

帰納的推論に基づく経路選択行動と道路交通システムの動態に関する研究

中山晶一朗¹・北村隆一²

¹正会員 工博 日本学術振興会特別研究員(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

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

不確実性下において、人間は必ずしも確率論的に正しい方法に従って行動するのではなく、自らの経験等によって規則・方法を形成し、それに基づいて行動すると考えられる。本研究の目的は、そのような帰納的推論に基づいた経路選択行動を定式化した上で道路交通システムに関するシミュレーションモデルを構築し、数値実験を通じて、道路交通システムおよび経路選択行動の挙動を考察することである。数値実験の結果、行動主体は、現状とは著しく異なる認知状態である「思い込み」を起こしたり、また、経路選択時における思考を省略する行動の習慣化、行動の「凍結」を起こしたりすることが分かった。また、行動主体が行動を凍結させることなどせず、十分に熟考する場合は利用者均衡に近い値に収束するが、その他の場合は必ずしもそれに収束するとは限らないことが示された。

Key Words: induction, cognitive process, genetic algorithms, route choice, day-to-day dynamics

1. はじめに

交通ネットワークの分析には、利用者均衡を中心とする均衡の概念が多用されており、その理論の拡張が盛んに行われてきた¹⁾。

交通ネットワークにおける均衡の概念は、Wardrop²⁾が提唱した配分原則に始まるところ、通常に用いられるのは、Wardrop 均衡(利用者均衡)と確率的利用者均衡の二つである。Wardrop 均衡は、交通ネットワーク・フローを記述するための最も基本かつ重要な均衡概念であり、その状態は最適化問題として定式化されるとともにその一意性が示され³⁾、数学的な位置付けが明確にされている。また、もう一つの重要な均衡である確率的利用者均衡⁴⁾は、ランダム効用理論に基づいた経路選択行動に基づく均衡概念と解釈することが可能で、Wardrop 均衡と同様に最適化問題として定式化がなされている⁵⁾。

これらの均衡分析は、本来は複雑な交通システムを、均衡という一つの「状態」として捉えようとするものであり、それにより解析的な取り扱いを可能とするものである。均衡分析において、システムを均衡という状態により記述することができるのは、行動論的な意味においては、行動主体に対して完全合理性および効用最大化などの強い仮定を設けているからである^[1]。これらの仮定により効用が最大化された一つの状態として交通行動が記述さ

れ、その集合から構成される交通システムも均衡といいう一つの状態によって捉えられることになる。この仮定と利用者均衡等の概念を結び付けることにより、交通システムを理論的・統一的に捉える枠組みを提供することが可能となったと考えられる。

しかし、人間の計算能力や知識は限られたものであるため、行動と目的との客観的な関係から見ると、人間の合理性は制限されたものである⁶⁾。したがって、完全合理性や効用最大化仮説は理想化された人間を記述するものであり、現実の人間行動に対して仮定できるものではない。

この限定合理性の概念は人間の合理性を消極的に捉えたものであるが、それを積極的に捉えることも可能である。計算能力や知識の限界などの行動が決定される「プロセス」を制約する諸要因を与えとすれば、人間は十分合理的であるとみなせる。この意味での限定合理性は、手続的合理性⁷⁾とも呼ばれる。限定合理性の概念は、人間の行動は効用最大化問題として定式化することはできず、状態としての行動ではなく、行動が生み出されるプロセス、すなわち認知過程を直接に解析することが必要であることを意味するものであると考えられる。行動をそれが決定されるプロセスを含めて記述しなければならないとするならば、当然のことながら、システム自体もその状態が生起するプロセスを記述しなければならないで

あろう。行動主体の限定合理性を考慮するということは、行動主体の認知過程を考慮することであり、さらに、交通システムについても従来の均衡分析のように均衡という一つの状態としてのみ捉えるのではなく、プロセスという視点から捉えることを意味すると考えられる。

後で詳述するが、実際の人間は自らの経験によりどのように行動を行うのかという規則・方法を内生的に形成する、即ち「帰納的推論」を行うと考えられている。本研究では、行動主体の経路選択決定プロセス(経路選択の認知過程)として、帰納的推論を定式化する。そして、帰納的推論を通じて経路を選択する行動主体を含む道路交通システムモデルを構築し、シミュレーション分析によって経路選択行動及び道路交通システムの挙動を考察することが本研究の目的である。このようなシミュレーション分析によって新たな視点、すなわちプロセスの視点から、道路交通システムおよび経路選択行動を考察する。

2. 既往の研究

前節ではプロセスの視点から、道路交通システムを理解し、捉えることの重要性について述べた。これまでにもこのような視点からの研究が幾つか行われている。

Horowitz⁸⁾、飯田ら⁹⁾は、行動主体は予測旅行時間を予測誤差が小さくなるように随時修正すると考え、予測旅行時間を過去に経験した旅行時間の重み付き平均と定式化した経路選択モデルを構築している。筆者ら¹⁰⁾は前述の研究では外生的に決定されていた重みを遺伝的アルゴリズムにより内生的に決定した経路選択モデルを提案し、シミュレーション分析を行った。Canterella & Cassetta¹¹⁾も同様に予測旅行時間は前回の実際の旅行時間や(前回の)予測旅行時間に基づくと考えて定式化を行い、システムの挙動に関して、解析的性質を明らかにした上で、数値計算を行っている。また、Mahmassani & Chang¹²⁾と Hu & Mahmassani¹³⁾は Simon¹⁴⁾の満足化(satisficing)の考え方を取り入れた経路選択モデルによりシミュレーション分析を行っている。Cassetta¹⁵⁾と Cassetta & Canterella¹⁶⁾はマルコフ過程を、小林・藤岡¹⁷⁾はベイズ学習を用いて経路選択行動を定式化している。

以上の既往研究のモデルでは、行動主体がどのように経路を選択するのかがある一つの形式に限定されたものとなっているとともに、実際に人間がそれらを用いて経路選択していることが十分には検証されていない。また、経路選択決定過程が一つの形式でしかモデル化されていないがために、経路選択決定における異質性・多様性が明確には記述されていない^[2]。

