

# マルチエージェントシステムを用いた 都市内物流施策の評価に関する研究

小川 慶輔<sup>1</sup>・谷口 栄一<sup>2</sup>・Ali Gul Qureshi<sup>3</sup>・中村 有克<sup>4</sup>・Joel Teo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

E-mail:k.ogawa@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー 京都大学大学院教授（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

E-mail:taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院准教授（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

E-mail:aligul@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学大学院助教（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

E-mail:nakamura@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>京都大学大学院研究員（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

E-mail:joel.teo@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年の急速な経済発展に伴って、都市内では道路交通問題や環境問題が深刻なものとなった。それらの問題の大きな要因の1つとして貨物車交通が挙げられ、消費者ニーズの多様化に伴った形で物流事業者は非効率な配送を強いられている。その結果、道路交通問題、環境問題の悪化に拍車をかけている。行政は、各利害関係者の目的を鑑みながらこれらの問題を施策の実施を通して解決する必要がある、その上で、どの施策がより効果的かを検証することが非常に重要となる。

本研究では、マルチエージェントシステム概念を都市内貨物車交通に適用し、利害関係者をエージェントとしたモデルを構築する。ケーススタディとして同モデルを実在する道路ネットワークに適用し、行政が各種施策を実施した場合の効果の検証を行うことで、施策の有効性、モデルの有用性、そして施策に関する知見を得ることを目的とする。

**Key Words** :City logistics, urban freight transport, stakeholders, multi-agent system, Q-learning

## 1. 研究の背景

近年の急速な経済発展に伴って、都市内では道路交通問題や環境問題が深刻なものとなった。それらの問題の大きな要因の1つとして、貨物車交通が挙げられる。まず、道路交通問題についてであるが、近年の消費者ニーズの多様化に伴った、より付加価値の高い物流サービスの提供が求められている。その具体例として、Just-in-Time配送や電子商取引等に伴う小口、多頻度な配送が挙げられる。しかし、物流事業者は消費者ニーズに応えようとするあまり非効率な配送が強いられている。その結果、都市内の道路交通状況悪化に拍車をかけることとなっている。次に環境問題についてであるが、自動車の排出ガス中に含まれるNOx（窒素酸化物）やSPM（浮遊粒子状物質）等の大気汚染物質は、貨物車をはじめとする大型車から特に多く排出されている。その量は同一速度・距離で比較すると乗用車等の小型車類の十数倍にも達する。また、自動車による走行騒音も問題となっており、その発生レベルは大型車と小型車との間には格段の

差がある。従って環境問題に着目する場合、都市内における貨物車交通の行動特性を正確に把握した上で、その問題解決のための具体的方策を検討する必要がある。

以上のように貨物車交通は道路交通問題、環境問題の両面に深く関係しており、これらの問題解決にあたって、行政は効率性と環境負荷軽減の両者を目指した施策を行うことが重要である。その施策には様々なものが考えられるが、一方的に物流事業者に何かを強いるような施策には限界がある。よって、物流事業者の自助努力を促進しつつ、その自助努力では対処不可能な部分を行政がうまく対処することが望まれる。しかしながら、行政の検討する各種施策が実際にどの程度重交通を緩和し、環境負荷を軽減することに貢献できるのかを予測することは決して容易なことではない。施策に費やせる費用には限りがあり、最近では費用便益比を考慮するなどして、少ない費用でできるだけ高い効果を持つ施策を練ることが重要視されている。そのため、各種施策の効果を適切に評価し、より効果の高い施策を行うことが行政には求められる。また、行政の施策の実施により各利害関係者が

相互に作用する一方で、それらを取り巻く道路ネットワークの動態にも変化が生じる。

そこで本研究では、貨物車交通に関するモデル化に関する研究、ならびに近年分散型制御のシステムとして研究が進められているマルチエージェントシステムの概念に着目し、貨物車交通における各利害関係者の目的、行動をモデル化した上で、行政が実施する各種施策の定量的評価を目指すこととする。

