

都市物流施策評価のためのマルチエージェントシミュレーションに関する研究*

Multi-agent Simulation for Evaluating Urban Logistics Policies

岡本雅之**・谷口栄一***・山田忠史****

By Masayuki OKAMOTO**・Eiichi TANIGUCHI***・Tadashi YAMADA****

1. 背景と目的

近年、都市内における交通状況は著しく悪化している。その原因の1つとして、トラックによる貨物輸送が挙げられる。このような状況を改善するためには、行政および物流事業者の双方の対応が急務である。都市貨物輸送には、種々の利害関係者が存在するため、これら利害関係者への影響を見極めた上で、どのような対策を採るべきかを検討することが肝要である。

本研究では、都市内のトラック貨物輸送に焦点を当て、それに関係する利害関係者（物流事業者、荷主、行政）を対象としたマルチエージェントシミュレーションモデルを開発し、物流事業者のITS導入効果や行政の都市物流施策の実施効果を検証する。

2. 配車配送計画

本研究においては、物流事業者の行動モデルとして、2つの配車配送モデルを用いる¹⁾、すなわち、VRPTW-F (Vehicle Routing and scheduling Problems with Time Window-Forecasted) および VRPTW-D (Vehicle Routing and scheduling Problems with Time Window-Dynamic) である。

VRPTW-F は過去の平均所要時間を用いて前日に作成した配車配送計画を、そのまま当日に運用する計画であり、当日の交通状況によって経路や荷主の訪問順序の変更を行わない。

一方、VRPTW-D は当日に得られるリアルタイム所要時間情報を用いて、荷主またはデポに到着する毎に配車配送計画を解き直すことにより、経路や荷主の訪問順序を動的に変更することが可能な計画である。

*キーワード：物流計画，交通情報，ITS

**正会員，工修，国土交通省

***フェロー会員，工博，京都大学大学院工学研究科

****正会員，工博，京都大学大学院工学研究科

(京都市左京区吉田本町，

TEL075-753-4789, FAX075-752-5303)

3. マルチエージェントモデル

(1) 概説

マルチエージェントシステムとは、モデル内に複数の主体(agent)を想定し、各主体が目標(goal)を達成するために、各々の知識(knowledge)や技術(skill)に基づいて意思決定を行い、その行動を表すモデルである。システム全体よりも個々のエージェントの能力、性質、機能を重視し、自律的なエージェント (autonomous agent)間の相互作用に着目している。本研究では、本モデルにおける各種エージェントが各自の期待報酬を最大化（期待報酬がコストの場合は最小化）するような行動を取った場合、その行動が他のエージェントの行動にどのような影響を与えるのかについて考察する。

(2) エージェントの設定

ここでは、物流事業者の集荷行動のみを考える。物流事業者の目標は利益の最大化であり、その方策は、利益の最大化が期待できるような料金を荷主に対して提示することである。物流事業者の利益は荷主から支払われる集荷料金から集荷コストを差し引いたものであり、集荷コストはトラックが走行することによって発生する走行コスト、トラックを所有することによって発生する固定コスト、到着指定時間外に到着した場合に発生する早着ペナルティと遅刻ペナルティから構成される。物流事業者の目的関数は、以下のように定式化できる。

Maximise

$$E[B(f_i)] = f_i \cdot E[n_c(f_i)] - E[C_{c,i}] \quad (1)$$

ただし、

f_i : 物流事業者*i*の提示料金

$E[B(f_i)]$: 物流事業者*i*の提示料金を f_i とした場合の利益の期待値

$E[n_c(f_i)]$: 物流事業者*i*の提示料金を f_i とした時の獲得荷主数の期待値

$E[C_{c,i}]$: 物流事業者*i*の物流コストの期待値

荷主の目標はコストの最小化であり、コストを最小化するような物流事業者を選択することが荷主の方策となる。ここで、コストとは物流事業者に支払う料金の他に、荷主毎に設定した単位時間当たり遅刻コストに遅刻時間を乗じたものを意味する（以下、荷主コストと呼ぶ）。ここで、荷主毎に設定した単位時間当たり遅刻コストは荷主の積荷に対する時間価値であり、物流事業者が荷主に対して支払う遅刻ペナルティとは異なる。荷主の目的関数を定式化すると、以下ようになる。