本研究では、以上のような問題点を解消すべく、行動主体は次節で述べるように現実の人間が行っていると考えられる帰納的推論によって、どのように経路を選択するのかという経路選択に関する規則・方法自体を学習により形成し、各行動主体が各自形成した規則・方法に従って経路を選択すると仮定して経路選択行動を定式化する。

3. 帰納

交通システムの研究において認知過程をモデル化する場合、当然、それは人間の認知過程に基づくべきである。人間の認知過程に関しては、認知心理学の分野において膨大な研究蓄積が存在する。認知心理学では、人間は抽象的で規範的な規則を適用した演繹的な推論を行っているのでなく^{[18),19)}、経験した個々の事象から仮説を立て、それを適用するという帰納的な推論を行っている^{[20)}、とされる。

本研究で対象としている経路選択行動では以下のような帰納の例が考えられる。ある経路で通常よりかなり混雑した日の翌日は空いていたという経験のある行動主体が何度も積むとする。その行動主体は走行経路が通常よりも混雑していると、翌日のその経路は空いていると期待するに至るであろう。これは、混雑の翌日は空いていたという単なる経験情報が一般化され、それが知識として貯蔵されるとともに、次回からその知識が予測に適用されるようになったことを意味する。このような過程が帰納である。

Holland et al. はこのような帰納を計算論的に取り扱う枠組みを示している^{[20)}。それは if-then ルールを用いるプロダクションシステム²¹⁾が基本となっており、そのルールが遺伝的アルゴリズム²²⁾により修正されることにより帰納のプロセスが記述される。ここで、プロダクション・システムとは、条件部と実行部から構成される if-then ルールによって問題を解決するシステムである。与えられた問題は符号化され、それと条件部が合致する if-then ルールがあれば、その符号化された情報はそのルールの実行部に置き換えられる。そのような処理をその情報が解に到達するまで繰り返す。これらがプロダクション・システムにおける問題解決の基本的メカニズムである。

本研究においては、帰納的認知過程をモデル化するに際して、Holland et al. と同様の枠組みを用いる。本研究でこの枠組みを用いる理由は、一つにはそれが心理学的な根拠を持つからであり、もう一つはそれが数値計算に適しているからである。

ある行動主体の記憶

前日: 経路1を32分で走行
前々日: 経路2を28分で走行

前日 ($i=1$)			前々日 ($i=2$)		
$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
経路1 ($j=1$)	0	0	1	0	0
経路2 ($j=2$)	0	0	0	0	1

20 25 30 35 20 25 30 35 min.

If-then ルール

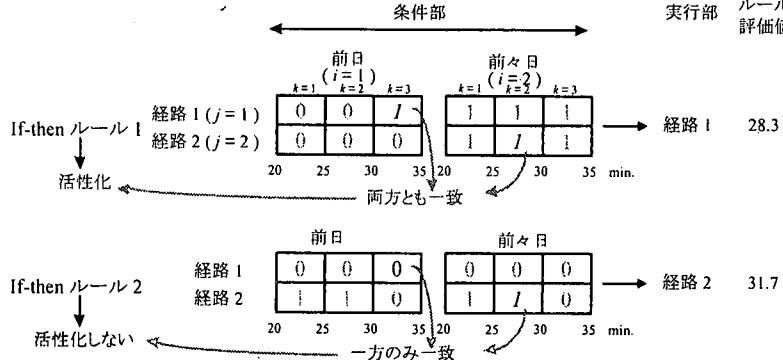


図-1 記憶と if-then ルール

4. 道路交通システムシミュレーションの概要

本研究で構築したシミュレーションモデルは経路選択モデルと交通流モデルから構成される。前者は行動主体(ドライバー)の経路選択を模擬するモデルであり、その認知過程を含むものである。後者は経路選択モデルから得られる各行動主体の選択結果を集計して道路網上の交通状況を算出するものである。行動主体は交通流モデルで算出される交通状況を実走行を通じて経験し、それに基づいて学習しつつ経路を選択するものと考える。

(1) 経路選択モデル

a) 経路選択モデルの概要

本研究では、行動主体は、1) if-then ルールに基づいて行動を決定する、2) 過去 m 日分の走行経路とその時の旅行時間を記憶している、と仮定する。

経路選択モデルの基本的メカニズムは、以下の通りである: 1) 行動主体が記憶する過去 m 日間全ての走行経路およびその旅行時間と合致する条件部を持つ if-then ルール(以下、「活性化」したルール)が指示する経路が選択される、2) 合致したルール、すなわち活性化したルールが複数ある場合は、最もルール評価値が小さいルールの指示する経路が選択され、活性化するルールがない場合は、経路はランダムに選択される、3) 遺伝的アルゴリズムによりより優れたルールが生成されるとともに、ルール評価値が走行経験に合わせて更新される。ここで、ルール評価値とはそのルールがどれ程優れたものかを表す指標であ

り、それが小さいルールほど優れたルールである。

b) 記憶

現実の行動主体が旅行時間を連続実数として正確に記憶するものではないとの同様に、行動主体も連続数として旅行時間を記憶するのではなく、旅行時間がどれ程であったかを近似的に記憶していると仮定する。本稿では、時間を n 区間に分割し、行動主体は経験した旅行時間と対応する区間のラベル、 $k (=1, 2, \dots, n)$ を記憶するとした。

c) if-then ルールの構造

If-then ルールは if に対応する条件部と then に対応する実行部から構成される。実行部にはそのルールが指示する選択経路 y が記載される。条件部は、0 または 1 の値をとるビット x_{ijk} から構成される。ここで、 $i (=1, 2, \dots, l)$ は経路、 $j (=1, 2, \dots, m)$ は記憶日(過去何日目の記憶であるのか)、 $k (=1, 2, \dots, n)$ は旅行時間の区間を表わす。そして、 m 個の記憶に対応する m 個のビット全てが 1 である場合、そのルールは活性化したということになる。

