

交通需要解析のための 所得制約・自由時間制約下での消費行動のモデル化

藤井 聰¹・北村隆一²・熊田善亮³

¹正会員 工博 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻助手(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻修士課程(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究では、交通行動はその他の種々の行動とは独立ではないという認識のもと、交通行動を伴う活動は自由時間と所得を投入して自己生産されるサービスの一環であると考え、ランダム効用理論に基づいて消費行動全般をモデル化することで個人の交通需要を算定する行動モデルを構築した。そして、個人の交通行動と時間利用、出費のデータに基づいて非線形 Tobit モデルを適用してモデル内の未知パラメータの推定計算を行った。推定の結果、所得の多い男性ほど非日常活動により多くの時間と所得を投入する傾向にあること、観光施設が多く、自宅から近い地域ほど訪れる可能性が高いこと等が統計的に示された。最後に、推定されたモデルから交通頻度、支出、自由消費に関する需要関数を誘導し、それに基づいたモンテカルロシミュレーション法によるシナリオ分析を行った。

Key Words: travel behavior, temporal and monetary constraints, random utility theory

1.はじめに

(1) 交通行動とその他の行動との関係

個人が実行する交通行動は、その個人が実行するその他の種々の活動と独立でないのは自明であろう^{1), 2)}。ところが、個人が実行する活動には様々なものが存在しており、それら全てを考慮した交通行動モデルを開発することが不可能であることも事実である。したがって、交通需要解析を目指して交通行動をモデル化する場合に重要となるのは、その他の活動を考慮すべきか否かという議論というよりはむしろ、いかなる目的のもと、いずれの活動を、どのような方法で考慮すべきか、といった方法論についての議論である³⁾。

このような認識のもとで、従来においても様々な交通需要解析を目的とする研究が重ねられてきた。その中の代表的な研究アプローチが Activity-Based Approach^{4), 5)}である。このアプローチは、交通行動にのみ着目した Trip-Based Approach の行動モデルとは異なり、一日を通じての活動、厳密に言うならば、一日を通じての時空間内の行動軌跡に焦点をあてるものである。近年において、個人の生活行動に直接的に働きかける交通需要マネジメント方策、あるいは、個人の生活の質を考慮した政策評価の必要性が高まるにともなって、Activity-Based Approach の有効性と必要性も向上し^{6), 7), 8)}、現在では様々な種類の Activity-Based Approach に基づい

た行動モデルが開発されるに至っている¹¹⁾。

ところが、冒頭にも述べたように、個人が実行する行動を全て考慮した行動モデルを開発することは当然ながら不可能である。Activity-Based Approach のモデルが考慮していない側面の中で、交通行動の解析を行う上で重大な意義を持つものとして、所得に基づく種々の消費行動が挙げられよう。

(2) 所得に基づく消費行動をモデル化するための枠組み

所得に基づいた消費行動と個人の活動とを同時に考慮した最も初期的な行動モデルとして Becker⁹⁾のものが挙げられる。このモデルの基本的な考え方は、世帯は利用可能な時間と所得に基づいて財・サービスを自己生産し、それを消費することで得られる効用を最大化するように消費行動を決定している、というものである。それ以後、このモデルは様々な研究者によって一般化、あるいは、発展がなされており、それ以後の消費者理論や時間価値研究、あるいは、行動モデルに多大な影響を及ぼしたものと位置付けられる¹²⁾。

この考え方方が Activity-Based Approach の文脈の中で応用された初期的な研究として、Kitamura の時間配分モデル¹⁰⁾が挙げられる。このモデルは、所得に基づいた消費行動ではなく、時間資源に基づいた活動サービスの消費行動をモデル化するものであり、それ以後、交通需要解析を目的として様々な形で発展¹¹⁾、応用¹²⁾がなさ

れている。現在では、自由時間制約をプリズム制約¹³⁾という形に一般化した上で、連続的な活動時間と、離散的な活動場所、内容、順番、交通機関との選択行動を同時に記述する離散・連続モデルにもその考え方が適用されている^{14), 15), 16)}。

これらの研究では、実証的な行動データに基づいて各パラメータが推定され、効用関数の誘導がなされている。しかし、それ故に、所得に基づいた消費行動を視野にいれた交通需要解析モデルの開発が立ち後れていることも否定できない。これは、比較的長い期間での行動を対象とする場合には所得制約が重要な意味を持つものとなる一方で、Activity-Based Approach は短い期間での行動（例えば一日の活動）を対象とすることが本質的な原因であるが、より直接的な原因是、交通行動と消費行動についての非集計データの欠如であろう。交通行動と生活行動とを観測する Activity-Diary 調査⁶⁾はその調査手法が比較的古くから確立されていたのに対して、交通行動と消費行動との双方を観測する調査の手法は未だ確立されておらず、また、実施された例も希である。実際、Jara-Diaz¹⁷⁾や Kraan¹⁸⁾は、交通需要解析を行うための行動モデルを、自由時間制約だけでなく、所得制約も考慮した上で定式化しているが、需要関数内の未知パラメータが推定されておらず、かつ、その推定方法も示されていない。

(3) 所得制約を考慮した交通需要解析モデル

一方、Activity-Based Approach が対象としていた一日の活動パターンではなく、一月、あるいは、一年等のある程度の期間での個人の交通行動の累積を記述するモデルを構築する際に、所得制約を考慮する方法論が室町ら^{19), 20)}、あるいは、森杉ら²¹⁾によって提案されている。室町らは、買い物場所別の買い物頻度を、森杉らは目的地域別の来訪頻度をそれぞれ対象としている。なお、このような来訪頻度は、交通需要予測において非常に重要な指標であり²²⁾、従来からもいくつかのアプローチに基づいてモデル化が図られている^{22), 23), 24), 25), 26)}。

室町ら、森杉らのモデルはいずれも、Becker のモデルと同様に、複数の財・サービス（ここでは、買い物場所別のあるいは目的地別の来訪行動）を想定して、効用最大化仮説に基づいて、それらの財・サービスへの資源の配分問題を解くことにより需要解析を目指すものである。ただし、室町らが適用した離散・連続モデルは複数の財に資源を同時に配分するような現象を記述することが、逆に、森杉らのモデルは特定の財への資源の配分量が 0 となる現象を記述することがそれぞれ困難である。それに加えて、森杉らのモデルを代表的個人を想定した上

で需要解析に適用する場合²⁾には、個人間の異質性を考慮できない、あるいは、行動論的基盤が希薄となる、といった集計モデルが抱える問題²⁷⁾が、また実際の個人を対象とした場合には、各個人の目的地ごとの来訪頻度のシェアとモデル上での選択確率とが必ずしも一致しないという課題が生じることとなるものと考えられる²⁸⁾。

これらの点に着目して、藤井ら²⁹⁾は、Kitamura の時間配分モデル¹⁰⁾で考慮されていた各財（活動サービス）への資源配分量が 0 となる条件²⁹⁾を用いて、個人の交通行動を記述する非集計型の行動モデルを構築している。このモデルは、ランダム効用最大化仮説に基づいて、世帯の所得制約下での女性個人の海外旅行、国内旅行行動を記述するものであり、その際に、海外旅行、国内旅行に行くか、行かないか、といった離散的な選択も、旅行費用が 0 となるという条件に基づいて間接的に内生化している点が特徴である。この点から、藤井らの研究では、このモデルを連続・離散選択モデルと呼称している。

(4) 本研究の目的

このように、交通行動が他の行動と独立ではない、という認識のもと、様々な行動モデルが提案されてきている。以上で概観した従来の研究を大別すると、自由時間制約下での時間の消費行動に着目したモデルと、所得制約下での所得の消費行動に着目したモデルとに分類することができよう。しかし、個人の行動が、時間にも所得にも制約されるものであることを考えると、これらの両者を考慮した行動モデルの開発も重要な課題の一つであるものと考えられる。

特に、レジャー・娯楽といった非日常的な活動（以下、非日常活動）は、必要とされる費用も時間も日常活動と比べて大きく、所得制約と自由時間制約の両者が大きな意味を持つ活動と言えよう。その一方で、ゆとりある社会の実現を目指すならば、今後の交通計画では定型的な通勤交通等ではなく、非日常活動に伴う交通についての計画が中心的課題の一つとなるものとも考えられる。

さらに、このような行動モデルを交通需要解析に適用することを考えた場合、実証的な非集計データを収集した上で、そのデータに適合するような形で行動モデルを構築することが必要であろう。

