

渋滞緩和エージェントモデルによる 渋滞緩和の提案と評価

萬屋 賢人^{†1} 菅原 俊治^{†1}

本論文では、視野範囲内の先行車が低速の際に車間距離をとる渋滞緩和車を導入し、エージェントシミュレーションにより、渋滞緩和への効果とその解析結果について述べる。高速道路の交通流は渋滞に至る過程で、渋滞が起こりうる交通密度に至っても、交通流の流量が増加し続けるメタ安定相を経る。メタ安定相は、流量が最大となる状態であり、渋滞の初期状態からメタ安定相へ戻すことができれば、渋滞の緩和や渋滞の発生を遅らせることができると考えられる。そこで渋滞緩和車を渋滞緩和エージェントとしてモデル化し、交通流のモデルである拡張 Nagel-Schreckenberg モデルに加えシミュレーションにより実験したところ、実際に渋滞状態からメタ安定相に移行できることを確認した。さらに詳細な解析の結果、渋滞緩和車を連続して配置することがメタ安定相への移行に重要であることが分かった。また渋滞緩和車を導入しない場合の平均速度と渋滞緩和車を導入したときの通常車両および渋滞緩和車の平均速度を比較したところ、渋滞緩和車となり速度を落としても、平均速度は向上することが分かった。

A Method for Ease of Traffic Congestion Using Traffic Congestion Reducer

KENTO YOROZUYA^{†1} and TOSHIHARU SUGAWARA^{†1}

In this paper, we introduce *traffic congestion reducer* (TCR) that is modeled by the car agent taking sufficient distance from the front car, in order to ease traffic congestion in highways. Even if the traffic density in a highway reaches the state in which congestion can happen, we sometimes observe the phenomenon that the traffic flow still keep growing. This state is called the *metastable phase*. The metastable phase corresponds to the state that the highway's flow is maximum. If we can shift an early congested phase to a metastable phase, we could ease traffic congestion and/or delay the incidence of traffic congestion. By adding a number of TCRs to the extended Nagel-Schreckenberg model that can reproduce the metastable phase, we experimentally shows, by using our multi-agent simulation environment, that the appropriate placement

of TCRs can shift a congested phase to a metastable phase. We also modify the abilities of TCRs, such as the scope (the size of visible front) and cautiousness (reducing the speeds earlier). The results indicate that placing more than two TCRs straight before the congesting location significantly improves the probabilities of shifting congested phase to a metastable phase. We also find that the average speed in the state with TCRs is higher than that in the state without TCRs.

1. はじめに

日本国内における自動車保有台数の増加にともなう交通量の増加により、高速道路の交通渋滞は年々深刻化している。ETCの導入により料金所の円滑な運営が進んだ現在、高速道路における交通渋滞の多くは、先行車の減速が時間の経過とともに後続車へ伝播して発生する自然渋滞である。近年のCO₂排出量の制限や頻繁なブレーキ・発進によるエネルギーの浪費もあり、交通渋滞の緩和・回避は国レベルで解決すべき大きな課題である。

高速道路の交通流では渋滞に至る過程で渋滞が起こりうる交通密度に至っても、流量が増加し続けるメタ安定相^{3),4)}を経る。メタ安定相は流量が最大となる状態でもあり、その発生メカニズムを解明すれば、自然渋滞の発生、軽減や渋滞解消が期待できる。交通流シミュレーションにおいてメタ安定相の再現に関する研究には、たとえば交通の基本概念をモデル化した Nagel-Schreckenberg モデル (以下 NS モデル)⁵⁾ を運転者が先行車の情報を取得するように拡張したモデル (以下拡張 NS モデル) がある¹⁰⁾。メタ安定相の発生できる拡張 NS モデルは現実に近い交通流の再現といえる。

本論文では、この拡張 NS モデルを実際の交通流と見立て、渋滞相からメタ安定相へと遷移させる渋滞緩和車を提案する。具体的には、拡張 NS モデルに、視野範囲にある先行車が低速の際に早めに減速し車間距離をとる渋滞緩和車を導入し、これをエージェントとしてモデル化して、マルチエージェントシミュレーションにより渋滞相からメタ安定相へ遷移できる場合があることを示す。仮に遷移できなくても、渋滞緩和車は平均流量を上げる効果があることを述べる。さらに遷移に成功した場合としない場合の渋滞緩和車の割合と配置を詳細に調べ、その配置を工夫することで、渋滞緩和車の数が少なくても遷移に成功することを示す。最後に渋滞緩和車となった車の平均速度と一般車の平均速度、および渋滞緩和車を投入

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

2 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価

しない場合の車の平均速度をと比較し、渋滞緩和車であっても他車との速度に大きな差はなく、また導入することによって全体の平均値が上昇することを実験により示す。

本論文の構成は以下のとおりである。2章で本論文に関連する関連研究を紹介する。3章で高速道路における交通流を基本図を用いて説明し、拡張 NS モデルのルールについて述べる。また拡張 NS モデルでメタ安定相が発生することを確認し、メタ安定相の発生率と車両密度との関係を示す。4章では1度渋滞相に至った交通流をメタ安定相へ再び遷移させる渋滞緩和車を投入する手法を提案する。渋滞緩和車が効果的に機能する配置の検証、渋滞緩和車の視野や減速条件とその影響を調査する。5章で考察と今後の課題、6章で結論を述べる。

