時間－空間系における交通行動分析（その2）

岐阜大学　学生員　○大野栄治
岐阜大学　正員　宮城俊彦
岐阜大学　正員　加藤晃

1. はじめに

現代社会における人の選択行動は価値観の多様化のため増々複雑となり、加えて、人の選択行動は複雑な時間－空間的制約の中で行なわれるため、それを予測する問題は計画者にとって困難な課題となっている。

ところで、都市交通需要予測は、都市交通施設の計画やその運営管理を効果的に行なっていく上で必要欠くべからざるものである。しかし、前述したように、個人の選択行動のメカニズムが複雑化し、かつ、よりきめ細かい交通計画が必要となってきた現代都市においては、その目的に応じた交通選択モデルあるいは交通需要モデルを構築することが非常に困難になりつつある。

伝統的な交通行動分析手法の問題点は、交通の現象そのものに焦点を当てているところにある。交通需要は活動に付随して生じる派生需要であると考えられるので、交通行動は人の活動の因果系列の一部であるとみなせる。それゆえ、交通需要を予測するためには、まず人が活動を選択するメカニズムを解明しなければならない。

現在、交通行動分析に関するアプローチには、次のようなものがある。

①行動時間配分を考慮した効用最大化モデル(1)(2)
②非集計交通選択モデル(3)(4)
③トリップ連鎖モデル(5)(6)
④プリズムモデル(7)(8)
⑤Time Budget 研究(9)(10)

ここで、人の交通行動を分析するモデルは、明確な行動理論に基づいたものが理想的であり、また、時間－空間制約を考慮したものが現実的であるといえる。なぜならば、理論の裏付けによる問題の解明という姿勢は大変重要であり、また、日常生活を行なう上での時間－空間制約を無視しては人の行動分析は不十分なものとならざるをえない。しかし、①～⑤のモデルは、時間－空間制約の中での人の選択行動を十分記述しているとはいえない。

本研究の目的は、時間－空間制約の中での個人の効用最大化行動の定式化を目標としている。しかし、これまでの研究では、時間－空間制約がどのようにして個人の効用最大化行動に係わってくるのか、また、どのような形で制約条件として効くのか明らかにされてない。したがって、本稿ではそうした点に焦点を当てて検討している。まず、従来の効用最大化行動理論の枠組内で時間制約がどのように扱われているかを紹介し、それによって交通行動モデルが定式化できることを示す。また、交通における時間価値がどのように形成されるのかをみる。次に、時間－空間制約の表現のひとつのモデルであるプリズムモデルを考え、それがどのように人の行動を制約し、効用最大化に影響を及ぼすのかをみる。そして、これらの観点から、プリズムが表現する領域が効用の大小に関連する指標であることを明らかにし、プリズムモデルによる交通政策の評価の方法を考察する。

2. 行動時間を考慮した効用理論に基づく活動選択モデル

行動時間を考慮した効用理論はDeSerpa やBruzelius によって展開されているが、本稿では簡単な効用関数を仮定して議論を進める。さて、人の行動を次のような効用最大化問題に定式化する。

$$\max.\ U(x_1, x_2, t_1, t_2, t_w) \quad (1)$$

$$\text{s.t.}\ p_1x_1 + p_2x_2 \leqq I\ (=Wt_w + Y) \quad (2)$$

$$t_1 + t_2 + t_w \leqq T \quad (3)$$

$$g_1x_1 \leqq t_1\ ,\quad g_2x_2 \leqq t_2 \quad (4),(5)$$

$$x_1 \leqq X_1\ ,\quad x_2 \leqq X_2 \quad (6),(7)$$

$$x_1\ ,\ x_2 \geqq 0$$

x_1：活動量　p_1：活動の単位支払い価格
x_2：トリップ数　p_2：トリップの単位支払い価格
t_1：活動時間　g_1：活動の必要最小時間

t_2：トリップ時間　g_2：トリップの必要最小時間
t_w：労働時間　　X_1：総活動量
w：賃金率　　X_2：総トリップ数
I：所得　Y：非労働収入　T：利用可能時間