本研究では以上の認識のもと、交通行動以外の種々の消費行動も視野に入れた上で、自由時間制約と所得制約の両者を同時に考慮した、非日常活動についての交通行動モデルの構築を図る。モデル構築にあたっては、筆者らが従来よりいくつかのアプローチに基づいて



図-1 京阪神 12 地域

行動モデルの開発を行ってきた大阪湾岸パネル調査の一部である生活圏に関するデータ^{22), 24), 25), 26)}を用いた。特に、大阪湾岸パネルの第四回調査では、交通行動のデータに加えて、所得と出費、および、時間利用に関するデータを収集しており、本稿ではこれらのデータを合わせて用いた実証的な数値計算例を示す。

2. モデルシステムの概要

(1) モデルシステムの内生変数と従来のアプローチとの比較

本研究で提案するモデルシステムは、所得制約、自由時間制約下での、個人の非日常活動に伴う交通需要を予測するものであり、内生変数として以下の非日常活動の状態を表すベクトル \mathbf{N} を出力するものである。

$$\mathbf{N} = (N_1, N_2, \dots, N_k, \dots, N_K) \quad (1)$$

N_k :個人が非日常活動を行うために、地域 k に一月間に訪れる回数(以下、来訪頻度)

なお、後に示す数値計算事例では、ベクトル \mathbf{N} を規定する地域集合として、図-1 に示した京阪神地域の 12 地域を想定した。

さて、このベクトル \mathbf{N} は個人の非日常活動実行場所の空間的拡張を直接的に意味するものであり、非日常活動目的の交通需要の基礎指標と捉えることができる。例えば、集計化することで非日常活動目的の OD 交通量や交通生成量等の交通需要に関する指標を推定することが可能である。

筆者らは、この認識のもと、このベクトル \mathbf{N} を出力するいくつかのタイプのモデルシステム、例えば、Direct

Demand モデルの考え方を適用した簡便なもの²⁵⁾や、心理的な距離感を考慮した離散選択モデルシステム²²⁾、あるいは、選択構造の個人間の異質性を潜在セグメントアプローチに基づいて考慮したもの^{24), 26)}等を構築してきたが、それらのモデルシステムはいずれも Trip-Based Approach に基づいたものであった。すなわち、従来のモデルシステムが、1)個人の交通行動に着目し、2)個人の交通行動を目的地選択や発生選択といったいくつかの局面に分割し、それらを個別にモデル化して複数のモデルを構築し、それらを統合したものである、という一般的、伝統的な非集計モデルシステムの形態をとっていた。一方で、本研究で提案するモデルは、1)交通行動以外の消費行動にも着目し、2)それらを複数の局面に分割することなく統一的に記述する、というものである。この点が、本研究と従来の研究との大きな相違点である。

(2) モデルの定式化

a) 行動仮説

本研究では、非日常活動の実行状態 \mathbf{N} についての需要関数を誘導するにあたり、個人は以下の最適化問題の解として与えられる行動を探っているものと仮定する。

$$U(\mathbf{N}, MO, TH) \rightarrow \max \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in \Omega} M_k N_k + MO = I \quad (3a)$$

$$\sum_{k \in \Omega} T_k N_k + TH = FT \quad (3b)$$

$$N_k \geq 0 \quad (\forall k \in \Omega) \quad (3c)$$

$$MO \geq 0 \quad (3d)$$

$$TH \geq 0 \quad (3e)$$

I :一月の間に自由に消費できる総所得(以下、総自由所得)

FT :一月間の総自由時間

$U(\cdot)$: I と FT を投入して自己生産する財・サービスの消費に伴う効用の直接効用関数

MO :一月間に非日常活動以外に投入する総自由所得

TH :一月間の非日常活動のための時間以外の総自由時間

M_k :地域 k に来訪する際の一回あたりの所要費用(滞在費用と往復移動費用の和)

T_k :地域 k に来訪する際の一回あたりの所要時間(滞在時間と往復移動時間の和)

Ω :来訪行動の対象となる地域全体の集合

この定式化は、個人は、式(3a)～(3e)の制約条件の下で、最も満足が得られるように、非日常活動の状態とそれ以外の財とサービスの消費行動に投入する時間と所得を調整する、ということを意味している。そして、式(3a)は所得制約を、式(3b)は自由時間制約、そして、式(3c)～(3e)は費用と時間の非負条件を表している。

b)効用関数の定式化

さて、直接効用関数 $U(\cdot)$ について、地域別の非日常活動に伴う効用 $U_k(N_k)$ と、 TH を投入して自己生産する財・サービスの消費に伴う効用 $UH(TH)$ 、 MO を投入して自己生産する財・サービスの消費に伴う効用 $UO(MO)$ の総和であると考える。すなわち、

$$U(N, MO, TH) = \sum_{k \in \Omega} U_k(N_k) + UO(MO) + UH(TH) \quad (4)$$

なお、 TH と MO との間に効用値に対しての相互作用が存在することも十分考えられるが、本研究では実証データからの推定可能性を考慮して両者に独立の関数を仮定した。同様にデータの制約もあり、各地域に来訪する際の一回あたりの所要費用及び所要時間は固定値を用いている。これらの点に関しては、以下の(3)節で更に考察を加える。

$U_k(N_k)$ を定式化するにあたっては、来訪頻度 N_k が、来訪行動サービスの消費行動における消費量を意味するものと考え、消費量が増加することによって効用 $U_k(N_k)$ は増加するとともに、その限界効用は低減するものと考えて、以下のように定式化する^{10), 7), 16)}。

$$U_k(N_k) = \alpha_n^k \ln(N_k + 1) \quad (5)$$

α_n^k : 非負の係数

ここで、 N_k に 1 を加えているのは、 $N_k \rightarrow 0$ で限界効用が無限大に発散することを回避し、 N_k が 0 となる、すなわち、地域 k に一度も訪れないという場合をモデル上で表現するためである^{7), 28)}。なお、対数関数の妥当性に関しては、藤井ら¹⁶⁾によって実証的に検討されている。

一方、 $UO(MO)$ や $UH(TH)$ は MO や TH を投入して生産される財やサービスの特性に依存する。そのような財やサービスには種々のものが考えられるが、それらの詳細に関するデータを収集することは非常に困難である。本研究では、一定の価格のもとで、 MO 、 TH に基づく種々の財や活動サービスを一定比率で消費しているものと考え³⁰⁾、かつ、式(5)と同様に総効用の単調増加と、限界効用の低減を考慮して、対数関数を用いて以下の

ように定式化する。

$$UO(MO) = \beta_m \ln(MO) \quad (6)$$

$$UH(TH) = \beta_t \ln(TH) \quad (7)$$

β , β_m : 非負の係数

これらの式において、式(5)とは異なり、 TH や MO に 1 に加えていないのは、非日常活動以外の財、サービスは人間にとて必要不可欠なものだからである。このように定式化すると、 $TH \rightarrow 0$ あるいは $MO \rightarrow 0$ において、限界効用が無限大に発散するため、非日常活動以外の財やサービスに、例えば食事やそのための買い物に、時間や所得が必ず配分されるようになる。

ここで、 β , β_m はそれぞれ、 TH , MO に基づく財・サービスに対する選好の程度を表す非負の係数であり、個人属性に依存するものと考えられる。そして、これらの係数の非負条件を考慮して、以下のように定式化する。

$$\beta_m = \exp(BZ) \quad (8)$$

$$\beta_t = \exp(CZ) \quad (9)$$

B, C : パラメータベクトル

Z : 個人属性

一方、 α_n^k は地域 k での非日常活動サービスに対する選好の程度を意味するものであり、地域 k の属性に依存するものと考えられる。特に、 α_n^k については、本モデルシステムが主に着目している非日常活動に伴う交通需要に直接影響を及ぼす係数であるため、個人の交通行動のランダム性を考慮するために誤差項を導入し、かつ、非負条件を考慮して以下のように定式化した。

$$\alpha_n^k = \exp(A\mathbf{X}_k + \varepsilon_k) \quad (10)$$

A : パラメータベクトル

\mathbf{X}_k : 地域 k の地域属性

ε_k : 誤差項

なお式(3a), (3b)を通じ、交通行動のランダム性が TH , MO のランダム性に繋がる事に注意されたい。

さて、以上の式(4)～(10)を式(2)に代入すると、直接効用関数は以下のようになる。

$$U(N, MO, TH) = \quad (11)$$

$$\sum_{k \in \Omega} \left\{ e^{A\mathbf{X}_k + \varepsilon_k} \ln(N_k + 1) \right\} + e^{BZ} \ln(TH) + e^{CZ} \ln(MO)$$

c) 未知パラメータの推定方法

以上の最適化問題を解くにあたり、式(12)のラグランジエ関数 $LA(\cdot)$ を定義すると、キューンタッカーの条件より、最適解が同時に満たすべき方程式群として式(13a)～(13h)が誘導される。

$$LA(N, MO, TH) = U(N, MO, TH) + \dots \quad (12)$$

$$K_1 \left(\sum_{k \in \Omega} M_k N_k + MO - I \right) + K_2 \left(\sum_{k \in \Omega} T_k N_k + TH - FT \right)$$

