

[特集論文]

観測・被観測関係と行動モデル

上田孝行¹・福本潤也²¹正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)²正会員 工修 東京大学助手 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

本稿では、行動モデル研究に関して筆者らが持っている問題意識を、『観測と被観測の関係』に着目しながら話題提供することを意図している。取り上げる話題は次の三点である。第一に、既往の代表的なモデル作成方法を、観測と被観測の関係を捉える一つの有力なアプローチである逆問題の考え方に依拠して整理する。第二に、観測のための統計情報の利用可能性が広がった場合に、モデルを用いた影響予測や政策評価の信頼性・妥当性の向上を通じて生じる情報価値を、社会的厚生のため把握する問題について議論する。第三に、被観測の立場にある主体の選好を行動モデルを通して把握し、それに基づいて政策評価を行う場合に生じる論理的・倫理的問題について議論する。

Key Words : behavior modeling, inverse problem, value of information, value judgment based on revealed preference

1. はじめに

本稿では、行動モデル研究に関して筆者らが持っている問題意識を、『観測と被観測の関係』に着目しながら話題提供することを意図している。以下、獲得された統計情報をもとにモデルを作成・同定し、定量的に現象を記述しようとする行為を『観測』と呼び、観測の対象とされる家計・企業などの主体の行動や社会経済システムの挙動を『被観測』と呼ぶ。また、観測を行う者を『観測者』と呼ぶ。

上述の定義に従えば、土木計画学における行動モデルの作成・同定は観測の行為に他ならない。ただし、現象の記述のみを目的とした観測の行為であるとは限らない。土木計画学における行動モデル研究が政策評価に資することを意図している点において、社会的意思決定の結果にまで影響を及ぼす場合がありうる。また、モデルを同定する際には受動的に既存の統計調査の結果を利用するだけでなく、その前段における適切な統計調査の設計といった行為にまで関わる場合がありうる。土木計画学における行動モデル研究の現状や課題は、単にモデル作成・同定の場面だけでなく、統計調査設計の場面から社会的意思決定の場面まで含めた幅広い枠組みの中で捉えられることが望ましい、と筆者らは考える。

本稿では、モデル作成・同定の場面における『観測と被観測の関係』が、社会的意思決定や統計調査設計と密接に関わってくる点に注目し、(1)統計情報の利用可能性と行動モデルの作成可能性・判定可能性の関係、(2)行動モデルが政策評価に利用される場合の統計情報の価値、(3)行動モデルを通じて把握される被観測者の選好を情動的基礎とした政策評価の限界、の三点を話題として取り上げて議論する。以下、2. で

は、モデルの作成から政策評価への活用までの一般的な流れを整理し、3.以降で取り上げる話題の位置づけを確認する。3.から5.の各章では、上述の三つの話題を一つずつ取り上げて考察する。

2. モデル作成/活用の流れと本稿の位置づけ

(1) モデル作成/活用の標準的な流れ

モデル作成・同定の場面における観測と被観測の関係が、モデル作成から活用までの流れにいかなる影響を及ぼすかを把握するために、土木計画学における行動モデル作成/活用の標準的な流れを次のように整理する。

- Step 1 行動主体の選好および選択行動の定式化
- Step 2 主体間相互作用の定式化
- Step 3 Step 1 と Step 2 で定式化された理論モデルを同定するためのモデルの定式化
- Step 4 Step 3 で定式化されたモデルを同定するための統計情報の収集
- Step 5 Step 4 の統計情報に基づく、Step 3 で定式化されたモデルの同定
- Step 6 政策代替案の影響の予測
- Step 7 政策代替案の評価

Step 1 は、効用最大化問題を定式化して需要関数を導出したり、ロジットモデルに代表される選択行動モデルの関数形を設定したりする作業である。Step 2 は、行動主体の選択を左右する主要因のいくつかを、行動主体間の相互作用の結果として内生的に決定されるメカニズムを定式化する作業である。経済モデルに

における価格均衡メカニズムや交通ネットワークモデルにおける混雑外部性による均衡メカニズムの定式化がこれに相当する。Step 3は、Step 1およびStep 2で定式化されたモデルを同定するための関係式を導出する作業である。統計学的推測手法を適用してモデルを同定するために、通常、Step 1やStep 2で導かれた関係式に誤差項を付加した統計モデルが作成される。Step 4は、Step 3で定式化されたモデルを同定するために必要な統計情報を収集する作業である。観測者が独自に統計調査を実施する場合もあるが、通常は既存の統計調査結果から収集される。後者の場合、利用可能な統計情報を所与としてStep 1からStep 3の作業が実施される場合が少なくない。Step 5は、Step 4で収集された統計情報に基づいて、Step 3で定式化されたモデルに含まれるパラメータを同定する作業である。統計学的推測手法が一般に利用されるが、キャリブレーションなど、その他の手法が利用される場合もある。Step 6は、Step 5までの作業で得られたモデルを用いて、政策の影響を定量的に予測する作業である。Step 7は、Step 6で定量的に推定された政策の影響と政策評価のための社会的価値規範を照らし合わせて、政策の採否あるいは優先度決定のための評価指標を算定する作業である。費用便益分析が代表例である。

筆者らは、Step 1の作業で経済学における選好を考慮した行動モデルを念頭に置いているが、これを土木計画学の標準的行動モデルとして取り上げることに違和感を覚える読者もいるであろう。土木計画学では、主体の選好を明示的に取り上げずに交通需要量を予測する類の研究も多数行われてきた。ただし、1980年代後半の非集計行動モデルの普及を通じて、選好を考慮した経済学的な行動モデルが土木計画学に広く定着したのも事実である。また、費用便益分析などの政策評価を行うには、選好の明示的な考慮が不可欠である。以上の理由より、本稿では選好に基づく経済学的な行動モデルを標準的モデルとして取り上げて議論を進めたい。

さて、モデルの作成・同定という観測の行為は、基本的にStep 1からStep 5までの一連の作業に相当する。筆者らは、必ずしも個々の学術研究において、常にStep 1からStep 7までの全作業を完遂する必要があるとは考えない。ただし、モデルの作成・同定という観測の行為が、計画や政策についての社会的意思決定の結果にまで影響を及ぼす可能性があることは、観測者が認識しておく必要があると考えている。

なお、土木計画学に限らず行動モデル研究の多くでは、Step 1とStep 2の作業のうち、前者に研究の主たる関心があり、後者を必ずしも伴っていない。以下、Step 2の作業を明示的に伴わないモデルを行動モデル、明示的に伴ったモデルを社会経済システムモデルと呼び、区別したい。

(2) モデルの判定基準

経済学・経営学・心理学など様々な分野で、これまでも膨大な数の行動モデルが提案されてきた。モデルの優劣の判定の必要性はいうまでもない。様々なモデルの判定基準が用いられてきたが、なかでも、「前提条件や仮説の現実性」と「現況再現性」という2種類の基準が果たしてきた役割は大きいように見受けられる¹⁾。本稿では、前者をモデルの妥当性に関する判定基準、後者をモデルの信頼性に関する判定基準と呼びたい。以下、土木計画学のモデルや土木計画学研究者に馴染みの深い経済学のモデルを中心に、その妥当性や信頼性がいかに判定されてきたかを概観する。

a) 理論的な行動モデル・社会経済システムモデル

ミクロ経済学や応用ミクロ経済学における理論的研究では、Step 1からStep 7の作業のうち、Step 3からStep 5を除いた作業が行われるのが通常である。モデル同定の作業が行われなため、現況再現性に基づきモデルの信頼性を問うことはできない。モデルの妥当性は、標準的なミクロ経済学で前提とされる諸性質が満たされているかどうかといった、既往理論との整合性を基準に判定されているとみなせる。

経済学に代表される社会科学の歴史において、データが未整備で統計理論も十分に確立されていなかった時代には、観測者がモデルの妥当性を検討するには、自らの行動原理に照らして内省するしかなかった。その後、学界内外における論争を経て、多くの支持を得た理論が標準理論としての地位を獲得した。ミクロ経済学における行動モデルや社会経済システムモデルの理論的研究は、そのようなプロセスの上に成立した理論体系との整合性があるからこそ、定量的な判定がなされなくとも、その正当性を主張できるといえる。

b) 実証的な行動モデル

交通需要分析における非集計行動モデルに代表される実証的な行動モデル研究²⁾では、Step 2を除いたStep 1からStep 6もしくはStep 7までの作業が、通常行われる。モデルの信頼性の判定には、パラメータ推定作業の中で算出される尤度比などの統計学的基準や同定されたモデルに基づいた予測的中率などの現況再現性を表す指標が用いられる。モデルの妥当性については、ランダム効用最大化仮説を統計学的に検証する試みが一部で行われてはいるものの³⁾、必ずしも十分に検証されてこなかったように見受けられる。

家計の消費行動に関する実証的研究⁴⁾でも、Step 2を除いたStep 1からStep 6もしくはStep 7までの作業が行われる。モデルの信頼性は、非集計行動モデル研究と同様に判定される。一方、妥当性については、効用最大化行動から導出される需要関数が満足すべき対称性や凸性などの諸性質が同定されたモデルにおいて満たされているかどうかを統計学的に検定する作業がこれまで多数試みられてきた。既存研究の多くで効用最大化仮説を支持する帰無仮説が統計学的に棄却さ

