

# ドライバーの学習を考慮した道路交通の動的解析: 複雑系としての道路交通システム解析に向けて

## *Drivers' Learning and Road Transportation System Behavior:*

### *A Dynamic Study toward the Complex-Systems Analysis of Road Transportation*

中山晶一郎<sup>1</sup>, 藤井聡<sup>2</sup>, 北村隆一<sup>3</sup>

By Shoichiro NAKAYAMA, Satoshi FUJII, Ryuichi KITAMURA

#### 1 はじめに

道路交通システムを数理的に取り扱おうとする場合、従来から利用者均衡をはじめとする交通均衡の概念が用いられることが多く、現在でも様々な理論的拡張がなされている<sup>1)</sup>。

このような均衡分析は、道路交通システムに関する一般的な性質やその規範的な状態を把握するためには極めて有効な方法論である。しかし、現象記述を行う場合に用いられることの多い利用者均衡には、完全情報を前提とするなどいくつかの問題点が指摘されている<sup>2)</sup>。また、室内実験による研究では、交通量は利用者均衡に収斂する様子は見られないと結論付けられ<sup>3)</sup>、実際の観測による交通量と交通均衡による計算交通量とは30-50%ないしそれ以上食い違うことは珍しくないとされる<sup>4)</sup>。このように、利用者均衡が実際に成立するか否かは必ずしも自明ではないといえる。

利用者均衡が成立するか否かという問題について議論するためには、道路交通システム全体の挙動の集計指標による観測が不可欠であるが、それに加えてシステムを構成する個々のドライバーの記憶、判断、学習といったミクロな要素が把握できれば、様々な角度から詳細な分析ができ、それによって道路交通システムの挙動の性質を本質的に把握できる可能性が期待される。当然のことながら実証的な見地からの分析が極めて有効であるが、それではミクロからマクロまでの全ての状態変量を観測することが極めて困難である上、可能であるとしても得られたデータを解析するだけでは潜在的な認知、学習プロセスを含む因果関係全般を明らかにすることも容易ではない。これらを考え合わせると、道路交通システムで日々繰り返される様々な因果の連鎖を再現する仮想的なシミュレーションを実行してその結果を分析する、という方法も有効なアプローチの一つであると考えられる。

そこで本研究では、より人間の認知過程に近い仮定

から道路交通システムシミュレーションモデルを構築し、そのシミュレーションモデルにおいて、交通均衡は成立するのか、また、成立するとすればその均衡はいかなるものであるのか、などの問題を考察し、それらを通じて道路交通システムをどのように取り扱うべきかを考察することを目的とする。

また、日々の変動に支配的な影響を及ぼしていると推測されるドライバーの学習には、従来までの学習を考慮した研究であるHorowitz<sup>5)</sup>や飯田ら<sup>6)</sup>の研究における走行経験の蓄積という短期的学習以外に、知覚旅行時間の分布形の変化<sup>[1]</sup>や意思決定構造自体の変化という長期的学習が存在する。本研究ではこれらの点に着目し、ドライバーの異質性を許容し、走行経験の記憶と旅行時間の知覚・認知を再現し、かつ、遺伝的アルゴリズムを用いて長期的学習をモデル化した上で、day-to-dayシステムの動的な挙動を再現し、考察を加えることとする。

#### 2 既往の研究

ドライバーの学習過程を考慮することの必要性は、道路交通システムモデルの動学化と合わせて従来から盛んに指摘されてきた<sup>7)</sup>。

Horowitz<sup>5)</sup>や飯田ら<sup>6)</sup>は、ドライバーの学習を考慮した上で道路交通システムのday-to-dayに関する動的な挙動をシミュレートし、その結果に考察を加えるという研究を行っている。これらの研究は、ドライバーが知覚している旅行時間(知覚旅行時間)を過去に経験した旅行時間の重み付き平均として定式化した上で、日々の交通状態の変動をシミュレートしている。ただし、その重み(ウェイト)は外生的に与えたものである。そして、交通量は必ずしも利用者均衡に収斂するとは限らず、場合によっては振動することもあるという結果を得ている。しかし、このような重み付けによる行動モデルは適応期待形成と呼ばれ、頻繁に用いられるものの、それはドライバーがそのウェイトをどのように推計したかに関して何も言及しておらず、行動モデルとしての明確な基礎を持ったものとは言い難いとされる<sup>8)</sup>。すなわち、長期的学習の考慮が必要とされる。また、Horowitz<sup>5)</sup>や飯田ら<sup>6)</sup>のモデルではすべてのドライバーが同じ意思決定を行うとされるが、複数の要素から構成されるシステムの挙動に、個人間の様々な異質性と

