エレベータ群のトレース駆動シミュレーション

米田 清，中山 靖子，松本 敏明

1．はじめに

高層ビルで縦に移動する手段は実際上，エレベータしかない．その計画と運用は，利用者や建物の所有者にとって切実な問題である．どんな性能のエレベータを何台，用意すれば足りるか．サービスの対象とする階をどう分割して，どのエレベータにどの階を受け持たせるか．どういうロジックで運転を管理すべきか．

判断にはシミュレーションを使うことが多い．さまざまな条件のもとでいろいろな指標を測定し，総合的に判断する．評価の基準は社会的な要請によって変化する．たとえばエネルギー問題に関心が集まる時代には電力の節約を特に重視するようになるし，日本では外国よりも乗り心地を重視する傾向がある．

シミュレーションの基礎データには，エレベータ群の仕様に関する部分と，それを使う環境に関する部分がある．環境は，広義には上記の社会的な背景まで含み，狭義には交通需要を指す．仕様はエレベータの製造元が把握しているのに対して，交通需要は想定する部分が大きい．通常，ビルの計画時には次のような手順で交通需要を設定する．

床面積と使用形態をもとに，各階の滞留人数を求める．単位時間あたり，人数の一定割合がエレベータを使うとして，利用者数を算出する．利用者がどの階からどの階へ行くかは，入居予定者の情報から，同一会社の階どうしの往来を多くしたり，他のエレベータ群との乗り継ぎを考慮して設定する．このように経験や仮定に依存するので，予想とビル稼動後の実状とは食い違う場合がある．

一方，ビル稼動後についてはエレベータ乗降客の自動測定技術が進み，交通実績を用いてシミュレーションすることができるようになった．

本稿では，まず実測データを用いてエレベータ群のシミュレータを駆動する意義を説明する．次いで，それを可能にするエレベータ交通の測定法を紹介する．

よねだ きよし，なかやま やすこ，まつもと としあき
㈱東芝 〒210 川崎市幸区柳町70

2．トレース駆動シミュレーション

エレベータでは，利用客に対するサービスの水準を表わす指標として，平均待ち時間と長待ち率をよく使う．長待ち率というのは，待ち時間がある一定よりも長くなる乗客の割合である．いずれの指標も利用者数が多ければ悪く，少なければ良くなる．利用者数が同じ場合は，どの階からどの階へ移動するかというパターンの影響が大きい．

計算した性能指標が信頼できるためには，シミュレーションに用いる交通需要が，そのビルの人々の動きを正確に反映している必要がある．そこで，実際に現地で測定したデータを使いたい．これから建てるビルに納入するエレベータでも，よく似たビルの実測データが使えれば，想定より望ましい．

性能指標として平均待ち時間だけを問題にする限りは，大雑把な評価でも比較的，正確な値が得られる．しかし長待ち率は分布の裾確率なので，仮定や近似に敏感である．そのため評価には特に実測値を使いたい．

ところで，コンピュータを設計するための性能予測では，トレース駆動シミュレーション（trace driven simulation, TDS）[1]と呼ばれる評価を行う．これは写実的な，フィクションをできるだけ排除したシミュレーションである．手順は大略，以下のとおり．

まず，既存の類似システムが稼働している環境で，性能指標に影響しそうな負荷状況を時系列的に測定する．たとえば実動している計算機に，どれだけの仕事がいつ発生したかを，ハードウェアやオペレーティングシステムに手を加えて測定する．その記録がトレース（trace）である．トレースはいつ何が起きたかの歴史を記録した生に近いデータであって，モデルをあてはめてパラメタを推定した結果よりも量が桁違いに大きく，性質も異なる．