貨物車交通のモデル化に関する研究としてTaniguchi *et al.*<sup>1)</sup>は、貨物車交通施策の実施が複数の利害関係者に与える影響について定量的に分析しており、都市内高速道路の料金実施が効果的であることを示している。しかし、荷主が配送委託する物流事業者が常に固定であるため、現実社会での重要な相互作用として考えられる荷主の獲得競争が反映されていない。また、貨物車交通における利害関係者の関わりをまとめたものとして、Anand *et al.*<sup>2)</sup>はオントロジーの概念を用いて、貨物車交通に関わる利害関係者の目的、資源、行動について、各利害関係者どうしの関係を示している。また、Teo *et al.*<sup>3)</sup>は、マルチエージェントシステムを用いた行政の施策評価の基本的なモデル構造を示しており、エージェントとして物流事業者、荷主、行政を考慮している。これらのエージェント間の相互作用やエージェントの目的・行動を明示し、エージェントの学習法に関する検証をした。その上で、仮定の道路ネットワークにおいてモデルを適用し、行政の施策の評価を行っている。

以上を踏まえ本研究では、マルチエージェントシステムを用いて利害関係者をエージェントとみなしたモデルを構築する。そして同モデルによる都市内貨物車交通施策の評価の枠組みを確立するとともに、実在する道路ネットワークにおいて行政が各種施策を実施した場合の効果の検証を行う。また、道路ネットワークをより現実に則した表現するために、交通シミュレーションを組み込んだモデルの構築を行うこととする。以上のように、複数の利害関係者を考慮した貨物車交通施策の総合的評価を行うとともに、施策の有効性やモデルの有用性を示し、施策に関する知見を得ることを目的とする。

## 2. モデルと定式化

本研究におけるモデルの構造を図-1に示す。各主体の相互作用は図中の矢印で表される。まず物流事業者は荷主の顧客情報を基に、最適な貨物輸送料金を各荷主に提示する。次に、荷主はこれを受けて最適な物流事業者を選択する。物流事業者は委託された貨物輸送を実施し、貨物輸送費用を把握する。顧客は物流事業者から貨物を受け取る際に、希望する時間より配送が遅れた場合は荷

主にクレームを出す。行政が施策を実施した場合、物流事業者は自社の配送を変化させる。以上の状態、行動を、各利害関係者をエージェントとしたマルチエージェントシステムの枠組みに適用し、モデル化を行う。以下、モデルの詳細について説明する。

エージェントの学習を、学習の適応レベルにより分類した場合、分散学習、協調学習、社会的学習の3つに分類されるが、本研究では分散学習を取り入れることとする。分散学習とは、明示的な相互作用や通信がない状態において、各エージェントが自身の目標を達成すべく独立して学習を行うものである。

分散学習の1つとして強化学習がある。強化学習は、エージェントが自身にとって最適な行動や結果が分からず、試行錯誤によってその状態を発見するような、教師なし学習の代表的な学習手法である。強化学習では、エージェントがとった行動に対する評価結果がエージェントに提示され、各エージェントは提示された評価結果を学習することにより、自身にとって望ましい行動を探索する。評価結果の学習とは、学習主体が自身の行動の結果得られる様々な報酬を手掛かりとしながら、単位時間ないし最終的に受け取る報酬の総量を最大化する方策を獲得するということである。

続いて強化学習のメカニズムは図-2に示す通りである。エージェントは、まず自身の置かれている環境から状態  $s_t$  を知覚した上で、その状態の下で自身がとるべき行動  $a_t$  を選択し実施する。その結果、状態が  $s_{t+1}$  へと遷移し、その遷移に伴ってエージェントは報酬  $r_{t+1}$  を受け取る。なお、この報酬は特定のある状態に到達した時点で与えられると考えることが多く、状態遷移ごとには与えられない場合もある。報酬はその状態の望ましさを表す指標であり、報酬が大きいほどエージェントにとって望ましい状態であると言える。上記の作業を繰り返し、最終状態に到達した時点でエージェントのタスクが完遂される。この学習の繰り返しにおいて、各状態における最適な行動を選ぶためのルール（これを方策または政策という）が構築されていくことになる。まとめると、強化学習ではエージェントが環境との相互作用により自身の置かれている状態を知覚し、その状態において自身がとる行動の価値を学習することによって方策の価値（行動価値関数）を更新する。そして最適な方策が獲得されることとなる。