この問題に対応したLagrange関数は、次の式で与えられる。

$$
\begin{aligned}
L = U &- \lambda (p_1 x_1 + p_2 x_2 - w t_w - Y) \\
&- \mu (t_1 + t_2 + t_w - T) \\
&- \eta_1 (g_1 x_1 - t_1) \quad - \eta_2 (g_2 x_2 - t_2) \\
&- \gamma_1 (x_1 - X_1) \quad - \gamma_2 (x_2 - X_2)
\end{aligned} \tag{8}
$$

このとき、この最適解は、以下のKuhn－Tucker条件を満足しなければならない。

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \frac{\partial U}{\partial x_1} - \lambda p_1 - \eta_1 g_1 - \gamma_1 = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = \frac{\partial U}{\partial x_2} - \lambda p_2 - \eta_2 g_2 - \gamma_2 = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_1} = \frac{\partial U}{\partial t_1} - \mu + \eta_1 = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_2} = \frac{\partial U}{\partial t_2} - \mu + \eta_2 = 0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_w} = \frac{\partial U}{\partial t_w} + \lambda W - \mu = 0 \tag{13}$$

ここで、λ, μ, η_1, η_2, γ_1, γ_2はLagrange未定乗数であり，それらは対応する制約条件の定数項の限界効用を表わしている。したがって、次の式が成立する。

$$\frac{\partial U}{\partial I} = \lambda \quad , \quad \frac{\partial U}{\partial T} = \mu \tag{14), (15}$$

$$\frac{\partial U}{\partial (g_i x_i)} = \eta_i \quad , \quad \frac{\partial U}{\partial X_i} = \gamma_i \quad (i=1,2) \tag{16), (17}$$

今、式(9)～(17)を整理することにより、次のような時間節約の限界価値を求めることができる。

①資源としての時間価値

$$\frac{\mu}{\lambda} = W + \frac{1}{\lambda}\frac{\partial U}{\partial t_w} \tag{18}$$

②活動時間の価値

$$\frac{\eta_i}{\lambda} = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}\frac{\partial U}{\partial t_i} \quad (i=1,2) \tag{19}$$

③活動量の価値

$$\frac{\gamma_i}{\lambda} = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial U}{\partial x_i} - \left(p_i + \frac{\eta_i}{\lambda} g_i \right) \quad (i=1,2) \tag{20}$$

ここで、式(20)に注目する。右辺の第２項は活動の一般化費用（GC_i）を表わしているため，活動の価値は実際に活動して得られる価値から一般化費用を差し引いたものであるといえる。そこで、ある活動をして得られる効用をその活動の価値で表わすことにする。まず、ある変数の限界効用が他の変数とは独立であると仮定し、個人の効用を次のように定義する。

$$U_i = a_i - GC_i \tag{21}$$

a_i：社会経済特性を表わす変数（ＳＥ変数）で定義される。

ここで、式(20)あるいは(21)はある特定の個人の最適な選択行動の結果であり、その行動は決定論的であることが暗に仮定されている。次に、似たような社会経済特性を持つ集団を考え、その中での個人の行動を考える。このとき、ランダム効用理論の考え方により、個人の効用は集団に共通な部分（測定可能な部分）と個人によって異なる部分（測定不可能な部分）に分離されるので、個人の効用を次のように再定義する。

$$\tilde{U}_i = \bar{U}_i + \tilde{\varepsilon}_i \tag{22}$$

ここで，確率項 $\tilde{\varepsilon}_i$ がガンベル分布をすると仮定するならば、次のような選択確率式が得られる。

$$P_i = \frac{\exp(\bar{U}_i)}{\sum_i \exp(\bar{U}_i)} \tag{23}$$

式(23)は、従来のランダム効用理論から誘導される選択モデルと全く同じ形式となっているが、異なるのは、効用最大化行動理論において時間制約を導入したために時間価値の概念を取り入れることができたことである。

さて、この選択モデルは、交通における選択問題にも適用できる。ここで、x_2をトリップの総数とし、x_{2j}を目的地jへのトリップとする。また、t_2をトリップに利用可能な時間とし、t_{2j}をx_{2j}に配分する時間とする。このとき、個人の効用関数は、

$$U = U(x_1, x_{21}, \ldots, x_{2J}, t_1, t_{21}, \ldots, t_{2J}, t_w) \tag{24}$$

