

非集計行動モデルによる多次元選択行動の分析*

Disaggregate Behavioral Model and Multidimensional Choice

原 田 昇**

By Noboru HARATA

はじめに

「交通の現象を交通流としてではなく、個人行動の積み上げとして捉え直すことによって交通計画に何か新しい展開が生まれるのではないか。」これが私が非集計行動モデルの研究に抱いた予感であり、以来、今日までの研究の大筋を一言で言うならば、「ある合理的な理論に基づいて交通行動を理解しようとする事」であった。したがって、研究のスタイルは、「確率効用理論という合理的理論とその交通行動への適用可能性を実際の交通行動への適用を通して理解する」と言う実証的なものとなった¹⁾。例えば、鉄道経路(駅と端末手段)と代表交通手段の同時選択行動は、重要な分析課題であるにもかかわらず集計型モデルでは分析困難な現象であったが、非集計行動モデルによる分析は実用的と言えるに至っている²⁾。また、種々の改良モデルが提案されているが、ロジットモデルのIIA特性を緩和したNES-TEG LOGIT (NL) モデルは、目的地と交通手段の同時選択などの多次元選択行動の分析を改善する上で重要なことが明らかになっている³⁾。

ここでは、これらの要点を、非集計行動モデルによる多次元選択行動分析に係わる理論的改良と適用事例のレビューとしてまとめるものである。

以下では、個人選択理論の概要、個人行動として交通を捉える際の基本的概念を示したのち、多次元選択モデルにおける合成変数の形とパラメータの意味をNLモデルとの関係で整理する。そして、適用によって得られた知見を整理し、今後の研究の展望をまとめる。

1. 個人選択理論の概要

例えば、「Aさんが自家用車で通勤している。」という交通行動については、数多くの仮説を立てる事ができる。

- ・バスや鉄道に比べて、費用は少し多くかかるが非常に速いので利用する。
- ・バスや鉄道に比べて、高くてもやや遅いが、プライバシーが保てるので利用する。
- ・仕事で自家用車を使うので、仕方なく利用する。
- ・子供を送り迎えするために、利用する。
- ・運転することが好きなので、利用する。

であり、実際の理由も多種多様である。

これらはいずれも、「意思決定者が、選択肢の中から、あるルールにしたがって選択を行う」、とい

* キーワード：交通需要分析、非集計行動モデル、多次元選択

** 正会員 工博 東京大学工学部助手

うフレームで考える事ができるが、意思決定者、選択肢、ルールは3要素には多くのバリエーションがある。意思決定者は多くの場合個人であるが、世帯や企業も考えられる。考慮される選択肢は、利用可能性と重要度により異なっており、ルールには、合理的なものから全くのランダム、あるいは偏見による一意的なものまで考える事ができる。

非集計行動モデルは、適用性の高い組み合わせとして、「個人等の意思決定者が、利用可能な選択肢の中から、合理的選択により、最も望ましい選択肢を選択する。」と考えるものである。すなわち、個人の状況によって「利用可能な選択肢 (CHOICE SET)」が限定され、次にその中から最も望ましい選択肢を選ぶとしているのである。これに関しては、3点指摘したい。

ひとつは、利用可能な選択肢についてである。適用事例の中には、これら2つのプロセスを1つのモデルで表わすものも多いが、現実には、利用可能な選択肢がかなり限定される事が多く、政策の影響範囲を誤らないためには、自由な選択に対する制約条件の有無を十分に考慮する必要がある。例えば、交通手段選択では、保有、免許、利用距離限界、サービス時間帯による制約が重要である。

次は、選択肢の望ましさであるが、時間、費用、快適性などの総合指標（通常は線形和、LINEAR IN PARAMETER^{注1)}）を作成し、これを「効用」と呼ぶことにしている。これは、一般化費用の概念を拡張したものと考えると理解しやすい。

最後に、合理的なルールであるが、非集計行動モデルは、効用理論の中の確率効用理論より、導出することができる^{4),5)}。これは、最も望ましい選択肢を常に利用すると考える決定論的効用理論に比べると、同一個人が同一条件下で異なる反応をする可能性を認めており、適用性が高くなっている。

これを、選択確率 P 、効用 U 、個人 n の選択肢集合 J 、選択肢 i, j を用いて式で示すと、個人 n が選択肢 i を選択する確率 P_{in} は、

$$P_{in} = \text{Prob} [U_{in} > U_{jn}, j \in J_n] \cdots (1-1)$$

となる。また、効用すべて (U) を測定することは困難であり、測定可能な確定項 (V) と測定不可能な誤差項 (e) との和として次のように記述する。

$$U_{in} = V_{in} + e_{in} \cdots \cdots (1-2)$$

式 (1-2) で、誤差項の分布形は未知であるが、適切な分布を仮定し、式 (1-1) に代入し密度関数の積分計算を行う事によって、非集計行動モデルの関数形を導出する事ができる。最も一般的には、誤差項はいくつもの誤差の同時分布であることから正規分布と考えられ、その結果として、プロビットモデルが得られる。しかし、パラメータ推定が困難であり、誤差項を独立で同一な Gumbell 分布と仮定して得られるロジットモデルの方が適用が進んでいる。なお、正規分布と Gumbell 分布の関係、モデルの導出過程、最尤法によるパラメータの推定、集計予測方法等については、文献6)を参照されたい。

2. 個人行動としての交通

交通に関する選択は、交通を行うか否か（交通発生頻度）、いつ行くか（出発時刻）、どこへ行くか（目的地）、どの交通機関を用いるか（交通機関）、どの経路を用いるか（経路）といった多くの次元を含んでおり、交通行動はこれらの選択群の組み合わせ (A BUNDLE OF CHOICE) によって決定される多次元選択行動として捉えることができる^{7),8)}。また、長期的には、居住地の選択や自動車保有台数の選択とも関連している。膨大な組み合わせを含むこれらの選択行動を分析するための考え方を3点指摘したい。ひとつは、時間的安定性により、これらの選択次元を分類しヒエラルキーを設定する事にある。例えば、SAN FRANCISCO 湾岸地域で開発された非集計行動モデルによる予測モデル (MTC) 体系では、土地利用モデルによる都市開発決定の予測と、非集計行動モデルによるモビリティ選択と交通選択の3段階構造を用いている。また、BRAZIL において非集計行動モデルによる予測体系を開発し

