

# 都市交通におけるミクロ・マクロリンクの解明

Massive Multiagent-based Urban Traffic Simulation with Intricate Behavior Models

山根昇平 服部宏充 中島悠 石田亨  
Shohei Yamane Hiromitsu Hattori Yuu Nakajima Toru Ishida

京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻  
Department of Social Informatics, Kyoto University

In this paper, we elaborate urban traffic simulations conducted on a newly-developed multiagent-based traffic simulator with fine-grained models so as to investigate the micro-macro relationship in complex systems. In our simulations, an agent, which has functions for both micro-level (reactive driving behavior) and macro-level (deliberative route-planning) decision-making. Through simulations based on diverse environments, we try to recognize the effects between micro and macro behaviors.

## 1. はじめに

現実世界の社会システムは、人間による複雑で多様な意思決定によって、様々な様相を見せる。このような社会システムを再現し、分析するための手法として、マルチエージェントシミュレーションが用いられる。マルチエージェントシミュレーションでは、多様なエージェントによる局所的なインタラクションをモデル化することで、大局的な現象を再現する。過去に様々な分野でマルチエージェントシミュレーションが適用されてきたが、シミュレーションの中で、ミクロ・マクロリンクをどのように再現し、分析するかということが、未だ重要な課題となっている。そこで、本研究で我々は、マルチエージェントシミュレーションを都市交通に適用し、微視的な振る舞いがいかにして巨視的な現象を生み出すか、また、生み出された減少がいかにして微視的な振る舞いに影響を与えるかについて調査する。

そこで、マルチエージェントによる都市交通シミュレーションを実施する。このシミュレーションでは、エージェントは局所的な運転行動と、大局的な経路選択行動の双方に関する意思決定機能を持つ。この目的のため、本稿ではまず、局所的な意思決定と大局的な意思決定の双方を統合して、マルチエージェントシミュレーションを実施する技術について示す。これにより、エージェントは、目的地に辿り着くまでの最適な経路を探索し、その経路の中で、周囲の環境に合わせて、与えられた運転行動モデルにしたがったアクセル・ブレーキ・ハンドル操作といった運転行動を行う。次に、開発した交通シミュレータを用いて、多様な行動モデルとそれらインタラクションが、全体の交通に与える影響について分析する。このため、我々は、ひとつの道路内における影響の分析から、段階的に規模を大きくしていくことで、大域におけるミクロ・マクロリンクを解明する。

以下、本稿を次の様に構成する。第2節では、本研究で開発した交通シミュレーションプラットフォームについて説明する。第3節で、実際に行ったシミュレーションについて詳述し、分析結果を示す。最後に、第4節で本稿をまとめる。

## 2. マルチエージェント交通シミュレーションプラットフォーム

ミクロ・マクロリンクは、エージェント個々のミクロな行動が全体のマクロな現象を創発し、マクロな現象がミクロな行動に変化を与えることで、ミクロとマクロが相互に影響しあって形成される。都市交通においては、各車両が目的地に移動する中で、アクセル・ブレーキによる速度調整や、ハンドルによる方向調整などのミクロな振る舞いをする。そして、それらの集積により、道路ごとの流量といったマクロな現象が現れる。本研究では、これら都市交通でのミクロの行動とマクロの現象を再現し、それらの相互作用を実現するプラットフォームを構築した。

### 2.1 交通シミュレータの設計

ミクロ・マクロリンクの再現のため、シミュレーションプラットフォームは次の2点を実現する必要がある。すなわち、1) ミクロレベルでのエージェントの振る舞いの記述、実行および、2) マクロからミクロへのフィードバックである。これらを実現することで、ミクロレベルでのエージェントの振る舞いの集積がマクロレベルの現象を生み、その現象がミクロレベルの行動に影響を与え、それにより更にマクロレベルの現象が変化する、といったミクロ・マクロのループが完成する。本研究では、交通シミュレーションにおける上記2点それぞれについて、以下のような機能をもつ交通シミュレータを設計した。

