

[特 集]

# 主観的評価値のあいまい性を考慮した ハイブリッド離散選択モデル

李 百鎮<sup>1</sup>・藤原章正<sup>2</sup>・張 峻屹<sup>3</sup>・杉恵頼寧<sup>4</sup><sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院国際協力研究科開発科学専攻 (〒739-8529 東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: bjlee@hiroshima-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学大学院教授 国際協力研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 工博 広島大学大学院助教授 国際協力研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: zjy@hiroshima-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: ysugie@hiroshima-u.ac.jp

通常の因子分析では主観的評価値のあいまい性を満足に表現できない。そこで、本研究では、ファジィ理論を用いた因子分析手法の適用により、主観的評価値のあいまい性を表現することを試みる。また、前述の因子分析手法により計算されたファジィ潜在要因に基づき主観的評価値のあいまい性を考慮した新たな離散選択モデル(ハイブリッド離散選択モデル)を提案する。同モデルの効用関数は線形性を仮定した幅を持つ関数形となっている。さらに、交通情報提供下における交通機関選択の選好意識(SP)データを用いて分析した結果、ファジィ理論を用いた因子分析手法と提案したハイブリッドモデルの有効性を明らかにした。

**Key Words** : subjective evaluation data, fuzziness, factor analysis, hybrid choice model, fuzzy theory

## 1. はじめに

交通行動を記述するための数理モデルはこれまで、確率効用最大化理論に基づく Predictive choice behavior (PCB) モデルが主流であった。PCB モデルは、行動の予測可能性を重要視するため、計測が容易で観測精度が高く、そして、政策的に制御しやすい定量的要因(例えば、費用、旅行時間、車保有台数など)をモデルの説明変数として用いることが多い。これに対して、Behavioral choice (BC) モデルは、PCB モデルでブラック・ボックスとみなされてきた個人の意思決定プロセスを解明し、行動現象をありのままに論理的に正しく表現しようとしている<sup>1)~5)</sup>。意思決定プロセスを調べるために、学習や習慣形成などの客観的に観測可能な要因以外に、個人の認知心理データ(例えば、嗜好や態度など)という主観的な要因を用いることも少なくない<sup>2)~10)</sup>。しかし、これらの主観的なデータの回答にはあいまい性が多く含まれると考えられる<sup>11)~16)</sup>。

一方、最近の交通計画分野では、インフラの量的な拡充の限界から、交通システムの質的な改善(例

えば、公共交通機関の快適性や安全性などのサービス改善、ITS による情報提供、障害者や高齢者のためのバリアフリー化)が求められている。このような交通政策を効果的に評価・展開するためには、快適性や便利性及び安全性などに関する利用者の主観的な評価が重要になる<sup>4)~7)</sup>。

このような背景の中で、交通行動モデルに学習や習慣形成などの客観的な意思決定プロセス情報を取り入れると同時に、あいまい性をもつ主観的評価値も明確に導入する必要性が高まっている。態度や習慣形成などについては、これまで態度理論などを応用した研究がある<sup>8)~10)</sup>。本研究では、後者の快適性、便利性、安全性などに関する利用者の主観的評価値に存在するあいまい性の表現を中心に研究を進める。ただし、提案する表現方法は態度などのデータの記述にも適用可能であると考えられる。

主観的評価値の測定には、評定尺度方法が主に使われる。これは、回答者に検討対象を5段階や7段階や10段階などの尺度に基づき評価してもらう方法である。評価尺度は言葉で表すのが通常である<sup>11)</sup>。例えば、5段階評価尺度の場合、「非常に悪い」、「悪

い」、「普通」、「良い」、「非常に良い」という具合である。このように計測された主観的評価値に隠れている潜在的な要因を見つけ出すために、因子分析が有効である。しかし、「非常に悪い」や「悪い」の評価カテゴリーの境界が不明確であるため、これら主観的評価値のあいまい性を排除することは難しい。そして、通常の因子分析では、このようなあいまい性を満足に表現することができない<sup>5)-7)</sup>。

そこで、本研究では主観的評価値に存在するあいまい性を、ファジィ理論に基づき因子分析を行うファジィ因子分析手法により表現することを試みる。

ファジィ因子分析は、不明確な限界をもつ主観的評価値をファジィ集合として表現し、あいまい性が存在する幅を考慮して、通常の因子分析を行う<sup>12)-14)</sup>。通常の因子分析では、主観的評価値間の相関行列を用いるのに対して、ファジィ因子分析では主観的評価値の持つあいまい性を考慮するため、「幅」を持った相関行列を定義し、その結果として、「幅」を持った潜在要因を見つけ出すことができる。本研究では、このようなファジィ因子分析から得られた「幅」を持つ潜在要因を、離散選択モデルの効用関数の説明変数として取り入れ、「幅」を持つ選択確率の算出の有効性を確認する。

上述のことを鑑みて、本研究は以下のように構成される。まず、第2章では主観的評価値を考慮した離散選択モデルに関する研究とファジィ理論を応用した関連研究についてレビューを行う。第3章では本研究で適用したファジィ因子分析手法を説明し、ファジィ潜在要因を考慮した離散選択モデル（ハイブリッドモデル）を定式化する。第4章では提案したモデルの有効性に関する実証的な分析を行う。第5章では結論と今後の課題を述べる。

## 2. 既存の研究

### (1) 主観的評価値を取り入れる研究の必要性

交通行動分析分野においては、1970年代から心理的・主観的な潜在要因の重要性が指摘されるようになり、これらの潜在要因を離散選択モデルに導入する研究が継続的に行われている<sup>17)</sup>。Dobson<sup>18)</sup>は交通選択肢に対する個人の主観的な評価を調査する必要性と、言葉によりその主観的な評価を測る必要性を主張した。また、この言葉による表現(Linguistic)には、選択肢の属性、選好の表現、選択肢に関する満足度の評価、選択肢を選ぶ行動的な意図が含まれていると述べている。McFadden<sup>19)</sup>は選択行動の意思決定過程をパスダイアグラムで表し、それに影響を及ぼす

構成概念である知覚、信念、情緒、態度、選好、動機間の因果関係や測定関係を明示的に示した。

今まで、交通分野において離散選択モデルの中に主観的評価値を取り入れる方法として、主に2種類が挙げられる。1つは個人間における主観評価値の変動に着目した確率理論に基づくもので、もう1つは主観評価値のあいまい性に着目したファジィ理論によるものである。以下では、それぞれについてレビューを行う。

### (2) 確率理論による主観的評価値の表現方法

Ben-Akivaら<sup>1)</sup>は、予測可能な選択行動モデル（経済学、マーケティング、工学など）と意思決定プロセスを明確に分析しようとして、選択行動に影響する様々な要因を離散選択モデルの枠組みの中で総括的に扱うことのできるハイブリッドモデルを提案し、モデルの説明力を向上させることができると主張した。Walker<sup>2)</sup>とWalker & Ben-Akiva<sup>3)</sup>は、このハイブリッドモデルをさらに発展させ、潜在変数と潜在クラスの影響、SPデータとRPデータとの融合、異質性を包括的に扱うことのできる一般化確率効用（Generalized random utility : GRU）モデルを提案した。モデルの基本構造を図-1に示す。このモデルは、因子分析やより一般的な因果構造分析手法であるLISRELモデルを用いた潜在変数モデルと潜在クラスモデルを特殊形として含めることができる。

因子分析を適用したモデルとして、例えば、Recker & Golob<sup>20)</sup>の研究がある。この研究では、通勤トリップにおける交通機関選択行動を分析するため、各交通機関に対する主観的評価値を用いて因子分析を行った。そして、潜在要因を、選択肢間に類似性がある潜在要因と選択肢が固有に持っている潜在要因に分け、前者を共通変数として、後者を選択肢の固有変数として定義した。さらに、算出された潜在要因の因子得点をロジットモデルの中に取り入れた。

