

マルチエージェントシステムを用いた都市高速道路の交通管理改革に関する研究*

Research on the System Innovation of Traffic Management Schemes for Urban Expressway Companies with a Multi-Agent Simulation Model*

岡本太郎 **・谷口栄一 ***・山田忠史 ****

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

1. はじめに

2005年に民営化された都市高速道路の運営は、近年、少子高齢化や経済情勢の低迷に加えガソリン価格の高騰などから利用台数が伸び悩み、経営の長期的展望において高架橋や都市トンネルなどの構造物の更新に要する投資への備えなど、先行き不透明な状況におかれている。このため、都市高速道路会社は、これまで以上に管理運営の効率化を追求する経営を行う必要がある。

都市高速道路において、事故や渋滞の原因となる落下物などの交通障害の早期発見と、交通事故処理を含めたそれらへの迅速な対応を行う交通管理は、交通阻害を最小限にとどめ円滑な交通を確保し、定時性という顧客サービス水準を維持する一方、料金収入の機会損失を抑制するための根幹的かつ極めて重要な業務である。

交通管理においては、巡回基地の設置、巡回車の配備と巡回スケジュールをより効率的に行うことで投資を抑制しつつ前述の目的を最大限確保する必要がある。

また、交通管理に適切な投資をすることは、有料道路の経営安定や社会経済発展のほか、近年活発に議論されている地球環境保護にも有益であるため、その効率的運用を科学的に分析することは重要なことである。この観点から、われわれは、これらの意思決定を支援するシステムの基礎となるモデルについてマルチエージェントシステム（以下MAS）を用いたモデルの開発に取り組んできた¹⁾。本稿では引き続き、これまでの簡易な問題によるシミュレーション事例を紹介した上で、実道路への適用について建設路線の整備に伴うネットワークの拡大を見込んだ展望を述べる。

*キーワード：道路計画、交通計画評価、交通管理

**正員、阪神高速道路株 総務人事部秘書グループ アシスタントマネージャ

(大阪市中央区久太郎町4-1-3、TEL06-6252-8121(代表))

Eメールアドレス: taro-okamoto@hanshin-exp.co.jp)

***フェロー、工博、京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻

都市基盤システム工学講座 教授

(京都市西京区京都大学桂、TEL075-383-3229)

****正員、博士(工学)、京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻

都市基盤システム工学講座 助教授

(京都市西京区京都大学桂、TEL075-383-3230)

2. 交通管理に関する意思決定支援システムの構築

交通分野におけるMASの研究例^{2)~5)}を踏まえると、MASの適用は、不確定かつ動的で予測困難な環境において特に有用である。それゆえ、これまで主に経験知に基づいた交通事故の取り扱いにおいて、MASの優位性が活用可能と考えられる。また、MASの特徴に、エージェントが「動的な環境」の状態変化を知覚し、他のエージェントとの行動の相互作用の下で、学習を伴い適応的に行動することが挙げられる。このような特徴は、「高速道路会社」と「交通管理会社」の2つの知的エージェントにも当てはまる。両エージェントは、円滑な交通を確保しつつ、発生した交通事故に対してより早期に対応するため、即応性と目的志向性を有する。さらに、高速道路会社にとって有効な交通管理方策を見出すためのMASの適用事例は見られない。これらにより、本研究では、MASの枠組みで、高速道路会社の交通管理における経営効率化を図るモデルの開発に取り組み、高速道路会社の経営改善に寄与する方策について考究する。

(1) 高速道路会社エージェント

高速道路会社エージェントは、効率的な経営と円滑な交通を保つことを目的とするエージェントである。本モデルでは、交通管理会社エージェントに対して事故防止のための定期巡回と事故発生時の迅速な処理を行う交通管理業務を委託して、利益の増大を図ることとする。高速道路会社の利益は、料金収入から交通管理会社への報酬、利用者が事故処理中に高速道路を利用回避することによる減収、および、定期巡回が遅延することによるペナルティを差し引くことにより算定される。

本稿では、以下の手順で高速道路会社エージェントの行動をシミュレートする。

- Step 1 : 交通管理会社に対し報酬の一部を前払いする。
- Step 2 : 交通管理会社が、定期巡回と事故処理を行う。
- Step 3 : 事故渋滞による利用者の減による損失と、定期巡回の遅延によるペナルティを計算する。
- Step 4 : 1日の終了時点で、交通管理会社に対し、当日の実績に基づいて報酬を支払い、事故処理中の減収額と巡回遅延ペナルティの累計を控除し

