

時空間におけるトリップチェーンの記述モデル

TRIP CHAIN MODELS IN THE TIME/SPACE

近藤 勝直*・上野 義弘**

By Katsunao KONDO and Yoshihiro UENO

1. ま え が き

トリップチェーンを都市平面で記述する方法については従来から数多くの研究例がある。しかし現実のトリップチェーンは、この都市平面 (space) に時間軸 (time) を導入したところの時空間において生じていることに注目しよう。トリップチェーンを時空間で把握する方法として現在までに考えられているのは次の 2 つである。

- ① マルコフ再生理論を用いる方法^{1), 2)}
- ② Time/Space Analysis^{3)~6)}

前者の方法は周知のように、都市平面における定常な単純マルコフ連鎖モデルに滞在時間分布を導入しようとするものであり、後者の方法は特に欧州において最近台頭してきたものであり、時間軸において各種の activity への時間配分を問題にしようとするミクロな分析方法である。

パーソントリップ手法によって交通需要推計を行う場合、総交通生成量はトリップ目的別生成原単位と職種別人口を得てあらかじめ決定されており、ついでそこにトリップ目的の連関モデル (= 吸収マルコフ連鎖モデル) を導入することにより 1 日の行動パターンを追跡できることが明らかにされてきている。そしてそれは時刻を捨象した場合の 1 日の交通量の分布パターンを求めるのに有効であった。

しかし交通施設の容量計画にとってはピーク時の交通量を必要とし、さらに都市内諸活動に対してある種の時刻制限 (たとえば時差出勤など) を設けるときの波及効果は恐らく交通パターンに多大の影響を及ぼすであろうことから、その政策評価にとっては交通パターンと時刻との関係を把握しておくことが是非とも必要となる。前者に関する情報はトリップの時刻分布や、各種の交通施

設での滞留時間分布が中心となり、それは伝統的な方法 (たとえばピーク率という概念) で推計することが可能である。しかし後者の場合、恐らく“社会制度の変更”として位置づけられるであろう各種の時間帯規制や時刻に関する調整を含んでいることから、ピーク率という一元的な尺度では複雑な交通パターンの変化を表現しきれないであろう。交通パターンの諸変化の積み重ねとしてピーク交通量を算定する必要がある。時刻調整に関する主なものは、

- ① 勤務時間の短縮 (一方での余暇時間増)
- ② 時差出勤, 時差退社
- ③ 商店の営業時間帯の変更 (地域別, 業態別)

などである。① については、勤務時間が短縮されることにより、必要な業務活動を短縮された時間内で消化する必要上、業務活動 (トリップ) の密度が高まる可能性がある反面、業務活動の合理化・システム化を促すという側面も現われるであろう。そして勤労者の個人的側面としてはそれは余暇時間増となって現われるので、自由裁量トリップの生成機会が増大することになる。② については、トリップの時刻分布の形状がやや変更を受けただけであり、交通パターンにはそれほど影響しないであろう。なぜなら、これは拘束的なトリップ目的だからである。③ については、商店従業者への影響も無視できないが、商店への顧客の買物交通が大きな影響を受ける。特に百貨店・スーパー・娯楽施設などの営業時間帯の変更は基本的な生活パターンの変更にまで波及するであろう。また営業時間が短縮されるとなると、買物客の特定の時間帯への集中を呼ぶことにもなるであろう。

このように時間・時刻に関する社会制度の変更は交通に多大の影響を与える。しかしトリップの絶対量は恐らくトリップメーカーの内的必要性に由来するものであって、さほど影響を受けないであろう。最も影響を受けるのはトリップチェーンである。すなわちトリップ目的の連鎖の組合せが変化するのである。したがって上記のよ

* 正会員 工博 福山大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 パシフィック・コンサルタンツ (株)

うな制度の変更がある場合には、将来予測法としてのマルコフ連鎖モデルが適当であるかどうかはいまのところ定かではない。短期予測ならびに時刻に加えられる変更が微量であるかぎりにはマルコフ連鎖モデルは依然として有効である。そしてその変更が自由裁量行動を促すようなものであればあるほどマルコフ連鎖モデルは生きてくる。しかし他方、その変更が自由裁量の余地をせざるようなものであれば、交通パターンは画一化の傾向を示すことになり、マルコフ連鎖モデルの有効性が薄れる。そしてその際には Time/Space Analysis のようなミクロな方法（個人の選択行動を記述するモデル）を用いて、トリップメーカーの行動規範にまで遡行して試みることによってマクロ化（個人の集計もしくは流れの量についてのモデル化）の方向を模索することになるのである。これは今後の研究に待つところが大きい分野である。本稿では交通需要予測を念頭に置いたマクロ的なモデルを構築するという立場で、マルコフ連鎖モデルを基軸としたトリップチェーンの時空間モデルの展開を試みる。

2. トリップチェーンの平面的形態と時空間的形態

(1) 都市平面におけるトリップチェーンの吸収マルコフ連鎖モデル：概要^{7),9)}

都市における人の移動行動を順を追って追跡してみると、たとえば自宅 (home) をベース (base) として、自宅→出勤→買物→帰宅というようなサイクル (cycle) を構成していることがわかる。このようなトリップの連なりをわれわれはトリップチェーンと呼んでいる。この軌跡を都市平面において模式的に図化したのが図-1である。次々と目的間を推移しつつ、空間的な移動を行ってゆく様子が表わされている。従来のトリップチェーン研究(トリップ目的を明示的に取り扱っているものをさす)においては、時間の推移は考慮に入れず、連鎖するトリップのみに着目して、それを追跡する試みがなされてきた^{7),9)}。トリップチェーンの記述モデルとしてはよくマルコフ連鎖理論が用いられるが、パーソントリップのトリップチェーンの記述という意味からは、目的関連プロセスを基本にして人の1日の動きを追跡しようとする吸

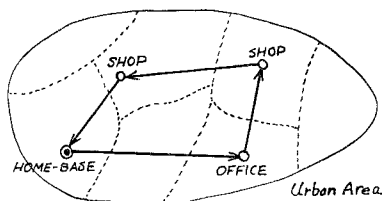


図-1 都市平面のトリップチェーン

取マルコフ連鎖モデルが代表的であり⁷⁾、その実証的分析についてもいくつかの研究報告がなされてきている^{9),10)}。ここでは後節でのモデルの展開のための準備として、この吸収マルコフ連鎖モデルを概略的に振り返っておこう。

状態の集合を $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 、そのうち吸収状態を $S_A = \{S_1, S_2, \dots, S_r\}$ 、過渡状態を $S_T = \{S_{r+1}, S_{r+2}, \dots, S_m\}$ とし、このとき、各状態間の推移確率は次のような推移確率行列 Q で表わす。

$$Q = \begin{matrix} & S_A & S_T \\ \begin{matrix} S_A \\ S_T \end{matrix} & \begin{bmatrix} I & O \\ R & Y \end{bmatrix} \end{matrix}$$

I : 単位行列, Y : 正行列

R : 列ベクトル, O : 行ベクトル

この推移行列 Q を媒介にして状態が次々と推移してゆく過程を吸収マルコフ過程という。いま吸収状態として帰宅目的を、過渡状態として帰宅目的以外の非吸収的なトリップ目的を対応させると、 R はある非吸収的なトリップ目的から帰宅する確率を要素とするベクトル、 Y は非吸収トリップ目的間の推移確率行列を与える。以下ではこれらを帰宅ベクトル、目的間推移行列と呼ぶことにする。

n 段階目の推移行列 Q^n は次のような形となる。

$$Q^n = \begin{bmatrix} I & O \\ R^{(n)} & Y^n \end{bmatrix},$$

$$R^{(n)} = (I + Y + Y^2 + \dots + Y^{n-1})R$$

Y^n の $i-j$ 要素は、いま考えている過程があるトリップ目的 i で出発して n 回の推移の後にあるトリップ目的 j を行う確率を与えている。この Y^n を $n=0$ から $n=\infty$ まで加算した行列

$$I + Y + Y^2 + \dots = (I - Y)^{-1}$$

は吸収マルコフ連鎖の基本行列と呼ばれており、その $i-j$ 要素は、トリップ目的 i でベースを出発したものが再びベースに戻ってくるまでに行ったトリップ目的 j の回数の期待値を表わしている (Y および $(I - Y)^{-1}$ の定義法は文献 13) に詳しい)。