た例¹⁰⁾、短期交通政策評価モデルを開発した例¹¹⁾に、ヒエラルキー適用の典型をみることができる。

次は、同時選択モデルの段階推定による計算負荷の軽減である。例えば、目的地(d)と交通手段(m)の同時選択モデル $P(m, d)$ は、次式のように条件付き確率 $P(m|d)$ と周辺確率 $P(d)$ の積に展開し、ロジットモデルの場合には、2段階に分けて推定することができる¹²⁾。この時、各段階で取り扱う選択肢の数が大幅に減少するため、推定が容易になる。

$$\begin{aligned} P(m, d) &= P(d) \cdot P(m|d) \\ &= P(m) \cdot P(d|m) \cdots (2-1) \end{aligned}$$

最後は、政策評価モデルの開発についてであるが、対象とする政策の影響がどこまで及ぶのか、ある次元をモデルに取り入れる事に実用的な意味があるのか、を考える事によって、分析対象とするべき交通行動の範囲を的確に限定することが重要となる。例えば、買い物トリップに関して、交通機関選択と目的地や交通発生頻度の選択を組み合わせた同時選択モデルを用いる例が多いが、これは、都心部の駐車規制が都心部への買い物回数をへらしたり郊外ショッピングセンターに買い物目的地を変更させたりする、という事が考えられる場合に有用である。

3. 多次元選択と合成変数

自動車保有と通勤手段、頻度と目的地と交通手段といった、多次元にわたる選択行動のモデル化は、同時選択モデルの段階推定により容易になったが、次の課題は、条件付き確率の影響を周辺確率に持ち込む「合成変数 (COMPOSITE VARIABLE)」の定式化であった。

例えば、目的地選択モデル $P(m)$ の推定において、その目的地まで利用可能な交通手段の効用を合成する方法については、種々の方法が使われていた。効用最大の交通手段によって代表させる方法、各手段の効用を選択確率 $P(m|d)$ により重み付け平均

して用いる方法などであり、直観的には納得のいく方法であった。

しかし、Manheim¹³⁾によって、同時選択モデルの段階推定において整合性を保つには、確率に関する次の二式を満足する合成変数を導入することが示され、ロジットモデルに関しては、合成変数は LOG-SUM の式形になることが明らかとなった。

$$P(d) = \sum_m P(m, d) \quad \text{〔周辺確率の算出〕} \quad \cdots \cdots \cdots (3-1)$$

$$P(m|d) = P(m, d) / P(d) \quad \text{〔条件付き確率の算出〕} \quad (3-2)$$

例えば、目的地と交通手段の選択から得られる効用 V_i を、目的地のみ、手段のみ、目的地と手段の双方に関連した効用、 V_d, V_m, V_{dm} に分けて、以下のように表記すると、

$$V_i = V_d + V_m + V_{dm} \quad \cdots \cdots \cdots (3-3)$$

目的地と交通手段の同時選択確率を表すロジットモデルは、

$$P(d, m) = \frac{e^{V_d + V_m + V_{dm}}}{\sum_d \sum_m e^{V_d + V_m + V_{dm}}} \quad \cdots \cdots (3-4)$$

となり、以下の手順で、式形を決定できる。

はじめに、式 (3-1) より $P(d)$ を決める。

$$P(d) = \frac{e^{V_d} \sum_m e^{V_m + V_{dm}}}{\sum_{d'} e^{V_{d'}} \sum_{m'} e^{V_{m'} + V_{dm'}}} \quad \cdots \cdots (3-5)$$

ここで、交通手段 m に関連する効用を合成変数 A で表わすと、

$$A_d = \ln \left(\sum_m e^{V_m + V_{dm}} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (3-6)$$

$$P(d) = \frac{e^{V_d + A_d}}{\sum_{d'} e^{V_{d'} + A_{d'}}} \quad \cdots \cdots \cdots (3-7)$$

となる。 A_d の形から合成変数は、LOGSUM 変数とも呼ばれている。

次に、式 (3-3) と (3-6) を式 (3-2) に代入して、

$$P(m|d) = \frac{e^{V_m + V_{dm}}}{\sum_{m'} e^{V_{m'} + V_{dm'}}} \dots\dots\dots (3-8)$$

が得られる。

これらの式は、同時型ロジットモデルでは、条件付き確率と周辺確率もロジットモデルで表わされることを示している。したがって、交通行動分析では条件付き確率を取り扱うことが多いが、ロジットモデルを用いることができる。例えば、通勤交通手段選択は居住地、就業地、自動車保有を既決定とする条件付き選択行動として、ロジットモデルを用いて分析することができる。

4. 合成変数の解釈

ここでは、LOGSUMで表わされる合成変数の持つ意味を整理してみる。

例えば、目的地と交通手段の同時選択ロジットモデルにおいて、目的地 d への交通手段 m を含む選択肢グループ M_{nd} の最大効用は注2)，

$$\begin{aligned} \max_{m \in M_{nd}} (U_{m|d}) &= \max_{m \in M_{nd}} (V_m + V_{dm} + \varepsilon_{dm}) \\ &= \ln \left(\sum_{m \in M_{nd}} e^{V_m + V_{dm}} \right) + \varepsilon_d \\ &= A_d + \varepsilon_d \dots\dots\dots (4-1) \end{aligned}$$