図-1 は、経路数が 2、記憶日数が 2、区間数が 3 の場合の前に経路 1 を 32 分で走行し、前々日は経路 2 を 28 分で走行した行動主体の記憶と if-then ルールの 1 例である。図-1 の上半分が示すように行動主体の記憶は 0 および 1 の値しかとらない行列として表現することができる。その行動主体の前日の記憶は $(i, j, k) = (1, 1, 3)$ のビットが 1 をとることによって、前々日の記憶は $(2, 2, 2)$ の 1 によって表示されている。

If-then ルールの条件部は記憶と同じ行列形式によって表現される。図-1 の下半分の if-then ルール 1 では、前々日に対応するビットは全て 1 の値をとっており、前々日の

記憶がどのようなものであっても前々日に関しては合致することになり、前日に対応するビットでは、経路1で30～35分に対応するビットのみ1であり、前日の経験がその場合にのみ合致することになる。したがって、このif-thenルール1は、前日に経路1を30～35分で走行していたならば前々日の経験がどのようなものであっても経路1を選択することを推奨する。このif-thenルール1が活性化するのかは、行動主体の前日の記憶に対応するビット(1,1,3)と前々日に対応するビット(2,2,2)がともに1の値をとるものであるかどうかを調べればよく、そうすることによりif-thenルール1は活性化することが容易に分かる。一方、if-thenルール2は前日、前々日とも経路2で20～30分に対応するビットが1である。したがって、このif-thenルールは、二日連続経路2を走行し、その二回ともが30分以内であつたならば経路2を選択することを推奨する。このif-thenルール2は行動主体の前日、前々日の記憶に対応する二つのビットのうち一方のビットのみしか1の値をとっていないため、活性化しない。以上より、図-1のような記憶と2つのルールを持つ行動主体は、活性化するルールがif-thenルール1のみであり、この行動主体はif-thenルール1が推奨する経路1を選択することになる。

各ルールはそのルールがどれ程うまく働くかを表す指標であるルール評価値をそれぞれ持つ。複数のルールが活性化した場合、そのうちいずれのルールが実行されるかは、帰納の考え方から従つて、今までに旅行時間の小さい経路をより多く指示していたルール(ルール評価値が小さいルール)が実行されるとする。活性化したルールのうち、実際に走行した経路と同じ経路を指示したルールのみが次式に従つて更新される。

$$f_i = c \cdot f_{i-1} + (1-c) \cdot t_{i-1} \quad (1)$$

ここで、 f_i : i 日目のルール評価値

t_{i-1} : 前日の旅行時間

c : パラメータ ($0 \leq c \leq 1$)

式(1)のように、実際に走行した経路と同じ経路を指示したルールのみルール評価値を更新するのは、行動主体は走行しなかった経路の旅行時間は知り得ないため、そのようなルールのルール評価値を更新することができないからである。

d) 学習

行動主体の学習は、if-thenルールおよびそのルール評価値の修正・更新として記述される。本研究では、if-thenルールの修正・更新に遺伝的アルゴリズム²²⁾を用いていく。

経験情報が一般化・抽象化されたものである知識(3.帰納で述べた仮説)はif-thenルールによって表象される。本

研究で遺伝的アルゴリズムを帰納に適用するに当たっての基本的な考え方は、優れた仮説、すなわちルール評価値の小さいif-thenルールは生存する確率が高く、また、交叉や突然変異という遺伝的操作が繰り返される中で、優れた仮説(if-thenルール)が生成される、というものである。

本研究の遺伝的アルゴリズムでは、if-thenルールの条件部 x_{jk} および実行部 y がビット列と見なされ、それに対して再生産・交叉・突然変異の遺伝的操作が繰り返される。再生産とは、ルール評価値に応じてビット列が再生産されることであり、本稿では、ルール評価値の最も大きい a 個のビット列が削除され、ルール評価値の最も小さい a 個のビット列が繁殖されるとする。ランダムに選んだり組のルール対に対して互いのビット列の一部を入れ替え新たなビット列を生成するのが交叉であり、ある小さな確率でビットの値を変化させるのが突然変異である。

(2) 交通流モデル

交通流モデルは行動主体の経路選択結果を集計して経路交通量を求め、行動主体が経験する旅行時間を算定する。本稿では以下のBPR関数²³⁾を用いて交通量 q と旅行時間 t の関係をモデル化する。

$$t = t_f \cdot [1 + \alpha \cdot (q/C)^\beta] \quad (2)$$

ここで、 t_f : 自由走行時間

C : 交通容量

α, β : パラメータ

5. 数値実験

上述のシミュレーションモデルを用いて、2つの経路により1対の起終点(OD)間が連結された単純な道路網に200人の行動主体を繰り返し走行させる数値実験を行った^[3]。以下では、まず、二つのケースの結果を記載する。ケース1では記憶する日数 m は2、一人の行動主体が持つルールの数 S は50、ケース2では $m=5, S=125$ である。交通流モデルのパラメータに関しては、 α, β が両経路とも共に2.0、そして、経路1では $t_f=20.0, C=200$ 、経路2では $t_f=10.0, C=100$ である。旅行時間の区間数 n は8とした。また、if-thenルールのビット初期値としては、全ての数値実験において、条件部は全て1とし、実行部はランダムに1または0を発生させたものを用いた。

(1) 利用者均衡との比較

図-2から図-4は両経路の旅行時間の推移であり、図-2がケース1の200日までのもの、図-3がその400～600日のもの、図-4がケース2の400～600日のものである。ま

