

# 貨物輸送事業者の参入・退出を考慮した都市内貨物車交通に関するマルチエージェントシミュレーション\*

A multi-agent simulation about urban freight transport considering an entry and shakeout of freight carriers\*

玉川 大\*\*・谷口栄一\*\*\*・山田忠史\*\*\*\*

By Dai TAMAGAWA\*\*・Eiichi TANIGUCHI\*\*\*・Tadashi YAMADA\*\*\*\*

## 1. はじめに

都市内における道路交通・環境問題の解決には、効率性と環境負荷低減を目指した貨物車交通施策の展開が重要と考えられる。一方、都市内貨物車交通問題には、その複雑さゆえ未解決の課題が多数存在し、その中の一つとして、多目的で複数の利害関係者を考慮した物流のモデル化の問題がある<sup>1)</sup>。貨物車交通施策の実施にあたっては、事前にその有効性を評価した上で現実適用する仕組みが重要となるが、そのためには上記課題の解決が前提となる。

そこで筆者らは都市内貨物車交通に関する多目的で複数の利害関係者を独立したエージェントとして考慮したマルチエージェントモデルを構築し、仮想道路ネットワークにおいて、各種貨物車交通施策の評価に関するシミュレーションを実施した<sup>2)</sup>。しかしながら、この研究では、各利害関係者の数や位置等の条件は固定されていた。一方、現実社会においては、貨物輸送事業者の市場からの退出や新規参入等、市場環境は頻繁に変化していることから、これらの現象を考慮する必要があると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、過年度に構築したマルチエージェントモデルを用いて、市場環境の変化として貨物輸送事業者の新規参入や退出を考慮したシミュレーションを行う。そして、過年度の結果との比較を行い、これら市場環境の変化が貨物車交通施策の効果に与える影響について分析することにより、効率的で環境に優しい都市内貨物車交通の実現に資することを目的とする。

## 2. モデルの概要

(1) 都市内貨物車交通に関する利害関係者

過去の筆者らの研究<sup>2)</sup>と同様に、都市内貨物車交通に関する利害関係者として以下の5主体を考慮し、それぞれ目標並びに目標実現に向けた具体的行動を想定した。

a) 貨物輸送事業者

目標：貨物輸送利益の最大化

行動：荷主への貨物輸送料金提示並びに貨物の配送

b) 荷主

目標：貨物輸送委託コストの最小化

行動：貨物輸送事業者の選択並びに配送の委託

c) 沿道住民

目標：自身の居住地域内でのトラックからのNO<sub>x</sub>排出量が基準値を超過する日数の最小化

行動：トラックからのNO<sub>x</sub>排出量が基準値を超過した場合に行政に対して環境改善を要望するかもしくは黙認する

d) 行政

目標：沿道住民からの環境改善要望発生地域数の最小化

行動：環境改善要望発生地域を対象に貨物車交通施策を実施するかもしくは何もしない

e) 都市高速道路管理者

目標：高速道路料金収入の最大化

行動：通行料金の変動を伴う料金施策の実施

以上のように想定した結果、利害関係者間の相互作用は以下のように表現される。

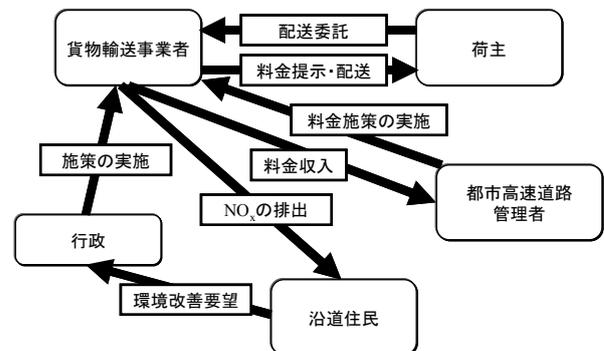


図-1 利害関係者間の相互作用

\*キーワード：物流計画、交通管理、マルチエージェントモデル

\*\*正員、博士(工学)、京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1、TEL:075-383-3140、