となり、合成変数は最大効用の確定項と一致する。したがって、合成変数は、特定の選択肢グループから得られる最大効用の期待値のメジャーとして用いる事ができる。

ロジットモデルに関する合成変数については、さらに、選択肢ならびに効用値の増加に対して非減少であることが示されている¹⁴⁾。すなわち、既存の選択肢の改善効果と同様に、利用可能な選択肢の増加（＝選択の自由度の増大）による効果を、合成変数値の変化によって測定することができる。

また、特定目的地へ利用可能な交通手段の効用を合理的に合成した値として A_d を アクセシビリティ の指標として用いる事ができる。合成変数の値は、個々のサンプルにより異なったものとなるが、それ

らを集計する事によって、地区による違いを示すことができる¹⁵⁾。

さらに、合成変数 A は、消費者余剰の指標として用いる事ができる。選択モデルは、ある選択肢に対する個人の需要関数とみなしうる。したがって、効用が V_n^1 から V_n^2 へ変化した場合の個人の消費者余剰の変化 ΔS は、

$$\Delta S = \sum_{i \in J_n} \int_{V_n^1}^{V_n^2} P(i) dV \dots\dots\dots (4-2)$$

となる。ロジットモデルの場合は、この積分を解くことが可能であり、次式が得られる¹⁶⁾。

$$\Delta S = \ln \left(\sum_{i \in J_n} e^{V_i n} \right) - \ln \left(\sum_{i \in J_n} e^{V_i n} \right) \quad (4-3)$$

消費者余剰の変分が合成変数値の変分により与えられることが分かる。

5. 合成変数のパラメータ

合成変数の形が決定したうえでの課題は、合成変数のパラメータの取りうる値とその解釈であった。合成変数の係数が 1.0 のとき同時型と一致するのであるが、実際に段階推定すると、合成変数の係数は 1 にはならないこと、推定順序により異なる係数が推定されることが示された。McFadden¹⁷⁾ は、この係数が 2 を越えてはならないことを示したが、NL モデルの開発によって、この係数は 0 と 1 の間にあるべきことが明らかとなった。なお、確率効用理論からの NL モデルの導出は、William 等を参照されたい^{3), 6), 18), 19)}。

ここでは、鉄道ルートを含む選択ツリー（図-1）を用いて、合成変数とそのパラメータの実用的な意味を例示する。

図-1 の選択ツリーに相当する NL モデルは、

$$P(l|r) = e^{\lambda_1 V_{rl}} / \sum_{i'} e^{\lambda_1 V_{r i'}} \dots\dots\dots (5-1)$$

$$P(m) = e^{\lambda_2 (V_m + V_{m*})} / \sum_{m'=1}^3 e^{\lambda_2 (V_{m'} + V_{m'*})} \dots\dots\dots (5-2)$$

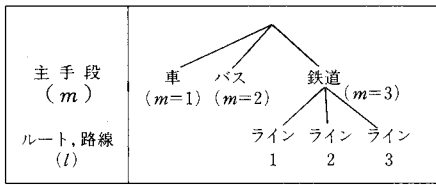


図-1 鉄道3ルートを含む選択ツリー

ただし,

$$V_{m*} = \begin{cases} 0 & , m' = 1, 2 \\ \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\sum_{l=1}^3 e^{\lambda_1 V_{rl'}} \right), & m' = 3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

$$\lambda_2 < \lambda_1 \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

この例を用いて4点指摘したい.

第1は, 合成変数について, 式(5-3)の V_{3*} を展開する¹⁸⁾と,

$$\begin{aligned} V_{3*} &= \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\frac{1}{P_{\max|r}} e^{\lambda_1 V_{r,\max}} \right) \\ &= -\frac{1}{\lambda_1} \ln P_{\max|r} + V_{r,\max} \quad \dots\dots (5-5) \end{aligned}$$

ただし, $P_{\max|r} = \frac{e^{\lambda_1 V_{r,\max}}}{\sum_l e^{\lambda_1 V_{rl'}}$

ここに, $V_{r,\max}$: 効用最大の鉄道経路の $V_{r,l}$ したがって, 効用最大の経路で代表される ($V_{3*} = V_{r,\max}$) 場合に比べると, “ $-\frac{1}{\lambda_1} \ln P_{\max|r} (\geq 0)$ ” は修正項と考えられる ($V_{r,l}$ が時間のみで構成される場合, 効用最大の経路はミニマムパスを意味する).

$$V_{rail} = V_3 + V_{3*} \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

とおき, $\lambda_2 = 1$ に固定すると V_{rail} は,

- ・効用の誤差項をすべて独立であるとする(この場合, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$) ロジットモデルのときに, 最大となること.
- ・鉄道経路間の効用の誤差項は完全に相関をもつ

(この場合, $\lambda_1 = \infty$) Maximum モデルのときに, 最小となること.

がわかる²⁰⁾. したがって, 類似性の大小に応じて, λ_2/λ_1 を $[0, 1]$ に定めればよいことがわかる. また, ルート間の効用 V_{rl} がすべて等しい場合, あるいは, ルート数 N のみが既知でそれらの効用は等しいと仮定する場合には,

$$\begin{aligned} V_{3*} &= \frac{1}{\lambda_1} \ln (N \cdot e^{\lambda_1 V_{r,l}}) \\ &= V_{r,l} + \frac{1}{\lambda_1} \ln N \end{aligned}$$

となり, ロジットモデルと比べて, $\frac{1}{\lambda_1} \ln N$ を導入した形になる.

