

## 交通関連行動時間を考慮した都市交通需要モデル

A STUDY OF THE URBAN TRAVEL DEMAND MODEL WITH  
THE TRAVEL-RELATED AVAILABLE TIME

宮城 俊彦\*・加藤 晃\*\*

By Toshihiko MIYAGI and Akira KATOH

## 1. 序 論

交通流の大きさについて確実な情報を得ることは、それが設計の基礎として使用され、交通施設の費用・便益の決定の基礎となる点で重要であり、交通網上の交通流パターンをいかに精度よく合理的に予測、追究するかの問題は、交通技術者あるいは計画者の基本的課題である。

ところで、このような交通需要の予測に対し、2つの一般的なアプローチがある。その第1はすでに広く用いられている都市輸送計画法(U.T.P.法)である。この手法は一般に、交通発生、交通分布、交通機関分担、経路配分の四段階のプロセスを経ることから四段階推定法ともよばれ、システム評価が第五段階となる。他の1つは、経済学における需要-供給均衡原理を応用する方法で、M. Beckmann<sup>1)</sup>によって交通量予測の分野に持ち込まれ、M. Wohlら<sup>2)</sup>によって詳細に研究された。この両者の違いを大まかに示すならば、前者は初めにネットワーク負荷量を求め、それを固定したままで代替ネットワークの評価を行うのに対し、後者は交通とネットワークの相互関係を論じており他の事情が不変ならばネットワークのサービス水準の変化に応じ交通需要量が変わるとするものである。需要-供給均衡モデルにおいてはトリップ主体(各個人あるいは世帯)のトリップ行動を説明する需要関数と交通施設系の特性を表わす供給関数とによって顕在化する交通量を予測する。供給関数は交通配分で用いられる容量関数に相当し、これは従来から広く研究されている。したがって、均衡モデルの適用にあたって問題となるのは需要関数の方である。この需要モデルの開発には一般に回帰分析手法が用いられ多くの説明変数によって需要量が推定されるが、しかし、重共線

性、符号の問題などの回帰分析に固有の問題は、まだ完全には解決していない。また、都市内交通の需要推定への回帰分析手法の適用は、特に均衡交通量の推定の点で問題が残ると考えられ、均衡流推定のための最適な方法とはいえない。

このような交通需要推計問題に関連し重要となるのは人の交通行動特性をいかにモデルで表現するかということである。人の交通行動特性を表現する行動需要モデルは、トリップ発生機構を前の四段階推定法に比べてより因果関係の線に沿って説明しうる点で望ましい。経済学において消費者行動を説明する効用理論は、行動需要モデル設定の理論的基礎を与える。この場合のモデルの開発の基礎となる仮定は、トリップ行動をトリップ主体の意志決定段階における効用極大化の結果であると見なすことである。Golobらが指摘するように、もしトリップ主体が固定した金額を全交通機関に割り当てていたり、あるいは全トリップ数に対し固定した時間数を割り当てている場合には、貨幣や時間の予算制約のもとでの効用極大化が正当化される<sup>3)</sup>。この報告では時間に制約をもつ場合について考察しているが、Golobらの意見についても多少の修正案を提案したい。すなわち、全トリップ数に割り当てられる時間数は一定という考え方式に対し、「1日の戸外で費やす時間数は一定」という仮説のもとでのトリップ行動を考察する。1日が24時間であることは普遍的なものであり、このうちの限られた時間数を戸外での活動に割り当てている。このような戸外での活動時間は、トリップ主体の社会経済的特性に応じ各人の便益を最大にする方向で決まると考えてよいだろう。したがって、短期的には上の仮説は正当なものとなりうるし、長期的にはトリップ主体の所得などと関連させて吟味しうるだろう。

本論文においては、交通需要推定の問題をある行動時間の範囲内でどれだけのトリップ機会が生じうるかという点で述べており、トリップ頻度の決定を確率的に論

\* 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

じている。モデルの定式化にはマルコフ再生理論を援用しており、結果として得られるモデルは回帰分析手法や効用理論によらない行動需要モデルである。すなわち、トリップ主体の特性を表わす行動時間が与えられると、ゾーン特性を表わすゾーン滞留時間およびネットワーク特性としてのゾーン間通行時間との関係でトリップ機会数が求められる。その際に重要な内生変数となるのがゾーンの相対的発生力およびゾーン間推移確率であり、本論文では、相対的トリップ発生力を与えて推移確率を求める方法とゾーンの相対的発生ポテンシャルを与えて相対的トリップ発生力および推移確率を求める方法について言及した。

## 2. マルコフ連鎖による連続トリップ過程の定式化

これまでの交通モデルの多くは人の交通行動を個々のトリップ目的に対応づけ、これを分離して扱ったり、あるいは2地点間の交通に注目し、これを独立してモデル化してきた。しかし、現実には人の交通行動では個々のトリップは独立ではなく相互に関連しながら1日の交通行動を構成していると考えられる。トリップ目的間の連関を考慮したこのような連続する交通行動の表現はトリップ連鎖とよばれ、S. Nardgrist によって提案されたが<sup>4)</sup>、佐佐木教授はこれを独自の形で開発し、実用化している<sup>5), 6)</sup>。

トリップ連鎖の定式化にはマルコフ過程がよく用いられるが、ここでは本論文で提案するモデルの基礎となった佐佐木モデルについて説明しておく。初期の佐佐木モデルにおいては、目的間の連関よりもトリップの空間的生起の系列に重点が置かれている。すなわち、各ゾーンで発生する第1トリップが次々とゾーンを推移していく過程を問題にしており、本論文ではこのようなトリップ過程を連続トリップ過程とよぶことにする。

佐佐木による連続トリップモデルは次のように説明される<sup>5)</sup>。

いま、いかなる車も都市外へ出ることのできない閉塞都市を考え、

- (i) トリップエンドは常に都市内部に含まれる。
- (ii) 比較的短距離交通によって構成される。
- (iii) 完結トリップである。

と仮定するならば、巨視的には車の運行をある推移確率に従ったマルコフ連鎖であると見なせる。したがって、ゾーン  $ij$  間の推移形態をマルコフ連鎖の推移確率  $P_{ij}$  に対応させ、

(iv) 1日を通してゾーン間推移確率  $P_{ij}$  は一定である。

と仮定することにより、次のような交通モデルが誘導される。

$$N_{ij} = Mnw_i P_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$N_{ij}$  : ゾーン間交通量

$M$  : 地域の総自動車保有台数

$n$  : 平均トリップ数

$w_i$  : マルコフ連鎖の極限確率でゾーンの相対的トリップ発生力を表わす。

式(1)において  $Mn$  は総トリップ数  $N$  を表わしているので、式(1)は次のようにも書ける。

$$N_{ij} = Nw_i P_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

ところで、このモデルで問題となるのはゾーンのトリップ発生確率と相対的発生ポテンシャルを表わす初期確率を等しく  $w_i$  と置いている点であり、実際に  $M_i = Mw_i$  として各ゾーンの発生ポテンシャル(佐佐木モデルにおいては各ゾーンの自動車保有台数)を計算してみても実績値との適合性は必ずしも良くない。また、式(2)において  $N$ ,  $w_i$  が外生的に与えられることを考えるならば、このモデルは単に  $P_{ij}$  を求める問題に帰着され、トリップ発生機構をネットワークとの関連でとらえようとする需要-供給均衡理論の立場からは不満が残る。しかし、佐佐木によるマルコフ連鎖交通モデル(以下、M.C.T. モデルと略称する)は概念的にはいくつかの新しい視点を示してくれた。まず、第1にトリップ生成という概念である。トリップ生成法はトリップ数をゾーンにではなくトリップ主体に関連づけて求めようとする。これは行動需要モデルとして基本的に備えてなければならない性質である。第2に各ゾーンの発生量を確率  $w_i$  で評価する点である。従来の交通モデルのほとんどがゾーンの発生量を絶対数として扱っていたのに対し、M.C.T. モデルはこれを相対的に評価する。このことはあるトリップ目的に対する目的地相互の代替性、言い換えればある地域の吸引効果の増加に伴い他の地域の吸引効果の相対的減少を評価するため土地利用モデルと交通モデル相互のシミュレーションがより容易に行える可能性がある。