Boxall & Adamowicz<sup>21)</sup>は、レクリエーション活動の動機や環境に関する主観的な概念に対する異質性を考慮した潜在クラスモデルを適用した。この研究では、レクリエーション活動に関する潜在的異質性を考慮する動機指標を推定するために因子分析を適用した。

これ以外にも、因子分析を用いた交通行動モデルは多数存在する<sup>22)-25)</sup>。しかし、因子分析を用いたモデルの問題点の1つとして、潜在要因の予測の困難さを挙げることができる。これに対して、森川と佐々木<sup>4)</sup>は観測が可能な要因を用いて潜在要因を同定するため、LISRELモデルを用いる方法を提案し、都市間交通機関の利便性と快適性の2つの潜在変数を取り上げ、交通機関選択問題への適用可能性を示した。

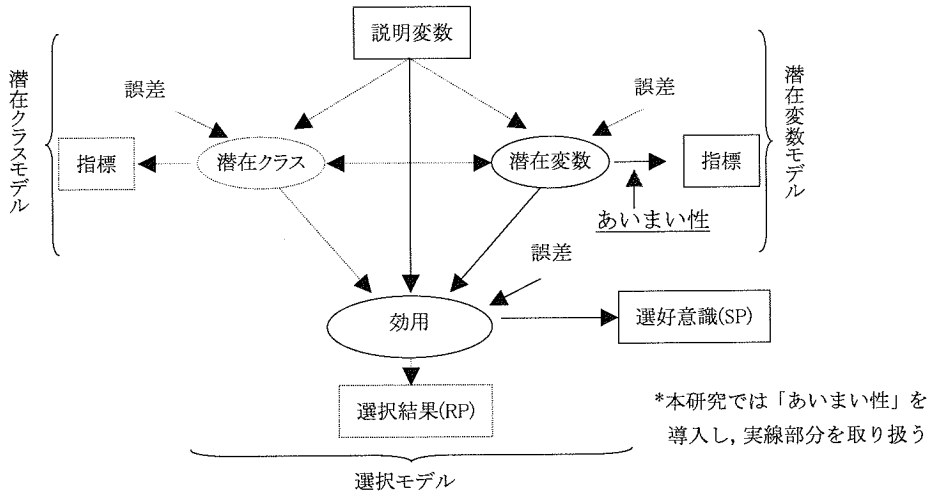


図-1 ハイブリッドモデルの基本構造

このモデルの特徴は、LISREL モデルによって観測可能な要因と不可能な要因の因果関係を定式化し、モデルの中で推定される未知パラメータを用いて潜在変数の予測値を計算できることである。しかしながら、段階推定モデルから得た結果は同時推定モデルによる結果と顕著なずれが生じているため、モデル推定上の問題点が課題として挙げられる。また、同時推定モデルの推定の複雑さはモデルの実用化を阻む原因の 1 つとなっている。河上ら<sup>6)</sup>も交通サービス利用者の異質性、特に知覚構造の異質性を考慮するため、LISREL モデルを適用した。

### (3) ファジィ理論による主観的評価値の表現方法

ファジィ理論では主観的評価値のあいまい性を扱うために、主観的評価値をファジィデータ<sup>13),16),26),27)</sup>として定義する。

秋山と佐佐木<sup>28)</sup>は、経路選択行動モデルの構築に際してファジィ推論の適用可能性を検討した。Leeら<sup>29)</sup>は、さまざまなファジィ推論方法を用いて交通情報提供における経路選択行動を分析し、ロジットモデルと比較した結果、ファジィ推論の適用可能性を実証した。また、高羽と秋山<sup>30)</sup>は、人間の意思決定プロセスを明示的に表現するため、ファジィ・ルールに基づくファジィ制約を用いた目的地選択とロジットモデルに基づく交通機関選択との統合モデルを提案した。また、Lotan & Koutsopoulos<sup>31)</sup>は交通情報提供における運転者の情報獲得と経路選択行動のプロセスを表現するためにファジィ理論を適用した。

これ以外にも多数研究がなされてきた<sup>32)-35)</sup>。その中で、菊地と宇野<sup>35)</sup>の研究は興味深い。彼らは時間に関する不確実な情報を取り扱うため、幅という概

念が有効であることに着目し、幅を持つ数値を取り扱うことができる可能性理論(Possibility Theory)に基づいて、トリップメーカーの意思決定分析のための数学的枠組みを提示した。具体的には、旅行時間や到着時刻等の時間要素に含まれる不確実性に対する人の知覚について検討し、それがトリップのスケジュールの設定に及ぼす影響を検証した。また、秋山と水谷<sup>32)</sup>は知識ベースモデルの観点から、確率効用最大化理論に基づく選択モデルとソフトコンピューティング手法(ファジィ理論、ニューラル・ネットワーク、ファジィ・ニューラル、遺伝的アルゴリズムなど)を効果的に融合することで、ファジィ推論型効用関数をもつハイブリッドモデルを提案した。

### (4) 本研究の位置づけ

主観的評価値は 2 面性をもつ。ある個人からみた場合、心理的要素や回答環境などの影響でその値が一般にはっきりしない。このため、主観評価値をあいまい現象として扱うべきであろう。一方、主観的評価値は母集団から抽出する被験者が変わると、その回答値の分布が常に同じになる保証がないため、確率現象(ランダム性のもつ現象)として扱うべきであろう。なお、本研究では、意思決定に関わる不確実性はあいまい性とランダム性の両方を指す。

そこで、本研究では交通機関選択を対象に、主観評価値のこのような 2 面性に着目し、ファジィ因子分析手法と離散選択モデルを統合した新たな離散選択モデルを提案する。具体的には、図-1 に示すハイブリッドモデルの基本構造の実線部分を取り扱うことになる。

主観評価値のあいまい性を考慮する点では、秋山

と水谷<sup>32)</sup>のハイブリッドモデルと似通った考え方に基づいている。しかし、本研究では、ファジィ因子分析を適用し、主観的評価値間の因果関係を論理的に表現した上で既存の離散選択モデルと融合するという考えを考えると、秋山と水谷<sup>32)</sup>のモデルとはモデリング・プロセス上の違いがある。

### 3. 主観的評価値のあいまい性を考慮したハイブリッド離散選択モデル

本研究では、主観的評価値を表現するために、因子分析手法を用いる。因子分析とは、主観的評価値間の相関関係を分析し、それらの背後に潜む潜在因子を探索しようとする多変量解析の手法である<sup>36)</sup>。

前述のように、一般的には主観的評価値にあいまい性が伴うため、評価値そのものが幅をもった値となる。このような主観的評価値に関わる潜在要因を抽出するために、通常の因子分析では対応できない。そこで、幅をもった主観的評価値に関わる因果構造を分析する有効な手法としては、ファジィ因子分析手法がある。中森と川中<sup>13)</sup>は商品の感性的評価構造を解明するため、ファジィ因子分析手法を初めて提案した。具体的には、言葉として表す評定カテゴリー（感性ワード）間のファジィ距離を同定し、不明確な限界をもつ主観的評価値をファジィ集合として表現した上で因子分析を行う手法である。ここでは、ファジィ因子分析手法を概説した上で、幅を持つ潜在要因を取り入れた離散選択モデルを定式化する。

#### (1) ファジィ因子分析

通常の因子分析を適用する場合、第1段階として、ある潜在因子数のもとで因子負荷量行列( $A$ )と独自因子分散行列( $\Psi$ )の推定値をまず算出する。このとき、データが持つ情報を標本分散共分散行列( $S$ )あるいは標本相関行列( $R$ )に集約し、ある規準のもとでデータに最も適合するように $A$ と $\Psi$ の各要素の値を定める。 $A$ と $\Psi$ の推定値を得た後に第2段階としては、因子の解釈を容易にするために潜在因子の回転を行う<sup>16)</sup>。ファジィ因子分析手法も上記の2段階を踏む。異なるのは、あいまい性を取り入れるため、すべての推定値が幅を持って算出される点である。そこで、本研究では主観的評価値のあいまい性をモデルの中に取り入れるために、最小値と最大値の区間を用いる値を区間ファジィ数として定義する。

