

マルチエージェントシミュレーションによる都市高速道路のパトロール業務の効率化*

Improvement of the Efficiency of Highway Patrol 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

2008 年秋に国土交通省は、交通需要が 2030 年へ微減との全国交通量推計¹⁾を公表した。現に、都市高速道路の利用交通量は、2007 年度以降減少している²⁾。高速道路では、2005 年の民営化を受け経営合理化を進行中であり、2008 年の燃油高騰、世界同時不況による交通需要減から、さらなる経営効率化が、喫緊の課題である。

一方、例えば阪神高速道路の交通事故件数は、近年、横ばいとなる一方、落下物事故件数は増加している³⁾。

これら交通事故は、その渋滞による受益者の時間損失のほか、人身および物損で多額の損失が生じる³⁾。このため、交通管理業務のうち、事故対応はもちろん、落下物等の迅速な解消、および、未然防止のための定期巡回を行う業務（以下、パトロール業務）は、極めて重要であり、その効率化を科学的に分析することは、安全性や、渋滞緩和による利用者サービス向上はもとより、交通需要の減少下での高速道路事業の経営基盤安定にも資する。

このため、筆者ら⁴⁾はパトロール業務の効率化につながる意思決定支援を目的として、高速道路会社と交通管理会社（パトロール会社）からなる2主体のマルチエージェントシミュレーションモデルを提案し、両主体の方策による利益や交通流への影響について基礎的な研究を行った⁴⁾。本研究では、料金収入と交通流制御の各々に深く関与する高速道路利用者（以下、利用者）と交通管理者（以下、交通管理行政）を加えた4主体とし、各主体相互への影響を考慮することで、高速道路会社の交通管理において渋滞緩和による利用者サービス向上と経営効率化を図るパトロール業務の方策について分析する。

*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 経営企画部経営企画課 課長代理

(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 准教授

(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

既往の研究によれば、マルチエージェントシステムの適用は、不確定かつ動的で予測困難な環境において、複数のエージェントの意思決定に相互作用が生じる場合に、特に有用である。都市高速道路のパトロール業務は、道路の不具合を早期に発見し対応するほか、事故現場へ急行し早期完了を支援するが、これらは動的かつ予測困難な事象である。また、マルチエージェントシステムの一般的特徴として、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意思決定の相互作用の下で、学習をしながら適応的に行動することが挙げられるが、この特徴は、本研究で扱う4つエージェントにも該当する。すなわち、各エージェントは、交通事故の発生などの交通状況に対して、より迅速に対応し、事故渋滞の解消や高速道路の利用選択について、即応性と目的志向性を有する。また、都市高速道路のパトロール業務の経営効率化にマルチエージェントシステムを適用した事例は見当たらない。これらの理由から、本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いて、前述の方策について検討する。以下に、各エージェントの①目的、②方策、③利益、④1日の行動を説明する。

(1) 高速道路会社エージェント

- ①経営効率化、利用者サービス（安全、快適）の向上
 - ②パトロール業務委託単価の増減、高速道路への投資
 - ③料金収入からパトロール業務委託費と定期巡回遅延ペナルティを引いた額
 - ④1日の行動
- Step1：パトロール会社に当日の業務委託費の概算払い。
Step2：高速道路入口で利用者に所要時間の情報を提供。
Step3：高速道路の交通事故発生時、交通管理行政と協議、パトロール会社に事故処理支援を指示する。事故処理時間長期化時、交通管理行政の指示で、事故地点手前の入口1箇所を一時的に閉鎖する。
Step4：1日の終了時点で、パトロール会社に当日の業務実績に基づき精算払い。自身の当日の利益は、当日の料金収入からパトロール業務の精算額と定期巡回遅延ペナルティを引いて計算する。

Step5 : 利益を前日と当日で比較し、その増減から、翌日の定期巡回と事故対応の単価を決定する。単価は、利益についてのみの学習に基づいて設定する。

Step6 : 利益から必要経費（一定値）を除いた額が黒字の場合、翌日、黒字額を高速道路に投資する。投資は、高速道路の安全、快適を向上させると考え、翌日の利用者の高速道路利用と事故発生率を好転させる。ただし、投資効果が限定的な場合、次の黒字時のみ4割を納税用に、6割は翌日以降の投資に留保される。