周囲の環境に対する即応的行動 (運転行動)。周囲の車両や自身の運転する車両について、その速度や位置などの情報をもとに、ハンドル、アクセル、ブレーキといった車両の操作に関する意思決定を行う機能。この機能により、道路内での個々のエージェントの通過速度が、ミクロレベルでの振る舞いにより決定される。

交通状況に基づく経路選択 (交通行動)。各道路における平均通過時間などの交通状況をもとに、出発地から目的地に到達するための最適な経路を探索する機能。この機能により、運転行動の集積として現れるマクロレベルな交通状況が、それぞれのエージェントにフィードバックされる。

上記の機能を備えた交通シミュレーションを実施するため、本研究では、ベルリン工科大学とチューリッヒ工科大学で開発された、大規模マルチエージェント交通シミュレーションを行

連絡先: 山根昇平, 京都大学大学院情報学研究科, 京都市左京区吉田本町京都大学, 075-753-3350, yamane@ai.soc.i.kyoto-u.ac.jp

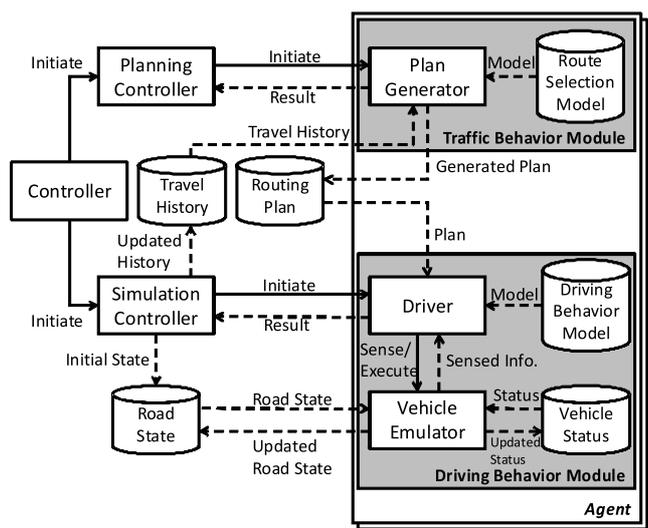


図 1: 交通シミュレーションプラットフォームのアーキテクチャ

のためのツールキットである, MATSim[Balmer 08]<sup>\*1</sup> を用いた. MATSim のシミュレーションでは, エージェントは経路選択, シミュレーション, スコアリングからなる一日単位のプランニングを繰り返し行う. 本研究では, MATSim のプロセスのうち, シミュレーションのプロセスを, 上記運転行動に基づくシミュレーションで置き換える. これにより, ミクロレベルでのシミュレーションに基づいて経路のスコアが計算され, そのスコアを基に選択された経路を基にシミュレーションが実行されるという, ミクロ・マクロリンクを実現することができる.

## 2.2 交通シミュレーションプラットフォームのアーキテクチャ

図 1 に, 本研究で開発したプラットフォームにおいて, シミュレーションと経路選択に関するアーキテクチャを示す. 図中の Controller は, 前述の経路選択, シミュレーション, スコアリングを含むプロセス全体の制御を行う. この Controller により, Planning Controller と Simulation Controller が起動されることで, 経路選択とシミュレーションのプロセスが, それぞれ開始される. 経路選択プロセスは, 次のように動作する. まず, Planning Controller は, 各エージェントの Plan Generator を起動する. Plan Generator は, Travel History から前日までの交通状況を取得し, 目的地に至る最適な経路を生成する. この経路は, Routing Plan に格納される. 全エージェントのプランニングが終了すると, Controller は Simulation Controller を起動する. シミュレーションのプロセスは, 次のように動作する. Simulation Controller は, 道路ネットワーク上のエージェントについて, シミュレーションの実行を依頼する. エージェントの運転行動モジュールは, Driver と Vehicle Emulator から成る. Driver は, Vehicle Emulator から周囲の環境情報を取得し, その情報, プラン, および, 自身の運転行動モデルによって, ハンドルやアクセル操作といった意思決定を行う. この意思決定は, 車両に対する操作として, Vehicle Emulator に送られる. Vehicle Emulator では, Driver からの求めに応じて, 車両の速度などの状態と Road State から得られる周囲の情報を取得する. また, Driver から送られた操作

を基に, 状態の更新を行う. 以上のようにして得られたシミュレーションの結果は, 道路ごと, 時間帯ごとの平均通過時間として, Travel History に保存される.