本研究では、中森と川中<sup>13)</sup>により提案されたファジィ因子分析手法を適用し、主観的評価値のあいまい性を表現することにする。この手法は、相関係数

が区間ファジィ数として表現されるファジィ相関係数行列を用いる。以下では、中森と川中<sup>13)</sup>の研究を参考に、ファジィ因子分析手法を概説する。

まず、回答者( $n=1, \dots, N$ )の評価項目( $k$ )に対する主観的評価値( $x_{nk}^p$ )を用いて、区間ファジィ数として表されるファジィ相関係数行列( $\tilde{R}$ )を式(1)に基づき計算する。

$$\tilde{R} = ([r_{kl}^L, r_{kl}^R])_{K \times K} = \begin{bmatrix} [r_{11}^L, r_{11}^R] & \dots & [r_{1K}^L, r_{1K}^R] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [r_{K1}^L, r_{K1}^R] & \dots & [r_{KK}^L, r_{KK}^R] \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$r_{kl}^L = \max\{-1, r_{kl} - \gamma\sigma_{kl}\} \quad (1b)$$

$$r_{kl}^R = \min\{r_{kl} + \gamma\sigma_{kl}, +1\} \quad (1c)$$

ただし、 $r_{kl}$ は主観的評価値間の相関行列( $R$ )の成分、 $\sigma_{kl}$ は $r_{kl}$ の標準偏差、 $k$ と $l$ は評価項目( $k, l=1, 2, \dots, K$ )である。また、 $[\cdot, \cdot]$ は区間ファジィ数を表し、 $r_{kl}^L$ と $r_{kl}^R$ は主観的評価値のあいまい性を考慮した相関の最小値と最大値である。 $\gamma$ はファジィ度を表すパラメータであり、 $\gamma=0$ の場合は通常の因子分析を意味する。

区間ファジィ数として計算される相関行列( $\tilde{R}$ )の固有値 $\tilde{\lambda}_k$ を求めるため、式(2)を定義する。

$$\tilde{R} - D^2 = (\tilde{s}_{kl}) = ([s_{kl}^L, s_{kl}^R]) \quad (2)$$

$$= ([r_{kl}^L - d_k^2, r_{kl}^R - d_k^2])$$

ここで、 $D = \text{diag}(d_k)$ は独自因子の荷重行列、 $d_k$ は独自因子である。

潜在因子数が $P$ 個あると仮定すると、ファジィ固有値( $\tilde{\lambda}_p$ )は区間ファジィ数として、以下の最適化問題を解くことにより求めることができる。

$$\tilde{\lambda}_p^L \text{の最小化 } (p=1, \dots, P) \quad (3a)$$

$$\text{制約条件 } 0 \leq \tilde{\lambda}_p^L \leq \lambda_p \quad (3b)$$

$$\left| \tilde{\lambda}_p^L e_{pk} \right| \leq \max \left\{ \left| \sum_{k=1}^K s_{pk}^L e_{pk} \right|, \left| \sum_{k=1}^K s_{pk}^R e_{pk} \right| \right\} \quad (3c)$$

$$\tilde{\lambda}_p^R \text{の最大化 } (p=1, \dots, P) \quad (4a)$$

$$\text{制約条件 } \lambda_p \leq \tilde{\lambda}_p^R \quad (4b)$$

$$\left| \tilde{\lambda}_p^R e_{pk} \right| \geq \min \left\{ \left| \sum_{k=1}^K s_{pk}^L e_{pk} \right|, \left| \sum_{k=1}^K s_{pk}^R e_{pk} \right| \right\} \quad (4c)$$

ここで $\lambda_p$ と $(e_{pk})$ はそれぞれ $\gamma=0$ のときの平均固有値と平均固有値ベクトルである。

$\tilde{\lambda}_p$ を求めた後に、ファジィ因子負荷量 $\tilde{A}$ を式(5)のように推定する。

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{pk}) = ([a_{pk}^L, a_{pk}^R])$$

$$= \begin{cases} \left[ \sqrt{\lambda_p^L} e_{pk}, \sqrt{\lambda_p^R} e_{pk} \right], & e_{pk} \geq 0 \\ \left[ \sqrt{\lambda_p^R} e_{pk}, \sqrt{\lambda_p^L} e_{pk} \right], & e_{pk} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

また、回転行列  $T = (t_{pk})$  を用いて、回転後のファジィ因子負荷量 ( $\tilde{B}$ ) を求める。

$$\tilde{B} = (\tilde{b}_{pk}) = ([b_{pk}^L, b_{pk}^R]) = \sum_{p=1}^P t_{pk} \times [a_{pk}^L, a_{pk}^R] \quad (6a)$$

$$t_{pk} \times [a_{pk}^L, a_{pk}^R] = \begin{cases} [t_{pk} a_{pk}^L, t_{pk} a_{pk}^R], & t_{pk} \geq 0 \\ [t_{pk} a_{pk}^R, t_{pk} a_{pk}^L], & t_{pk} < 0 \end{cases} \quad (6b)$$

上記に説明したファジィ因子分析手法の推定は少し複雑のように見えるが、実用的には、区間ファジィ数として式(1)の相関行列を計算した後、式(3)~(4)を満たす手順を踏むことで、通常の因子分析手法の推定に使う統計プログラムで推定が可能である。

区間ファジィ数として算出された因子負荷量間のファジィ距離 ( $\tilde{d}_{kl}$ ) は式(7)によって計算する。

$$\tilde{d}_{kl} = ([d_{kl}^L, d_{kl}^R]) = \left( \left[ \sum_{p=1}^P (\delta_{pkl}^L)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \left[ \sum_{p=1}^P (\delta_{pkl}^R)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (7a)$$

$$\delta_{pkl}^L = \min \left\{ |T1 - T2|; \forall T1, \forall T2 \in \tilde{b}_{pk} \right\} \quad (7b)$$

$$\delta_{pkl}^R = \max \left\{ |T1 - T2|; \forall T1, \forall T2 \in \tilde{b}_{pk} \right\} \quad (7c)$$

このように、ファジィ因子分析の場合、因子負荷量が区間ファジィ数として与えられる。これらの主観的評価値に関わる潜在要因を抽出するため、Fuzzy C-means clustering (FCM) 手法<sup>37)</sup>を用いる。FCM を実行するため、本研究ではファジィ数として計算された因子負荷量間の距離 ( $\tilde{d}_{kl}$ ) の平均値を用いる。

## (2) 新たなハイブリッド離散選択モデルの定式化

因子分析から得た潜在因子に対する回答者の主観的評価値は、因子得点によって表される。また、因子得点は潜在変数として離散選択モデルに導入される。潜在因子  $q$  に対する因子得点は式(8)により計算される<sup>20)</sup>。

$$\tilde{f}_{iq}^n = \sum_{k \in K} x_{ik}^n b_{iqk} \lambda_{iq}^{-1} + \eta_{iq}^n \quad (8)$$

ここで、 $\tilde{f}_{iq}^n$  は個人  $n$  が選択肢  $i$  の潜在因子  $q$  に対する因子得点 (潜在変数)、 $x_{ik}^n$  は選択肢  $i$  の評価項目  $k$  に対する主観的評価値、 $b_{iqk}$  は潜在因子  $q$  に対する評価項目  $k$  の回転後の因子負荷量、 $\lambda_{iq}$  は潜在因子  $q$  の固有値、 $\eta_{iq}^n$  は考慮しない変数による誤差項である。

本研究では、 $\tilde{f}_{iq}^n$  が選択行動に影響する他の要因と独立であると仮定し、選択肢効用関数を式(9)のように定義する。

$$U_i^n = \sum_{m \in M} \beta_m x_{im}^n + \sum_{q \in Q} \alpha_q \tilde{f}_{iq}^n + \xi_i^n \quad (9)$$