M.C.T. モデルのこのような利点を生かした交通モデルが得られないかということが次節以下の焦点である。

## 3. マルコフ再生過程による都市交通モデルの定式化

### (1) 時間要因の交通モデルへの導入

M.C.T. モデルは従来の交通モデルと異なりトリップ過程を数学的に定式化したものであるが、これにはいく

つかの単純化が含まれている。その1つは、目的地への推移確率は現在いるゾーンと目的地ゾーンのみ依存し、過去の履歴には関係しないというものであり、第2は、時間ディメンションの欠如である。Hemmens が指摘するように<sup>7)</sup>、人の交通行動は、

- (a) トリップ目的
- (b) 目的地で消費する時間
- (c) 目的地の空間的配置

という3つの要因で特徴づけられるだろう。従来の交通モデルのほとんどは (a), (c) のみを考慮したものであった。しかし、人の交通行動が時間に関する制約をもつならば、あるいはトリップ目的やゾーンで費やす時間が求められ、その消費時間によってトリップ目的やゾーンの活動水準が特徴づけられるならば、これらの各変数をモデルに組み込むことは明らかに重要であり、トリップ発生機構の説明に大きく寄与するであろう。なんとすれば、トリップ主体の社会経済的特性に応じその行動時間が定められ、種々の活動に消費する時間が与えられると、行動時間内にいくつの活動を行うかは通行時間を内生変数として行動時間と活動時間の関係で決定できると思われるからである。すなわち、トリップ主体の1日の活動スケジュールが先決されている場合、彼の行動時間内にこれらの活動をすべて完結するよう通行時間を割当てようとするであろう。あるいは活動スケジュールが彼の念頭にない場合、たとえば勤務を終えたのち、ふいに映画や買物へ行くことを思いついたときでさえ彼の行動時間の範囲内で実行できる活動を選択したと考えてよいわけである。その際、映画館やショッピングセンターまでの通行時間が彼の意志決定行動を支配している。

ここで問題となるのはトリップの滞留時間(あるゾーンの中で活動または休養するために消費する時間)は活動水準を反映しうるかという点である。

表一1には目的別滞留時間について中川三郎が広島パーソントリップデータより得た結果<sup>8)</sup>、および著者らが中京圏パーソントリップデータより岐阜市についてまとめた結果、そして Vidakovic によるアムステルダムに

おけるタイムバジェット調査から得た結果<sup>9)</sup>を並記した。この表から気づくことは、まず第1に広島 P.T. の結果と岐阜市のそれとが非常に良く似た値を示していることである。出勤、登校、帰宅以外のトリップ目的は分類が異なるため直接的な比較は行えないが「買物、食事」が「日常目的」に、「社交、私用」が「非日常目的」に対応し、また、岐阜市における「業務」には「一時帰社、帰校」を含めていることを考慮するならば、この2つの地域の滞留時間特性の類似性は明らかである。また、広島とアムステルダムの結果についても調査方法の違い、国民性の違いなどによる差こそあれ、よく似た値を示している。このことは消費時間に関するデータの地理的、時間的安定性を示していると解釈でき、予測目的のデータとしては都合がよい。第2はトリップ数が大きくなると滞留時間が短くなるのがアムステルダムの結果から読みとれることである。行動時間が固定されていると考えるならば、滞留時間の長短がトリップ機会の増減に影響を与えることは容易に理解できる。

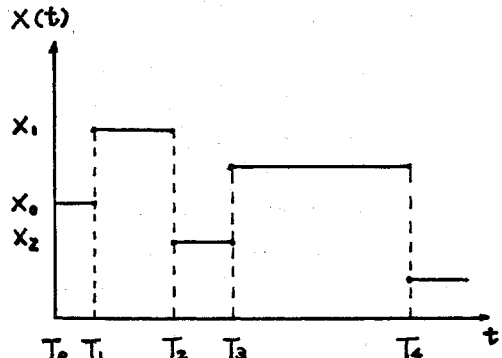
これだけのデータから結論づけることは早急すぎるが、本論文では「滞留時間がトリップ機会の増減に関係する」という仮定から出発する。したがって、滞留時間が与えられた場合、ある行動時間内にどれだけのトリップ機会が生じうるかが当面の課題となるが、この命題から次に示すマルコフ再生過程が有用な道具になる。モデルの定式化にあたっては佐佐木の M.C.T. モデルと同様の仮定が必要であり、したがって、過去の履歴の忘却という単純化の問題は依然として残る。

(2) マルコフ再生過程

可算個状態空間で値をとる確率過程  $X(t)$  ( $t > 0$ ) を考えてみよう。 $X(t)$  は時点  $t$  でトリップ行為者が属する「状態」である。交通分析ではこのような「状態」には交通ゾーンとかトリップ目的あるいはその複合したものが対応する。議論を簡単にするため「状態」を交通ゾーンのみに対応させよう。ところで、トリップ行為者は次

表一1 トリップ目的別滞留時間の比較 (単位:分)

広島 P.T. 調査	中京圏 P.T. 調査 (岐阜市)		アムステルダム T.B. 調査		
	出 勤	出 勤	出 勤	2リンク以上で構成されるチェーン	2リンクチェーン
出 勤	479	479	出 勤	143	386
登 校	396	438	買 物	13	25
帰 宅	122	124	社 交	40	151
買 物	28	46	その他	79	105
社 交	112	98			
業 務	88	137			
食 事	50				
私 用	84				
帰 社	153	平均	全目的	67	148



図一1 マルコフ再生過程

のように移動すると仮定する。すなわちゾーンから次の目的ゾーンに移動していく過程はマルコフ連鎖を形成し、あるゾーン  $i$  に到着してから次のゾーン  $j$  に移るまでに消費する時間は  $i$  と  $j$  のみに依存し確率的に変動すると考える。トリップ行為者のこのような移動過程は図-1のように表わすことができる。図において  $T_n$  を考慮しない場合、つまり  $X(t)$  をセミマルコフ過程という。図において  $T_n (n=0, 1, 2, \dots)$  は  $n$  回目のトリップ終了時点を表わし、 $X_n (n=0, 1, 2, \dots)$  は  $n$  回目のトリップ後の到着ゾーンを表わす。この二次元の確率変数をもつ確率過程  $(X_n, T_n)$  をマルコフ再生過程という。マルコフ再生過程は大ざっぱに言えば再生過程とマルコフ連鎖が複合した過程であり、再生過程の一般化であると同時にマルコフ連鎖の一般化でもある。マルコフ再生過程は、まず Pyke により研究され、Cinlar はさらにそれを掘り下げた。本論文における理論の主要な展開は Cinlar<sup>10)</sup> によっている。

ここで本論文における表記法について触れておこう。非負の整数値集合の部分集合を  $\mathfrak{S}$  で表わす。また、実数線上で定義された  $F(\infty) \leq 1$  であるような右連続性を有する非減少点関数  $F$  は直線上のボレル集合の測度を与える。したがって点関数と対応する測度は同じ記号を用いる。 $M(t)$  は関数を要素としてもつ行列で、 $M(t)$  をラプラス-スティルチェス変換した行列を  $M^e(s)$  と記す。 $M$  を測度の行列、 $N(t)$  を可測関数の行列とすると、 $M$  と  $N$  のたたみこみを  $M * N(t)$  と書く。

(3) 1 トリップ過程の定義

1 トリップ過程は図-2に示すようにゾーンにおける活動過程とゾーン間の移動過程より構成されるものとする。活動過程を考えることによって1日のトリップ過程を時間的に連続した過程とみなすことができ、行動時間内でのトリップ数を求めることを可能にすると同時にトリップパターンの背後にある活動水準をモデルに組み込むことを意図している。すなわち滞留時間をゾーンの活動水準を表わす指標としてとらえている。1トリップ過程の所要時間は滞留時間と通行時間の和として定義でき、これをゾーン間推移時間とよぶ。滞留時間や通行時間はトリップ行為者が異なる経路を経ることにより、あるいは種々の要因の影響を受けるために変動し、おのおの  $S(t), T(t)$  という確率分布関数に従うと仮定する。ゾーン間推移時間の分布関数  $F_{ij}(t)$  は

$$F_{ij}(t) = P_r \{ T_{n+1} - T_n \leq t | X_{n+1} = j, X_n = i \} \quad (i, j \in \mathfrak{S}) \quad (3)$$