Key Words : 学習, 経路選択, 複雑系, 遺伝的アルゴリズム

1 学生員, 工修, 京都大学大学院土木システム工学専攻

2 正 員, 工博, 京都大学大学院土木システム工学専攻

3 正 員, Ph. D, 京都大学大学院土木システム工学専攻

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

Tel 075-753-5136 Fax 075-753-5916

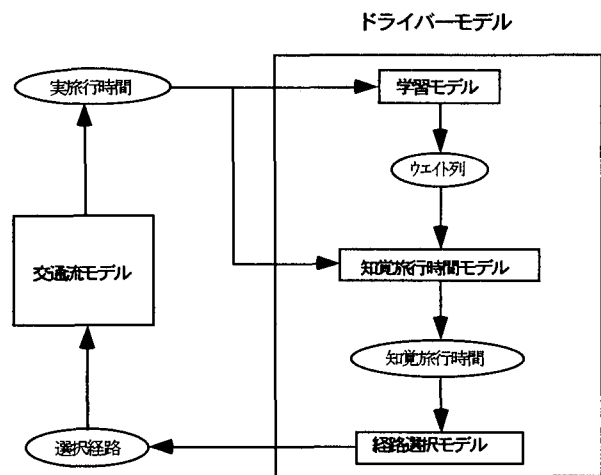


図1 シミュレーションモデルの概要

その分布の形が大きな影響を与える可能性は否定できない。

### 3 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルの概要を説明するにあたり、まず、シミュレーションモデルの構築および数値実験における我々の立場を明らかにする。

本研究は、交通均衡の概念に比して、より現実に近い交通行動を仮定した場合の道路交通システムの（動的）性質に対する理解を深めるために行うものである。そのために、本研究は、行動記述モデルを均衡分析において仮定される理想的な交通行動からより実際の交通行動に近いものへと精緻化するというアプローチをとる。しかしながら、完全な行動記述モデルの構築は不可能であることから、何らかの仮定・前提を設けざるを得ない。このような研究上の限定的な状況においては、やはり、部分的には非現実的な仮定も許容した上で問題を簡略化し、焦点を絞った分析を行うことが有効な方法論であろう。

我々はこのような研究立場に立ち、シミュレーションモデルの構築に際して、道路交通システムの最も根本的なメカニズムである交通行動と交通状況（混雑状況）との相互作用と本研究で着目しているドライバーの学習・認知から生じる因果連鎖の二つを記述することに焦点を絞り、その他の要素はできる限り簡素なものにすることとした。

このような考え方の下で、本研究では、図1に示すような道路交通システムシミュレーションを用いる<sup>9)</sup>。なお、ドライバーが経験して獲得する実際の旅行時間（実旅行時間）は自分の走行した経路のもののみである。

本シミュレーションモデルはドライバーモデルと交通流モデルから構成されるが、前者はドライバーの知覚・経路選択・学習を再現するモデルであり、知覚旅行時間モデル、経路選択モデル、学習モデルの三つの

サブモデルから構成される。後者はドライバーモデルから得られる各ドライバーの選択結果を集計して全体の交通状況の再現を図るものである。ドライバーは交通流モデルで再現される交通状況を実際に走行することを通じて経験し、それに基づいて学習し、次の知覚旅行時間を形成するものとする。

#### (1) ドライバーモデル

ドライバーの学習を考慮する必要があることは既に述べた通りである。

学習の定義は必ずしも統一されてはいないが、学習は、1) 結果として行動に変化を引き起こす、2) 練習または経験の結果として生じる、3) 比較的永続的な変化である、4) 直接観察することはできない、という性質を持つものとされる<sup>10)</sup>。ここで、2) は自らの経験に「反省」を加え、それを反映させる、すなわち経験と行動には相互作用があることを意味し、3) は学習にはある程度の継続性が必要であることを意味している。学習のモデル化には、1-3) の性質が具備されることが必要である。

本研究では、学習のモデル化に際して、従来から考慮されてきた短期的学習のみならず、長期的学習も取り扱うが<sup>12)</sup>、短期的学習の記述には旅行時間の重み付き平均を用いる。この理由は、それが従来から頻りに用いられているとともに、ある程度の再現性がある<sup>11)</sup>、とされるからである。本研究では、重み付き平均による短期的学習に長期的学習を付加することになるが、モデル化の際には、この2つからなる学習が前述の1-3) の性質を具備する必要がある。このような形で長期的学習をモデル化する方法の一つとして、遺伝的アルゴリズムを用いる方法があり、本研究ではそれを用いることにする。遺伝的アルゴリズムは、生物進化の過程を模倣したアルゴリズムであり、最適化や学習のモデル化の一手法として用いられるものである（遺伝的アルゴリズムの詳細については後述）。なお、本研究では上記の性質を満たす形での学習モデルとして遺伝的アルゴリズムを適用しているが、現時点では、個人がこのアルゴリズムに則って現実に学習を行っていることは実証されていない。しかし、本モデルは上述の学習の性質を満たすものではあり、少なくともその意味においては妥当なものと考えられる。

#### (a) 知覚旅行時間モデル

本研究では、既に述べたように従来まで頻りに用いられてきた旅行時間の重み付き平均として知覚旅行時間モデルを構築した。

ドライバーの経路選択行動は、所要時間が不確定であるという意味で、典型的な不確実性下の意思決定<sup>12)</sup>の一つである。不確実性下の意思決定を記述するモデルとして、多くのモデルが提案されているが<sup>13)</sup>、本研究では、不確実性を連続的な関数で表現するのではな