次に，トレースどおりに負荷が発生したとして新設

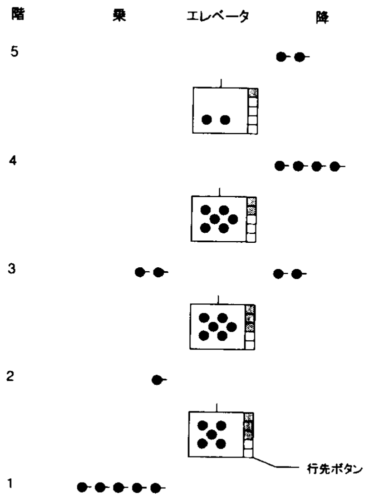

図1　かごが空の状態からふたたび空になるまで

計の計算機でそれを処理したら，性能指標がどうなるか，シミュレーションで評価する．こうすれば，実用の場面でどの程度の性能が期待できるか，説得力のある予測ができる．エレベータでもTDSを行いたい．この場合トレースは交通実績，すなわち，■何階から何階へ■何人が■いつ移動したか，に当る．

3．交通実績の測定

交通実績を測定するには，乗る前に配った札を降りた所で回収するとか，各エレベータにカメラを設置するなどの方法が取られていた．これでは高価すぎて長期の観測はできない．利用者としても，行動を監視されているような気がする．

そこで，かごにかかる荷重を人数に換算するなどの，より安価でプライバシーが守れる，自動測定が実用になっている．扉が開いてから荷重が最低になるまでの減少分が降りた乗客に対応し，その時点から扉が閉まるまでの増加分が乗り込んだ乗客に対応する．奥にいる人を通すために一時的にかごを降りる，という場合をうまく補正できればこの方法で乗降人数までは出る．

しかし，どの階からどの階へ何人が移動したかは測定できない．たとえば，図1のような状況を考えよう．あるビルで下層階を出発したエレベータが，途中階に止まりながら上昇し，最後に反転して下降に入る．その間に止まった階に番号を付けて，1階，2階などと呼ぶことにする．つまり，途中で止まらなかった階は無視して番号を付ける．

空だったエレベータに1階で5人乗り込んだ．2階でまた1人乗った．3階では2人乗って2人降りた．4階で4人降り5階で2人降りて再び空になった．かごの絵の右端にはエレベータかご内にある行先ボタンを表示してある．押されているものに斜線を入れた．問題はこの間，何階から何階に何人が移動したかである．

乗客の出発階を行に，行先階を列に並べて作った次のような表をOD表(origin-destination table)という．空白部分は0を表わす．OD表の“？”部分を埋めたい．

(1)

OD	1	2	3	4	5	Σ
1			?	?	?	5
2			?	?	?	1
3				?	?	2
4						
5						
Σ			2	4	2	8

必要な部分だけを取り出して，

(2)

OD	3	4	5	Σ
1	?	?	?	5
2	?	?	?	1
3	0	?	?	2
Σ	2	4	2	8

2階に着く前に3，4，5階の行先ボタンが押されているから，1階から3，4，5の各階に行った人が少なくとも1人ずつは，いたことがわかる．この確定部分を差し引くと，問題はこうなる：

(3)

OD	3	4	5	Σ
1	?	?	?	2
2	?	?	?	1
3	0	?	?	2
Σ	1	3	1	5

4．行列均衡問題

上のように行和と列和のつじつまが合うように行列の中身を埋める問題は行列均衡問題（matrix balancing problem）[2,3]と呼ばれ，交通に限らず通信，経済，会計，生物などいろいろな応用に現われる．ただし，狭義の行列均衡問題では対称行列のみを扱う．本稿では対称行列にも正方行列にも限らない．

このままでは変数の方が方程式より多い線形方程式系なので，解は不定である．さらに，乗降人数のつじつまが合わず，乗った人より降りた人の方が多いなどという測定もあるので，解が存在しないこともある．その対策はいろいろあるので，以下では簡単のため，解が存在する場合に限る．

解の一意性は，目的関数を設け，方程式を制約条件と

して，最適解を1つだけ選び出すことによって保証する．その目的関数としては，Kullback-Leibler 情報量[2]を採る．理由は，思想的には最大エントロピー原理の枠に納まることと，実利的には凸関数で扱いやすいとか，得られた解が自動的に非負条件を満たすことがある．