このように, 都市交通は個々の運転者と車両というミクロなレベルで再現され, また, 目的地までの経路の生成にシミュレーションの結果得られた平均通過時間を用いることでマクロな交通状況を個々のエージェントへとフィードバックしている.

## 3. 交通シミュレーションによるミクロ・マクロリンクの分析

### 3.1 実験の設定

エージェント個々の振る舞いとマクロな交通の相互作用を詳細に調べるため, 下記の 3 つのシミュレーションを行った.

実験 1) 1 つの直線道路によるシミュレーション. 道路ネットワークは一本の直線道路のみで構成され, エージェントはその端から端まで走行する. 道路の車線数は 2. ひとつの道路内で, エージェントの多様性がどのような影響を及ぼすかを観察する.

実験 2) 3 経路のネットワークによるシミュレーション. 出発地と目的地は 1 種類であるが, 途中で距離の等しい 3 つの経路に分岐し, その後合流する. エージェントは 3 つの経路のうちひとつを選択することができる. 上記で観察された影響により, 交通行動がどのように変化するか観察する.

実験 3) 京都市の道路ネットワークによるシミュレーション. 実際の京都市の道路ネットワークと, 2000 年に行われたパーソントリップ調査を基に生成した OD を用いたシミュレーションを行う. 上記で観察された現象が, 大規模な交通をどのように生み出すかを観察する.

本稿では, 上記のように, 規模の小さい道路ネットワークから規模の大きい道路ネットワークへと, 段階的にシミュレーションを行うことで, ミクロ・マクロリンクを詳細に分析する.

第 2 節で示したように, エージェントは周囲の環境を観測し, それに基づいた意思決定を行って車両を操作する. これにより, 人間の観察を基にした精密なモデルを与えることができるが, 本研究では, ミクロ・マクロリンクの分析過程を明確にするため, 単純なモデルを用いて説明する. エージェントに与える運転行動モデルとして, 次のような振る舞いを持つモデルを用いた. まず, 前後方向の振る舞いとして, 次式で示される, Pipes による追従モデル [Pipes 53] を用いた.

$$v(t) = A \times (v_{front}(t-1) - v(t))$$

ここで,  $v(t)$  は時刻  $t$  における自身の速度,  $v_{front}(t)$  は時刻  $t$  における前方車両の速度,  $A$  は感度を表す定数である. これは, 前方の車両との速度差が小さくなるように速度を調節するモデルであり, 感度パラメータによってその度合いを調整する. 横方向の振る舞いとしては, Nagel による追い抜きモデル [Nagel 98] を用いた. このモデルでは, 次の条件を満たすとき, エージェントは右車線に移動する.

$$v_{leftfront} \leq v(t) \text{ or } v_{rightfront}(t) \leq v(t)$$

ここで,  $v_{leftfront}(t)$ ,  $v_{rightfront}(t)$  はそれぞれ, 時刻  $t$  における, 右側車線と左側車線の前方車両である. この条件の前半

\*1 <http://sourceforge.net/projects/matsim>

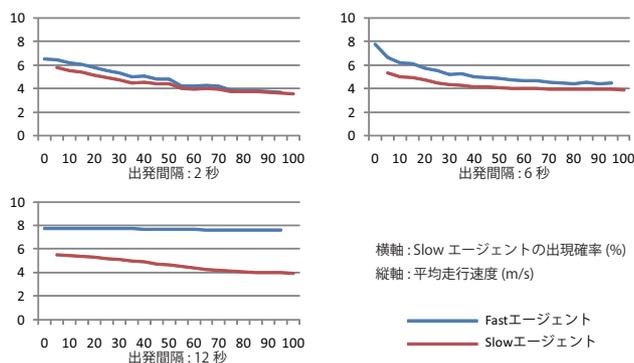


図 2: 直線道路での 2 種類のエージェントの平均走行速度

は、左側車線の車両を追い越すため、後半は、右側車線の車両を左側車線から追い抜きしないために導入されている。また、左車線を標準として用いるため、上記条件の否定を、左車線に移動する条件として用いる。これにより、右側の車線ほど速度が速くなるという追越車線の振る舞いが再現できる。