Step7 : Step1 から Step6 を規定回数繰り返す。

(2) パトロール会社エージェント

①経営効率化

②事故派遣車両の決定、各基地巡回車配置台数の増減

③業務受託費から、車両と基地の費用を引いた額

④1日の行動

Step1 : 高速道路会社から業務委託費の概算払いを受け、ルールに従い、パトロール業務を開始する。

Step2 : 高速道路の交通事故発生時、高速道路会社の指示を受け、全巡回車の事故地点までの所要時間を把握、ルールに従い巡回車を事故地点へ派遣する。

Step3 : 事故地点で巡回車は、交通管理行政が行う現場検証に必要な交通規制等の事故対応を行う。事故対応終了後は、速やかに基地へ戻り待機する。

Step4 : 1日終了時点で、高速道路会社から当日のパトロール実績に基づき業務委託費の精算を受ける。業務委託費から当日の定期巡回と事故対応に要した運行費用と巡回車および基地の配置費用とを控除したものを当日の利益として算出する。

Step5 : 利益を前日と当日で比較し、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（最短で到着可能車両、定期巡回車両のみ、事故対応車両のみ）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。また、翌日の各基地の車両配置台数を、当日の稼働状況に応じて決定する。

Step6 : Step1 から Step5 を規定回数繰り返す。

(3) 利用者エージェント

阪神高速道路のOD調査結果⁵⁾では約7,500のODペアが存在する。本研究ではこのうち、全利用台数の25%超を占める交通量上位100ペアを利用者エージェントとし、高速道路会社によるアンケート調査結果⁶⁾を活用して、利用者の意思決定を以下のように単純化する。

①利用OD間の短時間での移動

②利用OD間で高速道路の利用か不利用を選択

③高速道路利用車両1台当りの所要時間減少量

④1日の行動

Step1 : 高速道路入口で利用ODの最新所要時間を入手する。既知の事前所要時間と、平時の標準所要時間から求めた平均所要時間を最新所要時間から引いて所要時間差 $\Delta T_{ab}(i,t)$ を求める。

Step2 : $\Delta T_{ab}(i,t)$ に応じた高速道路不利用率を前述の調査結果⁶⁾から高速道路の利用距離 $d \leq 15\text{km}$ では図-1のグラフを用いて決定し、高速道路の利用台数を算出する。

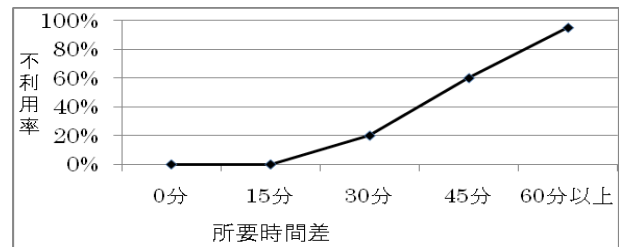


図-1 所要時間と高速道路不利用率($d \leq 15\text{km}$)

不利用率は、 $d > 15\text{km}$ では、 d の増大に伴い低下傾向にあると考えられるため、 $D = -d/300 + 0.5$ で仮定する。

Step3 : 各ODペアで、高速道路利用車両の平均所要時間を算出する。当日のこの値から前日の同値を引いた値を利用者エージェントの利益とし、翌日の各ODペアの不利用率は、この学習のみに基づき設定される。

Step4 : Step1 から Step3 を規定回数繰り返す。

(4) 交通管理行政エージェント

交通事故対応は、交通管理者の権限であり、道路管理者である高速道路会社と協議の上、遂行されている。本研究では、交通管理者を交通管理行政エージェントとして以下に設定する。