E-mail: d-tamagawa@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

\*\*\*フェロー、工博、京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1、

TEL:075-383-3229、FAX:075-950-3800)

\*\*\*\*正員、博士(工学)、京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1、

TEL:075-383-3230、FAX:075-950-3800)

(2) マルチエージェントモデル

本研究で使用するマルチエージェントモデルは、各利害関係者を独立したエージェントと見なしたモデルであり、図-2 に示すように各主体の学習行動モデルと貨物輸送事業者の配車配送計画モデルより構成される。なお配車配送計画モデルには、過年度に構築されている確定論的配車配送計画モデル<sup>3)</sup>を用いている。本モデルを用いたシミュレーションの流れを以下に示す。

- (STEP1)学習行動モデルにより、主体毎に過去の経験に基づき、自身の採るべき行動が選択・実施される。
  - (STEP2)配車配送計画モデルにより、貨物輸送事業者毎に各荷主への配送順序・トラックの割り当てが決定され、配送が実施される。
  - (STEP3)配送の結果、NO<sub>x</sub> 排出量や高速道路料金収入等ネットワーク環境が確定・更新される。
  - (STEP4)主体毎に必要な要素が学習行動モデルへフィードバックされ、主体毎に新たな環境が認知される。
  - (STEP5)フィードバックされた結果に基づき、主体毎に自身の行動の評価がなされ、経験が更新される。
- その後、STEP1に戻る。

以上のように、本モデルは2つのサブモデルによる繰り返し計算を行うことにより、他主体との相互作用を踏まえた上での自身にとっての望ましい行動が学習されるものである。

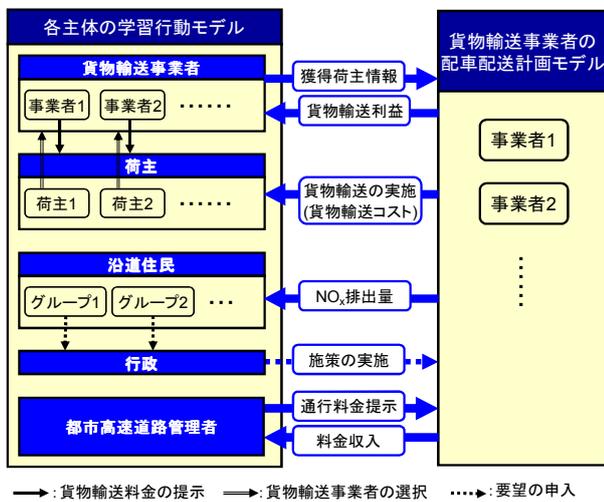


図-2 マルチエージェントモデルの枠組

(3) 各主体の学習行動モデル

貨物車交通施策の実施等に伴いネットワーク環境に変化が生じた場合、各主体は環境の変化に対応するべく、変化後の環境に相応しい行動を学習・実践するものと考えられることから、各主体は学習主体としてモデル化する必要がある。現在、様々なエージェント学習が提案されているが、都市内貨物車交通に関与する各主体のように、ネットワーク環境の変化に追従しながら自身にとつ

て理想的な行動を試行錯誤的に探索する必要がある場合には、強化学習<sup>4)</sup>の考え方が適用可能となる。強化学習の中にも様々な学習手法が提案されているため、それらの中から適用可能な学習手法を選択し、そのパフォーマンスを比較した結果、最終的にQ学習<sup>5)</sup>を用いてモデルが構築されている。Q学習における貨物輸送事業者の行動価値関数の更新式は以下のとおりである。以下の式で、貨物輸送事業者の行動は貨物輸送料金の提示であり、貨物輸送事業者は、自身が獲得できた利益を学習することにより、最も多くの利益が期待できる料金を学習する。

$$Q_f(s_{f,t}, a_{f,t}) \leftarrow Q_f(s_{f,t}, a_{f,t}) + \alpha_f \left[ r_{f,t+1} + \gamma_f \max_{a_{f,t+1} \in A_f} Q_f(s_{f,t+1}, a_{f,t+1}) - Q_f(s_{f,t}, a_{f,t}) \right] \quad (1)$$

