

# 渋滞相からメタ安定相への遷移を可能にする渋滞緩和エージェントの提案と効果

A Method of Transition from Congestion Phases to Metastable Phases.

萬屋 賢人 菅原 俊治  
Kento Yorozuya Toshiharu Sugawara

早稲田大学基幹理工学研究科情報理工学専攻  
Department of Computer Science and Engineering, Waseda University

In this paper, we propose the special-purpose vehicle, called *traffic congestion reducer* (TCR), that takes sufficient distance from the front car to ease traffic congestion, and show that how many vehicles are required to actually reduce the congestion. Even if traffic density in highway reaches the state in which congestion can happen, we can often observe the phenomenon where the traffic flow still keep growing. This state is called the metastable phase. To investigate the features of actual traffic flows, it is require to produce this phenomenon in the traffic simulation. From this viewpoint, extended Nagel-Schreckenberg model that can generate metastable phases was proposed. Using this model, we introduce a number of TCRs to shift a congesting phase to a metastable phase, and investigate how many TCRs are required to success the phase transitions. Our results show that, although more TCRs can ease the congestion with higher probability, their relative positions are more important for the phase transitions.

## 1. はじめに

近年、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深刻化している。国土交通省の試算 [1] によると、2001 年の日本国内での渋滞による損失時間は年間 38 億時間、金額にして年間約 12 兆円になる。近年は排出量の増加による環境への悪影響や急ブレーキ・急発進によるエネルギーの浪費もあり、交通渋滞の緩和・回避は解決すべき大きな課題である。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。

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。メタ安定相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。メタ安定相の解析に関する研究には、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) [3] 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) を提案し、マルチエージェントシミュレーションにおいてメタ安定相の発生に成功したものがある [2]。

次の節で高速道路における交通流の説明を交通流の基本図により説明する。また拡張 NS モデルのルールについて述べる。第 3 節で拡張 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手法を提案する。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車間距離をとる渋滞緩和車を新たに導入する。マルチエージェントシミュレーションにより渋滞緩和車を導入することで、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。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、渋滞緩和車の数を少なくとも遷移に成功できることを示す。第 5 節にて考察と今後の課題、第 6 節にて結論を述べる。

連絡先: 萬屋 賢人, k.yorozuya@isl.cs.waseda.ac.jp

## 2. 準備

### 2.1 交通流の基本図

高速道路の交通流において、先行車の減速が後続車へと伝搬しないため、車両密度が増加につれ交通流の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交通流の流量が減少する相を渋滞相と呼ぶ。そして自由相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。また渋滞が起こり得る車両密度に至っても、交通流の流量が増加し続ける相をメタ安定相という。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。

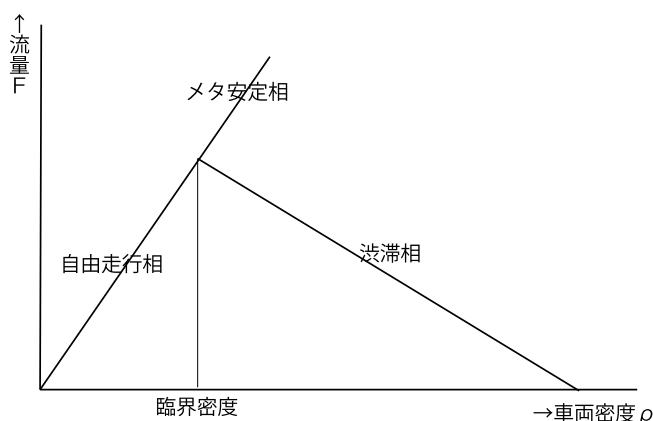


図 1: 交通流の基本図

### 2.2 拡張 NS モデル

交通渋滞の解析に関し、本論文と関連する研究として [2] がある。[2] では、状態入力と行動出力の対として記述可能なためセルオートマトンモデルを使用しているが、そのままでは交通流の解析は困難なため、K. Nagel と M. Schreckenberg が交通の基本概念をモデル化した NS モデル [3] をさらに拡張さ

せた拡張 NS モデルを提案している。この拡張 NS モデルをマルチエージェントシミュレーションとして実装し、先行車の減速・ブレーキが後続車に伝搬し発生する渋滞相と、NS モデルでは実現できなかった、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の発生を実現し、現実に近い交通流の再現に成功した。

拡張 NS モデルは、NS モデルから「先行車の速度」と「先行車とその前方の車との車間距離」を考慮したものであり、ある車両が予測した先行車の速度を予測速度とする。車両を  $i$ 、その先行車を  $j$ 、 $j$  の予測速度を  $v_j^{pred}$ 、制限速度を  $v_{limit}$  と表す時、時刻  $t$ 、 $t+1$  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運転ルールを以下に示す。