次に弾力性について,

$$V_m = \sum_{n=1}^N \theta_n Y_{mn} \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

$$V_{3l} = \sum_{k=1}^k \beta_k X_{lk} \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

と置いて, 式(5-1), (5-2)より弾力性を算出すると,

$$E_{X_{lk}}^{P(r)} = X_{lk} \cdot (1 - P(r)) \cdot P(l|r) \cdot \lambda_2 \cdot \beta_k \quad \dots\dots\dots (5-9)$$

$$E_{X_{lk}}^{P(m)} = X_{lk} \cdot (-P(r)) \cdot P(l|r) \cdot \lambda_2 \cdot \beta_k \quad (m \neq r) \quad \dots\dots\dots (5-10)$$

$$E_{Y_{mn}}^{P(m)} = Y_{mn} \cdot (1 - P(m)) \cdot \lambda_2 \cdot \theta_n \quad (m \neq r) \quad \dots\dots\dots (5-11)$$

$$E_{Y_{mn}}^{P(r)} = Y_{mn} \cdot (-P(m)) \cdot \lambda_2 \cdot \theta_n \quad \dots\dots\dots (5-12)$$

となる. 合成変数に含まれる X_{lk} の変化に関する弾力性式(5-9), (5-10)は, $P(l|r) (\leq 1)$ によって割引かれることがわかる. ただし, この性質は, 段階型ロジットモデルと共通である. 式(5-9) ~ (5-12)の弾力性をみると, λ_2 については, 負になると, 「鉄道経路の改善がされたのに, 鉄道経路全体の利用率が低下する」という矛盾が生じてくることがわかる. しかし, λ_2 と λ_1 の大小関係については, この4式をみると, 弾力性の符号からみ

た制約はない。

そこで、 $\lambda_2/\lambda_1 \leq 1$ の意味を考えてみよう。IIA特性は、“赤バスー青バス”問題で明らかなように、弾力性の点でいえば、類似性の大小によらず、すべての選択肢に対する交差弾力性が一定になることに問題がある。NLモデルでは、類似性の強い選択肢に対する交差弾力性が相対的に大きくなるはずである。この例でいえば、鉄道路路 l の属性 X_{lk} に関して、鉄道路路 l' に対する交差弾力性 $E_{X_{lk}}^{P(l'|r)}$ が、鉄道以外の交通手段に対する弾力性 $E_{X_{lk}}^{P(m)} (m \neq r)$ に等しいか、大きくなるはずである。すなわち、

$$E_{X_{lk}}^{P(l'|r)} / E_{X_{lk}}^{P(m)} \geq 1 \quad (m \neq r) \quad \dots\dots\dots (5-13)$$

また、

$$E_{X_{lk}}^{P(l'|r)} = X_{lk} \cdot (-P(l|r)) \cdot \lambda_1 \cdot \beta_k \quad \dots\dots\dots (5-14)$$

したがって、式(5-10)、(5-14)を式(5-13)に代入して整理すると、

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} < \frac{1}{P(r)} \quad \dots\dots\dots (5-15)$$

となる。この式から、 $P(r)$ の全域(0～1)に関して、式(5-13)が常に成立するための必要十分条件は、

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq 1$$

であることがわかる。したがって、 λ_2/λ_1 の上限は、類似性の異なる選択肢に対する交差弾力性の大小に関連して意味づけることができる。

続いて、効用の差の分散を算定すると、 λ の二乗と反比例する形となっている。この例では、 $\lambda_2 < \lambda_1$ より、

$$\begin{aligned} \text{Var}(V_m - V_r) &= \frac{\pi^2}{3 \lambda_2^2} > \frac{\pi^2}{3 \lambda_1^2} \\ &= \text{Var}(V_{rl'} - V_{rl}) \quad \dots\dots\dots (5-16) \end{aligned}$$

したがって、効用の差の分類のより小さい選択肢グループを類似性が高いと呼んでいる事になる。

なお、NLモデルは、各レベルの λ を共通としているが、例えば、バスルート間と鉄道路ルート間の効用の差の分散を同一とする理論的根拠はない。この点については、NLモデルの一般形として、TEV(Tree Extreme Value)モデルが提案されている²¹⁾。

最後に、式(5-7)、(5-8)を式(5-1)、(5-2)に代入して整理すると、

$$P(l|r) = \frac{\exp \left[\sum_{k=1}^K (\lambda_1 \beta_k) X_{lk} \right]}{\sum_{l'=1}^K \exp \left[\sum_{k=1}^K (\lambda_1 \beta_k) X_{l'k} \right]} \quad \dots\dots\dots (5-19)$$

$$\begin{aligned} P(m) &= \exp \left[\sum_{n=1}^N (\lambda_2 \theta_n) Y_{mn} \right] / \\ &\quad \left[\sum_{m=1,2} \exp \left[\sum_{n=1}^N (\lambda_2 \theta_n) Y_{mn} \right] + \right. \\ &\quad \left. \exp \left[\lambda_2 \cdot \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\sum_{l'=1}^3 e^{\lambda_1 V_{rl'}} \right) \right] \right] \\ &\quad (m=1,2 \text{ の場合}) \quad \dots\dots\dots (5-20) \end{aligned}$$

となるが、推定パラメータとして得られるのは、 $(\lambda_2 \theta_n)$ 、 $(\lambda_1 \beta_k)$ ならびに (λ_2/λ_1) であり、 λ_2 と λ_1 については、その比率のみが推定される。したがって、 $\lambda_1 = 1.0$ 等の基準を設定する必要がある。

6. NLモデルの適用方法

ここでは、NL(またはTEV)モデルを用いた実証的研究のレビューに基づいて、NLモデルの適用方法について、ロジットモデルの作成と比べて注意すべき点を整理している。以下、作成手順別に記述する。

(1) 選択ツリーの選定方法

理論上の組合せとしては、選択肢の数が増加するに従って比較可能な選択構造の数が増える²²⁾。例えば、選択肢数4に対して26の選択ツリーが考えられる。したがって、すべての可能性を比

べて最適の選択ツリーを求めることは、選択肢の数が多い場合には実際的ではない。一方、適用例においてはいずれも、数種類の選択ツリーに限定したうえで、モデルを適用し、その中で最も優れたものを選ぶ方法を用いている。この限定の根拠について、Ortuzar は次の 2 点を挙げている²³⁾。

