

都市高層ビルの内部交通解析

李 明哲 伏見正則
東京大学

(受理 1996 年 10 月 22 日 ; 再受理 1997 年 3 月 10 日)

和文概要 東京や北京、上海などの大都市では、高額な地価などの原因により、大量の高層ビルが建てられており、これから増えて行くことが予想される。これらのビルの内部では、都市機能を果たすため、さまざまな交通が発生している。都市工学において、高層ビルの内部交通解析は無視できず、円滑に人を移動させるために必要となる通路の設計、高層ビル建設などにも影響があり、非常に大切な意味を持つ。そこで本論文ではビル内交通問題に関する今までの研究をもとにして、若干拡張したモデルを提案する。具体的には、ビルの形は直方型(円柱型)から錘台型に拡張し、交通の種類に関しては、通勤交通に加えて、内部の人同士が行き来するための交通あるいは人が施設を訪問するための交通が併存する場合を考える。提案したモデルをもとにした数値解析も行なう。

1. はじめに

ビル内交通問題は、円滑に人を移動させるために必要となる通路の設計、ビル建設などに影響があり、最近では、東京や北京、上海などの大都市で限られた土地をより有効に利用するため、高層ビルの数がますます増えるとともに、これに関する研究も広くなされるようになっていく。このなかでも特に縦方向の内部交通解析に重点が置かれている。これは、ビルのなかでは水平移動は徒歩によって比較的容易にでき、通常平面解析、例えば、田口 [3] のように行なうことができるが、垂直移動は交通手段としてエレベータに頼らざるを得ないので、ビル特有の空間解析によって行なわなければならないためである。本文でもエレベータによる縦方向の内部交通だけを考えることにする。したがって、以下ではエレベータ用通路のことを単に「通路」と言うことにする。

一般的に、高層ビルの内部交通は2種類に分けられる。1種類は高層ビルの内部と外部の間で発生している交通、いわゆる内外交通であり、もう1種類は高層ビルの内部で発生している交通、いわゆる内内交通である。内外交通解析の1例として、奥平 [2] による定式化がある。エレベータの利用率がもっとも高い通勤時間帯を考慮したこの定式化では、直方型(円柱型)ビルにおける居住部分と通路部分の配分を理論的に与えた。内内交通解析の1例として、田口 [4] による定式化がある。ビル内部の人同士の往来によって生ずる交通(人人交通)を考慮したこの定式化では、直方型(円柱型)ビルにおける居住部分と通路部分の配分を理論および数値的手法を結合した方法で与えた。

高層ビルの内部交通の種類に関して、上で述べたふたつのモデルはそれぞれ1種類の内部交通だけを考慮した定式化である。例えば、奥平モデルは通勤時間帯におけるオフィスビルを対象にしていると考えるのが適当であり、田口モデルは休日における居住専用ビル(いわゆるマンション)などに適用するのが適当である。しかし、実際の高層ビルにおいては、多種類の内部交通が同時に発生しているのが普通である。例えば、内内交通においては、人同士が行き

来するための交通だけではなく、人が施設を訪ねるための交通も存在しているのが現実である。一方、高層ビルの形状に関して、上で述べたふたつのモデルは直方型(円柱型)ビルに限られている。しかし、最近では直方型(円柱型)以外に錐台型などの形状のビルも目につくようになってきている。

このような現状を踏まえ、高層ビルの内部交通の種類および形状に対する拡張の重要性と必要性を背景に、本文ではひとつの内外交通とそれぞれひとつの内内交通を結合した、2種類の内部交通による錐台型高層ビルの居住部分と通路部分の配分に関する定式化を行なった。具体的に言えば、内外交通としては奥平[2]による通勤交通、内内交通としては田口[4]によるビル内の人同士の交流による交通および、本文で提案するビル内の人間がビル内の施設を訪ねるための交通を考慮した定式化を行なった。実際のビルの設計のほとんどが内外交通を想定したこと、ビルの内部でもっともよく考えられるのが内内交通であることから、このふたつのモデルは理論的に都市高層ビルの内部交通状況の定量的分析に利用できるような一般性を持つと思われる。以上の定式化は錐台型ビルについて行なったが、現存する都市高層ビルにおいては、直方型(円柱型)の形状を持つものももっとも多いことから、本文ではまた、直方型(円柱型)モデルの通路面積を理論的に与えた。そして、それぞれの計算例を通じ、直方型(円柱型)、さらに錐台型高層ビルにおける内部交通状況を数値的に解析した。

2. 通勤交通と人人交通における居住部分と通路部分の配分

2.1 通路面積に関する定式化

図1のような下底面積が S 、上底面積が αS ($0 \leq \alpha \leq 1$)、高さが h である錐台型ビルを考える。このモデルで、 x を地上から測ったビル内の任意の点の高さ、 $S(x) = S[1 + \frac{x}{h}(\sqrt{\alpha} - 1)]^2$ を x における建築面積、 $L(x)$ を x における居住面積、 $S(x) - L(x)$ を x における通路面積とする。ここで考えているのは連続モデルなので、人も各階ではなくて、居住部分に体積密度 ρ で連続的に分布しているものとする。ここで述べるモデルは、オフィスビル、居住専用ビル、オフィスと住居の混在ビルのいずれにも適用可能なものであるが、以下では説明を簡単にするために、居住専用ビルにおける朝の出勤時間帯を想定する。出勤する人はこの間に1回エレベータで移動するものとする。また、この時間帯内に輸送できるエレベータ通路単位面積

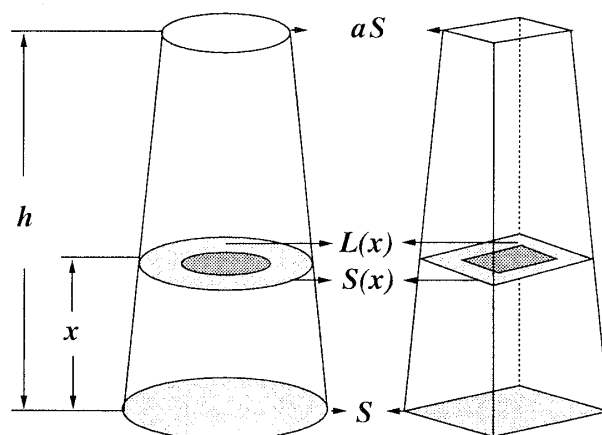


図1 錐台型高層ビルモデル。 $S(x)$ は建築面積 (淡影部+濃影部), $L(x)$ は居住面積 (淡影部).

あたりの人数を c とする. 高度 x のところに居住する人のうちで出勤しない人の割合を $\beta(x)$ とする. 出勤しない人の間でもエレベータを利用する行き来があるが, これについては田口 [4] にならって, 各人が出勤しない人のうちの一定の割合 (γ) の人と行き来するものと仮定する. (そうでないモデルについては, 別の機会に論ずる予定である.) 通勤交通と人人交通に関する仮定の詳細については奥平 [2], 田口 [4] を参照していただきたい.

さて, 通勤交通を行なう人に注目すると, 高さ x の断面を通過する人数は x よりも上に住んでいる人であるから,

$$(2.1.1) \quad \rho \int_x^h [1 - \beta(\tau)] L(\tau) d\tau \quad (0 \leq x \leq h)$$

となる.

また, 通勤交通を行なわない人に注目すると, 高さ x の断面を通過する交通量は x よりも上に住んでいる人と下に住んでいる人との行き来によるものであるから,

$$(2.1.2) \quad \gamma \rho^2 \int_x^h \beta(\tau) L(\tau) d\tau \int_0^x \beta(\tau) L(\tau) d\tau \quad (0 \leq x \leq h)$$

となる.

一方, 高さ x の断面を通るエレベータの輸送能力は

$$(2.1.3) \quad c[S(x) - L(x)] \quad (0 \leq x \leq h)$$

で表される.