2. 関連研究

自動車の交通流を再現し、渋滞解消を目的とした研究は多く行われている。たとえば、文献 6) では、交差点などのある実際の一般道路を対象としたシミュレータを提案している。また文献 13) では、微視的道路交通シミュレータを作成し、運転者の判断モデルを導入することで、一般道の実交通を精度良く再現させている。さらに、地点制御および系統制御方式の信号制御についてその特徴を調べている。このほかに企業においても数社が信号制御方式を提案している。一般に、都市における一般道の渋滞解消への試みは信号制御に重点を置くことが多く、それを高速道路に適用はできない。また、信号制御以外の方法として、プローブと VICS 情報を相互に補完しあい、渋滞情報のない主要幹線以外の道路の状態を推測し、それをもとに混雑していないと推定できる迂回路の提供を提案したものもある¹¹⁾。しかし、高速道路の情報は比較的完備されており、その前提は異なる。

一方、高速道路については、交通流をモデル化し、実際の流れの再現に重点をおいた研究が多い。たとえば、文献 2) では、流出解析の一手法である等価粗度法を応用し交通流を表現しているのに対し、文献 7) では高速道路の交通流の変動をバーガーズ方程式を用いて表現している。さらに、文献 1), 5) では、高速道路の低い密度で自由走行相が存在し、高い密度で渋滞相が存在することを示している。特に、文献 5) は、交通の基本概念をセルオートマトンでモデル化したものであり、本研究の基本的なモデルとなっている。しかしこれらの研究ではメタ安定相が現れず、実際の高速道路とは異なることが指摘されている⁴⁾。

実際の交通流に確認できるメタ安定相を実現させた研究として、たとえば文献 10), 12) がある。文献 10) では、文献 5) で提案された NS モデルに確率的減速のモデルを導入した拡張 NS モデルを提案し、マルチエージェントシミュレーションによりメタ安定相を実現している。文献 12) ではセルオートマトンに基づくモデル化に確率変数を用いた車両速度表

現加えているが、拡張 NS モデルとは異なり、1 単位時間ごとに各車両は最大 1 マスのみを移動可能としている。これにより他車両に対する自車両の行動の制御を単純化したうえでメタ安定相の実現に成功している。この中で、本研究で提案する渋滞緩和エージェントを導入するには、速度の概念が明確な文献 10) の拡張 NS モデルがより適切であり、これをベースに実験を行っている。

高速道路における渋滞対策に関する研究は、路線や車線の追加による影響を調べたものが多い。たとえば文献 14) では、新たな路線を追加することでの渋滞解消予測をシミュレーションによって行っている。また、文献 8) では、速度低下を起こしている車に速度を上げるよう情報を提供する、渋滞の終了近くの車両にも速やかに速度を上げるよう指示するなど、適切な情報を渋滞の内外にドライバーに与えることで渋滞の抑制を狙っている。本研究は、渋滞解消車となるエージェントが、前方車両の速度と車間から自律的に運転制御するアプローチをとっており、これらの方法とはまったく異なっている。

3. 交通流のモデル化とメタ安定相の再現

3.1 交通流の基本図

高速道路の交通流において、流量が少なく先行車の減速が後続車へと伝搬せず、車両密度の増加とともに流量も増加する相を自由走行相と呼ぶ。逆に車両密度が増加につれ流量が減少する相を渋滞相と呼ぶ。自由走行相から渋滞相へと変わる境界の密度を臨界密度と呼ぶ。さらに渋滞が起こりうる車両密度に至っても、流量が増加し続けるメタ安定相が知られている。この交通流の各相を簡略化した図を交通流の基本図と呼び、図 1 に示す。

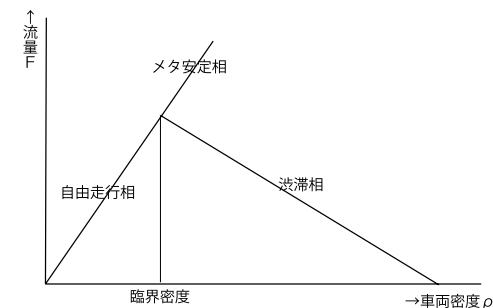


図 1 交通流の基本図

Fig. 1 Three phases in traffic flows.

