

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*

Research on the Improvement of Management of an Urban Expressway Company by the Increase in Efficiency of Traffic Management*

岡本太郎 **・谷口栄一 ***・山田忠史 ****

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

1. はじめに

都市高速道路の運営は、2005年の民営化以降の管理コストの抑制傾向に加え、少子高齢化等に起因する通行台数の伸びの鈍化、高架橋や都市トンネルなどの道路構造物の老朽化に対する備えなど経営的に厳しい状況におかれている。このため、道路運営会社は、管理運営のあり方を点検し、より必要性の高い部門へと投資を集中させてつづける。

かねてから都市高速道路においては、事故や渋滞の原因となる車両からの落下物や車両接触などの事故が頻発し、交通の阻害、ひいては料金収入の減少への影響が少なくないことから、遅滞のない交通管理（パトロール）は極めて重要である。

このため、限られた管理費のうち交通管理への投資にあたっては、パトロールカーの巡回スケジュールや基地への配置をより効率的に行う必要がある。

渋滞削減につながる事故防止や道路交通の円滑化などに寄与する交通管理に適切な投資をすることは、有料道路の経営を安定させることのみならず、道路利用者の利便性を向上させるほか、社会経済の発展や地球環境改善にも有益であり、道路交通に関わる全てのステークホルダーにとって恩恵をもたらすため、その効率的な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、本稿では、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を開発するためマルチエージェントシステムを用いた簡易な問題による検証結果を紹介するとともに、今後の実道路ネットワークに適用するための展望について述べる。

*キーワード：道路計画、交通計画評価、交通管理

**正員、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻博士課程

(京都市西京区京都大学桂、TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

E-メールアドレス: taro-okamoto@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

***フェロー、工博、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

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工学専攻

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

交通分野におけるマルチエージェントシステムに関する研究¹⁾²⁾³⁾を踏まえ、本稿では、都市高速道路の交通管理の効率的な運用を分析するため、経営エージェントと交通管理エージェントなどで構成されるマルチエージェントシステムによるシミュレーションを試みた。これらのエージェントが自らの利益を最大化する行動をとりながら、相互作用と学習を通して、全体としてより少額でより有効な効果を得る方策を探索するモデルである。

(1) 経営エージェント

経営エージェントは、効率的な経営と円滑な交通を保つことにより利益を最大化することを目的とするエージェントであるが、本システムでは、交通管理エージェントに対して事故防止のための定期パトロール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最大化を図るモデルである。利益は、料金収入から固定費用、運行費用を含んだ交通管理エージェントへの報酬、事故処理中の減収コストおよび定期パトロールが遅延した場合の事故リスクをコスト換算したものを差し引いたもので、これを目的関数として最大化することを考える。

この関数は組み合わせ最適化問題であり、厳密解を求めることは難しく、遺伝的アルゴリズムなどのヒューリスティックな手法で近似解を用いることが多いが、本稿では、マルチエージェントシステムを用いたシミュレーションにより過渡的な解を求めている。その手順を以下のステップにより示す。

Step 1: 経営エージェントが、料金収入から、交通管理エージェントに報酬(予算値)を渡す。

Step 2: 交通管理エージェントは、定期巡回と発生した事故の処理を行う(次節にて説明)。

Step 3: 事故への交通管理エージェントの対応により、事故渋滞による交通台数減による減収と定期巡回が遅延したことによる落下物のリスクを各パラメータによりコスト化。

Step 4: 一日終了時点で、経営エージェントの利益として料金収入から事故の実績を反映した交通管

理エージェントへの報酬(実績値)、事故処理中の減収コストおよび定期巡回遅延コストの累計を引いたものを当日の利益として算出。

Step 5 : 前日の利益と当日の利益を比較し、翌日の交通管理エージェントへの報酬の額を決定する。

Step 6 : 以下繰り返し。下記の式(1)を最大化。

経営エージェントの利益 (最大化)

$$B(f_a, f_p) = T - (f_a \cdot n_a + f_p \cdot n_p) - A_d[f_{ad} \cdot n_{ad}] - A_r - P_r \quad (1)$$

但し、 $B(f_a, f_p)$: 事故処理報酬を f_a 、巡回報酬を f_p とした場合の、経営エージェントの利益の期待値、

T : 料金収入、

n_a : 事故処理回数、

n_p : 巡回回数、

A_d : 事故減収の期待値、

f_{ad} : 事故減収コスト、

n_{ad} : 事故継続時間

A_r : 事故処理遅延コスト、

P_r : 巡回遅延コスト

(2) 交通管理エージェント

交通管理エージェントは、経営エージェントから前述の交通管理業務を受託し、円滑な交通確保に努めつつ、効率的な業務執行により自らの利益の最大化を図るモデルである。この利益は、経営エージェントからの報酬から固定費用と運行費用を差し引いたものである。