よって, 輸送力の限界においては, 式 (2.1.1) と式 (2.1.2) を合せたものが式 (2.1.3) に等しく, 通勤交通と人人交通による居住面積と通路面積を定める積分方程式

$$(2.1.4) \quad c[S(x) - L(x)] = \gamma \rho^2 \int_x^h \beta(\tau) L(\tau) d\tau \int_0^x \beta(\tau) L(\tau) d\tau + \rho \int_x^h [1 - \beta(\tau)] L(\tau) d\tau \quad (0 \leq x \leq h)$$

が成り立つ. ただし, ビルの上端では通路が必要ないので, 境界条件を $L(h) = \alpha S$ とする.

上の通路面積の定式化 (2.1.4) を解析的に解くことは難しく, 積分方程式に対する数値解法, 例えば, 折れ線近似法, 逐次近似法などを用いてその近似解を求めなければならない.

これから, パラメータ $\alpha = 1$, $\beta(x) = \beta$ の場合, すなわち, 図 2 のような直方型 (円柱型)

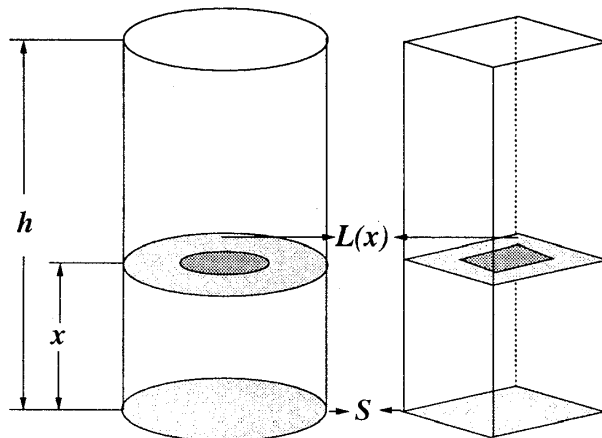


図 2 直方型 (円柱型) 高層ビルモデル. S は建築面積, $L(x)$ は居住面積 (淡影部).

モデルにおける式(2.1.4)の積分方程式を考える.

i) $\gamma\beta = 0$ の場合

変数分離形である式(2.1.4)を

$$(2.1.5) \quad \frac{dL}{dx} = \frac{(1-\beta)\rho}{c}L \quad (0 \leq x \leq h)$$

のように整理し, 境界条件 $L(h) = S$ を使って解けば

$$(2.1.6) \quad L(x) = S \exp\left[\frac{(1-\beta)\rho}{c}(x-h)\right] \quad (0 \leq x \leq h)$$

が求められる.

ii) $\gamma\beta \neq 0$ の場合

まず, ビルの高さ x 以下の有効容積

$$(2.1.7) \quad V(x) = \int_0^x L(\tau)d\tau \quad (0 \leq x \leq h)$$

を従属変数とし, ビルの有効容積

$$(2.1.8) \quad V_h = \int_0^h L(\tau)d\tau$$

を新しいパラメータとすると, $V(x)$ に関する常微分方程式

$$(2.1.9) \quad c\left(S - \frac{dV}{dx}\right) = (1-\beta)\rho(V_h - V) + \gamma\beta^2\rho^2(V_h - V)V \quad (0 \leq x \leq h)$$

を導くことができる. ここで, 境界条件は $V(0) = 0$ である.

次には, 変数分離形である式(2.1.9)を

$$(2.1.10) \quad \frac{dV}{dx} = K[(V-A)^2 + B^2] \quad (0 \leq x \leq h)$$

のように整理し, 境界条件 $V(0) = 0$ を使って解けば

$$(2.1.11) \quad V(x) = A + B \tan\left(KBx - \arctan \frac{A}{B}\right) \quad (0 \leq x \leq h)$$

が与えられる. ただし, $K = \frac{\gamma\beta^2\rho^2}{c}$, $A = \frac{1}{2}\left(V_h - \frac{1-\beta}{\gamma\beta^2\rho}\right)$, $B = \sqrt{\frac{S}{K} - \left[\frac{1}{2}\left(V_h + \frac{1-\beta}{\gamma\beta^2\rho}\right)\right]^2}$.

そして, $V(x)$ を x に関して微分し

$$(2.1.12) \quad L(x) = KB^2 \cos^{-2}\left(KBx - \arctan \frac{A}{B}\right) \quad (0 \leq x \leq h)$$

を得る.

最後は, 境界条件 $L(h) = S$ を利用し, 方程式

$$(2.1.13) \quad V_h = \sqrt{\frac{S}{K}} \sin\left(KBh - \arctan \frac{A}{B}\right) + A$$

を導出することによって V_h を計算し, さらに $L(x)$ を求める. 式(2.1.13)で A , B は V_h の関数であるから, V_h を解析的に求めることは難しく, 非線形方程式に対する数値解法, 例えば, ニュートン法などを用いて V_h の近似値を求めなければならない.

明らかに, $\beta = 0$ のとき, 式(2.1.6)は奥平モデルによる結果となり, $\beta = 1$ のとき, 式(2.1.11), 式(2.1.12)と式(2.1.13)は田口モデルによる結果となる.

2.2 直方型(円柱型)高層ビルにおける数値計算

本節では直方型(円柱型)高層ビルに関し, パラメータを実際に与えたうえ, 逐次近似法を用いて前節で導いたモデルの数値解析を行なう.

まず、各パラメータを次のように定める。密度 ρ は奥平 [2] で使われている標準的なオフィス値を用いる。すなわち、1人あたりの専有床面積を 8m^2 、1階あたりの高さを 4m とし、 $\rho = 0.03 \text{人}/\text{m}^3$ とする。エレベータの単位面積あたりの輸送量 c の算定は難しい問題であるが、ここでは奥平 [2] が推定した値を借用する。すなわち、奥平モデルから得られた通路面積と有効面積の関係

$$(2.2.1) \quad c[S - L(0)] = \rho \int_0^h L(\tau) d\tau$$

に、実際に建設された日本の高層ビルのデータを当てはめて導かれたものとして、1時間あたり $c = 35 \text{人}/\text{m}^2$ とする。パラメータ γ は田口 [4] が使用した値を用いる。これは、各人が自分と異なる階にいる人と10万人に1人の割合で行き来するとして、 $\gamma = 10^{-5}$ とする。

次に、 $h = 250\text{m}$ 、 500m 、 $S = 100^2\text{m}^2$ 、 150^2m^2 、 200^2m^2 、 $\beta = 0.0$ 、 0.5 、 1.0 の各組合せについて、直方型 (円柱型) 高層ビルにおける式 (2.1.4) に対応する反復式

$$(2.2.2) \quad L_{n+1}(x) = S - \frac{\gamma \rho^2 \beta^2}{c} \int_x^h L_n(\tau) d\tau \int_0^x L_n(\tau) d\tau - \frac{\rho(1-\beta)}{c} \int_x^h L_n(\tau) d\tau \quad (0 \leq x \leq h) \\ n = 0, 1, 2, \dots$$

を考える。バナッハの不動点定理 [1] により、 n が大きくなると、 $L_n(x)$ が $L(x)$ の良い近似式になる。この計算で、逐次近似法による初期値 $L_0(x)$ としては $S(x)$ を用い、反復回数を8とした。

結局、図3のような直方型 (円柱型) 高層ビルにおける、通勤交通と人人交通による通路面積の解析図および、図4、図5のような $h = 250\text{m}$ 、 500m の直方型 (円柱型) ビルに関し、それぞれの S と β から定められた x における居住面積の割合分布図が得られた。

図4、図5の解析結果からわかるように、通勤交通の発生率が小さくなる (すなわち、 β が大きくなる) にしたがって、居住面積割合の最小位置は地面からビルの高さの半分の所に向けて移動し、エレベータ用通路面積の底面積による影響も著しくなる。(底面積が大きいほど、居住面積の割合が小さくなる)。