れてきたため、その意義を巡っては様々な解釈がなされてきているが^{5),6)}、モデルの妥当性を定量的に検証する取組みが行われてきた点には注意しておきたい。

c) 実証的な社会経済システムモデル

4段階推定法に代表される伝統的な交通需要予測分析⁷⁾や伝統的なマクロ計量モデルを用いた分析⁸⁾では、Step 1 から Step 6 までの作業が行われるのが通常である。モデルの信頼性は、各段階あるいは個別方程式の現況再現性を通じて判定されることが多い。4段階全体あるいはモデル全体を通しての再現性のチェックも行われてはいるが、各段階あるいは個別方程式毎にパラメータが推定されることが多く、最終的な基準として十分に活用されているとはいえない。多段階構造・多変数の大規模モデルでは機械的に統計学的基準から判定することが困難であり、政策の影響予測において重要な変数の再現性についてのモデル作成者の判断に依存する部分が多い。モデルの妥当性については、4段階推定法やマクロ計量モデルが、ミクロ経済学における効用最大化仮説のような基本となる論理仮説を有していないため、首尾一貫した方法で検証されてこなかったようである。

応用一般均衡モデル⁹⁾では、Step 1 から Step 7 までの作業が行われる。Step 5 で統計学的推測手法でなく、基準時点でのデータセットを支持するパラメータを選択するキャリブレーションが一般に行われるため、現況再現性に基づいてモデルの信頼性を判定することは基本的に不可能である。分析の前提となっている各経済主体の最適行動仮説や価格均衡仮説などの妥当性についても統計学的手法を用いて定量的に検証されることはない。モデルの妥当性はもっぱら、既往理論との整合性に基づいて判断されている。一方、計量経済学的手法を用いてモデルを同定する応用一般均衡分析も一部の研究者によって行われている¹⁰⁾。ここでは現況再現性によるモデルの信頼性の判定や各経済主体の最適行動仮説の妥当性の定量的な検証が行われている。ただし、均衡仮説の妥当性についてはキャリブレーションを用いた応用一般均衡分析と同様、既往理論との整合性に基づいて判断されている。

(3) 基本モデル -議論の土台として-

(1) に示した行動モデルの作成/活用の流れを表現し、さらに3.以降で取り上げる論点を定式化した形で表現するために、ここでは式(1)-(3)に示される基本モデルを用意しておく¹¹⁾。

【行動モデル】

$$U: \mathbf{D}_{a_i} \times \mathbf{D}_{b_i} \times \mathbf{D}_{z_i} \mapsto \mathbf{R} \text{ s.th. } U(a_i, b_i, z_i) = U_i \quad (1. a)$$

$$V: \mathbf{D}_{b_i} \times \mathbf{D}_{z_i} \mapsto \mathbf{R} \text{ s.th. } V(b_i, z_i) = V_i \quad (1. b)$$

$$a_i: \mathbf{D}_{b_i} \times \mathbf{D}_{z_i} \mapsto \mathbf{D}_{a_i} \text{ s.th. } a_i(b_i, z_i) = a_i \quad (1. c)$$

$$z_i: \mathbf{D}_y \times \mathbf{D}_e \mapsto \mathbf{D}_{z_i} \text{ s.th. } z_i(y, e) = z_i \quad (1. d)$$

ここで、

$i \in \mathbf{I}$: 行動主体のラベルおよびその集合

U : 行動主体の直接効用を規定する写像

V : 行動主体の選択行動の結果として実現する間接効用を規定する写像

a_i : 行動主体が選択する行動を規定する写像

b_i : 行動主体の選好/個別属性を表すパラメータ

z_i : 行動主体を取り巻く環境を規定する写像

y : 社会経済システムの内生状態

e : 計画/政策によって変更しうる社会経済システムの外生要因

\mathbf{D}_A : 変数 A の定義域

【社会経済システムモデル】

$$s: \mathbf{D}_b \times \mathbf{D}_e \mapsto \mathbf{D}_y \text{ s.th. } s(b, e) = y \quad (2)$$

ここで、

s : 社会経済システムの内生状態を規定する写像

$$b = (b_i)_{i \in \mathbf{I}}$$

【社会的意思決定のための価値規範】

$$W: \mathbf{R}^{\mathbf{I}} \mapsto \mathbf{R} \text{ s.th. } W(V) = W \quad (3)$$

ここで、

W : 社会的意思決定のための評価指標の水準を規定する写像

$$V = (V_i)_{i \in \mathbf{I}}$$

ここで、観測者が式(1)と式(2)の全入力変数の値を観測可能で写像に関する全情報(関数形やパラメータ)を把握しており、写像に関する全計算を正確に計算可能であると仮定してみよう。さらに、式(3)の写像も把握しており、それを正確に計算可能であると仮定してみよう。前者は観測者が超人的な情報収集能力と処理能力を有していることを、後者は観測者がプラトンの哲人王であることを意味する。この時、(1)で示したモデル作成から活用までの全ての作業が一人の観測者によって完遂されることになる。

現実の観測者は、情報の収集能力と処理能力に限界を持つとともに、様々な個人の価値判断を尊重しなければならず、超人や哲人ではありえない。もちろん、観測者は詳細な統計調査を設計したり、精緻なモデルを定式化することで超人を目指すことは可能である。また、専門家の判断(各種の審議会など)と称して評価指標を作成することで、哲人を代行することもある範囲で可能である。しかしながら、これらの作業を通じても観測者が超人や哲人に到達することは明らかに不可能であるし、モデルのいたずらな詳細化が「原寸大の地図」を作ると同じ愚に至る危険性を、そして、一部の専門家の価値判断が独善に至る危険性を招くことすらありうる。行動モデルや社会経済システムモデルを作成・活用する場合、観測者が超人・哲人には決して

て成り得ないことを出発点として認識しておく必要があると筆者らは考える。ただし、超人・哲人の想定は、現実の観測者が置かれた環境を把握するうえでのベンチマークとしての役割を果たす点で意義がある。

(4) 本稿で取り上げる話題の位置づけ

行動モデルや社会経済システムモデルが政策評価に利用される場合、モデルが満足すべき要件として、現実社会を適確に表現・近似していることが、まずは思い浮かべられるであろう。しかしながら、(2)でも見た通り、これまで広く利用されてきたモデルであっても、前提とする仮説が定量的に検証されていなかったり、モデル全体での現況再現性が十分に確認されていなかったりして、不完全にしかその妥当性や信頼性が判定されてこなかった。無論、これらの事実からこれまでのモデル研究の成果が社会資本整備の影響予測や政策評価を行う上で無意味なものであったと結論づけるわけにはいきまい。むしろ、超人・哲人になりえない現実の観測者が置かれている状況の困難さを示している、と筆者らは考える。3.以降では、観測者が超人・哲人になりえないとの立場から、モデル作成・同定の場面における『観測と被観測の関係』を軸に、以下の三点を話題として取り上げる。

a) 観測・被観測関係とモデル作成

観測者が超人になりえない理由の一つとして、モデルを作成・同定する際に十分な統計情報を利用できない点が指摘できる。利用可能な統計情報を所与として Step 1 から Step 3 のモデル定式化の作業を行う場合、統計情報の利用可能性によってモデルの作成可能性や判定可能性が制約される。3.では、利用可能な統計情報に基づいてモデルを作成・同定する観測の行為を逆問題としてとらえ、観測と被観測の関係がモデルの作成可能性や判定可能性に及ぼす影響を整理する。

b) 政策評価の妥当性・信頼性と情報価値

交通需要分析における非集計行動モデル研究のように、観測者自身が統計調査を設計することで統計情報の利用可能性を変更できる場合がある。適切な統計調査が設計された場合、政策評価の信頼性が向上したり、モデルの作成可能性や判定可能性の拡大を通じて、より適切なモデルが利用されることが期待される。一方、統計調査の設計や実施に少なからぬ費用がかかるのも事実である。4.では、ベイズ意思決定理論に従いながら、統計情報の価値と統計調査の費用を比較検討しうる枠組みの基本的考え方を示す。

c) 被観測者の選好に基づいた政策評価の限界

観測者は、被観測者の選好を直接的に知ることは不可能であり、モデル分析を通じて間接的に把握しなければならない。しかしながら、モデルの定式化によっては、選好を間接的にすら同定できない場合がありうる。また、間接的に同定された選好に基づいて政策評価を行うと、倫理的に許容し難い政策的インプリケー

ションが導かれる危険性もある。5.では、これらの問題について考察する。

3. 観測・被観測関係とモデル作成

(1) 逆問題の考え方¹²⁾

Step 6 における政策代替案の影響予測とは、Step 1 および Step 2 で定式化された行動モデル・社会経済システムモデルに、外生変数(主に b_i)および政策変数(e)の値を入力し、社会経済状態(主に a_i, b, y)の水準を出力する作業である。これを、モデルを用いて解かれるべき順問題と定義しよう。この時、観測された社会経済状態変数の水準から、観測者にとって未知である、モデルを規定する写像(具体的には、関数形やパラメータ)や写像に入力されるべき外生変数の水準を推定する問題を、順問題に対比する形で逆問題と定義できる。本稿の立場では、行動モデルや社会経済システムモデルの作成・同定という観測の行為は全て逆問題として捉えられる。

一般に逆問題を解くのは困難である。その理由は、順問題では有限個の安定した解が存在するにも関わらず、逆問題では解が存在しなかったり、あるいは反対に多数(場合によっては無限に)存在しすぎるからである。このような問題は非適切問題と呼ばれる。逆問題の研究は非適切問題を適切な問題へと変換し、適切な解を探るという点で意義を持っている。

さて、変数 X, Y, θ の間に $Y = F(X, \theta)$ の関係が成立しているとしよう。観測された変数 Y, X の値から未知である変数 θ の値を求める問題は逆問題である。観測された変数 $Y \in \mathbf{R}^m$ を『結果』と呼び、推定すべき変数 $\theta \in \mathbf{R}^n$ を『原因』と呼ぶことにする。結果 Y と原因 θ の次元に応じて、逆問題における非適切問題は以下の3種類に分類できる。

- ① $m > n$ θ の解が存在しない場合
- ② $m = n$ θ の解が安定でない場合
- ③ $m < n$ θ の解が多数存在して特定できない場合

非適切な問題を解くためには問題の構造を書き換えたり、推定すべき変数に関する事前情報を追加する作業が必要である。非適切な問題のままでは逆問題を有意義な形で解くことができないため、何らかの追加的な条件の設定が必要とされる点に注意したい。