K_1, K_2 : ラグランジエの未定定数

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial N_k} \leq 0 \quad (\forall k) \quad (13a)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial N_k} \cdot N_k^* = 0 \quad (\forall k) \quad (13b)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial MO} \leq 0 \quad (13c)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial MO} \cdot MO^* = 0 \quad (13d)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial TH} \leq 0 \quad (13e)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial TH} \cdot TH^* = 0 \quad (13f)$$

$$\sum_{k \in \Omega} M_k N_k^* + MO^* - I = 0 \quad (13g)$$

$$\sum_{k \in \Omega} T_k N_k^* + TH^* - FT = 0 \quad (13h)$$

N^*, N_k^*, MO^*, TH^* : それぞれ N, N_k, MO, TH の最適解

ここで、式(11), (12)ならびに式(13a)～(13h)から、以下の需要関数が誘導される^[3]。

$$\begin{pmatrix} N^* \\ MO^* \\ TH^* \end{pmatrix} = D(X, Z, I, FT, T, M | A, B, C, \epsilon) \quad (14)$$

$D(\cdot)$: 需要関数

X : X_k を第 k 列ベクトルに持つ行列

T : T_k を第 k 要素に持つベクトル

M : M_k を第 k 要素に持つベクトル

ϵ : ϵ_k を第 k 要素に持つベクトル

式(12)より、外生変数 X, Z と制約条件 I, FT 、各地域での非日常活動の所要費用と所要時間 T, M 、ならびに、パラメータベクトル A, B, C と誤差ベクトル ϵ が既知の場

合、本モデルシステムの内生変数である N^* を誘導することができる。

ここで、需要予測をおこなうために不可欠なのが、パラメータベクトル A, B, C と誤差ベクトル ϵ の分布である。本研究では需要関数を誘導する仮定で導かれる最適解 N^*, MO^*, TH^* が満たすべき以下の必要条件式^[4]を用いて、アンケート調査により観測されている来訪頻度、出費、時間利用の状態がその個人にとっての最適解であるという条件のもと、パラメータ推定を行うこととした。

$$\frac{1}{N_k^* + 1} \begin{cases} = \left[\frac{M_k e^{BZ - AX_k}}{MO^*} + \frac{T_k e^{CZ - AX_k}}{TH^*} \right] e^{\epsilon_k} & \text{if } (N_k^* \neq 0) \\ \leq \left[\frac{M_k e^{BZ - AX_k}}{MO^*} + \frac{T_k e^{CZ - AX_k}}{TH^*} \right] e^{\epsilon_k} & \text{if } (N_k^* = 0) \end{cases} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (15)$$

ここで、誤差項 ϵ_k を、平均 0、分散を σ^2 の互いに独立な正規分布に従うものと仮定すると、ある個人の地域 k について以下の尤度関数が誘導される。

$$L = \begin{cases} \frac{N_k^* + 1}{\sigma} \phi \left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{W_k(N_k^* + 1)} \right) & \text{if } (N_k^* \neq 0) \\ 1 - \Phi \left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{W_k(N_k^* + 1)} \right) & \text{if } (N_k^* = 0) \end{cases} \quad (16)$$

ただし、

$$W_k = \frac{M_k \exp(BZ - AX_k)}{MO^*} + \frac{T_k \exp(CZ - AX_k)}{TH^*}$$

$\phi(\cdot)$: 標準正規確率密度関数

$\Phi(\cdot)$: 標準正規分布関数

この式(16)に基づいて、推定サンプル内の各ケースについての尤度を算定し、それらの対数を全て足しあわせて対数尤度関数を誘導する。そして、それを最大化することで、未知パラメータ A, B, C ならびに誤差分散 σ^2 を推定する。

なお、式(15)のような形式の統計モデルは、一般に Tobit モデル^[3]と言われるが、その右辺が線形関数ではなく非線形関数であるため、これを非線形 Tobit モデルと呼ぶ。

(3) 基本的仮定と定式化の妥当性に関する考察と本研究の意義についての再考察

本研究では、以上のような考え方に基づいて、モデルを定式化したが、ここでは本研究の仮定と定式化の妥当

性に関する考察を加えるとともに、再度、本研究の意義を確認する。

a)効用最大化仮説について

本研究では、個人は効用最大化の解として与えられる行動を実行するものと仮定したが、この仮定の妥当性に関しては、批判がなされているのも事実である^{32), 33)}。しかし、意思決定時においては認知や実行可能な行為等についての限界はあるとは考えられるものの、その一方で自らが変更可能な変数(決定変数)を調整することで、より好ましい状況の実現を図る傾向が存在することは明らかであろう。実証データへの適合を前提として交通需要解析モデルとしての有効性を目指す本モデルでは、この点に着目し、個人の意思決定プロセスを直接モデル化すること³⁴⁾を放棄し、そのプロセスの結果として現出する観測可能な行動が満たすであろう統計的性質の記述を目指したものである³⁵⁾。ただし、需要解析モデルの有効性をより向上させるためには、やはり、選択肢やその属性等の認知、あるいは、検索や判断のコストや過誤といった様々な要素を総合的に考慮する必要があるものと考えられる。そのためにも、個人の認知や判断のコストと過誤、あるいはスケジューリングについてのデータを収集し、それらの特質を分析した上でモデルに導入することが今後必要であるものと思われる^{36), 37)}。

b)非日常活動以外の財・サービスの消費活動に伴う効用の定式化について

次に、式(6)、(7)で定義したように、本研究では費用 MO と時間 TH を投入して生産される財、サービスを消費することで生じる効用をそれぞれ独立に定義している。ところが、例えば日常的な活動である食事や読書は、時間と所得の双方を投入して生産されるサービスであり、したがって、 $UO(MO)$ と $UH(TH)$ との間には相互作用が存在するものと考えられる。しかし、推定計算を行うために用いたデータセットには、先述のように費用 MO と時間 TH を投入して生産される財、サービスに関する情報は含まれておらず、したがって、両者の相互関係を的確に把握することは困難であった。この点から、本研究では、式(6)、(7)に定義したように両者の効用を独立と扱うこととした。

c)地域別の所要費用・時間の意思決定について

式(2)に示したように N 、 MO 、 TH のみを個人の決定変数であるとみなしているが、一回来訪あたりの所要時間 T_k や所要費用 M_k も決定変数として考えられる。しかし、 N や MO 、 TH は一月間の行動の累計である一方で、 T_k 、 M_k は来訪するという条件の下でしか存立しないものであり、したがって、必ずしも N 、 MO 、 TH と T_k 、 M_k とを同時に意思決定していると考えることが適切であるとは断定

できないものとも思われる。さらに、 T_k 、 M_k には、交通ネットワークの条件によって規定される移動に伴う所要時間と所要費用がそれに含まれている。この点を考えると、個人が T_k 、 M_k を完全に自由に決定しているとは考えがたい。それに加えて、現時点でも、未知パラメータを推定する際に適用している統計モデルが、非線形 Tobit モデルといった決して推定計算が容易ではないものであることを考えると、 T_k 、 M_k を決定変数とすることはパラメータの推定計算の実行可能性の点からも困難であるといえる。これらから、本研究では、需要解析可能な解析ツールを提案することを最も重要な課題と位置づけ、今回は T_k 、 M_k を決定変数として導入することを避けた。