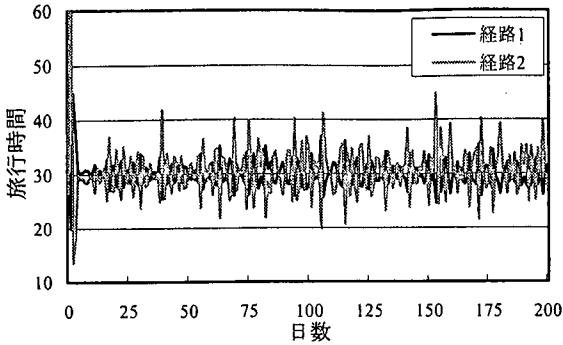


図-2 ケース 1 における 200 日までの旅行時間

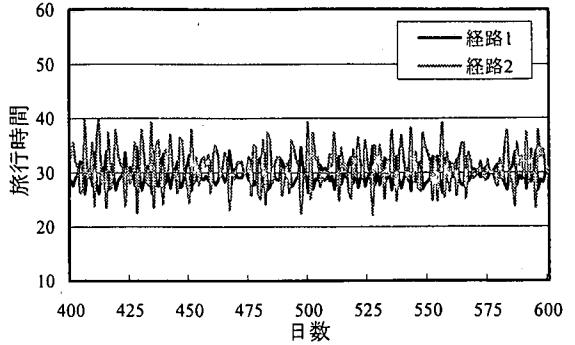


図-3 ケース 1 における 400~600 日の旅行時間

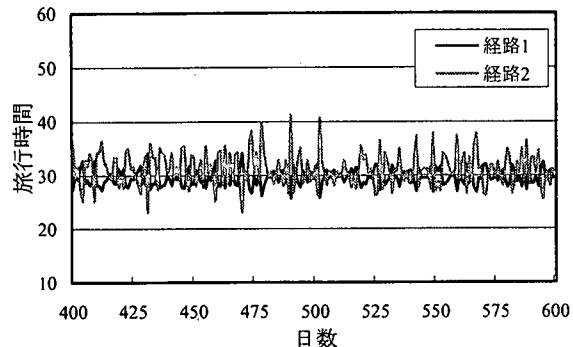


図-4 ケース 2 における 400~600 日の旅行時間

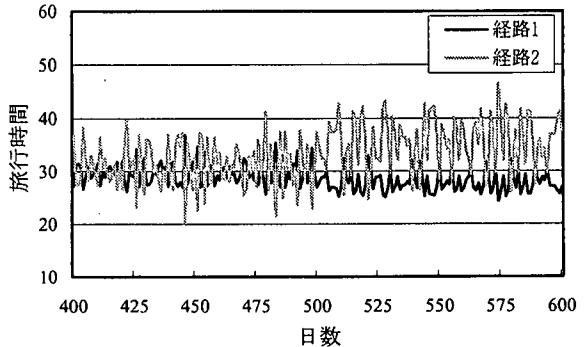


図-5 500 日以降帰納的学習の停止のケース 1 の旅行時間

表-1 交通量の平均と分散およびそれらの均衡との検定

	平均値	t 値	分散値	χ^2 値
ケース 1	98.3	-3.67*	101.9	1020.6*
ケース 2	97.3	-8.38*	50.0	500.8

* : 均衡と有意な差がある
自由度が 500 における χ^2 値の 5% 値は 553.1

た、各ケースの 500~1000 日における経路 1 の交通量の経時的平均と経時的分散は表-1 の通りである^[4]。

まず、各ケースにおいてシステムが利用者均衡(等時間配分)に収束しているか否かを検討する。ここでのネットワークと総交通量の場合、利用者均衡状態では両経路とも交通量は 100 となる。シミュレーションにおける交通量の平均が利用者均衡と一致するという帰無仮説は表-1 に示した t 値により両ケースとも棄却された。しかし、その差は小さく、利用者均衡の近傍とも言える。

ここで分散に関して検討するために、利用者均衡における交通量の経時的分散を以下のように考える。各々の行動主体が自らの経路選択に先立って他の行動主体の経路選択結果を知ることは不可能である。したがって、行動主体が道路交通システムの構造を熟知し、均

衡が維持されるとき、各自が利得を長期的に最大化させると仮定すると、行動主体はそれぞれの経路を確率 0.50 (両経路の旅行時間の期待値が等しくなる経路 1 の選択確率は、BPR 関数が非線形であるため、厳密には、0.5004147...となる)で無作為に経路を選択するという戦略を探ると考えられる。この時実現する交通量は $N = 200$ の二項分布に従う確率変数で、その分散は 50.0 となる。表-1 に示した χ^2 検定の結果から分かるように、均衡とシミュレーション結果の分散が等しいという帰無仮説はケース 1 でのみ棄却され、ケース 1 のみシミュレーション結果の分散が理論値より有意に大きいことが示された。また、ケース 1 とケース 2 との比較では、分散に関して有意な差があった。

次に、行動主体の帰納的推論がシステム全体に及ぼす影響を検討するために、ケース 1 について 500 日以降、行動主体が帰納的推論を行わない場合のモンテ・カルロ・シミュレーションを行った。前節の経路選択モデルに即して言うと、遺伝的アルゴリズムの働きを 500 日以降停止する場合である。このとき、行動主体は、500 日以降、if-then ルールは更新されず、それまでに形成したルール群を用いて経路を選択し続ける。帰納的推論を 500 日以降停止した場合のケース 1 の 400~600 日の旅行時

間が図-5 である。この図から、500 日以降旅行時間の経時的平均の経路間の差が大きくなっていることが分かる。この結果は、旅行時間の平均値が等しくなるためには、帰納的推論が必要であることを示唆していると考えられる。ケース 2 に関しても同様の傾向が見られた。

以上の結果から、行動主体が帰納的推論を行うことにより、旅行時間の経時的平均は、各ケースとも統計的には利用者均衡(等時間配分)とは異なったものの、それに極めて近い値となった。また、経時的分散に関する検定結果は、情報処理能力が高いケース 2 のみ比較のために提示した均衡状態の分散値ほど小さいものとなった。したがって、行動主体の帰納的推論を仮定した場合、情報処理能力が大きい場合、システムは利用者均衡近い値に収束すると言える。

(2) 思い込みと行動の凍結

図-2 から分かるようにシミュレーション初期の短い期間 6~16 日では、交通状態は安定している。この時の経路変更者数は 20 人未満と比較的少ない。これは、最初の 5 日間では旅行時間が大きく変動しており、走行経験の少ない中で極端な旅行時間を経験した行動主体が偏った知識・情報を持ち、経路変更を行わなくなつたためである。このような現象を筆者らは「思い込み」(delusion)と呼んでいる¹⁰⁾。図-2 が示すケース 1 の結果では、このような思い込みが生じるもの、それは行動主体が走行経験を積み、学習する中で解消されている。