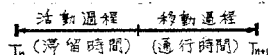


図-2 1 トリップ過程の定義

と定義でき、したがって  $S_i(t)$  と  $T_{ij}(t)$  とによって

$$F_{ij}(t) = \int_0^t S_i(t-x) T_{ij}(dx) \quad (4)$$

として求めることができる。ただし、次式が成立する:

$$\left. \begin{aligned} F_{ij}(0) &= 0, t \leq 0 \\ 0 \leq F_{ij}(t) &\leq 1, 0 \leq t \leq \infty \\ \lim_{t \rightarrow \infty} F_{ij}(t) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(4)をラプラス-スティルチェス変換すると

$$F_{ij}^e(s) = S_i^e(s) T_{ij}^e(s) \quad (6)$$

したがってゾーン間推移時間の期待値  $\bar{\tau}_{ij}$  は次式で与えられる。

$$\bar{\tau}_{ij} = \lim_{s \rightarrow 0} (1 - F_{ij}^e(s)) \quad (7)$$

ところで、ゾーン滞留時間は厳密には目的地に応じ変動するかもしれない。この場合、式(6)は

$$F_{ij}^e(s) = S_{ij}^e(s) T_{ij}^e(s)$$

とする必要がある。しかし、将来値推定の問題を考慮に入れるならば  $S_{ij}(t)$  という形にすると不都合な点が多い。分類を細分化することはデータの入手を困難なものとするし、得られたデータの精度が信頼できない場合も多い。 $S_i(t)$  という形で定義すればゾーンの土地利用特性やその他の指標との関連で予測が比較的容易に行えると考えられるのでこの形を採用することにした。

ところで、ゾーン  $i$  に到着した人がゾーン  $j$  に移る確率  $P_{ij}$  はマルコフ連鎖を形成すると仮定する。このとき  $i$  ゾーンに到着した人が  $j$  ゾーンに移るまでに消費する時間の分布関数は

$$A_{ij}(t) = P_{ij} F_{ij}(t) \quad (i, j \in \mathfrak{S}) \quad (8)$$

となる。

$$\sum_j P_{ij} = 1 \quad (9)$$

と式(5)を考慮すると

$$A_{ij}(0) = 0, A_{ij}(\infty) = P_{ij}, \sum_j A_{ij}(\infty) = 1 \quad (10)$$

が成立する。このような mass function  $A_{ij}(t)$  を要素とする行列  $A(t)$  をセミマルコフ行列という。 $A_{ij}(t)$  は時点0で  $i$  にいた人が時点  $t$  までに  $j$  へ移る確率を与えるが、ゾーンに到着した人のうち特に目的地を指定しない場合、すなわちある時点  $t$  までに他ゾーンへ移ってしまった人については次式の確率分布関数が対応する。

$$H_i(t) = \sum_j A_{ij}(t) \quad (11)$$

その期待値  $\bar{\tau}_i$  は

$$\bar{\tau}_i = \int_0^\infty t dH_i(t) = \sum_j P_{ij} \bar{\tau}_{ij} \quad (12)$$

で表わされる。

このように時間的に変動する1トリップ過程はセミマルコフ行列で定式化できる。以下このようなトリップが連続して生起する場合の交通動態の定式化を検討する。

(4) 連続トリップ過程のたたみこみ

セミマルコフ行列は1トリップ過程の記述に有用であり、ゾーンを出発した人が次々にゾーンを訪ずれていく過程はこれら1トリップ過程の重ね合せである。たとえば時刻0で*i*ゾーンを出発し、時刻*t*までに*n*回のトリップ後*j*に到着する人については、ある時刻*x*でゾーン*r*に移り、*r*からの(*n*-1)回のトリップを(*t*-*x*)時間で行うと考えればよいわけで、連続トリップ過程はこの“たたみこみ”によって容易に記述される。

3トリップの場合についてグラフで示すと図-3のようになる。図中のループはゾーン内移動を表わす。

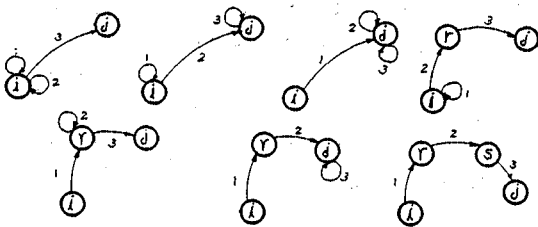


図-3 3トリップ過程

以上のことより、 $A_{ij}(t)$  について次式のようなたたみこみが成立する。

$$\left. \begin{aligned} A_{ij}^{0*}(t) &= \delta_{ij} \\ A_{ij}^{n*}(t) &= \sum_r \int_0^t A_{ir}(dx) A_{rj}^{(n-1)*}(t-x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタ。

行列形式では

$$\left. \begin{aligned} A^{0*}(t) &= I \\ A^{n*}(t) &= \int_0^t A(dx) A^{(n-1)*}(t-x) \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

ここに、 $I$ : 単位行列、 $n^*$  は  $n$  重たたみこみを表わす。

(5) 連続トリップ過程の積分方程式

いま、時刻*t*までに各ゾーンを出発する第1トリップ量を行ベクトル  $M(t) = [M_1(t), M_2(t), \dots, M_n(t)]$  で表わす。また、任意のゾーンを出発した人が時刻*t*までに*j*へ移る確率はセミマルコフ行列  $A(t)$  で表わされるが、第1トリップの推移時間は滞留時間を含まないもので、第2トリップ以降とは異なる分布をもち、これを  $A'(t)$  とすると、時刻*t*までの各ゾーンの到着量  $V(t)$  は次のような前向きマルコフ再生方程式を満足する。

$$V(t) = \int_0^t M(t-x) A'(dx) + \int_0^t V(t-x) A(dx) \dots\dots\dots(15)$$

あるいは;

$$V(t) = M(t) * A'(t) + V(t) * A(t) \dots\dots\dots(15.a)$$

式(15)右辺の第1項は各ゾーンからの直接的な到着量であり、第2項は立ち回りを考慮した到着量である。すなわち、時刻*t*までのゾーン到着量は、各ゾーンを出発する第1トリップか、あるいは、それまでにすでに他ゾーンに到着していた人の継続トリップにより構成される。

閉じたシステム内での交通行動を考える場合、式(15)の解は次式で与えられる。

$$V(t) = M(t) * A'(t) * R(t) \dots\dots\dots(16)$$

ここに、

$R(t)$ ;  $R(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A^{n*}(t)$  で定義される  $n \times n$  行列でマルコフ再生行列とよばれる。その要素  $R_{ij}(t)$  は時刻*t*までに*j*を訪問する回数の期待値を表わしている。

さて、式(16)が式(15)の解であることを示そう。式(15)において、 $K(t) = M(t) * A'(t)$  とおくことによって、

$$V(t) = K(t) + \int_0^t V(t-x) A(dx) \dots\dots\dots(17)$$

という前向きマルコフ再生方程式の一般形を得る。ここで、 $K(t)$  は  $t \leq 0$  で0になり、上に有界な行ベクトル。閉じたシステムにおいては、次式で定義される  $B_{jk}(t)$  を要素とする  $A(t)$  に関する双対行列  $B(t)$  が存在する。

$$B_{jk}(t) = \frac{w_k}{w_j} A_{kj}(t) \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $w_j, w_k$  はマルコフ連鎖の極限確率

このとき、式(17)は  $B(t)$  によって、一般のマルコフ再生方程式に書き換えることができる<sup>10)</sup>。

$$U(t) = G(t) + \int_0^t B(dx) U(t-x) \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 $U(t), G(t)$  は列ベクトル。ただし、 $G(t)$  は  $t \leq 0$  で0になり、上に有界

式(19)の解はCinlarによって与えられており、

$$U(t) = R'(t) * G(t) \dots\dots\dots(20)$$

となる。ここに、 $R'(t) = \sum_{n=0}^{\infty} B^{n*}(t)$

なお、式(17)から式(19)に変換するときに、

$$\left. \begin{aligned} G_j(t) &= \frac{1}{w_j} K_j(t) \\ U_j(t) &= \frac{1}{w_j} V_j(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