く、離散的な複数の主観的な所要時間の集合で表現する。すなわち、個々のドライバーは各経路について複数の旅行時間を想起しているものと考え、口語表現をするならば、ドライバーは走行経験のうち旅行時間の大きかったものを重視するのか、小さかったものを重視するかなどによって、「この経路はA分かかかるかもしれないし、B分かかかるかもしれない…」と旅行時間に関するいくつかの考え方をもっているとする。そして、ドライバーの想起する複数の旅行時間を知覚旅行時間要素  $\bar{t}_m^k$  ( $k=1,2,\dots,K$ ) ( $m=1,2,\dots,M$ ) と呼ぶこととする。ここに、 $m$  は経路、 $k$  は経路ごとに想起する旅行時間のラベルである。

以上を基本的な考え方として、知覚旅行時間を定式化するにあたり、以下を仮定した。

- ・ドライバーは走行経験として、経路ごとに過去  $n$  回分の旅行時間しか記憶できない。ここで、この経験し記憶している旅行時間を経験旅行時間と呼ぶ。
- ・知覚旅行時間要素は経験旅行時間の重み付き平均である。
- ・想定される旅行時間の最小値  $t_{\min}$  と最大値  $t_{\max}$  により定義される区間を  $l$  等分し、それぞれの区間に1つずつウエイトを定義する。それら  $l$  個のウエイトをウエイト列と呼ぶことにする。
- ・個人は、各経路に複数のウエイト列をもち、各ウエイト列によりそれぞれ一つの知覚旅行時間要素を算定する。
- ・各経路の複数の知覚旅行時間要素から任意に選んだものをその経路の知覚旅行時間とする<sup>[4]</sup>。

以上の仮定に基づいて、知覚旅行時間要素を以下のように定式化した。

$$\bar{t}_m^k = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{n+1} \delta_{ij,m} \cdot w_{i,m}^k \cdot t_{j,m}}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{n+1} \delta_{ij,m} \cdot w_{i,m}^k} \quad (1)$$

$$\delta_{ij,m} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{\min} + (i-1) \cdot (t_{\max} - t_{\min}) / l \\ & < t_{j,m} \leq t_{\min} + i \cdot (t_{\max} - t_{\min}) / l \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ここで、 $\bar{t}_m^k$  : 経路  $m$  のウエイト列  $k$  により形成される知覚旅行時間要素

$t_{j,m}$  : 記憶している経路  $m$  の  $j$  番目の旅行時間

$t_{0,m}, t_{n+1,m}$  : ドライバーが経路  $m$  について想定する旅行時間の最小値と最大値

$w_{i,m}^k$  : 経路  $m$  のウエイト列  $k$  の要素  $i$

式(1)におけるウエイト列  $\{w_{i,m}^k\}$  は旅行時間の予測の考え方を表わしている。例えば、大きな  $i$  に対応するウエイト、すなわち、値が大きい経験旅行時間を重み付けするウエイトが、他のウエイトの比べて相対的に大きい場合は、走行経験のうち旅行時間が大きかったものを重要視するという考え方を表わしている。このような幾通りものの組

み合わせによって、さまざまな旅行時間予測の考え方を表現することができる。また、記憶する走行経験が  $n$  個だけとしているのは、ドライバーの記憶が限られたものであること、その忘却効果を表現しようとしたものである。

### (b) 経路選択モデル

経路選択モデルは、ドライバーは最短経路を利用するとの仮定のもと、知覚旅行時間が最小となる経路を算出する。

### (c) 学習モデル

本研究では、各ドライバーは各経路の実旅行時間をよりの確に予測することを目指してウエイト列  $\{w_{i,m}^k\}$ 、すなわち、「旅行時間を予測する考え方」を変化させる。そして、本来的に遺伝的アルゴリズムが遺伝子の環境への適応をモデル化したものである点に着目して、ウエイト列を遺伝子列と見なし、実旅行時間への適応を、即ち経験する実旅行時間に基づくウエイト列の改訂を、遺伝的アルゴリズムを用いて行う。具体的には、以下の手順で遺伝的アルゴリズムを適用する。

- 1) 再生産：ある日における利用経路  $m'$ 、その時の実旅行時間が  $t_{i,m'}$  であった場合、 $|t_{i,m'} - \bar{t}_m^k|$  の値が小さいウエイト列  $k$  が優秀なウエイト列と見なされる。そして、この値に応じて、優れたウエイト列が増殖され、劣ったウエイト列は削除される。
- 2) 交叉：より優れたウエイト列が生成されるために、再生産によって生き残った全ウエイト列の中からいくつかのペアが作られ、それらのウエイト列の一部が交換される。
- 3) 突然変異：突発的に優れたウエイト列が生成されるために、交叉の後、ある一定の確率で任意のウエイトの値が変化される。

知覚旅行時間要素がドライバーの知覚旅行時間分布からの標本であると見るとき、上に示した遺伝的アルゴリズムによるウエイトの更新によって、Horowitz<sup>[5]</sup>や飯田ら<sup>[6]</sup>の研究では一定であった知覚旅行時間分布の分散が内生的に決定されることになる。また、前述の学習の1-3)の性質に関しては、ウエイト列が変化するため1)は満たされ、再生産では  $|t_{i,m'} - \bar{t}_m^k|$  に従ってウエイト列の削除・増殖がなされるため2)も満たされ、全てのウエイト列が変化してしまう訳ではないので継続性があるため3)も満たされる。