本研究では、上記のモデルを基本として、4 種類の運転行動モデルを用いた。これは、前方に車両が居ない場合の速度（自由走行速度）と、追従モデルによる速度調節の緩急によって分類される。自由走行速度については、速いものは 8m/s、遅いものは 4m/s とする。速度調節については、緩やかなものは前方車両との距離が 40m 以下で速度を合わせ、感度パラメータを小さくした。速度調節の急なものは、前方車両との距離が 20m 以下で速度を合わせ、感度パラメータを大きくした。

### 3.2 実験の設定と結果

#### 3.2.1 直線道路でのシミュレーション

道路ネットワークとして、2km 長、2 車線の一方直線道路を用いた。エージェントモデルは速度が速く速度調節が緩やかなもの（Fast&Cautious）と速度が遅く速度調節が緩やかなもの（Slow&Cautious）の 2 種類の場合と、それに速度が速く速度調節が急なもの（Fast&Aggressive）と速度が遅く速度調節が急なもの（Slow&Aggressive）を加えた 4 種類すべてを用いたものの 2 種類を行った。エージェント数は 100 とし、速度の遅いエージェントの出現確率を、0% から 100% まで 5% 刻みで変化させた。また、出発間隔は均一とし、2 秒から 12 秒まで 2 秒刻みで変化させた。

エージェントの種類が 2 種類の場合について、出発間隔が 2,6,12 秒のときの結果を図 2 に示す。横軸が遅いエージェントの出現確率、縦軸がエージェントモデルごとの平均走行速度である。追従モデルにより、エージェントは他のエージェントの速度に合わせるため、速いエージェントは遅いエージェントの存在により、平均走行速度が 8m/s を下回っている。逆にしても同様のことが言える。また、遅いエージェントは道路内を走行する時間が長いので、速いエージェントの速度低下の方が、遅いエージェントの速度上昇より顕著である。この傾向は、エージェントの出発間隔が小さいほど顕著であり、間隔が 2 秒の場合にはほとんど差がない。出発間隔が 12 秒になると、速いエージェントは遅いエージェントの影響を受けることなく、自由走行速度で走行できている。これは、間隔が十分でない場合は、速いエージェントが遅いエージェントの速度を上回る前に追従してしまい、追い抜きを行うことができないが、間隔が十分に開くことで、追い抜きの効果が現れたためである。また、速い速度で走行する車両が増えるため、遅いエージェン