ただし、

$Q_f(s_{f,t}, a_{f,t})$  : 事業者が状態  $s_{f,t}$  において行動  $a_{f,t}$  を選択

した場合の期待貨物輸送利益 (円)

$\alpha_f$  : 学習率

$r_{f,t+1}$  : 貨物輸送事業者が状態  $s_{f,t}$  において行動  $a_{f,t}$  を選択した場合に得られた貨物輸送利益 (円)

$\gamma_f$  : 割引率

3. 仮想ネットワークを用いたシミュレーション

(1) シミュレーション条件

図-3 に示すように、一般道路と都市高速道路から構成される格子状の仮想道路ネットワークを用いてシミュレーションを実施した。貨物輸送事業者はネットワークの四隅に1社ずつ、荷主は貨物輸送事業者所在ノードとネットワーク中心部を除く計20箇所に1社ずつ配置した。荷主の貨物需要は1荷主あたり1,000kgで統一した。また、隣接するノード間のエリアを一つの独立した居住地域単位とすることにより、ネットワーク内に複数の独立した住民グループが存在するものとした。なお、行政区画はネットワーク全体で1つとした。都市高速道路もネットワーク全体を1社で管理しているものとし、通行料金は2t車および4t車が40円/km、10t車が80円/kmとした。一般道路のリンク走行時間は3時間の幅を持つ時間帯毎に異なるものとしたが、高速道路のリンクは終日60km/hで走行可能とした。以上の条件は全て過去の筆者らの研究<sup>2)</sup>と同じである。

以上の条件をもとに、本稿においては、

- ① 貨物輸送事業者が1社新規参入するケース
- ② 既存の貨物輸送事業者が1社退出するケース

の2つの状況下での貨物車交通施策の評価を行うとともに、過年度の結果<sup>2)</sup>と比較することにより、貨物輸送事業者の新規参入や退出といった市場環境の変化が貨物車

交通施策の効果に及ぼす影響についても分析する。

貨物輸送事業者が新規参入するケースでは、シミュレーション結果が比較的安定した時点において、ネットワークの中心部に1社参入し、計5社となるものとした。また、既存事業者が1社退出するケースでは、新規参入と同じ時点において貨物輸送利益の最も少なかった事業者1社が退出し、計3社となるものとした。今回退出の対象となった事業者も図-3に示す。