この目的間推移行列 Y が求まると、これにトリップ目的別ゾーン間推移行列 P を作用させることによって、ベースから出発したトリップを順次追跡してゆくことができる。このプロセスが図-2 に示されている。目的別・ゾーン別の第1トリップ発生数を要素とする行ベクトルを A ,

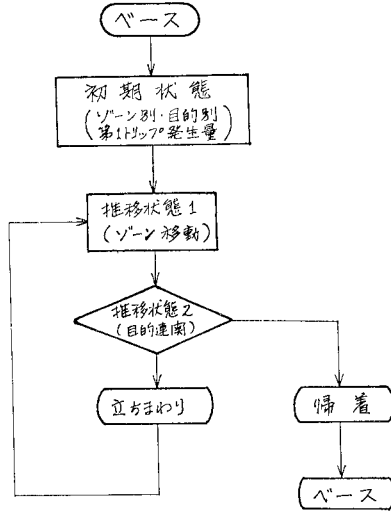
$$A = (A^1, A^2, \dots, A^m, \dots, A^M)$$

M : 非吸収トリップ目的の数

$$A^m = (A_1^m, A_2^m, \dots, A_i^m, \dots, A_N^m)$$

N : ゾーン数

目的間推移行列を \tilde{Y} ,



図一 吸収マルコフモデルによる追跡プロセス

$$\overset{*}{Y} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & M \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ m \\ \vdots \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & Y_{mm'} & \dots \\ Y_{M1} & Y_{M2} & \dots & Y_{MM} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$Y_{mm'} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ N \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{mm'} & & & \\ & y_{mm'} & & \\ & & \ddots & \\ & & & y_{mm'} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ゾーン間推移行列を P ,

$$P = \begin{bmatrix} P^{(1)} & & & \\ & P^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & P^{(M)} \end{bmatrix}$$

$$P^{(m)} = \begin{bmatrix} p_{11}^m & p_{12}^m & \dots & p_{1N}^m \\ p_{21}^m & p_{22}^m & \dots & p_{2N}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1}^m & p_{N2}^m & \dots & p_{NN}^m \end{bmatrix}$$

ただし、 $\sum_{j=1}^N p_{ij}^m = 1$ (for all i and m)

とすると、第1トリップの発エンド数、着エンド数はそれぞれ

$$U_1 = A, V_1 = AP$$

第2トリップの発・着エンド数は

$$U_2 = V_1 \overset{*}{Y} = AP \overset{*}{Y}, V_2 = U_2 P = AP \overset{*}{Y} P$$

と書くことができ、以下同様のプロセスが続行できる。

第 n トリップの発・着エンド数はそれぞれ

$$U_n = A(P \overset{*}{Y})^{n-1} = AP(\overset{*}{Y} P)^{n-2} \overset{*}{Y} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_n = AP(\overset{*}{Y} P)^{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

と求められる。また第 n トリップのOD表 X_n はベクト

ル U_n を対角行列に変換したものを \bar{U}_n とすれば $\bar{U}_n P$ で得られる。

$$X_n = \bar{U}_n \cdot P = A(P \overset{*}{Y})^{n-1} P \dots \dots \dots (3)$$

一方、帰宅トリップについては次のように考えることにより、簡潔に定式化することができる。ベースから出発したトリップは、各段階においてトリップが終了するごとに毎回 R の割合でベースに帰着することになるが、いま \bar{A} をベクトル A を対角化した行列とすれば、第1トリップを行ったものうち次に帰宅トリップを行うものの第1トリップのOD表は $\bar{A} P \overset{*}{R}$ で表わすことができる。ここに $\overset{*}{R}$ は次のような対角行列である。

$$\overset{*}{R} = \begin{bmatrix} R_1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_m & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & R_M \end{bmatrix}$$

$$R_m = \begin{bmatrix} r_m & & & \\ & r_m & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_m \end{bmatrix} \text{ } N \text{ 個}$$

r_m : 第 m トリップ目的から次に帰宅する確率

この $\bar{A} P \overset{*}{R}$ を転置 (transpose) すればそれは帰宅 OD表に等しい。したがって第1トリップからの帰宅 OD表は、

$$H_1 = [\bar{A} P \overset{*}{R}]^t$$

と記せる。同様にして第2トリップからの帰宅 OD表は

$$H_2 = [\bar{A} P \overset{*}{Y} P \overset{*}{R}]^t$$

と記せ、結局第 n トリップからの帰宅 OD表は

$$H_n = [\bar{A} P(\overset{*}{Y} P)^{n-1} \overset{*}{R}]^t \dots \dots \dots (4)$$

と書くことができる。ただし、行列 H_n においては、ベースを出发点する第1トリップの目的と帰宅直前の第 n トリップの目的の両方が保存されている。

1日単位での交通量を求めるには、トリップチェーンの1日完結性の仮定のもとに、 U_n, V_n, X_n, H_n をそれぞれ $n=1$ から始めて、収束するまで加算すればよい。したがって

$$U = A + AP(I - \overset{*}{Y} P)^{-1} \overset{*}{Y} = A + V \overset{*}{Y} \dots \dots \dots (5)$$

$$V = AP(I - \overset{*}{Y} P)^{-1} \dots \dots \dots (6)$$

$$X = \bar{U} P \dots \dots \dots (7)$$

$$H = [\bar{A} P(I - \overset{*}{Y} P)^{-1} \overset{*}{R}]^t \dots \dots \dots (8)$$

がそれぞれ1日のトリップ目的別総発生量、総吸引量、非吸収目的 OD表、帰宅 OD表を与えることになる。

(2) 時空間におけるトリップチェーンの把握

前項でわれわれは時刻を捨象した場合のトリップチェーンの吸収マルコフ連鎖モデルの骨格についてみてきた

わけであるが、実際のトリップチェーンは、都市平面に時間軸を加えた3次元空間（以下時空間と呼ぶ）において生起していることに注目しなければならない。つまり、あるトリップの到着から次のトリップの発生までには時間的遅れが存在しており、この時間的遅れが滞在(sojourn)、すなわち到着ゾーンでの活動時間となっているわけである。Hemmens は人の交通行動が

- ① トリップ目的
- ② 目的地での消費時間
- ③ 目的地の空間的配置

という3つの要因によって特徴づけられることを指摘している。このことは、時空間におけるトリップチェーンがこれら三者によって規定されていること、逆にいえばこれら三者を合理的な形で再構成することができれば、時空間におけるトリップチェーンモデルを構築できることを意味している。図-3 は2種類のトリップチェーンについての、平面的形態と時空間的形態を描いている²⁾。横軸は都市平面(space)を、縦軸は時刻(time)を表わしており、また活動は固定された空間において定義されている。A氏は朝出勤交通を行ってofficeに到着し、退社時刻まで勤務した後、帰宅途中に買物のため商店に立ち寄っている。他方B君は、朝A氏よりやや遅れて大学に向かい、大学で遅くまで研究に没頭し、それが終了するや自宅に直行している。この図は人の行動を視覚的に説明するのに有効であるばかりでなく、次のような特徴を有している。

- ① space上の点は「土地利用」ならびに「施設分布」を与えている。
- ② space上の点を結ぶ線分は「OD分布」である。
- ③ time-spaceにおける斜線はトリップの軌跡を示

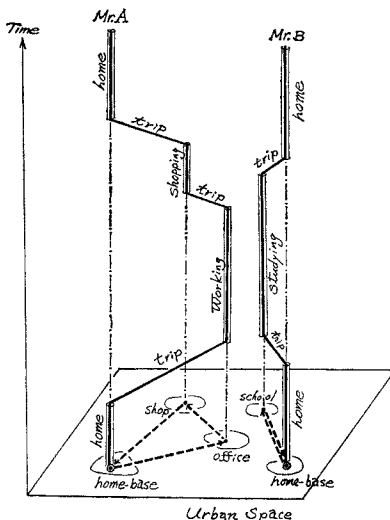


図-3 時空間におけるトリップチェーン

しており、この斜線の傾きは「交通手段」の速度に依存している。

④ time-spaceにおける垂直な線分は「活動時間」を与えている。

⑤ space上に投影された軌跡は、いわゆる「トリップチェーン」を表わしている。

⑥ time軸上に投影された線分の連結は、生活時間の配分を表わしている。

図-3が明示しているこのような諸特徴を念頭に置くとき、space上でのトリップチェーンのモデル、すなわち吸収マルコフ連鎖モデルを時空間へ拡張するという方向が最も自然であり、かつトリップの生成量を別途推計できる¹³⁾ので最も望ましいであろう。そこで次節ではこのような観点から、時空間におけるあり得べきトリップチェーンモデルの2つの方法を展開する。

