

相対性効用の概念に基づく交通機関SPパネルデータの分析*

Analysis of SP Panel Data for Mode Choice based on the Concept of Relative Utility*

張 峻屹**・杉恵 頼寧***・藤原 章正***・玉置 善生****

By Junyi Zhang**・Yoriyasu Sugie***・Akimasa Fujiwara***・Yoshio Tamaki****

1. はじめに

現在、交通分野において多用されているSP (Stated Preference) 手法について、しばしばその時間的安定性が指摘される。本研究ではこの時間的安定性に影響する最も重要な要因の1つとして、文脈依存性 (Context Dependence) を取り上げる。

通常、個人は嗜好といった心理的要素、情報の欠如、経験、他人の影響などによりすべての選択肢を意思決定過程において均等に認識しているわけではない。例えば交通機関選択の場合、料金や時間などのサービス水準がすべて同じであっても、各交通機関に関する利用者の嗜好や選択が必ずしも同じであるとは限らない。これは異なる交通機関に対して、個人が異なる重みをもって評価を行っているからと考えられる。

一方、効用理論の重要な概念である選択枝の効用については、今まで当該選択枝の属性の影響のみが考慮されてきているが、実際、選択枝集合にある他の選択枝の影響、過去・将来の選択行動の影響及び他人からの影響も受ける。本研究で取り扱う文脈依存性はこのような影響のことを指す。ただし、一般的に言われている文脈依存性の範囲はもっと広い。

前述した、意思決定プロセスにおける異なる選択枝への認識・評価の不均一性 (相対重要性) 及び文脈依存性を考慮できるモデリング手法の1つとして、相対性効用モデルがある¹⁾。同モデルからみると、SPの時間的変化は選択枝属性パラメータ値の変化と各選択枝の相対重要性パラメータ値の変化に分けられる。

本研究では交通機関選択に関するSPパネルデータを対象に、相対性効用モデルの重要な概念である相対重要性パラメータの時間的安定性、同モデルにおける選択枝属性以外の影響要因の取り入れ方及びその相対重要性パラメータとの関係について検討すると同時に、SPの時間的変化特性を考慮した交通機関選択モデルを提案する。

*キーワード：相対性効用、交通行動分析、交通手段選択

**正員、工博、パシフィックコンサルタンツ(株) 総合計画本部交通計画部
(東京都新宿区西新宿2-7-1新宿第一生命ビル20階
TEL 03-3344-1109, FAX 03-3344-1549)

***正員、工博、広島大学大学院国際協力研究科開発科学専攻
(東広島市鏡山1-5-1,
TEL 0824-24-6919, FAX 0824-24-6919)

****所属は第一著者と同じ

そして、1994年に開通した広島市新交通システムの利用意識に関する4時点SPパネルデータを用いて、提案したモデルの妥当性を検証する。

本論文は以下のように構成される。第2節では文脈依存性を考慮した研究をレビューし、第3節では相対性効用モデルについて論述する。第4節では相対性効用に基づく新たなSPパネルモデルについて説明する。第5節では提案したモデルに関する推定及び考察を行う。最後に、本研究の成果と将来の課題について第6節で述べる。

2. 文脈依存性を考慮した研究のレビュー

McFadden は選択行動に関する意思決定プロセスを図1のように総括する。このプロセスは“記憶”に基づく“知覚/信念”によって形成され、“態度”、“動機/情緒”と“選択”から影響を受ける。そして、再帰性、完全性、推移性と連続性という条件のもとで、“選択”は数量的な測定尺度、つまり、“効用”によって表現することができる²⁾。

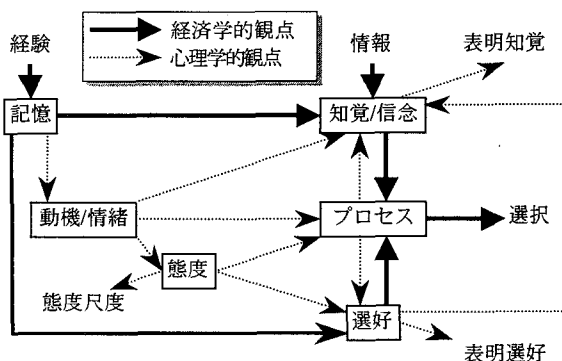


図1 選択に関する意思決定プロセス²⁾

一方、心理学的な観点からみると、選択行動は局所的で、適応性・学習性をもち、そして、文脈に依存して変わりやすく、さらに、“知覚/信念”・“態度”・“動機/情緒”の間の複雑な相互作用関係に影響される³⁾。このような心理学的立場に立てば、SPが元々時間的に変化しやすいものであると解釈することができる。

Tversky and Simonson は彼らの文脈依存選択理論では、文脈をバックグラウンド文脈 (background context) とロ

一カル文脈(local context)に分けている。前者は過去の選択結果に、後者は選択肢集合によってそれぞれ定義される。そして、効用関数を文脈に依存しない項と文脈依存項に、文脈依存項をさらにバックグラウンド文脈依存項とローカル文脈依存項にそれぞれ分けている³⁾。ただし、彼らの文脈依存選好理論では効用最大化を仮定していない。

Oppewal and Timmermans は文脈を選択肢集合の構成文脈(composition context)とバックグラウンド文脈に分けている⁴⁾。前者はTversky and Simonsonのローカル文脈と同じ意味合いをもつが、後者に関する解釈はTversky and Simonsonと異なる。ここでいうバックグラウンド文脈は意思決定の外的要因を指す。例えば、住宅購入を考える際の税金のことや投資を決める時の利息や経済情勢のことはその例である。そして、ローカル文脈をさらに選択肢の数、選択肢の類似性及び選択タスクに関する提示フォーマットに細分化する。また、文脈依存性を表現するため、McFaddenのUniversal logit model⁵⁾を用いた。

Anderson らはローカル文脈依存性を表現するため、McFaddenのモデル⁵⁾を使い、他選択肢の属性を取り入れる方法と、他の選択肢の利用可能性を取り入れる方法を検討している⁶⁾。

Kahneman ら⁷⁾、Tversky and Kahneman⁸⁾は彼らの参照依存性(reference-dependent)モデルでは、選択が現況または参照基準点に依存すると主張し、参照基準点の変化が選好の逆転をもたらすと実証した。ここでいう参照依存性も文脈依存性の一種である。

また、McFadden はTversky らの心理学研究成果をレビューする際に、効用最大化原則に反する認知的変則として“文脈”、“参照点”、“利用可能性”、“迷信”、“プロセス”及び“投射”という6大分類に総括している⁹⁾。