①交通事故の早期解消および事故渋滞の緩和

②事故時の高速道路の入口閉鎖開始時間の決定

③事故対応時間の減少量

④1日の行動

Step1 : 事故発生現場にパトロール会社の巡回車到着時から現場検証を開始する。現場検証時間は、事故毎に15~45分間でランダムに決定する。

Step2 : 巡回車の現場到着時間と現場検証時間の合計が一定値を超えた時点で、交通管理行政が高速道路会社に入閉鎖を許可する。

Step3 : 1日終了時点で、当日の事故対応時間を計算する。この値から前日の同値を引いた値を交通管理行政エージェントの*i*日目の利益 $B_g(i)$ とする。翌日の入口閉鎖開始時間は、 $B_g(i)$ のみの学習結果に基づき設定される。

Step4 : Step1 から Step3 を規定回数繰り返す。

(5) エージェントの学習

各エージェントは、図-2 に示す相互関係の中、利益を基準に学習しつつ各々の方策を実行する。本研究では、動的かつ不測な事故を扱うため、教示信号を必要とせず、行動と評価のサイクルのなかで試行錯誤しつつ、動的な環境に対応可能な強化学習を用い、実際に得た報酬のみから価値更新するモンテカルロ法⁷⁾を採用した。各エージェントの利益に関して、以下の更新式で表される。

$$B(i) \leftarrow B(i-1) + \alpha(B(i) - B(i-1))$$

ただし、

$B(i)$: i 日目のエージェントの利益

α : 学習率

3. 都市高速道路ネットワークを用いた計算例

(1) 都市高速道路ネットワークの設定

前章のモデルを、阪神高速道路のうち、連続する放射環状道路から構成される 280 ノード、445 リンクのネットワーク (図-3) に用いて、ケーススタディを行う。ネットワークの概要と巡回ルールは以下のとおりである。

- a) 高速道路リンクは、高速道路の出口か入口を起終点とし、その距離は、実際のランプ間距離で定義する。
- b) 一般道路リンクは、①高速道路の 1 組の出口→入口、②乗継ルートの出口→入口、③基地→直近入口とし、その距離は、一律①3km、②5km、③0.5km とする。

