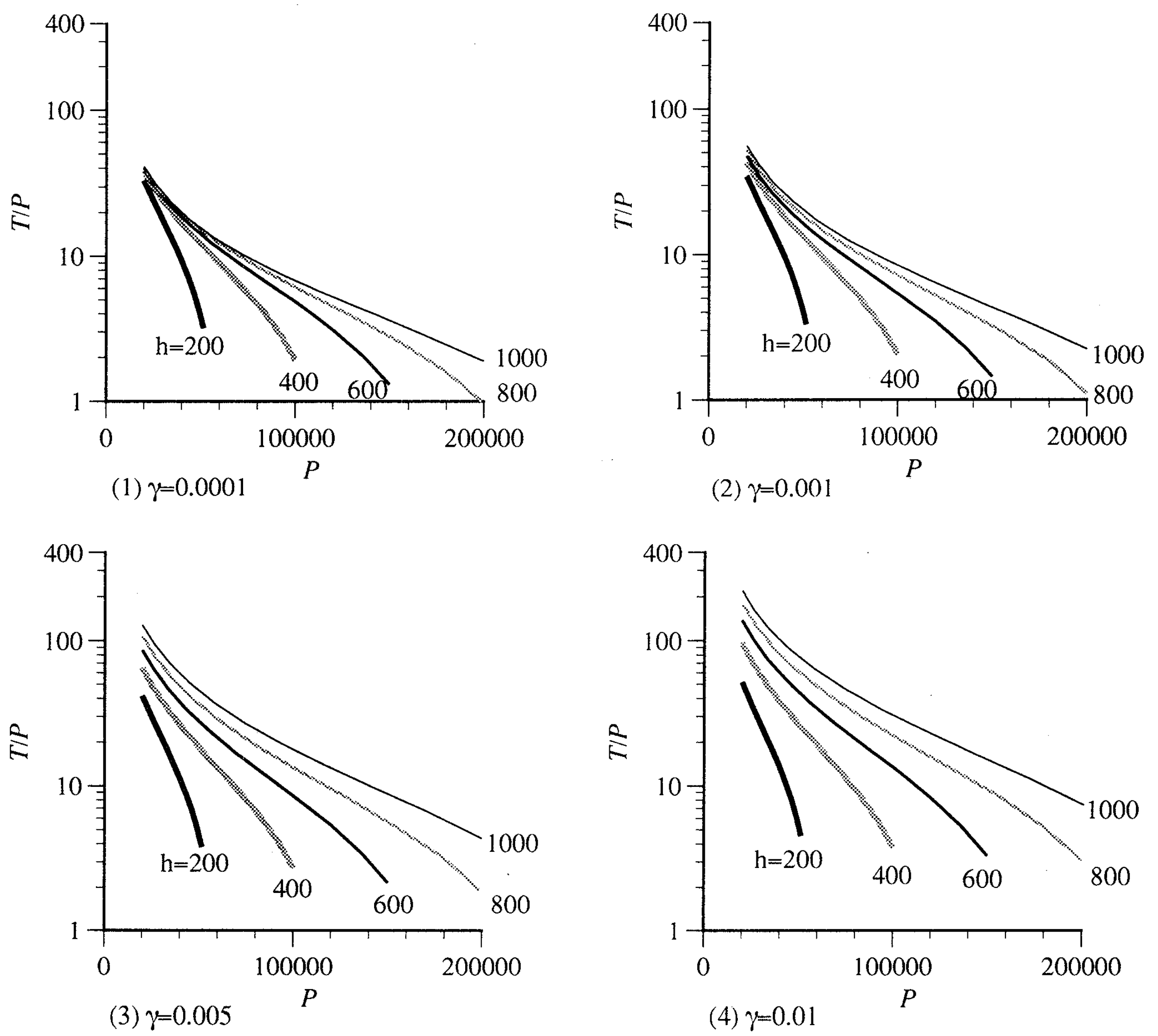

図4　収容人口Pと１人あたりの活動量T/Pの関係，γは距離抵抗，hはビルの高さ

図4に，距離抵抗γを与え，収容人口Pを横軸，１人あたりの活動量T/Pを縦軸としてビルの高さごとにかいたグラフを示す．このグラフは図3を整理し直したものである．γが小さいとき，T/Pが大きい（人口が少ない）場合には，ビルの高さhを高くしてもT/Pの差がほとんどなく，また，収容人口もわずかしか増えないので，hを増す効果がほとんどないことがこの図からもわかる．γを大きくして移動を局所的にすると，T/Pが大きい場合にも，hを高くしたとき，PまたはT/Pを増やすことができる．また，もともとT/Pが小さく活動量の少ない場合には，hを高くすると，T/PまたはPを増加させることができる．

