

# マルチエージェント型ファジィ交通行動モデルの提案\*

## Multi-Agent Simulation Model for Fuzzy Travel Behaviour Analysis \*

秋山孝正\*\*・奥嶋政嗣\*\*\*・和泉範之\*\*\*\*

By Takamasa AKIYAMA\*\*・Masashi OKUSHIMA\*\*\*・Noriyuki IZUMI\*\*\*\*

### 1. はじめに

現実的な都市交通政策検討の局面においては、交通行動者の多様性、地域の特異性あるいは行動規範の不確実変化など複雑な社会現象に直面する。一律の交通行動原理に基づく交通行動分析モデルは、理論的な現象説明と計画規範の設定に有用である。しかしながら、自律的で協調的な都市交通計画の要請を見れば複雑系としての社会現象記述が必要不可欠である。

このような背景を踏まえて、本研究では精緻な交通行動記述と都市交通現象の複雑系として記述可能な交通行動モデルを提案する<sup>1) 2)</sup>。具体的には、まず空間情報(GIS)を利用した交通行動記述方法を述べる。これは交通行動を時間的・空間的に高精度で推計する精緻な交通現象記述を意図している。つぎに、交通行動記述モデルを内包する広域的エージェントモデルとして構成する。すなわちマルチエージェント型の複雑系モデルとして交通現象を表現する。このような複雑系交通行動モデルでの観測結果から、都市交通政策に対する内発的・自律的な交通現象変化の可能性を議論できる。

### 2. 交通行動分析モデルの構成と複雑系

ここでは、都市交通現象を複雑系としてモデル化するための基本的な交通行動モデルを作成する。すなわち従来型の理論的枠組みによる交通行動分析モデルを構築するとともに、複雑系モデルの交通行動推計プロセスとしての具体的構成方法を検討する。

#### (1) 複雑系としての交通行動分析の意義

知的情報処理において、複雑系とは、複数の構成要素をもち、構成要素が有機的に結合している全体的なシステムを示す。したがってシステムの構成要素は自律的規則にしたがって変化することから、システム全体の状態・振舞いが決定される様相を持つ<sup>3)</sup>。

したがって、複雑系モデルは多数の研究分野において、要素還元的な分析方法での解決の困難な問題に対する応用が検討されている<sup>4)</sup>。

なかでも生命現象を複雑系として記述する「人工生命」の研究は代表的である<sup>5)</sup>。これは計算機上の仮想環境に、生命体の現象を表現するシミュレーションを構成するものである。生命体の活動における複雑現象を記述することで基本的様相を観測しようとする試みである。

たとえば、モータリゼーションを自己組織化の進展として表現した研究は複雑系の有用性を示すものである<sup>6)</sup>。さらに、近年では人工生命と同様の複雑系モデルにおいて、構成要素(エージェント)を人間として、社会現象を複雑系として表現した「マルチエージェントシミュレーション」モデルも提案されている<sup>5) 13)</sup>。

また道路交通流解析へのエージェントモデルの適用においては、Transportation Researchの特集号が企画されている<sup>14) 20)</sup>。ここには運転者を自律的エージェントとした交通渋滞対策・交通管理に関するモデル分析が報告されている。また、交通行動分析に関して、マルチエージェントシミュレーションを用いた例が、海外の既存研究にいくつかみられる<sup>21) 22)</sup>。これらの研究では大域的な交通状況に対するエージェントの意思決定を記述し、この相互作用が大域的な交通状況に影響を与えるモデルを提案している。しかしながら、現実規模の都市交通モデルを構成した例は少ない。そこで本研究においては、特にマルチエージェントによる現実規模の都市交通システムを対象として、エージェントの相互作用から生じる大域的現象を観測し、都市交通現象の発生過程を分析する。

一方、都市交通現象は、交通行動に関連する極めて多様な構成要素がある。しかしながら、通常の交通行動モデルにおいては、効用最大化などの特定の意思決定構造を既定する。このとき、上記のような交通現象の複雑性の表現には、交通行動者の意思決定構造の特定形式でのモデル化は多くの問題を生じるものと思われる。

なかでも都市交通政策導入時においては、交通行動者は個人的な経験的知識に基づいた判断を行う場合もあり、また周辺状況の変化により意思決定構造自体が変化する場合もある。さらに交通行動者の意思決定は、広域的な(系全体の)交通流動変化の影響を受ける。複雑系モデルとは、こうした交通現象に伴う各種の複雑さを包含して、仮想的交通空間を構成しようとする提案である。

\*キーワード：交通行動モデル，複雑系，マルチエージェント

\*\*正会員，工博，岐阜大学工学部社会基盤工学科

(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1, TEL:058-293-2443, FAX:058-230-1528, E-mail:takamasa@gifu-u.ac.jp)

\*\*\*正会員，博士(工)，岐阜大学工学部社会基盤工学科

\*\*\*\*正会員，修士，(財)計量計画研究所

本研究では複雑系モデルの基本として交通行動者を自律的エージェントとするマルチエージェントモデルを作成する。本研究のマルチエージェント交通行動モデルにおけるエージェントモデルと交通行動モデルの関係を図-1に示す。ここで交通行動モデルは、各エージェントの1日の交通行動を決定するものである。

この際、エージェント（交通行動者）の動向に関しては、既存の交通行動モデルの成果が利用できる。すなわち、個人単位の交通行動分析モデルでは、行動主体の時間的・空間的制約や、日常的活動と移動の相互関係を明示的に表現することができる。したがって、都市交通現象の複雑系モデル構成には、交通行動者の交通行動を時間的・空間的に精緻に表現する交通行動分析モデルの利用は有効に機能するものと思われる。

通常の交通行動に関するマイクロシミュレーションでは、一定の交通行動規範を定式化し、個別の交通行動を集計的に加算して、都市交通現象を記述する。マルチエージェントシステムでは、交通行動者をエージェントとするため、個別の交通行動を都市圏で集計的に交通現象として算定する意味では類似しているが、エージェントモデルとしての相違点を挙げることができる。

すなわちモデル構成上では、①エージェント単位の行動規範の多様性を前提として、確率的効用理論などの統一的行動規範で定式化していない。また②エージェントのランダム性・あいまい性を考慮し「相互作用」の記述を前提とする。またモデルの適用性に関して、通常のマイクロシミュレーションでは、都市交通政策のインパクトに関する全体的な都市交通現象変化の推定を意図する場合が多いが、ここでは、③多様なエージェントの局所的行動変化が都市交通現象全体に波及する「創発現象」を観測する意図を持っている。