となり、前記の活動選択モデルの考え方により、次のような交通における選択モデルが誘導できる。

$$P_j = \frac{\exp(V_j)}{\sum_j^J \exp(V_j)} \tag{25}$$

$$V_j = a_j - GC_j \tag{26}$$

また、さらに目的関数の変数をいろいろ考慮して、よ

り現実的な交通選択モデルを作ることができる。[11]

3. 時間－空間プリズムによって与えられる制約条件

前節では効用最大化行動理論により活動選択モデルを誘導したわけであるが、この場合、個人の行動を規定する制約条件として行動空間あるいは行動の時間予定（スケジュール）が考慮されてないため、個人の行動を十分に記述しているとはいえないであろう。本節では、その点を克服するために、時間－空間プリズムの適用を試みる。

まず、次のような条件を与えられた個人を考える。

①午前6時には家を出ることが可能で、午後10時までには家に戻らなければならない。

②利用可能なモードの最高速度Vは一定である。

③ネットワークを無視してあらゆる方向に移動可能である。

このような個人の移動空間は、地図平面に時間軸を加えた3次元空間に表示すると図1のようになる。

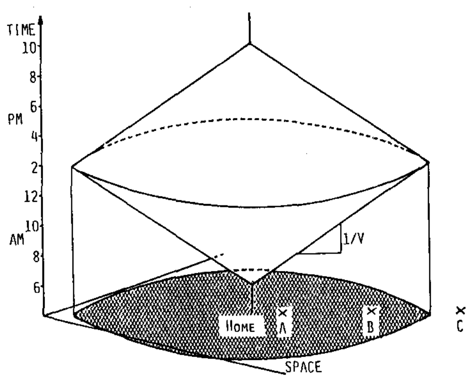

図1．個人の時間－空間プリズム（I）

今、図1で描かれた立体をプリズムと呼ぶ。ここで、プリズムの地図平面への投影図は、この個人が前記の条件を与えられた場合に移動可能な範囲を表わしている。それゆえ、この個人は、AとB地点へ到達可能であるがC地点へは到達不可能であることがわかる。このことは、効用最大化行動モデルには時間制約式として考慮されているが、そこから誘導された活動選択モデルには全く考慮されていない。それゆえ、代替案の選択確率を計算する際に、実際には選択不可能な代替案にも選択確率を割り当てることになって、大きな不都合が生じる。よって、代替案集合の決定の際に、このプリズムモデルを行動空間制約として加える必要がある。

さて、この個人に対し、さらに次の条件が加えられたとする。

④午前8時から正午12時までの間と午後1時から午後5時までの間は、A地点で仕事をしなければならない。

すると、この個人のプリズムは、図2のようになる。

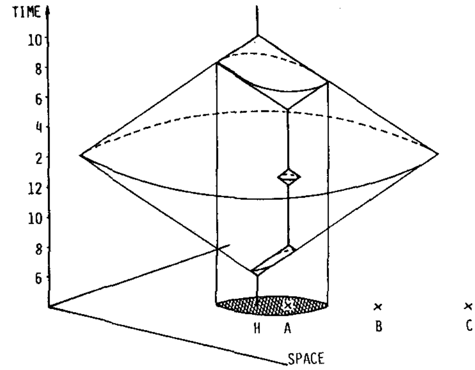

図2．個人の時間－空間プリズム（II）

このように、一日の活動スケジュールにおいて制約条件（Coupling制約）が加えられると、移動可能な範囲が狭くなることがわかる。図2より、以前はB地点に到達可能であったが、A地点で仕事をするというCoupling制約が加えられることによって到達不可能になったことがわかる。