前述のレビューから分かるように、文脈依存性はより範疇の大きい概念であり、選択肢の類似性を包含する。

これまでレビューした研究では文脈依存性に関する幾つかの記述方法を提案したが、本研究では相対性効用の概念を導入し、その代替的なモデリング手法を提案する。

3. 相対性効用モデルの概説

(1) 相対性効用の概念に関するレビュー

前述したように、文脈依存性といっても多種多様で、統一した定義や見解がないのが現状である。しかし、選択行動に与える影響の大きさを考えると、現在広く適用されている確率効用最大化理論の範疇のなかで文脈依存性をどう表現するかが研究の観点だけではなく、実用性の観点からみても重要な課題であると認識している。

このような問題認識に立ち、張らは従来の確率効用最大化理論の問題点に着目し、相対性効用モデルを提案し

ている¹⁾。

相対性効用の概念について、Duesenberryの相対収入仮説¹⁰⁾が有名であり、Marx¹¹⁾も最初の提唱者のひとりであると言われている¹²⁾。Stadt ら¹²⁾は効用の完全相対性を主張し、個人間の効用関数における差異を説明しようとする。具体的に、個人の収入に関する厚生関数を知覚収入分布で表す。つまり、個人は自分が知覚する収入分布におけるランキングに基づき特定の収入水準を評価すると仮定する。

(2) 本研究における相対性効用の定義

上述の相対性効用の概念を拡張すれば、選択肢の効用が当該選択肢の属性以外に、選択肢集合にある他の選択肢の影響、過去・将来の選択行動の影響及び他人からの影響を受けると考えられる(後者の2つは対象選択肢以外の影響も含む)。このような考え方に基けば、以下の3種類の相対性効用関数 $U_{ij,t}$ を定義することができる。

① 他選択肢の影響を考慮した相対性効用

$$U_{ij,t} = f\{u_{ij,t} | (u_{ij',t} : \text{for all } j' \neq j)\} \quad (1)$$

② 過去・将来の選択行動の影響を考慮した相対性効用

$$U_{ij,t} = f\{u_{ij,t} | (u_{ij',t'} : t' \neq t \text{ and } \forall j)\} \quad (2)$$

③ 他人からの影響を考慮した相対性効用

$$U_{ij,t} = f\{u_{ij,t} | (u_{i',j',t} : i' \in \text{参照グループ})\} \quad (3)$$

ここで、 i は個人、 j は選択肢、 t は時間、 u は従来の効用関数である。

また、参照グループは個人が比較対象として認識している他人の集合を指す。この集合は個人が明確に特定できる他人からなるものと、不特定多数の他人からなるものに分けられる。当然、意思決定の対象によって、この参照グループは変わりうる。

(3) 相対重要性の概念について

一方、従来の選択モデルでは、個人が選択肢集合にあるすべての選択肢を均等に認識すると仮定する。しかし、通常、個人は選択場面に応じて特定の選択肢により大きな評価重みを置くと考えられる。この点について、集団意思決定の研究ではColeman¹³⁾とGupta¹⁴⁾にも指摘された。ColemanとGuptaはmultiple-actor/multiple-eventsに関する集団意思決定メカニズムを表現する際に、本研究でいう相対重要性と似通った、interestという概念を導入した。

Coleman¹³⁾は以下の相対効用差(relative utility difference)という指標 r_{ij} を定義した。

$$r_{ij} = (u_{ij}^1 - u_{ij}^2) / \sum_j |u_{ij}^1 - u_{ij}^2| \quad (4)$$

ここで、 u_{ij}^1 は個人 i が選択肢 j を選ぶ効用である。そして、 u_{ij}^2 は j が提示された場合に j を選ばない（現況）効用を表すため、選択肢 j に依存する形をとっている。

現況との比較に基づく効用 $u_{ij}^1 - u_{ij}^2$ は正值と負値の両方をとる可能性がある。正值の場合に選ぶことにより得をし、負値の場合に損をする。そして、 r_{ij} の絶対値の和は 1 である。Coleman は $|r_{ij}|$ を個人 i の選択肢 j に示す interest として定義し、選択肢 j を選ぶかどうかを個人の意思決定にとってどれだけ重要かを表す。Coleman は $|r_{ij}|$ を relative interest と呼ぶ。 r_{ij} の符号は interest の方向を示す。よって、個人は自分の効用を増やすため、高い interest を示す選択肢に対して、できる限りその効用と interest の方向に対する制御力を得ようとする。

一方、Gupta は絶対値の関数表現を省いて、Coleman の relative interest 指標を以下のように修正した。

$$r_{ij} = (u_{ij}^1 - u_{ij}^0) / \sum_j (u_{ij}^1 - u_{ij}^0) \quad (5)$$

ここで、 u_{ij}^1 と u_{ij}^0 はそれぞれ選択肢 j に対する最も好ましい選択結果と、最も好ましくない選択結果から得られる効用である。この新しい指標は以下の条件を満たす。

$$0 \leq r_{ij} \leq 1 \text{ and } \sum_j r_{ij} = 1 \quad (6)$$

Coleman と Gupta はともに relative interest 指標を用いて、集団意思決定における各個人の相対影響力を分析した。しかし、彼らの定義は効用に基づくもので、効用関数に基づく選択現象の表現には適さないか、または、その適用が困難である。そこで、本研究では代替的なモデリング手法を提案する。

(4) 相対性効用最大化原則

ここでは、式 (1) の相対性効用を取り上げる。対象選択肢の選択に対して、選択肢集合における他の選択肢の存在や属性値が影響するなら、それらを対象選択肢の効用関数の中で明確に表現しなければならない（以下の仮説を参照）。よって、以下のような操作性の高い相対性効用関数を提案する。

$$U_{ij,t} = r_{ij,t} \sum_{j' \neq j} (u_{ij,t} - u_{ij',t}) \quad (7)$$

ここで、 $r_{ij,t}$ は相対重要性パラメータを表す。ただし、符号の制約がない。

仮説：個人が対象選択肢を選ぶかどうかは、選択肢集合にある他の選択肢との比較優位性と各選択肢の相対的重要性によって決まる。

ここでいう比較優位性とは効用の差を指す。選択肢間においてその属性変数パラメータが共通の場合、比較優位性は選択肢間の属性の差分関数となる。選択肢間の属

性の差が小さければ、選択肢間の類似性が高いと言える。このように、異なる選択肢の異なる効用の影響をそのまま対象選択肢の効用関数の中に取り入れることにより、選択肢間の類似性を明確に表現することができる。