3.2 拡張 NS モデル

交通流のモデル化にはセルオートマトンモデルを用いた NS モデルがある⁵⁾。しかし、NS モデルではメタ安定相は再現できないため⁴⁾、増淵らは「先行車の速度」と「先行車とその前方の車との車間距離」を考慮した拡張 NS モデルを提案した¹⁰⁾。車両 i がその先行車両 j の速度を予測し、その予測速度を v_j^{pred} とおく。また、車両 i とその直前の先行車両との車間距離を d_i とし、車両 i が時刻 t で速度決定後に移動した場所を $x_i(t)$ とする。上限速度を v_{max} としたときの時刻 $t \rightarrow t+1$ における速度 v を更新するための拡張 NS モデルの車エージェントのルールを以下に示す。

(1) 加速

$$v_i(t) \leftarrow \min(v_i(t-1) + 1, v_{\text{max}})$$

(2) 先行車を原因とする速度変更

if $v_i(t) > d_i$ then

$$v_j^{\text{pred}} \leftarrow \max(\min(d_j - 1, v_j(t-1)), v_{\text{max}} - 1), 0)$$

$$v_i(t) \leftarrow \min(v_i(t), d_i + v_j^{\text{pred}})$$

else

$$v_i(t) \leftarrow v_i(t)$$

end if

(3) 確率的減速

$$v_i(t) \leftarrow \max(v_i(t) - 1, 0) \text{ with probability } P$$

(4) 移動

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$$

なお $P (0 \leq P \leq 1)$ を減速確率と呼ぶ。また車 i の時刻 t での速度を $v_i(t)$ で表し、ルール

(1) から (4) を順に適用し、 $x_i(t)$ の位置から時刻 $t+1$ の $x_i(t+1)$ へ移る。この拡張 NS モデルにより、メタ安定相の発生を実現し、現実に近い交通流の再現に成功している。

3.3 メタ安定相の発生率

予備実験として拡張 NS モデルでメタ安定相の出現を確認するとともに、車両密度とメタ安定相の発生率の関係を調べる。本実験では、道路はループ状とし、道路長を整数 L とする。道路長の 1 は車 1 台が存在する 4m を想定した。車両密度 ρ は道路に存在する車の割合と定義する。たとえば $\rho = 0.3$ は道路長 $L = 100$ のときには 30 台の車両が存在することを示す。なお本実験では車両密度 ρ の値を 0.05 刻みで変化させる。時間は t (ステップ) とし、実際の道路上で 1 ステップは 1 秒と想定する。速度は 1 ステップあたり 0~7 だけ進む

表 1 パラメータの定義
Table 1 List of parameters.

| 記号 | 意味 |
|--------|-----------------------------|
| L | 道路長 |
| P | 確率的減速 |
| T | 計測時間 |
| F | 流量 |
| ρ | 車両密度 |
| S | 視野範囲 |
| H | 渋滞緩和車が減速する条件となる視野範囲内の先行車の速度 |

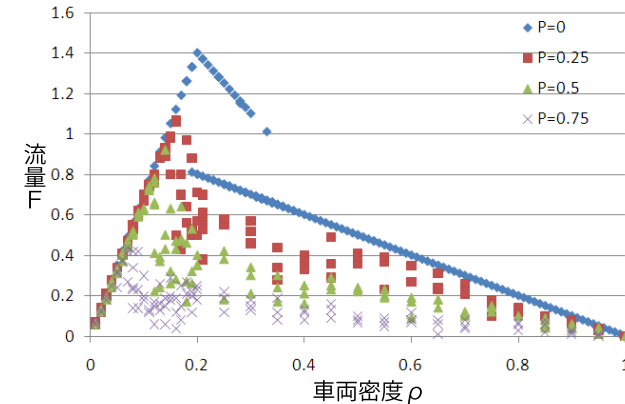


図 2 拡張 NS モデルの交通流の基本図

Fig. 2 Car densities and traffic flow rates in the extended Nagel-Schreckenberg model.

8 段階とする。実際の速度に換算すると、速度 1 は 14.4 km/h に相当し、上限速度 $v_{\text{max}}=7$ は 100.8 km/h に相当する。車エージェントの初期配置はランダムとする。各エージェントは視野範囲 S を前後に持ち、本実験では前後 7 マス ($S=7$) とする。なお渋滞緩和車が減速する条件となる視野範囲内の先行車の速度を H とする。減速確率 P の値は 0 から 0.25 刻みで 1 までの値とする。シミュレーション計測時間を T と表し、本実験では $T=1000$ とする。なお流量 F は、 $F=\rho * \bar{v}$ と定義する。定義したパラメータを以下の表 1 に示す

本実験で得られた拡張 NS モデルの交通流の基本図を図 2 に示す。なお、本図は各パラ

4 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価

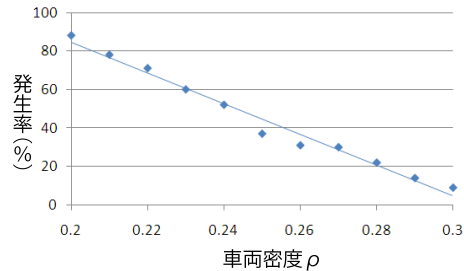


図 3 メタ安定相の発生率

Fig. 3 Appearance ratios of metastable phase.