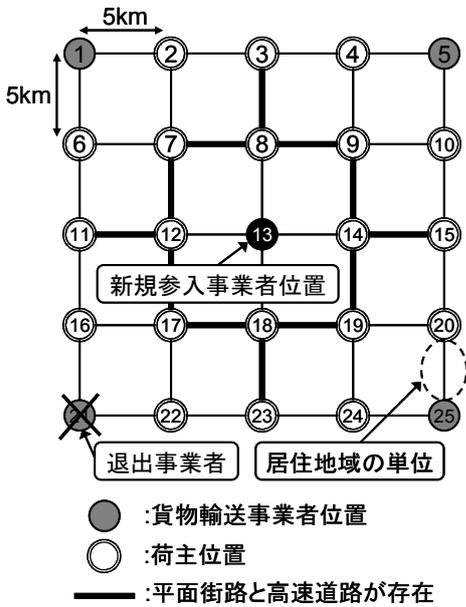


図-3 対象道路ネットワーク

(2) 計算結果

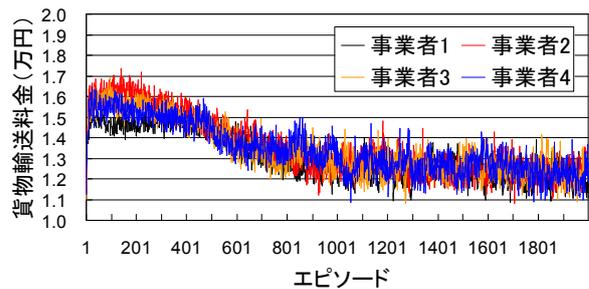
a)貨物輸送事業者の新規参入・退出が貨物輸送事業者の行動に与える影響

まず、貨物車交通施策が実施されない条件でシミュレーションを行い、貨物輸送事業者の新規参入並びに退出が貨物輸送事業者の行動に与える影響を分析した。

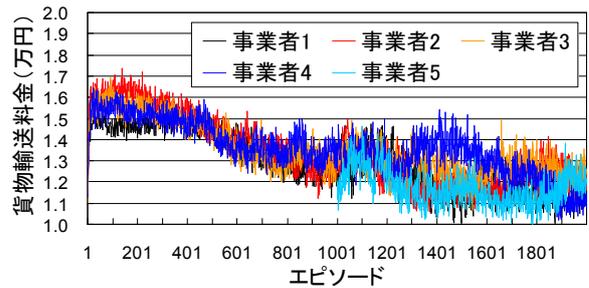
図-4, 5に各事業者の貨物輸送料金並びに全事業者の平均貨物輸送料金の推移を示す。新規参入のケースでは、各事業者の料金提示の動きが活発化し、事業者数が固定の場合よりも全事業者の平均で若干低下している。一方、既存事業者が1社退出したケースでは、残った3社間で引き続き料金を下げ続ける傾向が確認され、事業者数固定のケースや新規参入のケースよりも明らかに低下している。

図-6には全事業者の平均貨物輸送利益の推移を示す。新規参入のケースでは、貨物輸送料金が若干低下した上に、事業者数の増加に伴い1事業者が獲得可能な荷主数の期待値も減少したため、事業者数固定のケースよりも利益が減少する結果となったものと考えられる。一方、退出のケースでは、事業者数固定のケースと比較して貨物輸送料金は低下したものの、事業者数の減少に伴い1事業者が獲得可能な荷主数の期待値は逆に増加している