また、相対重要性パラメータに、選択肢の数や過去の選択結果、意思決定の外的要因といったものを取り入れることで、より広範の文脈依存性を考慮できると考えられる。さらに、Tversky and Kahneman⁸ の参照基準点という概念に照り合わせると、前述の相対性効用関数では選択肢集合にある対象選択肢以外すべての選択肢の効用を参照基準点として取り入れていると解釈できる。

このように、式 (7) の相対性効用関数では、選択行動に関する文脈依存性を選択肢属性の影響に依存するもの（選択肢の類似性）とそれ以外のものに分けている。

上述のことを以下の相対性効用最大化原則としてまとめることができる。

相対性効用最大化原則：個人が選択肢集合から相対性効用が最も高い選択肢を選ぶ。この相対性効用は選択における文脈依存性を明示的に表現し、各選択肢の比較優位性とその相対的重要性によって定義される。

また、以下の相対性効用定理も成り立つ。

相対性効用定理：もし個人が選択肢集合の各選択肢を同一視するならば、相対性効用最大化原則は従来の効用最大化原則に帰着する（証明は付録 1 を参照）。

(5) 相対性効用モデルの導出

従来の確率効用最大化理論では選択肢の効用を定義する際に、式 (8) に示すように当該選択肢属性や個人属性以外の影響を無視する。

$$u_{ij,t} = v_{ij,t} + \varepsilon_{ij,t} \quad (8)$$

ここで、 $v_{ij,t}$ は対象選択肢の属性や個人属性を含む効用関数の確定項、 $\varepsilon_{ij,t}$ は誤差項である。

式 (8) は分析者が「従来の効用が確定項 $v_{ij,t}$ と誤差項 $\varepsilon_{ij,t}$ との線形結合によって表現される」ことを知っているとして暗黙に仮定する。

一方、相対性効用モデルでは従来の効用ではなく、「相対性効用が確定項 $V_{ij,t}$ と誤差項 $e_{ij,t}$ との線形結合に表される（式 (9)）」ことを分析者が知っていると仮定する。そして、相対性効用関数を以下のように定義する。

$$U_{ij,t} = V_{ij,t} + e_{ij,t} \quad (9)$$

$$V_{ij,t} = r_{ij,t} \sum_{j' \neq j} (v_{ij,t} - v_{ij',t}) \quad (10)$$

ここでは、誤差項 $e_{ij,t}$ は選択肢 j のみに依存し、他の選択肢の非観測要因から影響を受けないという仮説を立てる。この仮説の緩和を今後の研究課題としたい。

本研究では、式 (9) と (10) で定義された効用を相対性効用と呼ぶ理由として、(1) 相対重要性パラメータ $r_{ij,s}$ を導入したこと、(2) 効用関数が従来のような確定項ではなく、他の選択肢との差分で定義されたことを挙げる。

誤差項 $e_{ij,s}$ の分布により、異なる選択モデルを導出できる。 $e_{ij,s}$ は同一で独立なガンベル分布に従う場合、以下のような選択確率式が得られる (r-MNL モデルと略す)。

$$P_{ij,s} = \frac{\exp\left\{r_{ij,s} \sum_{j' \neq j} (v_{ij,s} - v_{ij',s})\right\}}{\sum_k \exp\left\{r_{ik,s} \sum_{k' \neq k} (v_{ik,s} - v_{ik',s})\right\}} \quad (11)$$

誤差項間の同一性と独立性仮説が成り立たない場合のモデリング手法は既に多く提案され²⁾、それらを援用すればよい。ここで注目しているのは、確定項での文脈依存性の表現である。なぜなら、誤差項の確率分布の妥当性を容易に検証できないが、観測された情報をもとに定義した文脈依存性の検証が容易にできるからである。

式 (11) では、J 個の選択肢がある場合に J-1 個の相対重要性パラメータが唯一に得られることが容易に証明できる (付録 2 を参照)。言い換えれば、モデルの推定に際して、1 つの基準選択肢に対して、その相対重要性パラメータを予め設定された値に固定することが必要である。以下では式 (11) の特徴について説明する。

(a) r-MNL モデルは IIA 特性を持たない

差分型効用関数の導入により、選択の文脈依存性 (選択肢間類似性を含む) を考慮しているため、r-MNL モデルは IIA (Independence of Irrelevant Alternatives) 特性を持たない。

(b) r-MNL モデルは通常の最尤法で推定できる

従来の non-IIA モデルと違って、誤差項の分布や構造を変えずに効用の確定項のみを修正する形となっているため、通常の最尤法でモデルを推定することができる。

(c) 相対性効用を容易に既存の選択モデルに適用できる

相対重要性パラメータが選択肢によらず一定であれば、式 (11) は通常のロジットモデルになる。この場合、相対性効用最大化は通常の効用最大化に帰する。また、式 (9) と (10) で定義された相対性効用をそのまま他の既存選択モデルの中に取り入れることができる。例えば、それを NL (Nested Logit) モデルに取り入れると、同一選択階層における選択肢間の類似性をも考慮することができる¹⁾。

(d) 選択肢集合の特定を生内化させることができる

選択肢集合の特定に関する従来のモデルは段階選択プロセスを仮定する。つまり、第 1 段階では選択肢集合を特定し、第 2 段階では選択肢集合から 1 つの選択肢を選ぶ。しかし、Horowitz and Louviere¹⁵⁾ に実証されたように、選択肢集合の特定そのものが効用関数の一部に過ぎず、選択肢集合の特定段階では選択段階の効用関数に含まれる情報以外に何の有用な情報も提供できない。

一方、r-MNL モデルでの相対重要性パラメータを選択

肢集合の特定に影響する要因の関数として適切に定義することにより、選択肢集合の特定を生内化させることが可能である。

例えば、選択肢集合に A, B, C という 3 つの選択肢があるとする。モデルを推定した結果、選択肢 A と B の相対重要性パラメータは正値であるが、選択肢 C のそれは大きな負の値が得られたとする。この場合、 $\sum_{j'} (v_{ij,s} - v_{ij',s})$ の符号と大きさによって、選択肢 C が個人の選択意思決定において考慮されていないと解釈できるかもしれない。これに関する検証は本研究の目的から逸脱するので、今後の研究課題としたい。

(e) 階層化の困難な選択現象を簡単に表現できる

NL モデルは MNL モデルの IIA 特性を緩和するために提案された。しかし、選択階層をどう分けるかについて分析者の主観的な判断に頼らざるを得ない。特に選択階層を分けにくい場合や、選択階層構造の異質性が存在する場合、分析者の主観的な判断は間違ったモデル推定や政策を招くことを否定できない。

これに対して、r-MNL モデルでは相対性効用の概念を導入するため、選択階層を分けずに選択肢間の類似性を考慮することができる。したがって、階層化の困難な選択現象を簡単に表現することができる。