- 1) 選択肢相互の類似性に関する分析者の先見 (apriori beliefs)
- 2) 分析用データにおける層別分析の限界

これは、14 の研究の中で、アプリオリに選択ツリーを決めたうえでモデルを適用したものが 9 例あることから推し計ることができる。また、選択肢を次元によってまとめた選択ツリーを考える場合には、次元の順序を変えた 2 種類の NL モデルと、MNL モデルの計 3 種類の選択ツリーを比較すれば十分である^{8), 24)}。その他、複数の選択ツリーを設定しているものは^{21), 22), 25)}、すべて交通手段の中の類似性を検討したものであり、交通手段については、状況に応じて異なる選択ツリーが成立することが分かる。また、自動車保有と車種の選択についても、異なる選択ツリーが検討されている^{33), 35)}。

さらに、Van Der Hoorn et al.³⁴⁾ の交通機関選択の分析のように、鉄道について、アクセス部分とエグレス部分の合成変数を同時に導入することもできる。これは、合成変数をアクセシビリティ指標として活用したもので、実用上の問題はない。

(2) データの作成と特性変数の選択

モデルを作成することは、アンケートで得られる選択結果とモデルで推計される選択確率とが最も一致するようなパラメータを求めることである。そのためには、個々のサンプルについて、選択結果とその説明要因となるサンプルの社会経済属性と利用可能な選択肢のサービス特性をそろえることが必要となる。

サンプルの抽出は原則としてランダムサンプリングを用いるが、NL モデルを作成する場合には、異なるレベルの選択肢の組合せについて、一定数のサン

プル数を確保する必要がある。例えば、駅・アクセス手段同時選択の場合、駅別あるいはアクセス手段別にみて、分担率の小さいグループがあると、モデル精度に偏りが生じることになる。この場合、分担率の小さいグループが政策的にみて重要でない場合は分析対象から除外し、逆に、政策的に重要な場合は、選択結果に基づく層別ランダムサンプリングを用いるなど、モデル作成サンプルにおける分担率の偏りを押さえる工夫が必要である。

次に、選択要因をどのレベルに入れるべきかについては、選択要因のレベルごとの変動を調べることによって決定することができる。例えば、駅とアクセス手段の同時選択において、駅とアクセス手段の選択から得られる効用 V を式 (3-3) と同様に次式で表わすことができる。

$$V = V_m + V_s + V_{ms}$$

V_{ms} は、駅別にみてもアクセス手段別にみても変動する変数であり、駅までの所要時間などが考えられる。また、 V_s は、駅別にのみ変動するもので、同一駅への異なるアクセス手段については一定となる変数である。例えば、鉄道の乗車時間が考えられる。最後に V_m はアクセス手段別にのみ変動する変数で、自転車性別ダミーなどの固有変数が考えられる。

$V_m, V_s, V_{ms} (= V_{m|s} = V_{s|m})$ をどのレベルのモデルに含めるかは、図-2 に示すとおりであり、選択要因を V_m, V_s, V_{ms} 別に整理することによって、どのレベルのモデルで検討するべきかが明らかになる。

(3) 尤度関数の定式化

尤度関数の例を、駅・アクセス手段同時選択について示す。サンプル数を N 、駅数を S 、アクセス手段数を M とし、サンプル、駅、アクセス手段を各々サフィックス n, s, m で表すと、尤度関数 L^* は次式で与えられる。

モデルタイプ	モデル式
P(m,s) 型 ロジットモデル	$P(m,s) = \frac{e^{\lambda(V_s + V_m + V_{sm})}}{\sum_{s'} \sum_m e^{\lambda(V_{s'} + V_{m'} + V_{s'm'})}}$
P(m,s) = P(s)・P(m s) 型 NL モデル	$P(m,s) = \frac{e^{\lambda_1(V_s + A_s)}}{\sum_{s'} e^{\lambda_1(V_{s'} + A_{s'})}} \cdot \frac{e^{\lambda_2(V_m + V_{ms})}}{\sum_m e^{\lambda_2(V_{m'} + V_{m's})}}$ 但し、 $A_s = \frac{1}{\lambda_2} \ln \left(\sum_m e^{\lambda_2(V_{m'} + V_{m's})} \right)$
P(m,s) = P(m)・P(s m) 型 NL モデル	$P(m,s) = \frac{e^{\lambda_1(V_m + A_m)}}{\sum_{m'} e^{\lambda_1(V_{m'} + A_{m'})}} \cdot \frac{e^{\lambda_2(V_s + V_{sm})}}{\sum_{s'} e^{\lambda_2(V_{s'} + V_{s'm'})}}$ 但し、 $A_m = \frac{1}{\lambda_2} \ln \left(\sum_{s'} e^{\lambda_2(V_{s'} + V_{s'm'})} \right)$

注) s: 鉄道駅, m: アクセス手段, V_i : iのみに関連した効用
このとき, 駅とアクセス手段の選択から得られる効用 V は次式で表される.

$$V = V_m + V_s + V_{ms}$$

$$\text{ただし, } V_{ms} = V_{ms} = V_{sm}$$

図2 選択構造とモデル式—鉄道駅・アクセス手段同時選択の場合

$$L^* = \prod_{n=1}^N \prod_{s=1}^S \prod_{m=1}^M P_n(ms) \delta_{(ms)_n} \dots\dots (6-1)$$

$$L = L_1 + L_2 \dots\dots\dots (6-4)$$

ただし,

$P_n(ms)$: サンプル n が選択肢 ms を選ぶ確率

$\delta_{(ms)_n}$: サンプル n が選択肢 ms を選んだ時

1, その他 0

ただし,

$$L_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_{(ms)_n} \cdot \ln P_n(s|m) \dots\dots\dots (6-5)$$

これを, 段階型で示すと,

$$L^* = \prod_{n=1}^N \prod_{s=1}^S \prod_{m=1}^M [P_n(s|m) P_n(s)]^{\delta_{(ms)_n}} \dots\dots\dots (6-2)$$

(4) パラメータの推定(同時推定と段階推定)

両辺の対数をとると,

$$\begin{aligned} L = \ln L^* &= \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_{(ms)_n} [\ln P_n(s|m) \\ &\quad + \ln P_n(m)] \dots\dots\dots (6-3) \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_{(ms)_n} \cdot \ln P_n(s|m) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left(\sum_{s=1}^S \delta_{(ms)_n} \right) \cdot \ln P_n(m) \end{aligned}$$

となり, L は, 尤度関数の和として表すことができる.