## （2）マルチエージェントモデルの基本的構成

複雑系を対象とする研究においては、現在広く採用されている「構成的手法」と呼ばれるアプローチが有効である。構成的手法とは、基本的なモデルの作成により、その全体の振る舞いを観察することにより、対象の理解を深めようとするアプローチである<sup>3)</sup>。本研究では、このようなマルチエージェントシミュレーション手法により、都市交通現象を表現する。

ここでは、マルチエージェントシミュレーションの概要について説明する。一般に、マルチエージェントシミュレーションとは、多数の自律的な「エージェント」と呼ばれる行動主体を計算機上の仮想環境に配置し、行動ルール、行動主体間の相互作用により出現する社会構造や群行動などの観察により、対象とするシステムに関する現象のメカニズムを分析する手法である。

「エージェント」とは仮想環境における行動主体で

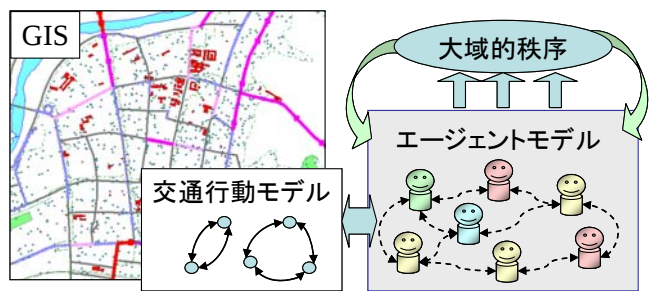


図-1 本研究のエージェントモデルと交通行動モデル

ある。各エージェントは内部状態と行動ルールを持つ。また環境や他のエージェントとの相互作用により、内部状態は変化することもある。またエージェントの行動は、「ルール」によって規定される。エージェントと環境の関係、エージェント間関係を規定するルールがある。

マルチエージェントシミュレーションでは、全体の挙動を直接支配するルールは存在しない。また、任意のエージェントが他のエージェントを支配するルールや、環境が全体の挙動を決定するようなルールも存在しない。したがって、このシミュレーションでは、巨視的な社会構造や群行動はエージェントの自律的な行動の結果として「ボトムアップ」に創発される<sup>4)</sup>。

本研究のマルチエージェントモデルでは、交通行動者を「自律的エージェント」と記述し、都市交通政策導入時の局所的で多様な意思決定から波及する現象を記述するものである。このため基本的構造として、①エージェントは都市交通政策の関連トリップ変更により適応する、②個別の交通行動連鎖による交通行動パターン変化を環境（都市全体）で算定する、③各エージェントは交通行動結果に対する満足度により適応方法を変更する。

このように、都市交通システムにおける個別交通行動者（エージェント）の局所的变化が波及的にシステム全体に影響するという形式を実現しようとしている。

## （3）空間情報を利用した交通行動分析モデル

ここでは、交通行動分析モデルの精緻化に空間情報を利用する。交通行動者の時間的・空間的制約および交通行動の詳細記述はモデル高度化の基本である。

ここでは既存研究において構成されたファジィ交通行動モデルを利用する<sup>23),24)</sup>。すなわちPT調査結果を基本として、交通行動者のトリップ連鎖を対象に、目的地、交通手段、出発時刻、経路などを推計する。またアクティビティについても、活動内容、滞在時間が推計する。

ここでは、さらにGIS情報とPT調査結果と統合的利用を提案し、交通行動に関する空間データ情報を精緻化することで高精度な推計を可能とする<sup>25),26)</sup>。

ここで空間情報を付加したサービス水準データ（エンジニアリングデータ）を作成するために、PT調査の

サンプルである各交通行動者の活動場所（トリップエンド）の位置（GIS 座標）を特定する。空間情報を利用した活動位置特定手順を図-2 に示す。

具体的には、対象サンプルの各トリップについて、①到着地範囲特定および②出発地範囲特定を行う。これらのステップを対象サンプルのトリップの回数に対応して繰り返す。このとき、①同一世帯居住者の居住地は共通であることおよび②通勤者（通学者）サンプルについて勤務地（通学地）は唯一存在することを考慮して、居住地範囲および勤務地範囲を記憶し、逐次更新することで範囲を限定していく手順としている。このため、到着地（出発地）の類型（[1]居住地、[2]勤務地、[3]その他）に基づいて、実行されるプロセスが以下の3種類のアルゴリズムを用いることにより選定される。

[1] 居住地範囲特定：①複数の帰宅トリップの到達可能範囲の共通領域の抽出および②同一世帯居住者の居住地存在範囲の共通領域の抽出により、世帯単位で居住地位置を特定する。

[2] 勤務地範囲特定：特定された個別施設、居住地位置および時空間制約（交通手段別の到達可能範囲）により、勤務地位置も範囲を限定できる。

[3] その他の到着地施設特定：当該ゾーンに多数存在しない①学校、②病院、③官公庁、④スーパー、⑤供給処理施設、⑥公園、⑦体育施設などの個別施設を特定する。

このように、交通行動データ（PT調査）情報に、GISの付加的情報を統合することにより、①交通行動者の空間位置が高精度に特定できる。②任意時刻における交通行動者の存在位置を詳細に表現できる<sup>14)</sup>。

これらの諸点を踏まえて、「空間情報を利用した交通行動分析モデル」を構成した。このときの交通行動者の意思決定過程を図-3 に示す。

本モデルは既存研究<sup>27)</sup>の交通行動パターンの推計モデルを基本的には利用している。したがって、各ステップでの算定過程の詳細の記述は参考文献に譲る。ここでは、図-3 のようにモデル化された交通行動決定過程を簡単に紹介する。このモデルでは、交通行動決定に関して、「固定活動」（勤務・学校、帰宅・自宅滞在時間など、通常は意思決定を伴わず行動が事前に固定されているもの）と、「付加的活動」（自由活動など、他の交通行動結果の影響を受けて内容が変化する活動）に活動（アクティビティ）を分割する。このとき、「固定活動」の場所・時間等は交通行動者ごとに先決されている。このとき、①交通行動者は時間的・空間的制約をから交通行動パターンの基本となる「付加活動数」を決定する、②付加活動の活動内容（目的・時間など）を決定する、③活動を行う場所（目的地）を決定する、④交通手段を選択する、⑤目的地への移動経路を選択する、⑥時間的制約を考慮して、活動時の滞在時間を決定する。以上の