(f) 選択肢属性値の個人別パラメータを推定できる

これまで、非集計アプローチでは個人データをそのままモデルの推定に用いてきているが、選択肢属性値のパラメータ推定値がセグメントをしない限り母集団を通じて同じであり、嗜好の異質性を反映していない。これに対して、r-MNL モデルでは相対重要性パラメータと確定項の差分との積で効用を定義するため、例えば、相対重要性パラメータに個人属性を、確定項の差分に選択肢属性値を取り入れることにより、選択肢属性に関する個人別のパラメータ推定値を得ることができる。

4. r-RP/SP 融合モデルの構築

本節では、前述した相対性効用モデル (r-MNL) の特徴を活用し、新たな SP パネルモデルを提案する。新しいモデルを説明する前に、まず、既存の SP モデルを簡単にレビューする。

(1) 既存 SP モデルのレビュー

SP データは仮想の状況を想定した調査結果であるがゆえに、RP 調査より多くのバイアスが含まれる。そして、SP データを用いて現存しない選択肢を予測する場合、過大に推定されることが多くの研究により実証されている。Morikawa¹⁶⁾ の RP/SP 融合モデルはこのような SP バイアスを修正する代表的なモデリング手法である。

RP/SP 融合モデルは仮想条件下における SP バイアスが

実行動 (RP) を無視したことから生じると主張する。このため、交通機関選択をモデリングする段階において RP 情報を導入し、RP データと SP データから導き出された時間価値が同じであるという条件を加えることによって SP バイアスを修正する。

Morikawa の RP/SP 融合モデルに対して、Zhang らは今まで区別せずに将来予測に利用されてきた各交通機関の定数項を個人の嗜好項と非観測要因に起因する回答バイアス項 (SP バイアス項) に分けることを提案した¹⁷⁾。嗜好項の明確な分離によって RP/SP モデルに存在する系列相関にも対処できると考えられる。

(2) 相対性効用にに基づくモデリングの留意点

式 (9) と (10) の相対性効用に基けば、SP の時間的変化は選択肢属性パラメータ値の変化と選択肢の相対重要性パラメータ値の変化に分けられると解釈できる。前者については本研究のような少ない時点のパネルデータでは表現が難しいため、ここでは後者のみについて検討する。モデルの構築にあたって、以下のいくつかの事項について明らかにする必要がある。

(a) 従来の選択モデルにおける定数項の役割

従来の選択モデルでは、モデルの推定分担率と実績分担率を一致させるように推定されるので、モデルの現況再現性を高めるために通常、定数項を導入する。この定数項はモデルに取り入れられた説明変数以外すべての要因の影響を含めるものである。もし選択肢別に異なる定数項が導入されれば、それらが各選択肢の相対重要性を表現するとも解釈できそうであるが、相対重要性の定義からすると、この定数項が説明変数と相関してしまい、統計上の観点から問題となる。つまり、相対重要性パラメータは個人の選択肢に関する選好 (効用) への重み付けを表すもので、そもそも選択肢の属性との線形結合で表現できるものではない。

(b) 選択肢属性以外の影響要因の取り入れ方

利用者が交通機関を選ぶ際に、交通機関の属性 (所要時間や費用など)、利用者の属性 (性別や年齢などの客観的属性及び嗜好などの主観的属性) 及び外的要因 (他人の影響など) が影響すると考えられる。

個人の時間的・金銭的制約のもとで効用を最大化することを考えると、交通機関の所要時間や費用といった属性が効用関数のなかに取り入れられることは理論的に保証されている。しかし、個人属性などの影響については経験的に、性別などの個人属性によるセグメント手法や、それらを共通変数としてモデルの中に取り入れる方法で考慮されてきている。

第3章 (4) で記述されたように、r-MNL モデルでは、選択行動に関する文脈依存性を選択肢の類似性とそれ以外の文脈依存性に分けている。つまり、選択肢間の属性の

影響を類似性として、その他の要因の影響を選択肢の類似性以外の文脈依存性として表現している。言い換えると、個人属性を含む選択肢属性以外の要因が相対重要性に影響すると主張する。このような観点からみると、選択肢属性との線形結合で個人属性などを効用関数のなかで取り入れると統計的に重共線性が生じてしまう。これに対して、個人属性などを相対重要性パラメータの説明要因として導入することで、このような統計上の不都合を回避することができる。

(c) 選択肢の属性と相対重要性パラメータの関係

相対重要性パラメータは選択過程における個人の各選択肢に置く重みを表すため、その大きさが当然選択肢属性から影響を受ける。例えば、所要時間と費用のみをもとに自動車と公共交通機関の選択を考える場合、利用者は公共交通機関に大きな重みを置いて、運行頻度や乗り換えなどを考慮に入ると、公共交通機関に置く重みは下がるであろう。つまり、モデルの中に取り入れる選択肢の属性によって相対重要性パラメータの推定値が変わる可能性がある。

(3) r-RP/SP 融合モデルの構築

式 (8) を RP・SP データ別に以下のように書き換える。

$$u_{ij,t}^{RP} = \pi_j^{RP} + v_{ij,t}^{RP} + \varepsilon_{ij,t}^{RP} \quad (12)$$

$$u_{ij,t}^{SP} = \pi_j^{SP} + v_{ij,t}^{SP} + \varepsilon_{ij,t}^{SP} \quad (13)$$

$$v_{ij,t}^{RP} = \sum_h \beta_{jh,t} X_{ijh,t}^{RP} + \sum_g \gamma_{jg,t} W_{ijg,t}^{RP} \quad (14)$$

$$v_{ij,t}^{SP} = \sum_h \beta_{jh,t} X_{ijh,t}^{SP} + \sum_k \phi_{jk,t} Z_{ijk,t}^{SP} \quad (15)$$

ここで、 π_j^{RP} と π_j^{SP} は定数項、 $v_{ij,t}^{RP}$ と $v_{ij,t}^{SP}$ は定数項を含まない確定項、 $X_{ijh,t}^{RP}$ と $X_{ijh,t}^{SP}$ は RP と SP データの共通説明変数、 $W_{ijg,t}^{RP}$ と $Z_{ijk,t}^{SP}$ はそれぞれ RP、SP データの固有説明変数、 $\beta_{jh,t}$ 、 $\gamma_{jg,t}$ と $\phi_{jk,t}$ はパラメータである。