たとえばここで、この個人が外食に30分とテニスに2時間割り当てることができたとする。喫茶店は、会

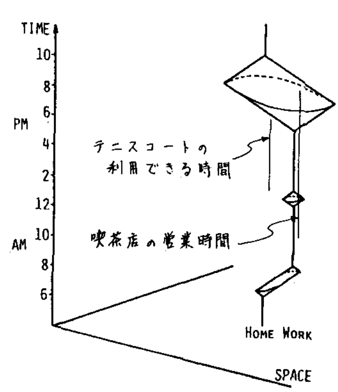

図3．個人の時間－空間プリズム（III）

社のすぐ近くにあり、午前10時から午後8時まで営業している。テニスコートは、会社から少々離れており、午後1時から午後6時まで利用できる。これらの条件を個人のプリズムに加えると図3のようになる。図3より、この個人は、喫茶店で30分間食事することができるが、テニスコートで2時間テニスすることができないということがわかる。このことから、時間制約として単に時間配分制約のみを考えていたのでは片手落ちといえる。すなわち、供給側の時間帯制約も考慮して時間配分および代替案集合の決定をしなければならない。

ここで、個人のCoupling制約の表現方法として図4のようなものを考える。

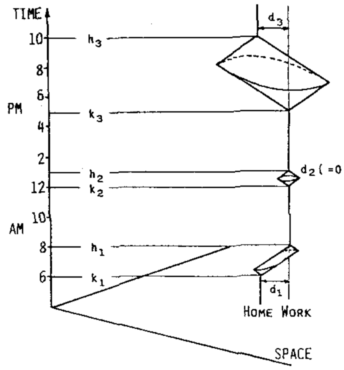

図4. 個人のCoupling制約の表現

図4のプリズムにおいて体積をもたない部分、すなわち直線で表わされた部分は、個人の行動決定に選択の余地がない部分であるといえる。それゆえ、時間帯 $h_n \sim k_n$ は効用最大化行動の分析の対象から外し、時間帯 $k_n \sim h_{n+1}$ について分析を行なえばよい。つまり、効用最大化モデルの時間制約式の T を $T_n = h_{n+1} - k_n$ で与えることによって、「その日の n 番目のプリズムにおける効用最大化行動分析」として分析するのである。

4. プリズムモデルによる種々の政策効果の評価

時間－空間プリズムが人の行動範囲を限定するものであるということは、前節で述べたとおりである。本節では、時間－空間プリズムの数理的性質を理解し、それがどのような交通政策に適用できるのか、またどのような形で交通政策の評価が行なえるのかという点について検討する。

(1)時間－空間プリズムの性質

まず、前節と同じ条件を与えられた個人を考える。Coupling制約のみを挙げると次のようである。

①午前6時には家を出ることが可能で、午後10時までには家に戻らなければならない。

④午前8時から正午12時までの間と午後1時から午後5時までの間は、A地点で仕事をしなければならない。

ここで、①のみの制約条件のプリズムと①④の制約条件のプリズムを重ねて描くと図5のようになる。

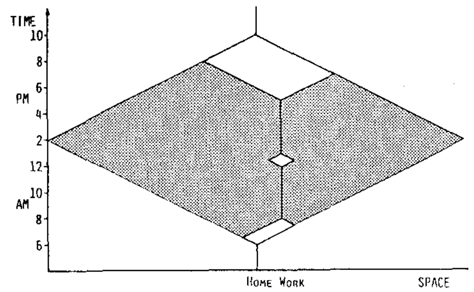

図5. Coupling制約が異なるプリズム

ここでは、図を簡単にするために地図平面を1次元で表示している。図5より、個人の一日の行動を制約する条件を多く考慮するほど、行動範囲を狭く限定できることがわかる。

ところで、図5のようにプリズムの大きさを左右する要因として、個人の制約条件の他に外生的に与えられる交通政策が考えられる。この政策には、次の3つが考えられる。

①ある場所に滞在しなければならない時間を自由に選択できるようにする政策

②ある時間滞在しなければならない場所を変える政策

③利用できるモードを変える政策

そこで、これらの政策の実施によってプリズムの大きさが変化することを例を挙げて示すことにする。

(例1) 仕事に従事する時間帯を変える政策

労働時間と昼休みの時間帯は変わらないが、仕事に従事する時間帯を自由に選択できるようになると、個人のプリズムは図6に示すように変化する。

(例2) 職場までの距離空間を変える政策

職場までの距離が変わると、個人のプリズムは図7

に示すように変化する。

(例3) 利用できるモードの速度を変える政策

新規モードの導入あるいは利用できるモードがいくつも存在するということは、移動速度を自由に変更できることを意味する。この場合、個人のプリズムは図8に示すように変化する。