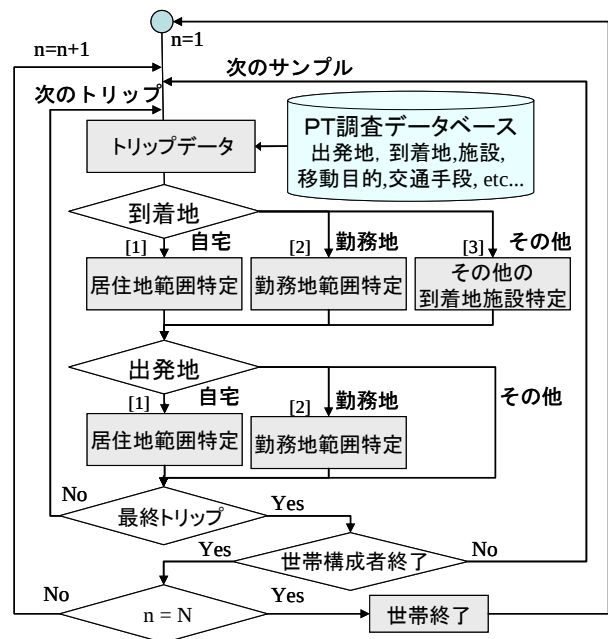


図-2 空間情報を利用した活動位置特定手順

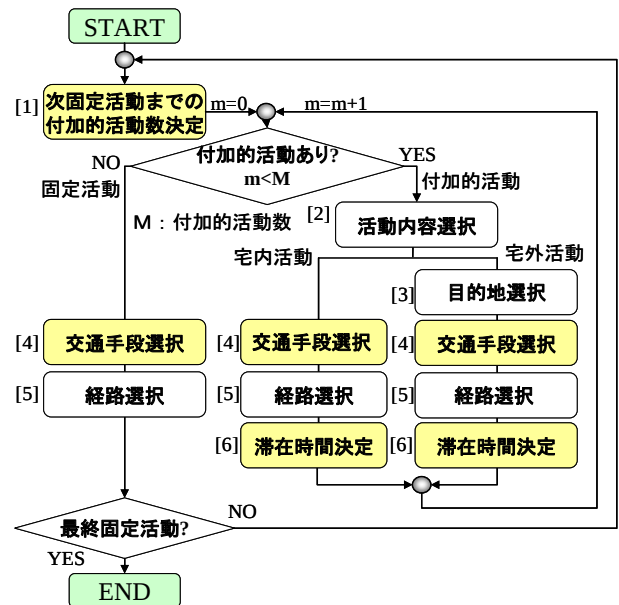


図-3 交通行動分析モデルの意思決定過程

特定交通行動者に対する1トリップに関する意思決定結果から、つぎのトリップ（交通行動）の判断を行う。

このように既存研究より、基本的部分を利用した「交通行動記述モデル」では、各交通行動者の時間的・空間的な制約を所与として、一日の交通行動の連鎖（交通行動パターン）を推計するものである。

空間情報の追加に伴いプロセスの一部を既存モデルから変更しているが、トリップ連鎖を逐次推計する基本構造は同様である。またこのモデルの特徴として、①交通行動者は、ある固定活動から次の固定活動までの付加活動数を事前に決定する（決定木モデル：C4.5）。②GIS付加情報（滞在施設情報）による滞在時間決定モデ

ルの精度が向上できる、③空間的な位置関係（バス停配置など）から交通手段選択モデルの精度向上ができることが挙げられる。

このように「空間情報を用いた交通行動分析モデル」は既存モデルに比して推計精度の向上が期待できる。ここでは岐阜市都市圏におけるPT調査全サンプルの1日の交通行動の推計を行った。ここで対象地域における交通状況の推計結果を図-4に示す。

岐阜市のトリップにおける交通手段について自動車利用と公共交通機関(バス)利用の構成割合は、自動車利用が86.4%を占め、公共交通機関利用率が低い。

また、この朝のピーク時間帯(7:00~9:00)における岐阜市中心部への自動車集中交通量のピーク率は25.3%である。このため、朝ピーク時には岐阜市中心部方向に向かう道路区間において交通混雑が発生している。

ここで、現況再現に関する交通行動推計結果を既存モデルと比較して、表-1に示す。

本表のうちトリップ連鎖の完全再現割合は既存モデル(28.5%)から61.7%に向上している。この要因としては、付加活動数と交通手段の高精度な推計結果によると類推される。ここで、決定木分析手法による付加的活動数決定モデルより、的中率は85.7%となっている。また各活動における滞在時間の平均推計誤差は、日常的自由:10.4分、非日常的自由活動:21.3分、業務活動:5.5分、在宅活動:8.3分あった。また交通手段選択モデルに関しては、簡略ファジィ推論により推計を行ったところ的中率は91.8%となっている。

このように「空間情報を利用した交通行動分析モデル」では、交通行動の推計メカニズムが同定されている。

（４）都市交通政策の適用

つぎに、交通行動分析モデルによる都市交通政策の評価について検討する。ここでは、都市交通政策の実行時における意思決定手順はすべての交通行動者（エージェント）に共通のものとして記述した。

具体的な都市交通政策として、岐阜市都心部の「時間帯混雑料金」導入を検討する。ここでは「ピーク時間帯（7:00-9:00）に、都心部コードンライン上で流入車両に対して500円の混雑料金課金」を設定する。すなわち、朝ピーク時の都心部への集中トリップのみを課金対象としている。この混雑料金設定では、34,045人が混雑料金課金に関連するトリップを持つ。ここでは、混雑料金課金に関連のない場合には交通行動に変化はないものとして推計する。

混雑料金導入時の交通行動変化推計結果を図-5に示す。交通行動者の多様性を考慮しない混雑料金の影響は交通行動分析モデルの設定変更により算定される。これによれば、23,698人（70%）が交通手段変更、8,984