SP 誤差項 $\varepsilon_{ij,t}^{SP}$ と RP 誤差項 $\varepsilon_{ij,t}^{RP}$ のばらつき (分散) は異なるため、Morikawa¹⁸⁾ は以下のようなスケールパラメータ μ を導入した。

$$Var(\varepsilon_{ij,t}^{RP}) = \mu Var(\varepsilon_{ij,t}^{SP}) \quad (16)$$

そして、式 (12) と (13) の定数項 π_j^{RP} と π_j^{SP} を嗜好項と非観測要因に起因する回答バイアス項 (SP バイアス項) に分け、既存と新規の選択肢の効用をそれぞれ以下のように再定義する。

① 既存選択肢

$$u_{ij,t}^{RP} = \tau_j + v_{ij,t}^{RP} + \varepsilon_{ij,t}^{RP} \quad (17)$$

$$u_{ij,t}^{SP} = \tau_j + \phi_j^{SP} + v_{ij,t}^{SP} + \varepsilon_{ij,t}^{SP} \quad (18)$$

② 新規選択肢

$$u_{ij,t}^{SP} = \psi_j^{SP} + v_{ij,t}^{SP} + \varepsilon_{ij,t}^{SP} \quad (19)$$

ここで、 τ_j は既存選択肢の嗜好項、 ϕ_j^{SP} は式 (12) と (13) の定数項 π_j^{SP} から分離してきた既存選択肢の SP バイアス項、 ψ_j^{SP} は新規選択肢の定数項である。

さらに、本章の (2) で論述した点を反映し、以下のように相対性効用を活用した新たな RP/SP 融合モデル (r-RP/SP 融合モデルと略す) を提案する。

$$P_i = \prod_t \left\{ \frac{\left(\frac{\exp(\mu w_{i0,t}^{SP})}{\sum_{j_0} \exp(\mu w_{ij_0,t}^{SP})} \right)^{y_{i0,t}^{SP}}}{\prod_j \left[\left(\frac{\exp(w_{ij,t}^{RP})}{\sum_j \exp(w_{ij,t}^{RP})} \right)^{y_{ij,t}^{RP}} \left(\frac{\exp(\mu w_{ij,t}^{SP})}{\sum_j \exp(\mu w_{ij,t}^{SP})} \right)^{y_{ij,t}^{SP}} \right]} \right\} \quad (20)$$

$$w_{ij,t}^{RP} = r_{j,t}^{RP} \sum_{j' \neq j} ((\tau_j + v_{ij,t}^{RP}) - (\tau_{j'} + v_{ij',t}^{RP})) \quad (21)$$

$$w_{ij,t}^{SP} = r_{j,t}^{SP} \sum_{j' \neq j} \left((\tau_j + \phi_j^{SP} + v_{ij,t}^{SP}) - (\tau_{j'} + \phi_{j'}^{SP} + v_{ij',t}^{SP}) \right) \quad (22)$$

$$w_{i0,t}^{SP} = r_{j_0,t}^{SP} \sum_{j' \neq j_0} ((\psi_{j_0}^{SP} + v_{i0,t}^{SP}) - (\psi_{j'}^{SP} + v_{ij',t}^{SP})) \quad (23)$$

ここで、 j_0 は新規選択肢、 r は相対重要性パラメータである。

第 3 章 (4) で記述したように、相対重要性パラメータに関する符号制約が理論的にない。しかし、本研究では SP パネルデータにおける相対重要性パラメータの時間的変化の把握が目的の 1 つであり、相対重要性パラメータの解釈を容易にするため、以下のような制約条件をつける。

$$r_{j,t}^{SP} \geq 0 \text{ and } \sum_j r_{j,t}^{SP} = 1 \quad (24)$$

以上の条件を満たすため、SP データの相対重要性パラメータを個人属性の関数として以下のように定義する。

$$r_{a_0,t}^{SP} = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq a_0} \exp\{\sum_k (\beta_{jk} X_{ijk,t})\}} \quad (25)$$

$$r_{j,t}^{SP} = \frac{\exp\{\sum_k (\beta_{jk} X_{ijk,t})\}}{1 + \sum_{j \neq a_0} \exp\{\sum_k (\beta_{jk} X_{ijk,t})\}} \quad (26)$$

ここで、 a_0 は SP の相対重要性パラメータを推定するための基準選択肢であり、推定に際してその説明変数パラメータ値のすべてを 0 に固定する。なお、どの選択肢を基準選択肢として選んでも構わない。

また、本研究では RP データの時間的変化を主な分析対

象ではないため、RP の相対重要性パラメータについては式 (25) と (26) のような式を仮定せず、そのパラメータを直接に推定することにする。ただし、推定に際して、1 つの RP 基準選択肢の相対重要性パラメータを 1 に固定する必要がある。

5. モデルの推定及び考察

(1) 使用する SP パネルデータの概要

広島市新交通システム開業後における通勤通学者の交通機関選択行動の予測を目的に、1987 年から 90、93、94 年にかけて計 4 時点にわたって自家用車 (CAR)、バス (BUS) と新交通システム (NTS) を対象に SP パネル調査が実施された。合わせて、自家用車とバスの利用実態 (RP) についても調査された。結果的に、各時点においてそれぞれ 226 パネルサンプルが得られた¹⁷⁾。なお、SP 実験において提示された交通機関のサービス水準として共通の所要時間と費用以外に、BUS と NTS については待ち時間を、NTS については駅までのアクセス時間を取り上げた。

(2) モデルの推定及び考察

相対重要性パラメータに与える個人属性、選択肢属性及び SP バイアスの影響を分析するため、表 1 に示す 4 種類のモデルを推定した。

表 1 対象モデル

モデル	嗜好と SP バイアスの分離の有無	過去車利用経験の有無	待ち・アクセス時間の有無
Model-1	あり	なし	なし
Model-2	あり	なし	あり
Model-3	あり	あり	なし
Model-4	あり	あり	あり

嗜好と SP バイアスを分離することの有効性についてはすでに実証された¹⁷⁾ため、ここでも両者を明示的に分離する。また、過去における車の利用経験は Tversky and Simonson³⁾がいうバックグラウンド文脈に当たる。その有無による選択結果への影響をみるため、あり\なしの 2 パターンを想定した。待ち時間とアクセス時間の有無については選択肢の属性と相対重要性パラメータとの関係を見るため、同様なあり\なしの 2 パターンを想定した。

(a) モデルの精度について

推定結果を表 2 に示す。同表をみると、どのモデルも精度 (自由度調整済み尤度比) が良好である。

また、相対重要性パラメータを導入しない従来のモデルの最終対数尤度は、モデル 1 と 3 に対応したのが -1367.90、モデル 2 と 4 に対応したのが -1366.14 となっている (モデルの推定結果の詳細を紙面上の制限で割愛)。従来モデルの対数尤度関数値とモデル 1~4 のそれらを用いて χ^2 検定を行った結果、 χ^2 値はそれぞれ 72.84、34.42、131.86 及び 93.62 であり、自由度 16 (SP 相対