ケース 1 に関して、ルールの実行部のビットに突然変異を起こさせない数値実験(ケース 1')を行った(初期状態を含め他の設定はすべて同じである)。ケース 1' の 200 日までの旅行時間が図-6 である。

ここで、思い込みに関して詳細に検討するために経路評価値という指標を用いる。経路評価値はある行動主体の経路に対する評価値であり、その経路を指示する全てのルールのルール評価値の平均値として算出される。既に述べたように、活性化したルールのうち、実際の走行経路と同じ経路を指示したルールのルール評価値が式 (1) に従って更新される。式 (1) から分かるようにルール評価値は経験した旅行時間の重み付き平均であるため、同じ経路を指示するルールのルール評価値の平均値はその行動主体が経路について持つ認知所要時間の指標となり得る。

図-7 から図-10 は全行動主体の経路評価値の散布図である。一つのプロットの x 座標はある行動主体が経路 1 について持つ経路評価値であり、y 座標が経路 2 の経路評価値である。図-7 と図-8 はケース 1 の場合の 15 日目と 50 日目の散布図である。図-7 が示しているように、15 日目の行動主体の経路評価値は 3 つのグループ A, B, C に分けられる。旅行時間の平均値は各経路とも約 30

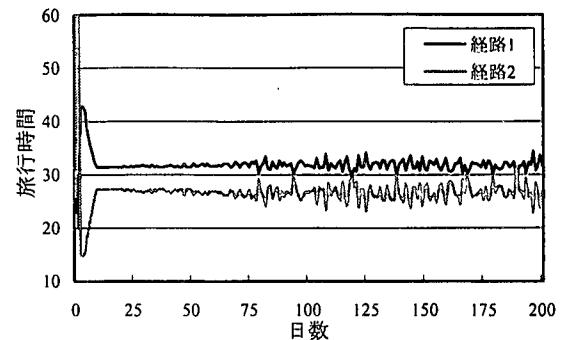


図-6 ケース 1' における 200 日までの旅行時間

分であるため、経路評価値も約 30 となるはずである。したがって、グループ C の行動主体はほぼ正しく経路を評価しているが、グループ A, B の行動主体はそうではなく、前述の思い込みを起こしていることが分かる。しかし、図-8 が示すように 50 日目には、経路評価値は両経路とも 30 付近に集中しており、多くの行動主体の思い込みが解消されていることが分かる。

図-9 と図-10 はケース 1' における 15 日目と 50 日目の経路評価値の散布図である。図-9 では図-7 と同様に行動主体は 3 グループに分かれているが、図-7 と異なり、すべての行動主体は思い込みを起こしている。また、図-9 でのプロット数は行動主体の数である 200 であったが、図-10 ではプロット数が 42 へと大幅に少なくなっている。この理由は、多くの行動主体において、全てのルールが指示する経路がある一方の経路のみとなってしまい、プロットが散布図に記載されていないためである。これは、思い込みが定着し、一方の経路しか走行しないということが習慣化し、他の経路を走行するということが全く考慮の対象外となっていることを意味する^[5]。

ケース 1 とケース 1' の違いはルールの実行部の突然変異の有無である。このため、思い込みの解消は実行部の突然変異によるものであると考えられる。この実行部の突然変異は合理的というよりむしろ「気まぐれ」に別の経路を走行することを意味する。気まぐれに経路を変更することによってのみ、思い込みを起こしている行動主体は別の経路を走行し、そこでの状況を知ることができるために、思い込みが解消されることになる。経路変更にコストがかかるなどの理由で気まぐれが起りにくい場合は、すべての行動主体が思い込みを起こし、システムは「思い込み均衡」^{[10)}に収束する。そして、思い込みの状態がある程度持続すると、行動主体の行動が固定化・習慣化し、その行動主体は他の経路を走行するということを検討すらしなくなる。このように行動が習慣化され、行動が固定される現象は「凍結」(frozen)と呼ばれる^{[24)}。このように行動を凍結させた行動主体は、行動を全く変化