とおいている。

式(18)、(21)の関係をを用いて式(20)を  $A(t)$  について書き改めると、

$$V(t) = K(t) * R(t)$$

を得る。これが求める解で、式(16)に一致する。

ところで、発生量、分布量についても到着量を求める

考え方と同様に

$$U(t) = \int_0^t M(t-x)H'(dx) + \int_0^t V(t-x)H(dx) \dots\dots\dots(22)$$

$$N(t) = \int_0^t \bar{M}(t-x)A'(dx) + \int_0^t \bar{V}(t-x)A(dx) \dots\dots\dots(23)$$

という積分方程式を得る。

ここで、

$U(t)$ ：時刻  $t$  までの各ゾーンの発生量を表わす行ベクトル

$N(t)$ ：時刻  $t$  までのゾーン間交通量を表わす  $n \times n$  行列

$$H(t), H'(t) : H(t) = [\delta_{ij}H_i(t)],$$

$$H'(t) = [\delta_{ij}H'_i(t)],$$

$$\text{ただし, } H'_i(t) = \sum_j A_{ij}'(t)$$

一印は行ベクトルの要素を対角要素に配列し直した対角行列を表わす。

ここで、式 (22)、(23) は時刻  $t$  までにすでに他ゾーンへ移ってしまったものとして定義している点に留意してほしい。

ところで、交通量を求めるための以上の各式は、計算には不都合なのでラプラスススティルチェス変換によって求めやすい形になおすと、

$$\left. \begin{aligned} V^e(s) &= M^e(s)A'^e(s)R^e(s) \\ U^e(s) &= M^e(s)H'^e(s) + V^e(s)H^e(s) \\ N^e(s) &= \bar{M}^e(s)A'^e(s) + \bar{V}^e(s)A^e(s) \\ R^e(s) &= [I - A^e(s)]^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

したがって、セミーマルコフ行列が与えられると、各ゾーンを出発する第1トリップの時刻的変動を把握することによって、式 (24) を用いて各交通量を求めることができ、これを逆変換することによって時刻  $t$  までの交通量が与えられる。

### (6) 定常モデル

時刻  $t$  までの交通量の変動が前述の関係式で観測されるものとしよう。このとき、1日のような長い時間に対して1トリップの移動過程は定常過程に近づくと期待できる。長い滞留時間をもつ過程はこのようなふるまいが遅いだろうが、1週間、あるいは1カ月といった長い時間に対する過程はやはり定常過程に近づくとみなしてよいであろう。このようなときは、平均的な1日の交通量を問題にすればよい。いずれにせよ、過程を定常過程として扱うことにより1日のトリップ量を見積ることが容易になる。平均的な量は、時間的な起伏を平滑化して容易に算出されるように、日トリップ量の算出に定常過程

を用いよう。

定常過程においては、 $M(t) \rightarrow M$  として取り扱うことができる。1日の間に出発すべき量は朝、同時に出発すると仮定しても何ら支障のあるものではない。ところで、各ゾーンを出発する第1トリップ量は相対的発生ポテンシャル  $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  に比例するとする。すなわち、過程の初期確率分布を  $a$  とおく。  $a$  の要素は具体的には次のように表わされる。

$$a_i = \frac{w_i \bar{r}_i}{\sum_j w_j \bar{r}_j}$$

ただし、

$$\sum_i a_i = 1 \dots\dots\dots(25)$$

上式が用いられる理由はセミーマルコフ過程の推移確率  $\phi_{ij}(t)$  が、 $t \rightarrow \infty$  としたとき上式の形になるためである。 $\phi_{ij}(t)$  は時刻0で  $i$  ゾーンを出発した人が何回のトリップを行ったかに関係なく時刻  $t$  で  $j$  に到着する確率を表わし、定常過程においては次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \phi_{ij}(t) &= \phi_j \\ \phi_j &= \frac{w_j \bar{r}_j}{\sum_i w_i \bar{r}_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(26)$$

したがって、各ゾーンの出発量が  $\phi_i$  に比例すると考えるのは合理的であろう。これは、M.C.T. モデルにおいて各ゾーンの出発量を  $w_i$  に比例させたのと同様の考え方であるが、式 (25) は時間ディメンションを含むことが重要であり、また、 $w_i$  を用いた場合には実績値をほとんど説明しきれなかったのに対し、式 (25) は実績値に対しかなり良好な近似を与えることが、後の計算例で判明する。

式 (25) で定義される  $a_i$  を初期確率とし、トリップ主体の総数を  $M$  とすると、ゾーンからの出発量は  $Ma_i$  であり、式 (16) はゾーン  $j$  について

$$V_j(t) = M \sum_k a_k A_{ik}'(t) * R_{kj}(t) \dots\dots\dots(27)$$

と書き改められる。

ところで、Cinlar によれば定常過程において各ゾーンを訪ずれる回数期待値  $Y_j(t)$  は、次式で与えられる。

$$Y_j(t) = \sum_i \sum_k a_i A_{ik}'(t) * R_{kj}(t) = \frac{t w_j}{\sum_i w_i \bar{r}_i} \dots\dots\dots(28)$$

マルコフ再生過程は時刻0で過程を観測したとき、過程がすでに進行している場合に定常過程への近づきを見せる。図-4 によるならば、時刻0で過程を観測したと

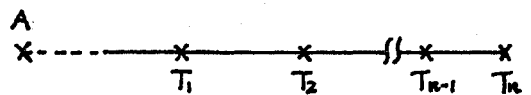


図-4 定常なマルコフ再生過程

き、過程は破線で示すようにすでに進行していたのであり、観測を始めてある時間たつと第1回の生起事象が記録される。第1回の事象生起までの時間分布関数は  $A_{ij}'(t)$  で、その後  $A_{ij}(t)$  に従って事象生起が観測される。したがって、式 (28) で事象の生起回数を見積ることは、事象が図-4におけるA点から始まることを暗々裡に仮定することになる。しかし、現実のトリップ過程では図-4の破線部分に対応する滞留時間が存在しないので、式 (28) をトリップ過程に適用するには過程の長さ  $t$  に仮想的な滞留時間  $\bar{s}$  を加える必要がある。

いま、朝自宅を出発した時刻から最終トリップ終了後、自宅に戻ってくるまでの時間を交通関連行動時間とよび、これを  $T$  と記すと、交通関連行動時間内でのトリップ生起数、すなわち、1日のトリップ生起数は、式 (27), (28) および上述のことを考慮して、

$$V_j = M \left( \frac{T + \bar{s}}{\bar{\tau}} \right) w_j \dots \dots \dots (29)$$

を得る。ただし、 $\bar{\tau} = \sum_i \sum_j w_i P_{ij} \bar{\tau}_{ij} = \bar{s} + \bar{t}$ 。

$\nu = T - \bar{t}$  なる関係式を定義し、式 (29) を書き改めると、

$$V_j = M \left( \frac{\nu}{\bar{\tau}} + 1 \right) w_j \dots \dots \dots (30)$$

となる。

式 (30) は次のように解釈できる。すなわち、第1トリップ生起時刻から最終トリップ開始直前までの時間を  $\nu$  と定義すると (図-5 (a))、その間の到着量に最終トリップの到着量を加えたものが総到着交通量である。あるいは、第1トリップの到着時点から最終トリップ終了時点までを  $\nu$  と定義するならば (図-5 (b))、その間の到着量に第1トリップの到着量を加えたものが総到着交通量である。

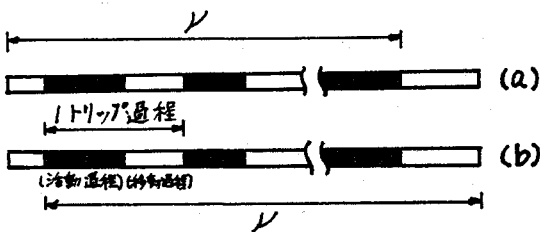


図-5  $\nu$  の定義域

ところで、発生量、分布量については、式 (22), (23) および、 $\lim_{t \rightarrow \infty} H_i(t) = 1$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} H_i'(t) = 1$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} A_{ij}(t) = P_{ij}$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} A_{ij}'(t) = P_{ij}$  なる関係式より、

$$U_i = Ma_i + V_i \dots \dots \dots (31)$$

$$N_{ij} = Ma_i P_{ij} + V_i P_{ij} \dots \dots \dots (32)$$

が導ける。

式 (31) で算定される発生量は到着量と一致しないが、これは、式 (22) が時刻  $t$  で他ゾーンに移ってしま

った交通量を算定するために最終トリップ終了時点では、その時点で他ゾーンに移ってしまった交通量をも算定してしまう。したがって、定常過程では  $Ma_i$  を二重計算することになるので、式 (31), (32) の  $V_i$  には  $(V_i - Ma_i)$  を用いるのが妥当である。このことより、発生量と到着量は一致し、分布量については、

$$N_{ij} = M \left( \frac{\nu}{\bar{\tau}} + 1 \right) w_i P_{ij} \dots \dots \dots (33)$$