たものを当日の利益として、以下の式で算出。

$$B(i) = T - (f_p(i) \cdot n_p(i) + f_a(i) \cdot n_a(i)) - f_{ad} \cdot n_{ad}(i) - f_{pd} \cdot n_{pd}(i) \quad (1)$$

ここに、

- $B(i)$: i 日目の高速道路会社の利益(円)
- T : 日あたりの料金収入予算額(円)
- $f_p(i)$: i 日目の交通管理会社への巡回報酬額(円)
- $f_a(i)$: i 日目の交通管理会社への事故処理報酬額(円)
- $n_p(i)$: i 日目の総巡回回数(回)
- $n_a(i)$: i 日目の総事故処理回数(回)
- f_{ad} : 事故発生中の時間あたり減収額(円/分)
- $n_{ad}(i)$: i 日目の総事故継続時間(分)
- f_{pd} : 定期巡回遅延の時間あたりのペナルティ(円/分)
- $n_{pd}(i)$: i 日目の総定期巡回遅延時間(分)

Step 5 : 利益について前日と当日を比較して、その増減により、当日の交通管理会社への報酬の単価に一定の比率を乗じたものを翌日の交通管理会社への報酬の単価とする。単価は、利益のみの学習結果に基づいて設定する(後節参照)。

Step 6 : Step 1 から Step 5 を 1 エピソードとして規定回数(90 日)繰り返す。

(2) 交通管理会社エージェント

交通管理会社エージェントは、高速道路会社エージェントから前述の交通管理業務を受託し、円滑な交通を確保しつつ、業務を効率的に執行して自らの利益を増大させる。その利益は、高速道路会社からの報酬から車両や基地の固定費用と運行費用を差し引いたものである。

本稿では、以下の手順で交通管理会社エージェントの行動をシミュレートする。

- Step 1 : 高速道路会社から報酬の一部を前払いで得て、既定のルール(後述)に従い、巡回を実施する。
- Step 2 : 事故発生時、全巡回車と事故地点間の所要時間を比較、何れかの巡回車が事故地点へ派遣。
- Step 3 : 巡回車は、事故地点に到着後、交通管理者(警察)による実況見聞に伴う交通規制や事故車排出の支援等の事故処理(実績平均値の 30 分)を行い、終了後すぐに基地へ戻り再び待機。
- Step 4 : 一日終了時に、高速道路会社から当日の実績に基づき精算された報酬を受ける。報酬総額から総費用を控除した当日の利益を式(2)で算出。

$$R(i) = (f_p(i) \cdot n_p(i) + f_a(i) \cdot n_a(i) - C_{t,p}(t_{p,0}, \mathbf{x}_p(i)) - C_{f,p} \cdot \delta_f(\mathbf{x}_p(i)) - C_{f,b} \cdot \delta_b(\mathbf{x}_p(i))) \quad (2)$$

ここに、

- $R(i)$: i 日目の交通管理会社エージェントの利益(円)
- $C_{t,p}(t_{p,0}, \mathbf{x}_p(i))$: i 日目の巡回車 p の運行費用(円)

$t_{p,0}$: 巡回車 p の基地の出発時刻を表すベクトル
ここに、 $t_{p,0} = \{t_{p,0} \mid p=1, m\}$

$\mathbf{x}_p(i)$: i 日目の巡回車 p の巡回の割り当てとスケジュールを示す数列

ここに、 $\mathbf{x}_p(i) = \{n(j), B(k) \mid j=1, N_p, k=1, n_{0,p}\}$

$n(j)$: 巡回車が j 番目に巡回するノード番号

$B(k)$: 巡回車が k 番目に巡回する基地を表す番号
(ここでは 0 と表現する)

N_p : 巡回車 p が巡回するノード総数

$n_{0,p}$: 数列 $\mathbf{x}_p(i)$ 中の $B(k)$ の個数

$C_{t,p}$: 巡回車の配置費用(円/台)

$\delta_f(\mathbf{x}_p(i))$: $= 1$; 巡回車 p 使用時、 $= 0$; その他の場合

$C_{f,b}$: 基地の配置費用(円/箇所)

$\delta_b(\mathbf{x}_p(i))$: $= 1$; 基地 b 使用時、 $= 0$; その他の場合

なお、 $\delta_f(\mathbf{x}_p(i)) = 0$ は、巡回車を使用せずリース料支払いが生じない状況を、また、 $\delta_b(\mathbf{x}_p(i)) = 0$ は、高速道路の高架下等の余剰地を活用する基地を使用せず、固定費をリース料的に支払わない状況を想定したものである。