しかし、交通需要解析を行う時点で、 T_k 、 M_k をモデルシステムの外生変数として位置づけたままでは、需要解析、需要予測へのモデルの適用性が著しく低下することが危惧される。そこで、本研究では、個人の意思決定を対象とした理論モデルではないものの、 T_k 、 M_k の分布を外生変数に基づいて説明する統計学的モデルを用いることで、これらの変数を内生化し、需要予測モデルの適用性の低下を避けることとした。本研究では、 T_k 、 M_k が非負の変数であることから、その分布を対数正規分布であると仮定して¹⁵⁾、以下の構造方程式モデルで内生化した。

$$\begin{pmatrix} \ln(M_k) \\ \ln(T_k) \end{pmatrix} = \mathbf{G} \begin{pmatrix} \ln(M_k) \\ \ln(T_k) \end{pmatrix} + \mathbf{HY}_k + \begin{pmatrix} \xi_M \\ \xi_T \end{pmatrix} \quad (17)$$

\mathbf{B}, \mathbf{H} : パラメータ行列

ξ_M, ξ_T : 多変量正規分布に従う誤差項

\mathbf{Y}_k : 説明変数ベクトル

なお、この式は、 T_k 、 M_k はそれぞれの期待値が \mathbf{Y}_k に依存し、かつ、互いに相互依存関係を持つ非独立の確率変数であることを意味している。

d)誤差項の仮定について

式(10)に仮定したように、非日常活動の来訪行動についての選好の程度を意味する係数 $\alpha_{n,k}$ に、行動のランダム性を考慮するために誤差項 ϵ_k を導入したが、 TH 、 MO に基づく財・サービスについての選好の程度を表す係数 β_n 、 β_m に関しても同様に、分析者にとって不確実性を意味する誤差項を導入する必要性が考えられる。実際、藤井らが提案している所得制約下での交通需要解析モデルでは、それらの誤差項の存在を認めた上で、3 つの活動への資源配分モデルを、2 つの線形方程式から構成される連立型の Tobit モデルの枠組みで推定計算を行っている²⁸⁾。ところが、たかだか 2 元線形連立方程式の Tobit モデルであるにも関わらず、その推定計算に約

5時間(Sun Sparc 5使用)を要するものであった。一方、本研究では、Tobitモデルにおける関数が非線形である上に、12地域への非日常活動とそれ以外の所得、それ以外の時間に基づく活動の合計14活動への所得と自由時間の両者の資源配分を取り扱うモデルであり、したがって、一個人あたりの方程式数が13本であり、その推定計算に必要な計算コストが非現実的なものとなるのは明らかであった。この点から、本研究では、少なくとも来訪行動のランダム性を表現することを優先して、 α_n^k に互いに独立な誤差項 ϵ_k を導入するにとどめた。

a) 本研究の意義に関する再考察

このように、本稿で定式化したモデルは、いくつかの限界を持つものであるが、これらの課題点はいずれもが入手可能な非集計データの欠如、あるいは、需要関数内の未知パラメータの推定計算の実行可能性の限界に起因するものである。これらの課題については、推定計算の実行可能性の限界と、被験者の回答労力の増大に伴うデータの信頼性の確保、適切な調査技法の検討といった種々の点を考慮しつつ、より適切な定式化を検討とするといった努力を積み重ねることが不可欠である。

ただし、このような限界を持つものではあるものの、これまでにも述べてきたように、本モデルシステムは時間制約と所得制約下での交通行動とそれ以外の消費行動の両者を、それらの間の種々のトレードオフを考慮しつつ統一的にモデル化するものである、という点が、従来の交通需要解析モデルと大きく異なる特徴である。

3. 未知パラメータの推定計算

(1) 推定計算のためのデータの概要

a) アンケート調査の概要

本研究では、大阪湾岸パネル調査^{38), 39)}の、1996年11月に実施された第四回調査のデータを用いてモデルシステムの構築を図る。

このパネル調査は、阪神高速湾岸線の供用、ならびに、阪神淡路大震災の被災と復旧が個人の生活行動、交通行動、生活圏に及ぼした影響を把握し、分析することを目的として、1993年、1994年、1995年、1996年に第一回調査から第四回調査までが実施された。サンプルについては、調査費用の削減を目的として、パネル調査に先立って予備調査を実施することで抽出した。予備調査では、設問項目の少ない調査票を、大阪湾岸地域の居住者を中心として抽出した7,000世帯に対して郵送で、湾岸線競合路線利用者の10,500人に対して路側での手渡しで配布した。本パネル調査においては、いずれ

の調査においても、予備調査で回答のあった被験者を対象として、郵送配布、郵送回収によって調査を実施している。

大阪湾岸パネル調査第四回調査では、3,170世帯に一世帯あたり4枚の調査票を郵送配布し、16才以上の世帯構成員の回答を依頼した。そして、412世帯(反応世帯率13%)から660人の調査票を回収した。

b) 来訪行動に関するデータ

本研究では、大阪湾岸パネル調査第四回調査で収集したデータの中から、年齢、性別、世帯構成員などの個人属性、世帯属性と、個人の生活圏に関するデータを用いる。生活圏についての調査では、図-1に示した12地域への、過去一月間の以下の3つの目的での来訪行動について調査した。

・日常的自由活動: 買い物、飲食、私的な訪問等

・仕事目的活動: 仕事、業務、アルバイト等

・非日常活動: 旅行、日帰りレジャー、娯楽

そして、来訪行動に関して、以下の質問項目を設けた。

①地域別目的別の過去一月間の来訪頻度

②地域別目的別の平均滞在時間

③地域別目的別の平均滞在費用

④地域別目的別の平均往復所要時間

⑤地域別目的別の平均往復所要費用 等

これらのうち、①は全ての地域についての回答を求めたが、②～⑤については①の回答が0ではない地域についてのみ、すなわち、過去一月に少なくとも1回は訪れた地域についてのみの回答を求めた。これは、調査設計の時点で、それら②～⑤の変数は訪れた地域についてのみ成立しえる変数であり、訪れたことがない地域についての滞在時間・費用や往復時間・費用を既に個人が決定しているとは考えられず、したがって、無理に回答を求めて十分な信頼性のあるデータが得られるとは考えられなかったからである。

本研究では、これらの調査項目のうち、①の項目から全ての地域についての非日常活動目的の来訪頻度の最適値^[6] N_k^* を、 N_k^* が0ではない地域についての来訪行動に伴う所要時間 T_k を②、④の項目から、 N_k^* が0ではない地域についての来訪行動に伴う所要費用 M_k を③、⑤の項目から、それぞれ各個人ごとに求めた。

c) 来訪行動に伴う所要時間と所要費用について

式(16)に基づいて最尤推定法でパラメータを推定する場合には、全ての地域についての所要費用 M_k 、所要時間 T_k が必要である。ところが、前項で述べたように、 N_k^* が0ではない地域についてのみの M_k 、 T_k しかデータとして得られていない。そこで、本研究では、instrumental variable^[40]の考え方に基づいて、1)式(16)に基づいた推

表-1 来訪行動に伴う費用と出費の説明モデルの推定結果

		$\ln(M_k)$	$\ln(T_k)$
	変数	パラメータ t 値	パラメータ t 値
B	$\ln(T_k)$	0.50 4.61	
H	年齢35才以下 ^{b)}	-0.28 -1.59	
	年齢55才以上 ^{b)}	-0.34 -1.83	0.19 1.54
	低収入者 ^{D,a)}		0.0088 3.07
	公共交通時間 ^{b)}	-0.43 -1.36	
	$\ln(\text{公共交通時間})^b)$		0.11 2.59
	有職者 ^{D,a)} ×公共交通時間 ^{b)}		-0.11 -3.23
	高収入者 ^{D,a)} ×公共交通費用 ^{b)}		0.23 1.93
	自動車時間 ^{b)}	0.015 2.22	
	有職者 ^{D,a)} ×自動車時間 ^{b)}	-0.21 -1.84	
	低収入者 ^{D,a)} ×自動車時間 ^{b)}	0.00090 3.49	
	自動車費用 ^{b)}		0.00020 1.81
	低収入者 ^{D,a)} ×自動車費用 ^{b)}		0.00070 1.99
	飲食店数 ^{a)}		0.0020 4.12
	$\ln(\text{小売店数}^a)$ の対数		0.11 2.86
	重相関係数	0.39	0.44

Sample Size = 306, χ^2 (df = 53) = 34.4 (p 値 = 0.98%)

[注意]