図4から，高いビルを使う場合には，活動量を少なくするか距離抵抗γをできるだけ大きくとらないと効率が悪いことが推察される．このことを，ビルの高さがコストを表すものと考え，活動量Tをビルの高さで割った値T/hで効率を表わして，γとPとの関係からみてみよう．図5は，γを与え，Pを横軸，T/hを縦軸としたグラフである．たとえば$\gamma=0.0001$のグラフをみると，収容人口が40000人以下では高さ200m，40000～70000人では高さ400mのビルが，単位高さ当たりの活動量をもっとも大きく実現することが分かる．また，γが異なるグラフを比較することにより，γが大きくなるほど高いビルが優位となることがわかる．

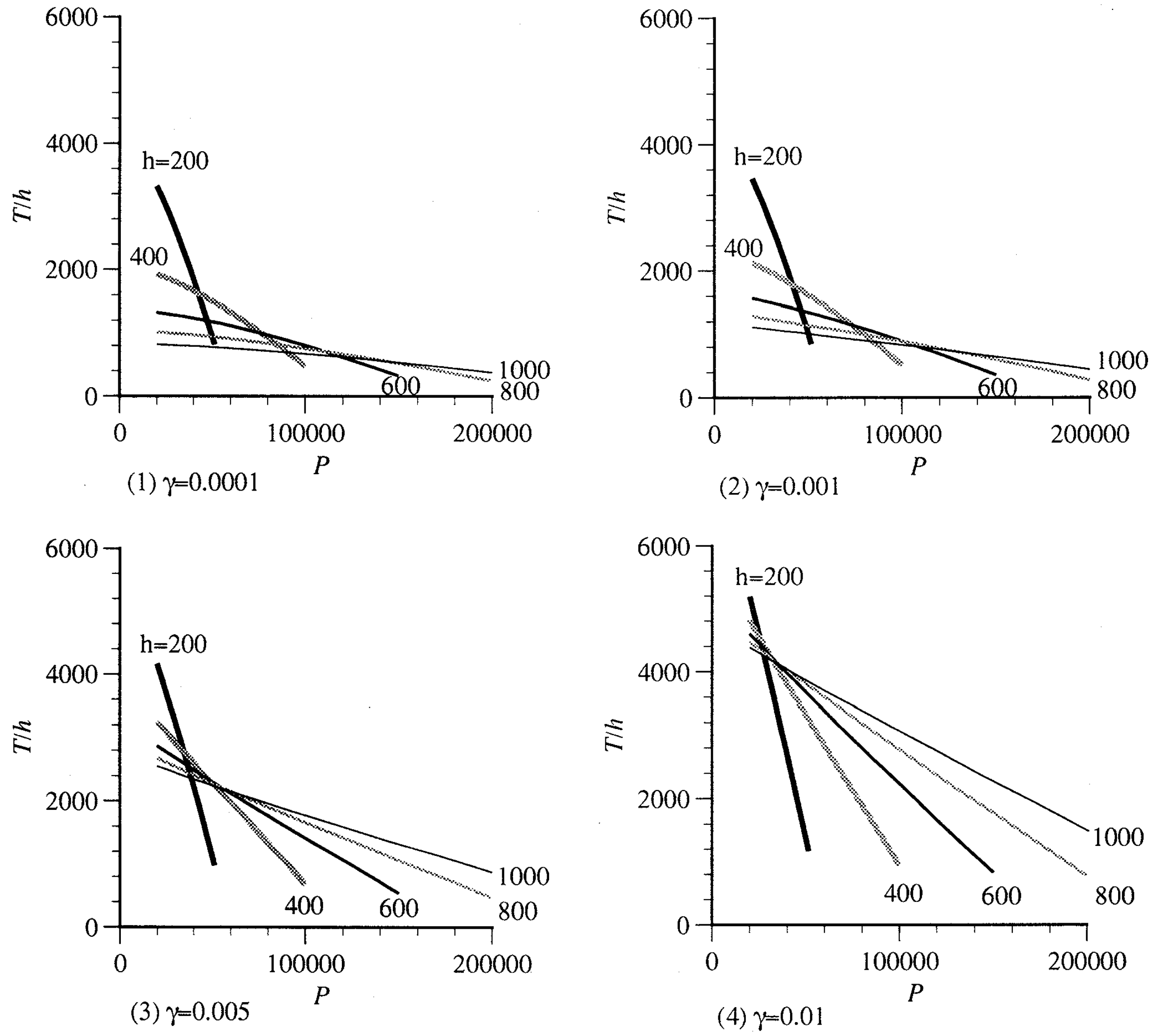

図5 ビル高さあたりの活動量T/hと収容人口Pの関係

4. まとめ

超高層ビルにおける内々交通を対象として,

- ビル内の人の対に対応して相互に行き来する交通が発生する
- 距離の長い移動の割合が短い移動の割合よりも少なくなるような距離抵抗が存在する

と仮定し,円滑な交通に必要なエレベータ通路の面積を求めるモデルを導いた.そして,計算例を検討することによって,ビルの高さと距離抵抗の大きさを操作したときの,ビルの中に収容できる人口と内々交通の量との関係を調べた.その結果,人が多く集まるほど交流が盛んになり1人あたりの行き来する相手の数が増すという“都市型ビル”に対して,ビルをより高層にしてより多くの人や活動を収容することは,距離抵抗を大きくすることによりある程度実現可能であることを示した.また,ビルの収容人口と内々交通の量の2つの尺度からみたときの適切なビルの規模があり得ること,移動をより局所的に制限できるほど高いビルが優位になることを示した.実際的なビルの解析を行なうには,需要を考慮した施設の適切な配置,それらをつなぐ階層

的なエレベータの運転方式といった，かなり個別の条件を取り入れたモデルを構成しなければならない．その際に，ここで述べた数理モデルが重要なツールのひとつとなると考えている．

この研究は文部省科学研究費基盤研究のひとつとして行なったものである．

付録　ビル内の人口分布$L(x)$の近似解の計算方法

方程式(2.4)の近似解の計算方法をのべる．区間$[0,h]$をn個の等間隔の小区間に分割する．小区間の端点を