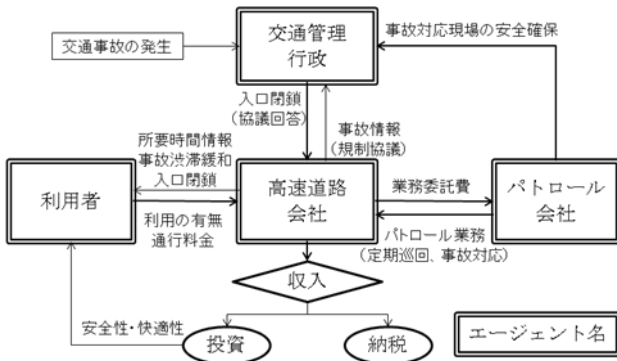


図-2 各エージェントと方策の相関関係

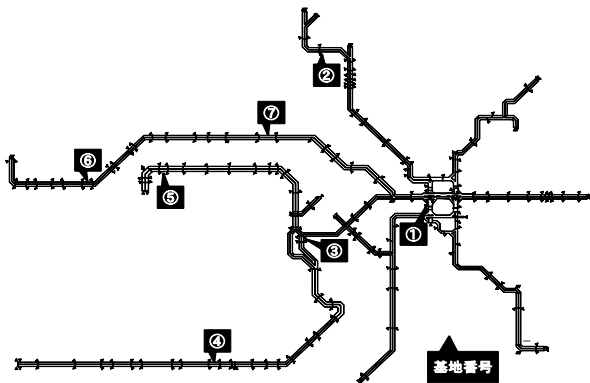


図-3 都市高速道路ネットワークと基地配置

- c) 高速道路リンクの所要時間は、各リンク距離を各リンクの車両検知器の 5 分毎の実勢速度から定義する。
- d) 一般道路リンクの车速は、一律時速 40km とする。
- e) 事故対応車両は、最短経路を選択 (含む一般道)。
- f) 基地は、全 7 箇所を配置し、基地 5 と基地 7 には、事故対応車両のみを配置可能とする。
- g) 全巡回車は基地で待機し、定期巡回か事故対応時に基地を出発、作業終了後、基地に戻り再び待機する。
- h) 定期巡回は、基本的に所定ルートで 2 時間毎に行う。
- i) 交通事故は、事故多発地点を考慮した確率に基づき、1 日に 10 件前後をランダムに発生させる。
- j) 事故渋滞中の速度は、①規制速度が 80 km/h 区間は、事故対応車両: 30 km/h、一般車: 時速 10km/h、②規制速度が 60 km/h 以下の区間は、事故対応車両: 15 km/h、一般車: 5km/h とする。
- k) 上記速度は、事故地点から手前へ規制速度の 1/10 で伝播し、事故終了後直ちに実勢速度に回復する。
- l) 事故対応中のリンクは定期巡回しない。ただし、事故対応に要する通過も定期巡回として扱う。

(2) モデルの設定

高速道路会社とパトロール会社の 2 主体モデル⁴⁾において、渋滞の有無、対応車両の選択、学習の有無については、実際の傾向と一致することを確認している。本研究でも、前述のネットワークを用いて、妥当性を判断基準に、利用者と交通管理行政の具体的な方策やパラメータ値を決定し、改めて 4 主体のモデル上での挙動の妥当性を渋滞の影響と学習効果の面から検証し、さらに、事故渋滞と学習の有無に関する挙動の妥当性についても確認した。計算には、阪神高速道路の実績値や業務委託契約の積算資料を参考にして以下の値を用いた。

- a) 料金: 料金収入標準額; 5 億円/日、高速道路利用料金の平均値; 700 円/台
- b) 報酬(初日): 定期巡回; 1 万円/回、事故対応; 50 万円/回
- c) 費用: 車両運行; 100 円/分、巡回車配置; 3 万円/台/日、基地の配置; 5 万円/箇所/日
- d) 基地への車両配置台数(初日): 5 台 (立寄所は、2 台)
- e) 定期巡回遅延ペナルティ: 200 円/分

なお、学習率は、値が大きいと学習速度が速い反面、利益変動が大きく良好な値に収束せず、逆に値が小さいと学習速度は遅くなるが、良好な値に収束しやすいとされている⁸⁾。2 主体モデルでの知見⁴⁾から、本研究でも、比較的穏やかな学習効果を発揮する $\alpha=0.1$ を採用する。

(3) ケーススタディ

4 主体のマルチエージェントシミュレーションモデルを用いて、高速道路会社の方策が自他のエージェントへ及ぼす影響を、本研究の目的である経営の効率化と、交

通円滑化および利便性向上の観点から考察する。以降の計算は、経営判断期間として四半期90日分を行う。

a) パトロール会社への報酬水準の変化

高速道路会社の利益 $B(i)$ とパトロール会社へ支払う翌日の報酬額の増減を、2 ケース計算した (表-1)。その結果、高速道路会社の利益では Case-1、パトロール会社の利益では Case-2 が大きい (表-2)。これは、2 主体モデルの計算結果⁴⁾と同様である。一方、OD 平均所要時間、事故対応時間も Case-2 が優れている。

高速道路会社の利益の推移 (図-4) では、Case-1、Case-2 とも増加傾向を示すが、パトロール会社の利益の推移 (図-5) では、Case-1 は減少、Case-2 は増加の傾向を示す。すなわち、高速道路会社の利益はいずれも増加、パトロール会社の利益は Case-1 が減少、Case-2 が増加、OD 平均所要時間と事故対応時間は、Case-2 が優れる。高速道路会社の利益が幾分少ない点を許せば、Case-2 が、全エージェント的に望ましい。モデルを 4 主体にしたことで、2 主体モデル⁴⁾では判断しかねた両ケースの優劣について結論が得られた。

さらに、Case-2 の条件で、利用者と交通管理行政には、学習をさせない Case-3 を計算した。いずれの指標でも Case-3 が Case-2 より劣る (表-2) 結果から、両エージェントの学習が、全体の利益増大につながるといえる。

b) 投資の影響

前述 Case-2 は、高速道路会社の利益が黒字になった時

表-1 高速道路会社の方策

	Case-1	Case-2
$B(i) - B(i-1) > 0$	$f_p(i+1) = f_p(i) \times 0.99$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 0.99$	$f_p(i+1) = f_p(i) \times 1.01$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 1.01$
$B(i) - B(i-1) < 0$	$f_p(i+1) = f_p(i) \times 1.01$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 1.01$	$f_p(i+1) = f_p(i) \times 0.99$ $f_a(i+1) = f_a(i) \times 0.99$