表2 r-RP/SP融合モデルの推定結果

説明変数	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
交通機関サービス水準				
所要時間 (分) (共通変数)	-0.071*	-0.078*	-0.050*	-0.065*
所要費用 (円) (共通変数)	-0.008*	-0.008*	-0.007*	-0.007*
待ち時間 (分) (SP 固有: BUS, NTS)		-0.1196		-0.237*
アクセス時間 (分) (SP 固有: NTS)		-0.0620		-0.0875
SP バイアス項+嗜好項 (NTS)	-1.618*	2.350*	7.824*	7.300*
SP バイアス項 (BUS)	-4.029*	3.462*	-0.2900	9.038*
嗜好項 (BUS)	0.417*	0.391*	0.353*	0.2308
スケールパラメータ	0.187*	0.179*	0.107*	0.120*
相対重要性パラメータ				
SP (BUS)				
定数項	-5.710*	0.8379	-0.1298	1.8381
性別 (男性 1, 女性 0)	-2.849*	3.492*	-4.312*	-1.4961
年齢	0.256*	-0.117*	0.188*	-0.1072
職業の有無 (あり 1, なし 0)	-2.192*	-0.1274	-4.883*	1.4194
世帯人数 (人)	-0.9407	0.1322	-0.1576	-0.6403
過去の自動車利用経験 (あり 1, なし 0)			-5.263*	3.035*
SP (NTS)				
定数項	4.172*	0.0976	-1.5260	3.090*
性別 (男性 1, 女性 0)	4.584*	-0.3368	-0.6765	-3.172*
年齢	-0.203*	0.0459	-0.0096	0.122*
職業の有無 (あり 1, なし 0)	8.437*	1.5711	2.768*	0.2880
世帯人数 (人)	-0.4267	0.2766	0.2228	-1.024*
過去の自動車利用経験 (あり 1, なし 0)			-9.094*	-5.730*
RP (BUS)				
1994 年	-0.542*	-0.540*	-0.466*	-0.530*
1993 年	-0.464*	-0.450*	-0.340*	-0.400*
1990 年	-0.560*	-0.589*	-0.467*	-0.551*
1987 年	-0.358*	-0.413*	-0.314*	-0.269*
初期対数尤度	-1619.80	-1619.80	-1619.80	-1619.80
最終対数尤度	-1331.48	-1348.93	-1301.97	-1319.33
自由度調整済み尤度比	0.1688	0.1570	0.1863	0.1764
サンプル数	904	904	904	904

*: 95%で有意

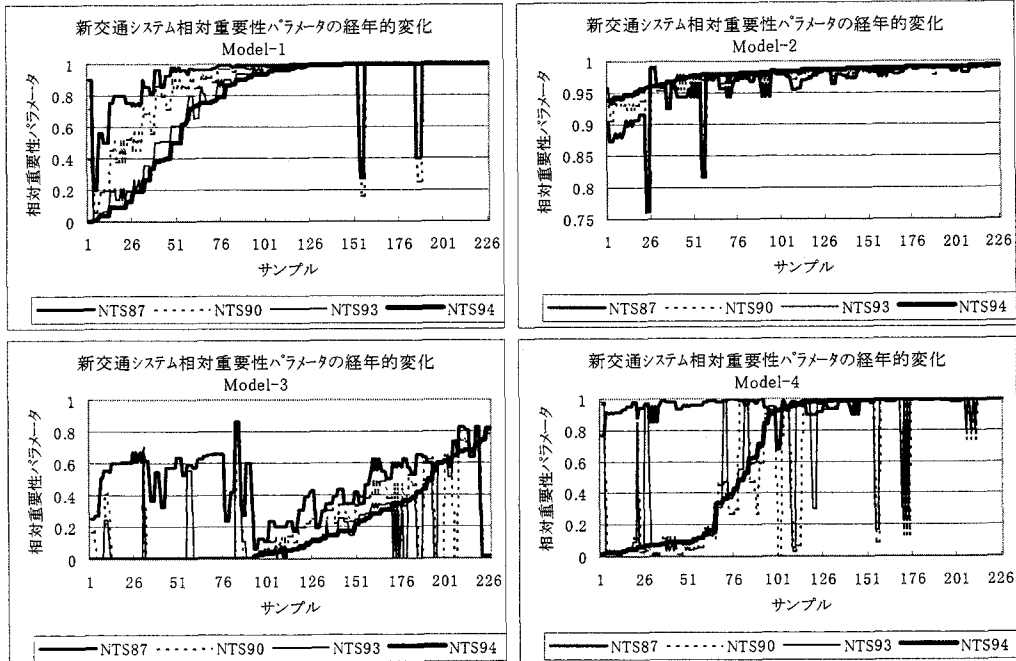


図2 新交通システム (NTS) の相対重要性パラメータの経年的変化

重要性関連パラメータについて BUS と NTS のそれぞれ 6 個、RP 関連パラメータの 4 個) の限界値 26.30 (95% の有意水準) を超えた。このことは相対性効用を導入することの有効性を支持する。

過去 (t-1 時点) における車の利用経験という文脈効果を取り入れると、Model-3 の精度は Model-1 と比べて 0.1688 から 0.1863 に約 10% 向上し、Model-4 の精度は Model-2 と比べて 0.1570 から 0.1764 に約 12% 向上した。

また、待ち時間とアクセス時間を取り入れた Model-2 と Model-4 は取り入れていない Model-1 と Model-3 をそれぞれ内含しているが、モデルの精度が落ちた。各モデルの推定に際して同一の収束基準を採用しており、モデル精度の低下が局所解に陥っているためであると考えられる。この点については、収束基準をさらに厳しくして推定を再度してみたが、改善が見られなかった。これは SP 相対重要性パラメータを個人属性などの非線形関数として定義したことにより、モデルの非線形性を増すことに起因すると思われる。今後、この点を理論的に追及したい。

(b) 相対重要性パラメータについて

RP データについて、CAR の相対重要性パラメータを 1 に固定して BUS の相対重要性パラメータを推定した。その結果、モデルの違いによる変化が小さく、同一モデルにおいても時点間での順位付けに変化もない。

一方、SP データについて、RP と同じように CAR の相対重要性パラメータを固定する。推定結果をみると、特にモデル 1 と 3 において BUS と NTS の相対重要性パラメータを説明する個人属性パラメータ値の多くが統計的に有意である。これは個人属性を選択肢の相対重要性の説明要因として導入したことが有効であると言える。