2.3 錐台型高層ビルにおける数値計算

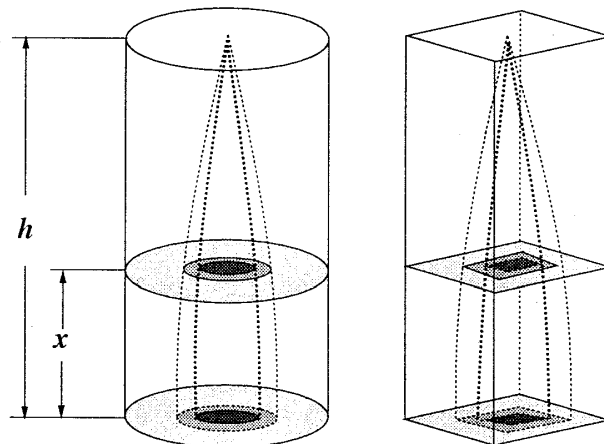
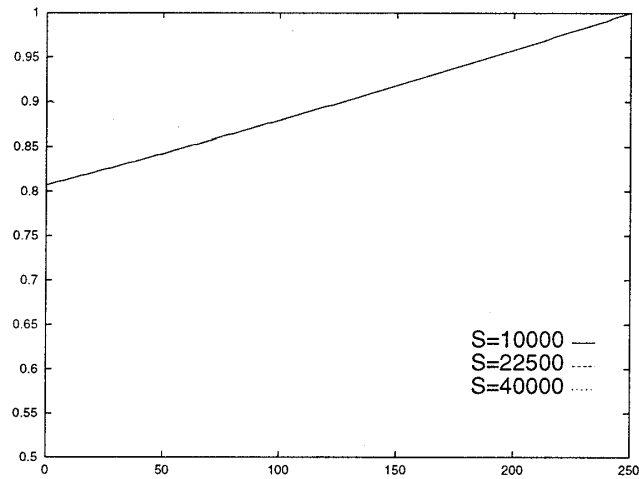
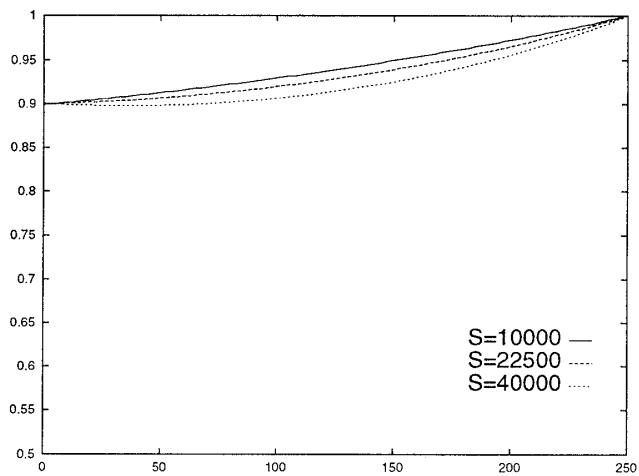


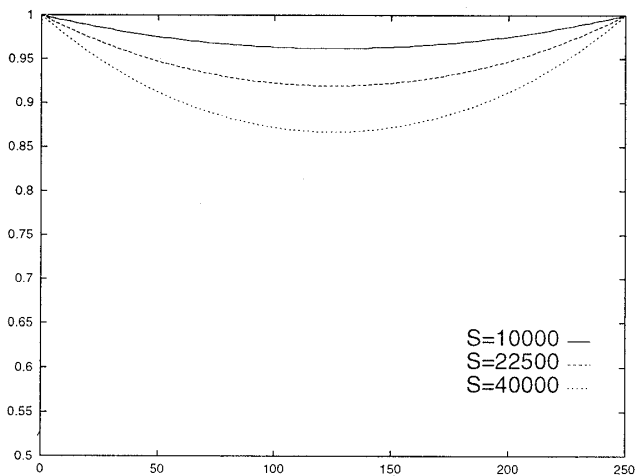
図3 通勤交通と人人交通における直方型 (円柱型) 高層ビルの通路面積解析。通路面積のうち、内側は通勤交通に必要な面積、外側は人人交通に必要な面積。



$$\alpha = 1.0, \beta = 0.0$$

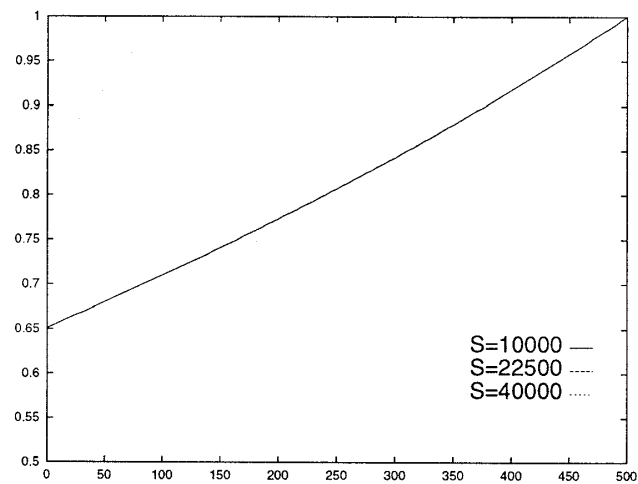


$$\alpha = 1.0, \beta = 0.5$$

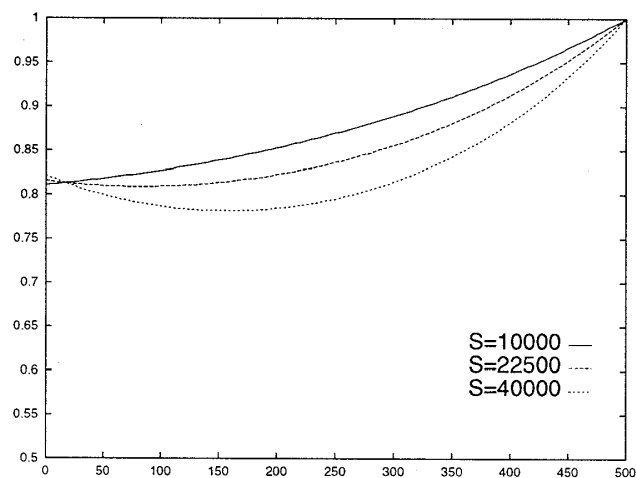


$$\alpha = 1.0, \beta = 1.0$$

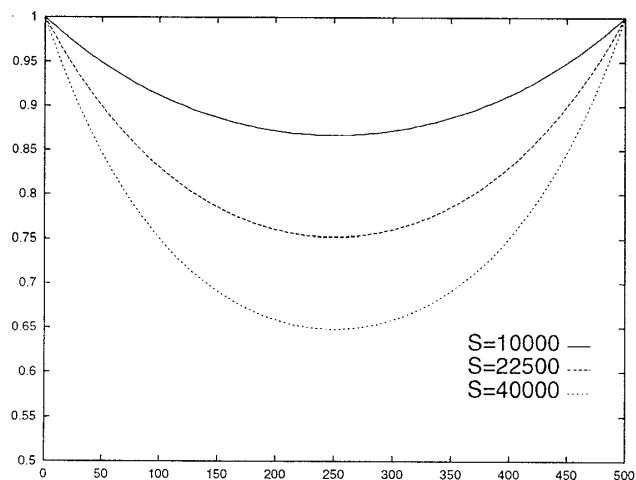
図4 $h = 250\text{m}$ の場合，通勤交通と人人交通における直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\beta = 0.0$ の場合には，グラフの形状は S によらず一定である．）



$$\alpha = 1.0, \beta = 0.0$$



$$\alpha = 1.0, \beta = 0.5$$



$$\alpha = 1.0, \beta = 1.0$$

図5 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と人人交通における直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\beta = 0.0$ の場合には，グラフの形状は S によらず一定である．）

