

## 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<sup>†1</sup> 菅原 俊治<sup>†1</sup>

高速道路の交通流は渋滞に至る過程で、渋滞が起こり得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。本研究では、渋滞の緩和と発生の遅延をめざし、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提案する。これをメタ安定相を再現できる拡張 Nagel-Schreckenberg モデルに加え、マルチエージェントシミュレーションにより、渋滞解消ができることをしめす。特に、渋滞時に渋滞緩和車を複数台連続させて投入する配置が、少ない渋滞緩和車で、メタ安定相への遷移を実現できることが分かった。

### A Method for Ease of Traffic Congestion Using Traffic Congestion Reducer.

KENTO YOROZUYA<sup>†1</sup> and TOSHIHARU SUGAWARA<sup>†1</sup>

Even if traffic density in highway reaches the state in which congestion can happen, we can sometimes observe the phenomenon where the traffic flow still keep growing. This state is called the *metastable phase*. We introduce a number of *traffic congestion reducers* (TCRs) that take sufficient distance from the front car to ease traffic congestion. Then we investigate whether or not the congestion can be eased or resolved by adding TCRs using the extended Nagel-Schreckenberg model that can generate the metastable phase. Our results show by placing the more than two TCRs straight, the congestion can be resolve with higher probabilities.

#### 1. はじめに

日本国内における自動車保有台数の増加に伴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。近年はCO<sub>2</sub>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得る交通密度に至っても、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、例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)<sup>4)</sup> 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)<sup>7)</sup> があ。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言える。

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示す。また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しない場合の車の平均速度をと比較する。

本論文の構成は以下の通りである。第2節にて本論文に関連する関連研究を紹介する。第3節にて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。第4節では一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。また渋滞緩和車が効果的に機能する場合を検証する。第5節にて考察と今後の課題、第6節にて結論を述べる。

#### 2. 関連研究

高速道路の交通流をモデル化し、実際の流れの再現に重点を置いた研究が多い。たとえば、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、5) 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、1)4)

<sup>†1</sup> 早稲田大学基幹理工学研究科情報理工学専攻

Waseda University, Department of Computer Science and Engineering

では、高速道路の低い密度にて自由走行相が存在し、高い密度にて渋滞相が存在することを示している。特に、4) 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<sup>3)</sup>。

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、例えば7)8)がある。7)では、4)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再現している。8)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を加えているが、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上でメタ安定相を再現している。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7)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。

### 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得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。

#### 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<sup>4)</sup>。しかし、NSモデルではメタ安定相は再現できないため<sup>3)</sup>、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<sup>7)</sup>。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 $v$ を更新する為の拡張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

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

(2) 先行車を原因とする速度変更

if  $v_i(t) > d_i$  then

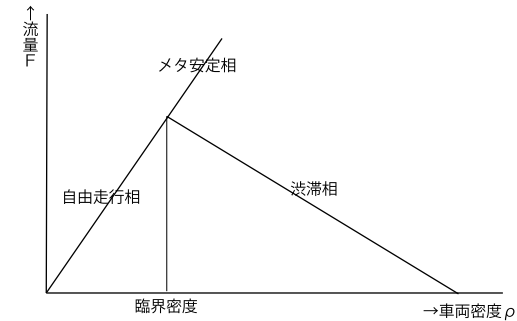


図1 交通流の基本図

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

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

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 $\rho$ は道路に存在する車の割合と定義する。例えば $\rho = 0.3$ 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 $\rho$ 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

8段階とする。実際の速度に換算すると、速度1は14.4km/hに相当し、上限速度  $v_{max}=7$  は100.8km/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。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、 $F=\rho * \sum_i v_i(t)$  と定義する。

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

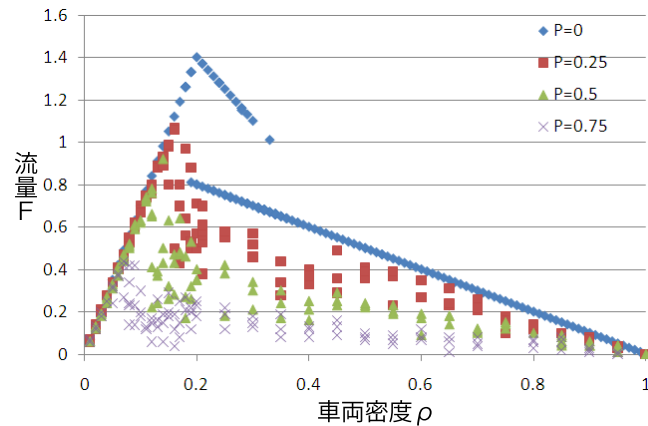


図2 拡張NSモデルの交通流の基本図

$P$  においても、臨界密度付近にてメタ安定状態が再現できることが分かる。例えば  $P=0$  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。 $P$  の値が大きいくほど、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概ね反比例することがわかる。

#### 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一度渋滞相に至った交通流をメタ安定相へと遷移

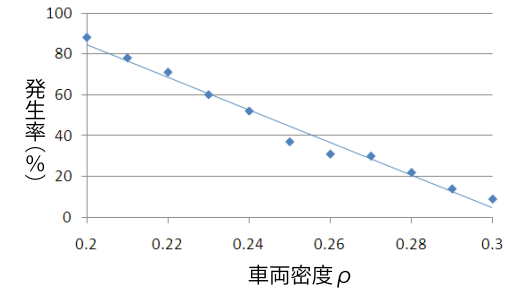


図3 メタ安定相の発生率

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時のみ速度を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

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

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。

##### 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。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、渋滞解消失敗時は300ステップにプロットした。これは300ステップを超えてメタ安定相に遷移した例がなく便宜的な表示である。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わかる。