### (2) 交通流モデル

本研究では、出発時刻選択を考慮しないため、同一時間帯に出発するドライバーのみを取り扱う。したがって、交通流モデルはドライバーの経路選択結果を集計して経路交通量を求め、それをういてドライバーが経験する旅行時間を算定するだけとし、以下のBPR関数によって、交通量  $q$  と旅行時間  $t$  の関係が表わされるとする。

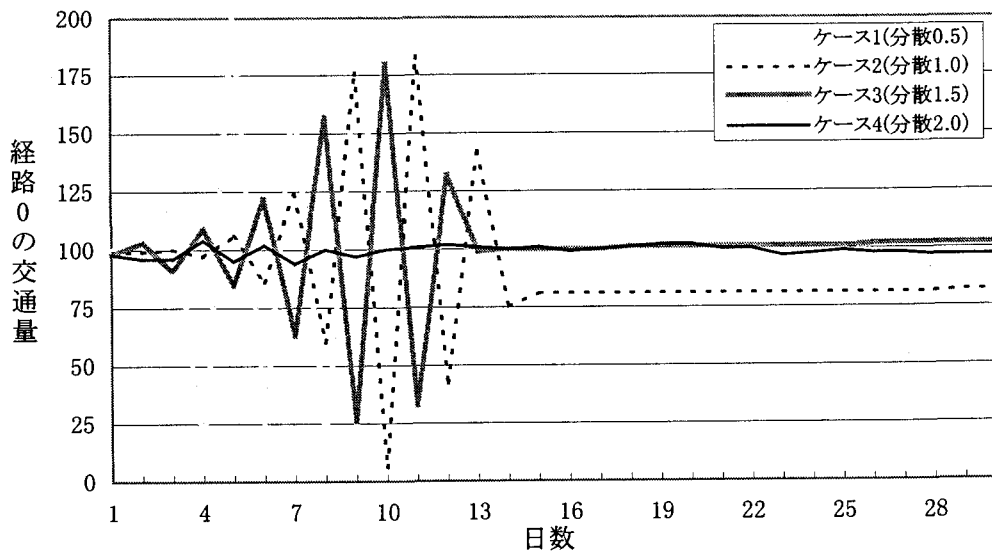


図2 各ケースにおける経路0の交通量の推移

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

ここで、 $t_f$  : 経路の自由走行時間  
 $C$  : 経路の交通容量  
 $\alpha, \beta$  : パラメータ

#### 4 数値実験

上述のシミュレーションモデルを用いて、1ペアの起終点(OD)と同質な2経路(ここでは経路0と経路1)からなる単純な道路網に、200人のドライバーを繰り返し走行させる数値実験を行った<sup>[5]</sup>。交通流モデルでは、両経路とも、 $t_f = 16.0$ 、 $C = 200$ 、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 2$ とした。また、ドライバーの記憶に関しては、 $n = 3$ とした。

初日においてドライバーは走行経験をもたないが、式(1)には外生的に与えられる $t_{0,m}, t_{n+1,m}$ が含まれているため、ウェイトの初期値さえ与えられれば、ドライバーは知覚旅行時間を算出し、選択経路を決定することができる。初期ウェイトは正規乱数であるが、本稿では、その分散が0.5, 1, 1.5, 2である4ケースを掲載する。図2は各ケースにおける経路0の交通量の推移を示しているが、これよりいずれも最終的には定常的な状態に収束していることが分かる。ケース3, 4では経路間の旅行時間がほぼ等しい状態(利用者均衡)に収束しているが、ケース1, 2ではそれに収束していない。また、ケース1, 2, 3のいずれもが、定常状態を迎えるまでに交通量が大きく振動しており、その振幅がある日を境として増減している一方で、初期ウェイト分散の大きなケース4においてはこの振動が特に見られなかった。これらのシミュレーション結果は、1) 道路交通システムにおいて必ずしも利用者均衡が成立するわけではないこと、2) ドライバー間の異質性の度合いによってシステムの挙動が異なり、収束状態も一意には決定され

ないこと、3) 均質なドライバーだけで構成されるシステムよりは、多様なドライバーが多く存在するシステムの方が安定すること、を示唆しているものと考えられる。

図3は各ケースにおける初日、経路間の交通量差が最も大きかった日、定常状態を迎えている日(各ケースとも20日目)のそれぞれの日での全ドライバーの両経路の知覚旅行時間の散布図を示す。正規乱数で初期値を与えたため、いずれのケースも初日の知覚旅行時間分布は互

いに相似な一つの集団を形成しているが、時間が経過して収束状態に至る過程で、状態1: 初日の状態がほぼ保存されている状態、状態2: いずれか一方の経路の旅行時間を長く見積もっているドライバーから構成される2つの集団が形成されるという状態、というどちらかに分岐することが分かる。なお、システムが「状態2」に収束してからは、ドライバーによる経路変更はほとんど生じていない。