Minimise

$$E[C_{s,j}] = f_i + C_{d,j} \cdot E[t_{d,ij}] \quad (2)$$

ただし、

$E[C_{s,j}]$: 荷主 j の荷主コストの期待値

$C_{d,j}$: 荷主 j の単位時間当たりの遅刻コスト

$E[t_{d,ij}]$: 物流事業者 i の荷主 j への遅刻時間の期待値

行政の目標は、道路リンク上の NOx 排出量を基準値以下に抑えることと仮定し、そのための施策を実施することが方策となる。本研究では行政の施策として、ロードプライシング、特定物流事業者を荷主が選択した場合の荷主への補助金交付、交換配送（共同配送の一種）の 3 ケースを考える。NOx 排出量の算出方法は以下の通りである。

$$e_{n,a} = d_a (k_1 \cdot v_m^2 - k_2 \cdot v_m + k_3) \quad (3)$$

ただし、

$e_{n,a}$: リンク a の NOx 排出量

d_a : リンク a の距離

v_m : トラックの走行速度

k_1, k_2, k_3 : 定数

(3) エージェントの学習

エージェントが方策を決定する際、その方策を決定するためのルール of 価値が必要となる。ルールの価値とは、物流事業者にとっては提示料金別の獲得荷主数の期待値と提示料金別の物流コストの期待値であり、荷主にとっては物流事業者別の遅刻時間の期待値であり、行政にとっては各リンクにおける NOx 排出量の期待値と各物流事業者の NOx 排出量の期待値である。各エージェントは毎回の行動の結果から、これらルールの価値を更新していく必要がある。

本研究では学習速度が比較的速い非ブートストラップ型の学習の 1 種であるモンテカルロ法に基づいた学習手法²⁾を採用した。

本研究で採用したモンテカルロ法に基づいた学習手法では、毎回の状態一行動過程において、ある時点におけるルールの価値が、前回までのルールの価値と前回に得られた報酬を学習パラメータ（学習率）を用いて配分することによって決定される。このような学習は以下のように定式化される。

$$E_\pi(t+1) = \alpha \cdot r_\pi(t) + (1-\alpha) \cdot E_\pi(t) \quad (4)$$

ただし、

$E_\pi(t)$: 時点 t における方策 π のルールの価値

$r_\pi(t)$: 時点 t における方策 π の報酬

α : 学習率

本研究では、この手法に基づいて各エージェントのルールの価値を更新した。

4. ケーススタディ 1

設定したマルチエージェントモデルを小規模な問題に適用し、モデルの特性と VRPTW-D の有効性を検証する。対象道路ネットワークは、図-1 に示すような正方形の格子状であり、各頂点に荷主と物流事業者が 2 社ずつ存在する。1 辺のリンク所要時間を 40 分、対角線のリンク所要時間を 60 分とした。

リンク所要時間を固定値としてシミュレーションを行い、学習率が 0.4 以上のケースにおいて、物流事業者の提示料金がゲーム理論におけるナッシュ均衡解と一致することを確認した。次に、リンク所要