Step 5 : 利益について前日と当日を比較して、翌日の方策を決定する。当日の利益が前日よりも少ない場合にのみ、翌日の事故発生時の対応車両(巡回中の車両、待機中の定期巡回車両、および、事故対応専用車両のいずれか)を、当日と異なる車両とする。対応車両の変更は、利益のみの学習結果に基づいて設定する(後節参照)。

Step 6 : Step 1 から Step 5 を 1 エピソードとして規定回数(90 日)繰り返す。

(3) エージェントの学習

両エージェントには、各々の方策を取る際に学習により自らの利益を増加させる機能を持たせた。

不確定で予測困難な交通現象を扱う本モデルでは、動的な環境に対応可能な強化学習、なかでも、実際に得た報酬から価値を更新するモンテカルロ法を採用した。例えば高速道路会社の利益の場合、式(3)で表される。

$$B(i) = \alpha \cdot B(i) + (1 - \alpha) \cdot B(i-1) \quad (3)$$

但し、 $B(i-1)$: $(i-1)$ 日目の高速道路会社の利益、

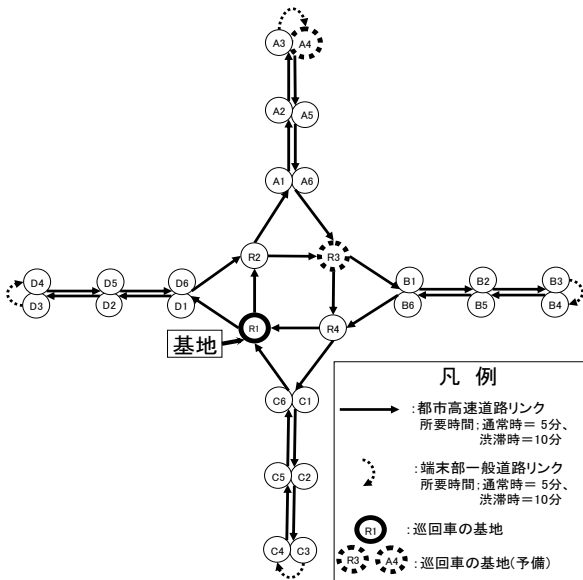
$B(i)$: i 日目の高速道路会社の利益、

α : 学習率

3. 仮想ネットワークを用いたモデルの検証と計算例

(1) 都市高速道路の仮想ネットワークの設定

前章で設定したモデルを簡易な問題に適用し、その挙動を確認した。用いた道路ネットワークは、放射環状型の都市高速道路を簡素化したもので、一方通行の環状道路と 4 放射道路からなる 28 ノード、32 リンク(うち 4 は一般道)の十字ネットワークとした(図-1)。



図一 都市高速道路の仮想ネットワーク

<仮想ネットワークと巡回の概要>

- a) 都市高速道路リンクはすべて同じ長さ (= 5 km)
- b) 環状道路は時計回り一方通行
- c) 放射路線では、その端で一旦、高速道路を出たあと、一般道路リンクを経由し、隣接ノードから再入場
- d) 巡回車は基地で待機し、定期巡回か事故処理で基地を出発し、終了後直ちに、基地に戻り再び待機する。
- e) 定期巡回は、1台の巡回車が、基地R1から各放射路線を2時間に1回巡回する。
- f) 巡回車の移動速度は、通常 60km/h、渋滞時 30 km/h
- g) 交通事故は、1日6件が i) ランダムに発生、ii) A6-R3 間で 100 倍、環状道路内で 10 倍の頻度で発生 の2ケースを設定する。
- h) 事故処理中のリンクは定期巡回しない。但し、事故処理のための通過も巡回として扱う。
- i) 渋滞は、事故発生地点から手前のリンクへ5分で5 km の速度で伝播（一般道リンクも伝播）させる。

(2) モデルのパフォーマンス検証

前述の仮想ネットワークを用いて、構築したモデルの挙動を確認するため、「渋滞の有無」、「対応車両の選択」、「学習の有無」の3ケースの計算を行った。計算条件には、阪神高速道路における実績値や積算資料を基に、仮想ネットワークの規模を反映した値を用いた。