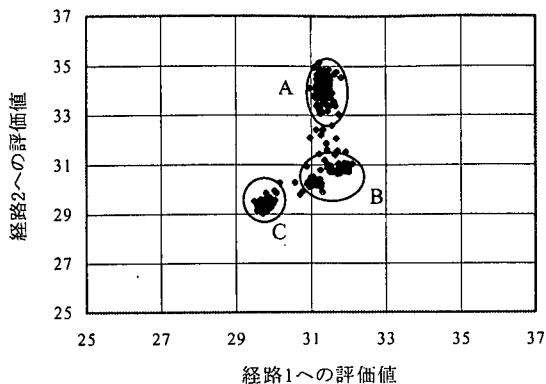


図-7 ケース 1 における 15 日目の経路評価値の散布図

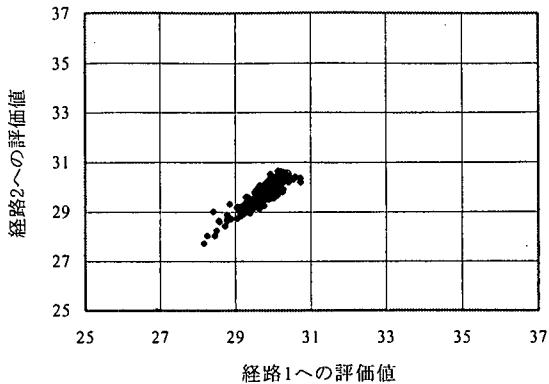


図-8 ケース 1 における 50 日目の経路評価値の散布図

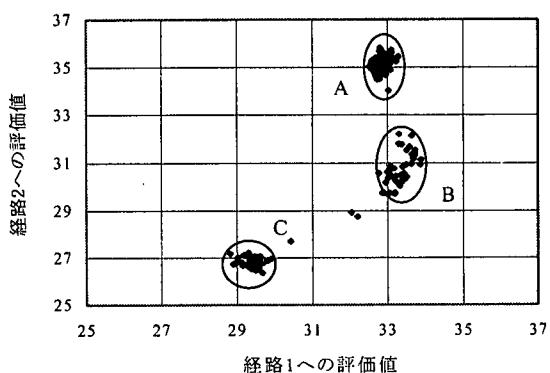


図-9 ケース 1' における 15 日目の経路評価値の散布図

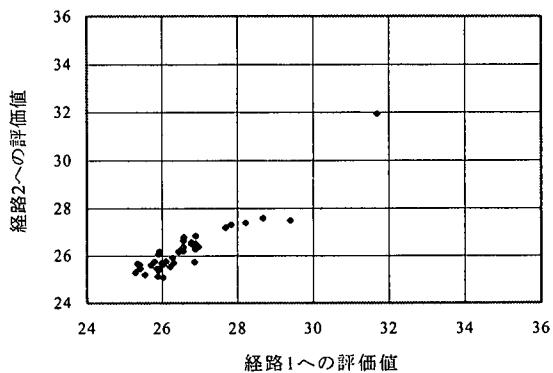


図-10 ケース 1' における 50 日目の経路評価値の散布図

させようとはしない。多数の行動主体の行動が凍結することによって形成された交通システムの状態を筆者等は、「凍結均衡」(frozen equilibrium)と呼ぶこととする^[6]。本稿で明らかにした凍結均衡は、既に筆者等^[10]が明らかにした思い込み均衡がより強固になったものと見ることが可能である。しかし、凍結均衡は、ある程度の期間、交通状況が安定すれば生じ得るものであり、必ずしも認知状態が実際の状態と異なるという意味での思い込みを前提とはしていない。

6. 結果の考察

(1) 交通行動における思い込みと凍結

人間の行動は、習慣(habit)によって決定されるものと熟考(deliberation)によるものとに分けることができ、たいていの行動は習慣によるものと考えられている^{[25], [26]}。新しい問題に直面した場合や状況が今まで異なる新しいものへ変化した場合、人間は様々な要因を考慮して十分

に思考する熟考を行う必要があるが、そうでない場合は思考を省略し、認知的負荷を軽減することのできる習慣によって行動を決定する。既に述べた数値実験において、ケース 1 では、習慣が生じることなく、行動主体は熟考を続けているといえる。これは、行動主体が常に新しい状況に直面していると認識しているため、熟考により行動を決定する必要があるからである。一方、ケース 1' では、行動は習慣化される。これは、前節で述べたように多くの行動主体が気まぐれなども起こさず、同じ経路を走行するため、状況が変化しないからである。行動主体は状況が変化しなければ、認知的負荷を軽減させるため行動を習慣化されることになる^[7]。

これまで交通工学の分野においては行動の凍結や習慣に関して、あまり注意が払われてこなかった。しかし、筆者らは室内実験によってそれが存在し得ることを確認している^[27]。また、行動主体の習慣を考慮した機関選択モデルが少數であるが提案されており^{[28], [29]}、同じく機関選択行動における習慣の諸特性を考察した研究も行われており^{[30], [31], [32]}。習慣が機関選択時の一つの重要な要

因であることが明らかにされている。思い込みの存在に関しても、幾つかの実証的研究によってその存在が示されている^{27),33),34)}。

これらの思い込みや行動の凍結という現象は、完全合理性および効用最大化仮説に基づいて離散選択モデルを適用した交通行動分析の再検討を迫るものと考えられる。効用最大化仮説は、効用が最大化された状態として行動を記述するものであり、効用関数が既知とすれば、客観的な外的情報を代入するだけで行動を記述することができる。しかし、思い込みが示すように行動主体の認知は客観的なものとは大きく異なる場合がある。この場合、客観的な値を代入して行動を予測すれば、系統的な誤差が生じることになる。また、行動の習慣化・凍結は行動主体の行動決定プロセスが効用最大化仮説とはあまりにもかけ離れたものであることを示しており、そのことによって系統的な誤りが生じる恐れがあると考えられる。ミクロなレベルで行動がどのように決定されるのかを改めて詳細に考察し、完全合理性仮説に基づく交通行動分析の是非を検討する必要があると考えられる。

(2) 道路交通システムは均衡に収束するのか？

数値実験結果では、行動主体は情報処理能力が高く、熟考するならば、利用者均衡(等時間配分)に近い状態へ収束する。情報処理能力が小さい場合は、その旅行時間平均は等時間に近い値となるものの、旅行時間の変動が大きく、収束したとは言えない状態となる。また、行動が習慣化した場合は一意には決定されない凍結均衡が生じ、それは一般に利用者均衡の値とは一致しない。

以上のような結果は、行動主体が十分に熟考するならば利用者均衡(等時間配分)に近い値に収束するというものであり、これは常識的な考え方からしても妥当な結果と考えられる。したがって、本研究の結果は、ネットワーク・フローを計算する際に利用者均衡を用いることを否定するものではない。しかし、数値実験結果は値自体が近いだけであり、その成立メカニズムは利用者均衡とは大きく異なるものである。つまり、図-5では帰納的推論を停止した場合、システムは利用者均衡とは大きく異なる値となつことを示したが、これは、旅行時間の経時的平均が等しくなるのは、システムの状態が絶えず変化するものの、行動主体もそれに適応しようと学習する結果であり、利用者均衡が完全情報をもち、合理的に選択した結果であるのとは大きく異なることを意味していると考えられる。したがって、利用者均衡の成立を前提として、道路交通システムの理論を拡張することは必ずしも適切であるとは言えず、それは慎重に検討すべき問題であると考えられる。既に述べたようにシステムの挙動に大きな影響を及ぼす、行動主体が熟考して経路を選択するのか、