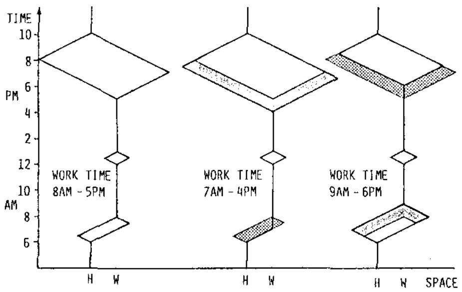

図6. 仕事の時間帯が変化した場合のプリズム

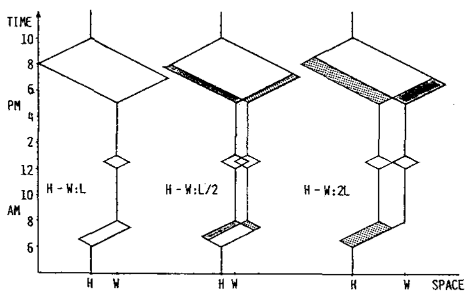

図7. 通勤距離が変化した場合のプリズム

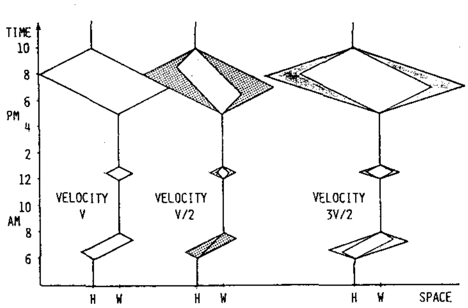

図8. 移動速度が変化した場合のプリズム

(2)交通政策評価への適用

さて、プリズムの変化が何を意味するのかを考察する。プリズムが変化する要因として図9に示すような3つの政策があるということは、前に述べたとおりである。図9より、プリズムの変化により移動範囲や活動時間が変化することがわかる。ここで、トリップそのものが価値をもつ場合を考えると、個人の潜在的移動範囲が増加するということは、個人の効用を増加させるということを意味する。それに対し、ある活動に付随して生じたトリップで、そのトリップが何らの価値をも生み出さないとする場合、人は必要最小時間のみをトリップに配分すると考えられる。したがって、この場合、モードの速度が増加することは、必要最小時間の減少、いいかえれば他の活動へ配分する時間が増加するということを意味し、その結果として個人の効用が増加するということを意味する。このように、潜在的移動範囲または利用可能時間のどちらか、あるいは両方が増加すると、個人の効用が高められる。いいかえれば、単一のプリズムの体積の増加は、個人の効用の増加をもたらすことを意味する。ただし、プリズムの体積の増加量が必ずしも効用の増加量と比例するとはいえない。なぜならば、図9に描いた3つの例は活動時間が同じだけ増加するようにプリズムを変化させたわけであるが、その体積の増加量は異なっているからである。そこで、プリズムの体積の増加量ではなく増加率を比較することによって政策の有効性が評価できるのではないかと考えられる。この点について以下に例を挙げて示す。

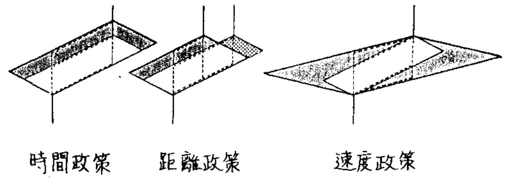

図9. プリズムを変化させる政策

ここで、前節で仮定した個人の帰宅トリップを考える。この個人の利用可能時間(T)は5時間、帰宅距離(L)は30km、利用可能モードの平均速度(V)は30Km/hである。それで、この個人に対して、どの政策が効用の増加に最も有効であるかを調べる。

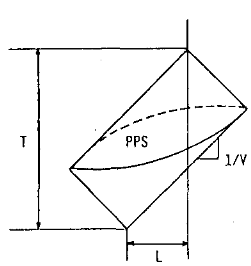

図10. T, L, Vの条件で描かれるプリズム

まず、図10に示すプリズムの体積PPSは、次の式で与えられる。

$$PPS = f(T,L,V) = \frac{\pi}{12} V^2 T^3 \left\{1 - \left(\frac{L}{VT}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}} \quad (27)$$