ここで、 $U_i^n$  は個人  $n$  の選択肢  $i$  の効用関数、 $x_{im}^n$  は選択肢  $i$  の交通サービス水準 (総数:  $M$  個)、 $\beta_m$  と  $\alpha_q$  はパラメータ、 $\xi_i^n$  は効用の誤差項、 $Q$  は潜在変数  $\tilde{f}_{iq}^n$  の数である。

$x_{im}^n$  と  $\tilde{f}_{iq}^n$  はそれぞれ異なる性質の行動に関わる変数である場合、式(9)が成り立つと考えられる。後述のように、本研究では、 $x_{im}^n$  は選好意識調査における交通機関サービス水準値、 $\tilde{f}_{iq}^n$  は実際の交通機関サービス水準に関する主観的評価値に関わる潜在変数である。このようなことを考えると、本研究では、効用関数を式(9)のように特定化しても差し支えない。

ただし、 $\tilde{f}_{iq}^n$  が選択行動に影響する他の要因  $x_{im}^n$  と相関する場合、式(9)を改良する必要がある。例えば、 $x_{im}^n$  のパラメータ  $\beta_m$  を式(8)の関数として定義することができる。こうすることにより、 $x_{im}^n$  のパラメータ (評価重み) に関する個人間の異質性を表現することができる。ただし、これは本研究の検討範囲を超えるため、その検証については今後の研究課題としたい。

式(8)を式(9)に代入すると、効用関数は式(10)のように変換される。

$$U_i^n = \sum_{m \in M} \beta_m x_{im}^n + \sum_{q \in Q} \alpha_q \tilde{f}_{iq}^n + \varepsilon_i^n \quad (10a)$$

$$\tilde{f}_{iq}^n = \sum_{k \in K} x_{ik}^n b_{iqk} \lambda_{iq}^{-1} \quad (10b)$$

$$\varepsilon_i^n = \sum_{q \in Q} \alpha_q \eta_{iq}^n + \xi_i^n \quad (10c)$$

ここで、 $\varepsilon_i^n$  は式(8)と式(9)の誤差項からなる新たな誤差項である。

このように、効用式(9)の誤差項  $\xi_i^n$  に、潜在変数を表す式(8)の誤差項  $\eta_{iq}^n$  が加わることで、誤差構造は複雑になっている。しかし、従来の誤差項  $\xi_i^n$  は省略された変数の影響も含むことを考えると、式(9)に式(8)を取り入れることにより、誤差項の影響はかえって減っていく可能性がある。

本研究ではさらに、 $Q$  個の潜在変数を共通属性に関する潜在変数 ( $Q_G$  個) と選択肢固有属性に関する潜在変数 ( $Q_S$  個) に分けて、効用関数式(10)を式(11)のように再定義する。

$$U_i^n = \sum_{m \in M} \beta_m x_{im}^n + \sum_{q \in Q_G} \alpha_q \tilde{f}_{iq}^n + \sum_{q \in Q_S} \alpha_q \tilde{f}_{iq}^n + \varepsilon_i^n \quad (11)$$

本研究では、主観的評価値のあいまい性を考慮するため、ファジィ因子分析手法を適用し、区間ファジィ数として与える潜在変数を用いることが必要である。このため、本研究で用いる効用関数をさらに、式(12)によって定義する。

$$\tilde{U}_i^n = \sum_{m \in M} \tilde{\beta}_m x_{im}^n + \sum_{q \in Q_G} \tilde{\alpha}_q \tilde{f}_{iq}^n + \sum_{q \in Q_S} \tilde{\alpha}_q \tilde{f}_{iq}^n + \varepsilon_i^n \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_i^n = [U_i^{nL}, U_i^{nR}] = & \sum_{m \in M} [\beta_m^L, \beta_m^R] x_{im}^n \\ & + \sum_{q \in Q_G} [\alpha_q^L, \alpha_q^R] \cdot [f_{iq}^{nL}, f_{iq}^{nR}] \\ & + \sum_{q \in Q_S} [\alpha_q^L, \alpha_q^R] \cdot [f_{iq}^{nL}, f_{iq}^{nR}] + \varepsilon_i^n \quad (12b) \end{aligned}$$

ここで、 $f_{iq}^n$  はファジィ因子分析により区間ファジィ数として計算された因子得点（潜在変数）、 $[\cdot, \cdot]$  は最小値と最大値を表す区間ファジィ数で、 $L$  が最小値、 $R$  が最大値をそれぞれ表す添字である。交通サービス水準変数のパラメータ  $\beta_m$  も区間で表現される理由は、区間ファジィ数として与えられた因子得点  $f_{iq}^n$  をモデルの中に取り入れることにより、パラメータ  $\beta_m$  の推定値にも影響を及ぼすからである。

なお、区間ファジィ数としての潜在変数  $f_{iq}^n$  は、式(8)を用いて最小値と最大値のそれぞれに対して計算される。

ここで、式(12)の誤差項  $\varepsilon_i^n$  が独立で同一なガンベル分布に従うと仮定すると、区間ファジィ数の1つ1つに対する通常のロジットモデルと同じ式が得られる。本研究では交通機関選択を対象に、式(12)を取り入れた離散選択のロジットモデル（本研究で提案するハイブリッド離散選択モデル）を、区間ファジィ数として与えられた潜在変数の最小値と最大値のそれぞれに対して、通常の最尤推定法に基づき推定する。

#### 4. 事例研究

本研究では広島市の新交通システム（アストラムライン：NTS）の沿線住宅地における交通機関選択を対象に、自動車（乗用車）の遅れ所要時間情報提供が自動車とNTSの選択行動に与える影響を取り上げ、提案モデルの有効性を検証する。

深刻な道路交通渋滞を緩和し、モビリティの確保を図り、環境問題を改善するため、NTSなどの公共交通機関の利便性を向上させ、ITS技術を活かしたマルチモーダル情報の提供などの交通政策が各地で検討・実施されている。このような交通政策を今後効果的に実施するため、利用者の交通行動変化に及ぼす影響を評価する必要がある。このため、旅行時間の短縮効果や道路交通渋滞情報による交通行動の変化の分析だけでなく、交通情報提供に対する満足度、NTSの快適性や駅までのフィーダー交通機関の利便性に対する満足度などの主観的評価要因が意思決定プロセスに与える影響についても明確にすることが望まれる。

本研究では、自動車利用者を対象にして、自動車の遅れ所要時間情報提供による自動車とNTSの選択行動の変化を分析する。また、交通機関選択の意思決定に影響する主観的評価要因として、自動車、NTS、フィーダーバスの運行満足度や自動車の交通情報提供の満足度などを取り上げる。

表-1 主観的評価項目

交通機関	評価項目
自動車	①目的地までの所要時間
	②渋滞状況(渋滞場所と渋滞長)
	③ラジオによる道路交通情報提供の現状
	④テレビによる道路交通情報提供の現状
フィーダーバス	⑤普段の日の運行ダイヤの正確さ
	⑥雨や雪の日の運行ダイヤの正確さ
	⑦運行本数
	⑧所要時間(速さ)
	⑨運賃
NTS	⑩雨や雪の日の運行ダイヤの正確さ
	⑪運行本数
	⑫運行時間帯(始発・終電の時間)
	⑬所要時間(速さ)
	⑭運賃

#### (1) データの概要

著者らは1999年に広島市安佐南区に住む住民を対象に、市内中心部への旅行時間情報が提供された場合における公共交通機関利用意向についてアンケート調査を実施した<sup>38)</sup>。調査は2回に分け実施された。1回目の調査では、個人属性、普段の利用交通機関、移動目的、更に自動車利用者に対しては将来におけるNTSの利用可能性などを尋ねた。2回目の調査では、情報提供の必要性や必要な情報の内容、自動車利用者に対しては情報提供下における自動車とNTSに関する選好意識(SP)を調べた。