(2) 非適切問題への対処として見たモデル作成

観測者が利用可能な統計情報は、通常、行動モデルおよび社会経済システムモデルに含まれる一部の変数の値(非集計行動モデルのサンプリングデータなど)や、何らかの形で加工された変数の値(政府統計調査の集計表など)などである。行動主体を厳密に識別し

て主体毎の行動やそれを取り巻く環境などの微視的狀態を詳細に知ることはできない。(1)の定義に従い、観測される統計データを Y および X で、観測者にとって未知である原因と関係を θ および $F(\cdot)$ で表せば、観測者が直面する困難は、結果 Y を説明する関数 $F(\cdot)$ と原因 θ が無数に存在しえる点にあるといえよう。これは、モデル作成・同定という観測の行為が基本的に $m < n$ の非適切問題であることを意味している。観測の行為が $m > n$ あるいは $m = n$ の非適切問題となる場合も存在するが、その場合でも観測誤差の導入などを通じて、結果的に $m < n$ の非適切問題に書き換えているとみなせる。以下、モデルの作成・同定という観測の行為を $m < n$ の非適切問題への対処とみなして、その手順を整理する。ベイズ統計学¹³⁾⁻¹⁶⁾の枠組みに従えば、基本的な流れは次の通りである。a)まず、行動モデルおよび社会経済システムモデルを特定化して原因数 n を減らす。b)次に、推定すべき原因 θ についての信念を表す確率密度分布を形成し、観測されたデータに基づいて更新する。c)最後に、一定の基準に基づいて θ の点推定値を算出する。

なお、逆問題としてモデルの作成・同定という観測の行為を定義する場合、順問題としては主体の嗜好から行動を求める問題が考えられており、主体の嗜好が行動を規定しているとの仮定が暗黙の内に置かれている点に注意したい。2.(2)でも触れたとおり、仮定そのものの妥当性を問う議論も存在する。

a) モデル特定化を通じた原因数の減少

観測者は、モデルを特定化することで原因数を減らす。「けちの原理」に見られるとおり、原因数が少ないモデルほど望ましいとの考えもあるが、原因数の選択は現況再現性と将来予測の信頼性のトレードオフを踏まえて決定されるべきとの主張は強力である¹⁾。モデル特定化の代表的方法としては、例えば、以下のものがあげられる。

①行動モデル・社会経済システムモデルに適切と想定される関数形(基本モデルで表される $U(\cdot), V(\cdot), a(\cdot), z(\cdot), s(\cdot)$ など)を選択する。

②行動主体をグループ化して、同一グループ内の主体は同一の嗜好を有するとの仮定を置く。基本モデルの表記に対応させると次のように表わせる。

$$b = (b_i)_{i \in I} \rightarrow b = (b_h)_{h \in H} \quad (4)$$

ここで、

$$I = \bigcup_{h \in H} I_h \text{ and } I_h \cap I_{h'} = \emptyset \text{ for } \forall h, h' \in H, h \neq h'$$

$$b_i = b_h \text{ for } \forall i \in I_h$$

③行動主体の選択肢集合内の選択代替案をグループ化する。交通行動モデルにおいて無数に存在する目的地点を着地ゾーンとして統合することや、消費需要分析において財をグループ化することなどである。この作

業は基本的に行動主体の選択行動(a_i)の次元を減少させる作業であるが、財のグループ化が考慮すべき財市場の数の減少につながるなど、結果的に行動主体を取り巻く環境を表す変数(z_i, y, e)の次元を減少させることにもなる。

b) 原因についての信念の形成と更新

次に、観測者は原因 θ についての信念の形成と更新を行う。推定すべき原因が取り得る値についての信念は確率密度関数 $p(\theta)$ で表される。確率密度関数 $p(\theta)$ は、ベイズ定理に従い、観測された結果 Y と既知の変数 X に関する条件付き確率密度関数 $p(\theta|Y, X)$ へと更新される。

$$p(\theta|Y, X) \propto p(Y|X, \theta)p(\theta) \quad (5)$$

原因と結果の関係を表す $Y = F(X, \theta)$ が確定的なモデルで与えられる場合には、式(5)から、 $Y \neq F(X, \theta)$ となる (Y, X, θ) について $p(\theta|Y, X) = 0$ が導かれる。事後密度関数 $p(\theta|Y, X)$ には行動モデルおよび社会経済システムモデルの特徴が反映される点に注意したい。

\mathbf{R}^n の部分空間 $\Theta(Y, X) = \{\theta \in \mathbf{R}^n | Y = F(X, \theta)\}$ が定義されると、 $\theta \in \Theta(Y, X)$ において $p(\theta|Y, X) \geq 0$ が、 $\theta \notin \Theta(Y, X)$ において $p(\theta|Y, X) = 0$ が成立する。行動モデルや社会経済システムモデル $U(\cdot), V(\cdot), a(\cdot), z(\cdot), s(\cdot)$ の特定化は、原因 θ の存在範囲を規定するとともに、 θ の点推定値 $\bar{\theta}$ を推定する際の実行可能領域(解空間)も規定することになる。

c) 点推定値の算出

最後に、観測者は事後密度関数 $p(\theta|Y, X)$ から推定すべき原因 θ の点推定値 $\bar{\theta}$ を算出する。 $p(\theta|Y, X)$ が $\bar{\theta}$ より多量の情報を含んでいるため、 $\bar{\theta}$ の算出は必ずしも必要ではない。しかし、 $\bar{\theta}$ は $p(\theta|Y, X)$ の情報を圧縮した指標であるため、作成されたモデル構造の吟味の際に有用である。また、点推定値 $\bar{\theta}$ を固定した上で影響予測や政策評価を行った方が作業労力を減らすだけでなく、情報を簡潔に把握しやすい。

ベイズ意思決定理論に従った場合、点推定値 $\bar{\theta}$ は、 θ を代表させる $\bar{\theta}$ と原因 θ の距離で定義される損失 $l(\theta, \bar{\theta})$ の期待値の最小化問題の解として定義される。損失関数および定数 κ を用いて観測者の効用関数を式(6)のように定義すれば、点推定値は、観測者の期待効用最大化問題の解ともみなせる。点推定値の定義は式(7)および式(8)の通りである。

$$u(\theta, \bar{\theta}) = \kappa - l(\theta, \bar{\theta}) \quad (6)$$

$$\bar{\theta} = \arg \max_{\theta \in D_\theta} \int_{\theta \in \Theta(Y, X)} u(\theta, \bar{\theta}) p(\theta|Y, X) d\theta \quad (7)$$

$$\bar{\theta} = \arg \min_{\theta \in D_\theta} \int_{\theta \in \Theta(Y, X)} l(\theta, \bar{\theta}) p(\theta|Y, X) d\theta \quad (8)$$

代表的な損失関数は式(9. a)-(9. c)の通りであり、それぞれの損失関数を用いて算出される点推定値 $\bar{\theta}$ は、事後密度関数 $p(\theta|Y, X)$ のもとでの θ の期待値、中央値、最頻値($c=0$ の場合)に対応する。

$$\textcircled{1} \text{ 2乗誤差損失 } l(\theta, \bar{\theta}) = \|\theta - \bar{\theta}\|^2 \quad (9. a)$$

$$\textcircled{2} \text{ 絶対誤差損失 } l(\theta, \bar{\theta}) = \|\theta - \bar{\theta}\| \quad (9. b)$$

$$\textcircled{3} \text{ 0-1 損失 } l(\theta, \bar{\theta}) = \begin{cases} 0 & \text{for } \|\theta - \bar{\theta}\| \leq c \\ 1 & \text{for } \|\theta - \bar{\theta}\| > c \end{cases} \quad (9. c)$$

(3) 代表的なモデル作成作業

以下、代表的なモデル作成作業を(2)で示した非適切問題への対処としてとらえ、その手順を整理する。既往の代表的モデルといっても多岐にわたる為、ここでは筆者らの選択に恣意性があることを承知の上で、a)個人データを用いた非集計行動モデル、b)個人データと集計データの統合利用モデル、c)集計データを用いたエントロピーモデル、の3種類を取り上げる。

a) 個人データを用いた非集計行動モデル²⁾

一般的な非集計行動モデルでは、個人の選択行動は $a(b_i, z_i) \in \mathbf{D}_a = \{0,1\}^G$ で表される。ただし、 G は選択枝数である。観測者が利用できる統計情報は、経済システムに存在する個人の集合のうち、サンプリング調査された一部の個人 $i \in \mathbf{I}_Y \subset \mathbf{I}$ の個人データである。通常、選択行動の結果 $Y = (a_i)_{i \in \mathbf{I}_Y}$ および個人を取り巻く環境 $X = (z_i)_{i \in \mathbf{I}_Y}$ が観測される。推定すべき原因はグループ内で同一と仮定される個人の嗜好 $\theta = (b_h)_{h \in \mathbf{H}}$ である。原因と結果の関係式は、ロジットモデルなどの選択確率式 $p(a_i | b_h, z_i)$ に基づいた尤度関数として表現される。以上の関係を整理したのが、式(10. a)-(10. d)である。

$$Y = (a_i)_{i \in \mathbf{I}_Y} \quad (10. a)$$

$$\theta = (b_h)_{h \in \mathbf{H}} \quad (10. b)$$

$$p(Y|X, \theta) = \prod_{h \in \mathbf{H}} \prod_{i \in \mathbf{I}_Y} \delta(i, h) p(a_i | b_h, z_i) \quad (10. c)$$

$$\text{ただし、} \delta(i, h) = \begin{cases} 1 & \text{for } i \in \mathbf{I}_h \\ 0 & \text{for } i \notin \mathbf{I}_h \end{cases} \quad (10. d)$$