3. 時空間におけるトリップチェーンの記述モデル

(1) マルコフ再生理論にアナロジーしたモデル¹⁰⁾

目的地での滞在時間分布を導入しマルコフ再生理論を用いてトリップチェーンを表わす試みはすでに数多く存在する^{11),12)}。これらの研究ではトリップ目的についてはほとんど考察が払われていない(文献11)ではゾーン間の推移状態が吸収マルコフ連鎖にみたられている)。すなわち、隠れマルコフ連鎖(Inbedded Markov Chain)はゾーン間のSimple Markov Chainであること、滞在時間分布はゾーンの性格にのみ依存すること、などが仮定されていることが多い。しかし実際問題として滞在時間分布はゾーンの性格よりもゾーンでの活動の種類により強く依存していると思われる。すなわち、従来の研究においては「トリップ目的の連関」と「ゾーンの連関」とが混同されているわけである。そこで本研究ではこの両者をまったく独立したものとして取扱う。したがって、ここでは次のようにモデルの骨組みを考え直すことにする。

① 隠れマルコフ連鎖としては、トリップ目的に関する吸収マルコフ連鎖とゾーン間移動に関する単純マルコフ連鎖の2つを結合させた連鎖を考える。

② 滞在時間分布は、現在の活動と次に行う活動にのみ依存するものとする。

③ トリップ所要時間は、そのトリップの出発地における活動時間に含めるものとする。

④ トリップ目的とトリップ目的地での活動とは同義とする。たとえば「出勤」という状態は本来トリップ目的的名称であるが、ここでは特に断らない限りは、勤務

先での「勤務活動」と同義であるとする。

すなわち、従来のマルコフ再生モデルにトリップ目的の概念と、それらの吸収マルコフ連鎖を組込むことを意味している。

いま $F_{mn}(t)$ を、活動 m にいるものが次に活動 n に推移するという条件のもとでの、活動 m における滞在時間 (= 活動時間) が t 以下であるという、条件付確率であるとしよう。すなわち

$$F_{mn}(t) = P\{T_{k+1} - T_k \leq t | X_k = m, X_{k+1} = n\} \dots\dots\dots(9)$$

ここに X_k は k 番目に行く活動を、 T_k は X_k に入った時刻を示す。いま活動の種類は M 種とし、それらには帰宅目的 (= 在宅) は含まれないものとする。

一方、トリップ目的間推移行列を

$$Y = \{y_{mn}\} \quad (m, n = 1, 2, \dots, M)$$

で表わすとき、目的 m に入ってから t 時間後に目的 n に推移するという条件付確率は

$$Q_{mn}(t) = y_{mn} F_{mn}(t) \dots\dots\dots(10)$$

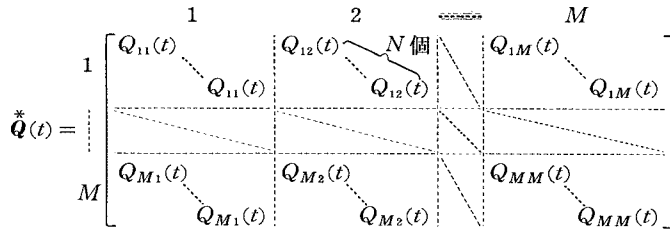
で与えられる。ただし $Q_{mn}(t)$ は $F_{mn}(t)$ の性質より

$$\begin{aligned} Q_{mn}(t) &= 0 \quad (t \leq 0) \\ 0 &\leq Q_{mn}(t) < y_{mn} \quad (t > 0) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{mn}(t) &= y_{mn} \end{aligned}$$

である。この $Q_{mn}(t)$ を要素とする行列を

$$Q(t) = \{Q_{mn}(t)\} = Y \otimes F(t) \dots\dots\dots(11)$$

で表わす。ここに $F(t) = \{F_{mn}(t)\}$ で、演算記号 \otimes は行列 Y と F の対応する要素間の積をとることを表わしている。ここで、この行列 $Q(t)$ の各要素をゾーンの個数 N だけ拡大し、対角に並べた行列を



で表わし、これにゾーン間推移行列 P (2.(1) 参照) を乗じたものを

$$\hat{Q}(t) = \hat{Q}^*(t) \cdot P \dots\dots\dots(12)$$

で定義する。この行列はセミ・マルコフ行列と呼ばれ、ここでは隠れマルコフ連鎖として、目的間の吸収マルコフ連鎖とゾーン間の単純マルコフ連鎖を組み合わせたものとなっている。すなわち、この MN 行 MN 列の行列の要素は

$$\hat{Q}_{mn}^{ij} = y_{mn} F_{mn}(t) p_{ij} \dots\dots\dots(13)$$

となっているから、ゾーン i で活動 m を開始したものが t 時間後にトリップ目的 n でゾーン j へ推移する確率を与えているわけである。

以上の準備のもとで、以下各ゾーンの目的別発生・到着交通量ならびに OD 交通量を時刻を追って算定する過程を定式化してみよう。

いま時刻 t までにトリップ目的 m でゾーン i を出発する累積交通量を $A_i^m(t)$ とし、それを次のようなベクトルで表わすことにする。

$$\begin{aligned} A(t) &= (A^1(t), A^2(t), \dots, A^m(t), \dots, A^M(t)), \\ A^m(t) &= (A_1^m(t), A_2^m(t), \dots, A_i^m(t), \dots, \\ &\quad A_N^m(t)). \end{aligned}$$

このとき、時間 $(0, t)$ における各ゾーンへの到着量は次式で与えられる。

$$V(t) = A(t)P + \int_0^t V(t-x)\hat{Q}(dx) \dots\dots\dots(14)$$

ここに、

$$\begin{aligned} V(t) &= (V^1(t), V^2(t), \dots, V^m(t), \dots, V^M(t)), \\ V^m(t) &= (V_1^m(t), V_2^m(t), \dots, V_j^m(t), \dots, \\ &\quad V_N^m(t)). \end{aligned}$$

$V_j^m(t)$: 時間 $(0, t)$ にゾーン j へ目的 m で到着したトリップ数。

式 (14) において、右辺第 1 項はベースを出発する第 1 トリップの着エンド数を、第 2 項は時刻 $(t-x)$ までに到着した交通量のうち、続く x 時間の間に目的を変更して次のゾーンへ推移したトリップの着エンド数を表わしている。先述したように、トリップの所要時間はその発エンドでの滞在時間に含まれていることから、ここではトリップは瞬時に完遂されるものとみなしていることになる。

式 (14) はまた次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} V(t) &= A(t)P \\ &\quad + \left[\int_0^t V(t-x)\hat{Q}^*(dx) \right] P \\ &= \left[A(t) + \int_0^t V(t-x)\hat{Q}^*(dx) \right] P \\ &= U(t)P \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

ここに、 $U(t)$ は時刻 t までの累積発生量である。一方、式 (14) はたた

み込み (convolution) を使って

$$V(t) = A(t)P + V(t) * \hat{Q}(t) \dots\dots\dots(16)$$

と書け、さらに両辺のラプラス変換をとると

$$V(s) = A(s)P + V(s)\hat{Q}(s) \dots\dots\dots(17)$$

となり、これより

$$\begin{aligned} V(s) &= A(s)P [I - \hat{Q}(s)]^{-1} \\ &= A(s)PR(s) \dots\dots\dots(18) \end{aligned}$$

を得る。ここに、

$$R(s) = [I - \hat{Q}(s)]^{-1} \dots\dots\dots(19)$$

は

$$R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{Q}(t)^k \dots\dots\dots(20)$$

$k(*)$: k -hold convolution (k 重たみ込み)

で定義されるマルコフ再生行列であり、その要素 $R_{ij}^{mn}(t)$ は、時刻 0 に目的 m でゾーン i を出発した人が時刻 t までに目的 n でゾーン j を訪れる回数の期待値を表わしている。