この関数も組み合わせ最適化問題であり、厳密解を求めることは難しく、近似解を用いて解くことが多いが、本稿では、事故地点に一番早く到着できるパトロールカーが事故処理を行うのが最も望ましいというルールにより近似解を求めた。その手順は以下に示すとおりである。

Step 1 : 経営エージェントから報酬(予算値)を得て、定期パトロールをルールに従い開始。

Step 2 : 事故発生時、全パトロールカーの位置と事故発生地点間の所要時間を比較し、最短時間であるパトロールカーが事故発生地点へ向かう。

Step 3 : パトロールカーは、事故発生地点に到着後、30分間かけて事故処理を行う。

Step 4 : 事故処理終了後、パトロールカーは速やかに基地へ戻り待機する。

Step 5 : 以下繰り返し下記の式(2)を最大化。

交通管理エージェントの利益 (最大化)

$$R(t_{p,0}, x_p) = (f_a \cdot n_a + f_p \cdot n_p) - C_{tp}(t_{p,0}, x_p) - C_{fp} \quad (2)$$

但し、 $R(t_{p,0}, x_p)$: 交通管理エージェントの利益の期待値

$C_{tp}(t_{p,0}, x_p)$: 巡回車の運行費用、

C_{fp} : 巡回車の固定費用、その他は式(1)と同じ。

(3) エージェントの学習

両エージェントは、各々の方策を取る際には自らの

利益を学習により増加させることが出来る設定とした。

本稿では、意思決定に要する時間的速さを重要視する観点から、一般に学習速度が比較的速いとされているモンテカルロ法に基づく学習手法を採用した。

モンテカルロ法に基づく学習手法は、下記の式(3)で表される。

$$E_a(t+1) = r_a(t) + (1 - \alpha) \cdot E_a(t) \quad (3)$$

但し、

$E_a(t)$: 時点 t における方策 a のルール価値、

$r_a(t)$: 時点 t における方策 a の報酬、

α : 学習率

3. 簡易ネットワークを用いたモデルの検証と計算例

(1) 簡易ネットワークの設定

前章で設定したマルチエージェントモデルを簡易な問題に適用し、モデルの挙動を確認した。

簡易な問題として設定した道路ネットワークは、放射環状型の都市高速道路ネットワークを簡素化したものであり、中心にある一方通行の環状道路と 4 つの放射道路からなるノード数 28、リンク数 32 (うち端部の 4 つは一般道) の十字ネットワークとした (図 - 1)。

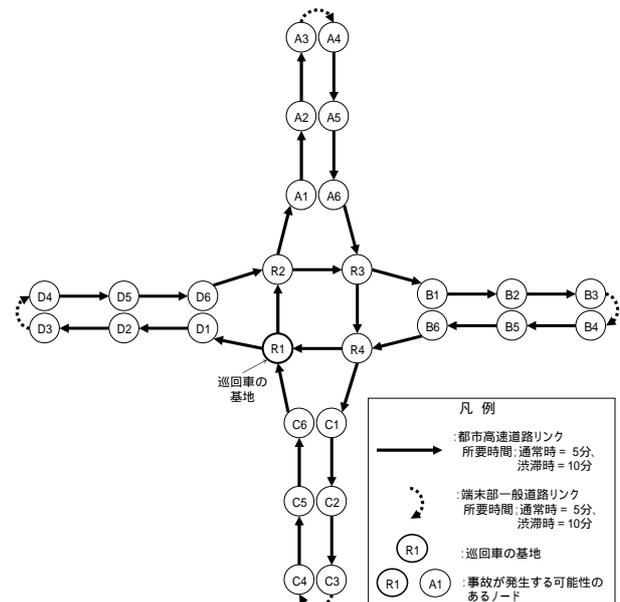


図 - 1 都市高速道路の簡易ネットワーク

<簡易ネットワークとパトロールの概要>

- 都市高速道路リンクはすべて同じ長さ (= 5 km)
- 環状道路は時計回り一方通行
- 放射路線の端部では、都市高速道路を一旦出たあと、一般道路リンクを経由後再入場。
- パトロールカーは基地で待機し、定期パトロールまたは事故処理のため基地を出発し、目的終了後直ち

に、基地に戻り待機する。

- e) 定期パトロールは表 - 1 のとおり 1 台のパトロールカーが各放射路線を 2 時間に 1 回パトロール。
- f) パトロールカーの移動速度は、渋滞が無い場合は 60km/h、渋滞のある場合は 30 km/h とした。
- g) 交通事故を、1 日に 6 件発生させた。
- h) 事故処理中のリンクは定期巡回しない。但し、事故処理のための往復も定期巡回したのものとして扱う。
- 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）させた。