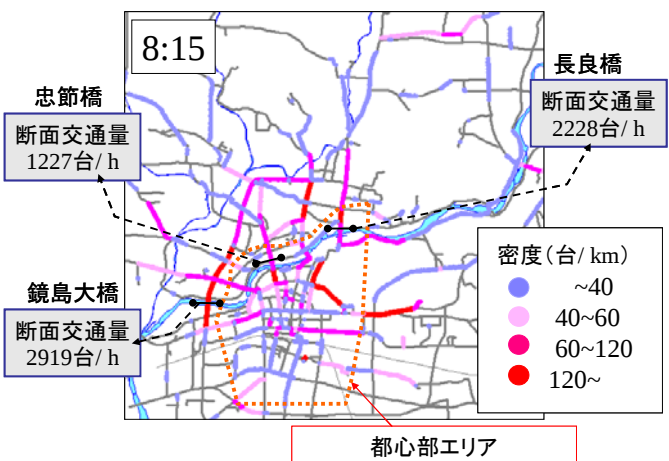


図-4 対象地域の交通状況

表-1 交通行動分析モデルの推計結果

|              |       | 変更前   | 変更後   |
|--------------|-------|-------|-------|
| トリップ数<br>一致  | サンプル数 | 5326  | 6736  |
|              | 割合    | 63.1% | 79.8% |
| パターン<br>完全一致 | サンプル数 | 2410  | 5211  |
|              | 割合    | 28.5% | 61.7% |

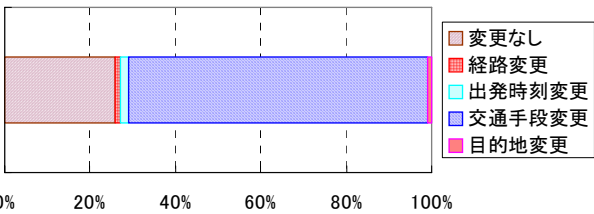


図-5 混雑料金導入時の交通行動変化推計結果

人（26%）は交通行動の変更なしと推計された。また、目的地変更は、課金時間帯に付加的活動を開始する交通行動者のみが選択可能であるため、推計された目的地変更者は271人（0.8%）と小数であった。

また交通行動者の1,807人（5%）でトリップパターンの変化が推計された。このなかで、トライアングル型からピストン型への変更が最も多く813人（2%）である。これらの多数は混雑料金支払いを回避するため出勤トリップ交通手段を自動車から公共交通へ変更し、付加的活動が減少している。

このように個別交通行動の集積による交通現象解析は可能であるが、自律的行動と相互作用を含む局所的変化の波及である大域的複雑現象は表現されていない。

3. マルチエージェント交通行動モデルの構築

ここでは、都市交通政策導入の影響による交通行動者の自律的な意思決定構造を表現する。特に既存のファ

ジ交通行動モデルを利用して、交通行動マルチエージェントシミュレーションの構築方法を提案する。

### (1) 交通行動エージェントの意思決定過程

ここでは、マルチエージェントシミュレーションの基本要素であるエージェント、環境、ルールにより仮想社会を構成する。このとき、現実社会の中規模地方都市において、朝ピーク時における道路交通渋滞が問題となっている岐阜市を参考に仮想社会を構成する。

ここで個々の交通行動エージェントの属性の設定について説明する。仮想社会の行動主体としては、すべての交通行動者を交通行動エージェントとして表現する。

これらのエージェントについては、日々、交通行動に関する意思決定を行うものとする。このとき、第3回中京都市圏PT調査データに基づき、対象地域(岐阜市)に居住するすべてのサンプルの属性を参考として、エージェントの属性を設定した。すなわち、PT調査の1サンプルが、この仮想社会の1エージェントに対応する。したがって、各交通行動エージェントの属性(年齢、性別、職業、居住地、勤務地、固定活動時間帯、自動車保有、運転免許保有など)には、PT調査データの個人属性を用いた。

本研究の「交通行動エージェントモデル」は、日常的な平日の交通行動に関して、都市交通政策の実施等の交通環境変化に対するエージェントの意思決定過程を記述するものである。したがって、エージェントの意思決定は1日の交通行動のうちの都市交通政策に関連する「トリップ変更」を記述するものである。すなわち、エージェントが1日の局所的な交通行動の調整により、交通環境に適応するプロセスを記述するものである。本研究では交通環境変化対応後の交通行動者の連鎖的交通行動は通常のトリップ連鎖生成過程に基づくと考えている。

ここでは、都市交通政策導入時には、交通行動者は経験情報をもとに意思決定をおこなうと考える。ここでは、都市交通政策に関与する(影響をうける)交通行動者は、①経路変更、②出発時刻変更、③交通手段変更、④目的地変更の4種類の選択肢を持つとする。したがって、混雑料金政策の場合、交通行動者は4種類の行動変化を行うか、行動を変化しない(混雑料金を支払う)ことになる。

図-6に、この場合の交通行動エージェントの意思決定プロセスを整理する。

① 都市交通政策実施前の満足度  $u(0, 0)$  と、前日の満足度  $u(k, s-1)$  を比較して「満足」「不満足」を判断する。このとき、満足度の差が許容範囲内であれば「満

足」と判断する。具体的な計算過程では、式(1)が成立する場合に、「満足」と判定される。

$$u(k, s-1) > u(0, 0) - \alpha \quad (1)$$

② 「満足」の場合には前日の選択肢を継続し、「不満足」の場合には、4種類の選択肢のなかから未試行項目をランダムに選択する。

③ 未試行項目がない場合には、許容満足度を減少させる(ある程度我慢する)。ここでは、許容満足度の減少を  $\Delta\alpha : 10$  円とする。

ここで交通行動の満足度とは「一日のトリップ連鎖全体に関する満足程度」として、交通費用と付加活動によって規定される。すなわち、満足度  $u(k, s)$  は、総移動時間  $t_a(k, s)$ 、総移動費用  $c_a(k, s)$ 、総付加活動時間  $t_b(k, s)$  を定義して、パラメータ  $\theta$  および  $\lambda$  を導入することで、式(2)により算定する。

$$u(k, s) = -\theta \cdot t_a(k, s) - c_a(k, s) + \lambda \cdot t_b(k, s) \quad (2)$$

ここで、総移動時間  $t_a(k, s)$  は交通行動エージェントの1日のすべてのトリップの所要時間を総和したものであり、総移動費用  $c_a(k, s)$  は1日のすべてのトリップの所要費用を総和したものである。これらはエージェントの意思決定項目  $k(s)$  に基づいて、交通行動モデルによって決定される1日の交通行動より推計される。したがって、所要時間短縮によりエージェントの満足度は向上し、所要費用増加により満足度は低下する。混雑料金政策導入により、課金エリアへ自動車を利用して移動する交通行動エージェントの総移動費用は、課金額分増加することになる。