事前分布が一様分布 $p(\theta) = \text{const.}$ であるとすれば、事後分布はベイズ定理に従って求められる。

$$\begin{aligned} p(\theta|Y, X) &\propto p(Y|X, \theta) p(\theta) \\ &= \prod_{h \in \mathbf{H}} \prod_{i \in \mathbf{I}_Y} \delta(i, h) p(a_i | b_h, z_i) \end{aligned} \quad (11)$$

損失関数を0-1損失関数で与えれば、期待損失最小化問題の解として定義される $\theta = (b_h)_{h \in \mathbf{H}}$ の点推定値は、

$\prod_{h \in \mathbf{H}} \prod_{i \in \mathbf{I}_Y} \delta(i, h) p(a_i | b_h, z_i)$ を尤度関数とする最尤推定値に等しくなる。

b) 個人データと集計データの統合利用モデル¹⁷⁾

個人データと集計データの統合利用モデルでは、サンプリング調査された一部の個人 $i \in \mathbf{I}_Y \subset \mathbf{I}$ の個人データに加え、各主体の選択行動結果の集計量 $a = \sum_{i \in \mathbf{I}} a_i \in \mathbf{R}^S$ が観測される。推定すべき原因は、グループ内で同一と仮定される個人の嗜好 $\theta = (b_h)_{h \in \mathbf{H}}$ である。原因と結果の関係式は、各主体の選択行動結果の集計量の観測誤差が多変量正規分布に従うものと仮定して、尤度関数で与えられる。原因 θ の事前密度関数は、個人データを用いた非集計行動モデルにおける最尤推定量が漸近正規性を有することを利用して形成される。以上の関係を整理したのが、式(12. a)-(12. d)である。ただし、 Σ_a と Σ_{bh} は、それぞれの多変量正規分布における共分散行列である。

$$Y = a = \sum_{i \in \mathbf{I}} a_i \quad (12. a)$$

$$\theta = b = (b_h)_{h \in \mathbf{H}} \quad (12. b)$$

$$Y|X, \theta \sim MVN\left(\sum_{h \in \mathbf{H}} \sum_{i \in \mathbf{I}} \delta(i, h) p(a_i | b_h, z_i), \Sigma_a\right) \quad (12. c)$$

$$\theta \sim MVN(\bar{b}_h)_{h \in \mathbf{H}}, \Sigma_{bh}) \quad (12. d)$$

事後分布はベイズ定理に従って求められる。ただし、 $a(b, z) = \sum_{h \in \mathbf{H}} \sum_{i \in \mathbf{I}} \delta(i, h) p(a_i | b_h, z_i)$ である。

$$\begin{aligned} p(\theta|Y, X) &\propto p(Y|X, \theta) p(\theta) \\ &\propto \exp \left[\begin{aligned} &-\frac{1}{2} (a - a(b, z))^T \Sigma_a^{-1} (a - a(b, z)) \\ &-\frac{1}{2} (b - \bar{b})^T \Sigma_{bh}^{-1} (b - \bar{b}) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

損失関数を0-1損失関数で定義すれば、事後密度関数を用いた期待損失最小化問題から事後分布の最頻値が導出される。

c) 集計データを用いたエントロピーモデル^{18), 20), 27)}

エントロピーモデルの意味解釈をめぐっては、様々な考え方が示されてきた。以下、観測された集中交通量と発生交通量から未知である分布交通量を推定する問題を念頭に、エントロピーモデルを「観測されたマクロレベルの情報(発生・集中交通量)や分析者が定義したモデルから導かれる条件(例えば、あるゾーンを着地とする分布交通量の和が集中交通量に等しいこと)と整合したミクロ状態(分布交通量)の生起確率を表現する確率モデル」として捉え直すMPS分析の立場に立つて議論したい^{18), 20), 26), 27)}。

これまでと同様に、個人の選択を $a_i \in \{0,1\}^G$ で表す。モデル作成・同定を行う観測者がデータとして利用できるのは選択枝別に集計された選択結果

$a^G = \sum_{i \in I} a_i \in \mathbf{R}^G$, グルーピングされた行動主体のタイプ別の選択結果 $a^H = (a_h)_{h \in H} \in \mathbf{R}^H$ (ただし, $a_h = \sum_{i \in I_h} a_i$), 環境の集計量 $Z = \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} a_{hg} z_{hg} \in \mathbf{R}^3$ の 3 種類であり, $Y = (a^G, a^H, Z)$ と表わせるとしよう (具体的には, 集中交通量, 発生交通量, 総交通費用). 観測者に既知の情報として, 行動主体タイプと選択肢のペア毎の環境水準 $z = (z_{hg})_{h \in H, g \in G} \in \mathbf{R}^{GH}$ を想定し, $X = z$ とする (具体的には, 各 OD ペアの交通費用). 推定すべき原因としては行動主体タイプと選択肢の各ペアの選択結果 $a = (a_{hg})_{h \in H, g \in G} \in \mathbf{R}^{HG}$ を想定し, $\theta = a$ とする (具体的には, 各 OD ペアの分布交通量). 原因と結果の関係式は, 未知量の集計量が観測量に等しいことを表す線形関数で与えられる. 以上の関係を整理したのが, 式 (14. a)-(14. c) である. a) と b) のモデルでは推定すべき原因が選択パラメータであったのに対して, ここでは選択行動結果の集計量が推定すべき原因である点に注意したい.

$$Y = (a^G, a^H, Z) \in \mathbf{R}^{G+H+1} \quad (14. a)$$

$$\theta = a \in \mathbf{R}^{GH} \quad (14. b)$$

$$Y = F(X, \theta)$$

$$= \left(\begin{array}{l} a_g = \sum_{h \in H} a_{hg}, a_h = \sum_{g \in G} a_{hg}, \\ Z = \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} a_{hg} z_{hg} \end{array} \right) \quad (14. c)$$

原因数と結果数を比較すれば, $m = G + H + 1 < GH = n$ であることから, 観測された結果 Y と整合する原因 θ が複数個存在することがわかる. これまでと同様に, 原因 θ の事前分布を形成する必要がある. 原因の事前分布の候補は複数考えられるが, 「結果 $Y = (a^G, a^H, Z) \in \mathbf{R}^{G+H+1}$ の値を変化させない行動主体のラベル i の置換が多い原因ほど, より実現している可能性が高い」との考えは, 有力なアイデアの一つである. このアイデアに従えば, 事前密度関数は式 (15) のように形成できる.

$$p(\theta) = \frac{\prod_{g \in G} \prod_{h \in H} a_{hg}!}{\left(\sum_{g \in G} \sum_{h \in H} a_{hg} \right)!} \quad (15)$$

事後分布はベイズ定理に従って求められる. ただし, $\delta_{Y=F(X, \theta)}$ は $Y = F(X, \theta)$ が成立する場合に 1, $Y \neq F(X, \theta)$ の場合に 0 となる関数である.

$$p(\theta | Y, X) \propto \delta_{Y=F(X, \theta)} p(\theta) \quad (16)$$

観測された結果と整合する原因 θ の集合を $\Theta(Y, X)$ で

表せば, 最頻値として定義される点推定値は式 (17) の最適化問題の解として求められる.

$$\begin{aligned} & \max_{\theta \in D_\theta} p(\theta) \\ & s.t. \theta \in \Theta(Y, X) \end{aligned} \quad (17)$$

目的関数である $p(\theta)$ をスターリングの公式を用いて近似すれば, 線形制約条件のもとでのエントロピー最大化問題が導出され, 原因 $\bar{\theta} = (\bar{a}_{hg})_{(h, g) \in H \times G}$ の点推定値が求められる¹⁷⁾. なお, 場合の数に比例する事前密度関数が与えられた場合, 事後分布の確率密度関数が点推定値の周辺で鋭く尖った関数となることが知られている^{19), 20)}. 上記の議論で得られる原因の点推定値 $\bar{\theta} = (\bar{a}_{hg})_{(h, g) \in H \times G}$ は, 本来求めるべき $p(\theta | Y, X)$ の良好な指標になっている.

これまで見てきたエントロピーモデルでは, 理論モデル $Y = F(X, \theta)$ が単純な集計関係を表す定義式でしかなかったが, 均衡条件を理論モデルとして扱った問題も存在する. 観測されたリンク交通量からの OD 交通量推定問題²¹⁾ や観測された集計統計情報からの家計タイプ別の人口推定問題²²⁾ はその具体例である. これらの問題では, 観測されるデータが誤差を含んでいたり, 必ずしも均衡制約条件が厳密には満たされていないため, 観測された結果と整合した原因が存在しない解の非存在性の問題に直面する. リンク交通量からの OD 交通量推定問題では最小二乗基準などの外的基準を導入することで原因数よりも結果数が多い非適切問題として解いているのに対して, 家計タイプ別の人口推定問題では観測されるデータの観測誤差を考慮することで原因数よりも結果数が少ない非適切問題に変換して解いている. 非適切問題への対処との視点から既存のモデルを捉え直すことは, 様々なモデルの特徴の理解促進につながるものと期待される¹¹⁾.