メータにおける実験を 10 回行い、その散布図としている。この図から、いずれの減速確率 P においても、臨界密度付近でメタ安定状態が再現できることが分かる。たとえば $P = 0$ のときは、車両密度約 0.2~0.3 の間でメタ安定相が現れた。 P の値が大きいほど、流量の最大値が減少し臨界密度は小さくなる。

さらに車両密度とメタ安定相の発生率の関係について調査した。図 3 は確率的減速 $P = 0$ のときのメタ安定相の発生箇所である車両密度 0.2~0.3 付近のメタ安定相の発生率である。図 3 から、車両密度と発生率はおおむね反比例することが分かる。

4. 渋滞緩和車の導入と評価実験

4.1 渋滞緩和車のモデル

本論文の目的は、車両密度の高い場合で 1 度渋滞相に至った交通流をメタ安定相へと遷移させることである。そのために、拡張 NS モデルに視野範囲の先行車が低速の際に車間距離をとろうとする渋滞緩和車を導入する。

渋滞緩和車のモデルは、拡張 NS モデルの運転ルールに、視野範囲の先行車が低速のときのみ速度を 1 段階減速する次のルール (2') を (2) と (3) の間に新たに加える。

(2') 前方車両による減速

$$\text{if } v_j^{\text{pred}} \leq H \text{ then} \\ v_i(t) \leftarrow v_i(t) - 1$$

なお、以降の実験では特に明示がなければ道路長 $L=100$, $\rho=0.3$, $P=0$, $S=7$, $H=2$ とし、各実験値は、特に断りがなければ 10 回の平均値である。

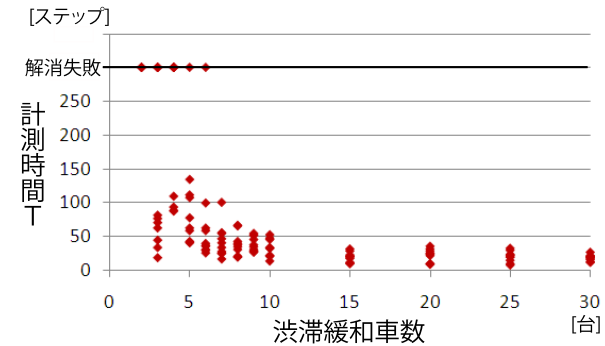


図 4 渋滞緩和車数と渋滞解消時間の関係

Fig. 4 The number of traffic congestion reducers and time for resolving the congestions.

4.2 渋滞緩和車の効果

前節で述べた実験環境に渋滞緩和車を投入し渋滞緩和車の効果を調査するシミュレーションを行う。道路長 $L=100$, 車両密度 $\rho=0.3$ のときの全車両 30 台の車両からランダムに x 台 ($2 \leq x \leq 30$) 選び、それを渋滞緩和車に変えた。ここでは渋滞相 (流量 $F=0.7$) に入ったことを確認し、100 ステップから渋滞緩和車を投入してメタ安定相へ遷移するかを調査した。本論文では、メタ安定相への遷移により渋滞解消と考える。また図 2 に示した各車両密度のメタ安定相の値に収束することで、メタ安定相への遷移が成功したとする。図 4 に渋滞相からメタ安定相への遷移の成否、遷移時間 (以下渋滞解消時間と呼ぶ) と渋滞緩和車の投入数との関係を示す。なお、計測時間 $T = 1000$ とした。図 4 より渋滞緩和は 3 台以上で成功し、渋滞緩和車の割合を増やすと成功率も高く、その平均渋滞解消時間も減少することが分かる。

また具体的に渋滞緩和車を導入し、メタ安定相への移行が成功した場合 (図 5) と成功しなかった場合 (図 6) の流量の変化の例を示す。図 5 では約 80 ステップで渋滞解消に成功し、0.7 から 1.1 へと流量が増加した。図 6 では流量の増加は見られない。しかし、図 6 の渋滞緩和車投入時の流量は通常の渋滞相の流量より増加しているように見える。これを詳しく調べるために渋滞緩和車の投入中のメタ安定相への遷移が失敗した場合について渋滞緩和車の投入中の流量を求め、表 2 に示した。

表 2 より、渋滞緩和車を投入した方が流量がその投入台数にかかわらず若干増加させる効果のあることが分かる。

5 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価

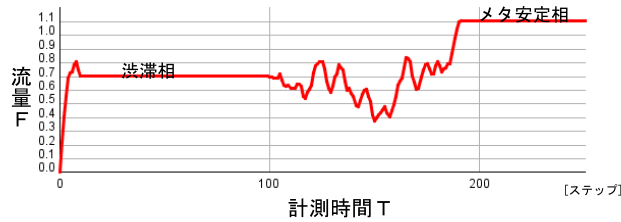


図 5 メタ安定相への遷移成功例

Fig. 5 A successful case of shifting a congested phase to a metastable one.



図 6 メタ安定相への遷移失敗例

Fig. 6 A failed case of shifting a congested phase to a metastable one.