を得る。

式 (33) が求める交通需要モデルである。トリップ主体の社会経済的特性によって1日の交通関連行動時間は先決されており、 $\bar{\tau}$  の増減がトリップ機会の増減を定める。トリップを行う段階における意志決定に影響を及ぼす要因、つまり通行時間が変化すると、それに応じて後述のように  $P_{ij}$  が定められ、その結果が  $\bar{\tau}$  の変化となって表われる。したがって、ゾーン間通行時間の変化はゾーン間の交通量の相対的変化だけでなく絶対数の変化にも影響することを式 (33) は示している。この点が、このモデルが重力モデルやその他のモデルの構造と根本的に異なるところである。

#### 4. 推移確率の推定法

##### (1) エントロピー・モデル

これまでの論理の展開において、 $P_{ij}$  は所与のものとして議論してきた。しかし、式 (33) のマルコフ再生交通モデル (以後、M.R.T. モデルと略称する) によってゾーン間需要量を求めるためには、 $P_{ij}$  の具体的な値を求める必要がある。

$P_{ij}$  を求めるにあたっては、国沢の1因子情報路に関するエントロピー・モデル<sup>11)</sup>を利用する。すなわち、人のトリップ行動に関し次のような行動仮説を立てる。

- (I) トリップ主体は目的地の選択にあたり、できるだけ通行時間を小さくしたいと考える。
- (II) トリップ主体は目的地の選択にあたり、何の制約もなく各自の自由意志によってできるだけ自由勝手な選択をしたいと考える。

(I), (II) を同時に満足するような均衡値  $P_{ij}$  を求めるには、ある制約条件のもとで  $H/\bar{t}$  を最大にすればよいことが国沢によって証明されている。ここに、 $H$  はトリップ行動のあいまいさを表すエントロピーである。

ところで、上の仮説はすべての交通行動にあてはめるには多少疑問が残る。自由度の高い「買物」や「娯楽」トリップなどには適用可能としても「通勤、通学」などは比較的固定した目的地を選んでるので、システム全体としてはある種の統計的規則性をもち、通行時間のみ

を意志決定要因とした場合のエントロピーは必ずしも最大化されないだろう。これはトリップ主体の意志決定行動の支配要因が通行時間のみでなく滞留時間にも深く関係しているからであると考えてみよう。すなわち、トリップ主体は1トリップ過程の所要時間を最小にしようと行動する。しかも、通行時間は滞留時間との関係で定まると仮定するならば、 $P_{ij}$  を求める問題は次のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \sum_j w_i P_{ij} &= w_j \\ \sum_j P_{ij} &= 1 \\ \frac{\bar{t}}{\bar{c}} &= c \text{ (定数)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

の制約条件のもとで、

$$- \sum_j \sum_j w_i P_{ij} \log w_i P_{ij} / \bar{c} \dots\dots\dots (35)$$

を最大にする。ただし、 $w_i$  は前もって与えられているものとする。また、

$$H = - \sum_j \sum_j w_i P_{ij} \log w_i P_{ij}$$

である。

この問題に対応したラグランジュ関数は

$$L = \frac{H}{\bar{c}} + \sum_j \lambda_j (w_j - \sum_j w_i P_{ij}) + \sum_j \mu_j (1 - \sum_j P_{ij}) + k \left( c - \frac{\bar{t}}{\bar{c}} \right) \dots\dots\dots (36)$$

最適解  $P_{ij}^0$  は、 $\partial L / \partial P_{ij} = 0$  より

$$P_{ij}^0 = \alpha_i \beta_j Z_{ij} \dots\dots\dots (37)$$

ただし、

$$Z_{ij} = \exp \{ -1 - (r - k \cdot c) s_i - (r + k - k \cdot c) t_{ij} \} \dots\dots\dots (38)$$

ここに、

$s_i$ : ゾーン  $i$  の滞留時間

$t_{ij}$ : ゾーン間通行時間

$$r = \frac{H}{\bar{c}}, \quad c = \frac{\bar{t}}{\bar{c}}, \quad k \text{ は未定係数}$$

また、

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 \text{ より} \\ \alpha_i = w_i / \sum_j \beta_j Z_{ij} \dots\dots\dots (39)$$

$$\beta_j = w_j / \sum_i \alpha_i Z_{ij} \dots\dots\dots (40)$$

が成り立つ。

式 (38) において、 $s_i$  は前もって与えられ、またゾーン  $j$  に無関係なので式 (38) は

$$Z_{ij} = \exp \{ - (r + k - k \cdot c) t_{ij} \} \dots\dots\dots (38.a)$$

と置けることに注意したい。

ところで、この解が  $H/\bar{c}$  を最大化する場合の解を含むことを示そう。式 (38) において

a)  $r - k \cdot c = 0$  の場合

$$k = r/c = H/\bar{c} \text{ となり}$$

$$Z_{ij} = \exp (-1 - k t_{ij}) \dots\dots\dots (41)$$

を得る。これは  $H/\bar{c}$  を最大化する場合の解に一致する。また、上式のように通行時間  $t_{ij}$  にかかる係数は滞留時間を含まず、推移確率に滞留時間が影響しないことを示している。

b)  $k=0$  の場合

式 (34)、(35) の最大化問題で  $\bar{t}/\bar{c} = c$  が制約条件にならない場合に相当し、式 (38) は次式のように変形できる。

$$Z_{ij} = \exp (-1 - r t_{ij}) \dots\dots\dots (42)$$

通行時間にかかる係数は滞留時間を含み、 $\bar{t} < \bar{c}$  であるから  $r$  は a) における  $k$  よりも小さい。すなわち、滞留時間の影響のため通行時間の推移確率に与える影響が a) の場合に比べ小さくなる。 $k$  の増加に伴い通行時間の推移確率に与える影響は増加するが、 $k$  が  $H/\bar{c}$  に一致する時点では単位通行時間当りエントロピー最大化問題の解に等しくなるため、 $k$  のそれ以上の大きな値にはそのもつ意味を付与しにくい。したがって、 $k$  の存在範囲は

$$0 \leq k \leq - \sum_j \sum_j w_i P_{ij} \log w_i P_{ij} / \bar{c} \dots\dots\dots (43)$$

と考えるのが妥当であろう。

## (2) モデルのキャリブレーション

$P_{ij}^0$  は陽表的に求めることはできないが、キャリブレーションによってその近似解  $P_{ij}$  を求めることができる。 $P_{ij}$  のキャリブレーションには行列尺度法 (matrix scaling method)<sup>12)</sup> を用いる。行列尺度法によって  $P_{ij}$  を求めるにあたっては、まず  $w_i$  が先決されている必要がある。 $w_i$  は実績値が与えられている場合はその決定は容易であるが、将来値の推定には原単位法によらねばならないだろう。原単位法を用いて  $w_i$  を推定する場合、将来時点においてトリップ主体の平均トリップ数は変化するにしても各ゾーンのトリップ発生強度は不変でネットワークの変更や土地利用の変化に影響を受けないと仮定する必要がある。しかし、長期予測、あるいはネットワークや土地利用に大きな変化があると予想できる場合には、これらの関連において  $w_i$  が予測できると都合がよい。M.R.T. モデルでは相対的発生ポテンシャル  $a_i$  との関連で  $w_i$  を予測しようとする。以下、現況値や原単位法によって  $w_i$  が与えられる場合と、 $a_i$  から  $w_i$  を決定する場合についてモデルのキャリブレーション法を述べよう。

a)  $w_i$  が所与の場合

ここでは、原単位法などにより将来値が与えられた場合というよりはむしろ、 $Z_{ij}$  にかかる係数を推定するため現況値から  $w_i$  が与えられる場合について述べる。というのは、未定係数  $k$  の値さえ推測できるならば後の