ドライバーは、大きな経路旅行時間を経験することで、その経路の旅行時間はかなり大きいと知覚すると、以後その経路の利用を差し控えるために、その経路の知覚・認知状況は更新されず、極端な走行経験がそのドライバーの知覚・認知状態を支配し続けることになる。このようなある種のドライバーの「思い込み」<sup>[6]</sup>によって、「状態2」でみられるような二つの集団が形成されることになった。ここで、「思い込み」は、初期の走行経験の記憶によってドライバーが一方の経路の旅行時間が実際よりもかなり大きいと知覚・認知している状態であり、より一般的にいうと、自らの経験や獲得した情報が極端であったなどのために、それらが記憶に残り続け、しばしば実際とは異なる知覚・認知状態となる現象のことである。一方、ケース4のように多様なドライバーがもともと存在する、すなわち、一方の経路の旅行時間が長いとのある程度の「思い込み」をもつドライバーが当初から多く存在する場合には、図2が示すように最初から交通量の変動が少なく、個々のドライバーの知覚旅行時間がほとんど更新されないため、結果的に図3が示すように当初の知覚旅行時間の分布が保存されるのである。

「思い込み」が生じるのかどうかは、ドライバーが大きな旅行時間を経験したか否か、すなわち、道路交通システムが極端な交通量の振動を起こしたのか否かに依存している。そして、その交通量の極端な振動の有無は初期のウェイトの分散、つまりドライバーの異質性に

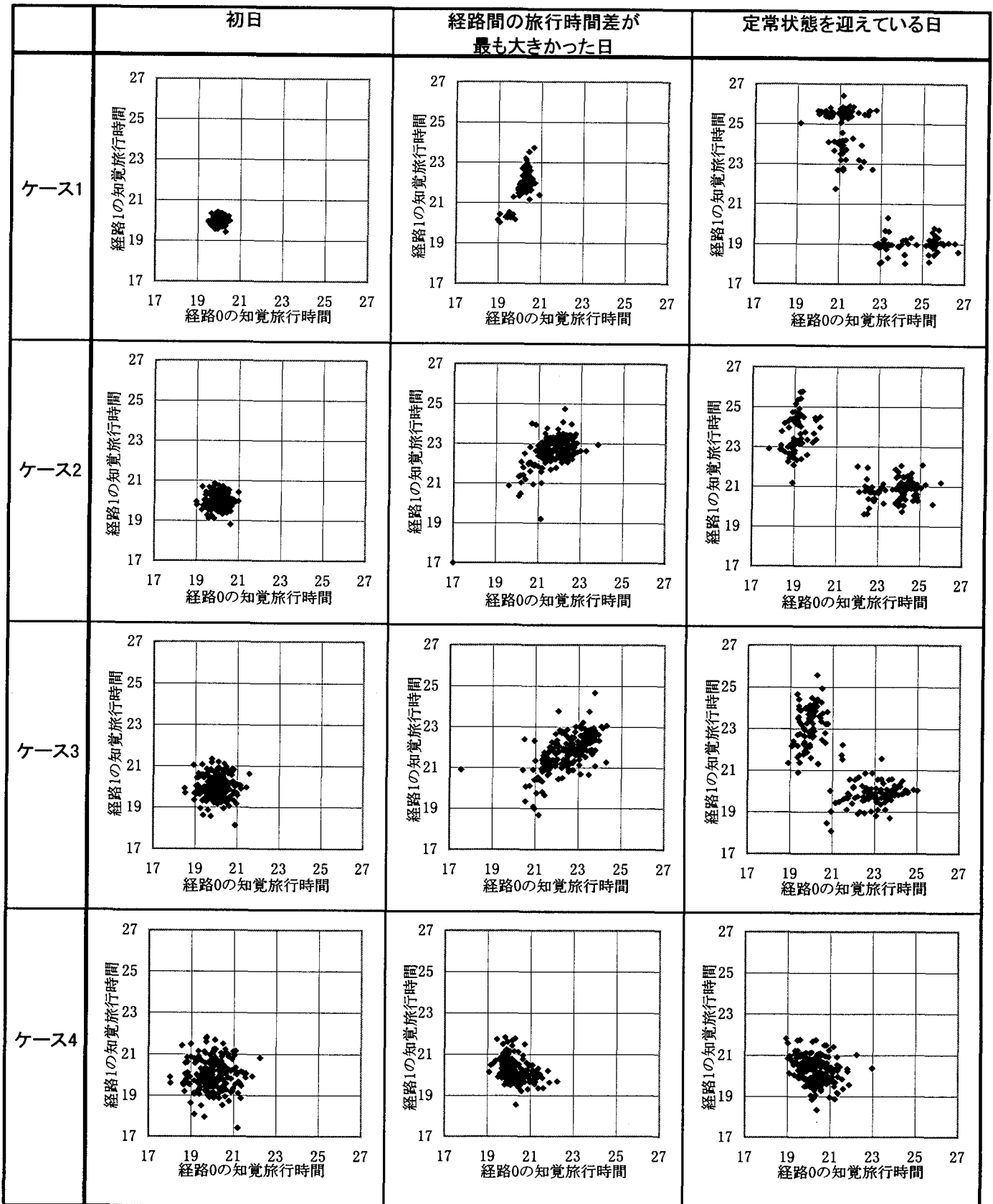


図3 各ケースにおける両経路の知覚旅行時間の散布図

依存している。したがって、このシステムは、状態が過去の出来事や初期値に依存するという「経路依存性」をもつシステムということができ、そして、ドライバーの「思い込み」は取り消すことができないものであるため、システムは時間的に不可逆でもあるとい