表 2 渋滞相時に渋滞緩和車投入・未投入での流量（渋滞解消失敗時）

Table 2 List of the numbers of traffic congestion reducers and flow rates (in the case of failures of phase shifting).

| 渋滞緩和車数 | 未投入時の平均流量 | 投入時の平均流量 |
|--------|-----------|----------|
| 2 | 0.7 | 0.726 |
| 3 | 0.7 | 0.725 |
| 4 | 0.7 | 0.724 |
| 5 | 0.7 | 0.722 |

4.3 渋滞緩和車の配置と渋滞解消時間の関係

一方、図 4 は渋滞緩和車の割合が少ないときでも渋滞緩和車を多く投入したときと同等の時間で渋滞解消に成功したことがあることも示している。そこで渋滞緩和車の割合が少ないときに渋滞解消時間のばらつきに着目し、少ない渋滞緩和車での渋滞緩和の成否の差、成功した場合の渋滞解消時間差の原因を調査した。

この結果を説明するために図 7 の (1) ~ (4) の配置で渋滞緩和車を投入し渋滞解消時間を

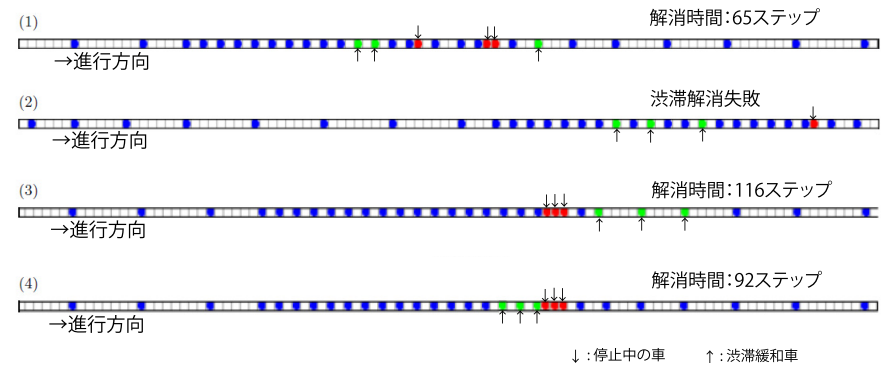


図 7 渋滞緩和車の配置

Fig. 7 Locations of traffic congestion reducers.

計測した例を示す。なお図 7 では、渋滞緩和車投入直後を示しており、上向き矢印を渋滞緩和車、下向き矢印を渋滞により停止している車、矢印なしを走行中の車とした。また渋滞解消時間も図 7 に示す。

図 7 より渋滞解消時間はそれぞれ (1) では 65 ステップ、(3) では 116 ステップ、(4) では 92 ステップで成功したが、(2) では 300 ステップ以上かかり渋滞緩和に失敗していることが分かる。図 7 の (1) ~ (4) を比較すると、渋滞緩和車を 2 台以上連続して投入した場合に渋滞解消が成功したと予想できる。また (3) と (4) の解消時間の比較から、渋滞緩和車の配置が同じでも、渋滞地点の通過により近い箇所に渋滞緩和車を投入する方が渋滞解消時間が短いと予測される。

そこで図 7 の (3) と (4) の渋滞時の配置を初期配置とし、他の渋滞緩和車の割合でも様々な配置で実験し、渋滞解消時間をまとめた結果を表 3 に示す。ここで、1 は渋滞緩和車を、0 は一般車両を表し、0 と 1 の列はその並びを示す。たとえば、101 は渋滞緩和車の間に一般車両がいること、11 は渋滞緩和車が連続して 2 台いることを意味する。

表 3 は、渋滞緩和車の割合にかかわらず、渋滞緩和車を複数台連続して投入すると渋滞解消に成功し、連続台数を多くすると渋滞解消時間を短くできることを示す。また、渋滞緩和車の割合で同じ配置で渋滞緩和車を投入しても、投入位置と渋滞箇所の距離により、渋滞解消時間が変化することも確認している。これは実際に、複数台の渋滞緩和車が渋滞地点を通過したことにより、解消されたことも示す。

6 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価

表 3 渋滞緩和車の配置による渋滞解消時間の相違

Table 3 Relative locations of traffic congestion reducers and average required time for phase shifting.

| 渋滞緩和車数 | 渋滞緩和車の配置 | 渋滞解消の平均時間 |
|--------|----------|-----------|
| 2 | 11 | 135.7 |
| 2 | 101 | 失敗 |
| 3 | 111 | 103.5 |
| 3 | 1011 | 109.2 |
| 3 | 1101 | 107.4 |
| 3 | 10101 | 失敗 |
| 5 | 11111 | 75.2 |

表 4 渋滞緩和車の (不) 連続配置と渋滞解消率

Table 4 Table of relative locations of traffic congestion reducers and success ratios of and required time for phase shifting.

| | 道路長 L | 視野範囲 S | 渋滞解消成功率 [%] | 渋滞解消時間の平均 (成功時) |
|--------|---------|----------|-------------|-----------------|
| 2 台連続 | 100 | 7 | 100 | 135.7 |
| 2 台不連続 | 100 | 7 | 0.0 | 失敗 |
| 1 台のみ | 100 | 7 | 0.0 | 失敗 |
| 2 台連続 | 100 | 15 | 100 | 100.3 |
| 2 台不連続 | 100 | 15 | 36.7 | 105.8 |
| 1 台のみ | 100 | 15 | 0.0 | 失敗 |
| 2 台連続 | 100 | 20 | 100 | 23.3 |
| 2 台不連続 | 100 | 20 | 53.3 | 51.2 |
| 1 台のみ | 100 | 20 | 0.0 | 失敗 |