また、自動車、NTS、NTS駅までのフィーダーバスに関する満足度に関する主観的評価として、表-1に示すような評価項目について被験者に回答してもらった。各評価項目については、「満足」、「やや満足」、「普通」、「やや不満足」、「不満足」の5段階評価尺度を用いて5から1の数字で評価してもらった。

前述の主観的評価値は、通常の段階評価法で計測された値である。しかし、個人が表-1に挙げる各交通機関の評価項目のそれぞれに対して満足か不満かを答えることができても、満足・不満の程度を必ずしも確定的に評価できるわけではない。また、例えば、同じ「やや不満」という評価尺度についても、個人によってその言葉が意味する範囲に対する認識が異なると考えられる。その結果、このような主観的評価値にはあいまい性が伴うと考えるのは現実的であると思われる。そこで、本研究では、それぞれの主観的評価値をファジィ数として処理する。

本研究では、このような主観的評価値を導入した離散選択モデルにより交通機関選択行動を記述することの精緻化を狙いとしているが、予測を行う際に、

表-2 SPカードの設定

カード	SP1	SP2	SP3	SP4
自動車の遅れ 時間情報の有無	なし	あり	あり	あり
自動車の遅れ 時間(分)	—	0	10, 20	30, 40
NTSの所要 時間(分)	20	20	20	20

例えば、後述のような将来の交通サービス水準の変化に伴う個人の主観的評価値の変化をどのように予測すればよいかという問題が生じる。これについては、交通サービス水準と主観的評価値との因果関係を別のモデリング手法により事前に評価した上で交通機関選択モデルに導入する方法などが考えられる。ただし、本研究では離散選択モデルの枠組みの中で、主観的評価値をファジィ因子分析により表現することの有効性を検証するため、モデルの需要予測への適用性については今後の研究課題としたい。

SP調査では、自動車の遅れ時間情報の有無、自動車の遅れ時間、NTSの所要時間の条件を設定した4種類のカードを被験者に提示し、対象地域から市中心部に向かう場合を想定して自動車とNTSの選択意向を尋ねた。なお、自動車の所要時間についてはオフピーク時の実績値を記入してもらった。SPカードの設定条件を表-2に示す。カードSP1は自動車の遅れ時間情報が提供されていない通常の交通状況を想定している。これに対して、SP2では遅れが生じていない（遅れ時間が0分）情報の提供を、SP3では軽い遅れが生じている（遅れ時間10、20分）情報の提供を、SP4では著しく遅れが生じている（遅れ時間30、40分）情報の提供をそれぞれ想定している。NTSの所要時間については、定時性が高いためすべてのカードにおいて20分とした。なお、自動車の総所要時間は、通常の所要時間と遅れ時間の和とする。

(2) ファジィ因子分析の推定結果

図-2は、ファジィ度 $\gamma$ を仮にそれぞれ0.0、0.2、0.6に設定した場合の区間ファジィ固有値の推定結果を示している。ファジィ度 $\gamma=0.0$ の場合は、通常の因子分析の結果と一致する。この図から分かるように、ファジィ度が大きくなるにつれ、最小と最大固有値とのギャップが拡大している様子が確認できる。これは、主観的評価値のあいまい性が増すことを表している。

図-3と図-4はそれぞれ $\gamma=0.0$ と $\gamma=0.6$ の場合における潜在因子の因子得点をプロットしている。図

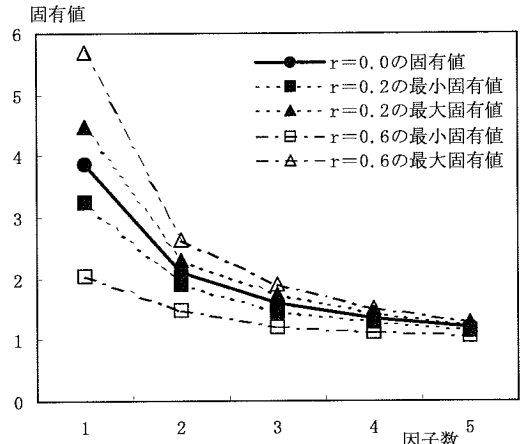


図-2 区間ファジィ固有値 ( $\gamma=0.0, 0.2, 0.6$ )

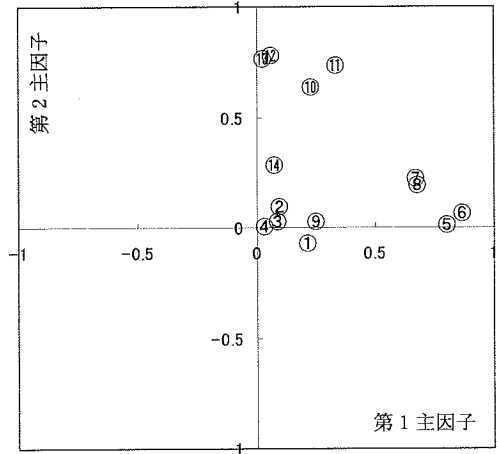


図-3 通常の因子プロット ( $\gamma=0.0$ )

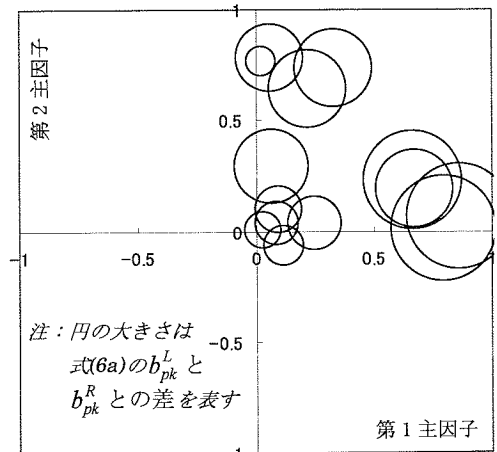


図-4 ファジィ因子プロット ( $\gamma=0.6$ )

-3と図-4を比較してみると、ファジィ度が増すことにより、区間ファジィ数に対応した潜在因子負荷量の最大値と最小値との差異が大きくなるのが読み取れる。各潜在因子は主観的評価値によって定義されることを考えると、ファジィ度が主観評価値に内在するあいまいさの程度を表すと解釈することができる。

本研究では、自動車利用者を対象に各交通手段の満足度を尋ねたため、図-4から分かるように、自動車の主観的評価値(①②③④)はファジィ度によって変動があまり見られない。NTSの所要時間に関する主観評価値(⑬)に対しても変動幅が小さい。これは、普段よく利用する自動車と定時性の高いNTSの所要時間に存在するあいまい性が小さいことを示唆する。一方、NTSの所要時間以外の主観評価値、特にフィーダーバスの主観評価値の変動幅が大きい。このようなあいまい性の異なる潜在因子が意思決定者の選択行動に及ぼす影響も異なってくると考えられる。

前述のことから、ファジィ因子分析手法により、交通機関選択に影響すると思われる主観評価値のあいまい性を捉えることができると言える。

表-3に、ファジィ対象間のファジィ距離とFCMの推定結果を表す。メンバーシップ値から判断すると、フィーダーバスの「雨や雪の日の運行ダイヤの正確さ(⑥)」と「運行本数(⑦)」以外、明確に各潜在クラスにばらついていることが分かる。図-3、図-4と表-3に示しているFCMの推定結果から、次のような潜在因子を定義することができる。

- 第1主因子：自動車交通情報の満足度
- 第2主因子：自動車の運行満足度
- 第3主因子：フィーダーバスの運行満足度
- 第4主因子：NTSとフィーダーバスの運賃満足度
- 第5主因子：NTSの運行満足度