える。

## 5 複雑系としての道路交通システム

### (1) 思い込み均衡

既に述べたように、ドライバーは知覚旅行時間の最小となる経路を選択するため、ケース1、2および3での収束状態は、確率的利用者均衡<sup>1)</sup>と同じく、「自分だけが経路を変更することによって、旅行時間を短縮することができないとドライバーが認知している状態」である。したがって、この状態は均衡といえる。

しかしながら、この均衡は一意性をもたないとともに、どのような状態に収束するかは過去の出来事や初期値に依存するなど従来までの交通均衡の概念と全く性質が異なる<sup>7)</sup>。ここでは、それらと区別するために、この均衡を「思い込み均衡」と呼ぶことにする。「思い込み均衡」は、「ドライバーが上述の思いこみの状態にロックイン<sup>13)</sup>され、経路変更によって旅行時間を短縮することができないと認識している個人がシステム内で多数を占めることでシステムが安定する状態」といえる。

このような「思い込み均衡」は交通機関選択においても存在する現象である可能性を指摘できる。もし自動車交通と公共交通の間において「思い込み均衡」が成立しているならば、たとえ公共交通のサービス水準を向上させたとしても、自動車交通から公共交通への転換をさほど期待できないであろう。自動車利用者は、公共交通は不便であると思いついており、もはやそれには目もくれないためである。

## (2) 複雑系としての道路交通システム

均衡分析では、個々のドライバーの完全情報と最短経路選択の2つが仮定されるならば、利用者均衡の成立が保証され、かつ、適切に最適化問題を定式化すれば、一意な均衡解が得られるため、個々のドライバーの認知や意思決定が直接的に扱われる必要がない。すなわち、均衡分析は、解析的に取り扱えるように道路交通システムをできるだけ単純に捉えようとしたものであるといえる。一方、本研究では、均衡の成立を前提とせず、個々のドライバーの経験、記憶や認知、そして、経路選択と意思決定構造の学習という種々の要素をモデル化し、それを集計化して日々の交通状態を再現した。すなわち、均衡成立のための強い前提の下で現象を単純に記述することを避けて、道路交通システムをできるだけ『複雑な』ままに記述することを目指したものである。このアプローチにより、個々のドライバーの行動と交通ネットワークにおける現象の間の新たな関係を明らかにすることができた。特に、本研究のシミュレーション分析の結果、個々のドライバーが交通状況に関して「思いこみ」を起こすことで均衡が成立することがある可能性が示された。このような知見は、均衡の成立を前提としている均衡分析では得られないものである。見方を変えると、このアプローチは、道路交通システムにおいては均衡分析が取り扱えないような『複雑さ』にもその本質があると認

識するものである。

本研究では、道路交通システムを複雑系として捉える視点が有効であることを主張するが、その理由は、単に道路交通システムが複雑系であるからというものだけではなく<sup>8)</sup>、それを複雑系として取り扱わなければ、道路交通システムの本質的な性質のうちのいくつかを見逃すことになりかねないからである<sup>9)</sup>。その例として、本研究では、シミュレーション実験を通して、ドライバーの(初期の)異質性によってシステムの収束状態が分岐するとともに、システムは「経路依存性」をもつということを示した。ただし、第3節で述べたようにシミュレーションモデル自体は非常にシンプルなものであるため、このような結果は道路交通システムの一側面を表わしたものに過ぎない。しかし、従来までの交通均衡の概念では不問にされてきた道路交通システムの複雑な性質について、その一側面を明らかにすることができたことは、複雑系として道路交通システムを見ることの必要性を指摘する上においては、いくらかの意味をもつものであると考えられる。

さらに、交通計画を検討する際にも、複雑系として道路交通システムを捉えるという視点が有効となると考えられる。例えば、情報提供政策を取り上げると、均衡分析では一意な均衡解が前提とされているために単に提供する情報の内容だけが問題となると思われる。しかし、道路交通システムを複雑系として捉える立場において、本研究で得られた知見からは「思い込み均衡」が生じることがありえると指摘できるため、適切な時期に適切な情報を提供しなければ非効率な「思い込み均衡」に陥り、その後、情報提供の効果があまり現れないということにもなりかねないなどという可能性が個々の行動から説明するというミクロな視点から指摘できる。このように道路交通システムを複雑系として捉えることによって、木目の細かい交通政策に向けてのミクロな視点から基礎的な知見を得るが期待できる。

## 6 結論

本研究では、均衡、および完全情報の成立を前提とせず、個々のドライバーの経路選択や認知・学習等を既存の行動理論に関する知見を参考にしつつ逐一モデル化し、それを集計化して動的解析を行った場合に出現する道路交通システムがいかなるものかを考察した。数値実験の結果、道路交通システムは、最終的には定常状態に収束するものの、その状態はシステム内の運転者の特質の分布によって分岐<sup>14)</sup>するとともに、不可逆な時間構造をもつなど均衡分析ではあまり取り扱われなかった「複雑な」性質があることが示された。当然ながら、システムの挙動は行動モデルの妥当性に依存しているものである以上、行動モデル、行動仮説