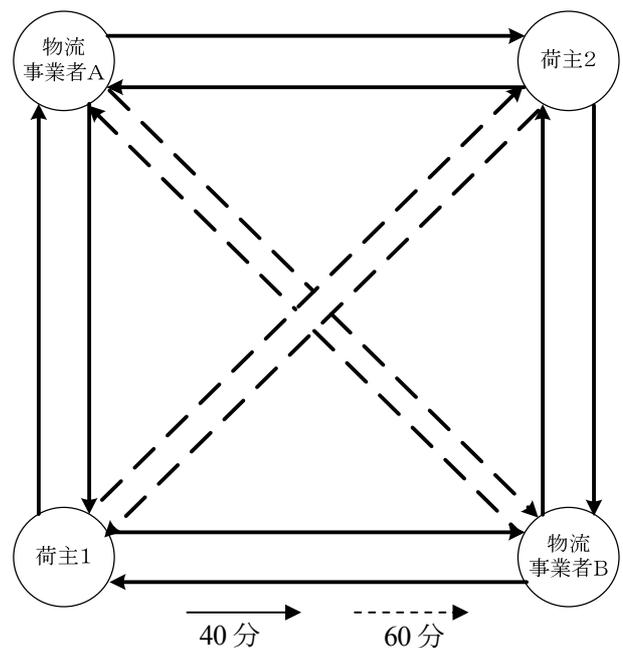


図-1 小規模道路ネットワーク

表-1: 計算ケース (ケーススタディ 1)

	Case 1	Case 2	Case 3
事業者 1 の行動	VRPTW-F	VRPTW-F	VRPTW-D
事業者 2 の行動	VRPTW-F	VRPTW-D	VRPTW-D

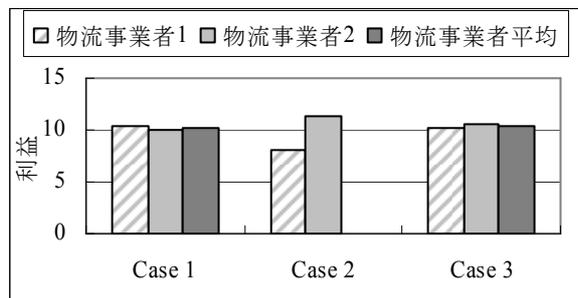


図-2 物流事業者の利益

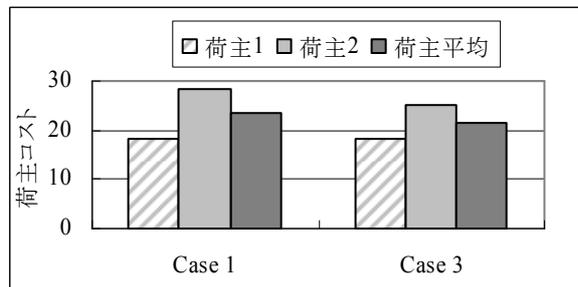


図-3 荷主コスト

時間が平均 40(分), 分散 20(分²)ならびに平均 60(分), 分散 40(分²)の正規分布に従うと仮定し, 表-1 に示す計算ケースにおいて, 5000 日分のシミュレーションを行った. 学習率 0.5 の場合の物流事業者の利益を図-2 に, 荷主コストを図-3 に示す.

Case 1 と Case 3 から, VRPTW-D を用いることにより, 物流事業者の利益は増加し, 荷主コストは減少していることがわかる. また Case 2 から, VRPTW-D を用いる事業者と VRPTW-F を用いる事業者が混在する状況では, VRPTW-D を用いる事業者の利益が増大することがわかる.

5. ケーススタディ 2 (45 荷主, 10 物流事業者)

図-4 に示すような 7×7 の正方形格子状道路ネットワークでの集荷に本モデルを適用する. 物流事業者は 10 社であり, 事業者 1~3 はノード 1 に, 事業者 4~6 はノード 13 に, 事業者 7~8 はノード 7 に, 事業者 9~10 はノード 19 に, それぞれデポを所有するものとした. 物流事業者の配車配送方法別, 行政施策別の計算ケースを, 表-2 と表-3 に示す.