<計算条件>

- a) 日あたりの料金収入予算額：2,000 万円/日
- b) 報酬：定期巡回;1 万円/回、事故処理;50 万円/回
- c) 費用：車両運行;100 円/リンク、車両配置;3 万円/台・日、基地の固定費;5 万円/箇所・日
- d) 車両配置台数：定期巡回;2 台、事故専用;最大 2 台
- e) 事故発生中の時間当たり減収額：5 万円/分

f) 定期巡回遅延の時間あたりペナルティ：200 円/分

ここで、ペナルティとは実際に生じる費用ではなく、遅延により減収につながる事故等の潜在的要因をハインリッヒの法則⁶⁾を参考に仮想的に設定したものである。

事故の確率的発生により計算ごとに結果が変動するため、90 日の平均値により対照した結果、3 ケースとも実現象と概ね一致し、モデルの妥当性が確認された¹⁾。

(3) 基地の位置に関する計算事例

次に、エージェントが学習しながら、各々の利益を増加させる状況下で、巡回と事故対応をより効率よく行える基地の位置についてシミュレートした。

1) 学習率の設定

学習率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) は、小さいほど学習速度が小さくなる²⁾とされるが、本モデルでは、エージェント利益の増と事故損失の減で良好な結果となる $\alpha=0.1$ を採用。

2) 高速道路会社エージェントの方策

高速道路会社から交通管理会社へ支払う翌日の報酬額の増減を、当日の利益と前日の利益の差に依存させる。その組み合わせを表-1の3ケースについて計算した。

その結果、ケースにより、利益について高速道路会社、交通管理会社、およびその合計のそれぞれが収束する額が異なり、全てに優れた案はないが、高速道路会社、交通管理会社それぞれの利益が増加傾向で、かつその合計がより多くなるケース3を採用することとした¹⁾。

3) 基地の位置

実際の都市高速道路では、巡回車の基地は複数存在するが、高架下等の余剰地を活用するなど、必ずしも効率優先の配置ではない。そのため、基地位置や、車両配置の変更で事故処理の効率化が期待される。本稿では、事故多発地点と基地位置の関係について、計算結果の妥当性を確認しつつ、実問題への適用について考察する。交通管理会社の方策として、基地を1ノードにまとめた場合と事故対応車両を別ノードに分散配置するケースを設定(図-2、表-2)。事故発生は前述のとおり、i) ランダムに発生させる場合(各ケース枝番 i) と、ii) 事故多発地点を明示する場合(同枝番 ii) について、それぞれシミュレーションを行った。

表-1 高速道路会社エージェントの方策

ケース1	ケース2	ケース3
報酬の変更なし	$B(i) - B(i-1) > 0;$ $f_p(i+1) = f_p(i) \times 0.99$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 0.99$ $B(i) - B(i-1) < 0;$ $f_p(i+1) = f_p(i) \times 1.01$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 1.01$	$B(i) - B(i-1) > 0;$ $f_p(i+1) = f_p(i) \times 1.01$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 1.01$ $B(i) - B(i-1) < 0;$ $f_p(i+1) = f_p(i) \times 0.99$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 0.99$

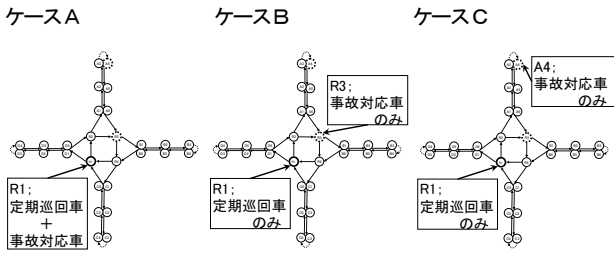


図-2 基地の位置

表-2 基地の位置変更

ケースA	全車がR1で待機
ケースB	定期巡回車はR1、事故対応車のみR3で待機
ケースC	定期巡回車はR1、事故対応車のみA4で待機

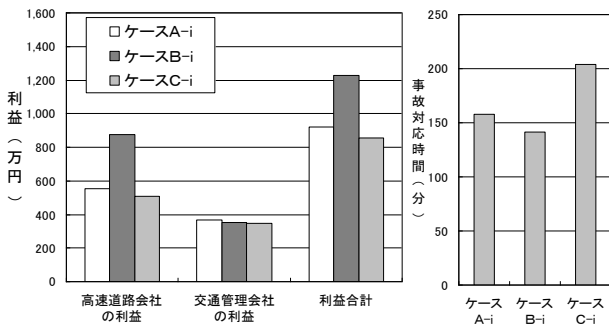


図-3 基地の位置による結果の変化
(事故がランダムに発生する場合)