本節では錐台型高層ビルに関し、パラメータを実際に与えたうえ、前節で述べた逐次近似法を用いて2.1節で定式化したモデルの数値計算を行なう。ここで、各パラメータは前節と同じ値を取る。

結局、図6のような錐台型高層ビルにおける、通勤交通と人人交通による通路面積の解析図および、図7のような $\alpha = 0.5$ 、 $h = 500\text{m}$ の錐台型ビルに関し、それぞれの S と β から定められた x における居住面積の割合分布図が得られた。(図を減らすため、 $\alpha = 0.5$ 、 $h = 500\text{m}$ の数値計算結果だけを挙げ、ほかの場合は省略した。)

図5と図7の比較結果からわかるように、通勤交通の発生率が小さくなるにしたがい、居住面積割合の最小位置は地面からビルの高さの半分の所に向けて移動する一方、直方型(円柱型)ビルにおいてはちょうど半分の所まで行くが、錐台型ビルにおいては半分の所まで行かない。

3. 通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の居住部分と通路部分の配分

3.1 通路面積に関する定式化

2.1節と同じような錐台型高層ビルを考える。ただし、通勤交通を行なわない人に関して、本節ではある人が他の各人で行き来するかわりに、ある人が地上から $x_0(0 \leq x_0 \leq h)$ のところに配置された施設に行く場合を考え、その確率を γ' とする。

$L(x)$ を、 $x_0 \leq x \leq h$ では $L_1(x)$ 、 $0 \leq x \leq x_0$ では $L_2(x)$ と書くことにすると、前と同様に、 $x_0 \leq x \leq h$ における、通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の居住面積と通路面積を定める積分方程式

$$(3.1.1) \quad c[S(x) - L_1(x)] = \rho \int_x^h [1 - \beta(\tau)] L_1(\tau) d\tau + \gamma' \rho \int_x^h \beta(\tau) L_1(\tau) d\tau \quad (x_0 \leq x \leq h)$$

および、 $0 \leq x \leq x_0$ における積分方程式

$$(3.1.2) \quad c[S(x) - L_2(x)] = \rho \int_{x_0}^h [1 - \beta(\tau)] L_1(\tau) d\tau + \rho \int_x^{x_0} [1 - \beta(\tau)] L_2(\tau) d\tau + \gamma' \rho \int_0^x \beta(\tau) L_2(\tau) d\tau \quad (0 \leq x \leq x_0)$$

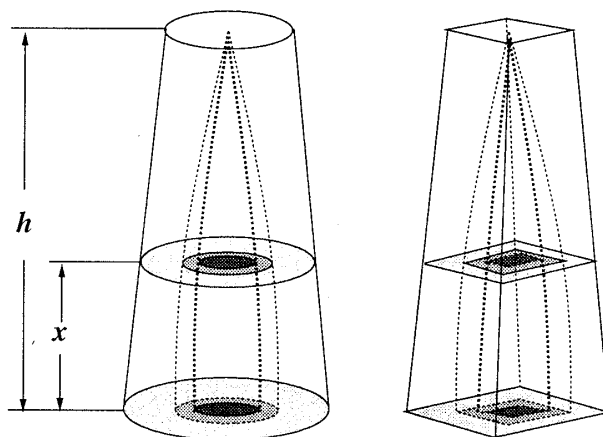
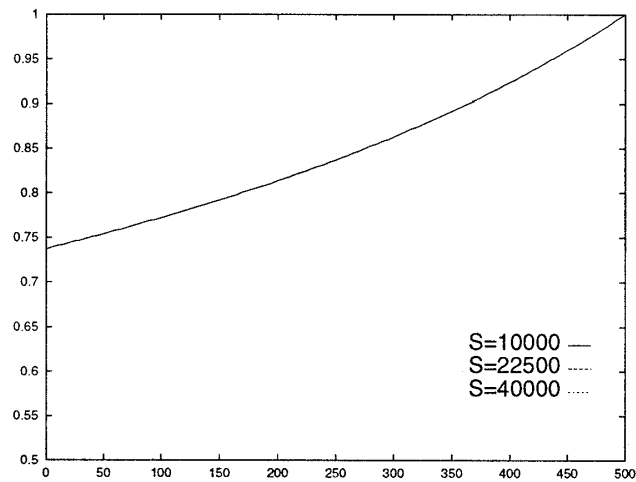
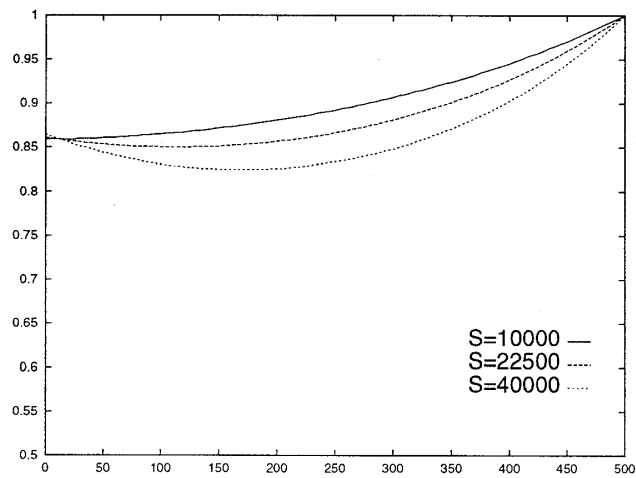


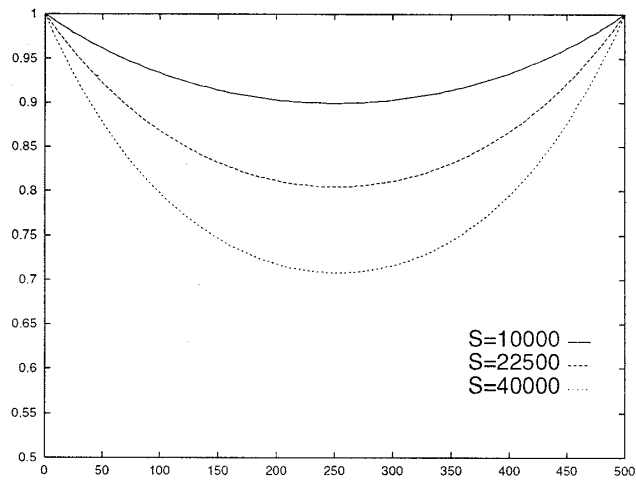
図6 通勤交通と人人交通における錐台型高層ビルの通路面積解析。通路面積のうち、内側は通勤交通に必要な面積、外側は人人交通に必要な面積。



$$\alpha = 0.5, \beta = 0.0$$



$$\alpha = 0.5, \beta = 0.5$$



$$\alpha = 0.5, \beta = 1.0$$

図7 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と人人交通における錐台型高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S(x)$ は居住面積の割合．($\beta = 0.0$ の場合には，グラフの形状は S によらず一定である.)