同様に発生交通量は、

$$U(t) = A(t) + \int_0^t V(t-x) \hat{Q}(dx) \\ = A(t) + V(t) * \hat{Q}(t) \dots\dots\dots(21)$$

であるから、

$$U(s) = A(s) + V(s) \hat{Q}(s) \\ = A(s) + A(s) PR(s) \hat{Q}(s) \\ = A(s) [I + PR(s) \hat{Q}(s)] \dots\dots\dots(22)$$

となる。OD 表はこの $U(s)$ を対角に並べた行列を $\overline{U}(s)$ で表わすとき、

$$X(s) = \overline{U}(s) P \\ = A(s) [I + PR(s) \hat{Q}(s)] P \dots\dots\dots(23)$$

で与えられる。式 (18), (22), (23) より $V(t), U(t), X(t)$ を得るには、それぞれの逆ラプラス変換をとることになる。また、これらの値が一定の値に収束した場合、すなわちすべての人がベースに戻ってしまった後に新たに発生する交通量がない場合には、吸収マルコフ連鎖モデル (2.(1)) で得られる 1 日合計の交通量に一致することは次のように証明される。

$$V = \lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \\ = \lim_{s \rightarrow 0+} sV(s) \\ = \lim_{s \rightarrow 0+} sA(s) PR(s) \\ = \lim_{s \rightarrow 0+} A(s) P sR(s) \\ = [\lim_{s \rightarrow 0+} A(s) P] [\lim_{s \rightarrow 0+} sR(s)] \dots\dots\dots(24)$$

ここで、

$$\lim_{s \rightarrow 0+} A(s) P = \lim_{s \rightarrow 0+} \int_0^{\infty} e^{-st} A(dt) P \\ = \int_0^{\infty} A(dt) P \\ = AP \dots\dots\dots(25)$$

他方、

$$\lim_{s \rightarrow 0+} sR(s) = \lim_{s \rightarrow 0+} \sum_{n=0}^{\infty} s \hat{Q}(s)^n \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} \hat{Q}(t)^n \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} [I + \hat{Q}(t) + \hat{Q}(t)^2 + \dots] \\ = I + \hat{Y}P + (\hat{Y}P)^2 + \dots \\ = (I - \hat{Y}P)^{-1} \dots\dots\dots(26)$$

したがって、式 (25), (26) を式 (24) に代入すれば、

$$V = AP(I - \hat{Y}P)^{-1} \dots\dots\dots(27)$$

となって、これは先の式 (6) とまったく等しい (QED)。 U, X についても同様のプロセスを経て式 (5), (7) に一致することが確かめられる。

このようにしてわれわれは、2.(1) で紹介したところの都市平面におけるトリップチェーンの吸収マルコフ連鎖モデルに矛盾しない形での、時空間におけるトリップチェーンのマルコフ再生モデルを構築できる。

(2) 時間帯推移行列を導入したモデル¹²⁾

2.(1) で紹介した吸収マルコフ連鎖モデルは、時間の推移を捨象して、都市平面でトリップチェーンを追跡するモデルであった。ここでは都市平面に時間軸を加えたところの時空間における吸収マルコフモデルを考える。

図-4 の平面は吸収マルコフモデルの考え方を概念的に示したものである。図中、破線で示されたトリップチェーンは、ゾーン 1 を出発した人がトリップ目的 a でゾーン 3 へ向かい、次にトリップ目的 b でゾーン 2 へ、ついでトリップ目的 b でゾーン 1 へ立ち寄った後にベース (ゾーン 1) に戻るという連鎖を表わしている。吸収マルコフモデルというのは、都市平面における [目的] × [ゾーン] の個数からなる Section を 1 つの状態と考えて、これらの Section 間の推移状態を記述するモデルだと考えることができよう。一方、ここで展開する時空間における吸収マルコフモデルでは、都市平面に時間軸を加えた 3 次元空間を [目的] × [ゾーン] × [時間帯] に分割してできる Block を 1 つの状態として考える。そしてこの Block 間の推移行列として新たに時間帯推移行列を導入することを考える。図-4 における実線の連なりは、平面における破線で示したトリップチェーンの軌跡を時空間に拡大したものである。図中、滞在行動は時間軸方向の移動の軌跡として与えられており、これは目

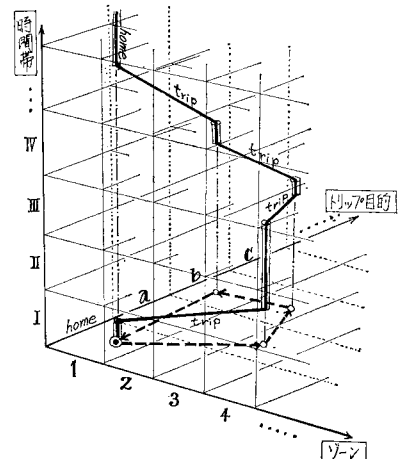


図-4 時空間吸収マルコフモデルの考え方

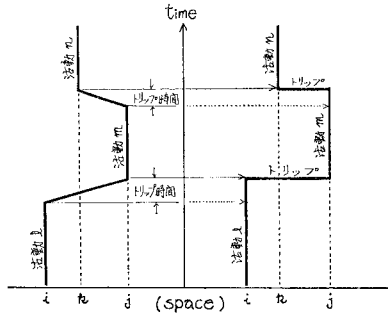


図-5 モデルで用いる活動時間の考え方

的およびゾーンの推移がない場合の垂直的空間移動と解釈される。一方、トリップの所要時間についてはこれを出発地での活動時間に含めるものとする、図-5のようなモデルを作ることができる。したがって、時間軸方向については滞在時間（活動時間）の長さだけを問題にすればよいことになる。これを時間帯推移という概念で把握しようと試みるわけである。

いま、1日の各時間帯に $l=1, 2, \dots, L$ の番号をつける（各時間帯の長さはそれぞれ任意でよい）。 r 番目の時間帯にトリップ目的 m でもってあるゾーンに到着した人が、次に目的 n に推移するという条件のもとで、 $s(s \geq r)$ 番目の時間帯までそのゾーンに滞在するという条件付確率を t_{mn}^{rs} とし、これを要素にもつ行列 T を次のように定義する。

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & n & \dots & M \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ m \\ \dots \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} & \dots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} & \dots & T_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mn} & \dots & T_{mM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{M1} & T_{M2} & \dots & T_{Mn} & \dots & T_{MM} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$T_{mn} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & s & \dots & L \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ r \\ \dots \\ L \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_{mn}^{11} & t_{mn}^{12} & \dots & t_{mn}^{1s} & \dots & t_{mn}^{1L} \\ & t_{mn}^{22} & \dots & t_{mn}^{2s} & \dots & t_{mn}^{2L} \\ & & \dots & & \dots & \\ & & & t_{mn}^{rr} & \dots & t_{mn}^{rL} \\ & & & & \dots & \\ & & & & & t_{mn}^{LL} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots \dots \dots (28)$$

ただし t_{mn}^{rs} については、時間帯を逆行するような滞在はあり得ないこと、ならびに1日単位で完結するトリップチェーンを対象としていることから、以下の条件が満足されなければならない。

$$\left. \begin{matrix} r > s \text{ のとき } & t_{mn}^{rs} = 0 \\ r \leq s \text{ のとき } & 0 \leq t_{mn}^{rs} \leq 1 \\ \sum_{s=r}^L t_{mn}^{rs} = 1 \end{matrix} \right\} \text{ (for all } m, n) \quad \dots \dots \dots (29)$$

この行列 $T = \{t_{mn}^{rs}\}$ のもつ意味は重要であり、マルコフ再生モデルにおける目的間推移時間分布（前項式(9)）に類似した概念である。しかしながら、マルコフ再生モデルにおけるような連続な滞在時間分布を与えているのではなく、時間帯という離散的な状態間の推移確率を与えていること、ならびに到着した時間帯 r に依存した形で滞在時間の長さ $(s-r)$ が変化するという側面を考慮に入れることができること、という2点を特色としている。すなわち、行列 T の小行列 T_{mn} を各行についてみると、それは現在の活動と次の活動とが与えられた場合の滞在時間の相対度数分布となっているわけである。この行列 T をわれわれは時間帯推移行列と呼ぶことにする。