(a) 事業者数が固定のケース



(b) 新規参入のケース



(c) 退出のケース

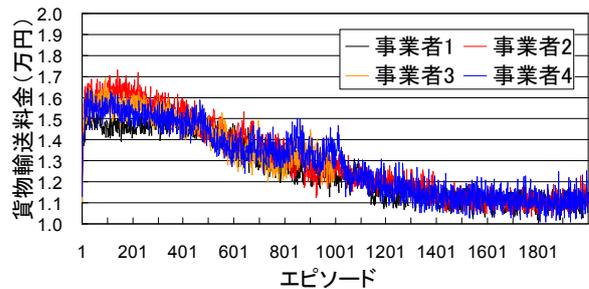


図-4 各事業者の貨物輸送料金の推移

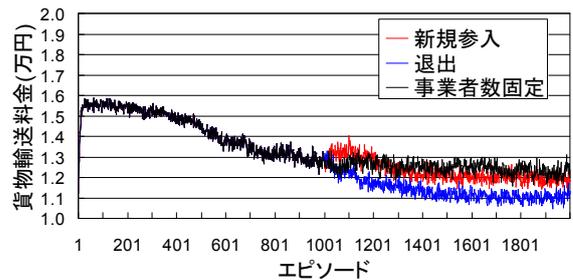


図-5 全事業者の平均貨物輸送料金の推移

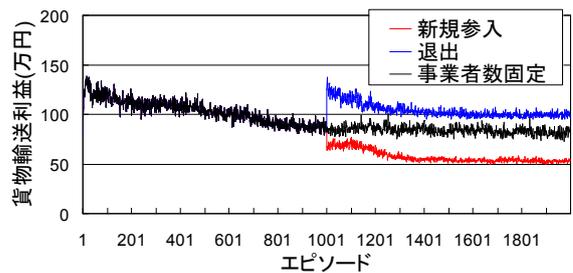


図-6 全事業者の平均貨物輸送利益の推移

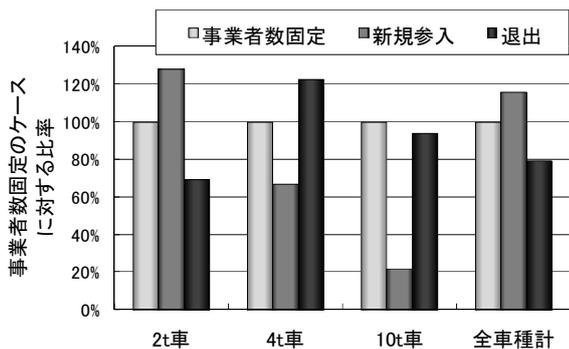


図-7 車種別トラック台数の変化

ため、貨物輸送利益も増加したと考えられる。新規参入、退出いずれのケースにおいても、事業者間の競争が再燃し提示料金が下落する傾向が見られたが、期待獲得荷主数が多く、利益を出しやすい環境にある退出のケースで下げ幅が大きくなっていることから、貨物輸送事業者は自身の採りうるリスクを勘案した上で、環境に合わせて柔軟に行動していると判断できる。

しかし一方では、事業者の退出により残事業者間での市場の寡占化が進み、料金が上昇する方向へ動く可能性も一般的には考えられる。本モデルでは、エージェントは自身の過去の経験を単純に踏襲して行動を選択しているが、市場環境に変化が生じた後では、変化前の状態で蓄積された経験が必ずしも有効とは限らないとも考えられる。現実社会においても、市場環境に変化が生じた場合には、変化が生じる前の過去の経験を単純に踏襲するのではなく、過去の経験を応用して、環境の変化に伴う他主体の行動の変化を予測していることも考えられる。したがって、今回の結果は、本モデルがこの点において課題を残していることを示しているとも考えられる。

図-7には、新規参入並びに退出のケースにおける全事業者での使用トラック台数を、過年度実施の事業者数固定のケースに対する比率で示した。この結果は、新規参入や退出後に状態が安定した期間の平均値で示している。新規参入の場合には車両の小型化が進み、その結果、総使用トラック台数が増加している。これは、事業者数の増加に伴い、1事業者あたりが獲得可能な荷主数の期待値が減少したため、各事業者で車両の小型化が進んだものと考えられる。一方、退出の場合には2t車から4t車へのシフトが進んでおり、総使用トラック台数が減少している。退出の場合には、新規参入とは逆に1事業者あたりが獲得可能な荷主数の期待値が増加するため、車両の大型化による対応が見られたものと考えられる。

#### b)貨物車交通施策の評価結果

過去の筆者らの研究<sup>2)</sup>では、行政による施策として、沿道住民から環境改善要望が生じた地域を対象に、全ト

ラックへのロードプライシングの実施と、10t車の通行禁止の2種類の施策を適用したが、ロードプライシングに関しては明確な効果が見られなかった。そこで本研究では、行政による施策として10t車通行禁止のみを検討した。また、過去の筆者らの研究<sup>2)</sup>と同様に、10t車通行禁止単独での効果と、高速道路の料金施策が併せて適用された場合の複合的な効果についても検証した。

図-8～図-12には、全事業者の平均貨物輸送利益、全荷主の平均貨物輸送委託コスト(以下、荷主コストとする)、ネットワーク全体でのNO<sub>x</sub>排出量およびNO<sub>x</sub>基準値超過地域数、高速道路料金収入について、新規参入、退出、および事業者数固定の各ケースでの結果を示す。なお、これらの結果は状態が安定した期間での平均値で示している。ここで、沿道住民の評価指標に関しては、個々の地域単位ではなくネットワーク全体で評価するために、ネットワーク全体での基準値超過地域数とした。また、沿道住民からの環境改善要望発生地域数と、上記のNO<sub>x</sub>基準値超過地域数の傾向に差が見られなかったことから、ここでは行政の評価指標として環境改善要望発生地域数の代わりにネットワーク全体でのNO<sub>x</sub>排出量を用いた。