を導くことができる。ここでも、ビルの上端では通路が必要ないことから、境界条件を $L_1(h) = \alpha S$ とする。

上の通路面積の定式化を解析的に解くことも一般には困難であり、積分方程式における数値解法、例えば、折れ線近似法、逐次近似法などを用いてその近似値を求めなければならない。ただし、特別な場合、例えば、パラメータ $\alpha = 1, \beta(x) = \beta$ の場合、すなわち、図2のような直方型(円柱型)モデルにおいては、式(3.1.1)と式(3.1.2)の解を以下のようにして解析的に求めることができる。

この場合、1番目の積分方程式を境界条件 $L_1(h) = S$ のもとに解くことができ、解は

$$(3.1.3) \quad L_1(x) = SF_1(x) \quad (x_0 \leq x \leq h)$$

となる。ここで、 $F_1(x) = \exp\left[\frac{(m+n)}{k}(x-h)\right]$ 。ただし、 $k = \frac{\varepsilon}{\rho}$ 、 $m = 1 - \beta$ 、 $n = \gamma/\beta$ である。

それから、2番目の積分方程式を $L_2(0) = S - \frac{m}{k} \int_{x_0}^h L_1(\tau) d\tau - \frac{m}{k} \int_0^{x_0} L_2(\tau) d\tau$ という境界条件のもとに解くことができる。 $L_2(0)$ は陽的に与えられていないので、まず $L_2(0)$ を求める。そのため、2番目の積分方程式の解を $L_2(x) = L_2(0)F_2(x)$ のように定める。ここで、 $F_2(x) = \exp\left[\frac{(m-n)}{k}x\right]$ 。そして、これを境界条件に代入し、 $L_2(0)$ に関する方程式を与える。解は

i) $m = n$ の場合

$$(3.1.4) \quad L_2(0) = \frac{k[mF_1(x_0) + n]}{(k + mx_0)(m + n)} S$$

ii) $m \neq n$ の場合

$$(3.1.5) \quad L_2(0) = \frac{(m-n)[mF_1(x_0) + n]}{[mF_2(x_0) - n](m+n)} S$$

となる。

最後は、 $L_2(0)$ から

i) $m = n$ の場合

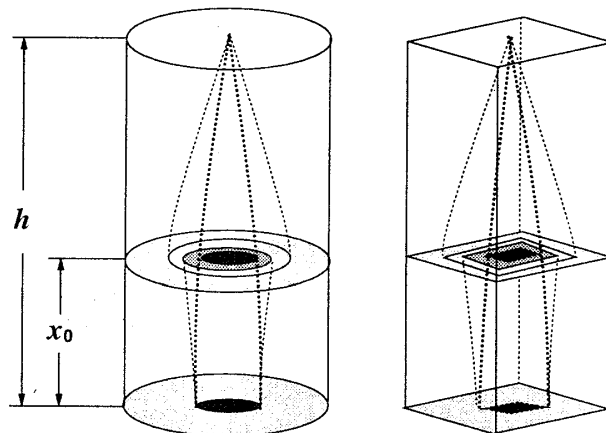
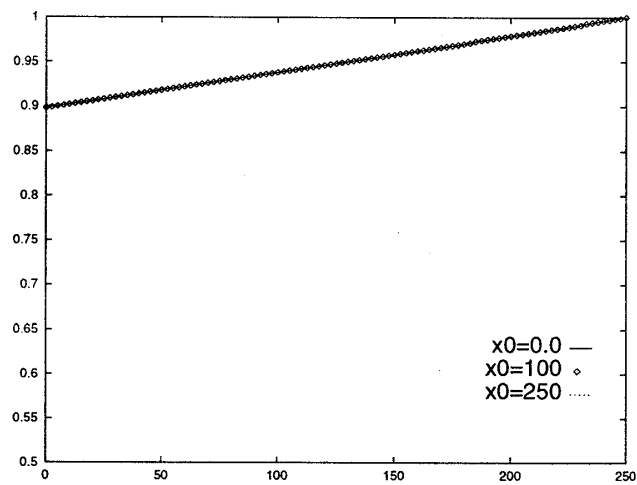
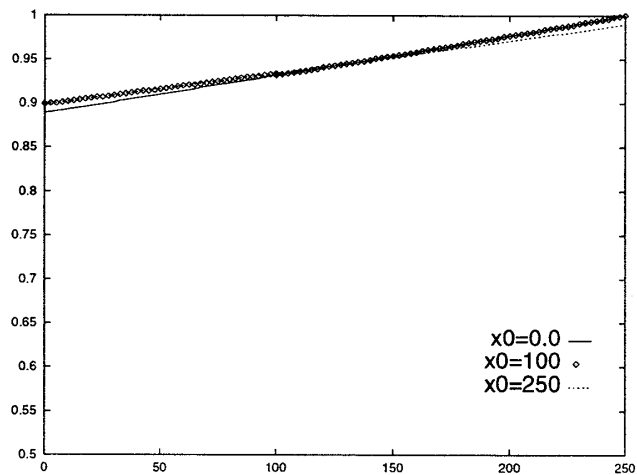


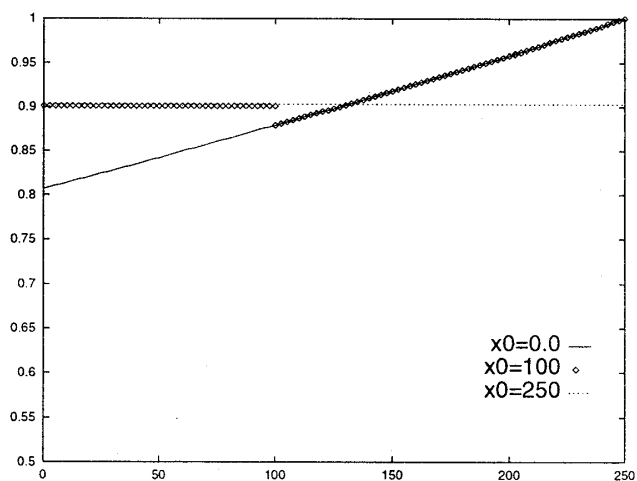
図8 通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の直方型(円柱型)高層ビルの通路面積解析。通路面積のうち、一番内側は通勤交通に必要な面積、それより外側は施設訪問による交通に必要な面積。($x = x_0$ で不連続となる。)



$$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 0.0$$

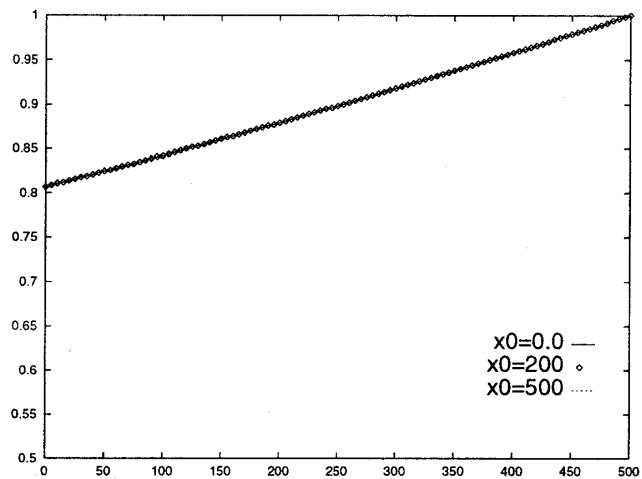


$$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 0.1$$

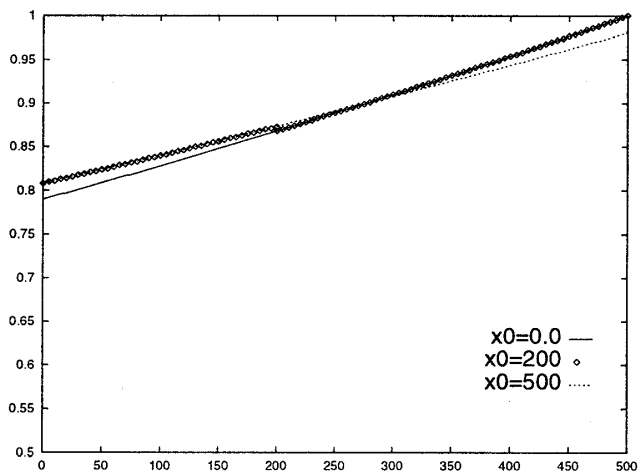


$$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 1.0$$

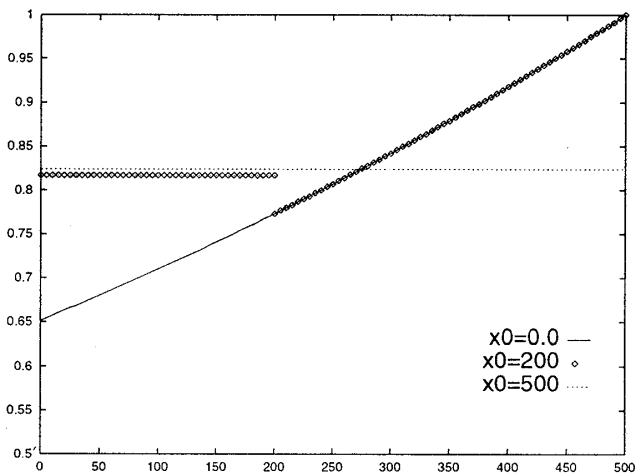
図9 $h = 250\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\gamma' = 0.0$ の場合には，グラフの形状は x_0 によらず一定である．）