(4) 代表的なモデル作成作業の比較検討

通常, 観測者は利用可能な統計情報に基づいてモデルの作成・同定を行わなければならない. そのため, 各々のモデルが記述する現象 (個人行動, 社会経済システムの相互作用など) の差異, モデル同定において利用される情報の差異, 統計学的検定などによるモデルの判定可能性の差異, が生じる. モデル作成・同定の場面における観測と被観測の関係がモデルの作成可能性や判定可能性に影響を与える事実を観測者自身が認識することは, 各々のモデルの意義と限界を把握するうえでも有益であると考えられる^{1), 23), 24)}. 以下, (3) で取り上げた代表的モデルのそれぞれを例に, 観測と非観測の関係から生じる各モデルの意義と限界を簡単に比較検討してみた.

a) 個人データを用いた非集計行動モデル

個人データを用いた非集計行動モデルの有用性は,

これまでの膨大な研究蓄積からも明らかであるが、ここでは次の点だけ指摘しておきたい。非集計行動モデル研究では Step 2 の作業への関心が低い場合が多く、個人間相互作用が引き起こすメカニズム（混雑外部性など）が十分に考慮されていない場合が多い。その結果、モデル同定において統計情報が必ずしも有効利用されていない可能性がある。また、影響予測や政策評価の妥当性や信頼性が損なわれている可能性がある。

b) 個人データと集計データの統合利用モデル

この分析の長所は、個人間相互作用が引き起こすメカニズムに関する情報である集計データをモデル同定に取り込んでいる点にある。ただし、交通現象の特徴ともいえる混雑外部性メカニズムが十分に考慮されておらず、社会経済システムの相互作用メカニズムを十分に取り込んでいるとはいえない。交通ネットワークの均衡条件を制約条件として行動モデルを同定する試みも一部で行われているが、必ずしも十分な成功を収めていないように見受けられる²⁵⁾。

c) 集計データを用いたエントロピーモデル

集計データを用いたエントロピーモデルでは、個人行動に関する合理的行動仮説が仮定されないため、政策評価に利用することは一般に困難である。また、交通行動特有の混雑外部性メカニズムも十分に考慮されておらず、影響予測の妥当性にも疑問が残る。土木計画学の目的が政策・計画の影響予測や政策評価にあることを踏まえると、エントロピーモデルの意義は限られていると考えられる。ただし、以下で説明する点において M P S 分析の考え方は有益である。

式(7)や式(8)で示した通り、結果から原因の点推定値を求める問題は期待効用最大化問題や期待損失最小化問題として定義できる。原因の点推定値を求めることを目的とした場合、式(7)や式(8)の数理計画問題を数値的に解ければ十分である。ただし、より興味深いのはそれらが解析的に解ける場合である。空間相互作用モデルにおけるマクロ変数が満たすべき制約条件と原因に関する事前分布の設定を工夫することで、推定量 $\bar{\theta}(Y, X)$ として、重力モデルや交通ネットワーク均衡モデルなどの代表的モデルを導出できることが知られている^{20), 26)}。仮に既存のモデルとは異なる $\bar{\theta}(Y, X)$ が導出されたとしても、それが意味解釈可能な場合、行動モデルや社会経済システムモデルの一つの候補を導出できたこととみなせよう。逆問題を解くことでモデル構造自体を推定していると捉えると非常に興味深い。また、 $\bar{\theta}(Y, X)$ の確率密度関数を導出して原因の実現値と照らし合わせることが可能であれば、 $\bar{\theta}(Y, X)$ の導出に用いられた制約条件が意味する仮説や、 $\bar{\theta}(Y, X)$ として表現されるモデル（例えば、交通ネットワーク均衡モデル）の妥当性を統計学的に検定することが可能になる²⁷⁾。現時点では、この研究プログラムは実用性のある水準まで進展していない。し

かし、既存研究において均衡仮説がその妥当性を定量的に検証されることなく利用されている状況を踏まえれば、積極的に研究を進める意義があるといえよう。

4. 政策評価の妥当性・信頼性と情報価値

(1) 政策評価の信頼性向上による情報価値

3. では、利用可能な統計情報を所与としたうえで、モデルの作成・同定という観測の行為を非適切問題への対処との視点から検討した。以下では、a) 新たな実験や調査の実施による統計情報の獲得や b) 既存統計調査の精度向上が、モデル作成・同定の場面における観測と被観測の関係の変化を通じてモデル分析の流れに及ぼす影響について、情報価値の把握との観点から検討したい。

a) 新規調査による情報獲得の価値

観測者が社会的意思決定者の役割も兼ねており、期待社会的厚生を最大にする外生変数 (e) の選択を求められている状況を想定しよう。ただし、観測者は社会経済システム内の個人の嗜好パラメータ (b) を確定的に知りえないとの意味で不確実性に直面しているとする。観測者が原因 Y と情報 X を観測し、外生変数の水準を e に決定した場合に実現しうる社会的厚生期待値を式(18)で定義する。さらに、外生変数の水準を選択を通じて実現しうる期待社会的厚生の最大値を式(19)で定義する。

$$B(Y, X, e) \equiv \int W(b, e) p(b | Y, X) db \quad (18)$$

$$B(Y, X) \equiv \max_{e \in D_e} B(Y, X, e) \quad (19)$$

ここで、

$$W(b, e) \equiv W((Y(b_i, z_i(s(b, e), e)))_{i \in I})$$

観測者は新たな統計情報を観測した場合、未知の原因 θ に関する信念をベイズ定理に従って更新する。ベイズ意思決定理論に従えば、統計情報の利用可能性の拡大は、不確実性下の意思決定問題における事前の意味でのより高い期待効用水準の実現を可能にする。新たな統計情報獲得の情報価値の定義は式(20)で表される^{14), 16), 28)}。式(20)の第一項は、調査 q のもとで獲得される情報 $Y' \in \mathbf{R}^n$ に関する事前密度関数 $p(Y' | q)$ を用いて計算される、調査 q のもとで観測される情報を踏まえた事後密度関数 $p(b | Y, Y', X)$ に基づく最適政策の価値 $B(Y, Y', X)$ の期待値である。一方、第二項は、新たな調査を実施しない場合の最適政策の価値 $B(Y, X)$ である。ただし、 $q \in D_q$ は調査のラベルであり、具体的には、非集計行動モデル研究の S P 調査におけるサンプル数や質問項目などを指定する。

$$\Delta B(q) = \int B(Y, Y', X) p(Y' | q) dY' - B(Y, X) \quad (20)$$

式(20)では調査 q を所与として情報価値 $\Delta B(q)$ を定義したが、非集計行動モデル研究のように観測者が統計調査を設計可能な場合もある。統計調査の設計可能性も踏まえた場合、統計調査の最適設計問題は式(21)で表現できる。最適調査を q^* で表す。ただし、 $C(q)$ は統計調査 q の調査費用であり、 $\Delta B(q)$ と比較可能な尺度で測られているものとする。

$$q^* \equiv \max_{q \in D_q} [\Delta B(q) - C(q)] \quad (21)$$

b) 統計調査の精度向上の価値

式(20)では、観測される統計情報が誤差を含んでいないとの想定のもと、新規調査による情報獲得の価値を定義した。しかし、現実には我々が取り扱う統計情報は何らかの測定誤差を含んでいると考えられる。統計調査で観測される統計情報の精度向上の価値は、以下のように定義できる。

単純化のため、 X の測定誤差はないものとしよう。 Y を観測されたデータとし、 $Y+dY$ を観測者にとって未知である真値とする。この時、式(22)は、統計調査の結果獲得される情報に関する事前密度関数 $p(dY|Y, X)$ を用いて計算される、測定誤差がない情報を踏まえた事後密度関数 $p(b|Y+dY, X)$ に基づいた最適政策の価値についての期待値である。一方、式(23)は新たな統計調査を実施しない場合に利用可能な統計情報に基づいた最適政策の価値を意味する。統計調査の測定誤差がなくなるとの意味での精度向上の価値は、式(22)と式(23)の差で定義できる。

$$\int_{e \in D_e} \{ \int_{b \in D_b} W(b, e) p(b|Y+dY, X) db \} p(dY|Y, X) d(dY) \quad (22)$$

$$\max_{e \in D_e} \int_{b \in D_b} \{ \int_{b \in D_b} W(b, e) p(b|Y+dY, X) p(dY|Y, X) db \} d(dY) \quad (23)$$

(2) 調査設計に向けての現実的対応

現実の観測者が(1)で示した最適調査設計のプロセスを追う場合、膨大な計算処理能力が求められる。そこでの処理能力は超人的能力といわざるをえず、非現実的な側面もある。以下、新規調査による情報獲得の価値の把握を例に、より現実的な対応策を検討したい。

a) 完全情報の価値

単純化のため、2つの政策代替案のいずれかの選択を迫られている状況を想定しよう。 $D_e = \{e^0, e^1\}$ で政策代替案集合を表す。観測者は、式(24)の評価指標の正負に基づいて最適政策を判断する必要がある。

$$\Delta B(e^1, e^0 | Y, X) = B(Y, X, e^1) - B(Y, X, e^0) \quad (24)$$

$B(Y, X, e)$ をテイラー展開近似すると、式(25)が導出できる。

$$\begin{aligned} B(Y, X, e) &\approx \int_b \left\{ W(\bar{b}, e) + \nabla_b W(\bar{b}, e)(b - \bar{b}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}(b - \bar{b})^T \nabla_b^2 W(\bar{b}, e)(b - \bar{b}) \right\} p(b|Y, X) db \quad (25) \\ &= W(\bar{b}, e) + \nabla_b W(\bar{b}, e) E_{p(b|Y, X)}[b - \bar{b}] \\ &\quad + \frac{1}{2} E_{p(b|Y, X)}[(b - \bar{b})^T \nabla_b^2 W(\bar{b}, e)(b - \bar{b})] \end{aligned}$$

式(25)の右辺第2項は、点推定値 \bar{b} が事後分布を用いた期待値で定義されているか、 $p(b|Y, X)$ が正規分布に従い、点推定値が平均値、最頻値、中央値のいずれかで定義されていれば消去される。第3項は、 $W(b, e)$ の選好パラメータに関する2階微分になっており、その符号や大きさは不明である。第0次近似までを用いた場合、式(24)は式(26)のように近似できる。現在の実務における費用便益分析は、これを計算している作業とみなせる。

$$\Delta B(e^1, e^0 | Y, X) \approx W(\bar{b}, e^1) - W(\bar{b}, e^0) \quad (26)$$