4.4 渋滞緩和車の連続投入の効果

これまでの実験から渋滞緩和車を連続配置したときに解消に成功する率が高いといえる。次の実験では連続配置が必要かをより詳細に調査する。具体的には視野範囲 S を大きくする、減速のタイミングを左右する H の値を変えるなどにより、渋滞解消率の変化を調べる。

まず 2 台連続で投入せずに、視野範囲を増やした車を 2 台投入した場合と、1 台のみ投入した場合との効果の差を比較した。道路長 $L=100$ と固定したとき、視野範囲 S を 7, 15, 20 と変化させ、それぞれの場合の成功率と渋滞解消の平均時間を表 4 に示す。なお表 4 の数値は、実験を 30 回行った平均値である。

表 4 より、2 台連続ではすべてにおいて解消に成功しているが、視野範囲を変更しても 1 台のみでは渋滞解消ができなかったことが分かる。2 台だが連続でない場合は、 S の値を大きくすると渋滞解消成功率が高くなるのが分かる。これにより視野範囲が大きくなるこ

表 5 道路長 L と渋滞解消時間の関係

Table 5 Road length and the required time for phase shifting.

| 道路長 L | 視野範囲 S | 渋滞解消時間の平均 (成功時) |
|---------|----------|-----------------|
| 100 | 20 | 23.3 |
| 200 | 20 | 121.1 |
| 300 | 20 | 218.7 |
| 400 | 20 | 302.4 |
| 500 | 20 | 375.5 |

とで 2 台連続でなくても渋滞解消に効果があると推測できるが、成功率および解消までの平均時間を比較すると、その効果は 2 台連続の場合と比べ低い。また S の値と解消時間の関係から、視野範囲を広げることで連続投入したとき渋滞解消時間を短くできる。これらの考察から 2 台連続が必ずしも必要ではない場合もあるが、その効果をきわめて高くでき、渋滞解消に大きく貢献するといえる。

また $L=100$ から 500 へ変化させた場合でも連続で投入することで渋滞解消可能か調査した。なお渋滞緩和車となる車を最小限にするため、渋滞緩和車となる車を 2 台と限定して実験を行った。実験の結果を表 5 に示す。本表より、道路長 L を長くしても渋滞緩和車を 2 台連続して投入することで渋滞解消を可能である。道路はループ状になっていることから、 L が大きくなると連続した渋滞緩和車が、渋滞点を通る頻度が下がる。次の通過までに再び渋滞が悪化することがあり、それが解消までの時間がかかる要因と考えられる。

4.5 減速のタイミングの影響

これまでは $H=2$ としており、これは渋滞緩和車の視野範囲にある先行車が速度 2 以下のときに速度を 1 段階減速させることを意味する。そこで H の値を変え、減速のタイミングを変えたときの解消率ならびに解消時間を調べる。 $L=100$ とし、 $H=1, 2, 3, 4$ と変化させたときの結果を表 6 に示す。なお $S=20, 7$ とし、実験を 30 回行いその平均値を示している。

表 6 より、 H の値を大きくし、渋滞緩和車の視野範囲にある先行車の速度が低速すぎないときに、渋滞緩和車の速度を減速する方が渋滞解消の成功率が上がることが分かる。これは視野範囲を大きくした実験結果と同様で、速度が下がりすぎる前に渋滞緩和車に対応するため、渋滞解消の成功率が増加したと考えられる。

しかし H の値を大きくすることは、別の渋滞要因になることも考えられる。たとえば図 8 は渋滞緩和車の視野範囲にある先行車の速度 H が 4 以下のときに、渋滞緩和車の速度を 1 段階下げ、メタ安定相へ遷移するまでの流量の変化を表したものである。

7 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価

表 6 パラメータ H の変化と渋滞解消率の関係

Table 6 Relationship between parameter H and the success ratios.

| | S | H | 渋滞解消成功率 [%] |
|--------|-----|-----|-------------|
| 2 台連続 | 7 | 1 | 100 |
| 2 台不連続 | 7 | 1 | 0.0 |
| 2 台連続 | 20 | 1 | 100 |
| 2 台不連続 | 20 | 1 | 26.7 |
| 2 台連続 | 7 | 2 | 100 |
| 2 台不連続 | 7 | 2 | 0.0 |
| 2 台連続 | 20 | 2 | 100 |
| 2 台不連続 | 20 | 2 | 53.3 |
| 2 台連続 | 7 | 3 | 100 |
| 2 台不連続 | 7 | 3 | 0.0 |
| 2 台連続 | 20 | 3 | 100 |
| 2 台不連続 | 20 | 3 | 83.3 |
| 2 台連続 | 7 | 4 | 100 |
| 2 台不連続 | 7 | 4 | 10.0 |
| 2 台連続 | 20 | 4 | 100 |
| 2 台不連続 | 20 | 4 | 90.0 |

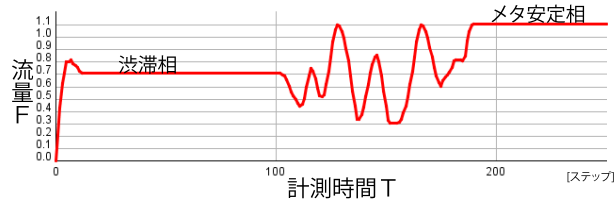


図 8 パラメータ $H=4$ 時の流量変化図
Fig.8 Flow transitions when $H = 4$.