結局，最適化問題としては，(i,j)を階対，x_{ij}を移動人数，$x_{i\cdot}$を行和，$x_{\cdot j}$を列和として，

OD表の実数再構成問題

$$(4)\quad \min_{xy}\left\{\sum_{i,j} x_{ij}\log\frac{x_{ij}}{q_{ij}}\;\middle|\; \sum_j x_{ij}=x_{i\cdot}, \sum_i x_{ij}=x_{\cdot j},\ 0\leq x_{ij}\right\}$$

ここに$(0\leq)q_{ij}$は，移動人数がこれくらいだろうという先験的な予想である．この値は，ボタン情報や停止階から0であることがわかっているものと，特に発着の多い階の他は，普通は平等にとる．つまり迷ったら，つじつまの合う範囲で，人数x_{ij}は予想q_{ij}に近い値を採用する．またもともと0であることがわかっているもの，たとえば例題で$(i,j)=(3,3)$については，$q_{ij}=q_{3,3}=0$なので，$x_{ij}=0$，$x_{ij}\log\frac{x_{ij}}{q_{ij}}=0$とする．

例題についてこれを解くと，解は

(5)

OD	3	4	5	Σ
1	0.667	1.000	0.333	2
2	0.333	0.500	0.167	1
3	0	1.500	0.500	2
Σ	1	3	1	5

行先ボタンでわかった確定部分をもどして，図1に対応する解は

実数解

(6)

OD	3	4	5	Σ
1	1.667	2.000	1.333	5
2	0.333	0.500	0.167	1
3	0	1.500	0.500	2
Σ	2	4	2	8

5．整数OD表の再構成

上の解は気持ちが悪い．パラメタを推定したいのではなく，間接的な観測からOD表を再構成することが目的だから，「2階から5階へ0.167人移動したはずだ」と言われても困る．これではTDSの役には立たない．これは上の定式化では人数が整数であるという情報を活用しておらず，実数として扱っているために起きた．整数であるという情報を使えば自然で解釈しやすいという意味で，より良い解が得られTDSに使える．

実数解を整数解に直すには，実数を整数に丸めるだけではすまない．実際，(6)を四捨五入すると

(7)

OD	3	4	5	Σ
1	2	2	1	5
2	0	1	0	1
3	0	2	1	3
Σ	2	5	2	9

となり，観測された乗降人数とつじつまがあわない．それでは，どのようにして整数解を得るか．

とりあえず，乗客は1人ずつ到着すると考える．到着すると，その時点で最も実現確率の高い，出発階と行先階の対を選ぶ．これは乗客の到着順序全体からなる空間に，最尤法を適用することに当たる．このモデルから構成順序法[4,5]という図2のような算法が導かれる．なお，同様の考え方で，複数の客が団体で到着する，集団到着へも拡張できる．

これによって例題を解くと：

(8)

OD	3	4	5	Σ
1	1	1	0	2
2	0	1	0	1
3	0	1	1	2
Σ	1	3	1	5

確定部分も入れた，図1に対応する解は

整数解

(9)

OD	3	4	5	Σ
1	2	2	1	5
2	0	1	0	1
3	0	1	1	2
Σ	2	4	2	8

乗降数のつじつまを合わせるだけなら，たとえば

(10)

OD	3	4	5	Σ
1	2	1	2	5
2	0	1	0	1
3	0	2	0	2
Σ	2	4	2	8

でも間にあうけれど，このような移動であった可能性は(9)よりも低い．たしかに(10)より(9)の方が(6)に近い．

構成順序法

- OD 表の実数再構成問題を解く．その解を $\{\hat{x}_{ij}\}$ とする．
  $\forall ij\ y_{ij}:=\lfloor x_{ij}\rfloor$，$q_{ij}:=\hat{x}_{ij}-y_{ij}$；ここに $\lfloor\cdot\rfloor$ は整数部分．
- 制約を更新する．$x_{i.}:=x_{i.}-\sum_j y_{ij}$，$x_{.j}:=x_{.j}-\sum_i y_{ij}$
- 以下を $\sum_{i,j} q_{ij}$ 回くりかえす．
  * OD 表の実数再構成問題を解く．その解 $\{x_{ij}\}$ の最大の要素を x_{hk} とする．
  * その階対 (h,k) に交通があったとする．$y_{hk}:=y_{hk}+1$
  * (h,k) に関わる制約を更新する．
    $x_{h.}:=x_{h.}-1$，$x_{k.}:=x_{.k}-1$
  * 先験情報を更新する．
    $i=h$ または $j=k \Rightarrow q_{ij}:=(x_{ij}-1)^+$；
    ここに $(\cdot)^+:=\max(0,.)$．
    $i\neq h$ かつ　$j\neq k \Rightarrow q_{ij}:=x_{ij}$．
- $\{y_{ij}\}$ を解とする．