新交通システムの相対重要性パラメータの経年的な変化を図 2 に示す。Model-1 と Model-3、Model-2 と Model-4 を比較してみると、過去における車の利用経験を取り入れたモデルは明らかに取り入れないモデルより相対重要性パラメータの時間的変動が大きい。また、過去における車の利用経験及び待ち時間・アクセス時間の影響とともに考慮した Model-4 は、他のモデルより相対重要性パラメータの経年的変化が明らかに大きい。これは効用の説明要因の違いにより相対重要性パラメータが敏感に反応することの現れであると考えられる。

(c) その他の推定結果に関する考察

SP バイアス項と嗜好項はほとんどのモデルにおいて統計的に有意となっており、両者を分離したことの有効性を再確認できた。

交通サービス水準について、共通変数の所要時間と費用はどのモデルにおいても論理的に正しい符号 (マイナス) を得ており、しかも統計的に有意になっている。しかし、SP 固有のサービス水準については、符号はマイナ

スになっているが、ほとんどの推定値が統計的に有意とはならず、待ち時間のみが Model-4 では有意であった。

また、スケールパラメータについて、どのモデルにおいても統計的に有意な値を得ており、しかも 1 より小さいため、SP データのばらつきが RP より大きいことを意味する。

6. おわりに

本研究では SP の時間的变化について文脈依存性が影響していることを心理学的な観点から指摘した。また、多様な文脈依存性が存在するため、それを考慮できる統一した手法がないことを既存研究のレビューにより明らかにした上で、文脈依存性を考慮した研究の重要性を示唆した。

このような問題認識に立ち、本研究では文脈依存性を考慮できる代替的な手法として、相対性効用の概念に基づくモデリング手法¹⁾の適用を提案した。以下のような結論を得ることができた。

(1) 相対性効用に基づき、SP の時間的变化を考慮した r-RP/SP 融合モデルを構築した。同モデルで導入した相対性効用は、文脈依存性を選択肢間の属性の影響 (類似性) を表す部分と、個人属性を含む他の要因の影響を表す部分から構成される。

(2) 相対性効用に基づく文脈依存性を考慮することの有効性を確認できた。

(3) SP データにおける相対重要性パラメータが個人単位でみると時間的に変化し、個人属性が大きく影響している。

(4) 文脈依存性の考慮がモデルの精度及び相対重要性パラメータの推定値に影響している。

(5) 取り入れる選択肢の属性によって相対重要性パラメータが変化する。

(6) モデルに取り入れる影響要因の数によって、相対重要性パラメータにおける個人間・時点間のばらつきが大きい。

今後の研究課題として以下のように挙げられる。

(1) 相対重要性パラメータの解釈については、使用データでは関連選択行動情報を収集していないため、行動的な解釈を今後明確にする必要がある。

(2) 相対重要性の説明要因の取り入れ方について、今回ではロジットタイプの関数で個人属性などの影響を表現したが、これに起因するモデルの推定問題を理論的に解明すべき。

(3) 第 3 章 (5) で挙げた r-MNL モデルの特徴を活かした分析を進める必要がある。

(4) SP の時間的な変化特性、効用の時間的相対性に着目し、実用性の高い動的 SP モデルを開発すべき。

参考文献

- 1) 張峻屹・杉恵頼寧・藤原章正: r-MNL モデルと r-NL モデルに基づくトリップ前交通情報提供効果の計測, 第 21 回交通工学研究発表会論文集, 289-292, 2001.
- 2) McFadden, D.: Disaggregate behavioral travel demand's RUM side: A 30-year retrospective, IATBR 2001, CD-ROM.
- 3) Tversky, A. and Simonson, I.: Context-dependent preferences, Management Science 39 (10), 1179-1189, 1993.
- 4) Oppewal, H. and Timmermans, H.: Context effects and decomposition choice modeling, Papers in Regional Science, The Journal of the Regional Science Association International 70 (2), 113-131, 1991.
- 5) McFadden, D., Train, K. and Tye, W.B.: An application of diagnostics tests for the independence from irrelevant alternatives property of the multinomial logit model, Transportation Research Record 637, 39-46, 1977.
- 6) Anderson, D., Borgeers, A., Ettema, D. and Timmermans, H.: Estimating availability effects in travel choice modeling: A stated choice approach, Transportation Research Record, 1357, 51-65, 1996.
- 7) Kahneman, D., Knetsch, J.L. and Thaler, R.: The endowment effect, loss aversion, and the status quo bias, Journal of Economic Perspectives 5, 193-201, 1991.
- 8) Tversky, A. and Kahneman, D.: Loss aversion in riskless choice: a reference-dependent model, Quarterly Journal of Economics 107, 1039-1061, 1991.
- 9) McFadden, D.: Rationality for economists? Journal of Risk and Uncertainty, Special Issue on Preference Elicitation (forthcoming paper, downloaded from his homepage).
- 10) Duesenberry, J.S.: Income, saving and the Theory of Consumer Behavior. Cambridge, Harvard University Press, 1949.
- 11) Marx, K.: Lohnarbeit und Kapital. Berlin, Karl Kautsky, 1930.
- 12) Stadt, H., Kapteyn, A. and Geer, S.: The relativity of utility: evidence from panel data, The Review of Economics and Statistics LXVII (2), 179-187, 1985.
- 13) Coleman, J.S.: The Mathematics of Collective Action, Aldine Publishing Company, Chicago, Chapter 3, 1973.
- 14) Gupta, S.: Modeling integrative, multiple issue bargaining, Management Science, Vol. 35 (7), 788-806, 1989.
- 15) Horowitz, J.L. and Louviere, J.J.: What is the role of consideration sets in choice modeling? International Journal of Research in Marketing, 12, 39-54, 1995.
- 16) Morikawa, T.: Incorporating stated preference data in travel demand analysis, Ph.D dissertation, Department of Civil Engineering, MIT, 1989.
- 17) Zhang, J., Sugie, Y. and Fujiwara, A.: A mode choice model separating taste variation and stated preference reporting bias, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4 (3), 23-38, 2001.

2001.

- 18) Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R.: Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, The MIT Press, pp. 84-87, 1987.