ダミー変数の場合、右肩に「^{b)}」を記載

a) 低収入者=個人年収 300 万以下、高収入者=個人年収 1000 万以上

b) 自宅地域と地域 k の間の機関別時間と費用

c) 会社員、公務員、自営業、パートのいずれか

d) 単位面積あたりの密度 (/km²)

e) 限界確率

定計算を行うに先立って式(17)に定義した **B**, **H** ならびに誤差ベクトル ξ の分散共分散行列を推定し、2)それらの推定値に基づいて観測されていない地域についての T_k , M_k を推定し、3)その推定値と観測値の双方を用いて式(16)に基づいてパラメータベクトル **A**, **B**, **C** を推定する、という手順を踏むこととした。

B, **H** を推定するにあたっては、前項 a)で述べた調査の回答者の中から上記の①～⑤、ならびに、個人属性に関する調査項目を不備なく回答した 211 人を抽出した。そして、その 211 人が報告した 306 地域への来訪行動における T_k , M_k の対数を被説明変数として、最尤推定法に基づいて推定した^[7]。推定計算を行う際には、有意とはならなかったパラメータについては 0 に固定した。以上の前提に基づいた推定結果を表-1 に示す。

モデルの適合度としては、 $\ln(M_k)$, $\ln(T_k)$ の重相関係数がいずれも 0.4 程度であるが、モデル全体の適合度を表す χ^2 は 34.4 と十分に小さな値をとっていることが分かる^[8]。また個々の係数からは、 T_k が大きい地域は M_k も大きいこと、自宅から地域 k までの所要時間、所要費用が T_k , M_k に大きく影響していること、および、その影響の程度は職業や収入によって異なっていること、そして、飲食店や小売り店の密度が高い地域ほど T_k が大きい、などといった傾向が読みとれる。

こうして得られた推定結果に基づいて、上述のように、

N_k が 0 であった地域 k についての T_k , M_k の予測値分布を求めた上でその期待値を算定し、それらの値を用いて、パラメータベクトル **A**, **B**, **C** を推定することとした。

d) 総自由所得・時間についてのデータ

本調査では、個人属性としては、年齢、性別、職業、年収などに加えて、一月間に自由に使うことのできる総所得の設問も設けた。この設問から、一月間の総自由所得 I を求めた。

一方、一月間の総自由時間 FT については、回答者が総自由所得 I と同様の形で、直接的に回答することは極めて困難であることが調査設計の時点で予想された。そこで、回答者にとっては回答し易いであろうという見込みのもとで以下の設問項目を設け、そこで得られたデータに基づいて事後的に総自由時間 FT を算定することとした。

A) 平日/休日の双方での平均的な起床時刻、就寝時刻、職場・学校での時間、往復の通勤・通学時間

B) 仕事・学校の休みの状態(週休一日、週休二日、各週二日等からの選択形式)

まず、上記 A)から、平日、休日の双方での仕事、睡眠、通勤時間以外の時間を算定し、これを平日、休日の自由時間とみなすこととした。一方で、B)の情報と、調査対象期間における暦から平日日数と休日日数を求めた。そして、前者と後者の積を休日、平日ごとにとり、それらの和を、一月間の総自由時間 FT を算定した。

最後に、 MO' , TH' については、それぞれ(3a), (3b)に、以上に求めた N_k , M_k , T_k , I , FT を代入することで算定した。

(2) 推定結果

a) 推定計算の前提

アンケート調査のサンプルのそれぞれについて、以上の方法で求めた MO' , TH' , M_k , T_k , I , FT , N_k と、後に述べる表-2 の外生変数ベクトル Z , X_k のいずれにも欠損値をもたない 165 サンプルをアンケート調査の回答サンプルの中から抽出した。この 165 サンプルのそれぞれについて、12 のそれぞれの地域への来訪行動についての尤度 L を式(16)から算定し、合計 1980 ケース (= 165 人 × 12 地域) 分の L を求め、それらの対数を足しあわせることで対数尤度を算定した。そして、最尤推定法で未知パラメータベクトル **A**, **B**, **C** ならびに誤差項の標準偏差 σ を推定した。以上的方法で得られた推定結果を、表-2 に示す。

b) パラメータの解釈について

ここで、推定結果を考察する前に、パラメータの解釈方法について述べる。まず、式(11)に示した直接効用関数

表-2 推定結果

	B	C	A			
	パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
年齢(才)			-0.015	-1.71		
男性 ^{d)}	-0.93	-1.57	-0.23	-1.82		
有職者 ^{a)}	15.14	18.22				
個人収入(万円)	-0.00018	-1.51	-0.00077	-1.94		
Bの定数項	-13.13	-15.81				
Cの定数項			6.04	9.02		
公共交通時間 ^{b)}					-0.016	-2.76
自動車時間 ^{b)}					-0.086	-2.12
飲食店数 ^{c)}					0.095	3.07
サービス事業所数 ^{c)}					-0.060	-3.28
観光施設数 ^{c)}					0.081	2.44

サンプル数: 1980 (= 165 人 × 12 地域) L(C) = -502.8 L(B) = -462.9 $\chi^2 = 79.75$ (df = 13)

[注意]

ダミー変数の場合、右肩に「D」を記載

- a) 会社員、公務員、自営業、パートのいずれか
c) 単位面積あたりの数(km^2)

b) 自宅地域と地域 k の間の機関別の所要時間d) 単位面積あたりの遊園地、博物館、美術館、動物園等の数(km^2)

を N_k で偏微分することで得られる N_k についての限界効用関数 $MU_{N_k}(\cdot)$ は、

$$MU_{N_k}(N_k) = \frac{e^{AX_k + \epsilon_k}}{N_k + 1} \quad (\forall k) \quad (18)$$

となる。この式は、パラメータベクトル A は地域 k での非日常活動サービスの消費に伴う限界効用を規定するものであることを示している。このことは、ベクトル A の要素が正(負)の場合、その要素に対応する地域属性が増加することでその地域での非日常活動の魅力が大きなもの(小さなもの)となり、その結果、地域 k への来訪頻度が増加(減少)することを意味する。

一方、 TH , MO についての限界効用関数 $MU_{TH}(\cdot)$, $MU_{MO}(\cdot)$ は、

$$MU_{MO}(MO) = \frac{e^{BZ}}{MO} \quad (19)$$

$$MU_{TH}(TH) = \frac{e^{CZ}}{TH} \quad (20)$$

である。これらの式は、パラメータベクトル B , C はそれぞれ、 MO と TH を投入して得られる財とサービスの消費に伴う限界効用を規定するものであることを意味している。したがって、パラメータベクトル B , C の要素が正である変数が大きい個人ほど、非日常的な来訪活動よりも日常的な活動を好む個人であり、結果的に MO と TH への投入量が大きなものとなる。

c) 推定結果の解釈

まず、表-2 に示した χ^2 値より、本モデルが統計的に有意であることが確認できる。

パラメータベクトル B , C に着目すると、男性のパラメータ値はともに負となっており、これより、男性の方が女性に比べて日常活動へ所得と時間を投入する傾向が弱く、むしろ非日常活動へ時間と所得を投入する傾向が強いことが分かる。この結果は、女性が飲食・買い物といった日常的な活動に所得ならびに時間を投入する傾向が強いことを反映しているものと思われる。また、個人収入の高い人に関する限り男性と同じく非日常活動へ所得・時間を投入する傾向が強いという結果が示されている。その他、年齢の高い人は非日常活動に時間を配分する傾向が強く、逆に、職業を持つ個人ほど非日常活動以外の活動に所得を投入する傾向が強いことが分かる。特に、後者の傾向については、そのパラメータの絶対値、t 値ともに大きく、非常に強いものであることが分かる。

次に、非日常活動実行に伴う限界効用を既定するパラメータベクトル A に着目すると、自宅からの時間距離を意味する電車時間、自動車時間の係数がともに負であることが示されている。これにより同程度に魅力的な複数の地域がある場合、より多くの移動時間が必要な遠方の地域ほど一回一回の来訪行動で得られる効用が小さく、したがって、近い地域の方が来訪頻度が高くなる傾向にあることが分かる。また、公共交通時間と自動車時間の係数の絶対値を比較すると、自動車時間の方が 5 倍以上大きいことが分かる。このことは、公共交通機関の所要時間よりも自動車の所要時間の方が、非日常活動の来訪行動に強い影響を及ぼしていることを意味しているのだが、この結果には、旅行、レジャーなどの非日常活動を実行する場合には主に自動車が利用されるという傾向が反映されているのではないかと推測される。また、飲食店数や観光施設数が正の係数を持つことが示され