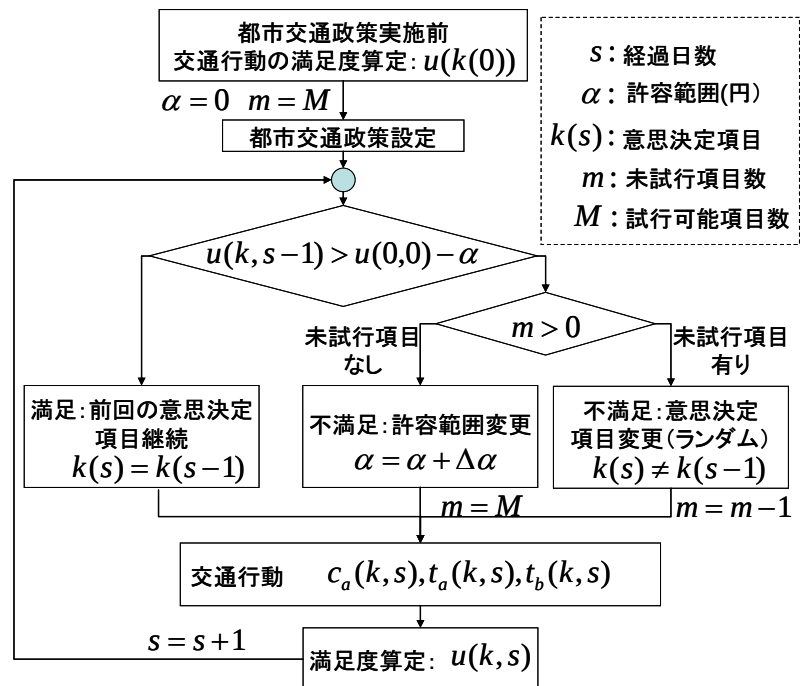


図-6 エージェント意思決定過程の構成

また総付加活動時間  $t_b(k,s)$  は交通行動エージェントの1日の付加的活動（自由活動）の活動時間を総和したものである。この総付加活動時間  $t_b(k,s)$  も、エージェントの意思決定項目  $k(s)$  に基づいて、交通行動モデルによって決定される1日の交通行動より推計される。したがって、付加的活動の取りやめおよび時間短縮により、エージェントの満足度は低下する。

このとき、式（2）で示される「交通行動の満足度」は、エージェントの局所的な交通行動変化（都市交通政策などへの対応）と連鎖する他の交通行動変化を含めて、一日全体で規定される。したがって、エージェントモデルでは前述した「交通行動分析モデル」の算定結果を踏まえた満足度算定を繰り返し実行することになる。

このように、交通行動による経験から、意思決定項目を自律的に選択する交通行動エージェントを規定した。これより、大域的な交通流動に基づく、個別交通行動者の自律的な意思決定メカニズムが表現可能となった。

## （2）マルチエージェントモデルの構成

つぎにマルチエージェントモデルの全体構成を説明する。特に交通行動記述メカニズムとして、前述の交通行動分析モデルを利用する。

本研究では、前述のようにエージェントの都市交通政策に対する局所的变化を、①エージェントの関連トリップ調整、②エージェント1日の交通行動パターン、③都市交通現象（交通システム）の変化、④エージェントの交通行動評価、⑤エージェントの関連トリップ調整（①に戻る）の形式で実現しようとするものである。したがって、「交通行動分析モデル」は、部分的な交通行動変化が連鎖的に1日の交通行動全体に波及する状況の推定に適する必要がある。本研究で利用した「ファジィ交通行動モデル」は、①恒常的な交通行動パターンの形成過程をファジィ推論等で構成しており、交通行動連鎖のメカニズムを高精度で記述できるため、個別交通行動から都市交通現象を集計的に導出する目的に適している。

また、②交通行動モデルの判断のファジィ変数の利用や推論形式（柔軟なモデル構造）が導入されており、都市交通政策における局所的な交通行動変化（選択肢集合の変化、不連続な意思決定変化）の記述が容易でありエージェントモデルとの結合性が高い。

ここでマルチエージェントモデルの具体的なモデル群の構成を図-7に示す。このマルチエージェントシミュレーションは、エージェントモデル、交通行動分析モデル、交通流動モデルおよび交通状況表示システムとしてのGISにより構成されている。

ここで、エージェントは都市交通政策に対応する「特定トリップの調整」を実行する。したがって、当該トリップに関する「目的地変更」（自由活動の場合）「交通手段変更」（選択肢集合変化）「出発時間」「経路変更」に関する調整結果（エージェントモデル）から連鎖する交通行動を各交通行動者の時間空間的制約から設定するものである（交通行動分析モデル）。

ここでエージェントモデルでは、①交通行動エージェントが満足度に基づき交通行動選択肢を決定する。この結果、都市交通政策の影響下のトリップ属性の変化が推計される。②この結果、交通行動エージェントは関連する1日の交通行動を行う。（この交通行動パターンは、前述の交通行動分析モデルの推計プロセスから算定する）。このように、都市交通政策導入に対応して、全交通行動エージェントに関する1日の交通行動軌跡が推計される（①～②を繰り返して算定する）。

つぎに、交通流動モデルでは、③交通行動エージェントの1日の交通行動軌跡を集計して経路交通量を算定する。ここでの「経路」とは、混雑料金課金エリアの通過の有無を表すものである。したがって、混雑料金課金エリアに出発地または到着地が有る場合には経路は1種類となり、これ以外の場合に2種類の経路が存在することとなる。