### (3) 新たなハイブリッド離散選択モデルの推定結果

ここでは、前述のファジィ因子分析から算出された潜在因子を交通機関選択モデルの効用関数に取り入れ、提案モデルの有効性を検証する。表-4に推定に用いた説明変数の一覧を示す。

本研究では、潜在変数(潜在因子の因子得点)を選択肢間に共通する要因(共通変数)と選択肢別の固有要因(固有変数)に分ける。具体的には、自動車、NTS、フィーダーバスの運行満足度は共通変数、自動車交通情報提供の満足度は自動車の固有変数、NTSとフィーダーバスの運賃満足度はNTSの固有変数として適用した。Wは、NTSの運行満足度とフィーダーバスの運行満足度がどのくらいの割合で影響するのかを表現する相対尺度推定係数である。

表-3 ファジィ対象間のファジィ距離とFCMの推定結果

評価項目	メンバーシップ値(クラスター)					ファジィ距離
	1	2	3	4	5	
③	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	[0.00, 0.21] ③⇔③
④	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	[0.03, 0.28] ③⇔④
①	0.02	0.95	0.01	0.01	0.01	[0.00, 0.23] ①⇔①
②	0.02	0.95	0.01	0.01	0.01	[0.18, 0.46] ①⇔②
⑤	0.01	0.01	0.95	0.02	0.01	[0.00, 0.39] ⑤⇔⑤
⑥	0.03	0.04	0.83	0.05	0.05	[0.14, 0.53] ⑤⇔⑥
⑦	0.02	0.03	0.88	0.03	0.04	[0.11, 0.61] ⑤⇔⑦
⑧	0.01	0.02	0.93	0.02	0.03	[0.12, 0.47] ⑤⇔⑧
⑨	0.01	0.01	0.02	0.93	0.03	[0.00, 0.26] ⑨⇔⑨
⑭	0.01	0.01	0.02	0.94	0.02	[0.11, 0.60] ⑨⇔⑭
⑩	0.16	0.08	0.17	0.12	0.47	[0.00, 0.35] ⑩⇔⑩
⑪	0.09	0.07	0.16	0.11	0.57	[0.17, 0.61] ⑩⇔⑪
⑫	0.01	0.01	0.01	0.02	0.95	[0.48, 0.88] ⑩⇔⑫
⑬	0.02	0.02	0.02	0.04	0.90	[0.53, 0.89] ⑩⇔⑬

表-4 説明変数一覧表

TT	自動車とNTSの所要時間(共通変数)
AGE	年齢(自動車固有変数)
DT	自動車の遅れ時間情報(自動車固有変数)
DUI	交通情報ダミー(自動車固有変数) 交通情報が提供されている場合 1 交通情報が提供されていない場合 0
CC	定数項(自動車固有変数)
SL	自動車、NTS、フィーダーバスの運行満足度(共通変数)
LCI	自動車交通情報の満足度(自動車固有変数)
SLF	NTSとフィーダーバスの運賃満足度(NTS固有変数)
W	NTSとフィーダーバスの運行満足度の相対尺度推定係数(NTS固有変数)

自動車の遅れ時間情報が交通機関選択行動に及ぼす影響を調べるため、以下の3つのケースを検討対象とする。

- ケース1(SP1)：普段の交通状況、つまり、遅れ時間情報が提供されていない場合における潜在因子の影響力を調べるためのものである。
- ケース2(SP1+SP2)：遅れが生じていないという交通情報が提供された場合における潜在因子の影響力を調べるためのものである。
- ケース3(SP2+SP3+SP4)：遅れ時間の交通情報が提供された場合における潜在因子の影響力を調べるためのものである。

そして、以下の3種類のモデルをそれぞれ推定し、その結果を表-5と表-6に示す。

- モデル1：潜在因子を考慮しないモデル
- モデル2：通常の因子分析から算出された潜在因子を取り入れたモデル
- モデル3：ファジィ因子分析から算出された潜在因子を取り入れたモデル



表-5 モデル1とモデル2の推定結果

データ 説明変数	モデル1						モデル2					
	ケース1		ケース2		ケース3		ケース1		ケース2		ケース3	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
TT	-0.031	1.447	-0.027	1.824	-0.015	1.147	-0.029	1.222	-0.025	1.639	-0.011	0.797
AGE	-0.196	1.343	-0.174	0.689	-0.161	1.735	-0.173	0.162	-0.130	1.157	-0.143	1.456
DT					-0.071	7.992					-0.084	7.785
DUI			0.640	2.442					0.762	2.634		
CC	1.480	1.934	1.317	2.378	1.718	3.455	1.362	1.617	1.108	1.854	1.723	3.179
SI							0.325	1.340	0.211	1.303	0.386	2.973
SLCI							0.735	3.378	0.720	4.658	0.720	5.747
SLF							0.461	2.352	0.454	3.042	0.334	2.469
W							0.620	3.206	0.558	3.042	0.295	2.406
初期対数尤度	-88.72		-177.45		-266.17		-88.72		-177.45		-266.17	
最終対数尤度	-85.35		-166.26		-219.89		-74.22		-144.68		-189.82	
尤度比	0.027		0.063		0.174		0.164		0.185		0.287	
自由度調整済み尤度比	0.004		0.041		0.159		0.085		0.140		0.257	
サンプル数	128		256		384		128		256		384	

表-6 モデル3の推定結果

データ 説明変数	ケース1		ケース2		ケース3	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
TT	[-0.029, -0.029]	[0.235, 1.213]	[-0.026, -0.025]	[1.666, 1.621]	[-0.011, -0.110]	[0.803, 0.794]
AGE	[-0.168, -0.178]	[1.027, 1.101]	[-0.123, -0.136]	[1.078, 1.211]	[-0.142, -0.146]	[1.430, 1.482]
DT					[-0.085, -0.084]	[7.796, 7.779]
DUI			[0.767, 0.759]	[2.643, 2.631]		
CC	[1.336, 1.384]	[1.569, 1.643]	[1.073, 1.133]	[1.778, 1.899]	[1.719, 1.734]	[3.151, 3.202]
SI	[0.272, 0.364]	[1.322, 1.481]	[0.172, 0.242]	[1.208, 1.416]	[0.327, 0.421]	[2.886, 3.069]
SLCI	[0.632, 0.829]	[3.416, 3.384]	[0.613, 0.811]	[4.701, 4.659]	[0.603, 0.822]	[5.668, 5.883]
SLF	[0.370, 0.523]	[2.117, 2.455]	[0.356, 0.516]	[2.714, 3.167]	[0.250, 0.388]	[2.093, 2.630]
W	[0.640, 0.606]	[3.250, 3.200]	[0.574, 0.545]	[4.083, 4.039]	[0.296, 0.295]	[2.338, 2.469]
初期対数尤度	-88.72		-177.45		-266.17	
最終対数尤度	[-73.66, -74.38]		[-143.86, -145.08]		[-189.58, -189.82]	
尤度比	[0.170, 0.162]		[0.189, 0.182]		[0.288, 0.287]	
自由度調整済み尤度比	[0.092, 0.083]		[0.145, 0.137]		[0.259, 0.257]	
サンプル数	128		256		384	

上述のモデルの推定結果について、以下のように考察を行う。

a) モデルの精度について

モデル3については、ファジィ度 $\gamma=0.6$ の場合に自由度調整済み尤度比が最も高い。このことから、本研究で用いる主観的評価値に内在するあいまい性の大きさが伺える。ここでは、表-5に $\gamma=0.6$ の結果のみを示す。

潜在因子を考慮しないモデル1の自由度調整済み尤度比が非常に小さい値(0.004)となってしまったのは、取り入れる説明変数が不足していると考えられる。ただし、同様な説明変数を取り入れた各モデルを比較するには支障がないと思われる。モデル1と比べて、モデル2の精度(自由度調整済み尤度比)は、ケース1では0.004から0.085に、ケース2では0.041から0.140に、ケース3では0.159から0.257にそれぞれ向上した。このことから、潜在因子を取