図2　構成順序法

6．実時間測定と大規模問題

整数解が満足に得られるようになったのは，ここ数年のことである．構成順序法で整数 OD 表を再構成することは，実数 OD 表の再構成を何度も繰り返すことに帰着する．

ここで，交通測定は実時間に行いたいという要求がある．記録を溜めてオフラインで処理するとなると，運行状態を監視する役には立たないし，情報を制御に使える可能性もなくなる．

実時間に測定するには各エレベータかごが空になるたびに構成順序法を行う必要がある．したがって OD 表の実数再構成を多数回，短時間のうちに行うことになる．結局，OD 表の実数再構成を高速に行いたい．

これはネットワークフローの分野で速い算法が開発されている [3] ことを知って解決した．

ここまでに述べた定式化では，解くべき問題はいつも小さい．しかし，応用によっては，問題が大きくなることもある．たとえば設備の状況によって，エレベータ内外のボタンの情報が取れず，しかも記録を溜めておいてあとで処理することがある．するとほとんどすべての階対を同時に考慮することになるので，表はサービス対象の階の数だけ行と列がある．

そのような大規模な整数 OD 表を再構成する問題は，初期にはワークステーションで十数時間かかって，不完全にしか解けなかった [6]．今ではパソコンで10秒くらいかければ，最適な整数解が得られる．

7．おわりに

ここで述べた方法がうまく働く条件の1つは，階対間の交通量が一様でなく，偏っていることである．いままでの実測によれば，エレベータ交通はこの条件をよく満たしている．出入口階，レストラン階，展望階，乗継ぎ階などを発着階とする交通が，他の階対よりも圧倒的に多い．測定結果を見るだけでも，運転法の改善のヒントになる．

以上でエレベータ交通の実測に必要な道具が大筋において完成した．この測定方法で得たデータで駆動したシミュレーションが徐々に行われるようになっている．

エレベータの評価は，代替関係にある，さまざまな要求のバランスの上に成り立つ判断である．要求が複雑な構造をしているので，メーカが心を砕く点は，どのようにユーザの価値観を理解するか，いかにして要求仕様を獲得するかである．

エレベータ群の TDS によって，「サービス水準を保ったまま，エレベータを1台，減らせるか」と言えば，それはよほど特殊な事情がない限り，無理だろう．しかし「いろいろな要求の代替関係を明らかにし，顧客の満足度を引き上げるのに役立つか」と言えば，それは疑いない．

文　献

[1] A.J.Smith;"Trace driven simulation in research on computer architecture and operating systems" in S.Morito, et al., eds., New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications, pp.43-49, ORSJ, 1994.

[2] S.C.Fang, J. R. Rajasekera, and H. S. J. Tsao: Entropy Optimization and Mathematical Programming, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.（出版予定）

[3] M.H.Schneider and S.A.Zenios: A comparative study of algorithms for matrix balancing; Operations Research, 38, 3, 439-455, 1990.

[4] 中山 靖子他;OD 表の構成順序に着目した整数推定法;日本 OR 学会1996年度春季研究会アブストラクト集, pp.132-133, 1996.

[5] 中山靖子他;OD 表の整数推定法:実数推定に帰着する解法;情報処理学会1996年度第9回数理モデル化と問題解決研究会 研究報告96-MPS-9, pp.25-32, 1996.

[6] K. Yoneda; "Integer estimation of origin-destination tables"; Trans.Inst. Electric Engineers of Japan, 114-C, 4, pp. 483-489, April, 1994.