式(20)では統計調査 q のもとの情報価値を定義したが、ここでは、仮想的に最適統計調査 q^* を通じて選好パラメータ b の値が観測される状況を想定してみよう。この仮想的統計調査の情報価値は式(20)に従い、式(27)で定義できる。式(27)は、通常、完全情報の価値と呼ばれており、式(20)で定義された情報価値の上限でもある^{(14), (16), (28)}。

$$\Delta B(q^*) = \int B(Y, b, X) p(b|q^*) db - B(Y, X) \quad (27)$$

さて、各主体が利用可能な統計情報に基づいて各時点において合理的に確率分布を形成するとの立場に立つベイズ意思決定理論に従えば、統計調査 q^* を通じて観測される b の事前密度関数は、調査実施前の時点において利用可能な統計情報 Y, X に関する条件つき確率密度関数に等しくなければならない。また、調査実施後の b の事後分布は、観測値周辺に退化した確率分布になる。さらに、 $\Delta B(e^1, e^0 | Y, X) > 0$ を、説明の便宜上、仮定しよう。この時、式(28)-(30)が成立する。ただし、 $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数である。

$$B(Y, X) = B(Y, X, e^1) \quad (28)$$

$$p(b|q^*) = p(b|Y, X) \quad (29)$$

$$p(b|Y, b, X) = \delta(b' - b) \quad (30)$$

式(28)-(30)を用いると、式(27)から式(31)を導ける。

$$\begin{aligned} \Delta B(q^*) &= \int_{e \in D_e} \{ \max_{b \in D_b} W(b, e) - W(b, e^1) \} p(b|Y, X) db \\ &= \int \max \{ W(b, e^0) - W(b, e^1), 0 \} p(b|Y, X) db \quad (31) \end{aligned}$$

式(31)中の $W(b, e)$ を1階のテイラー展開近似すると、式(32)が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta B(q^*) &\approx \int \max \left\{ \begin{aligned} &W(\bar{b}, e^0) - W(\bar{b}, e^1) \\ &+ (\nabla_b W(\bar{b}, e^0) - \nabla_b W(\bar{b}, e^1))(b - \bar{b}), 0 \end{aligned} \right\} p(b|Y, X) db \\ &= P[b|W(b, e^0) - W(b, e^1) > 0] \\ &\quad \times \left[\begin{aligned} &W(\bar{b}, e^0) - W(\bar{b}, e^1) \\ &+ \{\nabla_b W(\bar{b}, e^0) - \nabla_b W(\bar{b}, e^1)\} \\ &\times \{E_{p(b|Y, X)}[b|W(b, e^0) - W(b, e^1) > 0] - \bar{b}\} \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)から、完全情報の価値は式(33)-(36)の4つの成分に分解できることがわかる。

$$P[b|W(b, e^0) - W(b, e^1) > 0] \quad (33)$$

$$W(\bar{b}, e^0) - W(\bar{b}, e^1) \quad (34)$$

$$\nabla_b W(\bar{b}, e^0) - \nabla_b W(\bar{b}, e^1) \quad (35)$$

$$E_{p(b|Y, X)}[b|W(b, e^0) - W(b, e^1) > 0] - \bar{b} \quad (36)$$

式(33)は、式(26)に基づいた意思決定が完全情報のもとで最適でない確率を表す。式(34)は、式(26)の右辺と等しく、式(24)の評価指標を选好パラメータの点推定値で近似したものである。式(35)は、选好パラメータの限界的变化による式(34)の変化分を表す。式(36)は、式(26)に基づいた意思決定が最適でない条件付きの选好パラメータの期待値と条件なしの选好パラメータの点推定値の差である。式(32)から、式(33)および式(34)の値が大きいほど、完全情報の価値が大きくなることがわかる。上述の関係を、 $W(b, e)$ が b について線形のケースについて図示したのが図-1である。
 e^1 を政策実施、 e^0 を政策留保として捉えれば、ここでの議論が準オプション価値をめぐる議論と密接に関連していることがわかる^{29), 30)}。観測の限界が存在する場合、式(26)の选好パラメータの点推定値に基づいた評価指標の妥当性が損なわれ、选好パラメータの確率分布まで考慮した評価指標が必要とされる。

政策評価の実務においても、作成・同定されたモデルの頑健性を感度分析で検討したり、モデルの信頼性をパラメータ推定値や予測値の標準誤差から判断する作業が行われている³¹⁾。費用便益分析を例にとれば、例えば、社会的純便益が0になるP値の計算などは式(33)の計算に相当する³²⁾。また、パラメータに関する感度分析は式(35)の計算に相当する。本稿ではベイズ意思決定理論の枠組みでモデルの信頼性を議論しているため、必ずしも実務の計算作業と数学的に厳密に対応しているわけではないが、式(32)から現実に行われている感度分析や標準誤差の算出が、モデルの作成・同定という観測の行為における完全情報の価値といかなる形で対応付けられるかがわかる。現在、費用

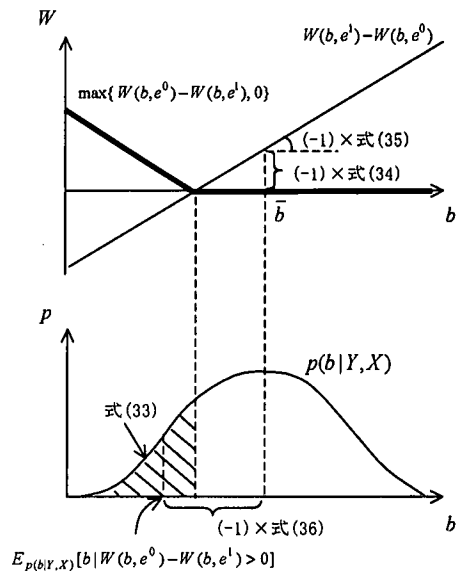


図-1 完全情報の価値の分解

便益分析を中心に政策評価のためのモデル分析の適用が実務レベルで試みられ、その報告書も多数公開されている。これらの実証分析結果を蓄積し、分析結果の信頼性や、それが最終的な政策評価結果に及ぼしうる影響について検討することは、モデル分析のために求められる統計調査の設計方針についての有益なインプリケーションを与えるものと期待される。

b) 標本情報の価値

これまで、情報価値の上限である完全情報の価値について検討してきた。ただし、そこでの选好パラメータが観察されるとの想定には、非現実的な側面もある。以下、完全情報ではなく、標本情報の価値について検討する¹⁴⁾。

式(20)の定義に従えば、標本情報の価値の大小は $p(b|Y, Y', X)$ および $p(Y'|q)$ に依存する。後者については、既に獲得された統計情報 Y と X に基づいて信念が形成されると考えられる。前者については、データの追加によってどの程度选好パラメータの事後確率に変化するかを定量的に把握しておく必要がある。 $\Delta B(e^1, e^0 | Y, X) > 0$ を仮定したうえで、式(20)を変形することで、式(37)が得られる。ただし、 $\bar{b}(Y')$ は、観測値 Y' に関する条件つき確率分布に基づいた b の点推定値である。

$$\begin{aligned} \Delta B(q) &= \int \left[\max_{e \in D_e} \{W(b, e)p(b|Y, Y', X)db\} - \int -\{W(b, e^1)p(b|Y, Y', X)db\} \right] p(Y'|q)dY' \\ &\approx \int \{ \max_{e \in D_e} W(\bar{b}(Y'), e) - W(\bar{b}(Y'), e^1) \} p(Y'|q)dY' \\ &= \int \max \{W(\bar{b}(Y'), e^0) - W(\bar{b}(Y'), e^1), 0\} p(Y'|q)dY' \end{aligned} \quad (37)$$

式(37)の具体的な計算には、 $p(Y'|q)$ に従って、 Y' の乱数を発生させるとともに、各々の Y' の値について $p(b|Y, Y', X)$ および $\bar{b}(Y')$ を計算する作業が求められる。近年、積極的に研究が進められているブートストラップ法やマルコフチェーン・モンテカルロ法などの計算機能力を全面的に駆使した統計学的手法は、事前分布や事後分布の近似計算に有益である^{13), 33)}。標本情報の価値の計測にも積極的に利用されることが期待される。

(3) モデル選択を通じた情報価値

(1)では、統計調査の利用可能性の拡大や統計調査の精度向上によって生じる情報価値を定義した。ここでは分析に用いられるモデルは所与のものとしていたが、以下、利用するモデルが変更される可能性も想定したうえで^{14), 34)}、統計情報の利用可能性が広がることで生じる情報価値について検討したい。まず、複数のモデルを想定した場合の最適意思決定問題を整理し、次に、観測者によって作成・同定されるモデルの集合が変更することに起因する情報価値について考察する。

分析者が考慮するモデルの集合を $\{M_k\}_{k \in K}$ で表し、モデル M_k における選好パラメータを b_k で表す。また、モデル M_k が現象の正確な記述になっているとの観測者の信念を事前確率 $P(M_k)$ で、各々のモデルのもとでの選好パラメータについての信念を確率密度関数 $p(b_k|M_k)$ で表す。この時、既知の情報 X およびモデル M_k と原因 b_k のもとで結果 Y が実現する確率密度関数が $p(Y|X, b_k, M_k)$ で表現されるならば、観測者がモデルと選好パラメータについて有する、観測された統計情報 Y および X に関する事後的信念は、ベイズ定理に従い、式(38)で表される。

$$p(M_k, b_k | Y, X) \propto p(Y | X, b_k, M_k) p(b_k | M_k) P(M_k) \quad (38)$$

さらに、モデル M_k が現象の正確な記述になっているとの事後的な信念は式(39)で、結果 Y と既知の情報 X 、モデル M_k を所与としたときの選好パラメータ b_k についての事後的な信念は式(40)で表される。

$$P(M_k | Y, X) = \int p(M_k, b_k | Y, X) db_k \quad (39)$$

$$p(b_k | Y, X, M_k) = \frac{p(M_k, b_k | Y, X)}{P(M_k | Y, X)} \quad (40)$$

モデル M_k に基づいた政策評価は、式(41)の評価指標に基づいて行われる。

$$\Delta B(e^1, e^0 | Y, X, M_k) \equiv B(Y, X, e^1, M_k) - B(Y, X, e^0, M_k) \quad (41)$$