さらに④この経路交通量（2種類のOD交通量）に基づき、「マルチクラス型時間帯別交通量配分」により

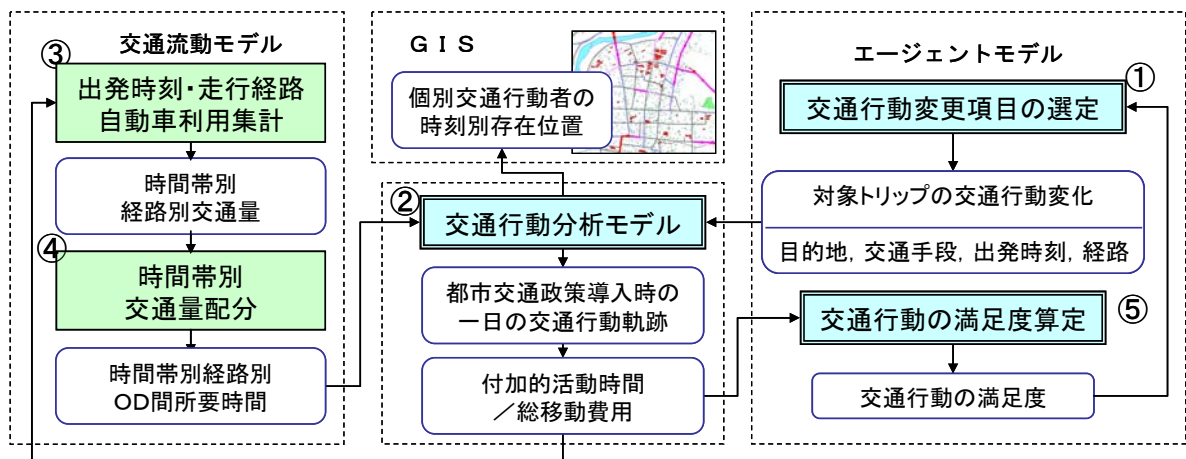


図-7 マルチエージェントモデルの全体構成

時間帯別経路別のOD間所要時間が算定される<sup>28)</sup>。したがって、残留交通量も2種類算定されることになる。ここでは、2種類の経路交通量によるリンクコスト関数の相互干渉は対称となるため、数理最適化問題として定式化可能であり、Frank-Wolfe法が適用可能である<sup>29)</sup>。これより、都市交通現象の推計結果である経路交通量が、集計的には道路網均衡条件を満たすよう決定される。

このような算定結果に基づいて、⑤個別交通行動エージェントの満足度  $u(k,s)$  は、このとき得られるOD間所要時間に基づく総移動時間  $t_a(k,s)$ 、総移動費用  $c_a(k,s)$  および交通行動分析モデルより得られる総付加活動時間  $t_b(k,s)$  から算定される。このように満足度  $u(k,s)$  は、エージェントの1日の時間的空間的な移動に関する総合的評価を表す指標となっている。

このように、マルチエージェントモデルの構成することで、都市交通政策の影響による交通行動者の自律的な交通行動変化と、都市圏全体の広域的な交通流動の相互関係を考慮した交通現象記述が可能となった。

#### 4. 都市交通政策評価への適用

ここでは、交通行動者の局所的意思決定が大域的な都市交通に与える影響を検討するため、マルチエージェント交通行動モデルを都市交通政策評価に適用する。すなわち複雑現象解析の視点から都市交通政策を検討する方法を紹介する。

##### (1) 交通行動者構成に関する分析

ここでは、対象地域の交通行動者の公共交通機関に対する利用意識が都市交通政策の効果に及ぼす影響を検討する。モデルでは公共交通機関の利用意識を「選択肢集合における交通手段変更の有無」として表現する。すなわち自動車から公共交通機関への交通手段変更の可能性を持つ交通行動者の割合で地域特性を規定する。具体的には、交通手段変更可能性をもつ交通行動者の割合を20%～80%（4ケース）設定する。このとき、それぞれの社会環境下で混雑料金政策の影響を算定する。

この設定に応じて交通行動エージェントの選択肢集合の分布状態が変化する。この結果、混雑料金政策に関する最終的な対応方法が交通行動者ごとに算定される。

図-8に交通手段変更可能者の全体に占める割合ごとに算定された混雑料金政策に対応する交通行動変化を示す。

公共交通機関を選択肢とする交通行動者の割合が大きいと、交通手段変更者は必然的に多数となる。一方で経路変更者・同一行動者（混雑料金支払い）の割合は少数である。特徴的な変化としては、割合60%～80%の間で選択肢構成割合が大きく変化していることがあげられる。このように道路交通混雑減少に起因する道路利用

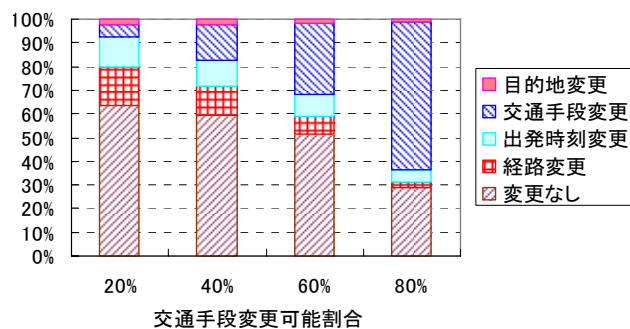


図-8 交通行動者構成と交通行動変化

者と公共交通利用者の協調的变化が推測される。

つぎに、交通手段変更可能割合ごとの交通行動者の満足度指標値の平均値の推移を図-9に示す。

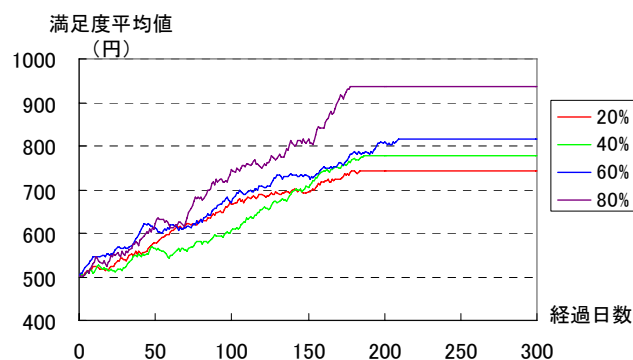


図-9 交通行動者の満足度指標値の推移

いずれのケースも交通行動者が混雑料金政策に対する経験の蓄積から、最終的に選択肢を固定し、安定的交通現象が生じる（交通行動の満足度が一定となる）。また変動は選択肢集合の規定に確率的判断（突然変異；5%）が含まれる点に起因する。ここで他の確率変動時にも同様に安定状態に至ることが観測されている。

##### (2) 交通行動変化の影響分析

ここでは、個別交通行動者の交通行動変化による広域的な交通流動への影響について分析する。

図-10に交通手段変更可能者割合と都市圏の道路混雑（総走行時間）の関係を示す。

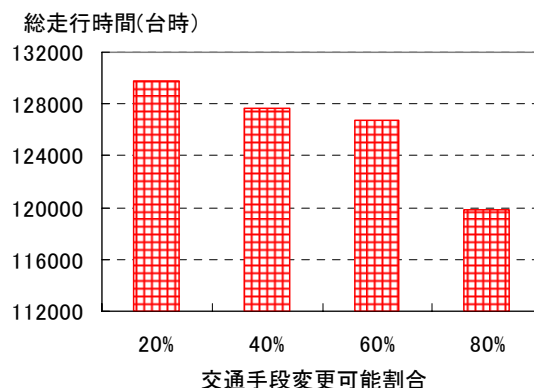


図-10 交通行動変化に基づく総走行時間

交通手段変更を選択肢とする交通行動者数に対応して混雑料金回避のため公共交通機関利用に変更する。この結果、都市圏道路混雑は減少する。特に交通行動者の80%が選択肢に公共交通機関を含めている場合には、効果的な混雑緩和が期待できる。一方で道路交通混雑緩和の検討には、積極的な公共交通意識の向上が必要であることを示すものである。