貨物輸送利益、荷主コストに関しては、新規参入、退出いずれにおいても、事業者数固定のケースと同様に、施策による影響があまり見られなかった。

NO<sub>x</sub>排出量やNO<sub>x</sub>基準値超過地域数に関しては、事業者数固定のケースでは10t車通行禁止に伴い多少の削減が見られたものの、新規参入や退出のケースではその効果が殆ど見られなくなっている。新規参入のケースでは、図-7に示したとおりトラックの小型化が進み排出量の多い10t車の使用自体が減少したため、施策の導入前で既にこれらの値が小さくなったことが原因と考えられる。退出のケースでは、図-7によると退出に伴い2t車から4t車へのシフトが進むと同時に10t車も多少削減されていることから、10t車通行禁止の効果が発現しにくくなったものと思われる。しかし高速道路の料金施策が併せて導入された場合には、特にNO<sub>x</sub>基準値超過地域数に関しては、新規参入、退出いずれのケースも、事業者数固定のケースと同様に改善効果が確認できる。図-13に示すとおり、いずれのケースでも都市高速道路管理者は料金収入を増加させるべく、料金を下げる行動を採用している。その結果、トラックの高速道路利用が促進され、トラックの平均走行速度の上昇に伴う環境改善効果が発現しているものと考えられる。

以上をまとめると、10t車通行禁止のような特定の地域かつ特定の車種への施策は市場環境の影響を大きく受ける一方で、高速道路の料金施策のように、ネットワーク全体かつ全車種へ適用される施策は、市場環境の影響をあまり受けないことが示唆されたこととなる。