表-3 シナリオ分析結果

	現状	ケース1	ケース2
北河内地域への来訪頻度平均* (単位:回/月)	0.0697	0.0836	0.0885
その増加量	-	0.0139	0.0188
その増加割合	-	20.0%	27.0%
北河内地域への来訪に伴う消費 費用平均* (単位:円)	¥531	¥627	¥652
その増加量	-	¥96	¥121
その増加割合	-	18.1%	22.8%
*:グロス平均			

ているが、これらは、観光施設数や飲食店数が多い地域での非日常活動は、それらが少ない地域での非日常活動よりも魅力的であり、より高い効用が得られることを意味するものである。なお、サービス事業所数の係数が負となっているが、これはサービス事業所には事務所や営業所などの第三次産業の全ての事業所が含まれていることが原因と思われる。すなわち、サービス事業所数が多い地域は、繁華街というよりはむしろオフィス街であり、したがって非日常活動の実行に伴う効用が小さいと考えられる。

ここで、地域別の来訪頻度を足し合わせることで、一ヶ月の全体の発生頻度が求まることを考えると、これらの推定結果は、魅力的な地域が周辺に多く存在する地域、あるいは、交通システムが十分に整備されており多くの魅力的な地域に短時間で到達できるような地域に居住する個人は、非日常活動の発生頻度が大きくなることを示しているものと考えられる。

4. 推定サンプルを対象としたシナリオ分析

以上に推定したパラメータ値に基づくと、式(17)に基づいて T , M を推定し、それを式(14)に導入することで非日常活動に伴う交通行動パターンを表すベクトル N^* を推定することができる。これを簡便に表現すると、以下のような需要関数を定義することができる。

$$\begin{pmatrix} N^* \\ MO^* \\ TH^* \end{pmatrix} = D(X, Y, Z, I, FT | A, B, C, H, G, \epsilon, \xi) \quad (21)$$

$D(\cdot)$: 需要関数

$Y: Y_k$ を第 k 列ベクトルに持つ行列

$\xi: \xi_m$ を要素とするベクトル

ここでは、パラメータ A, B, C の推定計算に用いた 165 サンプルを対象に、いくつかの仮想的な状況のもとで、

この需要関数に基づいてモンテカルロシミュレーションを行った結果を示す。

このシナリオ分析を行うにあたり、最も非日常活動での来訪頻度が少なかった北河内地域に関して、以下の二つの仮想的な状況を想定した：

ケース 1) 北河内地域への自動車ならびに電車での往復所要時間が共に 25% 短縮されるケース。

ケース 2) 北河内地域に含まれる 7 市区町村において各 3 個ずつ観光施設数が増加したケース、すなわち北河内地域全体で $7 \times 3 = 21$ 個の観光施設数が増加したケース。

また、式(21)に基づいてモンテカルロシミュレーションを行なうにあたっては：

1) 誤差項ベクトル ξ をその確率分布に基づいてランダムに発生させて式(17)に基づいて T , M を算定する。

2) その算定値とその他の説明変数、および、誤差項ベクトル ξ を式 * を算定する。ここで、誤差項ベクトル ξ については、推定された確率分布に基づいて 100 回ランダムに発生させて、100 個の N^* を算定する。

3) さらに、誤差項ベクトル ξ についても 100 回発生させる。

という手順を踏み、合計 10,000 個 ($=100 \times 100$) の N^* を各サンプルごとに算定した。

以上の前提に基づいて行った計算結果を表-3 に示す。表-3 から北河内地域への来訪頻度のサンプル平均が、ケース 1 では 20.0%，ケース 2 では 27.0% と、共に条件を変化させない場合（「現状」）と比較して増加していることがわかる。この結果から、交通速度改善などの交通政策によって往復所要時間が短縮されたり、観光施設を建設したりすると、その地域への非日常活動での入れ込み客が増加することが分かる。

一方、北河内地域での来訪行動に伴う出費についても、ケース 1 では 18.1%，ケース 2 では 22.8% それぞれ増加していることがわかる。これらの結果は、このような政策によって、非日常活動目的で北河内地域に訪れる人々の出費総額が増加することを示している。

このように、本モデルは、交通政策の交通需要への影響だけでなく、直接的な経済効果を解析することができる。この点が、本モデルの適用上の一つの特徴である。

5. おわりに

本研究では、個人の交通行動は、その他の行動と独

立ではないとの認識のもと、交通行動を伴う活動サービスは自由時間で所得を投入して自己生産されるサービスの一種であると考え、消費行動全般をモデル化することで、個人の交通需要を算定する行動モデルを構築した。そして、モデル内の未知パラメータを、個人の交通行動と出費についてのデータに基づいて推定し、最後に、モンテカルロシミュレーション法に基づいた簡単なシナリオ分析を行った。

本研究で提案する交通需要解析モデルは;1) 交通行動だけでなく時間と所得に基づいた消費行動を考慮した上で交通需要関数を誘導している点、2) それ故に政策が交通需要だけでなく個人消費に及ぼす影響、ならびに個人消費を通じた地域経済に及ぼす影響を考察できる点、3) モデル構築にあたって消費データを交通行動データとともに収集している点、4) 推定手法として非線形関数を仮定した Tobit モデルを用いている点など、いくつかの特徴的な点を挙げることができるが、その一方で、2. (3) で述べた個人の認知や判断、行為等の限界性の考慮やより詳細な消費データの収集といった様々な課題が残されているのも事実である。今後は、これらの課題に一つづつ対処していくためにも、より忠実に個人の意思決定を再現するための行動理論に関する理論的検討、適切なデータを収集するための調査設計についての検討、そして、パラメータの推定計算技法についての検討、といったそれぞれの側面を同等の重要度の下で総合的に検討していくことが不可欠であるものと考えられる。

謝辞: 本研究を遂行するに際して、阪神高速道路公団には調査の実施や資料の提供等、全面的なご協力頂いた。また、分析においては文部省科学研究費基盤研究(B)(2)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

注

[1] 例えば、最近では AMOS^{41), 42)}, SMASH⁴³⁾, PCATS^{44), 42)}, PCATS-RUM^{14), 15)} 等の個人の生活行動を再現するマイクロシミュレーションモデル、Kitamura et al⁴⁵⁾, 藤井ら⁴⁶⁾ 等の構造方程式モデル、あるいは、Ben-Akiva & Bowman⁴⁷⁾ の離散選択モデルや藤井ら^{7), 16)} の離散・連続モデル等が挙げられる。

[2] De Serpa (1971) は、Becker が導入した、定量的表現に困難が伴う commodities⁹⁾ を用いずに時間と財の消費量を直接的に効用関数に導入する一方で個々の活動の時間制約を考慮し⁴⁸⁾、Evans (1972) は、財の消費と時間の消費との関連を明示的に考慮した⁴⁹⁾。さらに Wilson (1982) は、時刻依存型の効用関数を用いた分析を行っている⁵⁰⁾。この様

な理論的発展がなされる一方で、交通需要解析を目的とした研究においても、Doenea (1972)⁵¹⁾、あるいは、Train and McFadden (1978)⁵²⁾ は、Becker の考え方に基づいて機関選択行動をモデル化している。

[3] まず、式(2), (3) の最適化問題の最適解の唯一性については、式(11) に定義した(最大化目的関数である)効用関数 $U(N, MO, TH)$ が狭義凹関数であり($\because U(N, MO, TH)$ の Hessian 行列は負定値)、かつ、式(3a)~(3e) で定義される実行可能領域が閉凸集合である(制約条件が非負条件と線形制約条件式のみであることから自明)ことから保証される。

一方、式(13a)~(13h) は、以下のように変形できる。

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial N_k} = \begin{cases} 0 & \text{if } (N_k^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (N_k^* = 0) \end{cases} \quad (\forall k) \quad (B1)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial MO} = \begin{cases} 0 & \text{if } (MO^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (MO^* = 0) \end{cases} \quad (B2)$$

$$\frac{\partial LA(N^*, MO^*, TH^*)}{\partial TH} = \begin{cases} 0 & \text{if } (TH^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (TH^* = 0) \end{cases} \quad (B3)$$

$$\sum_{k \in \Omega} M_k N_k^* + MO^* - I = 0 \quad (B4)$$

$$\sum_{k \in \Omega} T_k N_k^* + TH^* - FT = 0 \quad (B5)$$

ここで、式(B1)~(B5) の全てを同時に満たす最適解を算定する方法としては、以下の①~③の手順で計算を行う方法が挙げられる。

① まず、 N_k^* が正の場合 1, 0 の場合 0 となるダミー変数 D_k 、 MO^* あるいは TH^* が正の場合 1, 0 の場合 0 となるダミー変数 D_M 、 D_H を定義し、かつ、それらのダミー変数を要素とするベクトル D を $(D_1, D_2, \dots, D_K, D_M, D_H)$ と定義する。このこのベクトル D は、いずれの活動に資源を配分し、いずれの活動に資源を配分しないのか、という資源配分についての離散状態を表すものである。そして、このベクトル D としては、すなわち、資源配分の離散状態としては、 2^{K+2} 通りの組み合わせが考えられる。ここでは、 2^{K+2} 個の互いに異なるベクトル D で構成される集合を Π と表記する。