さて、時間帯 r にトリップ目的 m で到着した人が、時間帯 $s(s \geq r)$ までそのゾーンに滞在し、次にトリップ目的 n に推移するという確率を q_{mn}^{rs} とすると、これは目的間推移確率 y_{mn} と時間帯推移確率 t_{mn}^{rs} とより

$$q_{mn}^{rs} = y_{mn} t_{mn}^{rs} \dots \dots \dots (30)$$

と表わすことができる。この q_{mn}^{rs} を要素とする行列を次のように定義する。

$$Q = \{q_{mn}^{rs}\} = \{y_{mn} t_{mn}^{rs}\} = \overset{*}{Y} \otimes T \dots \dots \dots (31)$$

ここに、 $\overset{*}{Y}$ は目的間推移行列 Y を、時間帯の数 L だけ対角に拡大したものである。

$$\overset{*}{Y} = \begin{bmatrix} \overset{*}{Y}_{11} & \dots & \overset{*}{Y}_{1M} \\ \dots & \overset{*}{Y}_{mn} & \dots \\ \overset{*}{Y}_{M1} & \dots & \overset{*}{Y}_{MM} \end{bmatrix},$$

$$Y_{mn} = \begin{bmatrix} y_{mn} & & & & \\ & y_{mn} & & & \\ & & \dots & & \\ & & & L \text{ 個} & \\ & & & & y_{mn} \end{bmatrix}$$

また演算記号 \otimes は、対応する小行列どうしの積すなわち $Y_{mn} T_{mn}$ という演算をすべての小行列について行うことを意味している。さらに、この行列 Q の各要素をゾーンの個数 N だけ対角に拡大した行列 $\overset{*}{Q}$ を考える。

$$\overset{*}{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1M} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{M1} & Q_{M2} & \dots & Q_{MM} \end{bmatrix},$$

$$Q_{mn} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & r & \dots & s & \dots & L \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \dots \\ r \\ \dots \\ L \end{matrix} & \begin{bmatrix} Q_{mn}^{11} & Q_{mn}^{12} & \dots & Q_{mn}^{1r} & \dots & Q_{mn}^{1s} & \dots & Q_{mn}^{1L} \\ & Q_{mn}^{22} & \dots & Q_{mn}^{2r} & \dots & Q_{mn}^{2s} & \dots & Q_{mn}^{2L} \\ & & \dots & & \dots & & \dots & \\ & & & Q_{mn}^{rr} & \dots & Q_{mn}^{rs} & \dots & Q_{mn}^{rL} \\ & & & & \dots & & \dots & \\ & & & & & & & Q_{mn}^{LL} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$Q_{mn}^{rs} = \begin{bmatrix} q_{mn}^{rs} & & & \\ & \ddots & & \\ & & q_{mn}^{rs} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{N個} \\ \text{N個} \end{matrix}$$

$$= \begin{bmatrix} y_{mnt}^{mn} & & & \\ & \ddots & & \\ & & y_{mnt}^{mn} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{N個} \\ \text{N個} \end{matrix} \quad \dots\dots (32)$$

時空間における吸収マルコフ連鎖モデルでは、この行列 $\overset{*}{Q}$ が、平面における吸収マルコフ連鎖モデルで用いた $\overset{*}{Y}$ と同じ役割を果たすことになる。ただし、 $\overset{*}{Y}$ が目的間推移のみを表現するものに対して、 $\overset{*}{Q}$ は、目的間推移と時間帯推移の2つの推移状態を表現することになる。また、時間帯推移行列 T を含んでいることによって、トリップチェーンの進行過程がそのまま表現されるので、平面における吸収マルコフモデルで仮定したような同一時刻出発・同一時刻到着という抽象は必要としない。

この $\overset{*}{Q}$ を用いて時空間におけるトリップチェーンを追跡するプロセスは以下のものである。まずゾーン間推移行列 $\overset{*}{P}$ を次のように定義する。

$$\overset{*}{P} = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_M \end{bmatrix},$$

$$P_m = \begin{bmatrix} P_m^{(1)} & & & \\ & P_m^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_m^{(L)} \end{bmatrix},$$

$$P_m^{(r)} = \{r p_{ij}^m\} \quad (i, j=1, 2, \dots, N),$$

$$\sum_j r p_{ij}^m = 1.$$

ここに、小行列 $P_m^{(r)} = \{r p_{ij}^m\}$ は、時間帯 r におけるトリップ目的 m のゾーン間推移行列である。時間帯によらず目的別ゾーン間推移行列が定常であるとみなす場合には

$$P_m^{(1)} = P_m^{(2)} = \dots = P_m^{(r)} = \dots = P_m^{(L)} \quad (\equiv P_m)$$

となるような同一の推移行列 P_m を用いればよい。この $\overset{*}{P}$ と $\overset{*}{Q}$ を用いることによって1日の時間帯別・トリップ目的別の発生・到着・OD 交通量を算出することができる。2.(1) で紹介した吸収マルコフモデルにおいて、 $\overset{*}{Y}$ の代わりに $\overset{*}{Q}$ を、 P の代わりに $\overset{*}{P}$ を用いればまったく同様のプロセスでトリップチェーンを追跡することができる。ただし、第1トリップについては、ゾーン別・目的別・時間帯別の発生量を与件として与える必要がある。

一方、帰宅トリップについては、毎回の推移の後に各着エンドにおいて、次に帰宅を行うという条件のもとで時間帯を推移させればよいから、先の吸収マルコフモデル

の $\overset{*}{R}$ の代わりに次のような $\overset{*}{R}^*$ を用いればよい。

$$\overset{*}{R}^* = \overset{*}{R} \otimes \overset{*}{T}_R \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここに、

$$\overset{*}{R} = \begin{bmatrix} \overset{*}{R}_1 & & & \\ & \overset{*}{R}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \overset{*}{R}_M \end{bmatrix},$$

$$\overset{*}{R}_m = \begin{bmatrix} R_m & & & \\ & R_m & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_m \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} L \text{個} \\ L \text{個} \end{matrix}, \quad R_m = \begin{bmatrix} r_m & & & \\ & r_m & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_m \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} N \text{個} \\ N \text{個} \end{matrix}$$

ならびに、

$$T_R = \begin{bmatrix} T_{1R} & & & \\ & T_{2R} & & \\ & & \ddots & \\ & & & T_{MR} \end{bmatrix},$$

$$T_{mR} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & r & \dots & s & \dots & L \\ \vdots & & t_{mR}^{11} & \dots & t_{mR}^{1r} & \dots & t_{mR}^{1s} & \dots & t_{mR}^{1L} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r & & t_{mR}^{r1} & \dots & t_{mR}^{rs} & \dots & t_{mR}^{rL} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & & & & & & & & t_{mR}^{LL} \end{bmatrix}$$

なる T_R の各要素をゾーンの個数 N だけ対角に拡大したものが $\overset{*}{T}_R$ である。演算記号 \otimes は先ほどと同じである。小行列 T_{mR} の要素 t_{mR}^{rs} は、時間帯 r に活動 m を開始したものが、次に帰宅するという条件のもとで時間帯 s まで滞在するという条件付確率である ($\sum_s t_{mR}^{rs} = 1$)。平面における吸収マルコフモデルにおける $\overset{*}{R}$ の代わりに、ここで定義した $\overset{*}{R}^*$ を用いれば、帰宅 OD 表もまったく同様のプロセスで追跡することができる。

以上の追跡プロセスの概念が図-6 に示されている。まず、時間帯 r にトリップ目的 m でゾーン i を出発する第1トリップ発生数を ${}^r A_i^m$ で与え、次のようなベクトルを準備する。

$$\overset{*}{A} = (A_1, A_2, \dots, A_m, \dots, A_M),$$

$$A_m = (A_m^1, A_m^2, \dots, A_m^r, \dots, A_m^L),$$

$$A_m^r = ({}^r A_1^m, {}^r A_2^m, \dots, {}^r A_i^m, \dots, {}^r A_N^m)$$

この $\overset{*}{A}, \overset{*}{Q}, \overset{*}{P}, \overset{*}{R}^*$ を用いればトリップチェーンの追跡プロセスは2.(1) で展開したプロセスとまったく同様に取扱うことができる。ただ時間帯が明示的に導入されているので、前節式(5)~(8)で算定された諸量の各要素はそれぞれ時間帯のサフィックスが付けられて拡大されていることになっている。式(5)~(8)において $\overset{*}{A}, \overset{*}{Y}, P, \overset{*}{R}$ を上の $\overset{*}{A}, \overset{*}{Q}, \overset{*}{P}, \overset{*}{R}^*$ で置き換えれば

$$\overset{*}{U} = \overset{*}{A} + \overset{*}{A} \overset{*}{P} (I - \overset{*}{Q} \overset{*}{P})^{-1} \overset{*}{Q} \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$\overset{*}{V} = \overset{*}{A} \overset{*}{P} (I - \overset{*}{Q} \overset{*}{P})^{-1} \quad \dots\dots\dots (35)$$

