単一の高層建物と複数の低層建物　総移動時間の最小化

01303730　中央大学理工学部情報工学科　田口　東　TAGUCHI AZUMA

1. はじめに

筆者[1]は建物内の人の対が互いに行き来するという交通を仮定し、与えられた人口Pを収容するための居住領域と，それらの対による交通量に応じた交通領域を，総移動時間が最小となるように定める問題を導いた．そこでは，水平移動には廊下，垂直移動にはエレベータとエスカレータが利用され，それぞれ交通容量と速度が与えられている．この問題には，交通路の床面積と総移動時間という二つの評価指標がある．いずれも小さい方が望ましいが，低速な交通手段を用いて距離的に近接して住むか，高速の交通手段を用いて離れて住むか，という二つの方向があり，その間にトレードオフが生ずる．

さて，大きな集団を対象としてひとつの建物に全員が居住するというのは強すぎる制約である．そこで，全人口を同一形状の複数の建物に分割し，異なる建物との間の移動も考えることとした．ただし，地上を通る交通量と移動時間を取り入れると複雑となるので，次のように考えて建物内の部分だけを取り出した．

(a) 同じ建物にいる人の対も異なる建物にいる人の対も同じ確率bで行き来する．

(b) 別の建物に移動する場合にはいったん1階の中心部まで移動し，目的の建物の1階の中心部に瞬時に移動したあと，建物内の目的の場所に移動する．

2. 建物内の交通手段と移動時間最小化問題

建物は直方体で，各階の床は面積Sの正方形であり，居住領域，廊下，エレベータとエスカレータ，残りの部分に分けられる．i階の居住領域の面積をx_i，居住領域の人口密度をρとする．建物の階数をNとおき，十分に大きいものとする．各交通施設を利用したときの移動時間と交通面積を次のように定める．

廊下の歩行速度v_{cor}を80m/分，幅1mの廊下を1分間に20人（断面交通容量c_{cor}）通過できるとする．

エレベータは待ち時間2分，1階通過0.02分$(1/v_{elv})$，床面積1m^2で1分間に1人（交通容量c_{elv}）運ぶ．

エスカレータは1階通過0.4分$(1/v_{esc})$，床面積1m^2で1分間に10人（交通容量c_{esc}）運ぶ．

エレベータかエスカレーかの選択は移動階差dによるものとし，エレベータを利用する割合を$r(d)$とする．

建物の数をnとすると，一つの建物の人数は$P_{in}=P/n$であり，別の建物にいる人数は$P_{out}=P(n-1)/n$である．単一建物の定式化と異なる点は，他の建物との間の交通が1階を起（終）点とする垂直移動として現れることである．一つの建物を取り出して，数理計画問題を導くことができる．k階の床面積の制約条件は

$$f_k = x_k + \frac{\sqrt{f_k}}{c_{cor}}\{\frac{1}{3}b(\rho x_k)^2 + \frac{1}{2}b(\rho x_k)(P-\rho x_k)\} + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=k,j\neq i}^{N}\{\frac{r(|j-i|)}{c_{elv}} + \frac{1-r(|j-i|)}{c_{esc}}\}b\rho^2 x_i x_j$$
$$+ \sum_{j=k,j\neq 1}^{N}\{\frac{r(|j-1|)}{c_{elv}} + \frac{1-r(|j-1|)}{c_{esc}}\}bP_{out}\rho x_j \le S \quad k=1,\cdots,N$$

であり，総移動時間の最小化は次式のように表される．

$$\min_{x_k,r} \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\{r(j-i)\times(w+\frac{j-1}{v_{elv}}) + (1-r(j-i))\times\frac{j-1}{v_{esc}}\}b\rho^2 x_i x_j + \sum_{i=1}^{N}\{\frac{1}{3}\frac{\sqrt{f_i}}{v_{cor}}b(\rho x_i)^2 + \frac{1}{2}\frac{\sqrt{f_i}}{v_{cor}}b(P-x_i)\rho x_i\}$$
$$+\sum_{j=2}^{N}\{r(j-1)\times(w+\frac{j-1}{v_{elv}}) + (1-r(j-1))\times\frac{j-1}{v_{esc}}\}bP_{out}\rho x_j$$

3. 計算例

建物の数を$n=1, 2, 3, 4$とし，$P=10000, b=0.0001, \rho=1/8$について床面積を変化させて解を求めた．図1に交通手段ごとの平均移動時間を各nについて示す．図2に平均移動時間を横軸にとり1移動あたり利用床面積を縦軸にとって両者の関係を表す．

図1において$n=1$と$n=2$を比較してみよう．もしエレベータの待ち時間が0であれば$n=1$の解の中央か

ら上半分が$n=2$の解となる．建物の外にでる移動数は$b\times P_{in}P_{out}\times n/2$であり，建物の中だけの移動数は$b\times 0.5P_{in}P_{in}\times n$であることから，$n=2$の場合には50%の移動が外に出る．このためエレベータの待ち時間の平均値が長くなるという効果が生じて，より離れた階の移動に対してもエスカレータの方が速い．したがって，広い範囲のSに対してエスカレータが利用される．