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

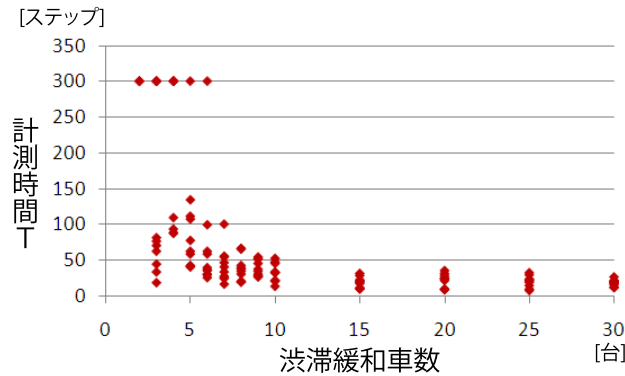


図4 渋滞緩和車数と渋滞解消時間の関係

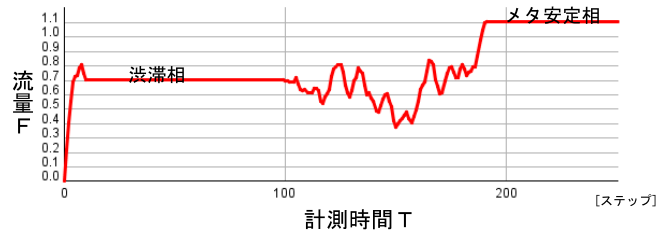


図5 流量変化図

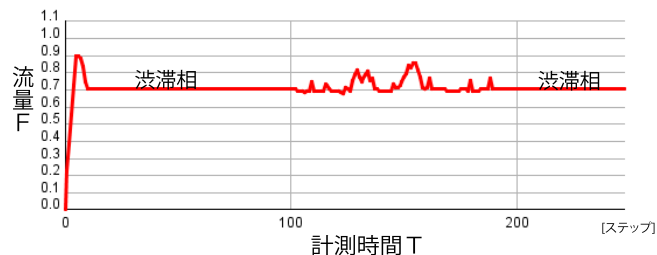


図6 流量変化図

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 1 に示した。表 1 より、渋滞緩和車を投入した方が流量が

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

その投入台数に関わらず若干増加させる効果のあることがわかる。

#### 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時でも渋滞緩和車を多く投入した時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計測した例を示す。なお図 7 では、緑円 (上向き矢印でも示す) を渋滞緩和車、赤円 (下向き矢印でも示す) を渋滞により停止している車、青円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。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、渋滞地点に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表 2 を示す。表 2 中の 11 は渋滞緩和車を連続して 2 台を表し、101 は渋滞緩和車の間に他の車がいることを表す。

表 2 は、渋滞緩和車の割合に関わらず、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

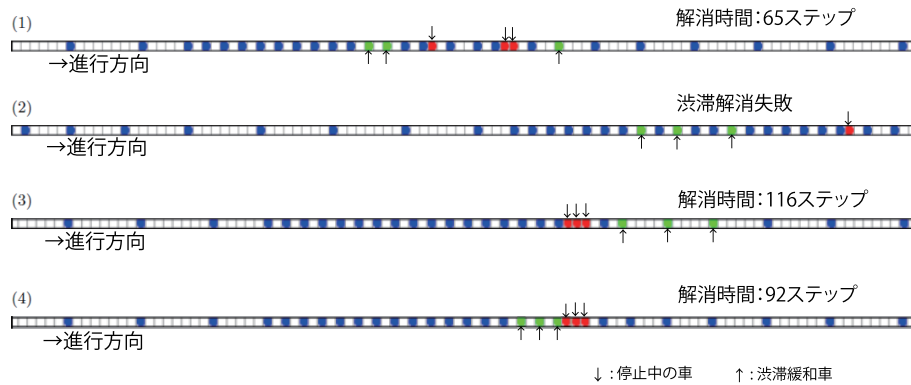


図 7 渋滞緩和車の配置

表 2 渋滞緩和車の配置による渋滞解消時間の違い

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

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により、解消されたことも示す。

#### 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言える。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  $S$  を大きくすることより、渋滞解消率の変化を調べる。

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で同様の効果が得られるか実験をした。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 3 に示す。なお表 3 の数値は、実験を 30 回行った平均値である。

表 3 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。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ことからわかる。これにより視野範囲が大きくなることで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の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、その効果を極めて高くでき、渋滞解消に大きく貢献すると言える。

表 3 渋滞緩和車の連続投入と渋滞解消率の関係

	道路長 $L$	視野範囲 $S$	渋滞解消成功率 [%]	渋滞解消の平均時間 (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

#### 4.5 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 4 に示す。

表 4 渋滞緩和車と普通車の平均速度

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

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わかる。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。例えば、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<sup>6)</sup>。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<sup>6)</sup>の結果には関連性があると考えられる。これについては、今後調査したい。

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) が狭いとき、例えば 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。第 4.5 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。但し、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、一車線のため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：本研究は一部科研費 (22300056) の助成を受けている。

## 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 (1992).
- 2) J., L.M.: On Kinematic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proc. Roy. Soc. Ser. A229*, Vol.1178, pp.317–345 (1955).
- 3) 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 (1997).
- 4) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, Vol.2, No.12, pp.2221–2229 (1992).
- 5) Toshimitsu, M. and Hideyo, H.: Traffic Current Fluctuation and the Burgers Equation, *Japanese journal of applied physics*, Vol.17, No.5, pp.811–816 (1978-05-05).
- 6) 西成活裕：渋滞の先頭は何をしているのか？，宝島社 (2009)。
- 7) 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 (2009-11-01)。
- 8) 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 (2005-06-15)。