交換配送を実施する場合, 各物流事業者の担当エリアを決定し, 2 社の物流事業者間において提示料金が同一で, かつ, それぞれが相手のエリアに属す

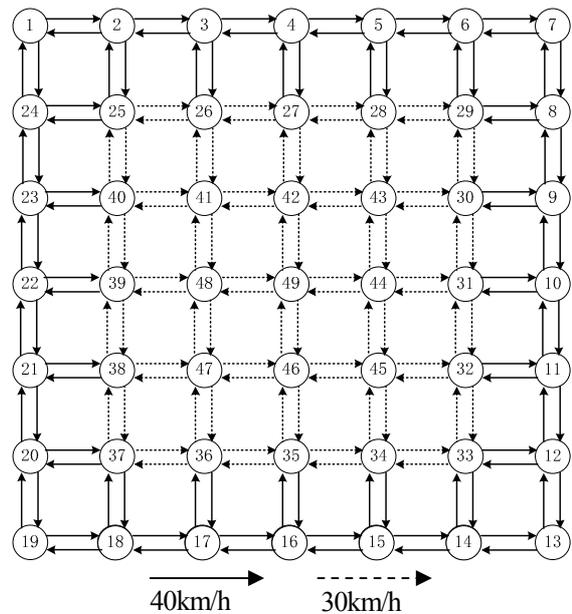


図-4 対象道路ネットワーク

表-2 計算ケース (ケーススタディ 2)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
F 事業者	10 社	9 社	7 社	5 社	0 社
D 事業者	0 社	1 社	3 社	5 社	10 社

*F 事業者は VRPTW-F を, D 事業者は VRPTW-D を用いる.

表-3 計算ケース (ケーススタディ 2, 施策あり)

	配車配送方法	行政の施策
Case 6	VRPTW-F: 7 社 VRPTW-D: 3 社	Case 3+ロードプライシング+補助金
Case 7	VRPTW-F: 7 社 VRPTW-D: 3 社	Case 6+交換配送

る荷主を獲得した場合, 貨物を交換する. 担当エリアは, 各物流事業者のデポを中心に均等に設定した. 対象道路ネットワークにおけるリンク所要時間には, ブロック密度法を用いた交通流シミュレーションの結果を用いた. 30 日分の計算を 3 回繰り返すことで, 90 日分の所要時間データを作成した.

図-5 に, Case 1 における物流事業者提示料金の平均値の推移を示す. これにより, 日数の経過に従って物流事業者が提示料金を下げ, ある程度下げたところで収束に向っていることがわかる. 物流事業者が荷主を獲得するために, 他社よりも低い料金を提示したためであると考えられる.

また, Case 1~Case 5 における物流事業者の利益と荷主コストを図-6 に示す. 物流事業者の利益は, VRPTW-D の導入事業者が少ない場合には大きい, 導入事業者が多くなるにつれて減少する. しかし, 全事業者が導入した場合でも, 全く導入しない場合よりは, 利益が大きくなる. また, VRPTW-D の導入により, 荷主コストは大きく減少している.

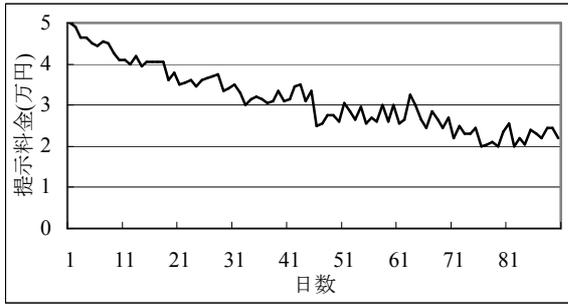


図-5 物流事業者の提示料金平均値の推移

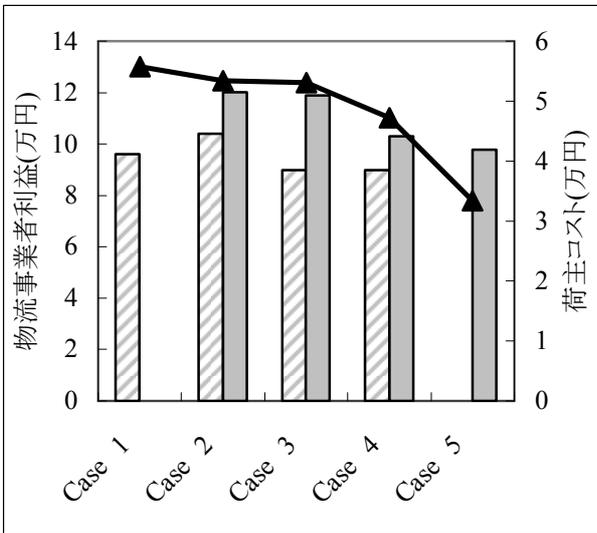
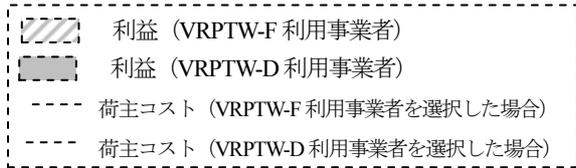