② 集合 Π の中から、 $X, Z, A, B, C, I, FT, T, M, *$ が与件として与えられているという条件下で式(B1)~(B5) の全てを同時に満たす条件ベクトル D を検出す。ここで、式(11) に示した効用関数には、「消費量 0 における限界効用値が異なる 2 つの活動が存在する場合、その限界効用値が小さい活動に資源が配分され、かつ、その限界効用値が大きい活動に資源が配分される」という状態はありえない」という性質を持つただが、この性質を用いることで、非常に効率的に式(B1)~(B5) の全てを同時に満たさうる条件ベクトル D を検出することができる。

③ 検出された条件ベクトル D のもとでの最適解を、式(B1)~(B5) に基づいて算定する。当然ながらこの段階では、状態ベクトル D の中の 0 となっている要素に対応する変数の最適値を計算する必要はない。一方、 D の中の 1 となっている要素に対応する変数の最適値については、式(B1)~(B5) に基づいてその変数についての等号条件式を誘導して、それらを通常の連立方程式と見なすことで、容易に算定することができる。

以上のような方法に基づいて最適解を算定することができる。

きる。このような、計算過程を簡便表記したものが式(14)の需要関数 $D(\cdot)$ である。なお、最適解の検出については、上記の解析的な解法以外にも、パウエル法⁵³⁾等の数値的な解法でも可能である。

[4] 上記式(B1), (B2), (B3)に、式(11)および式(12)で定義されるラグランジエ関数を代入すると、

$$\frac{1}{N_k^* + 1} e^{AX_k + \varepsilon_k} + K_1 M_k + K_2 T_k = \begin{cases} = 0 & \text{if } (N_k^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (N_k^* = 0) \end{cases} \quad (\text{C1})$$

$$\frac{1}{TH^*} e^{BZ} + K_2 = \begin{cases} = 0 & \text{if } (TH^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (TH^* = 0) \end{cases} \quad (\text{C2})$$

$$\frac{1}{MO^*} e^{CZ} + K_1 = \begin{cases} = 0 & \text{if } (MO^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (MO^* = 0) \end{cases} \quad (\text{C3})$$

さて、本文で述べたように本研究では、非日常活動以外の活動や財やサービスの購入に時間、所得を投入しないことはあり得ないと考えている。この仮定は、定式化の上では、式(C2), (C3)の左辺第一項が TH^* あるいは $MO^* \rightarrow 0$ で無限大に発散し、したがって、これらの式の左辺が 0 以下となることはあり得ない、ということに対応している。この条件を考慮すると、(C2), (C3)は以下のようになる。

$$\frac{1}{TH^*} e^{BZ} + K_2 = 0 \quad (\text{C2}')$$

$$\frac{1}{MO^*} e^{CZ} + K_1 = 0 \quad (\text{C3}')$$

ここで、式(C1), (C2)', (C3)'より、以下の方程式が誘導される。

$$\frac{1}{N_k^* + 1} e^{AX_k + \varepsilon_k} - \frac{M_k}{MO^*} e^{CZ} - \frac{T_k}{TH^*} e^{BZ} = \begin{cases} = 0 & \text{if } (N_k^* \neq 0) \\ \leq 0 & \text{if } (N_k^* = 0) \end{cases} \quad (\text{C4})$$

この式を整理したものが、本文式(15)である。

[5] 説明変数ベクトル Y_k としてはある変数の対数が正規分布であると仮定することと、その変数が対数正規分布であると仮定することは同値である。

[6] パラメータ推定を行うにあたっては、観測された行動結果は、本稿 2. で仮定した最適化行動の結果として実行された行動を観測されたものであるとみなす。

[7] このような推定計算を行う場合、Selectivity Bias が生じる可能性が考えられる。すなわち、 N_k の誤差項と T_k , M_k の誤差項の間に相関がある場合においては、 N_k が正数であった地域についての T_k , M_k の確率構造を記述するモデルを作成し、それを全ての地域に適用することでバイアスが生じるものと危惧されるのである。このバイアスを除去する方法としては、誤差項を含みモデルの構造が高度に非線形であるため、通常用いられる修正法⁵⁴⁾はここでは実用的ではない。代替案としては、来訪するしないという選択確率を定式化し、その選択確率を用いて個々のサンプルのウェイトを算定し、重み付き最尤推定法を用いて推定計算を行う、といったものが考えられる。しかし、本研究では、来訪するしないという事象を説明するために、効用最大化仮説に基づいた連続・離散選択モデルを構築しているのであり、そして、そのモデルを推定するために T_k , M_k を説明するモデルが必要である立場をとっているのである。したがって、

Selectivity Bias を除去するためには、何らかの収束判定条件を設けた上で、連続・離散選択モデルの推定と T_k , M_k の説明モデルの推定とを複数回繰り返す、あるいは、両モデルを同時に推定する、といった方法が必要であるものと考えられる。しかし、それらのいずれの方法も非常に推定コストが高いものである。この点から、本研究では便宜的に Selectivity Bias は存在しないものと考えた上で、本文に示したような推定手順を採用することとした。

[8] ここで χ^2 検定は、推定されたモデルが正しいという帰無仮説の下での適合度検定である⁵⁵⁾。

参考文献

- 1) 北村隆一: 交通需要予測の課題－次世代手法の構築にむけて、土木学会論文集、No. 530/IV-30, pp. 17-30, 1996.
- 2) 森杉壽芳、上田孝行、小池淳司、小森俊文: 古典的消費者行動に基づく交通行動モデルの地域間旅客需要予測への適用、土木計画学研究・講演集、No. 19(1), pp. 451-454, 1996.
- 3) 森川高行: 需要予測手法の最新動向と展望、交通工学 Vol. 32, 増刊号, pp. 10-15, 1997.
- 4) Jones, P.M., Dix, M.C., Clarke, M.I. and Haggie, I.G.: *Understanding Travel Behavior*, Gower, Aldershot, 1983.
- 5) 近藤勝直: 交通行動分析、晃洋書房, pp. 26-55, 1987.
- 6) Kitamura R., Fujii, S., and Pas, E.I.: Time use data for travel demand analysis: Toward the next generation of transportation planning methodologies, *Transport Policy*, Vol. 4, No. 4, pp. 225-235, 1997.
- 7) 藤井聰・北村隆一・瀬戸公平: 生活行動に伴う個人の効用を考慮した生活行動－交通行動モデルシステムの開発、土木学会論文集、No. 562/IV-35, pp. 83-96, 1997.
- 8) 藤井聰・北村隆一・門間俊幸: 誘発交通需要分析を目指した就業者の活動パターンに関する研究、土木学会論文集、No. 562/IV-35, pp. 109-120, 1997.
- 9) Becker, G.: A Theory of the allocation of time, *Economic Journal*, 75, pp. 493-517, 1965.
- 10) Kitamura, R.: A Model of Daily time allocation to discretionary out-of-home activities and trips, *Transportation Research*, 18B, pp. 255-266, 1984.
- 11) Kitamura, R., Yamamoto, T., Fujii, S. and Sampath S.: A discrete-continuous analysis of time allocation to two types of discretionary activities which accounts for unobserved heterogeneity, In *Transportation and Traffic Theory - Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 431-454, 1996.
- 12) RDC: Further Comparative Analysis of Daily Activity and Travel Patterns & Development of a Time-Activity-Based Traveler Benefit Measure, RDC, Davis, California, 1994.
- 13) Hagerstrand, T.: What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 23, pp. 7-21, 1970.
- 14) Fujii, S., Kitamura, R. and Monma, T.: PCATS-RUM: A probabilistic micro-simulation model system of individual's activity-travel patterns, *Transportation*