の吟味を実証的研究と理論的研究を繰り返す必要がある。しかし、上述のように、複雑な性質があること、その一方で、新たな収束点としての「思い込み均衡」という従来では指摘されていなかった状態での安定した均衡（すなわち無意味にさまようだけではない状態）が存立する可能性があることが示されたのは、本研究の成果であろう。行動モデルの性質によっては従来の利用者均衡とは異なる均衡が現出する可能性がある以上、伝統的な交通均衡の概念のように道路交通システムをできるだけ単純に捉えようとするアプローチがある一方で、本研究で示したような複雑系として道路交通システムを捉えることも道路交通システムの性質を把握する上で有効なアプローチであるといえるのではなかろうか。

今後の研究課題としては、モデルが過度に込み入ったものになることを避けるために考慮すべき要因を慎重に吟味しつつ、以下のように学習・認知モデルを進展させることがあげられる。本研究での学習は予測の高精度化という点での学習であったが、遅刻確率を下げるなど他の観点での学習も考えられ、それらの点に関しても、予測の高精度化という学習をモデル化した後に、順次考慮し、モデルを精緻化させるというアプローチをとりたい。次に、シミュレーションによって得られた知見である「思い込み」に対する実証的検討を行うことが今後の課題としてあげられる。この「思い込み」は本研究で得られた知見の核心とも言える部分であり、その実証的検証は不可欠である。さらに、本研究で述べたドライバーの行動仮説を検証することがある。人間の行動や思考に関しては心理学の分野で膨大な研究蓄積があり、心理学における手法を用いることなどが考えられる。

## 謝辞

本研究を推進するにあたり、文部省科学研究費・萌芽的研究の助成を受けた。ここに記して謝意を表したい。

## 脚注

[1] Horowitz<sup>5)</sup>や飯田ら<sup>6)</sup>の研究では、知覚旅行時間を経験旅行時間の重み付き平均にランダム項を付加したものとしている。しかし、ランダム項を旅行時間に関する不確定要素とし、学習によって知覚旅行時間分布が学習に精緻化されると考えるならば、その分散も内生的に決定される必要がある<sup>2)</sup>。

[2] 認知心理学では、人間の記憶は短期記憶（作動記憶）と長期記憶の2種類があるとされる<sup>15)</sup>。短期記憶とは、長期記憶において情報処理される状態にある（活性状態の）情報もしくは新たに入力された情報のことである<sup>16)</sup>。長期記憶は情報がそのままの形で貯蔵されたも

のだけでなく、それが抽象化、構造化されたもの、すなわち知識として蓄えられている<sup>16)</sup>。このような記憶システムに基づく情報処理として人間の認知過程を考える時、Horowitz<sup>5)</sup>や飯田他<sup>6)</sup>の重み付き平均によって旅行時間を予測するというものは、ドライバーがそのような方法によって旅行時間を予測するという知識があると前提したものとみなせる。長期記憶は経験によって知識も修正・精緻化されるものであるため、重みが変わらないというのはそのような学習（長期的学習）が行われていないことを意味する。また、このような短期・長期の区分を踏まえて、本研究では、長期的学習は意思決定プロセスを規定する知識自体が変化することであり、短期的学習は情報が単に入力・更新されることによって行動の変化を生じさせるシステムとしている。

[3] 従来において提案されている不確実性下の意思決定モデルとしては、期待効用理論<sup>12)</sup>、主観的期待効用理論<sup>17)</sup>、非線形効用理論<sup>18)</sup>、プロスペクト理論<sup>19)</sup>、状況依存焦点モデル<sup>20)</sup>、imprecise probabilityを仮定するモデル<sup>21)</sup>、ファジー理論<sup>22)</sup>など、不確実性をファジー理論や確率理論、あるいは、拡張した確立理論等で表現するものが提案されている。

[4] (c)学習モデルで述べるように知覚旅行時間要素は遺伝的アルゴリズムによって内生的に決定される。遺伝的操作によって、より現実に即した知覚旅行時間要素が増殖するので、それらをランダムに選んだものであっても、学習を再現していることになる。

[5] 総交通量が200台と少ないのは計算上の理由による。しかし、シミュレーションにおける総交通量の多少は、システムの挙動に対して本質的な影響を及ぼさないものと考えられる。

[6] このドライバーの「思い込み」という現象自体は、上記のシミュレーションモデルを用いた数値実験として、既に発表されている<sup>9)</sup>。本稿では、数値実験をさらに進め、以下で示すように、思い込み均衡の概念や道路交通システムを複雑系として捉える必要性などを新たに主張している。

[7] 一意性をもたない交通均衡の概念としては、限定合理的利用者均衡 (bounded rational user equilibrium) がある<sup>23)</sup>。

[8] 複雑系の定義は確立されていないものの、「多数の要素から成る系において、要素間の動的な相互作用によって多種多様な部分系が生成されるとき、このような系を〈複雑系〉という<sup>24)</sup>とする見方がある。このような見方に従うとき、道路交通システムは複雑系であるということができると考えられる。