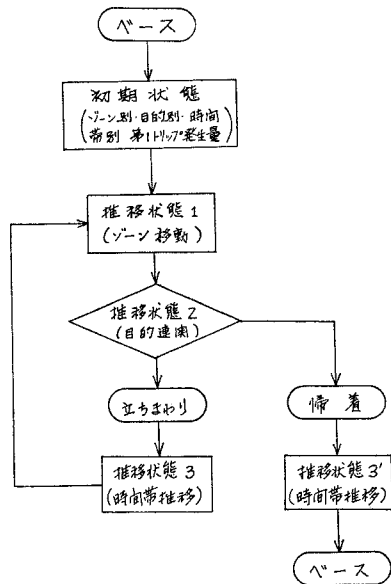


図-6 時空間トリップチェーンの追跡プロセス

$$\dot{X} = \dot{U} \dot{P} \dots\dots\dots (36)$$

$$\dot{H} = [\dot{A} \dot{P} (I - \dot{Q} \dot{P})^{-1} \dot{R}]^t \dots\dots\dots (37)$$

となる。 \dot{U} は目的別・時間帯別トリップ発生数を、 \dot{V} は同到着数を、 \dot{X} は同 OD 交通量を、そして \dot{H} は第 1 トリップ目的別・帰宅直前のトリップ目的別・時間帯別の帰宅トリップ OD 表を、それぞれ与えている。 \dot{U} と \dot{V} は $1 \times (M \times L \times N)$ のベクトル、 \dot{X} と \dot{H} は $(M \times L \times N) \times (M \times L \times N)$ の行列となっており、たとえば \dot{U} は次のような形をしている。

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (U_1, U_2, \dots, U_m, \dots, U_M), \\ U_m &= (U_m^1, U_m^2, \dots, U_m^r, \dots, U_m^L), \\ &\quad (m=1, 2, \dots, M) \\ U_m^r &= ({}^rU_1^m, {}^rU_2^m, \dots, {}^rU_i^m, \dots, {}^rU_N^m) \\ &\quad (r=1, 2, \dots, L) \end{aligned}$$

ここに、 ${}^rU_i^m$ は、時間帯 r にトリップ目的 m でゾーン i を発生するトリップ数である。いまトリップ時間はその発エンドゾーンにおける活動時間（滞在時間）に含めていることから、この ${}^rU_i^m$ は同時に、ゾーン i から出発して目的地に到着したもののうち時間帯 r から活動 m を開始するもの数を表わしている。この関係が図-7 に示されている。図の左側の部分は時空間におけるトリップチェーンを立面面に投影したものであり、図の右側はこの左図におけるトリップ時間をトリップの発エンドに加算したものである。さらに右側の図においては 3 種類の推移状態、すなわち目的連関 (y_{lm})、ゾーン連関 (p_{ij}^m)、時間帯推移 (t_{mn}^r) が示されている。モデルの基本的な骨格を視覚的に理解することがで

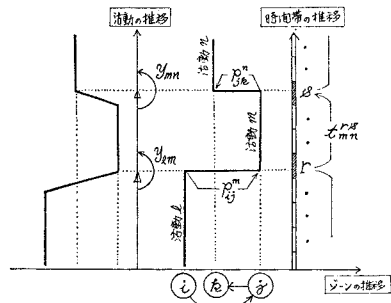


図-7 モデルで用いた 3 つの推移概念

きよう。

このようにしてわれわれは時間帯別の交通量を組織的に記述することができる。実際の交通計画においては、ここで展開したような時間帯別の交通量、特にピーク時のそれが必要であることが多い。その意味では実用的な手法であるといえよう。以上でわれわれは時空間におけるトリップチェーンの追跡モデルを 2 つ紹介してきたわけであるが、次項ではこれらを対比しながら利点・欠点を考えてみることにしよう。

(3) モデルの比較検討

3.(1) で紹介したマルコフ再生モデル、3.(2) で紹介した時間帯推移を含む吸収マルコフモデルは、ともにトリップ目的の連鎖に関する吸収マルコフモデルを基調としつつ、時空間モデルへと発展させられている。ただ滞在時間をどのように取扱うかという点で大きな相違が存在する。

前者のモデルでは、滞在時間は目的間推移時間分布の形で与えられ、後者では目的連関別の時間帯間推移確率という形で与えられる。したがって、前者のモデルにおいては時刻は連続的に取扱われ、後者には時間帯という離散的な状態間の推移として扱われることになる。それゆえ、前者には交通量の変化を連続的に記述できるという精緻さをもつ反面、推移時間分布形がラプラス変換を困難ならしめるようなものである場合は都合が悪いことになる。他方、後者には時間帯という離散的な状態を想定していることのために、前者ほどには時刻についての精緻さは獲得できず、また、トリップの発エンド時刻については若干のバイアスをもつことになるが(図-7 参照)、モデルによる追跡プロセスが前者に比べて比較的簡単であり、かつ交通計画に必要な時間帯別交通量を直接に算定できるという利点をもっている。また、1 つの時間帯の長さについても、実証に耐えるデータ数があるかぎりそれを小さくすることができるが、時間帯推移行列をあまり大きくすることは、予測という立場からはあまり推奨できない。

滞在時間の取扱いについてはもう 1 つ重要な違いがあ

る。前者のモデルでは、ある活動時間（＝滞在時間）を規定するのは、現在の活動と次に行う活動の2要因であったが、後者のモデルではこの2つの要因に加え、現在の活動が開始された時刻（＝時間帯）にも依存するとしている点である。前者では、活動時間は1日のどの時刻であっても1つの分布形に従うことが要求されているわけであるが、後者にとっては活動開始時刻によって異なるものと想定しているのである。これは現実的な想定である。朝9時に勤務を開始した者の活動時間分布と、夜9時に勤務を開始した者の活動時間分布が同じものであると主張する現実的根拠は乏しいと思われる。

また、活動時間が活動開始時間帯別に与えられるということは、1日で完結するトリップチェーンを記述するうえで重要な意味をもつ。両モデルともその全過程において生ずる交通量は、平面における吸収マルコフモデルで得られる総交通量に一致することがわかっているが、マルコフ再生モデルでは $t \rightarrow \infty$ としたときにこの値に収束する。つまり1日＝24時間を過ぎてもなお新たに交通量が発生し得るわけで、この際には何らかの方法でこのみ出した交通量を24時間内に再配分してやらなければならない。このみ出し交通量が生ずる原因は、先述したように推移時間分布形の考え方にある。一方、後者のモデルでは、1日の時間帯があらかじめ制限されている（24時間が適当に分割されている）ことから、上述のような問題は発生しない。

以上の考察から、時間帯推移の概念を導入したモデルの方が現実的かつ実用的であることが判断されよう。そして、それは1.で述べたような“時刻調整を含む交通政策”の影響評価を容易にし得るという意味でも実用性をもっているのである。すなわち、都市に住む人々の移動の基本的なパターンは目的連関 Y とゾーン移動 P で記述できるものとし、時刻に関係する部分はこれらとは独立に \dot{A} （第1トリップ発生量）、 T （時間帯推移行列）で記述されるものとすれば、時刻に関する調整は、 \dot{A} または T に加えられた時刻的変更として解釈され得る。したがって、その交通政策が時間帯別交通量に与える影響をモデルを通じて計算することができるのである。

4. 京都市（1970）における滞在時間分布

ここでは滞在時間（＝活動時間＋トリップ時間）の現況を、京都市（1970）パーソントリップ調査データを用いて考察する。対象としたデータは、① ホームベース、② 完全トリップパターン（ホームベースを起終点とするサイクルのみでトリップチェーンが構成されているもの）、③ 京都市内にホームベースがあること、の三条件