り入れることにより、モデルの精度が大幅に改善できることが確認できた。このことから、本研究で提案した、ファジィ因子分析手法により主観的評価値のあいまい性を考慮した新たなハイブリッド交通機関選択モデルが有効であることが伺える。

一方、モデル2と比べて、ファジィ因子分析から算出された潜在因子を取り入れたモデル3は、精度からみると、大きな差が見られないが、ファジィ潜在因子の最小値を仮定した場合においては、全てのケースで自由度調整済み尤度比が若干高くなっている。また、主観的評価値のあいまい性を反映し、幅を持ったパラメータの推定値と自由度調整済み尤度比を得られたことが特徴となっている。

モデル2とモデル3を比較すると、通常の因子分析結果を用いた場合( $\gamma=0.0$ )の各潜在因子の推定パラメータ値が、ファジィ度( $\gamma=0.6$ )を考慮した場合の推定値区間に包含されていることが分かる。

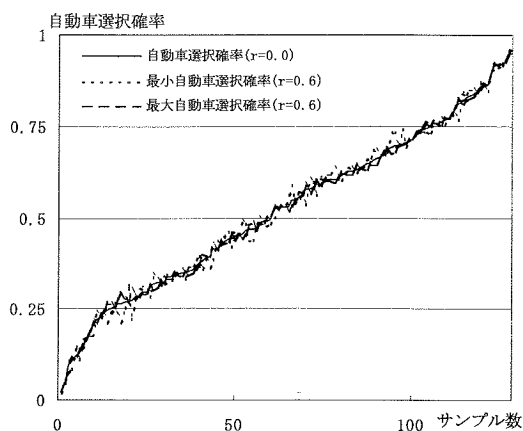


図-5 ケース1 個人別の最小と最大自動車選択確率

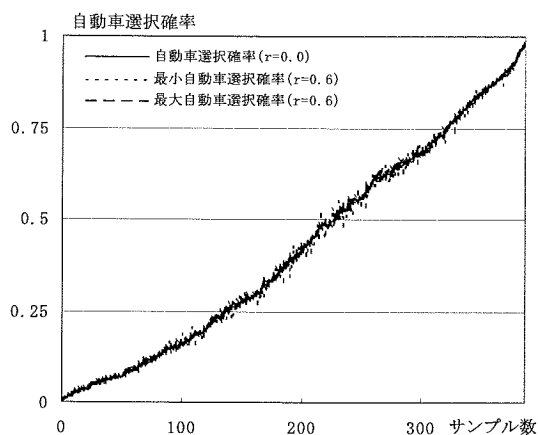


図-6 ケース3 個人別の最小と最大自動車選択確率

## b) モデルパラメータの行動論的解釈

交通サービス水準変数については、統計的に有意となったのは、自動車の遅れ時間のみである。交通情報提供ダミーのパラメータも統計的に有意であった。このことから、交通機関選択に影響する客観的な要因が、自動車の遅れ時間と交通情報の提供であることが分かった。

一方、主観的評価値の影響を表す潜在因子についてみると、ほとんどのパラメータが統計的に有意であった。その中で、影響力が最も高いのは自動車の交通情報に対する満足度であった。ただし、情報提供がされない場合とゼロの遅れ時間が提供される場合においては、NTS とそのフィーダーバスに対する満足度の影響力が高くなっている。

特に、モデル3については、情報提供がない場合(ケース1)、自動車の交通情報に対する満足度のファジィ推定値区間が $[0.632, 0.829]$ 、NTS とそのフィーダーバスに対する満足度のファジィ推定値区間が $[0.640, 0.606]$ となっていることから、ファジィ潜在因子を取り入れることにより、説明変数の影響力が逆転する可能性があることを示唆している。

## c) 情報提供による不確実性の減少効果分析

図-5 と図-6 に、主観的評価値のあいまい性に起因すると思われる、ケース1 と3 における個人別の交通機関選択確率の広がり(最小値, 最大値)を示している。交通情報が提供されないケース1 と比べて、自動車の遅れ時間情報を提供したケース3 では、選択確率の変動幅が狭くなっていることが分かる。これは、交通情報の提供が意思決定者の選択における不確実性を減少させたためであると解釈することができる。

しかし、今回の事例研究では、ファジィ因子分析から、因子得点は区間で与えるファジィ数として算出されたが、離散選択モデルに取り入れる際に、区間の最大値と最小値をそれぞれ用いて推定を行った。今後、最大値と最小値をもった区間データをそのまま離散選択モデルに取り入れるための推定手法の開発が研究課題として残される。

## 5. おわりに

本研究では、交通機関選択を対象に、選択に影響する利用者満足度という主観的評価値の2面性(個人からみたあいまい性と個人間の変動)に着目し、あいまい性をファジィ因子分析手法により、個人間の変動を離散選択モデルによりそれぞれ表現した新たなハイブリッド離散選択モデルを提案した。本研究の成果を以下のようにまとめることができる。

- 1) 通常の因子分析と比べて、ファジィ因子分析手法では主観的評価値のあいまい性を考慮するため、「幅」をもつ相関行列を定義し、「幅」で与える潜在因子を算出することができる。ファジィ因子分析の結果、普段あまり利用されていないアストラムラインとそのフィーダーバスの評価項目に対する主観的評価値は、自動車の評価項目に関する主観的評価値によりあいまい性が相対的に多く含まれていることが確認できた。このことから、ファジィ因子分析による主観的評価値のあいまい性を効果的に表現していると解釈することができる。
- 2) 前述の「幅」をもった潜在因子を交通機関選択

モデルに取り入れて、実証的分析を行った結果、モデルの精度が従来のモデルと比べて大幅に改善することが分かった。このことは、本研究で提案した、主観的評価値を考慮した新たなハイブリッド離散選択モデルの有効性を示している。

- 3) ファジィ因子分析手法により主観的評価値を取り入れた交通機関選択モデルは、従来の選択モデルを特殊ケースとして含めることができ、提案したモデルの一般性が認められる。
- 4) 異なる情報提供シナリオ（ケース）について分析した結果、交通情報の提供により、意思決定者の選択における不確実性が減少することが確認できた。これまで、情報提供による移動時間の短縮や交通機関の転換といった定量的な効果を評価しているが、意思決定の不確実性の低減効果についてはその評価は課題として残されてきたと思われる。ここでの分析結果から、本研究で提案したモデルは、意思決定の不確実性の減少効果を評価するツールとして適用可能であることが分かる。

本研究では、潜在因子の区間ファジィ数の最小値と最大値のそれぞれに対して、ロジットモデルを推定し、パラメータの違いを比較したが、個別推定によるモデルのスケールパラメータが異なってくる可能性があり、今後、区間ファジィ数をそのまま活かした離散選択モデルの推定手法を開発することが今後の研究課題として残されている。