NL モデルのパラメータ推定方法には, 同時推定と段階推定がある. 同時推定が L を最大とするパラメータを同時に求めるのに対し, 段階推定は, L_1 を最大とするパラメータを求め, このパラメータを L_2 へ代入したうえで L_2 を最大とするパラメータを求めるものである.

例えば, $P(m) \cdot P(s|m)$ 型の場合には, $P(s|m)$ について L_1 を最大とするパラメータを推定する. 次に, このパラメータを用いて合成変数 A_m に含まれる $\ln \left(\sum_{s'} e^{(V_{s'} + V_{s'm})} \right)$ を算出して, $P(m)$

について L_2 を最大とするパラメータを推定する。

理論的には、同時推定の方が望ましいが、計算時間と容量の関係から、選択ツリーが3レベルに及ぶ場合には計算は容易でない。また、実証的に両手法を比較した結果をみても、現在のところその優劣は明らかではない。

例えば、McFadden²¹⁾ は、TEV モデルの段階推定によって、効用最大化理論との整合性のないパラメータが得られたと報告している。しかしこれに対して、Cosslett²⁵⁾ は、同一モデルを同時推定（完全情報最尤法）によって求めると、効用最大化理論と整合性のあるモデルが得られたと報告している。したがって、この原因のひとつは、段階的推定手法にあると考えることができる。NL モデルについても、推定手法によってパラメータが大きく変化した例²⁸⁾と、逆に差がほとんどみられなかった例⁸⁾が報告されており、推定手法による違いとその原因を検討する必要がある。場合によっては、 λ に、類似性の違いを調整すること以外の要因が入ってしまう可能性は大きいと考えられる。

(5) 推定結果の検分方法

モデル作成時に用いられる通常の統計的指標 ($\theta = 0$ に対する t 値, χ^2 値, ρ^2 値) のほかに、NL モデルでは以下の評価指標が用いられる。

- 1) λ 比の推定値について、 $\lambda = 1$ に対する t 値、あるいは χ^2 値
- 2) 段階推定の場合、レベル h での尤度を $L_h(\theta)$ とおくと、NL モデル全体の精度を示す指標として²²⁾

$$\rho^2 = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H L_h(\hat{\theta})}{\sum_{h=1}^H L_h(0)} \cdots \cdots (6-7)$$

$$\rho_c^2 = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H L_h(\theta)}{\sum_{h=1}^H L_h(C)} \cdots \cdots (6-8)$$

ただし、 $\hat{\theta}$: 最尤推定量

$L_h(C)$: 選択肢固有定数のみを (選択肢の数 - 1) 個含むときの尤度

$\lambda = 1$ (ロジットモデルと一致する) に対する

t 値を用いて、選定されたツリー (における NL モデル) の成立の有無をみた結果を 表-1 「ツリーの成立」欄にまとめている。ツリーの成立しないケースのうち、McFadden²⁶⁾ の事例は $\lambda = 1$ を棄却できなかったケースであり、ロジットモデルを用いる方が適切である。また、Ben-Akiva et al. の事例³³⁾ は、 $\lambda = 0$ を棄却できなかったケースであり、車購入と車種の選択は独立したものとして扱う方が適切である。

NL モデルの ρ^2 , ρ_c^2 [式 (6-7), (6-8)] は、同一の選択ツリーの中での変数組の選定基準として用いるほかに、少なくとも2通りの使い方がある。

第1は、効用最大化理論と整合するパラメーターをもつ NL モデルが異なる選択ツリーについて求められたときの比較²²⁾であり、第2は、ロジットモデルと NL モデルとの比較²³⁾である。

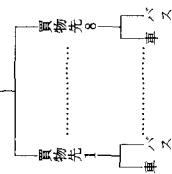
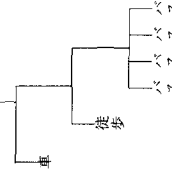
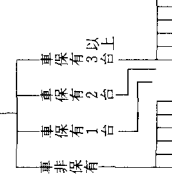
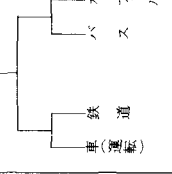
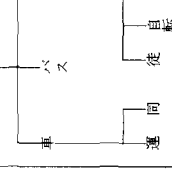
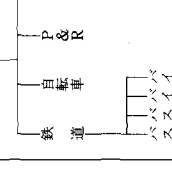
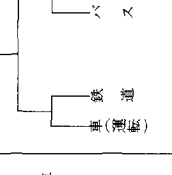
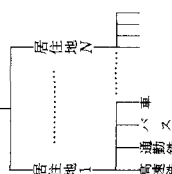
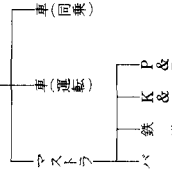
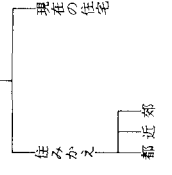
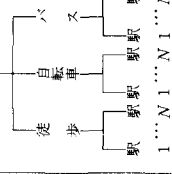
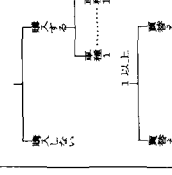
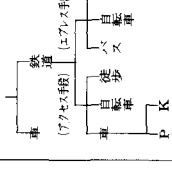
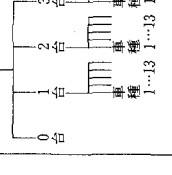
おわりに