次に、体積の増加率を比較するわけであるが、以下のようにして増加率を求める。

① $PPS = f_T(T, 30, 30)$

$$\frac{\partial f_T}{\partial T} = 706.9 \times T^2 \times \left(1 - \frac{1}{T^2}\right)^{\frac{3}{2}} + 706.9 \times \left(1 - \frac{1}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \partial f_T / \partial T_{\ (T=5)} = 17315$$

② $PPS = f_L(5, L, 30)$

$$\frac{\partial f_L}{\partial L} = -3.927 \times L \times \left(1 - \frac{L^2}{22500}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \partial f_L / \partial L_{\ (L=30)} = -115.4$$

③ $PPS = f_V(5, 30, V)$

$$\frac{\partial f_V}{\partial V} = 65.45 \times V \times \left(1 - \frac{36}{V^2}\right)^{\frac{3}{2}} + 3534 \times \frac{1}{V} \times \left(1 - \frac{36}{V^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \partial f_V / \partial V_{\ (V=30)} = 1962$$

ここで、$\partial f_T / \partial T_{\ (T=5)}$ は、T = 5，L = 30，V = 30の条件で構成されるプリズムの体積の時間に対する変化率を表わしている。同様に、$\partial f_L / \partial L_{\ (L=30)}$ は距離に対する変化率を表わし，$\partial f_V / \partial V_{\ (V=30)}$ は速度に対する変化率を表わしている。それゆえ、T = 5，L = 30，V = 30の条件を与えられている個人の効用がどの政策に最も敏感に反応するかを調べるためには、これらの変化率の値を比較すればよいといえる。前記の計算結果より、この個人に対して最も有効な政策は、仕事に従事する時間帯を変える政策であることがわかる。

5．今後の課題

本研究の目標とするものは、時間-空間制約の中での個人の効用最大化行動を定式化し、それを用いて交通行動分析をしようとするものである。しかし、現時点では、時間配分を考慮した効用最大化理論の枠組では交通モデルを定式化できることを示しえたものの、時間-空間制約を考慮した形ではまだ不十分であり、本稿で述べたように、時間-空間制約というものをプリズムモデルを用いて「視覚的」に考慮しているにすぎない。3節の最後に記した個人のCoupling制約の表現方法は、効用最大化を行なう領域がこのCoupling制約によってどのように狭められるのかを示したものであり、これをモデル化することが時間-空間制約の中での交通行動分析のひとつの定式化の方法を与えるであろう。

本研究では、データを扱う段階にまでも致ってない。しかし、この種の非集計モデルではデータの扱いも今後問題となるであろう。最後に、プリズムモデルの数理的性質を用いた交通政策の評価方法をステップにして、時間-空間制約の数式化を実現することが当面の課題である。

参考文献

(1) Deserpa,A.J. (1971) A theory of the economic of time, The Economic Jour. Vol. 81,pp.828-845.

(2) Bruzelius,N. (1979) The Value of Travel Time, Croom Helm London.

(3) Domencich,T.A. and McFadden,D. (1975) Urban Travel Demand, North Holland.

(4) Ben Akiva and S.R. Lerman (1979) Disaggregate Travel and Mobility Choice Model and Measures of Accessibility, Behavioural Travel Modelling, Croom Helm, London,pp.654-679.

(5) Sasaki,T. (1971) Estimation of Pwrson Trip Patterns through Markov Chains, Traffic Flow & Transportation, Ed. by G. F. Newell, American Elsevier.

(6) 近藤勝直 (1977) トリップチェイ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

(7) Hägerstrand,T. (1970) What about People in Regional science?, Papers and Proc., Regional Science Association, vol.24,pp 54-63.

(8) Burns,L.D.(1979) Transportation, Temporal and Spatial Components of Accessibility, Lexington,Mass.Lexington Books.

(9) Szalai,A. (1966) Trends in comparative time budget research, The American Behavioral Scientist, Vol.9,pp.3-8.

(10) Gutenschwager,G.A. (1973) The time Budget-Activity Systems per Spective in Urvan Research and Planning, AIP Journal.

(11) 宮城俊彦 (1983) 時間-空間系における交通行動分析（その1），土木計画学研究発表会講演集，pp.371-378