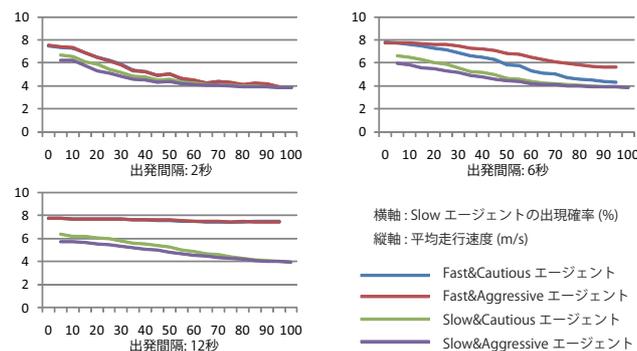


図 3: 直線道路での 2 種類のエージェントの平均走行速度

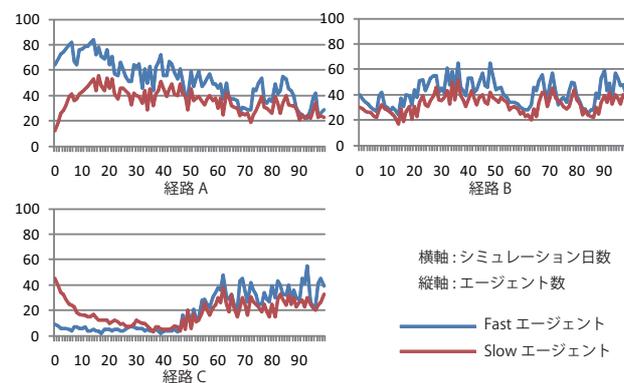


図 4: 3 経路での 2 種類のエージェントの経路選択

ともそれに追従して平均速度が上昇している。

図 3 では、同様の実験を、4 種類のエージェントモデルを用いて行った結果を示す。基本的な振る舞いは 2 種類の場合と同様であるが、速度調節の急なエージェントは、自由走行速度で走る傾向が強いため、速度の増減は少ない。特に、出発間隔が 6 秒の場合では、Fast&Aggressive エージェントにとって追い抜きを行う十分な間隔が開き、さらに他のエージェントがそれに追従するため、全体的に速度が上昇している。

このように、多様なエージェントが混在し、それらの間にインタラクションが発生することによって生じる、道路内での速度変化が観察できた。また、エージェントモデルの違いがもたらす、道路の平均速度の変化を観察した。

#### 3.2.2 3 経路でのシミュレーション

出発地点と目的地はそれぞれひとつずつであるが、途中で 3 つの経路に分かれており、エージェントはどの経路を通るかを選択する。どの経路を選択しても、目的地までの距離は等しく 1600m である。エージェントモデルは Fast&Cautious と Slow&Cautious の 2 種類を用い、それぞれ 100 台ずつ計 200 台のエージェントを発生させた。エージェントの出発間隔は 4 秒である。このシミュレーションでは、シミュレーション日数の経過による経路選択が発生するため、シミュレーション日数を 100 日とした。

シミュレーション結果を図 4 に示す。初期状態として、初回のシミュレーションでは、Fast&Cautious エージェントが 3 つの経路 A,B,C に 6:3:1 の割合で、Slow&Cautious エージェントは 1:3:6 の割合で分布するように設定した。まず、シミュ

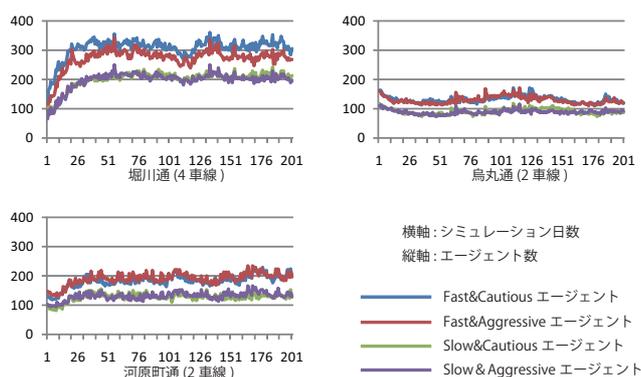


図 5: 京都市主要道路のエージェント数

レーション日数が 0 から 15 では、経路 A のエージェント数が増加し、経路 B、経路 C のエージェント数は減少している。直線道路でのシミュレーション結果から観察されたように、間隔が十分である場合は、Fast エージェントが多いほど平均速度は速くなる。したがって、経路 A にエージェントが集中している。シミュレーション日数が 16 から 45 になると、経路 B にエージェントが移動する。これは、経路 A にエージェントが集中した結果、車間が短くなり、平均速度が低下したためである。経路 A と経路 B との速度差がなくなり、2 経路間でエージェントを分け合うようになる。一方経路 C では、依然として Slow の割合が大きいため、平均速度が遅く、エージェント数は減少し続けている。シミュレーション日数が 45 を超えると、経路 C において Slow の割合が小さくなり、またエージェント数が非常に少なくなっているため、他の経路から経路 C への移動が発生する。この結果、最終的に、3 つの経路にエージェントが均一に分散するようになる。

このように、エージェントのミクロな振る舞いである運転行動が、各経路の平均速度の違いとしてあらわれ、それがマクロな意思決定である経路選択に影響を与えている。さらに、経路選択の結果、直線道路のシミュレーション結果で観察された様な運転行動の変化が見られた。