非集計行動モデルによる交通需要分析を研究したことによる最大の成果は、複雑な現象をある合理的な考え方によって捉えて客観的に理解する姿勢が身についてきたことではないかと考えている。当然の事ながらモデルそのものには限界があるが、その考え方や基本的姿勢にはかなりの可能性がある。

したがって、ここでは非集計行動モデルによる交通需要分析について重要と考えられる概念とモデル特性を、多次元選択行動分析に関する研究レビューとして整理した。これらは、非集計行動モデル分析のみならず、広く、交通需要分析の発展に寄与するものと期待している。

例えば、都市圏交通需要分析については、従来より、定型的な四段階推定法が使われているが、交通行動の捉え方、選択ツリーの在り方の多様性をみれば、都市圏の持つ政策課題に応じて異なるアプローチを検討するべきことがわかる。地方都市圏において自動車の効率的利用が問題とするならば、自動車保有や自動車の相乗りを交通サービス条件と関連付

表一 NL モデルの適用結果

文 献	Ben-Akiva (1974) <29>	Daly and Zachary (1976) <19>	McFadden and Talvitie et al. (1977) <26>	Cosslett (1978) <25>	Sobel (1979) <22>	Clercq (1981) <30>	McFadden (1981) <21>
分析対象	買物手段、目的地	交通手段、経路	車保有、通勤手段	通勤手段	交通手段	交通手段、週末	通勤手段
モデル	Structured Logit	NL, MNL	NL, MNL	TEV	NL, TEV	NL	NL, TEV
推定手法	段階型 (最尤法)	同時型/段階型	段階型	同時型	段階型	段階型	段階型
設定された 選択ツリー							
λ^* の推定値	0.549 (s.d.=0.147)	0.37~0.38 (f値不明)	0.800 (f=4.66)	0.48 (s.d.=0.14) 0.59 (s.d.=0.16)	0.477 (f=2.70) 0.384 (f=1.36)	収束しない	-0.30 (s.d.=0.27) 0.47 (s.d.=0.09)
ツリーの成立	○ (成立した)	△ (不明)	× (成立しない)	○	○	×	×
文 献	Anas (1982) <28>	Ortuzar (1983) <23>	宮本、安藤、清水 (1983) <31>	原田、太田 (1983) <24>	Ben-Akiva and Prashker et al. (1983) <33>	Van Der Hoorn et al. (1984) <34>	Berkovec (1985) <35>
分析対象	通勤手段、居住地	通勤手段	居住地(住みかえ)	駅、アクセス手段	自動車保有、車種	交通手段	自動車保有
モデル	NL	NL, MNL	NL	NL, MNL	NL	NL	TEV
推定手法	同時型/段階型	段階型	段階型	段階型	段階型	段階型	段階型
設定された 選択ツリー							
λ^* の推定値	段階推定 0.096 (f=11.4) 同時推定 0.868 (f=20.1)	0.3290 (f=4.77)	0.237 (f=1.40)	地区1 0.8538 (f=10.0) 地区2 0.6449 (f=4.99)	購入 0.512 (f=3.22) 買替え -0.092 (f=-0.625)	アクセス 0.52 (f=10.21) エクスプレス 0.31 (f=13.23)	0.453 (f=3.4)
ツリーの成立	○	○	○	○	○	○	○

* 選択ツリーのレベルごとの類似性指標の比を λ とする。 $0 < \lambda < 1$ で、0 かつ 1 と有意差のあるとき、ツリーは成立する。

< > 内は文献番号である。

けて分析しうる予測体系が必要である。トリップ目的によっても推計フローが異なってくるはずである。また、非集計ロジットモデルに関する適用方法の改善は、同一タイプのモデル（シェアモデル）であるグラビティモデルに適用することが可能であり、集計ロジットモデルを分担率曲線に替えて用いる事も可能である。

逆に、非集計行動モデルに対する盲目的な期待は、誤った認識として、一掃されなければならない。

「分析目的に適切なデータが準備できる事」が非集計行動モデル分析においては特に重要であり、ある政策の影響を捉えるには何を対象とするべきか、分析しようとする交通行動に対する計画者の見識が分析の成否を決めるのである。

最後に、本論文における成果は、東京大学工学部太田勝敏助教授の御指導と議論に負うところが大きく、ここに記して深謝の意を表します。

注 1) これは、「パラメータに関して線形」と呼ばれるように、変数を X_i 、効用を V とすると、

$$V = \sum_i \theta_i \cdot f(X_i)$$

を意味している。したがって、関数 f の取り方により、 V を X_i について非線形に設定できる。

注 2) パラメータ (η, ω) をもつ Gumbell 分布の次の性質による。

$$F(\varepsilon) = e^{-e^{-\omega(\varepsilon-\eta)}}, \quad \omega > 0$$

を、パラメータ (η, ω) の Gumbell 分布とすると、 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_J)$ がそれぞれパラメータ $(\eta_1, \omega), (\eta_2, \omega), \dots, (\eta_J, \omega)$ を持つ J 個の独立の Gumbell 分布に従う時、 $\text{Max}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_J)$ もパラメータ $\left(\frac{1}{\omega} \ln \sum_{j=1}^J e^{\omega \eta_j}, \omega\right)$ の Gumbell 分布となる。