表一 目的連関別平均滞在時間

（京都、1970）

→	Work	School	Shop	Free	Business	Home	平均
Work	0	531	447	514	201	600	580
School	280	0	339	311	324	427	412
Shop	81	118	82	88	68	101	96
Free	69	101	113	113	162	183	150
Business	128	420	126	195	112	227	130

（単位：分）

を満足するものである。

表一には、目的連関のパターン別にそれぞれ前目的における滞在時間の平均値が示されている。そして最終列には、後目的平均の滞在時間が示されている。表中、WORK → WORK, SCHOOL → SCHOOL はそれぞれ該当するパターンを行った人が存在しなかったことを示す。この表の見方は、たとえば WORK → BUSINESS は201分を得ているが、これは出勤トリップ後勤務状態にある者のうち次に業務トリップを行う者については、その勤務状態の時間が平均して201分であることを表わしている。この表から判断される1つの大きな特徴は、あるトリップ目的を行って次に帰宅トリップ目的を行う者の滞在時間は、自由度が高い目的（FREE, SHOP）や繰り返しの多い目的（BUSINESS）へ推移する者の滞在時間よりも長いということである。これは、1日のうちに消化しなければならない活動の数が多いほど1つの活動に費やされる時間が少なくなってゆくことを示している。

図一8～12には、各滞在目的別の滞在時間分布（実線）と滞在時間長の相対度数分布（破線）が描かれている。図一8は出勤トリップ後の職場での滞在時間分布を示す。破線の相対度数分布形は平均値を先出の580分（9.7時間）にもっており、図のかなり右側の部分に偏在している。圧倒的多数の者は勤務時間終了まで外出しない様子がわかる。図の左端部に存在する1つの山は、業務トリップによる外出の影響が現われたものと思われる。図一9には登校トリップ後の大学・学校等での滞在時間分布を示す。この分布の平均値は先出の412分（6.9時間）であり、ちょうど2つの山の中間地点に位置している。この分布形から判断すると学生には2種類のタイプが存在するようである。1つは、5時間ほど滞在して外出もしくは帰宅するタイプ、もう1つは8時間中1度も外出しないタイプである。後者はおそらく小・中・高校生の大部分を含んでいるものと思われる。

図一10には日常的な買物トリップ後の商店等における滞在時間分布を示す。この分布の平均値は96分（1.6時間）であり、指数分布的な密度関数に近似することが容易であるように思われる。圧倒的多数のものは買物が済めばすぐに次の行動、特に帰宅に移ることがうかがわ

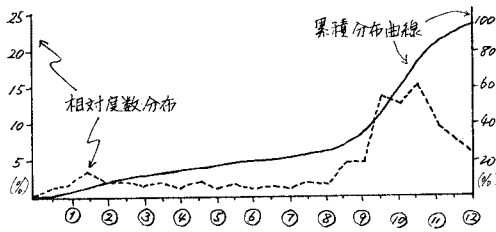


図-8 出勤後の滞在時間分布

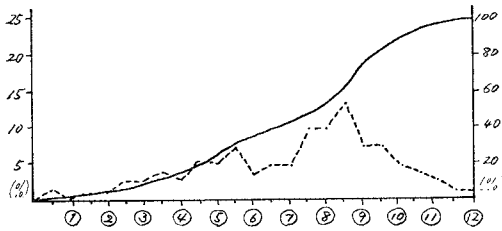


図-9 登校後の滞在時間分布

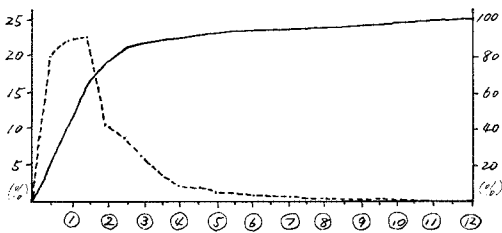


図-10 買物の滞在時間分布

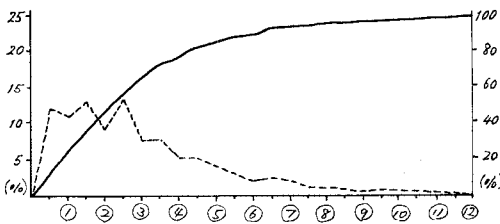


図-11 自由目的の滞在時間分布

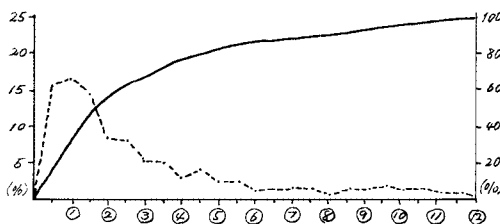


図-12 業務の滞在時間分布

注) 滞在時間の目盛(図-8~12:共通)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	以上

(単位:時間)

れる。図-11には自由目的(非日常的な買物, 社交, 娯楽, スポーツ等)トリップ後の滞在時間分布が示されている。この分布の平均値は150分(2.5時間)であり, この分布形もやや図の左側部分に偏在し, かついくつかの山が現われているものの, 指数分布に近似することは無理ではないと思われる。最後に図-12には業務トリップ先での滞在時間分布が示されている。この分布の平均値は130分(2.2時間)であり, これも密度関数は指数分布とみなし得る。

このようにみえてくると, トリップ目的が日常的買物・自由・業務の場合にはその滞在時間分布は指数分布的な密度関数で表現することが可能であると思われるが, 出勤・登校といった拘束的な目的については累積分布曲線がS字型となり, その数学的取扱いが困難になることが予想される。マルコフ再生モデルを用いる場合にはラプラス変換を行う必要があるが, 指数分布以外の分布形の場合にはその変換が極めて困難となることは避けられない。したがって, 3.(3)で考察した事項をもあわせ考えると, マルコフ再生モデルよりも, 時間帯推移の概念を用いる吸収マルコフモデルの方が実用的には推奨される。このような判断から, 次節では後者のモデルを実証的に検討することしよう。

5. 時間帯推移の概念を用いる吸収マルコフモデルの実証的検討

本節では京都市(1970)のパーソントリップ調査データをもとにして, 3.(2)で展開したモデルによってトリップチェーンを再現してみる。モデルの基本的な骨格を形成する概念は, 先述したとおり, ①トリップ目的間推移行列, ②トリップ目的別ゾーン間推移行列, そして③目的連関パターン別時間帯推移行列, という3つの推移行列で表現される。

トリップ目的間推移行列については, 前稿¹³⁾で2種類の定義法について検討し, その結果, 最尤推定値を用いる方法の方が実用的であると判断されているので, ここでもそれに従う。表-2にその行列の値が示されている。この推移行列は, その推移がどんな時間帯において生じるかということ, ならびにその推移が第何番目の推移であるかということには無関係に常に等しく作用させ

表-2 トリップ目的間推移確率行列

(京都, 1970)

→	Work	School	Shop	Free	Business	Home
Work	0.0	0.0052	0.0187	0.0272	0.1390	0.8099
School	0.0021	0.0	0.0170	0.0495	0.0020	0.9294
Shop	0.0063	0.0041	0.0507	0.0460	0.0572	0.8353
Free	0.0142	0.0044	0.0422	0.1146	0.0310	0.7936
Business	0.0150	0.0006	0.0191	0.0197	0.4389	0.5067

表—3 時間帯推移行列（出勤→業務の場合）

→	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	時間帯区分
(1)	0.206	0.162	0.098	0.049	0.046	0.024	0.023	0.120	0.096	0.127	0.028			0.021	3:00~7:00
(2)		0.045	0.269	0.189	0.150	0.074	0.021	0.074	0.022	0.037	0.008	0.008	0.058	0.047	7:00~8:00
(3)			0.046	0.246	0.233	0.123	0.056	0.088	0.058	0.045	0.026	0.034	0.026	0.017	8:00~9:00
(4)				0.072	0.341	0.151	0.078	0.129	0.064	0.055	0.029	0.040	0.014	0.029	9:00~10:00
(5)					0.055	0.306	0.137	0.224	0.167	0.055	0.029	0.026			10:00~11:00
(6)						0.109	0.029	0.109	0.029	0.063	0.029	0.058		0.027	11:00~12:00
(7)								0.244	0.236	0.520					12:00~13:00
(8)									0.356	0.256	0.186	0.108	0.093		13:00~14:00
(9)									0.148	0.516			0.176	0.160	14:00~15:00
(10)												0.740	0.260		15:00~16:00
(11)															16:00~17:00
(12)														1.000	17:00~18:00
(13)															18:00~19:00
(14)															19:00~21:00