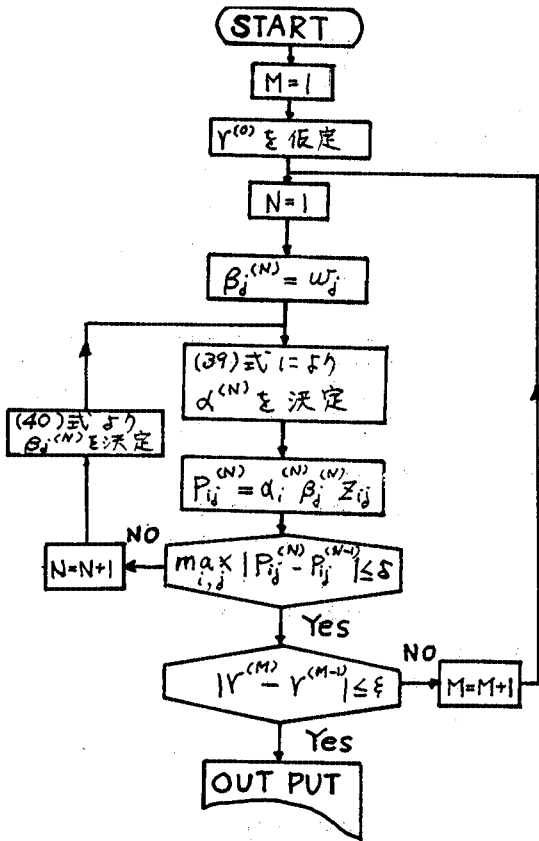


図-6 行列尺度法のフロー・チャート

計算方法は変わらないからである。

$Z_{ij}$  にかかる係数  $r, c, k$  のうち、 $r$  と  $c$  は実績値より求めることができ、したがって OD 交通量の実績値とモデルによる計算値との適合度が最大になるように  $k$  が決定できる。しかし、 $r$  の値が将来時点では変化すると予想できる場合、実績値より求まる  $r$  をそのまま将来推計に用いるのは不合理である。したがって、M.R.T. モデルでは  $r$  が自動的に求められるようキャリブレーションが構成される。この場合の行列尺度法のフロー・チャートを 図-6 に示す。また、 $k$  の決定および  $N_{ij}$  の求め方は次のようなステップを踏む。

ステップ 1)  $k$  の値を適当に仮定し、 $Z_{ij}$  には式 (41) を用い、行列尺度法により、 $k, P_{ij}$  を求める。

ステップ 2) 現況値より  $c$  を求める。 $r$  の初期値を  $r = -\sum_i \sum_j w_i P_{ij} \log w_i P_{ij} / \bar{c}$  で与える。 $Z_{ij}$  には式 (38.a) を用い、行列尺度法により、 $r, P_{ij}$  を決定

ステップ 3) 新しい  $P_{ij}$  が求められるたびに M.R.T. モデルで  $N_{ij}$  を求めておき、 $\chi^2$  の値を求める。

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j (N_{ij} - N_{ij}^*)^2 / N_{ij}^*$$

$N_{ij}^*$  は実績値

ステップ 4)  $k$  の値を減少させ、 $k=0$  になるまでステップ 2)～ステップ 3) の計算を行い、 $\chi^2$  を最小にする  $k$  を決定する。

b) 相対的発生ポテンシャル  $a_i$  より  $w_i$  を求める方法

M.R.T. モデルでは相対的発生ポテンシャルを  $a_i = w_i \sum_j P_{ij} \bar{r}_{ij} / \sum_j \sum_j w_i P_{ij} \bar{r}_{ij}$  で評価するが、これより  $w_i$  を求める方法について述べよう。 $a_i$  は昼間人口や夜間人口、あるいは世帯分布などの比較的推計が容易な人口指標によって与えられるべきだろう。ところで、 $a_i$  から  $w_i$  を求めるにしても  $P_{ij}$  が先決されている必要があり、また、エントロピー最大化原理を適用するにあたり  $w_i$  は所与のものとしているので  $P_{ij}$  は  $w_i$  が与えられないことには求めることができない。そこで次のような繰り返し計算によって  $w_i, P_{ij}$  を求める。

ステップ 1)  $w_i^{(1)} = a_i$  とおく

ステップ 2) 行列尺度法により  $P_{ij}^{(1)}$  を決定

$$a_i = \sum_j w_i^{(1)} P_{ij}^{(1)} \bar{r}_{ij} / \sum_i \sum_j w_i^{(1)} P_{ij}^{(1)} \bar{r}_{ij}$$

により  $a_i^{(1)}$  を求める。一般に、

$$\max_i |a_i - a_i^{(l)}| \leq \epsilon$$

ならば計算は終了する。しかし、この判定規準を満たさないならば、

ステップ 3)

$$w_i^{(l)} = \left( \sum_j \sum_j w_i^{(l-1)} P_{ij}^{(l-1)} \bar{r}_{ij} \right) \cdot a_i / \sum_j P_{ij}^{(l-1)} \bar{r}_{ij}$$

により新しい  $w_i$  を求め、ステップ 2) に戻る。

以上の計算を上述の判定規準を満足するまで繰り返す。

### 5. 岐阜市への適用例

中京圏都市群パーソントリップデータのうち岐阜市について M.R.T. モデルを適用した計算例をここに示そう。岐阜市のゾーン区分は 図-7 に示す通りである。今回の分析はマルコフ理論により忠実に従うという方針で岐阜市を 1 つの閉じたシステムとして考え、次の条件を満足するパーソントリップのみを分析対象とした。

- i) 第 1 トリップの起点が岐阜市域内にある。
- ii) 域内にすべてのトリップエンドをもつ。
- iii) 完結トリップである。

上述の条件を満足するパーソン数は 257 367 (人/日) で、これらの人による OD パターンは 表-2 のようになる。総トリップ数は 724 817 で 1 日 1 人当たりトリップ数は 2.816 となる。また、ゾーン間通行時間は「岐阜

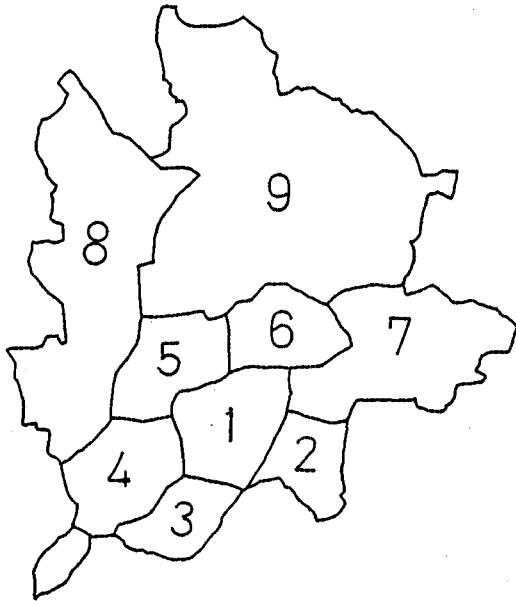


図-7 岐阜市のゾーン区分

表-2 岐阜市全パーソン OD 表 (閉じたシステムと考えた場合)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	183 110	17 221	8 956	18 960	12 240	7 829	2 917	5 136	4 127
2	17 184	63 781	3 255	2 188	2 917	1 344	954	1 079	387
3	9 012	2 830	18 599	2 551	981	785	336	556	307
4	19 288	2 638	2 469	53 414	2 464	1 374	702	876	835
5	11 875	1 741	1 011	2 581	54 119	3 424	385	2 990	753
6	7 889	1 232	759	1 370	3 366	34 849	672	781	2 721
7	2 948	981	364	672	365	589	17 499	196	139
8	5 247	1 102	526	984	2 722	782	196	39 881	224
9	4 017	416	445	807	781	2 666	139	196	35 011