それとも習慣的に選択するのか、という点を含め、実際の人間の認知過程を詳細に分析した上で、認知過程を考慮した道路交通システムの性質・メカニズム・挙動を詳細に検討することが必要であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、行動主体の帰納を含む認知過程を考慮した経路選択モデルを構築した上でそれを道路交通システム・シミュレーション・モデルに適用し、数値実験を通じて経路選択行動及び道路交通システムの挙動を考察した。行動主体の認知過程、すなわち、行動が決定されるプロセスを考慮するということは、道路交通システム自体のプロセスを記述することであり、従来の均衡分析が道路交通システムを均衡といいつつの状態として記述してきたものと対照をなすものである。

数値実験の結果、経路選択行動に関して、1) 初期に旅行時間の大きな変動が起こるため、それを経験した行動主体は思い込みを起こす、2) 思い込みは行動主体が気まぐれに経路を変更することによって解消され得る、3) 行動主体が気まぐれを起さず、思い込みの状態がある程度続くと、ある一方の経路を走行し続けるという行動が習慣化し、他の経路を選択するということが検討すらされなくなり、行動が凍結される、また、道路交通システムに関しては、4) 行動主体の情報処理能力が大きく熟考する場合は利用者均衡に近い値に収束するが、そうでない場合は必ずしもそのような値には収束しない、という結果が得られた。以上のような結果は、行動主体に認知過程がどのようなものかによって道路交通システムの性質・メカニズム・挙動が大きく異なることがあることを示すものであり、実際に人間がどのような認知過程によって経路選択するのかを詳細に分析するとともに、得られた知見に基づいた道路交通システムの性質・メカニズム・挙動を考察する必要があることを示唆するものと考えられる。

本稿で得られた知見は、非常に単純な設定の中でシミュレーションによって得られたものである。シミュレーションによる研究では、均衡分析のように体系的・統一的に道路交通システムを把握することはできないため、今後、初期条件を変更したり、様々な条件(例えば、出発時刻選択の考慮など)を附加したモデルを構築し、知見を蓄積することで、道路交通システムの全体像を明らかにすることが必要であると考えられる。また、思い込みや行動の凍結などの現象の実証的研究も、本稿で紹介したものでは十分ではないと考えられるため、さらなる実証的検討が必要であると考えられる。

注

- [1] ゲーム論の観点からみると、(Wardrop の) 利用者均衡はナッシュ均衡である³⁵⁾。ナッシュ均衡が成立するためには、行動主体が完全合理性を持つことの他に、ゲーム構造の知識や共有知識 (common knowledge)，信念の整合的配置 (consistent alignment of beliefs) を仮定する必要がある³⁶⁾。また、システムが定常であることが前提とされ、それを行動主体が知っている場合、合理的な行動主体は旅行時間に対する期待をベイズ学習によって形成するとも考えられ、この場合、システム状態は合理的期待均衡に収束する¹⁷⁾。
- [2] 既往の研究では、予測旅行時間にランダム項を付加することによって経路選択決定の異質性を取り扱っているものもある。しかし、その予測旅行時間の算出形式自体は一つである。したがって、ランダム項を付加したとしても経路選択決定の異質性を十分に定式化したとは言えないと考えられる。
- [3] 総交通量や交通容量の設定が現実の道路交通システムに比べて非常に小さい値となっているのは計算負荷を減少させるためである。
- [4] 各ケースそれぞれ5回のモンテ・カルロ・シミュレーションを行い、500～1000日の旅行時間について分散分析を行った。その結果、5%有意水準の $F(4, 2500)$ が 2.38 である一方、各ケースでの F 値は 0.07, 0.12 であった。したがって、各ケース内においては、乱数による影響はあまりないと考えられる。
- [5] 図-6を見ると、60日以降、いくらかの変動が見受けられるようになっている。これは、活性化しないルールがない場合ランダムに経路を選択することになっているためである。ルールの初期状態の条件部は全て 1 であるため、初期状態では活性化しないルールはほとんど出てこないが、時間が経過するとともに 0 のビットが増え、活性化するルールがない場合がある程度発生するようになるためである。
- [6] 行動を凍結させた行動主体は経路変更しようという動機を全く持っておらず、このような行動主体から構成されるシステム状態は均衡と呼ぶことができる。この凍結均衡はケース 1 やケース 2 の場合と異なり、収束するまでのシステムおよび行動主体の挙動等により、均衡値(収束値)は異なる。
- [7] 経済学で取り扱われる習慣化は、既に行った行動が現在の行動決定に影響を及ぼすことによって同じ行動を繰り返す傾向が生じることを意味していることが多い^{37), 38), 39)}。定式化としては、効用関数に既に行った行動に関するものが変数として入れることによって習慣化を表現する。そのような部分以外の定式化は通常の経済学と同様である。一方、社会心理学の分野では、習慣化は同じ行動を繰り返すようになるとともに行動決定

のための情報処理が縮減されることとして捉えられている^{30), 31), 32)}。本研究では、明示的に情報処理量が減少したことをしてはいない。しかしながら、行動主体が持つルールが全て同じ経路を指示するようになると、それらのルールは互いに矛盾するものではないため、一つにルールに集約することが可能である。このように矛盾しないルールを一つに集約できるという条件を加えると、検索すべきルール数が減少することにより、本研究の結果からも、情報処理量が減少することが分かる。

参考文献

- 1) 土木学会土木計画学研究委員会：交通ネットワークの均衡配分-最新の理論と解法-, 土木学会, 1998.
- 2) Wardrop, J. G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, vol. 1, pp. 325-378, 1952.
- 3) Beckmann, M., McGuire, C. G., and Winsten, C. B.: *Studies in Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, 1956.
- 4) Daganzo, C. F. and Sheffi, Y.: On Stochastic Model of Traffic Assignment, *Transportation Science*, vol. 11, pp. 253-274, 1977.
- 5) Fisk, C.: Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment, *Transportation Research*, vol. 14B, pp. 243-255, 1980.
- 6) Simon, H. A.: *Administrative Behavior- A Study of Decision-making Process in Administrative Organization*, Macmillon, New York, 1945.
- 7) Simon, H. A.: From Substantive to Procedural Rationality, *Method and Appraisal in Economics*, S. J. Latsis eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 129-148, 1976.
- 8) Horowitz, J. L.: The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, *Transportation Research*, vol. 18B, pp. 13-28, 1984.
- 9) 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏：経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学・講演集, No. 12, pp. 29-36, 1989.
- 10) Nakayama, S., Kitamura, R., and Fujii, S.: Drivers' Learning and Network Behavior: A Dynamic Analysis of the Driver-Network System as a Complex System, *Transportation Research Record*, No. 1676, pp. 30-36, 1999.
- 11) Cantarella, G. E. and Cascetta, E.: Dynamic Processes and Equilibrium in Transportation Networks: Towards a Unifying Theory, *Transportation Science*, vol. 29, pp. 305-329, 1995.