続いて学習主体についてであるが、本研究では物流事業者、荷主、行政の3主体とした。ここで学習主体とは、何らかの目的を達成するために試行錯誤的に行動し、得られた経験を学習することで任意の状態における自身の最適な行動を探索する主体のことである。物流事業者の目的は利潤の最大化であり、実際の配送による利潤を学習し、荷主に対する料金の提示、および低費用な配送を

行う。ここで物流事業者の配送は、配車配送計画モデルを用いて表現した。顧客間を最短経路で移動し、最適な配送順序に従って貨物の配送を行う。次に、荷主は物流事業者への配送委託費用の削減と配送サービスの質の向上を目的とし、顧客からのクレーム数を学習した上で、クレーム数と配送委託費用の両方を低減できる物流事業者の選択を行う。最後に、行政は環境、交通負荷の低減を目的とし、物流事業者からの NOx 排出量を学習した上で、施策を実施するかどうかの意思決定を行う。なお、本研究では各学習主体の学習メカニズムとして Q 学習を採用した。以下に更新式を示す。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1-\alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha \left[ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1} \in A} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \right] \quad (1)$$

ただし、

- $Q(s_t, a_t)$  : 状態  $s_t$  において行動  $a_t$  をとる場合の価値
- $\alpha$  : 学習率
- $r_{t+1}$  : 状態  $s_t$  で行動  $a_t$  をとる場合に得られる報酬
- $\gamma$  : 割引率
- $A$  : 実行可能な行動の集合
- $s_t$  :  $t$  日目の状態
- $a_t$  :  $t$  日目の行動

更新式(1)より、学習率が小さいほど過去の経験を重視し、大きいほど直近の経験を重視した学習となる。割引率は、将来に期待される報酬の不確実性を示すパラメータである。物流事業者は配送による利潤を、荷主は顧客からのクレーム数を Q 値として学習するこれらは全主体で共通である。行動に関しては、物流事業者は荷主への提示料金の決定であるが、本研究では提示料金を配送費用に値上げ率を乗じて算出するため、値上げ率の決定が行動となる。荷主の行動は配送委託先の物流事業者の決定である。

なお、図-3 がシミュレーションの流れである。ネットワーク情報、物流事業者、顧客の情報が必要なものとして存在する中で、物流事業者は配車配送計画により配送ルートを決め、及び配送ルートに準じて荷主に提示する料金の決定を行う。荷主は料金の提示を受け、物流事業者を選択する。なお、過去に受けた顧客からのクレームを加味した上での選択となる。荷主から選択された物流事業者は配送を実施し、行政はその際に排出された NOx 量を学習した上で、施策を実施するかどうかの判断を下す。そして、施策を実施する場合は道路ネットワークに変化が生じ、その中で物流事業者、荷主は新たな意思決定を行う。