図 5 と図 8 を比較すると、先行車の速度が高いうちから減速を始めると、流量変化の増減が大きくなる。この増減が多いと 1 度に多くの車両の速度が増減していることになる。これは H が大きいと渋滞緩和車となった車が後続車を図 5 の渋滞緩和車以上にとどめているからと考えられる。今回は H を大きくすることにより、渋滞解消の成功率が上昇した場合のみ観測できたが、一方で渋滞緩和車となった車の後ろで渋滞を起こす可能性もある。これについては今後の調査が必要である。

4.6 渋滞緩和車の利得

渋滞緩和車となった車は速度制限をするため、速度の面で不利になる可能性がある。渋滞

表 7 渋滞緩和車と普通車の平均速度

Table 7 Average speeds of traffic congestion reducers and normal cars.

| 渋滞緩和車数 | 渋滞緩和車の平均速度 | 普通車の平均速度 | 解消しない場合の平均速度 |
|--------|------------|----------|--------------|
| 2 | 2.298 | 2.306 | 2.298 |
| 3 | 2.303 | 2.331 | 2.298 |
| 5 | 2.307 | 2.332 | 2.298 |

緩和車の平均速度と、通常の車両、および渋滞緩和車を導入しなかった場合の平均速度と比較した。実験は $L=100, \rho=0.3, S=20$ とした。渋滞緩和車として機能する時間は渋滞相からメタ安定相へと遷移する間であり、その間の平均速度をそれぞれの車に対して計測した。これを表 7 に示す。

本表から、渋滞緩和車となった車とそうでない車の速度は大差がないことが分かる。また、連続投入した方が解消が早くなり、平均速度も上昇すると考えられる。さらに、渋滞緩和車を投入せずに放置した場合と比較すると、渋滞緩和車でも速度は上がる。これらの結果から渋滞緩和車となることで大きく不利にはならないと考えられる。

5. 考察と今後の課題

本論文で示した渋滞緩和車の投入以外にも、渋滞解消へのアプローチは多い。たとえば、道路の車線を増やし車の流量を増加させる渋滞解消法がある。しかし、この方法では、道路を増やせない環境や、道路建設のコスト・時間など様々な点を考慮すると実現は難しい。一方、本論文では渋滞緩和車による渋滞解消を目指しているため、コストや時間を大幅に削減できる。本研究に関連して、前方に渋滞が存在しても車間距離を一定つことで渋滞解消を可能にする研究がある⁹⁾。ここでは後続車に追い越しをされても車間距離を保つことで、渋滞地点に自身の車が到着する際には渋滞が解消されると述べられている。今回の結果も類似した観点から渋滞を解消しているため、本提案手法と文献 9) の結果には関連性があると考えられる。また本論文では拡張 NS モデルを高速道路の交通流と見立てた実験を行ったが、他のモデルを用いたシミュレーションも行う必要がある。これらについては今後調査をしたい。

渋滞緩和車の投入により、渋滞相からメタ安定相へと遷移させる結果を得たが、これはたとえば ITS の普及により実現できると考える。ITS のような機能は、高価格の車から導入される可能性が高い。このような車の比率は小さいが、本研究の結果は、渋滞緩和車が隣接していれば、視野範囲 (S が小) が狭く、また前方車両に合わせて早めに減速しなくても

(H が小) 有効であるので, たとえば ITS 機能を持つ車が前後に並んだときに, 渋滞緩和車として機能させればよい. 4.6 節の実験から渋滞緩和車の役割を帯びても渋滞箇所の通過時間に大きな差はなく, 十分に機能すると考えられる. また, 現在のように ITS が普及していない場合でも, 警察あるいは高速道路管理車の車両を 2 台以上連続させて, シミュレーション結果と同様に渋滞緩和車として走行させることも考えられる.

他方, 本研究では, メタ安定相の発生する車両密度に対しての提案モデルであり, すでに渋滞が何 km も続く車両密度が高い場合には対応できない. しかしながら, 渋滞の初期段階で渋滞緩和車を投入し, 渋滞を緩和あるいは遅らせることができる可能性はある. 現在, ほとんどの自然渋滞の発生箇所は既知であり, そこを監視することで, 渋滞の初期状態を発見し, 渋滞が長くなる前に渋滞緩和車を投入できる. ただし, 具体的な遅延の効果についてはさらなる実験が必要であるため, 今後の課題としたい.