本研究におけるマルチエージェントシステムは各交通行動者の混雑料金政策に対する時間的な推移に基づき、マクロな都市交通現象を算定する。前述のように本システムに内包される交通行動記述モデルはGISとの統合を意図している。このため交通行動変化の空間的把握も可能である。

図-11はさきの交通手段選択可能者80%の場合の最終状態（300日経過後）を空間表現したものである。都心部から放射状に公共交通機関への変更者が多数観測される。これは、①関連人口分布、②バス路線密度、③バス所要時間の複合的要素の関係から算定された自律的空間分布であるといえる。

交通手段選択可能者の割合は、道路利用者が自律的に交通手段を公共交通機関に変更することによる混雑料金導入効果を決定づけることになる。マルチエージェントシステムの出力はGIS利用により道路網混雑の時間的・空間的变化として表現できる。

図-12に設定条件の異なる2種類の道路混雑状況を示す。経過日数90日の時点では交通手段変更可能性をもつ交通行動者の割合が80%のケースでも道路混雑区間が多数存在していることが分かる。この道路混雑区間が日数経過とともに減少し、経過日数300日の時点ではほとんどの区間で道路混雑が解消していることがわかる。これより、交通行動者の公共交通利用に関する認識の相違は、都市交通政策の効果に影響することがわかる。

## 5. おわりに

都市圏の交通現象分析を目指した交通行動モデルは、現況の交通調査結果に整合した理論モデルを構築する場合が多い。すなわち個別交通行動者の時間的・空間的移動から都市交通流動を推計する。しかしながら、新規の都市交通政策は交通行動者の意思決定構造変化を与えることも推測され、既定の交通行動モデルの推計可能性に

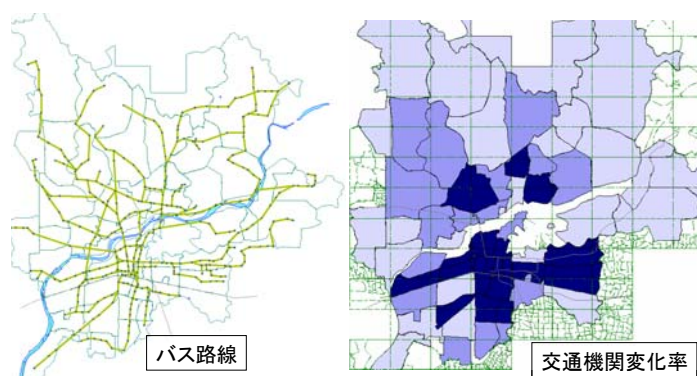


図-11 交通手段変更者の空間分布

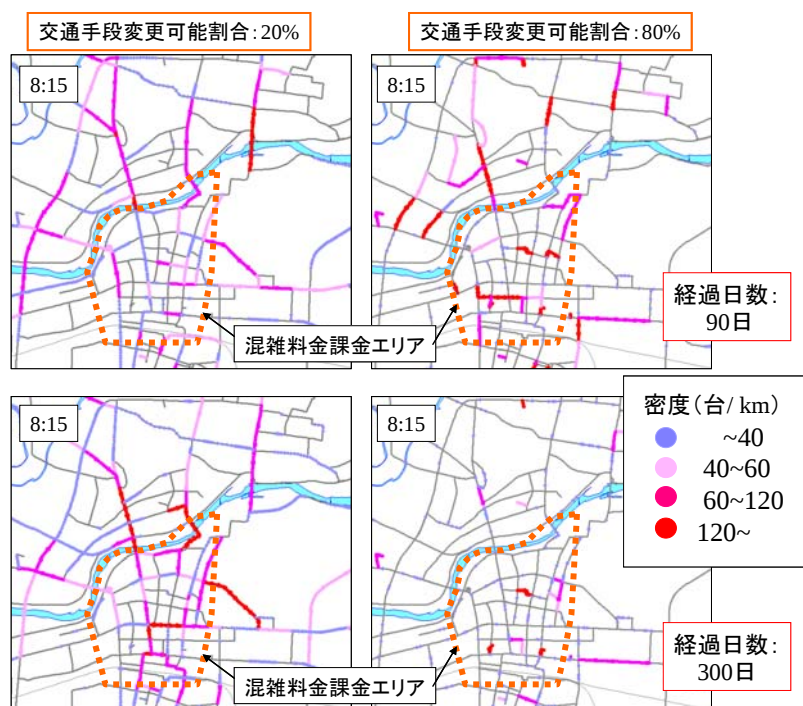


図-12 都市交通政策による都市道路網の交通状況

は問題がある。本研究では、都市交通現象を交通行動エージェントの時間的・空間的移動の集積するシステムとしてモデル化方法を提案し、具体的な検討を行った。本研究で得られた成果は以下のように整理できる。

- ① 交通行動エージェントの基本行動記述に、既存の交通行動モデルの算定メカニズムが利用した。このときPT調査結果と空間情報の統合的利用が詳細記述に有効であることを示した。
- ② 混雑料金政策導入を対象として、都市圏全域の交通行動エージェントの自律的意思決定から生じる交通行動パターン変化を表現する複雑系モデルを構成した。この結果、交通行動シミュレーションから内発的交通現象を観察可能とするモデル構成が示された。
- ③ 混雑料金政策に対する交通行動者の代替的交通行動に関する多様性を分析した。エージェントの交通機

関選択肢と公共交通機関の意識高揚に関連して、協調的な都市交通現象変化が時間的・空間的に観測できることがわかった。

本稿では基本的な交通行動マルチエージェントモデルの提案を行った。なお交通現象の複雑系処理に関して、①このような仮想的なマルチエージェント交通行動モデルの利用局面の整理、②交通現象に関する創発現象の整理、③自律的都市交通政策の具体的提案などについての一層の議論が必要である。