- 12) Mahmassani, H. S. and Chang, G.-L.: Experiments with Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters, *Transportation Research*, vol. 20B, pp. 297-320, 1986.
- 13) Hu, T.-Y. and Mahmassani, H. S.: Day-to-Day Evolution of Network Flow under Real-Time Information and Reactive Signal Control, *Transportation Research*, vol. 5C, pp. 51-69, 1997.
- 14) Simon, H. A.: *Models of Man: Social and Rational*, John Wiley & Sons, New York, 1957.
- 15) Cascetta, E.: A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks, *Transportation Research*, Vol. 23B, pp. 1-17, 1989.
- 16) Cascetta, E. and Canterella, G. E.: A day to day and within-day dynamic stochastic assignment model, *Transportation Research*, Vol. 25A, pp. 277-291, 1991.
- 17) 小林潔司, 藤岡勝巳:合理的期待形成過程を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 17-26, 1993.
- 18) Cheng, P. W. and Holyoak, K. J.: Pragmatic Reasoning Schemas, *Cognitive Psychology*, vol. 17, pp. 391-416, 1985.
- 19) Johnson-Laird, P. N.: *Mental Models- Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- 20) Holland, J. H., Holyoak, K. J., Nisbett, R. E., and Thagard, P. R.: *Induction- Processes of Inference, Learning, and Discovery*, MIT Press, Cambridge, 1986.
- 21) Newell, A. & Simon, H. A.: *Human Problem Solving*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
- 22) Goldberg, D. G.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts, 1989.
- 23) Bureau of Public Roads: *Traffic Assignment Manual, Urban Planning Division*, U. S. Department of Commerce, Washington D. C., 1964.
- 24) Lewin, K.: Group Decision and Social Change, *Readings in Social Psychology*, E. E. Maccoby et al. eds., Henry Holt and Company, New York, pp. 197-211, 1958.
- 25) Katona, G.: *Psychological Analysis of Economic Behavior*, McGraw-Hill, New York, 1951.
- 26) Kornai, J.: *Anti-Equilibrium*, North-Holland, Amsterdam, 1971.
- 27) 中山晶一朗, 山田憲嗣, 藤井聰, 山本俊行, 北村隆一: 旅行時間の思い込み認知と同一行動の繰り返しによる選択肢の絞り込みについての実験研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, -印刷中-, 2000.
- 28) Goodwin, P. B.: Habit and Hysteresis in Mode Choice, *Urban Studies*, vol. 14, pp. 95-98, 1977.
- 29) Banister, D.: The Influence of Habit Formation on Modal Choice- A Heuristic Model, *Transportation*, vol. 7, pp. 19-33, 1978.
- 30) Verplanken, B., Aarts, H., and van Knippenberg, A.: Habit, Information Acquisition, and the Process of Making Travel Mode Choice, *European Journal of Social Psychology*, vol. 27, pp. 539-560, 1994.
- 31) Verplanken, B., Aarts, H., van Knippenberg, A., and van Knippenberg, C.: Attitude versus General Habit: Antecedents of Travel Mode Choice, *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 24, pp. 285-300, 1997.
- 32) Aarts, H., Verplanken, B., and van Knippenberg, A.: Habit and Information Use in Travel Mode Choices, *Acta Psychologica*, vol. 96, pp. 1-14, 1997.
- 33) Fujii, S., Gärling, T., and Kitamura, R.: Changing Habitual Drivers' Attitudes Toward Public Transport: Triggering Cooperation in a Real-World Social Dilemma, submitted to *Environment and Behavior*.
- 34) 藤井聰, 中野雅也, 北村隆一, 杉山守久:自動車通勤ドライバーの公共交通機関の思い込み認知とその改善についての実証的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp. 636-637, 1999.
- 35) Charnes, A. and Cooper, W. W.: Extremal Principal for Simulating Traffic Flow in a Network, *Proceedings of the National Academy for Science of the United States of America*, vol. 44, pp. 201-204.
- 36) Heap, S. P. H. and Varoufakis, Y.: *Game Theory: A Critical Introduction*, Routledge, London, 1995.
- 37) Pollak, R. A.: Habit Formation and Dynamic Demand Functions, *Journal of Political Economy*, vol. 78, pp. 763, 1970.
- 38) Detemple, J. B. and Zapatero, F.: Asset Prices in an Exchange Economy with Habit Formation, *Econometrica*, vol. 59, pp. 1633-1657, 1991.
- 39) Constantinides, G. M.: Habit Formation: A Resolution of the Equity Premium Puzzle, *Journal of Political Economy*, vol. 98, pp. 519-543, 1990.

(1999.11.15 受付)

ROUTE CHOICE BASED INDUCTIVE REASONING AND ROAD TRANSPORTATION SYSTEM'S DYNAMICS

Shoichiro NAKAYAMA and Ryuichi KITAMURA

Under uncertainty, people do not necessarily behave stochastically, but behave based on rules and regulations which they form through their experiences. We formulated the route choice based on such inductive reasoning, and constructed the model of road transportation system. The aim of this study is to examine the behavior of road transportation system and route choice through simulation analysis. The results of the simulation, agents form "delusion" which means an extremely biased perception of the travel time, and habit which allow their behavior to be frozen. If the agents deliberate, the system nearly converges to user equilibrium; otherwise the system does not necessarily converge to it.