次に$n=3$の場合を考えてみよう．$n=1$の解の上端から人口が$P/3$含まれる部分まで取り出すと実行可能解が得られる．このことから，ビルの中心部で交通面積が大きくなるという現象を避けることができるので，各階の居住領域の割合を大きくとることができ階数は少ない．その上，エレベータの待ち時間の平均値は長くなるため，エスカレータが使われるSの範囲は$n=2$の場合よりもさらに広くなる．

図2で床面積の上限Sが等しいケースを比較しよう．$S\geq 2800$では，$n=1$の場合に床面積に余裕があって5階以上の移動にエレベータが使われている．これらのケースで$n=2$とすると平均移動時間は乗り換えの待ち時間に相当する分長くなり，利用床面積はそれほど変化しない．そして，$n=3$とすると，上に述べたように交通面積は大きく減少する．このとき，移動時間も減少するが，$n=3$においても同様にエレベータを利用しているSの範囲では$n=1$のときの平均移動時間までは減少しない．しかし水平移動とエスカレータによる移動だけですむような低層な建物となっていると，$n=1$のときよりも短い平均移動時間が実現され，分割の効果が著しい． $2800>S\geq 2400$では$n=1$の場合に長い移動にだけエレベータが使われている．これらのケースで$n=1$から$n=2$とすると長い移動が消えてしまい平均移動時間が短縮されかつ交通面積も減少する．

参考文献 [1]田口　東：交通路容積を考慮したコンパクトな建物．日本OR学会1999年度春期研究発表会，1E9, 102-103

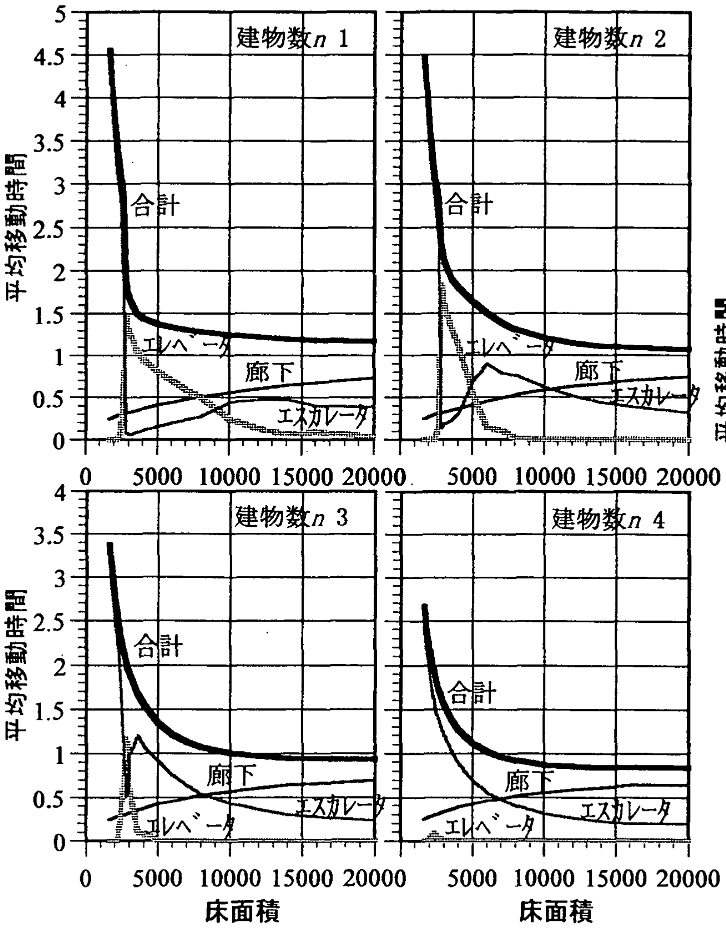

図1 床面積Sを与えたときの建物内の平均移動時間．

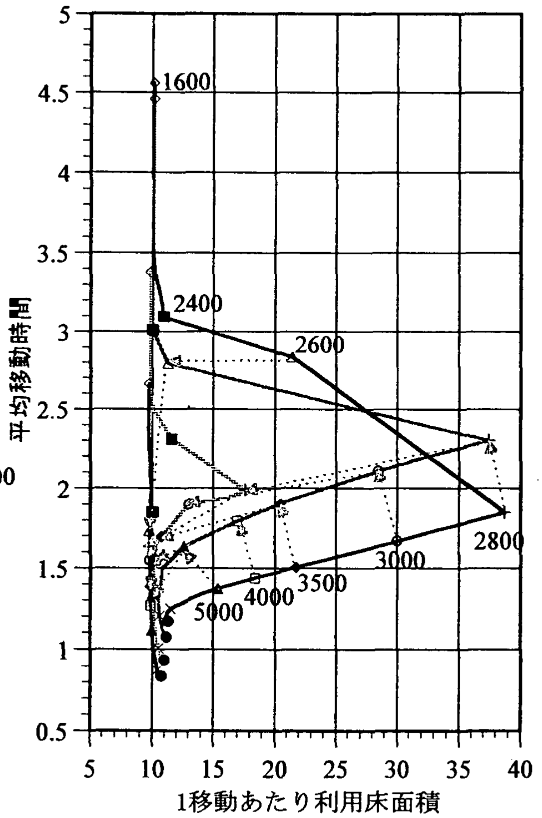

図2 床面積Sを変化させたときの平均移動時間と1移動あたり利用床面積の関係．床面積が等しいケースが破線で結ばれている．