$$x_i = i\Delta, \quad i = 0,2,\cdots n$$

$$\Delta = \frac{h}{n}$$

と表し，節点とよぶ．そして，各節点において$f_i (i = 1,2,\cdots n-1)$，区間の両端点においてS，となる図6に示すような折れ線関数$\tilde{L}(x)$を考え，$L(x)$を近似する関数とする．$\tilde{L}(x)$は図7に示すような，$[x_{i-1}, x_{i+1}]$の外で0となる山形関数$\varphi_i(x)$ $(i = 0,1,\cdots n)$を使って

$$\tilde{L}(x) = \sum_{i=0}^{n} \varphi_i(x) f_i$$

と表すことができる．上式を式(2.4)の右辺に代入し，

$$F(x) = \int_x^h \rho \sum_j \varphi_j(x_1) f_j \left\{ \int_0^x \rho \sum_i \varphi_i(x_2) f_i \, b \exp(-\gamma |x_1 - x_2|) dx_2 \right\} dx_1$$

$$= \sum_j \int_x^h \rho \varphi_j(x_1) f_j \left\{ \sum_i \int_0^x \rho \varphi_i(x_2) f_i \, b \exp(\gamma x_2) dx_2 \right\} \exp(-\gamma x_1) \, dx_1$$

のように変形する．実際の積分計算は$\varphi_i(x)$が0でない小区間ごとに分けて行うことができる．

もとの方程式(2.4)は区間$[0,h]$全域で成り立つ式であるが，近似関数$\tilde{L}(x)$の自由度$n-1$に合わせて，

$$c(S - \tilde{L}(i\Delta)) = F(i\Delta), \quad i = 1,2,\cdots n-1$$

のように，各節点で成り立つとした連立方程式に置き換える．左辺は$c(S - f_i)$，右辺はf_iに関する２次式である．たとえばf_iの初期値を$0.5S$として，ニュートン法を使うことにより，100節点程度の方程式に対して20回以内の反復で単精度の解を得ることが出来る．