られる。

トリップ目的別ゾーン間推移行列については表に掲げるスペースはないが、これも同じく時間帯やトリップ回数に関係なく定常であるとみなす。

目的連関パターン別時間帯推移行列についても全推移行列を掲げるスペースはないが、たとえば出勤(WORK)→業務(BUSINESS)という目的連関に関しては表—3のような時間帯推移行列を得ている。先述したようにこの行列は対角線より上の3角行列となるが、まったく要素の記されていない行については、該当するパターンを行った者が皆無であったことを示す。

また与件として与える第1トリップの時間帯別・目的別・ゾーン別発生量についてもスペースの関係上表掲できないが、時間帯別・目的別の生成量は表—4のようであった。

以上の4つの諸量、すなわちトリップ目的間推移行列、トリップ目的別ゾーン間推移行列、目的連関パターン別時間帯推移行列ならびに時間帯別・目的別・ゾーン別第1トリップ発生量でもってわれわれはトリップチェインを時空間において追跡することができる。スペースの関係上、表—5にはゾーンを捨象した場合について時間帯別・目的別のトリップ生成量が示されている。上段にはモデルによる計算値、下段には観測値がそれぞれ掲げられている。

WORK, SCHOOL, SHOP, FREEの各トリップ目的についてはおおむね計算値と観測値の乖離は少ないが、BUSINESSについては午前11時以降において乖離が目立つ。特に11時から17時までの時間帯においては計算値が観測値を上回り、それ以降の時間帯においてはこれが逆転している。これは、BUSINESSとして本来の業務トリップと、業務トリップ終了後のその人の職場への帰社トリップとをまとめて取扱ったことに起因している。すなわち、前者の時間帯では業務トリップ数が過小評価され、後者の時間帯ではそれが過大評価と

表—4 時間帯別・目的別第1トリップ生成量

(京都, 1970)

時間帯	Work	School	Shop	Free	Business
(1)	8 538	40	431	806	3 438
(2)	57 212	3 614	641	1 756	5 992
(3)	172 385	60 622	1 763	5 969	17 098
(4)	57 066	18 793	5 320	7 714	13 202
(5)	9 912	7 212	8 690	8 601	11 133
(6)	3 131	2 215	7 517	7 820	6 085
(7)	2 417	2 300	2 977	6 080	3 971
(8)	2 674	1 775	5 166	8 061	9 105
(9)	1 928	623	5 975	8 642	5 969
(10)	1 367	209	5 485	6 015	4 410
(11)	1 281	219	6 105	6 688	2 951
(12)	879	1 282	3 456	4 991	2 362
(13)	745	668	2 334	5 288	1 898
(14)	573	396	4 127	10 036	3 677
計	321 108	99 968	59 998	88 367	91 291

表—5 目的別・時間帯別生成交通量

(上段：計算値，下段：観測値)

時間帯	Work	School	Shop	Free	Business	目的合計
(1)	9 562	41	454	824	4 259	15 140
	9 582	40	431	806	4 036	14 895
(2)	57 235	3 619	696	1 824	7 271	70 645
	57 344	3 651	692	1 756	6 844	70 287
(3)	172 624	60 628	1 910	6 373	22 750	264 285
	173 612	60 622	1 928	6 327	21 047	263 536
(4)	57 414	18 835	5 907	8 481	26 703	117 340
	58 103	18 918	5 883	8 502	25 307	116 713
(5)	10 386	7 246	9 441	10 103	30 965	68 141
	10 943	7 293	9 711	10 184	31 978	70 109
(6)	3 692	2 253	9 014	9 760	23 457	48 176
	3 818	2 259	9 602	10 123	28 394	54 196
(7)	2 749	2 474	6 277	7 883	14 821	34 204
	2 848	2 464	7 337	7 955	18 184	39 788
(8)	2 862	1 900	6 094	10 252	22 190	43 298
	3 005	1 979	6 477	10 280	27 221	49 012
(9)	2 403	752	7 003	11 450	18 627	40 235
	2 220	703	7 211	12 208	23 060	45 402
(10)	2 093	333	7 139	9 191	17 132	35 888
	1 806	253	7 273	9 943	21 066	40 341
(11)	1 862	356	8 306	10 712	15 774	37 010
	1 571	303	8 195	11 022	16 736	37 827
(12)	2 004	2 422	7 375	10 753	16 285	38 812
	1 172	2 549	6 880	10 801	14 337	35 739
(13)	1 086	1 140	4 969	10 519	11 780	29 494
	782	1 095	4 316	9 978	8 609	24 780
(14)	1 701	780	7 748	17 939	27 685	55 493
	924	528	6 139	15 466	13 051	32 852

なって影響しているものと考えられる。今後はこの点の改良が、目的分類とも関連して必要となろう。

時間帯別の目的合計トリップ数を見ると、午前中のピーク時間帯（8：00～9：00，9：00～10：00）においては計算値はかなり実績値に近い値を得ており、交通量が少なくなるにつれ乖離が大きくなるようである。しかし実際の交通計画・交通政策においては7：00から18：00ぐらいまでの時間帯についての交通量に関する情報が意味をもつことを考えると、ここで用いたモデルはかなり大胆な構造を有しているにもかかわらず、割合現状を再現するのに成功していると考えてよいであろう。

6. おわりに

本稿では、従来の平面におけるトリップチェーンの吸収マルコフ連鎖モデルを時刻を含む形で展開すること、すなわち時空間へと拡張することを試みた。その場合のあり得べき方法として、(1) マルコフ再生モデルと、(2) 時間帯推移の概念を導入した吸収マルコフモデル、の2つを比較・検討した。その結果、実用的観点と政策的観点とからは後者のモデルが推奨されるということを示すことができたと思う。ただ業務トリップについては前節でも述べたとおり、その取扱いが極めて困難であり、今後は目的分類と同時に、その推移確率の構成についても一考を要しよう。今後の課題は、時刻的調整を含む交通政策を時間帯推移行列にどのように反映させるかという点であり、これは同時に都市における諸活動の時間構成の解明という作業を伴うことになろう。

参 考 文 献

- 1) Gilbert, Peterson and Schofer : Markov Renewal Model of Linked Trip Travel Behaviour, Proc. of ASCE, TE 691-704, 1972.
- 2) 宮城俊彦・加藤 晃 : 交通関連行動時間を考慮した都市交通需要モデル, 土木学会論文報告集, No. 254, 1976.
- 3) Flälingerstand, T. : The Impact of Transport on the Quality of Life, Introductory Reports No. 1, 5th Intl. Sympo. on Theory and Practice in Transport Economics, Athens, 22-25 Oct., 1973.
- 4) Jones, P.M. : The Analysis and Modelling of Multi-trip Journeys, Oxford Univ. TSU Working Paper No. 6, 1975.
- 5) Jones, P.M. : Travel as a Manifestation of Activity Choice ; Trip Generation Re-interpreted, Oxford Univ., 1976.
- 6) Hensher, D.A. : Multi-trip and Multi-purpose Journeys ; Some Suggestions, Oxford Univ. TSU Working Paper No. 15, 1975.
- 7) Sasaki, T. : Estimation of Person Trip Patterns Through Markov Chains, Proc. of the 5th Intl. Sympo. on Transportation and Traffic Flow Theory, Berkeley, 1971.
- 8) 松井 寛 : 交通目的連関行列を用いた発生・集中交通量の推定法, 交通工学, Vol. 11, No. 1, 1976.
- 9) Kondo, K. : Estimation of Person Trip Patterns and Modal Split, Proc. of the 6th Intl. Sympo. on Transport and Traffic Theory, Sydney, 1974.
- 10) 近藤勝直 : トリップチェーン手法を用いた都市交通需要推計プロセス, 京都大学学位論文, 1977.
- 11) 佐佐木 綱・松井 寛 : 会場内の観客流動モデル, 土木学会論文報告集, No. 159, 1968.
- 12) 上野義弘 : 時空間におけるトリップチェーンの記述と予測, 京都大学修士論文, 1977.
- 13) 近藤勝直 : トリップ目的間推移確率行列の将来予測法, 土木学会論文報告集, No. 278, 1978.

(1977. 7. 30・受付)