ここで、

$$B(Y, X, e, M_k) \equiv \int W(b_k, e) p(b_k | Y, X, M_k) db \quad (42)$$

ベイズ意思決定理論の立場に厳密に従った場合、最適政策は、各々のモデルについての事後的な信念の度合いと評価指標の値を考慮した、式(43)の評価指標の正負で決定される。

$$\Delta B(e^1, e^0 | Y, X) = \sum_{k \in K} P(M_k | Y, X) \Delta B(e^1, e^0 | Y, X, M_k) \quad (43)$$

ただし、複数のモデルを考慮して最適政策を決定するのは非現実的な側面もあり、式(39)で表される事後確率や、事後確率の比であるベイズ・ファクターに基づいてモデル選択を行い、選択されたモデルに基づいた政策決定を検討する立場もある¹⁴⁾。

さて、これまでの議論では、集合 $\{M_k\}_{k \in K}$ に属する全てのモデルについて事後確率および最適政策が決定されると考えてきた。しかしながら、現実のモデル作成・同定という観測の行為においては、3.でも議論した通り、原因数と結果数の大小関係からモデルをあらかじめ特定化する作業がなされる。原因数が結果数より大きいモデルでは、式(40)で表される事後分布がばらつきの大きな確率分布になる可能性が大きい。

図-1の確率密度関数において、 \bar{b} を一定としたまま、ばらつきの大小が変化する場合を考えればわかる通り、原因数が結果数より相対的に大きいモデルにおいては、式(40)の評価指標の完全情報の価値が大きくなると予想される。完全情報の価値は、それぞれのモデルにおいて、完全情報のもとで最適意思決定を行った場合と利用可能な統計情報のもとで最適意思決定を行った場合に実現する期待社会的厚生との差である。完全情報の価値が大きいことは、仮に利用可能な統計情報のもとで最適意思決定を行ったとしても、高い期待社会的厚生を実現できない可能性が大きいことを意味する。原因数と結果数を比較して前者が大きいモデルほど、情報価値の損失分だけ政策的インプリケーションの有効性も低下し、あらかじめモデルの作成・同定という観測の行為の対象から除外される可能性が大きくなる。

統計調査の利用可能性の拡大は、結果数を増加させるため、一般に分析対象とされるモデルの種類の増加につながる。より妥当なモデルが選択されることで、より高い期待社会的厚生を実現する意思決定が行われる可能性も増加する。(1)で定義した情報価値をモデルに基づいた政策評価の信頼性向上による情報価値とするならば、ここでの議論からは、新たな調査を通じた統計情報の獲得には、妥当なモデル選択を通じた情報価値とも呼ぶべきものが存在することが示唆される。無論、多数のモデルを適用することが作業労力などの観点から評価の実務において非効率を助長する危険性があるのも事実ではある。

費用便益分析などの結果がモデルの違い(関数形の違いなども含む)によって、どの程度影響を受けるかについて実証的な知見を蓄積することは、政策評価のためにはいかなるモデルの適用が望まれるか、さらに、

そのためどの程度の統計情報を整備すべきか、といった議論について定性的でこそあれ、有益な情報を提供するものと期待される。

5. 被観測者の選好に基づく政策評価の限界

(1) 社会的意思決定システムにおける観測者の役割

本稿では、観測者が超人・哲人にはなりえないとの立場に立っているが、3. および4. では、観測者が超人ではありえないことを認めつつも、哲人である可能性は否定してこなかった。以下、観測者が哲人でないことから生じる問題、さらには超人・哲人の両者でないことから生じる問題について議論したい。

社会的意思決定のための価値規範の構成問題についてはアローの可能性定理に関する議論が有名である。アローは民主主義的な条件を満足する市民の選好の集計ルールが独裁的ルールしかありえないことを示した。アローの議論と対比させれば、哲人である観測者はアローの議論における独裁者に対応するといえよう。無論、現実の社会的意思決定を巡る枠組みが独裁者の存在を許容するものでないことは言うまでもない。現在の社会的意思決定システムはアローが示した民主主義的なルールが満たすべき条件のいくつかを満足しないものの、人類の叡智によって試行錯誤を伴いながらも運営されているシステムと捉えられよう^{35), 36)}。

さて、上述の世界観にたった場合、モデル分析を通じた影響予測・政策評価の役割はいかなるものであろうか。筆者らは、「(1) 社会で広く支持されている価値前提に立ったうえでモデル分析による影響予測・政策評価を実施・公表して、(2) 市民間に存在する情報の非対称性の解消に寄与し、(3) 歴史的変遷の中で支持され運営されている社会的意思決定システムが効果的に機能するように貢献すること」にあると考える。そして、近代市民社会において広く支持されてきた思想の一つに寛容の思想がある^{37), 38)}。寛容の思想のもとでは、人々の思想の自由を抑圧する行為が否定される。政策評価に携わる観測者にも、自らの価値観で評価するのではなく、人々の多様な価値観を最大限尊重するとともに、現実社会からそれらを抽出・同定して政策評価を行うことが求められるといえよう。

(2) 観測の限界と政策評価の限界

観測者が超人になりえないことは繰り返し述べてきた通りであるが、当然、観測の限界は政策評価の限界へとつながる。政策評価を前提とした人々の選好の同定作業において観測の限界が引き起こしうる問題は、

a) 論理的問題と b) 倫理的問題の二つに分類できる。

a) 被観測者の選好に基づく政策評価の論理的問題

政策評価の論理的問題としては被観測者の選好の識別問題があげられる。土木計画学における具体的問題

としては、家計生産関数をめぐる議論における嗜好と技術の識別問題³⁹⁾、人口分布の固定性をめぐる議論における郷土愛と移転費用の識別問題⁴⁰⁾、期待効用理論をめぐる議論における知識と効用の識別問題⁴¹⁾などが考えられる。識別問題は結果数より原因数が大きい逆問題に他ならず、3. でも述べた通り、原因についての信念を表す事前分布を形成し、それを観測された統計情報に照らして更新する作業が求められる。しかしながら、識別問題においては、ベイズ定理に従って事後分布を算出したとしても、求められた事後分布が事前分布と同一になる、すなわち何ら改定が行われない場合がある。この時、モデル分析は事前分布の更新に対して無力となるため、事前分布の形成がきわめて重要になる。筆者らは事前分布の形成方法について必ずしも十分な回答を持ち合わせていないが、土木計画学が社会的責任を果たしていくうえでは、モデル分析に携わる者と実態調査に携わる者の共同作業が求められるのではないかと考える。

b) 被観測者の選好に基づく政策評価の倫理的問題

実務における現実的な問題として、(1) モデルを通じて同定された被観測者の選好を用いても現況を十分に再現できない問題、および、(2) モデルを通じて同定された被観測者の選好を用いれば現況を再現できるものの、被観測者の選好が我々の常識的感覚や既存の分析結果から乖離する問題、の二点が見受けられる。(1)と(2)のいずれの場合においても、モデルの定式化を変更したり、統計情報を収集したうえで、再度モデルの同定作業が必要になるのはいうまでもない。しかしながら、それでも(1)や(2)の問題が解消しない場合もある。この時、観測者はいかに政策評価を行うべきであろうか。筆者らは、(1)については精度を明記して公表する、あるいは、政策評価結果の公表を控えることで対処せざるを得ないと考え、以下、(2)の問題について考えたい。

被観測者の選好パラメータの点推定値を $\bar{b} = (\bar{b}_i)_{i \in I}$ で表そう。これが我々が有する常識的感覚や既存の分析結果における知見から乖離している状態をアノマリーと総称する。具体的には、時間価値の推定値が負となる場合や時間価値の推定値が既存の分析結果の数倍となる場合などがあげられる。CVMにおけるスコープテストをめぐる議論などもこの典型である⁴²⁾。

アノマリーな選好に基づいて算出される評価指標は次の通りである。

$$\Delta W = W((V(\bar{b}_i, z_i(y^b, e^b)))_{i \in I}) - W((V(\bar{b}_i, z_i(y^a, e^a)))_{i \in I}) \quad (44)$$

観測者が政策評価を行うにあたって、通常、置かれる価値前提は、(1) $V = (V_i)_{i \in I}$ の関数である W の関数形、および、(2) W の中に入るべき行動主体の選好

$\bar{b} = (\bar{b}_i)_{i \in I}$ については寛容の思想に従い社会的な価値判断で問うべきではないとの立場、の二つに集約されるであろう。これをリベラリズムの立場と呼ぼう。一方、(2)については例外もありうるとの主張は古くからみられる。極端な例ではあるが、麻薬中毒者の行動を観察しても麻薬の消費をよしとする価値判断は通常行われぬ。これはパターンナリズムの立場であり、特定の状況にあると社会一般から広く認められる行動主体の選好 $\hat{b} = (\hat{b}_i)_{i \in I}$ 、(ただし、 I_s は特定の状況にある主体の集合) については、特定の状況にない行動主体によって広く共有されている価値規範をあてはめてもよしとする^{43), 44)}。パターンナリズムの立場は、個人の選好の尊重の点においてリベラリズムの立場と対立する。また、外的に設定された選好 $\hat{b} = (\hat{b}_i)_{i \in I}$ のもとで評価が行われると、その選好を仮定して予測される社会経済状態 $y = s(\hat{b}, e)$ や行動主体が選択する行動 $a(\hat{b}_i, z_i^b)$ が、推定された選好 $\bar{b} = (\bar{b}_i)_{i \in I}$ のもとでの $y = s(\bar{b}, e^b)$ 、 $a(\bar{b}_i, z_i^b)$ とは乖離し、政策の影響予測という目的にとって不十分になる。