[9] 均衡分析では捉えることができない性質についてやそれを用いることで偏った分析結果が生まれるという指摘は、複雑系という言葉は使われていないものの、交通需要予測に関する動的分析の必要性の中では既に成

されている<sup>25)</sup>。

## 参考文献

- 1) 松井寛ほか：交通ネットワークの均衡分析－最新の理論と解法－，土木学会，東京，1998。
- 2) 飯田恭敬：交通モデルの課題と展望，土木計画学・論文集，No. 10，pp. 1-13，1992。
- 3) Iida, Y., T. Akiyama and T. Uchida: Experimental Analysis of Dynamic Route Choice Behavior, Transportation Research, Vol. 26B, pp.17-32, 1992.
- 4) Horowitz, J. L.: Travel and Location Behavior: State of the Art and Research Opportunities, Transportation Research, Vol.19A, pp.441-453, 1985.
- 5) Horowitz, J. L.: The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, Transportation Research, Vol.18B, pp.13-28, 1984.
- 6) 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。
- 7) 例えば，松井寛：交通需要の動的分析の諸相と今後の展望，土木学会論文集，No. 470/IV-20，pp. 47-56，1993。
- 8) 小林潔司，藤岡勝巳：合理的期待形成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。
- 9) 中山晶一朗・藤井聡・北村隆一・山本俊行：ドライバーの学習過程を考慮した道路交通システム解析，第17回交通工学研究発表会・論文報告集，pp. 73-76，1997。
- 10) Mednick, S. A., H. R. Pollio and E. F. Loftus 著，八木晃訳：学習，岩波書店，東京，1980。
- 11) 飯田恭敬，内田敬，宇野伸宏：交通情報を考慮した経路選択行動の動的解析，土木学会論文集，No. 470/IV-20，pp. 77-86，1993。
- 12) Von Neumann, J., and O. Morgenstern: Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press, Princeton, 1944.
- 13) Arthur, B.W.: Self-reinforcing Mechanisms in Economics, The Economy as an Evolving Complex System edited by Anderson, P.W. et al., Addison Wesley, Redwood City, Calif., pp.9-31, 1988.
- 14) 長倉三郎他：理化学辞典，pp. 661-662，岩波書店，1998。
- 15) Atkinson, R. C. and R. M. Shiffrin: Human Memory- A Proposal System and its Control Process, The Psychology of Learning and Motivation 2 edited by Spence K. W. and J. T. Spence, Academic Press, New York, 1968.
- 16) Anderson, J. R.: Cognitive Psychology and its Implications, W. F. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- 17) Savage, L. J.: The Foundations of Statistics, Wiley, New York, 1954.
- 18) Fishburn, P. C.: Nonlinear Preference and Utility Theory, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1988.
- 19) Tversky, A. and D. Kahneman: Prospect Theory- An Analysis of Decision under Risk, Econometrica, vol.47, pp.263-291, 1979.
- 20) 竹村和久：フレーミング効果の理論的説明，心理学評論，Vol.37，pp.270-291，1994。
- 21) Walley, P.: Statistical Reasoning with Imprecise Probability, Chapman and Hall, London, 1991.
- 22) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets, Information and Control, vol.8, pp.338-353, 1965.
- 23) Mahmassani, H. S.: On Bounded Rational User Equilibrium in Transportation Systems, Transportation Science, Vol.21, No.2, pp.89-99, 1987.
- 24) 廣松渉ほか編：哲学・思想事典，岩波書店，東京，pp.1367, 1998。
- 25) Goodwin, P., R. Kitamura and H. Meurs: Some Principales of Dynamic Analysis of Travel Behaviuor, Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Oxford Studies in Transport edited by P. Jones, Avebury, Aldershot, pp.56-72, 1990.

## ドライバーの学習を考慮した道路交通の動的解析：複雑系としての道路交通システム解析に向けて

中山晶一朗・藤井聡・北村隆一

本研究では、ア・プリオリに均衡が成立するとは仮定せず、個々のドライバーの学習過程を考慮した経路選択行動をモデル化した上で道路交通システムの day-to-day のダイナミクスに関してシミュレーション分析を行った。その結果、道路交通システムは、必ずしも利用者均衡に収束するとは限らないこと、初期状態や過去の出来事に依存すること、ドライバーの持つ交通状況に関しての「思い込み」がシステムの挙動を大きく左右することなどが分かった。これらの結果は、道路交通システムを単純なシステムと捉える従来からの交通均衡の概念では道路交通システムの本質的な性質のうち幾つかを捉えられない可能性があり、それを複雑系として捉える必要があることを示唆している。



---

**Drivers' Learning and Road Transportation System Behavior:****A Dynamic Study toward the Complex-Systems Analysis of Road Transportation****Shoichiro NAKAYAMA, Satoshi FUJII, Ryuichi KITAMURA**

A model system of drivers' learning and route choice was formulated in this study, and was applied to examine the day-to-day dynamics of road transportation systems through micro-simulation. The results indicate transportation systems do not necessarily converge to user equilibrium, may reach "deluded equilibrium" which is formed by drivers' false perceptions of travel times, and have "path-dependence". These imply that equilibrium analysis could fail to capture some essential natures of a transportation system, which therefore should be treated as a complex system.

---