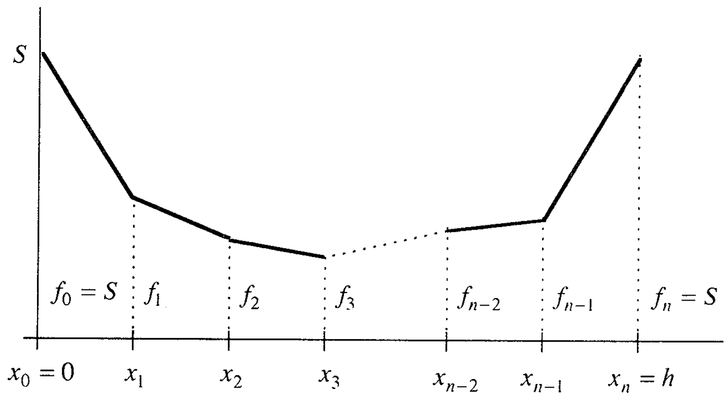

図6　$L(x)$を近似する折れ線関数$\tilde{L}(x)$

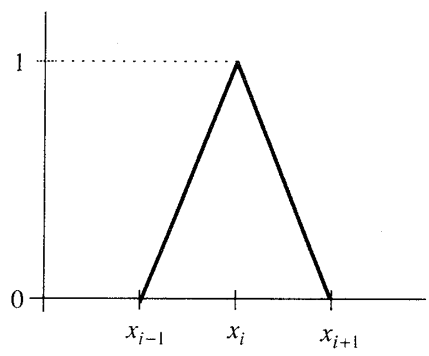

図7　補間関数$\varphi_i(x)$

参考文献

[1] 奥平耕造：都市工学読本．彰国社，1976．

[2] 谷村秀彦，梶　秀樹，池田三郎，腰塚武志：都市計画数理．朝倉書店，1986．

[3] 腰塚武志：都市域の流動に関する理論的考察．日本都市計画学会学術研究論文集，27，343-348，1992．

[4] 秋澤　淳，茅　陽一：混雑度一定の都市モデルに基づく総トリップ長を最小化する土地利用構造．T.IEE Japan, 115-C, 1072-1078, 1995.

[5] 李　明哲，伏見正則：錐台型ビルにおける通勤用通路面積．日本OR学会秋季大会アブストラクト集，64-65，1995．

[6] 田口　東：超々高層ビルにおける内々交通とエレベータ面積．*Journal of the Operations Research Society of Japan*，37, 232-242, 1994.

[7] 田口　東：都市空間の道路と住居への配分．*Journal of the Operations Research Society of Japan*，38, 398-408, 1995.

田口　東：112　文京区春日1-13-27
中央大学　理工学部　情報工学科
E-mail　taguchi@ise.chuo-u.ac.jp

ABSTRACT

URBAN TRAFFIC DISTRIBUTION AND ELEVATOR CAPACITY IN SUPER HIGH BUILDINGS

Azuma Taguchi
Chuo University

In recent years, very high buildings have been extensively constructed to utilize the narrow urban grand space. Most of those buildings are used for offices, and some for hotels or hospitals. But, there are some plans to build a super high building to form a "compact city" which brings residence, office, and some urban facilities close together. It is expected that the people in the building can satisfy their daily needs at hand so that the amount of traffic should be reduced. In this "city type" building, the trips occur for a variety of reasons, for example, employment, school, shopping etc., which are of different types compared to those in traditional buildings.

In this paper, we will discuss those traffic problems in the city type buildings. When we consider the traffic problem in a high building, the major difficulty appears in the vertical movement. Insufficient elevator area causes the complaint of the passengers for long waiting time, on the other hand, wide elevator area causes the dissatisfaction of the owner of the building having small area left for rent. For simplicity, we assume that the rest of the floor area not used for elevator are all used for residence, where people distribute uniformly. And, as for the traffic distribution, we adopt the "gravity model" in the theory of urban transportation distribution theory, in other words, a trip occurs by the interaction of a pair of people in the building, and the trip occurrence probability for the pair is equal to a constant multiplied by the deterrence factor. The deterrence factor is based on the distance between the origin and destination.

We derive the equation to determine the elevator area distribution in the following way. The transportation capacity c per unit area of elevator passage is assumed to be constant irrespective of the building height. The number of trips passing through a floor is the sum of the trip occurrence probabilities for such pairs that one located above the floor and the other located below. The product of the capacity c and the elevator area on the floor should be equal to this amount. The equation is derived from the condition that this relation should be satisfied at each floor in the building.

When the size of the building and the deterrences factor are given, the equation can be solved numerically to obtain the elevator area distribution. We solve the equations for several cases and consider the relation between the population P in the building and the number of trips T travelling through the elevator area. When the deterrence factor is small and the number of trips per person is at a high level, then population P or amount of trips per person T/P can be raised only at a very slow rate by enlarging the height of the building. If one expects to get substantial gain in T/P or P by constructing a higher building, the deterrence factor should be made large by carefully designing the facility layout in the building. We also draw the graphs which show the suitable population size and amount of trips for the building of each height.