図-6 物流事業者利益と荷主コスト

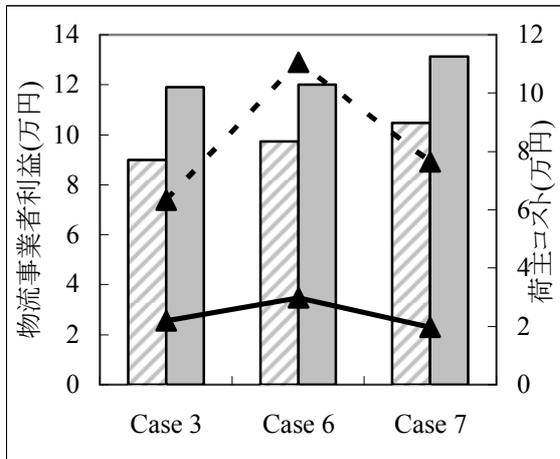
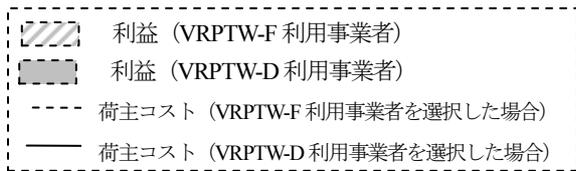


図-7 物流事業者利益と荷主コスト

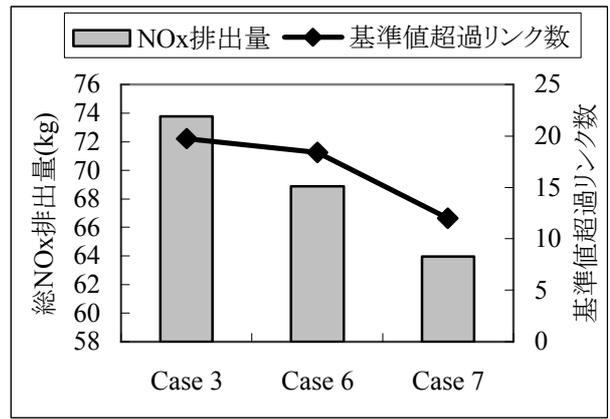


図-8 NOx 排出量と基準値超過リンク数

Case3, 6, 7における物流事業者の利益, 荷主コストを図-7 に, NOx 排出量, 基準値超過リンク数を図-8 に示す. 施策の実施により, 物流事業者の利益は増加しているが, 荷主コストも増加している. これは, 物流事業者が利益を確保するために提示料金を高くしているため, また, ロードプライシングの影響によって荷主への遅刻時間が増大しているためであると考えられる. しかし, VRPTW-D を用いる事業者を選択した荷主の荷主コストはあまり増加していない. また, 交換配送の実施により, 配車配送方法の違いによらず, 物流事業者利益は増加し, 荷主コストは減少している. 特に VRPTW-D を用いた場合は, 施策の実施前と比較しても荷主コストは減少している. また, NOx 排出量, 基準値超過リンク数は, 全てのケースで施策の実施により減少している.

6. 結論

都市内の貨物集配送を想定したマルチエージェントモデルを構築し, 物流事業者の配車配送行動と行政の施策の評価に関して基礎的考察を行った. その結果, 動的な配車配送計画を導入することにより, 物流事業者は高い利益を上げることができ, 荷主コストも削減できることが明らかになった. また, 交換配送の実施は, 荷主コストの減少に繋がり, 特に動的な配車配送計画システムを用いた場合に有効であることが示された. さらに, NOx 排出量や環境基準値超過リンク数は, 行政の施策により減少することが示された.

参考文献

- 1) 谷口栄一, 根本敏則, シティロジスティクス, 森北出版, 2001.
- 2) 高玉圭樹: マルチエージェント学習, コロナ社, 2003.