$N=724\ 817\ \bar{t}=232.50$

表-3 ゾーン間通行時間 (単位:分)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	12	20	21	19	23	26	38	34	38
2	20	11	24	29	33	32	26	41	40
3	21	24	12	24	34	38	38	34	43
4	19	29	24	11	33	35	44	33	49
5	23	33	34	33	13	19	38	24	33
6	26	32	38	35	19	13	29	33	26
7	38	26	38	44	38	29	16	51	29
8	34	41	34	33	24	33	51	12	49
9	38	40	43	49	33	26	29	49	15

市における交通特性<sup>13)</sup>より表-3のように与えられる。平均通行時間は16.4(分)であった。また、職種別の交通関連行動時間およびゾーン滞留時間は表-4,5のように求められる。全職種の交通関連行動時間は440(分)となる。

以上の数値を入力として岐阜市のOD交通量を推定してみた。

表-4 職種別交通関連行動時間 (単位:分)

職 種*	行動時間	
就業者 A	412	就業者 A: 農林漁業
就業者 B	575	就業者 B: 技能工・生産工, 事務, 探鉱採石
就業者 C	537	就業者 C: 運輸通信, 管理, 販売
就業者 D	518	就業者 D: 自由・サービス, 専門・技術, 保安
就学者	530	就学者: 学生, 生徒・児童
主婦・その他	191	主婦・その他: 主婦, 無職, その他
全職種	440	* 中京都市群パーソントリップ調査報告書に準ずる。

表-5 ゾーン滞留時間 (単位:分)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
199	230	238	238	208	227	235	219	216

a) 相対的発生力が所与のとき

実績値より  $w_i$  を求めると表-6 のようになる。したがって、パーソン数  $M=257\ 367$ , また、 $\nu=T-\bar{t}$  より、 $\nu=424$  (分) を与えて M.R.T. モデルを適用する。OD パターンの検討は、次の (A)~(C) のおのおの場合について行った。

(A) 実績値より  $r$  を与え、 $\chi^2 \rightarrow \text{Min}$  となる  $k$  を求める。

(B) 繰り返し計算によって  $r$  を求めると同時に  $\chi^2 \rightarrow \text{Min}$  となる  $k$  を求める。

(C) 滞留時間の影響を考慮しない場合、 $r$  は繰り返し計算によって求める。

おのおの場合の結果について、 $r, k, H/\bar{t}, \chi^2$  の値を一括して表-7 に与える。また、OD パターンは表-8, 9, 10 のように得られた。

表-7 における (A), (B) の結果の比較から判るように、 $k, r$  の値には若干の差が生じるが、 $\chi^2$  の値にはほとんど差がないので、繰り返し計算によって  $r$  を求めても実用上の問題はない。(A) で得た  $k$  の値を用いて  $r$  を求めると精度はさらによくなる。また、(B), (C) の  $H/\bar{t}$  の項を比較すると、(C) では滞留時間の影響がないため、単位通行時間あたりのエントロピーは最大化

表-6 実績値から求められた  $w_i$

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
発生量	260 496	91 939	35 957	84 060	78 830	53 640	23 753	51 664	44 478
$w_i$	0.3594	0.1268	0.0496	0.1160	0.1088	0.0740	0.0328	0.0713	0.0614

表-7 方法 (A), (B), (C) のおのおの場合について求められる諸量

	実績値	(A)	(B)	(C)
$r$	0.01314	0.01314	0.01375	0.01294
$k$	—	0.15420	0.15251	0.19066
$H/\bar{t}$	0.18643	—	0.18931	0.19066
$\chi^2$	—	95 928	96 190	161 114

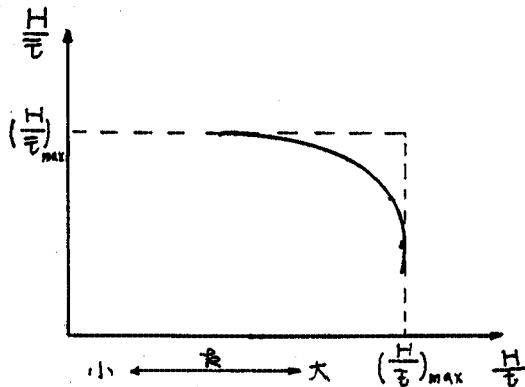


図-8  $H/i$  と  $H/\bar{i}$  および  $k$  の関係

され、0.19066 と実績値より大きめの値を出している。(B) では現実の OD パターンに近似させることによって滞留時間の影響を引き出している。そのため、単位通行時間あたりのエントロピーは最大化されず、より現実

表-8 方法(A)によるゾーン間交通量の計算値

O \ D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
1	168 327	24 841	11 947	27 261	15 552	7 654	1 105	2 572	1 601	260 860
2	24 847	52 423	3 856	2 943	1 679	1 545	3 727	444	604	92 068
3	11 942	3 854	14 170	3 616	807	340	320	746	212	36 007
4	27 232	2 939	3 514	46 110	1 574	906	209	1 455	139	84 078
5	15 623	1 686	811	1 582	28 589	11 876	573	6 382	1 817	78 939
6	7 703	1 554	342	912	11 898	23 942	1 848	1 231	4 283	53 713
7	1 114	3 757	323	211	575	1 851	13 354	70	2 532	23 787
8	2 588	447	751	1 466	6 393	1 230	69	38 654	138	51 736
9	1 628	614	216	141	1 839	4 326	2 553	139	33 085	44 541

$N=725\ 826$   $\bar{i}=233.01$

表-9 方法(B)によるゾーン間交通量の計算値

O \ D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
1	167 561	24 896	11 966	27 314	15 630	7 696	1 120	2 637	1 608	260 428
2	24 921	52 079	3 873	2 977	1 703	1 562	3 734	458	608	91 915
3	11 958	3 866	14 031	3 631	817	344	324	763	214	35 948
4	27 272	2 969	3 628	45 814	1 595	918	213	1 489	141	84 038
5	15 678	1 707	820	1 603	38 314	11 832	580	6 464	1 812	78 809
6	7 764	1 574	348	927	11 899	23 750	1 855	1 259	4 249	53 625
7	1 136	3 784	329	216	586	1 865	13 240	72	2 519	23 747
8	2 599	451	752	1 470	6 351	1 230	70	38 317	140	51 650
9	1 675	633	233	147	1 881	4 387	2 587	146	32 787	44 466

$N=724\ 627$   $\bar{i}=233.06$

表-10 方法(C)によるゾーン間交通量の計算値

O \ D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
1	185 328	21 024	10 478	23 863	12 411	5 571	561	1 345	749	261 332
2	21 045	61 027	3 087	1 851	962	926	2 884	185	267	92 234
3	10 463	3 079	18 297	2 888	479	178	176	422	91	36 072
4	23 796	1 844	2 884	53 492	899	489	87	794	45	84 330
5	12 560	973	485	913	46 094	11 679	309	4 996	1 073	79 083
6	5 680	944	181	500	11 766	29 376	1 379	720	3 265	53 811
7	577	2 962	181	90	314	1 391	16 448	23	1 843	23 829
8	1 353	186	426	801	4 966	710	23	43 196	169	51 830
9	800	285	97	48	1 131	3 417	1 913	47	36 883	44 621

$N=727\ 125$   $\bar{i}=231.83$

に近い値となっていることが理解できよう。この結果からも判るように、 $k$  は滞留時間の影響度を表わす尺度であり、 $k$  の値が大きくなり  $H/\bar{i}$  の値に近いほどゾーン間推移行動への滞留時間の影響は小さくなり、零に近いほど大きくなる。この関係は 図-8 のように表わすことができる。

将来予測について、 $k$  の値は現況分析の結果をそのまま用いることができよう。なぜならば、意志決定行動への通行時間と滞留時間の影響の度合はそうそう変化するとは考えられないからである。ただし、 $k$  はトリップ目的ごとに異なった値をとるものと思われる。

b) 相対的発生ポテンシャルより  $w_i$  を与える場合

発生ポテンシャルには昼間人口を用いた。昭和 46 年度の岐阜市の昼間人口分布は表-11 のように与えられ、これより  $a_i$  が求まる。 $a_i$  を与えて  $w_i$  を求めると、3 回の繰り返し計算後、表-12 のような結果を得た。

また、このときの  $w_i$  を用いて  $a_i$  を逆算すると正確に

表-11 の  $a_i$  に一致する。推定された  $w_i$  の擬似相関係数は  $\bar{R}=0.9936$  でかなり精度がよい。なお、擬似相関係数は次式で定義される<sup>10)</sup>。