表-2 高速道路会社の方策による計算結果の相違

	高速道路会社の利益(百万円)	パトロール会社の利益(万円)	OD平均所要時間(分)	事故対応時間(分)
Case-1	495.12	405.10	8.74	514.5
Case-2	494.66	467.58	8.73	492.5
Case-3	490.64	438.60	8.75	538.3
Case-4	494.04	494.47	8.76	524.1

※計算結果は、90日3回の平均

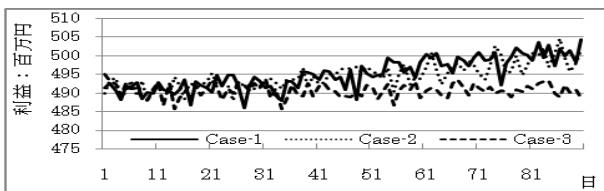


図-4 高速道路会社の利益の推移

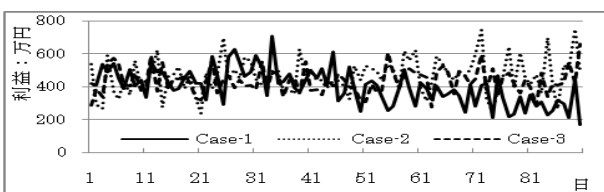


図-5 パトロール会社の利益の推移

点で投資を選択する。投資効果として、投資額 100 万円につき翌日の利用者の高速道路利用回避率を 0.01%、事故発生確率を 0.1% ずつ低下させる。また、投資額の回収期間を 3 年と仮定し、翌日の高速道路会社の利益の増加額が投資額の 3 年の 1 日に相当する 0.1% を超える場合は、投資効果を認め次回の黒字時も投資を選択できる。0.1% 未満の場合は、投資効果を認めず次回の黒字時は投資しないこととする。これに対して、常に利益を蓄積するだけで、納税も投資も行わないため高速道路利用率と事故発生確率は改善されない Case-4 を比較した。

その結果、パトロール会社の利益以外全てが Case-2 で優れるため (表-2)、高速道路会社の経営とサービス向上の観点では、Case-2 の方が望ましいといえる。

5. おわりに

本研究では、高速道路の渋滞緩和を行いつつパトロール業務の効率化につながる方策の決定を支援するマルチエージェントシミュレーションモデルを提案した。高速道路会社、パトロール会社、利用者および交通管理行政の 4 エージェントによるシミュレーションの結果、高速道路会社がパトロール会社へ委託する交通管理業務の報酬水準について、自らの利益が増加した場合に増額し、減少した場合に減額する方策が望ましいことが示唆された。また、高速道路会社の収支が黒字の場合に、高速道路会社はサービス向上に資する施策に投資する方が望ましいとの結果が示された。この知見は、2 主体モデル⁴⁾では得られず、4 主体モデルに拡張した成果である。

今後は、モデルのさらなるパフォーマンス向上と、実現象とのより精緻な比較がある。また、交通流シミュレーションモデルの適用により、事故と交通量変動を関連づけることも、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会第26回基本政策部会資料1-2新たな将来交通需要推計
- 2) 独立行政法人日本高速道路保有債務返済機構：ホームページ, <http://www.jehdra.go.jp/pdf/kotu/k999.pdf>.
- 3) 阪神高速道路株式会社：阪神高速道路の交通安全対策アクションプログラムパンフレット
- 4) 岡本太郎, 谷口栄一, 山田忠史：マルチエージェントシミュレーションを用いた都市高速道路の交通管理における経営効率化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, vol.25, No.2, pp.499-507, 2008.
- 5) 阪神高速道路公団：第22回阪神高速道路起終点調査, 2004.
- 6) 阪神高速道路公団：交通管制システムに関する運用評価業務報告書, 2004.
- 7) 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.
- 8) 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.