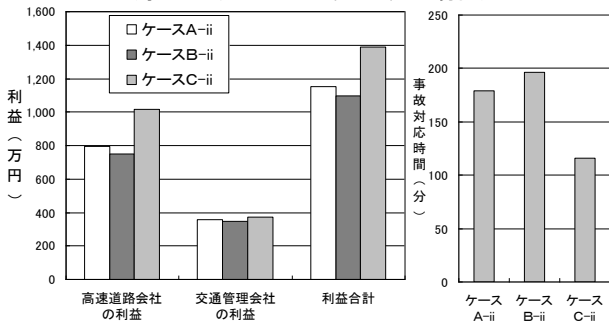


図-4 基地の位置による結果の変化
(事故多発地点を明示する場合)

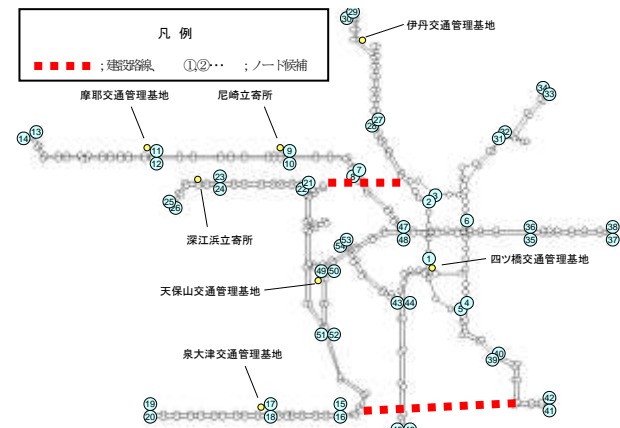


図-5 阪神高速道路の基地とネットワーク展開

その結果、i)では、高速道路会社の利益と事故対応時間は、ケースBが最も良く、ケースCが、最も悪い(図-3)。これは、ケースCでは、他ノードへのアクセス

距離が長くなり、事故到着時間が長くなるためと考えられる。交通管理会社の利益は、基地を分散するケースでは基地の固定費が増加するために減少する。逆に ii)では、高速道路会社の利益と事故対応時間は、ケースCが最も良く、ケースBが最も悪い(図-4)。これは、ノードA4が放射道路の端部ではあるが、基地が事故多発地点の手前に位置し効率的配置となるからである。一方、ケースBは、ノードR3が事故多発地点の後方に位置し、非効率な配置となるためと考えられる。

これらの結果は、直感的にも妥当なものであり、本モデルがそのような結果を導けることが確認された。

このため、図-5に示す実際の都市高速道路の基地配置の効率性検証や、今後の都市高速道路ネットワークが拡大した時点での基地の再配置計画への適用を試みる。

4. まとめと今後の展望

高速道路会社の交通管理は、これまで経験知に基づき対応され、科学的な効率化検討がされてこなかった。その効率化は、道路交通の円滑化はもとより民営化での経営改善、さらには地球環境保護にも寄与するため重要である。そこで、不確実に発生する事故を取り扱う交通管理について、MASによる検討を試みた。

本稿では、仮想の高速道路会社エージェントと交通管理会社エージェントの2主体のマルチエージェントモデルを設定し、簡単な放射-環状道路ネットワークを用いて適性を確認の上、90日間の環境の変化を観察した。

その結果、巡回車の基地配置について、事故多発地点を考慮した配置が効果的であるとの妥当な傾向を得た。このため、実際の基地配置の効率性を検証し、今後のネットワーク拡充における基地の再配置への適用を試みる実用性の高いモデルへと改良を加えていくこととしたい。

参考文献

- 岡本太郎、谷口栄一、山田忠史：都市高速道路の交通管理の効率化による経営改善に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.36，CD-ROM，2007。
- 大内東，山本雅人，川村秀憲：マルチエージェントシステムの基礎と応用-複雑系工学の計算パラダイム-コロナ社，2002。
- 高玉圭樹：マルチエージェント学習-相互作用の謎に迫る-コロナ社，2003。
- Davidsson, P., Lawrence H. et al.: An Analysis of Agent-Based Approaches to Transport Logistics, Transportation Research Part C, Vol.13(4), pp.255-271, 2005.
- Ossowski, S., Hernandez J.Z. et al.: Decision Support for Traffic Management Based on Organisational and Communicative Multiagent Abstractions, Transportation Research. Part C, Emerging technologies, Vol. 13, pp.272-298, 2005.
- Heinrich, H.W.: Industrial Accident Prevention, A Scientific Approach, N.Y. - McGraw-Hill, 1931.