$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 0.0$

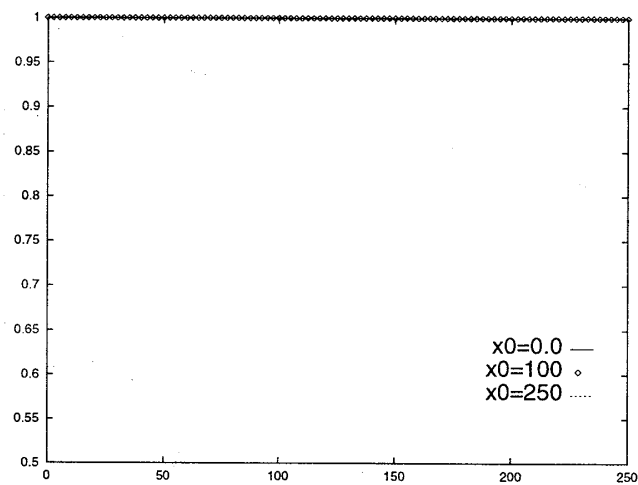


$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 0.1$

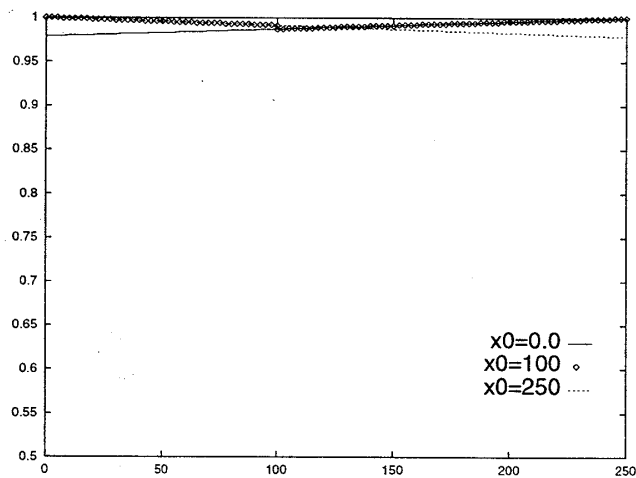


$\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma' = 1.0$

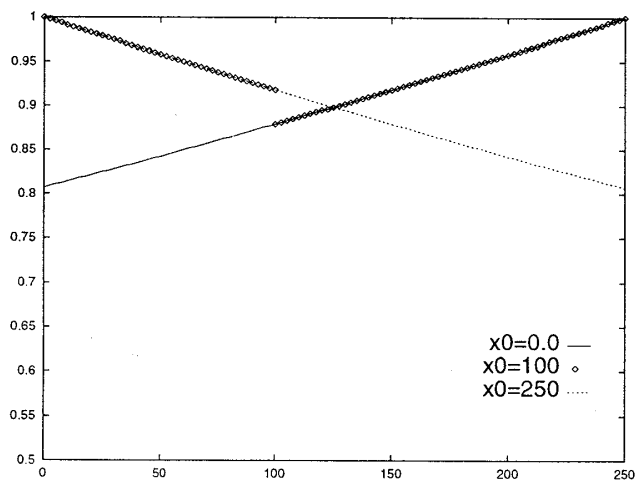
図10 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\gamma' = 0.0$ の場合には，グラフの形状は x_0 によらず一定である．）



$$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 0.0$$

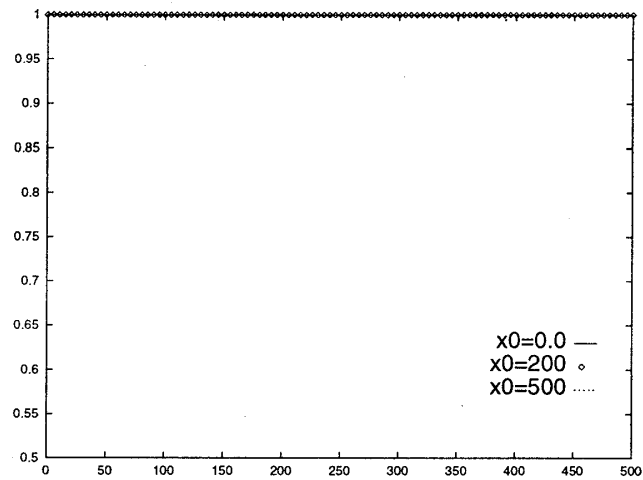


$$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 0.1$$

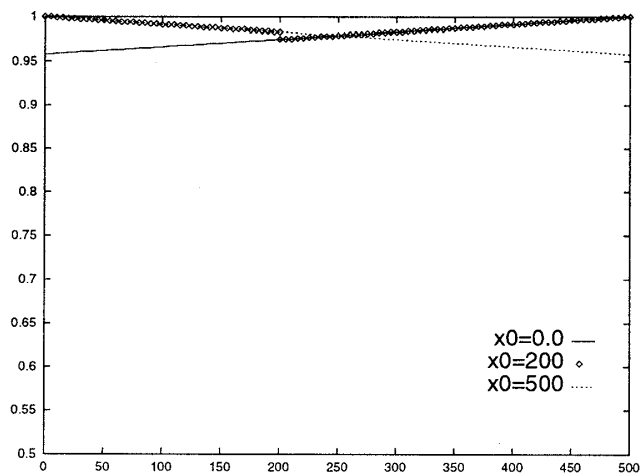


$$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 1.0$$

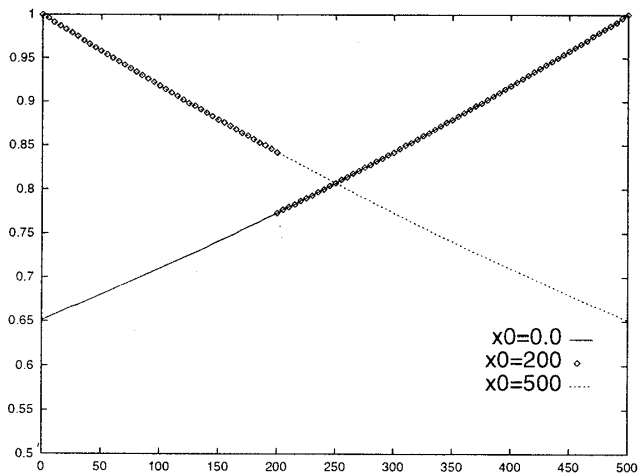
図11 $h = 250\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\gamma' = 0.0$ の場合には，任意の x に対して $L(x)/S = 1.$ ）



$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 0.0$



$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 0.1$



$\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma' = 1.0$

図12 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの直方型（円柱型）高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S$ は居住面積の割合．（ $\gamma' = 0.0$ の場合には，任意の x に対して $L(x)/S = 1.$ ）

$$(3.1.6) \quad L_2(x) = \frac{k[mF_1(x_0) + n]}{(k + mx_0)(m + n)} S \quad (0 \leq x \leq x_0)$$

ii) $m \neq n$ の場合

$$(3.1.7) \quad L_2(x) = \frac{(m - n)[mF_1(x_0) + n]}{[mF_2(x_0) - n](m + n)} SF_2(x) \quad (0 \leq x \leq x_0)$$

を得る.