6. 結 論

本論文では, 拡張 NS モデルを利用し車両密度とメタ安定相の発生率を調べた. 次に, 提案モデルとして, 拡張 NS モデルに渋滞緩和車を導入し, 渋滞相にあった交通流がメタ安定相へと遷移することを試みた. また, 渋滞緩和車の数よりも渋滞緩和車の配置により渋滞解消の時間が大きく変わることが本研究での実験で得られた. 特に渋滞緩和車を連続した配置で投入することで, 少ない渋滞緩和車で渋滞解消が可能であることを示した. さらに減速のタイミング, 視野の範囲も渋滞解消時間に影響することを調べた. 今回の研究では, 1 車線だけのシミュレーションであったが, 今後は複数車線に対して実験を行う. 本論文で渋滞緩和車による交通渋滞の解消を実現可能としたが, 渋滞解消時間をより短くすることも今後の課題である.

謝辞 本論文を改善するために有益なコメントをくださった査読者の方々に心から御礼申し上げます. なお本研究は科研費 (22300056) の助成を受けたものである.

参 考 文 献

- 1) Biham, O., Middleton, A.A. and Levine, D.: Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models, *Phys. Rev. A*, Vol.46, No.10, pp.R6124-R6127 (online), DOI:10.1103/PhysRevA.46.R6124 (1992).
- 2) Lighthill M.J.: On Kinematic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proc. Roy. Soc. Ser.A229*, Vol.1178, pp.317-345 (online), DOI:10.1098/rspa.1955.0089 (1955).

- 3) Kerner, B.S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*, Springer (2009).
- 4) Krauss, S., Wagner, P. and Gawron, C.: Metastable states in a microscopic model of traffic flow, *Phys. Rev. E*, Vol.55, No.5, pp.5597-5602 (online), DOI:10.1103/PhysRevE.55.5597 (1997).
- 5) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, Vol.2, No.12, pp.2221-2229 (online), available from (<http://publications.edpsciences.org/articles/jp1/pdf/1992/12/jp1v2p2221.pdf>) (1992).
- 6) Schreckenberg, M., Neubert, L. and Wahle, J.: Simulation of traffic in large road networks, *Future Gener. Comput. Syst.*, Vol.17, No.5, pp.649-657 (online), DOI:[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-739X\(00\)00033-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00033-9) (2001).
- 7) Toshimitsu, M. and Hideyo, H.: Traffic Current Fluctuation and the Burgers Equation, *Japanese journal of applied physics*, Vol.17, No.5, pp.811-816 (online), available from (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003954164/en/>) (accessed 1978-05-05).
- 8) 中村真吾, 依 明宏, 中島剛史, 久保田彰人, 小林祐貴, 市村 哲: 渋滞学に基づく高速道路における自然渋滞抑制システム, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2010) 予稿集, pp.438-445 (2010).
- 9) 西成活裕: 「渋滞」の先頭は何をしているのか?, 宝島社 (2009).
- 10) 増淵達也, 荒井幸代: 前方情報を考慮した走行ルールによるメタ安定相の発生と特徴の解析 (エージェントベースシミュレーション, <特集>ソフトウェアエージェントとその応用論文), 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム, Vol.92, No.11, pp.1935-1944 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007467235/>) (参照 2009-11-01).
- 11) 玉置 洋, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原 聡: 複数の交通情報を効率的に利用する最適な交通情報提供手法の構築, 人工知能学会論文誌, Vol.25, No.3, pp.394-399 (オンライン), DOI:10.1527/tjsai.25.394 (2010).
- 12) 玉城龍洋, 安江里佳, 北 栄輔: セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.46, No.10, pp.30-40 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002768710/>) (参照 2005-06-15).
- 13) 石川 亮, 本多中二, 風間 洋: 道路交通シミュレータ MITRAM を用いた信号制御設計, シミュレーション, Vol.24, No.3, pp.239-248 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003983888/>) (参照 2005-09-15).
- 14) 奥野和久, 黒田浩一, 松下 温: 東京外郭道路による首都高速道路の渋滞解消効果に関するシミュレーション, 全国大会講演論文集, Vol.46, No.1, pp.395-396 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002881681/>) (参照 1993-03-01).

(平成 22 年 11 月 17 日受付)

(平成 23 年 1 月 7 日再受付)

(平成 23 年 2 月 4 日採録)

9 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価



萬屋 賢人

2010年早稲田大学理工学部コンピュータ・ネットワーク工学科卒業。現在、早稲田大学理工学術院基幹理工学研究科情報理工学専攻在学。



菅原 俊治（正会員）

1982年早稲田大学大学院理工学研究科数学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所基礎研究部入所。1992～1993年マサチューセッツ大学アマースト校客員研究員。現在、早稲田大学理工学術院基幹理工学研究科情報理工学専攻教授。知識表現，学習，分散人工知能，マルチエージェントシステム，インターネット等の研究に従事。博士（工学）。日本ソフトウェア科学会，電子情報通信学会，人工知能学会，ISOC，IEEE，ACM各会員。