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{\sum_i \hat{Y}_i Y_i - n \bar{Y}^2}{\sum_i Y_i^2 - n \bar{Y}^2}}$$

ここに、

$\hat{Y}_i$  = 計算値、 $Y_i$  = 実績値

$\bar{Y}$  = 実績値の平均値

擬似相関係数を求めるにあたっては、M.R.T. モデルの構造よりくる影響を除去するため、 $\hat{Y}_i = N * w_i$  として  $\hat{Y}_i$  を計算している。 $N$ \* は総トリップ数の実績値。推定された  $w_i$  を用いた場合の発生交通量およびゾーン間交通量は 表-13 のようになる。以上の計算はパーソン・トリップに適用した例であるが、自動車交通に対し、駐車時間を与えて計算した例でも良好な結果を得ている。ただし、その場合には  $w_i$  を与えて  $a_i$  を求めている<sup>15)</sup>。このように、 $w_i$  か  $a_i$  のいずれか一方が与えられると、式 (25) を用いて他方が推定できる。

将来の土地利用計画より人口配置が定まると、これを発生ポテンシャルとして交通ネットワークとの関連でトリップ発生強度  $w_i$  を求めることができ、交通計画と土地利用計画相互のフ

表-11 昼間人口から求められた  $\alpha_i$ 

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
昼間人口	138 650	59 483	29 698	53 484	40 564	28 218	15 481	30 439	26 440
$\alpha_i$	0.3282	0.1408	0.0703	0.1266	0.0960	0.0668	0.0367	0.0721	0.0626

表-12  $\alpha_i$  を与えて式 (25) から計算された  $w_i$ 

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$w_i$	0.3572	0.1335	0.0640	0.1163	0.0989	0.0632	0.0333	0.0715	0.0621

表-13  $w_i$  の計算値を用いて算定されたゾーン間交通量

$$r=0.01379 \quad k=0.15251 \quad H/E=0.18992$$

D \ O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
1	164 956	25 430	14 214	27 043	14 653	6 875	1 120	2 626	1 611	258 526
2	25 458	55 247	4 775	3 058	1 657	1 448	3 880	473	632	96 628
3	14 202	4 766	20 126	4 338	924	371	391	917	258	46 293
4	26 998	3 049	4 334	45 646	1 504	824	214	1 492	141	84 203
5	14 704	1 661	928	1 512	34 256	10 078	553	6 139	1 730	71 560
6	6 943	1 461	375	834	10 143	19 299	1 688	1 140	3 870	45 753
7	1 138	3 938	398	218	560	1 698	13 515	73	2 572	24 110
8	2 588	466	904	1 473	6 029	1 112	71	38 676	416	51 734
9	1 684	660	270	148	1 803	4 008	2 648	148	33 613	44 983

$$N=723\,792 \quad \bar{r}=233.48$$

ードバックが少なからず考慮することが可能となる。

## 6. 考 察

マルコフ再生交通モデルの構造より、以下のようなことがいえよう。

(1) 交通需要量のゾーン間分布に大きく影響を与えるのは各ゾーンのトリップ主体の数量であり、これにより各ゾーンのトリップ発生強度をある程度まで説明できる。しかし、ゾーン特性を表わす滞留時間および交通施設の整備度に応じて決まる通行時間の影響も大きく、これはゾーンのトリップ発生強度、1人当たりトリップ数決定の要因となる。

(2) 比較的短い期間の交通量予測では、人の1日あたり交通関連行動時間およびゾーン滞留時間は変化しないと考えられるので、交通量の伸びは人口の伸びに応じて、また交通施設の整備による通行時間の減少に応じて決定される。

(3) 長期予測の場合は、交通関連行動時間およびゾーン滞留時間の推定が問題となる。労働時間が減少すれば娯楽時間が増大し、交通関連行動時間そのものは一定値を保つという論理も成り立つが、この点についてはなお一層の調査、解析を必要としよう。滞留時間は地域全体の平均値を考えれば、滞留時間の短い性質のトリップの増加、すなわち、業務、社交、娯楽などのトリップ目的の増加によって減少する。交通関連行動時間が一定値を保つと仮定できるならば、その減少分に見合うだけのトリップ増加が観測されよう。

## (4) 自動車交通に対し M.R.T.

モデルを適用する際には自動車の交通関連行動時間を見積る必要がある。滞留時間は駐車時間に置き換えられる。そして駐車時間は駐車施設の容量に密接に関係しているだろう。したがって、駐車施設の整備度に応じたトリップ量の変化具合が推定できよう。

(5) モデルに用いられる通行時間は、交通量の影響を考慮した均衡フロー時の通行時間である。したがって、均衡交通量の推定には現実的な供給関数を用いることが要求される。

(6) 本論文ではトリップ目的についての集計モデルのみを取り上げたが、交通関連行動時間のうち各トリップ目的に配分されている時間数を求めることができるならば、トリップ目的別の需要量が推定できよう。行動時間

の内訳はセミ・マルコフ過程を用いて分析することが考えられる。また、職業別に層化した行動時間を用いるなどの工夫も必要と思われ、今後の課題としたい。

## 7. 結 論

都市を1つの閉じたシステムとしてみる限り、その内部の交通はチェーンを形成する完結トリップとして取り扱える。そして、いま1つの特徴は1トリップ過程が連続して生起する再生過程を構成していることである。状態数が2つ以上のとき、すなわち、一般の交通システムにおいては、交通はマルコフ再生過程とみなすことができる。したがって、時間の関数として交通量を求めることができ、また、日交通量は定常過程によって与えられる。

本論文では提案されたところの M.R.T. モデルの特徴は、人の1日の交通関連行動時間とゾーンでの滞留時間をモデルに導入している点にあり、また、1トリップ過程の所要時間と交通関連行動時間の関係でトリップ機会を求めている点である。したがって、通行時間の変化はゾーン間交通量のみでなく発生量にも変化を与える。ただ、行動時間や滞留時間といった変数は従来ほとんど使用されることがないので、その特性および推定法については今後の課題として残される。

### 参 考 文 献

- 1) Beckmann, M.J., McGuire, C.B. and Winsten, C.B.: Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, 1956.
- 2) M. Wohl, B.V. Martin: Traffic System Analysis,

- McGraw-Hill, 1967.  
加藤 晃・山根 孟訳：計画者と技術者のための交通工学（上），鹿島出版会，1973.
- 3) Golob, T.F. and Beckmann, M.J. : A Utility Model for Travel Forecasting, *Transportation Science*, 4, 1971.
  - 4) Overgaard, K.R. : Traffic Estimation in Urban Transportation Planning.  
佐佐木 綱 訳：都市運輸計画における交通量推定，関西鉄道協会都市交通研究所，昭和43年。
  - 5) 佐佐木綱：都市における OD 交通量の定常性，道路，pp. 51-55, 昭和41年4月。
  - 6) Sasaki, T. : Estimation of Person Trip Patterns Through Markov Chains, 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, California, 1971.
  - 7) Hemmens, G.C. : The Structure of Urban Activity Linkages ; Urban Studies Monograph, Center for Urban and Regional Studies, University of North Carolina, 1971.
  - 8) 中川三郎：交通機関選択性向に関する考察（その2），土木学会第29回年次学術講演会講演概要集，第4部，昭和49年10月。
  - 9) Velibor, Vidakovic : A Study of Individual Journey Series : An Integrated Interpretation of the Transportation Process, 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, California, 1971.
  - 10) Cinlar, E : Markov Renewal Theory, *Advances in Applied Probability Theory*, 1, pp. 123-187, 1969.
  - 11) 国沢清典：エントロピー・モデル，日科技連，1975.
  - 12) Potts, R.B., Oliver, R.M. : Flows in Transportation Networks, Chap. IV, Academic Press, 1972.
  - 13) 中京都市群パーソントリップ調査協議会岐阜市部会，地域問題研究所：岐阜市における交通特性。
  - 14) 佐佐木綱：都市交通計画，国民科学社，昭和48年。
  - 15) 加藤 晃・宮城俊彦：マルコフ再生理論による都市交通モデルについて，土木学会第29回年次学術講演会講演概要集，第4部，昭和49年10月。

(1975.10.13・受付)