明らかに, $\beta = 0$ のとき, 式 (3.1.3) と式 (3.1.7) は奥平モデルによる結果となる.

3.2 直方型 (円柱型) 高層ビルにおける数値計算

本節では直方型 (円柱型) 高層ビルに関し, パラメータを実際に与えたうえ, 前節で導いた式 (3.1.3) および, 式 (3.1.6), 式 (3.1.7) を用いて数値解析を行なう. ここで, 各パラメータは 2.2 節と同じ値を取る.

結局, 図 8 のような直方型 (円柱型) 高層ビルにおける, 通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の通路面積の解析図および, 図 9, 図 10, 図 11, 図 12 のような $h = 250\text{m}$, 500m の直方型 (円柱型) ビルに関し, それぞれの β , γ' と x_0 から定められた x における居住面積の割合分布図が得られた.

図 9, 図 10, 図 11, 図 12 の解析結果からわかるように, 施設が配置されたところより高層部では, 低いところ (すなわち, 施設に近いところ) ほどエレベータ用通路面積の占める割合が大きい. また, ある人が施設に行く確率が大きくなるにしたがい, あるいは通勤交通の発生率が小さくなる (すなわち, β が大きくなる) にしたがって, 通路面積に対する施設の位置の影響が著しくなる. 一方, ある人が施設に行く確率, 通勤交通の発生率が大きくなるにしたがい, 居住面積の割合が小さくなる.

3.3 錐台型高層ビルにおける数値計算

本節では錐台型高層ビルに関し, パラメータを実際に与えたうえ, 2.1 節で述べた逐次近似法を用いて 3.1 節で定式化したモデルの数値計算を行なう. ここで, 各パラメータは前節と

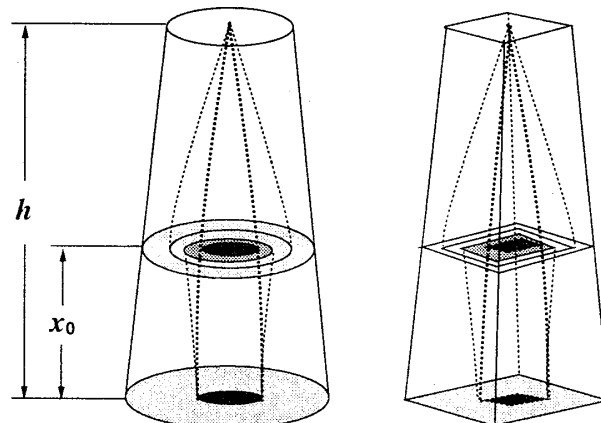
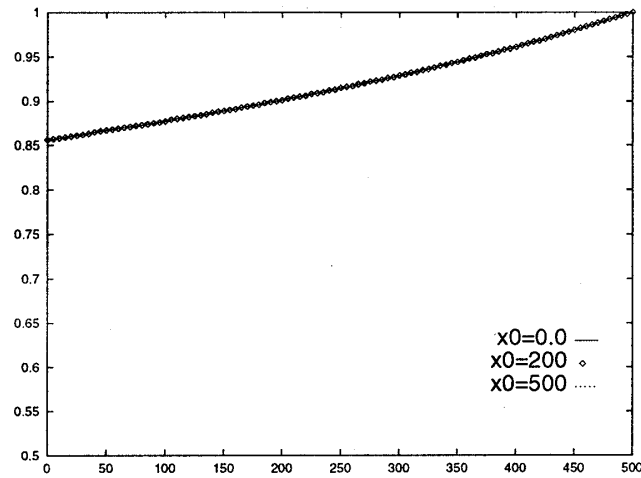
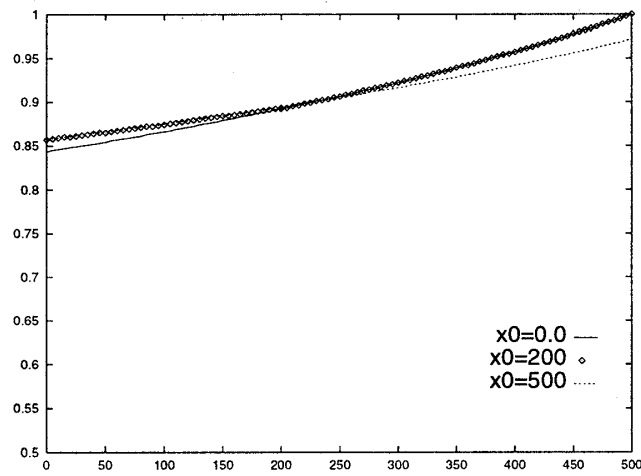


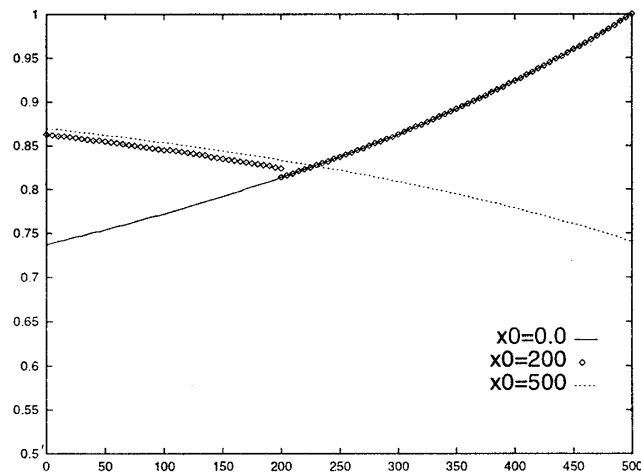
図 13 通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の錐台型高層ビルの通路面積解析. 通路面積のうち, 一番内側は通勤交通に必要な面積, それより外側は施設訪問による交通に必要な面積. ($x = x_0$ で不連続となる.)