### 3.2.3 京都市でのシミュレーション

道路ネットワークとして、実際の京都市のネットワークを用いて実験を行った。OD については、2000 年に行われたパーソントリップ調査を基に、約 2000OD、約 40000 の京都市中心部を通過するトリップを生成した。エージェントモデルは Fast&Cautious, Fast&Aggressive, Slow&Cautious, Slow&Aggressive の 4 種類を用い、それぞれの出現確率を 30%, 30%, 20%, 20% とした。各エージェントは、与えられた OD を、京都市内の任意の経路を選択して走行する。シミュレーション日数は、200 日とした。

図 5 に、京都市中心部の代表的な道路について、それぞれの交通量の変化を示す。シミュレーション初日では、各エージェントは距離のみに基づいた最短経路を選択するため、エージェントの分布に偏りが生じている。しかし、日数が経過するにつれ、それぞれの道路のエージェント数が一定の値付近に収束していることが分かる。この値は、4 種類のエージェントの割合がそれぞれの出現確率に近く、また、車線数に比例した値となっている。これは、3 経路でのシミュレーションにおける、最終段階（46 日以降）で見られた現象で説明できる。すなわち、道路の容量に対して走行車両数が少ない場合、追い抜きと

追従の効果により平均速度が上昇し、その道路を選択する車両が増加する。逆の場合には、Fast エージェントは追い抜きを行うことができず、Slow エージェントの速度に合わせてしまうため、平均走行速度が遅くなり、その道路を選択する車両が減少する。これを繰り返した結果、どの道路についても速度が同等になるよう、道路の容量（ここでは単純に車線数に比例する）に比例したエージェント数に収束するのである。

上記の現象は、複数のエージェントモデルと、それらの間のインタラクションがもたらした結果であることに注意する必要がある。例えば、すべてのエージェントに同じモデルを与えた場合、道路の容量を超える数の車両が走行するまで、その道路における車両の平均速度は一定である。したがって、道路間の車両数に偏りがあっても、それが経路を変更する要因とはならない。すなわち、エージェントモデルの多様性と、それらの間のインタラクションが、交通の様相に影響を与えていると言える。

## 4. まとめ

マルチエージェントシミュレーションにおいて、ミクロとマクロの相互関係を分析することは、シミュレーション中で起こる現象の理解のために重要な要素である。本稿では、都市交通を例にとり、ミクロとマクロ双方において、精密なモデルに基づいた意思決定機能を備えるプラットフォームを構築した。さらに、このプラットフォームを用いて、都市交通において、エージェントモデルの多様性とそれらの間のインタラクションにより、どのように交通が生み出されるか分析した。この分析に関して、シミュレーションの規模を段階的に広げていくことで、個々の運転行動の影響とそれにより生み出された交通が個々の交通行動に与える影響を分析し、その過程を示した。

今後の研究課題として、より精密な行動モデルの作成があげられる。実際の人間の運転者の振る舞いは、本稿で用いたモデルよりも多様であり、複雑な意思決定を行っていることは明らかである。そこで、人間の行動モデルを作成する技術 [Tanaka 07] を用いて、より人間に近いモデルを実装することが必要である。

## 参考文献

- [Balmer 08] Balmer, M., Meister, K., Rieser, M., Nagel, K., and Axhausen, K. W.: Agent-based Simulation of Travel Demand: Structure and Computational Performance of MATSim-T, in *Proceedings of the 2nd TRB Conference on Innovations in Travel Modeling* (2008)
- [Nagel 98] Nagel, K., Wolf, D. E., Wagner, P., and Simon, P.: Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach, *Phys. Rev. E*, Vol. 58, No. 2, pp. 1425–1437 (1998)
- [Pipes 53] Pipes, A., L.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics, *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 3, pp. 274–287 (1953)
- [Tanaka 07] Tanaka, Y., Nakajima, Y., Hattori, H., and Ishida, T.: A Driver Modeling Methodology Using Hypothetical Reasoning for Multiagent Traffic Simulation, in *Proceedings of the 10th Pacific Rim International Conference on Multi-Agents (PRIMA-2007)*, pp. 278–287 (2007)