## 参考文献

- 1) Ben-Akiva, M., McFadden, D., Train, K. and Walker, J.: Hybrid choice models: progress and challenges, *Working paper*, MIT, 2001.
- 2) Walker, J.L.: *Extended discrete choice models: integrated framework, flexible error structures, and latent variables*, Ph.D. Dissertation, MIT, 2001.
- 3) Walker, J. and Ben-Akiva, M.: Generalized random utility model, *Mathematical Social Sciences*, Vol.43, pp.303-343, 2002.
- 4) 森川高行, 佐々木邦明: 主観要因を考慮した非集計離散型選択モデル, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.115-124, 1993.
- 5) Morikawa, T. and Sasaki, K.: Discrete choice models with latent variables using subjective data, In Ortuzar, J., Hensher, D. and Jara-Diaz, S. (eds), *Travel Behavior Research : Updating the State of Play*, Pergamon, pp.435-455, 1998.
- 6) 河上省吾, 井上徹, 佐々木邦明: 利用手段ごとの主観的知覚構造の違いを考慮した交通機関選択モデル, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.637-642, 1999.
- 7) Fukuda, D., Lee, E.H. and Morichi, S.: A comparative study on discrete choice models with choice set formation process: An application to travel mode choice, *Proceedings of 9<sup>th</sup> WCTR Conference in Seoul, Korea*, CD-ROM, 2001.
- 8) 藤井聡, 竹村和久: リスク態度と注意一状況依存焦点モデルによるプレーミング効果の計量分析, 行動計量学, Vol.28, No.1, pp.9-17, 2001.
- 9) 藤井聡, トミー・ヤーリング: 交通需要予測におけるSPデータの新しい役割, 土木学会論文集, No.723/IV-58, pp.1-14, 2003.
- 10) Fujii, S. and Gärling, T.: Application of attitude theory for improved predictive accuracy of stated preference methods in travel demand analysis, *Transportation Research Part A*, Vol.37, No.4, pp.386-402.
- 11) 吉川歩: ファジィ評定とメンバーシップ関数同定法, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.2, pp.201-209, 1998.
- 12) 中森義輝: 感性データ解析, 感性情報処理のためのファジィ数量分析手法, 森北出版, 2000.
- 13) 中森義輝, 佐藤和明, 和多田淳三: ファジィデータの因子空間モデル, 日本ファジィ学会誌, Vol.9, No.1, pp.99-107, 1997.
- 14) 中森義輝, 川中愛: 因子空間におけるあいまいさの表現, 日本ファジィ学会誌, Vol.11, No.5, pp.797-807, 1999.
- 15) Yabuuchi, Y., Watada, J. and Nakamori, Y.: Fuzzy principal component analysis for fuzzy data, *Proceedings of FUZZ-IEEE*, Vol.2, pp.1127-1132, Barcelona, Spain, July 1-7, 1997.
- 16) 古殿幸雄, 奥田徹示, 浅居喜代治, 杉浦寅彦: ファジィ観測データを用いる主成分分析, 日本ファジィ学会, Vol.4, No.3, pp.120-137, 1992.
- 17) 北村隆一, 森川高行編著: 交通行動の分析とモデリング, 技報堂出版, 2002.
- 18) Dobson, R.: Towards the Analysis of attitudinal and behavioral responses to transportation system characteristics, *Transportation*, Vol.4, pp.267-290, 1975.
- 19) McFadden, D.: Rationality for economists? *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol.19(1-3), pp.73-105, 1999.
- 20) Recker, W.W. and Golob, T.F.: Attitudinal modal choice model, *Transportation Research*, Vol.10, No.5-B, pp.299-310, 1976.
- 21) Boxall, P.C. and Adamowicz, W.L.: Understanding heterogeneous preferences in random utility models: the use of latent class analysis, *Staff Paper 99-02*, University of Alberta, 1999.
- 22) Koppleman, F.S. and Lyon, P.K.: Travel choice behavior: Models of perceptions, feelings, preference, and choice,

- Transportation Research Record*, No.765, pp.26-33, 1980.
- 23) Koppelman, F.S. and Lyon, P.K.: Attitudinal analysis of work/school travel, *Transportation Science*, Vol.25, No.3, pp.26-33, 1981.
  - 24) Lovelock, C.H.: Modeling the modal choice decision process, *Transportation*, Vol.4, pp.253-265, 1975.
  - 25) Dobson, R. and Tischer, M.L.: Comparative analysis of determinants of modal choice by central business district workers, *Transportation Research Record*, No.649, pp.7-14, 1977.
  - 26) 武藤慎一, 上村高大, 高木朗義: ファジィ効用を用いたレクリエーション施設整備の便益評価, *日本ファジィ学会誌*, Vol.13, No.6, pp.662-671, 2001.
  - 27) 藤原章正, 張峻屹, 岡村敏之: ファジィ理論に基づくC/V調査分析法による住区内街路整備の評価, *都市計画論文集*, No.38-3, 505-510, 2003.
  - 28) 秋山孝正, 佐佐木綱: ファジィ推論と交通行動の記述, *交通工学*, Vol.23, No.3, pp.22-27, 1988.
  - 29) Lee, B.J., Namgung, M., Sung, S.R. and Fujiwara, A.: Route choice behavior model using fuzzy inference, *Selected Proceedings of 9<sup>th</sup> WCTR*, 2003 (in press).
  - 30) 高羽俊光, 秋山孝正: ソフトコンピューティングを利用した交通行動記述サブモデル, *土木計画学研究・論文集*, No. 17, 701-709, 2000.
  - 31) Lotan, T. and Koutsopoulos, H.N.: Models for route choice behavior in the presence of information using concepts form fuzzy set theory and approximate reasoning, *Transportation*, Vol.20, pp.129-156, 1993.
  - 32) 水谷香織, 秋山孝正: ファジィ推論とロジックモデルによるハイブリットモデルの検討, *土木計画学研究・論文集*, Vol.18, No.3, pp.509-516, 2001.
  - 33) 秋山孝正, 高羽俊光, 水谷香織: ナビゲーションのためのファジィ交通行動分析, *日本ファジィ学会誌*, Vol.11, No.2, pp.205-214, 1999.
  - 34) Vythoulkas, P.C. and Koutsopoulos, H.N.: Modeling discrete choice behavior using concepts from fuzzy set theory, approximate reasoning and neural networks, *Transportation Research Part C*, Vol.11, pp.51-73, 2003.
  - 35) 菊地慎也, 宇野伸宏: 推定旅行時間のあいまいさがトリップ計画に及ぼす影響の測定方法: 可能性理論の適用, *日本ファジィ学会誌*, Vol.11, No.2, pp.233-245, 1999.
  - 36) 柳井晴夫, 繁舩算男, 前川眞一, 市川雅教: 因子分析, 朝倉書店, 1990.
  - 37) Jang, J.S.R., Sun, C.T. and Mizutani, E.: *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, International edition, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, 1997.
  - 38) 藤原章正, 中村文彦, 佐藤和彦, 神田佑亮: 旅行時間情報の提供が個人の交通機関選択効用に及ぼす影響, *土木計画学研究・論文集*, Vol.18, No.4, pp.637-642, 2001.
  - 39) Teodorović, D.: Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art, *Transportation Research Part A*, Vol.33, pp.337-364, 1999.
  - 40) Dubois, D. and Prade, H.: Fuzzy sets and probability: Misunderstandings, bridges and gaps, *Proceedings of the Second IEEE Conference on Fuzzy Systems*, San Francisco, pp.1059-1068, 1993.
  - 41) Kikuchi, S.: Treatment of uncertainty study of transportation: fuzzy set theory and evidence theory, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.124, No.1, 1998.
  - 42) Lee, B.J., Fujiwara, A., Sugie, Y. and Namgung, M.: A sequential method for combining random utility model and fuzzy inference model, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Informatics*, Vol.7, No.2, 200-206, 2003.
  - 43) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社, 1990.
  - 44) 原田昇, 森川高行, 屋井鉄雄: 交通行動分析の展開と課題, *土木学会論文集*, No.470/IV-20, pp.97-104, 1993.

(2003.6.6 受付)

## HYBRID DISCRETE CHOICE MODEL INCORPORATING FUZZINESS OF SUBJECTIVE EVALUATION DATA

Backjin LEE, Akimasa FUJIWARA, Junyi ZHANG and Yoriyasu SUGIE

Conventional factor analysis is difficult to satisfactorily represent fuzziness in subjective evaluation data. This paper therefore attempts to tackle this issue by applying a factor analysis based on fuzzy theory. Moreover, a new discrete choice model (called hybrid discrete choice model) is proposed by incorporating fuzzy latent factors calculated from the above-mentioned factor analysis. Reflecting the influence of fuzziness, utility functions of hybrid discrete choice model are defined as those having interval values. An empirical study, using stated preference data for choice of travel mode under information provision, confirmed the effectiveness of factor analysis based on fuzzy theory and the hybrid discrete choice model.