表 - 1 定期パトロールのパトロールカーの移動

時刻	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	0:35	0:40	0:45	0:50	0:55
車両1	R1	R2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	R3	R4	R1	-
車両2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
時刻	1:00	1:05	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35	1:40	1:45	1:50	1:55
車両1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
車両2	R1	R2	R3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	R4	R1	-
時刻	2:00	2:05	2:10	2:15	2:20	2:25	2:30	2:35	2:40	2:45	2:50	2:55
車両1	R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	C4	C5	C6	R1	-
車両2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
時刻	3:00	3:05	3:10	3:15	3:20	3:25	3:30	3:35	3:40	3:45	3:50	3:55
車両1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
車両2	R1	D1	D2	D3	D4	D5	D6	R2	R3	R4	R1	-

注 1) : 表中の記号は、ネットワーク上のリンクを示す。

注 2) : 「 - 」は、基地で待機中であることを示す。

注 3) : 4 時以降は、0 時からと同様に 24 時まで繰り返す。但し、事故により変更されることがある。

(2) モデルの検証

前節で設定した簡易ネットワークを用いて、第二章で構築したモデルの挙動を確認するため以下の計算条件のもと a) 渋滞の有無、b) 対応車両の選択、c) 学習の有無 3 種類の計算を行った。

< 計算条件 >

- a) 収入 : 500 万円/日。
- b) 報酬 : 定期巡回; 2 千円/回、事故処理; 10 万円/回。
- c) 費用 : 車両運行; 100 円/リク、固定; 1 万円/台・日。
- d) 車両配置 : 定期巡回用; 2 台、事故専用; 最大 2 台。

事故が確率的に発生し計算ケースごとに結果が変動することから、四半期 (90 日) の平均値により対照した結果、いずれにおいても、実現象と概ね一致した傾向となり当モデルの妥当性が確認されている。

(3) 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ていく状況の発生を確認するため、以下の 2 ケースについての計算を行い 90 日間の経過を観察した。

a) 学習率の設定

一般に学習率 (0 ~ 1) は、小さいほど学習速度が小さくなる傾向があるといわれている⁴⁾。本モデルで、 $\alpha = 0.1$ と 0.3 について計算したところ、 $\alpha = 0.1$ の方が、利益の振幅が小さく、両エージェントの合計の増加傾向と事故損失の減少が大きく良好な結果を示した (図 - 2)。

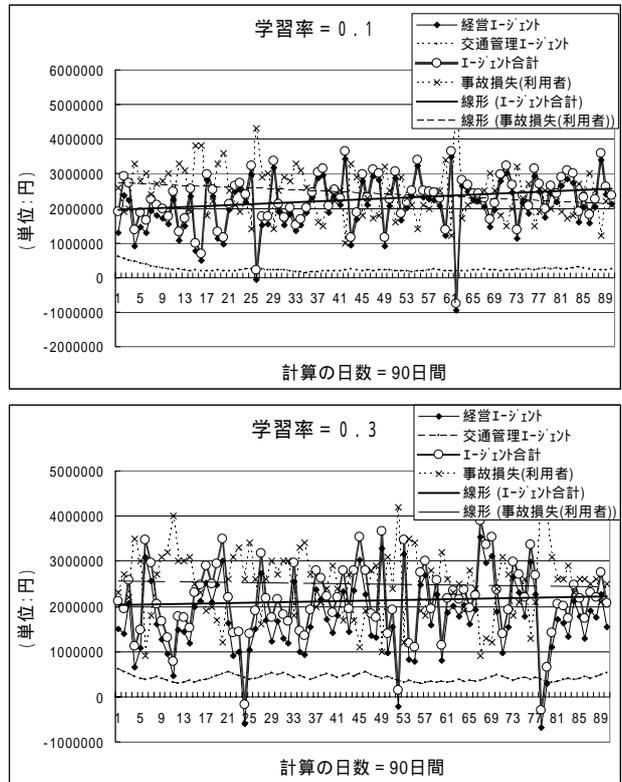


図 - 2 学習率の違いによる影響

b) 経営エージェントの方策

経営エージェントは交通管理エージェントに対する報酬を、当日の利益から前日の利益を差し引いた結果により翌日の額を決定している。そこで、以下の 3 ケースについてシミュレーションを行った。

ケース 1 : 報酬一定の場合

ケース 2 : 差が正なら報酬を 1 割減、負なら 1 割増

ケース 3 : 差が正なら報酬を 1 割増、負なら 1 割減

その結果、ケース 1 は、交通管理エージェントの利益はほとんど変わらず、両エージェントの合計は漸増、事故損失は漸減となっている (図は省略)。

ケース 2 では、交通管理エージェントは後半に減少するものの比較的高く推移。両エージェントの合計ではケース 1 と比較すると振動は小さいものの伸びは鈍い。事故損失は徐々に減少している (図 - 3)。