モデル分析の結果、アノマリーな選好を観測した観測者はいかに政策評価を行うべきであろうか。筆者らは次のように考える。まず、モデルの作成・同定に携わる観測者は社会的意思決定を行うべき立場にはおらず、現実の民主主義的意思決定ルールの内部に存在する情報の非対称性を解消すべく専門的な情報の提供を求められていると認識する。そして、同定されたモデルの現況再現性がきわめて高く、それ以上改良の余地がない場合においては、アノマリーな選好を用いて影響予測および政策評価を行うとともに、それらの作業のもとになっている被観測者の選好が我々の常識と反している可能性があること；あるいは、既存の分析結果から乖離していることを、社会に対して十分に説明すべきではなかろうかと考える。現況再現性が高いものの、アノマリーな選好が観測された行動主体は、パターンナリズムの議論における特殊な状況に置かれている可能性が大きい。我々は分析結果を公表することで社会の関心を分析対象となった行動主体が置かれている現状に目を向けさせ、リベラリズムの立場で政策評価を行うべきか、あるいは、パターンナリズムの立場で政策評価を行うべきか、についての民主的討論の実現を支援すべきであると考える。無論、ここでの問題は認識論および価値判断が入り混じっており、学界内外におけるより厳密な議論が必要なほうというまでもない。

6. おわりに

本稿では、モデル分析に携わる観測者が超人・哲人にはなりえないとの立場から、モデルの作成・同定の

場面における観測と被観測の関係を軸に、土木計画学での行動モデル研究において考慮すべき視点を提示することを試みた。特に、モデル分析に基づいた政策評価が社会的意思決定の結果にまで影響しうる点を強調したつもりである。

最近の計算機処理能力の進歩や統計情報の利用可能性の拡大は、今後、土木計画学における行動モデル研究の流れにも大きな影響を及ぼす可能性がある⁴⁵⁾。これまで技術的問題から困難であった分析の可能性が開けることは、土木計画学が社会的責任を果たしていくうえでも望ましいといえよう。しかしながら、その一方で様々な分析の可能性が広がることで、社会的有用性に乏しいモデルの乱造を招く危険性を有しているのも事実である。本稿が、今後起こりうるであろう事態を想定した上での土木計画学における行動モデル研究のあり方についての一つの問題提起にもなっていることを願っている。無論、筆者らの主張に対する異論も多数あろう。ただし、読者が筆者らの問題提起に何らかの関心を覚えたならば、ひとまず本稿の目的は達成されたといえる。今後の学界内外での活発な議論の一助となれば幸いである。

謝辞：本稿執筆のきっかけとなった土木計画学ワグネルセミナーを企画された北村隆一・藤井聡（京都大学）両先生に感謝いたします。なお、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号 10450188）および文部省科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号 10450186）の支援を受けています。

参考文献

- 1) Keuzenkamp, H.A.: *Probability, Econometrics and Truth: The Methodology of Econometrics*, Cambridge, 1999.
- 2) 土木学会: 非集計行動モデルの理論と実際, 土木学会.
- 3) McFadden, D.: Econometric models of probabilistic choice, in Manski, C. and McFadden, D. (eds.) *Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications*, MIT Press, 1981.
- 4) 例えば, Deaton, A. and Muellbauer, J.: *Economics and Consumer Behavior*, Cambridge, 1980.
- 5) Keuzenkamp, H.A. and Barten, A.: Rejection without falsification: On the history of testing the homogeneity condition in the theory of consumer demand, *Journal of Econometrics*, Vol.67, pp.103-127, 1995.
- 6) Varian, H.R.: Goodness of fit in optimizing models, *Journal of Econometrics*, Vol.46, pp.125-140, 1990.
- 7) 土木学会: 交通需要予測ハンドブック, 技報堂, 1981.
- 8) Wallis, K.F.: Large-scale macroeconomic modeling, in Pesaran, M.H. and Wickens, M.R. (eds.) *Handbook of Applied Econometrics*, Vol.1, 1995.
- 9) Shoven, J.B. and Whalley, J.: *Applying General Equilibrium*, Cambridge University Press, 1992, 小平裕訳: 応用一般均衡分析, 東洋経済新報社, 1993.
- 10) Jorgenson, D.W.: *Growth*, Vol.2, MIT, 1998.
- 11) 上田孝行: 逆問題から見た空間相互作用モデル, 応用力学論文集, Vol.1, pp.147-153, 1998.

- 12) 土木学会編: 土木工学における逆問題, 技報堂, 2000.
- 13) Bauwens, L., Lubrano, M. and Richard, J.-F.: *Bayesian Inference in Dynamic Econometric Models*, Oxford, 1999.
- 14) Bernardo, J.M. and Smith, A.F.M.: *Bayesian Theory*, Wiley, 2000.
- 15) Zellner, A.: *An Introduction to Bayesian Inference in Econometrics*, John Wiley & Sons, 1971, 福場庸・大澤豊訳: ペイジアン計量経済学入門, 培風館, 1986.
- 16) 繁枘算男: ペイズ統計入門, 東京大学出版会, 1985.
- 17) 森地茂, 屋井鉄雄, 平井節生: 個人データと集計データとの統合利用によるモデル構築方法, 土木計画学研究・論文集, No.5, pp.51-58, 1987.
- 18) 小林潔司: エントロピー理論と都市・交通モデリングへの適用, 土木計画学研究・講演集, No.10, pp.291-298, 1987.
- 19) Wilson, A.G.: A statistical theory of spatial distribution models, *Transportation Research*, Vol.1, pp.253-269, 1967.
- 20) Smith, T.E.: A Cost-efficiency principle of spatial interaction behavior, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.8, pp.313-337, 1978.
- 21) 土木学会編: 交通ネットワークの均衡分析, 土木学会, 1998.
- 22) 福本潤也: 集計化された統計情報に基づいた社会的厚生 の計測, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.135-143, 2000.
- 23) Gourieroux, C.: Econometric modelling: methodologies and interpretations, in Kirman, A. and Gerard-Varet, L.-A. (eds.) *Economics Beyond The Millennium*, Oxford, 2000.
- 24) 蓑谷千風彦: 計量経済学の理論と応用, 日本評論社, 1996.
- 25) Oppenheim, N.: *Urban Travel Demand Modeling*, John Wiley & Sons, 1995.
- 26) Smith, T.E.: A cost-efficiency theory of dispersed network equilibria, *Environment and Planning A*, Vol.20, pp.231-266, 1988.
- 27) Smith, T.E.: Most probable analysis: A method for testing probabilistic theories of population behaviour, in Chatterji, M. and Kuenne, R.E. (eds.): *New Frontiers in Regional Science*, New York University Press, 1990.
- 28) Lawrence, D.B.: *The Economic Value of Information*, Springer-Verlag, 1999.
- 29) Graham-Tomasi, T.: Quasi-option value, in Bromley, D.W. (eds.) *The Handbook of Environmental Economics*, Blackwell, 1995.
- 30) 多々納裕一: 開発留保の便益と開発戦略, 応用地域学研究, No.3, pp.21-32, 1998.
- 31) 堤盛人, 清水英範, 福本潤也, 井出裕史: 誤差項に空間的自己相関が存在する回帰モデルのパラメータ推定手法に関する考察, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.49-56, 1998.
- 32) 川除隆広, 多々納裕一, 岡田憲夫: プロジェクトの経済性評価の信頼性分析に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No.23(1), pp.223-226, 2000.
- 33) Veall, M.R.: Applications of the bootstrap in econometrics and economic statistics, in Ullah, A. and Giles, D.E.A. (eds.) *Handbook of Applied Economic Statistics*, Marcel Dekker, 1998.
- 34) Johansen, L.: *Lectures on Macroeconomic Planning*, North Holland, 1977.
- 35) Mueller, D.C.: *Public Choice II*, Cambridge, 1988, 加藤寛 監訳: 公共選択論, 有斐閣, 1989.
- 36) Riker, W.H.: *Liberalism Against Populism*, Waveland Press, 1982.
- 37) 桂木隆夫: 市場経済の哲学, 創文社, 1995.
- 38) Mendus, S.: *Tolerance and the Limits of Liberalism*, 1989, 谷本光男他訳: 寛容と自由主義の限界, ナカニシヤ出版, 1997.
- 39) Pollak, R.A. and Wachter, M.L.: The relevance of the household production function and its implications for the allocation of time, *Journal of Political Economy*, Vol.83, pp.255-277, 1975.
- 40) 坂下昇: ふるさと志向を伴う場合の地域間人口配分, 応用地域学研究, No.2, pp.1-10, 1996.
- 41) Savage, L.J.: Elicitation of personal probabilities and expectations, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.66, pp.781-801, 1971.
- 42) 竹内憲司: 環境評価の政策利用 - CVM とトラベルコスト法の有効性, 勁草書房, 1999.
- 43) 内野正幸: 自己決定権と平等, 岩波講座 現代の法 14 自己決定権と法, 岩波書店, 1998.
- 44) 澤登俊雄 編著: 現代社会とパターンリズム, ゆるみ出版, 1997.
- 45) Blundell, R.: The large data set revolution, in Kirman, A. and Gerard-Varet, L.-A. (eds.) *Economics Beyond The Millennium*, Oxford, 2000.

(2001.3.9 受付)

BEHAVIOR MODELING FROM THE POINT OF THE OBSERVER - THE OBSERVED RELATION -

Taka UEDA and Jun-ya FUKUMOTO

The aim of this paper is to show some perspectives of behavioral modeling in infrastructure planning from the viewpoint of the observer. We pick up the following three topics. Firstly, we interpret model building and identification as an inverse problem and clarify the methodology of representative behavior modeling. Secondly, value of information in welfare terms is defined and we investigate the fundamental principles of survey design. Thirdly, the logical and ethical problems, which may happen in evaluating the policies based on revealed preference of agencies, are introduced.