本研究では、マルチエージェントモデルを用いたシミ

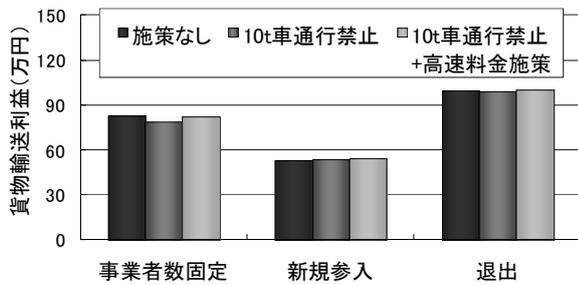


図-8 各ケースにおける平均貨物輸送利益の比較

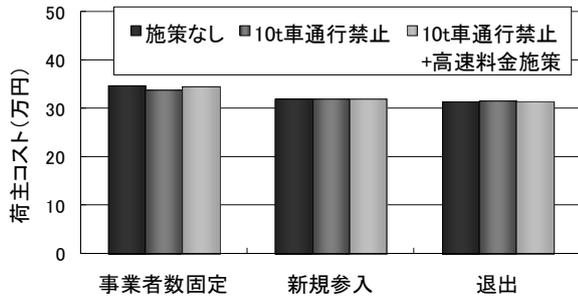


図-9 各ケースにおける平均荷主コストの比較

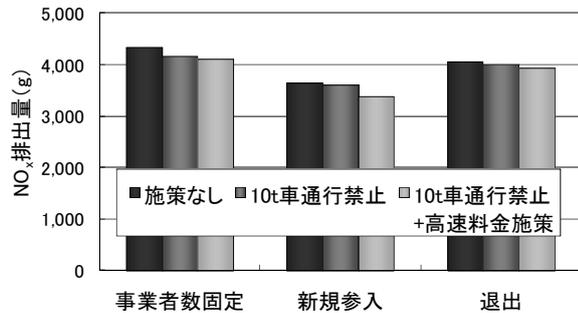


図-10 各ケースにおけるNO<sub>x</sub>排出量の比較

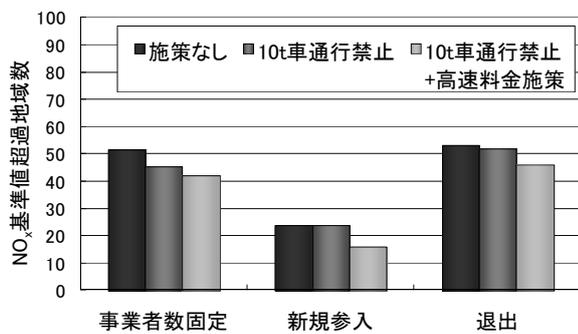


図-11 各ケースにおけるNO<sub>x</sub>基準値超過地域数の比較

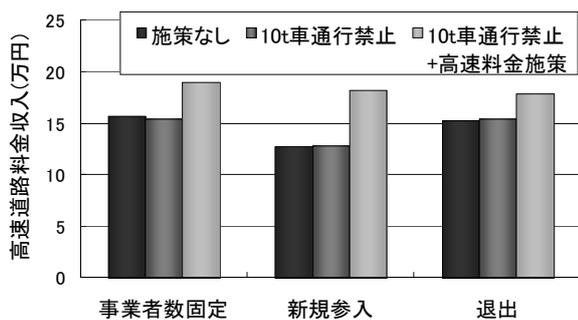


図-12 各ケースにおける高速道路料金収入の比較

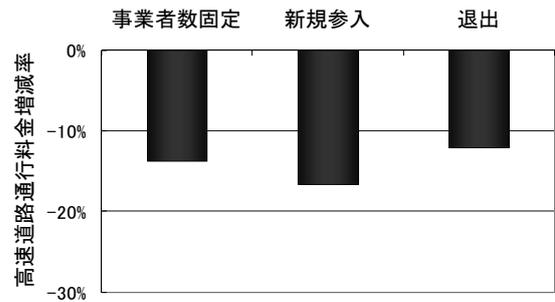


図-13 各ケースにおける平均高速道路通行料金増減率

ュレーションを実施しているが、マルチエージェントモデルは、貨物輸送事業者の新規参入や退出といった市場環境の変化を、エージェントの追加や削除により比較的容易に表現できることから、都市内貨物車交通施策の評価に適した性質を持っているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では、過年度に構築したマルチエージェントモデルを用いて、貨物輸送事業者の新規参入や退出といった、市場環境の変化を考慮した貨物車交通施策の評価を行った。その結果、貨物輸送事業者は市場環境の変化に柔軟に対応した行動を採ることが確認されるとともに、特定の地域や特定の車種を対象とした施策は市場環境の影響を受けやすい一方、ネットワーク全体かつ全車種を対象とした施策は市場環境の影響をあまり受けないことが示唆された。

しかしながら、本モデルでは、各エージェントが、市場環境に変化が生じた後も、変化が生じる前に蓄積された経験を踏襲して行動しており、この点に改良の余地があるものとする。併せて、本稿での結果は、限定された条件での計算結果に過ぎないため、今後、様々な計算条件でのシミュレーションを実施することにより、結果の傾向を把握していく必要があるものとする。

#### 参考文献

- 1) 谷口栄一ほか：都市圏物流のモデル化・政策・評価，土木計画学研究・講演集，Vol.24(2)，pp741-748，2001.
- 2) 玉川大，谷口栄一，山田忠史：マルチエージェントモデルを用いた都市内貨物車交通施策の評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.36，CD-ROM，2007.
- 3) 谷口栄一，山田忠史，細川貴志：都市内集配トラックの配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響分析，土木学会論文集，No.625/IV-44，pp.149-159，1999.
- 4) 三上貞芳，皆川雅章共訳：強化学習，森北出版，2000.
- 5) Watkins, C.J.C.H. and Dayan, P.: Technical Note: Q-Learning, Machine Learning, Vol.8, pp.55-68, 1992.