付録 1: 相対性効用定理の証明

個人が選択肢集合にあるすべての選択肢 (J 個) を同一視することは, 相対重要性パラメータが選択肢によらず一定であることと同等である. ここで, すべての相対重要性パラメータを 1 と固定する. すると, 相対性効用関数を以下のように再定義することができる.

$$U_{ij,t} = \sum_{j' \neq j} (u_{ij,t} - u_{ij',t}) \quad (27)$$

相対性効用の最大化は,

$$\sum_{j' \neq j} (u_{ij,t} - u_{ij',t}) \geq \sum_{k' \neq k} (u_{ik,t} - u_{ik',t}), \forall k \neq j \quad (28)$$

を意味する. 上式の両側に対して, 以下のような式展開を行う.

$$\begin{aligned} \sum_{j' \neq j} (u_{ij,t}) - \sum_{j' \neq j} (u_{ij',t}) \\ \geq \sum_{k' \neq k} (u_{ik,t}) - \sum_{k' \neq k} (u_{ik',t}) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (J-1)u_{ij,t} - \sum_{j' \neq j} (u_{ij',t}) \\ \geq (J-1)u_{ik,t} - \sum_{k' \neq k} (u_{ik',t}) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\therefore \sum_j (u_{ij,t}) = \sum_k (u_{ik,t}) \quad (31)$$

$$\therefore Ju_{ij,t} \geq Ju_{ik,t} \Rightarrow u_{ij,t} \geq u_{ik,t} \quad (32)$$

このように, $U_{ij,t} \geq U_{ik,t}$ は $u_{ij,t} \geq u_{ik,t}$ と同等である. よって, すべての選択肢の相対重要性パラメータが同じであれば, 相対性効用最大化は従来の効用最大化に帰着する.

付録 2: 相対重要性パラメータの解の唯一性

式 (10) を以下のように書き換える. なお, 式の記述を簡潔にするため, 添字 t を省いた. そして, r_{ij} を r_j とする.

$$V_{ij} = r_j \bar{V}_{ij} = r_j \sum_{j' \neq j} (v_{ij} - v_{ij'}) \quad (10')$$

式 (11) の対数尤度関数を以下のように定義する.

$$\begin{aligned} L &= \log \left\{ \prod_i \prod_j (P_{ij})^{\delta_{ij}} \right\} \\ &= \sum_i \sum_j \delta_{ij} \log (P_{ij}) \\ &= \sum_i \left\{ \sum_j (\delta_{ij} r_j V_{ij}) - \log \sum_k \exp \{ r_k \bar{V}_{ik} \} \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

したがって, 式 (33) の最大化を保証するため, まず, 相対重要性パラメータ r_j に関する 1 回偏微分は以下の式を満たす必要がある.

$$\frac{\partial L}{\partial r_j} = \sum_i \left\{ \delta_{ij} \tilde{V}_{ij} - \frac{\exp(r_j \tilde{V}_{ij})}{\sum_k \exp(r_k \tilde{V}_{ik})} \tilde{V}_{ij} \right\} = 0 \quad (34)$$

明らかに、相対重要性パラメータ r_j の値に関係なく、以下の式が成り立つ。

$$\sum_i \{\delta_{ij}\} = 1$$

$$\sum_i \left\{ \frac{\exp(r_j \tilde{V}_{ij})}{\sum_k \exp(r_k \tilde{V}_{ik})} \right\} = \sum_i \{P_{ij}\} = 1$$

したがって、式(34)は成立する。

一方、式(33)に関する2回偏微分は以下ようになる。

$$\frac{\partial^2 L}{\partial r_j \partial r_k} = - \sum_i \tilde{V}_{ij} \tilde{V}_{ik} P_{ij} P_{ik} \quad (35)$$

パラメータ r_j と r_k の唯一性を保証するための充分条件は、式(34)で構成される行列が半負値行列になるとのことである。

これを証明するため、式(35)を用いて、以下の要素をもつ $N \times K$ の行列 A を定義する。

$$a_{nk} = (P_{ij} P_{ik})^{1/2} \tilde{V}_{ik} \quad (36)$$

A のすべての要素は実数であるため、 A^*A は半正値行列であることが分かる（例えば、従来のロジットモデルのパラメータ推定値の唯一性証明については、Ben-Akiva and Lerman¹⁸⁾ は同様な証明手法を用いた）。

明らかに、式(35)で構成される行列は $-A^*A$ にほかならない。よって、その行列は半負値行列である。

しかし、すべてのパラメータ r_j が唯一に推定されるかどうかについては、説明変数パラメータとの関係を明らかにする必要がある。説明を簡単にするため、従来のロジットモデルの効用関数確定項に相対重要性パラメータを導入することを考える。そして、式(11)は以下のように書き換えられる。

$$P_{ij} = \frac{\exp(r_j v_{ij})}{\sum_{j'} \exp(r_{j'} v_{ij'})} \quad (37)$$

$$v_{ij} = \sum_k \beta_k x_{ij,k} \quad (38)$$

ここで、 $x_{ij,k} \cdot \beta_k$ はそれぞれ従来の効用関数の k 番目の説明変数とそのパラメータである。

式(38)を用いて、式(37)を以下のように変形できる。

$$P_{ij} = \frac{1}{1 + \sum_{j'} \exp(\sum_k (r_{j'} - r_j) \beta_k x_{ij,k})} \quad (39)$$

このように、相対重要性パラメータは単独の r_j ではなく、 $r_{j'} - r_j$ として推定されることとなる。よって、 J 個ではなく、 $J-1$ 個の相対重要性パラメータは唯一に推定されることが分かる。

このことは、式(11)の場合についても同様に言えることである。

相対性効用最大化理論に基づく交通機関SPパネルデータの分析

張 峻屹・杉恵 頼寧・藤原 章正

本研究ではしばしば問題視されるSPの時間的変化に文脈依存性が影響することを心理学的な観点から指摘した。そして、選択肢間の類似性とそれ以外の文脈依存性（ここでは過去の選択結果や年齢など個人属性の影響を指す）から構成される相対性効用に基づき、SPの時間的変化を考慮できる r-RP/SP 融合モデルを提案した。その結果、(1) 相対性効用に基づく文脈依存性を考慮することの有効性、(2) 文脈依存性はSPの相対重要性パラメータの時間的変化及びモデルの精度に影響すること、(3) 説明変数の数が増えると、相対重要性パラメータにおける個人間及び時点間のばらつきが大きいことなど、を明らかにした。

Analysis of SP Panel Data for Mode Choice based on Relative Utility Maximization Principle

By Junyi Zhang · Yoriyasu Sugie · Akimasa Fujiwara

We argue that context dependence (CD) affects the temporal change of SP data. To reflect this, we propose a new mode choice (r-RP/SP) model based on relative utility function, which consists of the term of alternative similarity and the term of other context-dependent factors like previous choice results. Throughout an empirical analysis, it is confirmed that, (1) the way of using relative utility to incorporate the influence of the CD is effective, (2) the parameters of relative importance (RI) are variant temporally and affected by the CD, (3) as the number of explanatory variables increases, the parameters of RI fluctuate largely among individuals and over time.