参 考 文 献

- 1) 原田 昇：非集計行動モデルの交通計画への適用に関する研究，東京大学都市工学科昭和 57 年度博士論文。
- 2) 原田 昇・太田勝敏・新谷洋二：非集計行動モデルによる新駅利用量の予測方法とその評価，土木学会論文集，第 349 号／IV-1，昭和 59 年 7 月。
- 3) 原田 昇：Nested Logit モデルの理論と適用に関する研究のレビュー，土木学会論文集，第 353 号／IV-2，昭和 60 年 1 月。
- 4) R.D. Luce, P. Suppes: "Preference, Utility, and Subjective Probability", in *Handbook of Mathematical Psychology*, Vol. 3, ed. R.D. Luce, and E. Galanter, New York, Wiley, 1965, pp. 249 ~ 410.
- 5) 原田 昇：改良ロジットモデルの交通計画への適用に関する研究（日交研シリーズ A-93），昭和 60 年 6 月，日本交通政策研究会。
- 6) 土木学会土木計画学委員会編：非集計行動モデルの理論と実際（土木計画学講習会テキスト，No. 15，昭和 59 年 11 月。
- 7) Domencich, T.A. and McFadden, D.: Urban travel demand - a behavioral analysis, North-Holland, 1975.
- 8) Manheim, M.L.: Fundamentals of transportation systems analysis, volume 1: basic concepts, MIT. Press, 1979.
- 9) Ruiter, E.R. and M.E. Ben-Akiva: Disaggregate Travel Demand Models for San Francisco Bay Area, TRR 673, 1978.
- 10) M.E. Ben-Akiva and R.C. Barras et al.: A Model System of Individual Travel Behavior for a Brazilian City, Transportation Policy Decision Making 2, pp. 451 ~ 480, 1984.

- 11) M.E. Ben-Akiva and T.J. Atherton : Methodology of Short-Range Travel Demand Predictions Analysis of Carpooling Incentives, Journal of Transport Economics and Policy, pp. 224 ~ 267, 1977 .
- 12) Amemiya, T. : On a two-step estimation of a multivariate logit model, Journal of Econometrics, pp. 13 ~ 21, 1978 .
- 13) Manheim, M.L. : Practical implications of some fundamental properties of travel-demand models, HRR 422, pp. 21 ~ 38, 1973 .
- 14) M.E. Ben-Akiva and S.R. Lerman : Disaggregate Travel and Mobility-Choice Models and Measures of Accessibility, in Behavioral Travel Demand Model, ed. P. R. Stopher and Meyburg, 1976 .
- 15) 原田 昇：非集計ロジットモデルによる駅周辺施設計画の評価，第17回日本都市計画学会学術発表会論文集，都市計画別冊，昭和57年11月．
- 16) Williams, W.L.H.C. : On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit, Environmental and Planning A. Vol. 9, pp. 285 ~ 344, 1977 .
- 17) McFadden, D. : Working paper No.7617: properties of the multinomial logit model, Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, 1976 .
- 18) McFadden, D. : Quantitative methods for analyzing travel behavior of individuals : some recent developments, Working Paper 7704. Urban Travel Demand Forecasting Project, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1977 .
- 19) Daly, A. and Zachary, S. : Improved multiple choice models, LGORU, 1978 .
- 20) Charles River Associates, Inc. : Disaggregate travel demand models, project 8-13 : phase I report. Vol. I, II, C.R.A. 1976 .
- 21) McFadden, D. : Econometric models of probabilistic choice, in Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Application ed. C.F. Manski and D. McFadden. MIT Press, 1981 .
- 22) Sobel, K.N. : Travel demand forecasting by using the nested multinomial logit model, Transportation Research Record. 775, pp. 48 ~ 55, 1980 .
- 23) Ortuzar, J.D. : Nested logit models for mixed-mode travel in urban corridors, Transportation Research-A. Vol. 17, No. 4, pp. 283 ~ 299, 1983 .
- 24) 原田 昇・太田勝敏：Nested Logit モデルの多次元選択への適用性 — 駅，アクセス手段同時選択の場合 — ，交通工学，Vol. 18, No. 6, pp. 3 ~ 11, 1983 .
- 25) Cosslett, S.R. : Efficient estimation of discrete-choice models, WP 7801, Dep. of Econo. Univ. of California, 1978 .
- 26) McFadden, D. and Talvitie A. et al. : Demand Model Estimation and Validation, Special Report UCB-ITS-SR-77-9, The Institute of Transportation Studies, Univ. of California, 1977 .
- 27) Williams, H.C.W.L. and Ortuzar, J.D. : Behavioural theories of dispersion and the mis-specification of travel demand models, Transportation Research-B. Vol. 16 B, No. 3, pp. 167 ~ 219, 1982 .
- 28) Anas, A. : Residential Location Markets and Urban Transportation-Economic Theory, Econometrics and Policy Analysis with Discrete Choice Models, Academic

- Press, 1982.
- 29) Ben-Akiva, M. : Structure of passenger travel demand models, Transportation Record 526, pp. 26 ~ 42, 1974.
- 30) Clerq, F. Le. : A model for Multimodal trips, in New Developments in Modelling Travel Demand and Urban Systems, ed. G.R.M. Jansen, et al., Saxon House, pp. 93 ~ 115, 1979.
- 31) 宮本和明・安藤 淳・清水英範：都市圏住宅立地需要予測モデル，第5回土木計画学研究発表会講演集，pp. 540 ~ 546，1983.
- 32) 林 良嗣・磯部友彦・富田安夫：非集計手法を用いた住宅需要分析モデル，第5回土木計画学研究発表会講演集，pp. 547 ~ 555，1983.
- 33) Ben-Akiva, M.E. and Prashker, J.N. et al. : Estimating and Use of Dynamic Transaction Models of Automobile Ownership, TRR 944, pp. 134 ~ 141, 1983.
- 34) Van Der Hoorn A.I.J.M. et al. : Mode Choice and Mode Captivity in Interlocal commuting : Two Dutch Studies on Modal Split in Congested Transportation Corridors, Transportation Policy Decision Making 2, pp. 373 ~ 388, 1984.
- 35) Berkovec, J. : Forecasting Automobile Demand Using Disaggregate Choice Models, Trans. Res-B, Vol. 19B, No. 4, pp. 315 ~ 329, 1985.