謝辞：最後に本研究は、平成17年度科学研究費補助金研究(C)15760395の研究成果の一部であることを付記する。また、パーソントリップ調査利用に関しては、中京都市圏総合都市交通計画協議会の御了解をいただいた。ここに記し感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 秋山孝正：知的情報処理を利用した交通行動分析，土木学会論文集，No.688/IV-53，pp. 37-47，2001.
- 2) 秋山孝正：ソフトコンピューティング技術の土木計画における応用と課題，土木計画学研究・講演集，Vol. 27，CD-ROM，No. 201，2003.
- 3) 井庭崇・福原義久：複雑系入門，NTT 出版株式会社，1998.
- 4) 吉永良正：複雑系とは何か，講談社現代新書，講談社，1996.
- 5) 有田隆也：人工生命，科学技術出版，2002.
- 6) Epstein.J.M and R.Axtell，服部正太・木村香代子訳：人工社会－複雑系とマルチエージェント・シミュレーション，共立出版，1999.
- 7) Kitamura, R., Nakayama, S. and Yamamoto, T. : Self-reinforcing motorization: can travel demand management take us out of the social trap?, *Transport Policy*, Vol. 6, pp. 135-145, 1999.
- 8) 中山晶一郎・北村隆一：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，土木学会論文集，No.660/IV-49，pp. 53-63，2000.
- 9) 福田大輔，上野博義，森地茂：社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析，土木学会論文集，No.765/IV-64，pp.49-64，2004.
- 10) 佐々木邦明，西井和夫，土屋勇太：パークアンドバスライド利用意向がマクロの利用率から受ける影響に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol. 20，No. 4，pp.835-841，2003.
- 11) 奥嶋政嗣，秋山孝正：都市交通現象を対象とした人工生命モデルの提案，土木計画学研究・講演集，Vol.27，CD-ROM- No.207，2003.
- 12) Masashi Okushima, Takamasa Akiyama: Construction of Artificial Life Model for Urban Transport Analysis, *Proceedings of the SCIS & ISIS 2004*, No.20109, 2004.
- 13) 奥嶋政嗣，秋山孝正：局所的相互作用を考慮した都市交通政策評価のための人工社会モデル，土木学会論文集D，vol. 63，No. 2，pp.134-144，2007.
- 14) Hernández, J. Z., Ossowski, S. and Serrano, A. G. : Multi-agent architectures for intelligent traffic management systems, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 473-506, 2002.
- 15) Hidas, P.: Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 351-371, 2002.
- 16) Rossetti, R. J. F., Bordini, R. H., Bazzan, A. L. C., Bampi, S., Liu, R. and Vliet, D. V.: Using BDI agents to improve driver modelling in a commuter scenario, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 373-398, 2002.
- 17) Wahle, J., Bazzan, A. L. C., Klügl, F. and Schreckenberg, M.: The impact of real-time information in a two-route scenario using agent-based simulation, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 399-417, 2002.
- 18) Chen, H. and Bell, M.: Instrumented city database analysts using multi-agents, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 419-432, 2002.
- 19) Adler, J. L. and Blue, V. J.: A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 433-454, 2002.
- 20) Logi, F. and Ritchie, S. G.: A multi-agent architecture for cooperative inter-jurisdictional traffic congestion management, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 5-6, pp. 507-527, 2002.
- 21) Kosonen, I.: Multi-agent fuzzy signal control based on real-time simulation, *Transportation Research C*, Vol. 11, No. 5, pp. 389-403, 2003.
- 22) Jeffrey L. Adler, Goutam Satapathy, Vikram Manikonda, Betty Bowles and Victor J. Blue : A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance, *Transportation Research B*, Vol. 39, No. 4, pp. 297-318, 2005.
- 23) 小澤友記子，秋山孝正，奥嶋政嗣：ファジィ交通行動モデルによる混雑料金政策の影響評価，土木計画学研究・論文集，Vol. 21，No. 2，pp. 607-618，2004.
- 24) 秋山孝正，奥嶋政嗣：都市交通計画のためのファジィ交通手段選択モデルの構築，日本知能情報ファジィ学会誌，Vol.19，No.2，pp.176- 188，2007.
- 25) 和泉範之，奥嶋政嗣，秋山孝正：空間情報を利用した交通行動の時間的推移の表現方法，土木計画

学研究・論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 405-412, 2005.

- 26) 和泉範之, 奥嶋政嗣, 秋山孝正: 交通行動分析における空間情報の利用方法に関する検討, 第 24 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.249-252, 2004.
- 27) Takamasa Akiyama, Masashi Okushima, Noriyuki Izumi: Development of Integrated Travel Behaviour Model with Spatial Information, Proceedings of 11th International Conference on Travel Behaviour Research

CD-ROM, No. 1304, 2006.

- 28) 土木学会土木計画学研究委員会編: 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー, (社) 土木学会, 1998.
- 29) 土木学会土木計画学研究委員会編: 道路交通需要予測の理論と適用・第 I 編・利用者均衡配分の適用に向けて, (社) 土木学会, 2003.

---

## マルチエージェント型ファジィ交通行動モデルの提案\*

秋山孝正\*\*・奥嶋政嗣\*\*\*・和泉範之\*\*\*\*

都市圏の交通行動に関する基本データであるパーソントリップ調査から, 交通行動モデルを構築するため近年の計算機技術を有機的な利用を検討した. 特に空間的な詳細情報 (GIS 情報) を交通行動データと統合し, 交通行動パターン推計の精緻化を行った. さらに, 交通行動者をエージェントとする都市圏全体の交通現象をシミュレートするためのマルチエージェントモデルを作成する. ここではいわゆる還元論的な交通需要予測モデルではなく, 複雑系として都市交通現象を表現することによって, 交通行動者の局所的意識決定が大域的な都市交通に与える影響を検討するための, 具体的なモデル化の方法を提案するとともに交通政策評価への適用性を論じる.

---

## Multi-Agent Simulation Model for Fuzzy Travel Behaviour Analysis

By Takamasa AKIYAMA\*\*・Masashi OKUSHIMA\*\*\*・Noriyuki IZUMI\*\*\*\*

The essential points of multi-agent simulation can be summarized that the social structure can be emerged as population behaviour through the interaction of agents in the environment according to the determined rules depending on the acquired information and knowledge of agents. The decision of each agent for day to day travel is formulated in the agent model corresponding to the congestion charging scheme. Each agent should have different preference to the alternatives of trips. On the other hand, traffic flow on urban network should be estimated summarizing the individual behaviours of commuter in the integrated model as previously mentioned. Therefore, the simulator artificial transport society consists of two interactive procedures such as travel behaviour estimation and agent day to day decision. Furthermore, the day to day transport phenomena can be monitored through the display illustration based on GIS software.