- (submitted).
- 15) 藤井聰, 門間俊幸, 北村隆一, 藤井宏明: ランダム効用理論に基づく生活行動シミュレーションモデルの構築, 土木計画学研究・講演集, No. 20 (2), pp. 189-192, 1997.
 - 16) 藤井聰, 北村隆一, 長沢圭介: 選択肢集合の不確実性を考慮した生活行動モデルに基づく居住地域評価・政策評価指標の開発, 土木学会論文集, No. 597/No. 40, pp. 33-47, 1998
 - 17) Jara-Diaz, S.R.: General Micro-Model of User's Behavior: The Basic Issues. Paper presented at the Seventh International Conference on Travel Behavior, Valle Nevado, Santiago, Chile, 1994.
 - 18) Kraan, M.: Modelling activity patterns with respect to limited time and money budgets, In D. Hensher, J. King and T. Oum (eds.), *World Transport Research, Proceedings of the 7th World Conference on Transportation Research, Vol 1, Travel Behavior*, Elsevier Science, Oxford, pp. 151-164, 1996.
 - 19) 室町泰徳: 離散連続モデルを利用した買い物トリップ発生に関する基礎的分析, 土木計画学研究・論文集, No. 10, pp. 47-54, 1992.
 - 20) 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 誘発交通量の算定に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 14, pp. 519-526, 1996.
 - 21) 森杉壽芳, 上田孝行, Dam Hanh LE: Gev and nested logit models in the context of classical consumer theory, 土木学会論文集, No. 506/IV-26, pp. 129-136, 1995.
 - 22) 荒木敏, 藤井聰, 北村隆一: 交通行動分析に基づいた個人の生活圏に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 17, pp. 35-38, 1995.
 - 23) 古屋秀樹, 兵藤哲朗, 森地茂: 発生回数の分布に着目した観光交通行動に関する基礎的研究, 1993年度代 28回日本都市計画学会学術研究論文集, pp. 319-324, 1993.
 - 24) 藤井聰, 木村誠司, 北村隆一: 選択構造の異質性を考慮した生活圏推定モデルの構築, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 613-622, 1996.
 - 25) 藤井聰, 北村隆一, 枝植章英, 大藤武彦: 阪神・淡路大震災が交通行動に及ぼした影響に関するパネル分析, 土木計画学研究・論文集, No. 14, pp. 327-332, 1997.
 - 26) Fujii, S. and Kitamura, R.: Analysis of personal action space using a model system with multiple choice structures, In D. Hensher, J. King and T. Oum (eds.), *World Transport Research, Proceedings of the 7th World Conference on Transportation Research, Vol 1, Travel Behavior*, Elsevier Science, Oxford, pp. 165-180, 1996.
 - 27) 飯田恭敬編著: 交通工学, 国民科学社, p. 108, 1992.
 - 28) 藤井聰, 池田泰敏, 北村隆一: ランダム効用理論に基づく所得制約下での国内・海外旅行行動の連続・離散選択モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 15, pp. 619-628, 1998.
 - 29) Pudney: *Modelling Individual Choice, The Econometrics of Corners, Kinks and Holes*, Basil Blackwell, Oxford, pp. 138-186, 1989.
 - 30) Henderson, J.M., Quandt, R.E.著, 小宮隆太郎訳: 現代経済学一価格分析の理論一, 創文社, pp. 32-35, 1961.
 - 31) Maddala, G.S.: *Limited-dependent and Qualitative Variables in Econometrics*, Cambridge University Press, pp. 149-196, 1983.
 - 32) Simon, H.A.: Invariants of human behavior, *Annual Review of Psychology*, 41 (1), pp. 1-19, 1990.
 - 33) Kahneman, D. and Tversky, A.: Prospect theory: an analysis of decision under risk, *Econometrica*, pp. 263-291, 1979.
 - 34) Payne, W. P., Bettman, J. R. and Johnson E. J.: *The adaptive decision maker*, Cambridge University Press, 1993.
 - 35) 藤井聰: 交通計画におけるシミュレーション手法の適用可能性について, 土木計画学研究・講演集, No. 21, pp. 19-34, 1998.
 - 36) Hayth Roth, B. and Hayth Roth, F.: A cognitive model of planning, *Cognitive Science*, 3, pp. 275-311, 1979.
 - 37) Garling, T., Brannas, K., Garvill, J., Golledge, R.G., Gopal, S., Holm, E. and Lindberg, E.: Household Activity Scheduling. Paper presented at the Fifth World Conference on Transport Research, Yokohama, 1989.
 - 38) 西井和夫, 北村隆一, 飯田恭敬, 杉恵頼寧, 石田東生他: これから交通需要分析・予測のための交通調査手法の課題, 土木計画学研究・講演集, No. 20 (1), pp. 529-534, 1997.
 - 39) 藤井聰, 北村隆一, 枝植章英: 阪神・淡路大震災が個人の交通行動・生活行動に及ぼした影響の分析, 交通工学, Vol. 32, No. 2, pp. 37-46, 1997.
 - 40) Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press, pp. 56-57, 1985.
 - 41) Kitamura, R., Pendyala, R.M. and Pas, E.I.: Application of AMOS, An Activity-Based TCM Evaluation Tool to the Washington, D.C., Metropolitan Area, *Proceedings of Seminar E held at the PTRC European Transport Forum*, Vol. P392, pp. 177-190, 1995.
 - 42) Kitamura, R. and Fujii, S.: Two computational process models of activity-travel behavior. In T. Garling, T. Laitila and K. Westin (eds.) *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*, pp. 251-279, 1998.
 - 43) Ettema, D., Borgers, A. and Timmermans, H.: SMASH (Simulation Model of Activity Scheduling Heuristics): some simulations, *Transportation Research Record*, 1551, pp. 88-94, 1996.
 - 44) 藤井聰, 大塚祐一郎, 北村隆一, 門間俊幸: 時間的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するための行動シミュレーションの構築, 土木計画学研究・論文集, No. 14, pp. 643-652, 1997.
 - 45) Kitamura R., Robinson, J.P., Golob, T.F., Bradley, M.A., Leonard, J. and van der Hoorn, T.: A comparative analysis of time use data in the Netherlands and California, In *Proceedings of Seminar E, PTRC 20th Summer Annual Meeting*, PTRC Education and Research Services, Ltd., London, pp. 127-138, 1992.
 - 46) Fujii, S. and Kitamura, R.: Evaluation of trip-inducing

- effects of new freeways using a structural equations model system of commuters' time use and travel, *Transportation Research B*, in-press, 1999.
- 47) Ben-Akiva, M. and Bowman, J.: An Activity Based Disaggregate Travel Demand Model System with Daily Activity Schedules, New England University Transportation Center, 1996.
 - 48) De Serpa, A.: A Theory of the Economics of time, *The Economic Journal*, 81, pp. 828-846, 1971.
 - 49) Evans, A.: On the theory of the valuation and allocation of time, *Scottish Journal of Political Economy*, 2, pp. 1-17, 1971.
 - 50) Wilson, G.C.: *The Timing of Economic Activities*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
 - 51) Doenna, F.X.: Consumer behavior, transport mode choice and value of time: some micro-economic models. *Regional and Urban Economics*, Vol. 1, No. 4, pp. 355-382, 1972.
 - 52) Train, K. and McFadden, D.: The goods/leisure tradeoff and disaggregate work trip mode choice models, *Transportation Research*, Vol. 12, pp. 349-353, 1978.
 - 53) 例えば, 星野聰:数値計算の技法, 電気・電子工学大系 50, コロナ社, pp. 74-77, 1977.
 - 54) Mannerling, F. and Hensher, D.: Discrete/continuous econometric models and their application to transport analysis, *Transport Review*, Vol. 7, No. 3, pp. 227-244, 1987.
 - 55) 豊田秀樹:SASによる共分散構造分析, 東京大学出版会, pp. 99-118, 1992.

(1998.5.11 受付)

A MONETARY AND TEMPORAL CONSTRAINED CONSUMPTION-BEHAVIOR MODEL FOR TRAVEL DEMAND ANALYSIS

Satoshi FUJII, Ryuichi KITAMURA and Yoshiaki KUMADA

A random-utility model system of the individual's consumption of service and goods under monetary and temporal constraints is presented as a new methodology to analyze the individual's travel demand. The model is formulated as a system of non-linear Tobit models whose parameters are estimated using individuals' travel behavior, time use and expenditure data. Parameter estimates indicate that male or high-income individuals tend to allocate more time and money to non-routine activities, for example sight seeing or leisure activities. This tendency are also indicated by a scenario analysis using in which Monte Carlo simulation was performed using this model system.