一方、ケース 3 は、上記 2 ケースにくらべ、交通管理エージェントは 10 日後位である程度水準まで利益を下げたのち安定。一方、経営エージェントも振動の幅が小さく、交通管理エージェントとの合計はその増加傾

向がもっとも顕著である。また、事故損失についてもその減少速度が最も大きく3つのケースの中ではもっとも良好な結果を示しているといえる(図-2の上図)。

以上のことから、経営エージェントのとり方策としては、前日の利益より当日の利益が増えた場合に翌日の交通管理エージェントへの報酬を1割程度増やし、減った場合に1割程度減らす場合が望ましいことがわかった。

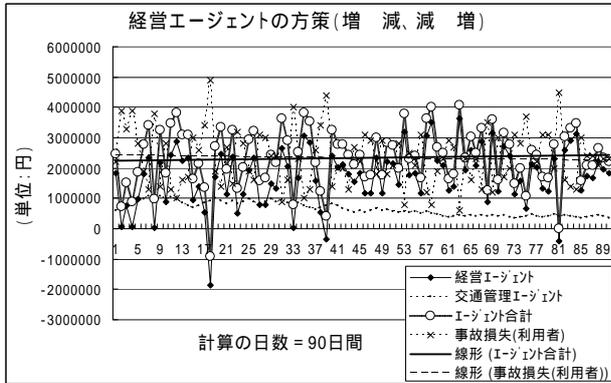


図-3 経営エージェントの方策の影響(ケース2)

c) 基地の位置

実際の都市高速道路では、パトロールカーの基地は複数存在するため、各基地への車両配置を変えることで事故処理効率が左右されることが予想される。

本稿では、事故多発地点を考慮した配置を検討することに向け以下の3ケースについてシミュレーションを行った。

ケース1: ノードR1のみ(前項ケース3)

ケース2: 定期巡回車両以外をノードR3に分散

ケース3: 定期巡回車両以外をノードA4に分散

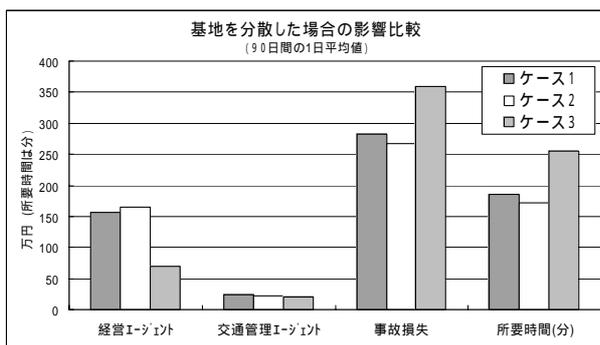


図-4 基地を分散した場合の影響

その結果、図-4のとおり環状道路で2箇所に分散したケース2が最も良い結果となる一方、放射道路の端に分散したケースで最も悪い結果となった。ネットワークの性質上、基地の数が限られる場合は、環状道路内が各ノードにも近いためと考えられるが、各放射道路の端部に配置することも検討の余地があると考えられる。

4. まとめと今後の展望

民営化された高速道路会社の経営を効率化することが求められるなか、交通への影響が直ちに発現することから経営への影響が大きいと考えられる交通パトロールや事故処理などの交通管理について、効率的かつ有効な運用を科学的に分析することをマルチエージェントシステムにより試みた。

本モデルでは、仮定の道路会社で経営エージェントと交通管理エージェントを設定し、モデルの挙動を簡単な放射-環状道路ネットワークを用いて確認した上で、経営判断の節目のうち比較的短い四半期(90日)において、時系列に見たところ、経営エージェントの方策によりそれぞれのエージェントの利益が変化することが判った他、パトロールカーの基地を分散させることによる影響についても有効な方策についてシミュレーションすることが出来た。

このため、今後は、実際の高速道路ネットワークについて事故多発地点などの事故発生状況を加味したうえ、定期巡回での経路とスケジュール及び複数基地への車両配置についてより効率化を再現できるモデルへと発展させていきたい。

参考文献

- 1) Ronald van Katwijk et al. : Coordination of traffic management instruments using agent technology, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 10, Number 5, October 2002, pp. 455-471(17)
- 2) Paul Davidsson et al. : 'An Analysis of Agent-Based Approaches to Transport Logistics', Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 13(4), pages 255-271, Elsevier, 2005.
- 3) Sascha Ossowski et al. : Decision support for traffic management based on organisational and communicative multiagent abstractions, Transportation research. Part C, Emerging technologies (2005).
- 4) 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.
- 5) Gabor Nagy et al. : Location-routing: Issues, models and methods, European Journal of Operational Research 177 (2007) 649-672
- 6) 岡本, 谷口, 山田: 民営化後の都市高速道路会社における計画管理システムに関する研究, 土木計画学研究・公演集Vol.34(165), 2006.