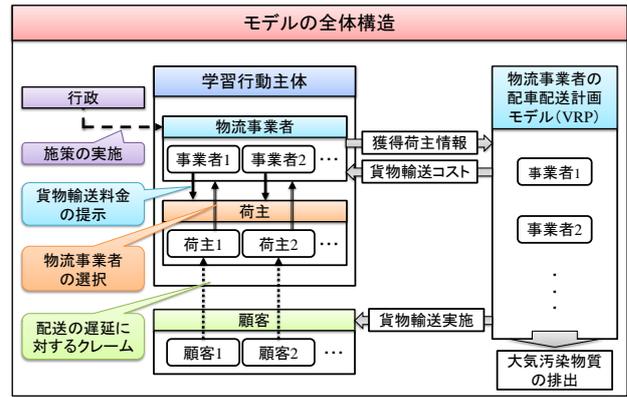


図-1 モデルの全体構造

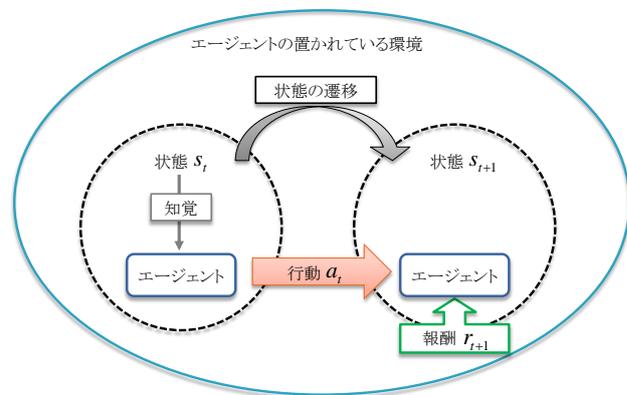


図-2 強化学習の流れ

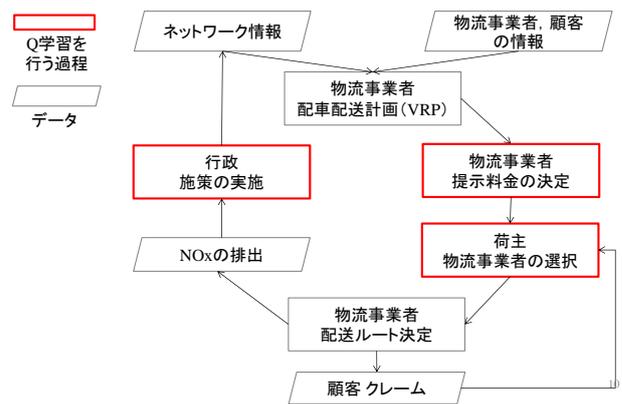


図-3 シミュレーションの流れ

### 3. ケーススタディ

ケーススタディでは、実在する道路ネットワークに本モデルを適用し、各種施策の効果を検証する。実施する施策の1つとして、UDCの設置を検討する。UDCとは

Urban Distribution Center の略で、荷主、物流事業者、顧客間の配送を経済面、環境面ともに効率化を図ることを目的とした、物流センターのことを指す。UDC の設置により効率的な配送が期待されるが、その効果の程度を本ケーススタディにより検証する。その他にも、道路の新設、流入規制などの施策の効果を検証する。

検証方法について、施策を全く打たない場合の各学習主体の Q 値を基準とし、各種施策を実施する場合のケースとの比較を行い、各学習主体への効果の程度を検証する。

結果は、発表当日に示すこととする。

### 3. おわりに

貨物車交通による交通、環境問題の悪化に拍車がかか  
る中、行政はそれらの解決のために様々な施策の実施を

検討する必要がある。その効果を検証するために、本研究ではマルチエージェントシステム、交通シミュレーションを用いて貨物車交通に関わる各利害関係者の行動に関するモデルの構築を行った。その上で、ケーススタディを通して、各種施策の効果の検証を進めることとする。

### 参考文献

- 1) Taniguchi, E. and R.E.C.M. van der Heijden. : An evaluation methodology for city logistics, *Transport Reviews*, Vol.20, No.1, pp.65-90, 2000.
- 2) Anand, N., Yang, M., Duin,J. and Tavasszy, L. : An ontology for city logistics, *Expert Systems with Application* 39, pp.11944-11960,2012.
- 3) Teo, J., Taniguchi, E. and Qureshi, A.G. : Evaluation of Distance-Based and Cordon-Based Urban Freight Road Pricing in E-Commerce Environment with Multiagent Model, *Transportation Research Board*, pp.127-134, 2012.

(?受付)

## Evaluating city logistics measure in freight transportation with multi-agent systems

Keisuke OGAWA, Eiichi TANIGUCHI, Ali Gul QURESHI and Joel TEO

With the rapid economic development in recent years, environmental and road traffic problems have become serious in cities. As one of the major factors of those problems, freight vehicles transportation faces big challenges in delivery services, due to the diversification of consumer needs. As a result, environmental and road traffic problems have gotten worse. Administrators are required to resolve these problems through measures, considering the conflicting objectives of each stakeholder. Therefore, it is extremely important to evaluate effects of such measures before their actual implementation. In this study, behavior of city logistics stakeholders is modeled using the concept of multi-agent system.

In case studies, we evaluate effects of various measures applying this model to actual road network and logistics data. The goal of this study is to obtain insight about the effectiveness of such measures and verify the usefulness of the proposed multi-agent model.