$$\alpha = 0.5, \beta = 0.5, \gamma' = 0.0$$

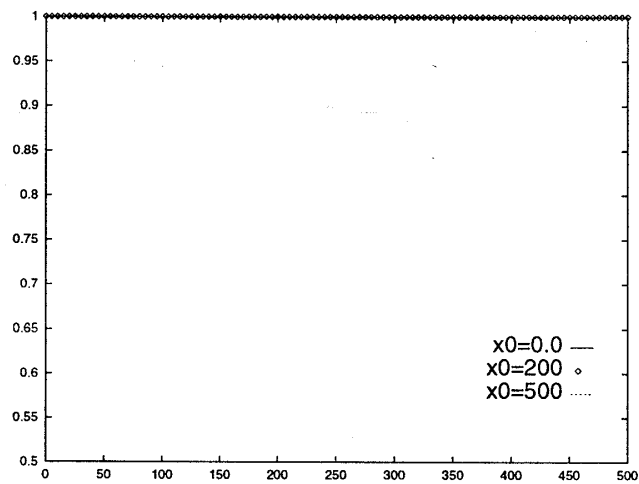


$$\alpha = 0.5, \beta = 0.5, \gamma' = 0.1$$

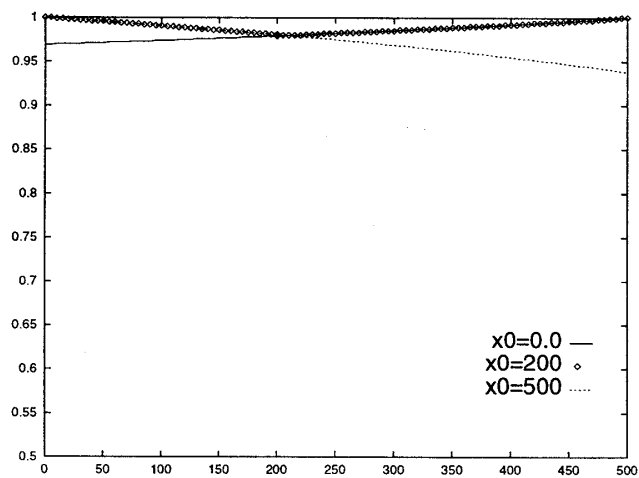


$$\alpha = 0.5, \beta = 0.5, \gamma' = 1.0$$

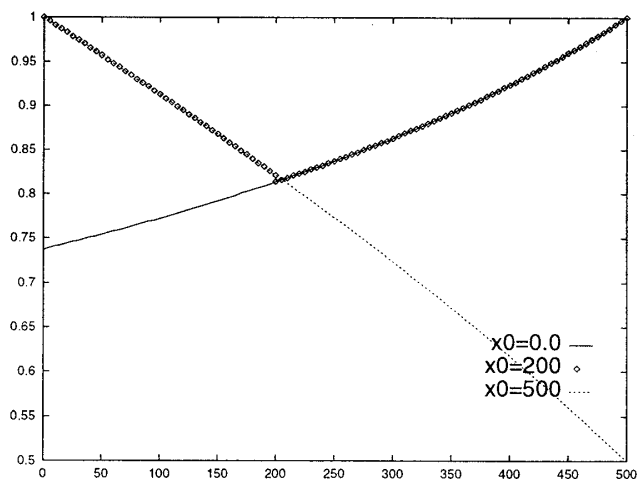
図14 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの錐台型高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S(x)$ は居住面積の割合．($\gamma' = 0.0$ の場合には，グラフの形状は x_0 によらず一定である.)



$$\alpha = 0.5, \beta = 1.0, \gamma' = 0.0$$



$$\alpha = 0.5, \beta = 1.0, \gamma' = 0.1$$



$$\alpha = 0.5, \beta = 1.0, \gamma' = 1.0$$

図15 $h = 500\text{m}$ の場合，通勤交通と施設訪問による交通が混在するときの錐台型高層ビルの居住面積．横軸 x は地上からの高さ，縦軸 $L(x)/S(x)$ は居住面積の割合．($\gamma' = 0.0$ の場合には，任意の x に対して $L(x)/S(x) = 1.$)

同じ値を取る。結局、図 13 のような錐台型高層ビルにおける、通勤交通と施設訪問による交通が混在する場合の通路面積の解析図および、図 14, 図 15 のような $\alpha = 0.5$, $h = 500\text{m}$ の錐台型ビルに関し、それぞれの β , γ' と x_0 から定められた x における居住面積の割合分布図が得られた。(ここでも、図を減らすため、 $\alpha = 0.5$, $h = 500\text{m}$ の数値計算結果だけを挙げ、ほかの場合は省略した。)

この場合にも、前節で示した直方型(円柱型)の場合と類似の傾向が見られる。

4. おわりに

本研究では、高層ビル内部交通の種類および形状に対する拡張を目指し、ひとつの内外交通とそれぞれひとつの内内交通を結合した、2種類の内部交通による錐台型高層ビルの居住面積とエレベータ用通路面積の定式化を行なった。また、直方型(円柱型)高層ビルにおいては、その通路面積を理論的に求めた。最後は、直方型(円柱型)、さらに錐台型高層ビルにおける数値計算を通じ、各パラメータより定められたそれぞれの定式化の居住部分と通路部分の配分を直観的に解析したうえ、ビルの高さが大きくなるにしたがい、居住面積の割合が小さくなり、ビル建設に対する投資が有効に生かされないという奥平 [2], 田口 [4] による結果が、このような拡張された範囲でも意味を持つことを明らかにし、多種類の内部交通が同時に発生している一般都市高層ビルにおいて、通勤交通の発生率が小さくなるにしたがい、通路面積に対する底面積と施設配置の影響が著しくなることを検証した。ビルの形状とほかのパラメータの関係性を詳しく調べ、どのような形状が最適であるかなどを議論することは大変興味深いですが、非常に複雑になるので、現実的なパラメータの同定、実際の問題への適用などとともに、今後の研究課題とする予定である。最後に、初稿に対して有益なコメントをしていただいた査読者の方に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 柴垣和三雄：関数解析と数値解析の基礎，森北出版，1985.
- [2] 奥平耕造：都市工学読本，彰国社，1976.
- [3] 田口 東：都市空間の道路と居住への配分－交通渋滞のない円形都市モデル，日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌，Vol. 38(1995)，pp.398-408.
- [4] 田口 東：大規模超高層ビルにおける内内交通とエレベータ通路，日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌，Vol. 37(1994)，pp.232-241.
- [5] 吉田耕作：積分方程式論，岩波書店，1978.

李 明哲

〒113 東京都文京区本郷7丁目3番地1号
東京大学工学部計数工学科

lmz@misojiro.t.u-tokyo.ac.jp

伏見正則

〒113 東京都文京区本郷7丁目3番地1号
東京大学工学部計数工学科

fushimi@misojiro.t.u-tokyo.ac.jp

ABSTRACT

THE INNER TRAFFIC ANALYSIS OF URBAN SKYSCRAPERS

Mingzhe Li Masanori Fushimi
University of Tokyo

There are many skyscrapers in large cities such as Tokyo, Beijing, Shanghai *etc.*, mainly with rectangular parallelepiped shapes and some with frustum shapes, which is caused by the soaring of the land price.

In a very big building with many people, it is well known that the inner traffic can not be ignored and it is important to forecast the inner traffic so that a sufficiently large inner traffic space is designed to guarantee the people to move in the building smoothly. Here, the inner traffic generally means the vertical inner traffic.

Basically, there are two kinds of the inner traffic inside a skyscraper. One is the so-called Outside-Inside inner traffic, which is the traffic by the people coming from outside to inside or by the people going from inside to outside. Another one is the so-called Inside-Inside inner traffic, which is the traffic by the people acting within a skyscraper.

As an example of Outside-Inside inner traffic, Okudaira gave a formulation in 1976. By considering the rush hours when the elevators are mostly occupied by the working people, he derived the theoretical distribution of the inner traffic area and the dwelling area in a rectangular skyscraper. Also as an example of Inside-Inside inner traffic, Taguchi gave another formulation in 1994. By considering the communication among the people inside a skyscraper, he calculated the distribution of the inner traffic area and the dwelling area in a rectangular skyscraper by combining a theoretical method and Newton numerical method.

The above two models are formulated based on one kind of the inner traffic and they are reasonable for some special cases. For instance, Okudaira model may be valid for an office building during the rush hours, and Taguchi model may be valid for a residential building in the holidays. However, we daily experience that several kinds of the inner traffic generally exist in a skyscraper, for example, with respect to Inside-Inside inner traffic, there exist not only the traffic due to the communication among the people inside a skyscraper, but also the traffic caused by the allocation of a public facility *etc.*, showing the incorporation of these traffics is meaningful. On the other hand, the above two models are limited to a rectangular skyscraper. However, there appear more and more frustum skyscrapers recently, meaning the generalization of the shape of a skyscraper is also important.

Here in this paper, we give the formulation combining one Outside-Inside inner traffic and one Inside-Inside inner traffic in a frustum skyscraper. Concretely, we consider Okudaira model for Outside-Inside inner traffic, and we consider Taguchi model, the allocation problem proposed in this paper for Inside-Inside inner traffic respectively. Moreover, since most skyscrapers have the shape of rectangular type, not frustum one, also in this paper, we theoretically analyze the distribution of the inner traffic area and the dwelling area with respect to rectangular case. Finally, we apply all of them to some examples for various parameter values. The numerical analysis shows that the result obtained by Okudaira and Taguchi, which says that the remainder of building volume after taking the elevator passage is scarcely dependent on the height of the building and thus the most of the investment on a high skyscraper may be wasted, is also meaningful in such an extension. Further, it shows that the dwelling area is much more affected by the bottom area and the location of a public facility as the occurring rate of Outside-Inside inner traffic decreases in a skyscraper.