(1) 加速

$$v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{limit})$$

(2) 先行車を原因とする速度変更

$$\text{if } v_i(t) > d_i \text{ then}$$

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

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

else

$$v_i(t) = v_i(t)$$

end if

(3) 確率的減速

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

(4) 移動

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t)$$

なお  $P(0 \leq P \leq 1)$  を減速確率と呼ぶ。また車は (1) から (4) を順に適用する。

### 3. 予備実験

本論文では、まず拡張 NS モデルでメタ安定相の出現を確認し、さらに車両密度とメタ安定相の発生率の関係を調べる。

#### 3.1 実験環境

本実験で使用するシミュレーション実験環境について説明する。道路はループ状とし、道路長を  $L$  とする。道路長の 1 は約  $4m$  を想定し、最大 1 台の車が存在する。車両密度  $\rho$  は道路に存在する車の割合と定義する。道路長  $L = 100$  にて、 $\rho = 0.3$  の場合は 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  $\rho$  の値を原則として 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。実際の道路上での速度に換算すると、速度 1 段階ごとに  $14.4km/h$  となる。また制限速度  $v_{max}=7$  を導入するが、これは  $100.8km/h$  に相当する。車エージェントの初期配置はランダムとし、各エージェントは視野範囲前後 7 マスをもつ。減速確率  $P$  の値は 0 から 0.25 刻みで 1 までの値とする。計測時間  $T$  の終了をもって 1 回のシミュレーションとする。取得するデータはシミュレーションを 10 回行った平均を取る。

#### 3.2 メタ安定相の発生率

拡張 NS モデルの交通流の基本図を見るために、拡張 NS モデルを道路長  $L=100$ 、減速確率  $P=0, 0.25, 0.5, 0.75$  と変化させ、計測時間  $T=300$  に設定した。その結果を図 2 に示す。それぞれ確率的減速  $P$  と車両密度  $\rho$  の組み合わせごとに

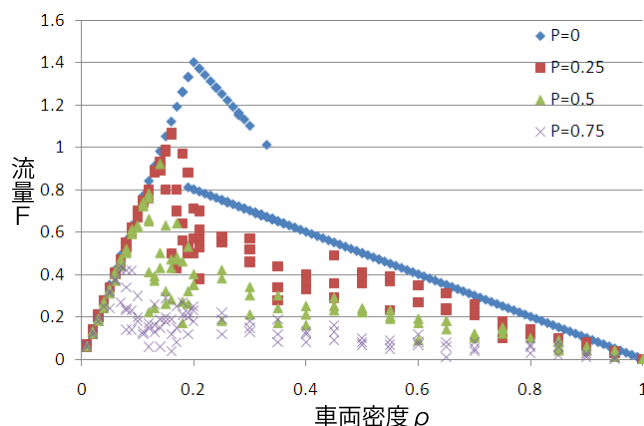


図 2: 拡張 NS モデルの交通流の基本図

10 回行った。メタ安定相が出るかの確認なので平均は取らず散布図とした。

図 2 に示す通り、いずれの減速確率  $P$  においても、それぞれの臨界密度付近にてメタ安定状態を確認できた。例えば  $P = 0$  の時は、車両密度約 0.2~0.3 の間である。 $P$  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った。

拡張 NS モデルでは実際の交通流と同じようにメタ安定相が現れたが、[2] ではメタ安定相の発生率については言及されていない。そこで確率的減速  $P = 0$  の時、メタ安定相の発生箇所である車両密度 0.2~0.3 付近で、拡張 NS モデルにおいて車両密度を 0.2, 0.25, 0.3 とした時のメタ安定相の発生率を調査した。表 1 にシミュレーション 100 回あたりの各車両密度におけるメタ安定相が発生する平均確率を示す。表 1 より、車両

表 1: メタ安定相の発生率

車両密度	発生率 [%]
0.2	88
0.25	37
0.3	9

密度が大きくなるにつれメタ安定相の発生率は下がるのがわかる。逆に車両密度が大きくなるほど渋滞相に至りやすい。より詳細な結果を図 3 に示す。図 3 から、車両密度と発生率は概ね比例している様子がわかる。

### 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

本論文では、車両密度の高い場合でも一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を試みる。そのために提案モデルでは、拡張 NS モデルに視野範囲にある先行車が低速の際に車間距離をとる渋滞緩和車を新たに導入する。

渋滞緩和車の運転ルールは、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 段階減速する以下のルールを (2) と (3) の間に新たに加える。

$$\text{if } v_j^{pred} < H \text{ then}$$

$$v_i(t) = v_i(t) - 1$$

以下の実験では  $H=2$  とした。

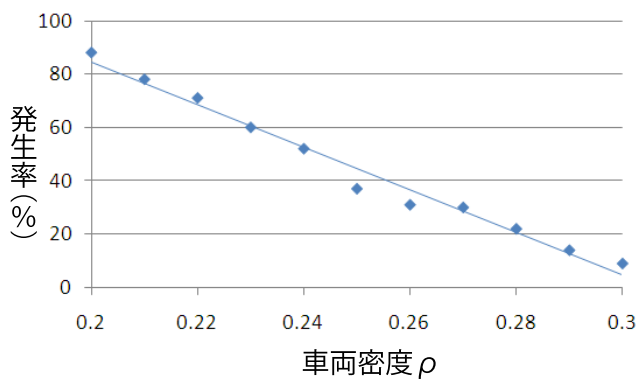


図 3: メタ安定相の発生率

#### 4.2 実験

拡張 NS モデルと同じ実験環境に渋滞緩和車を投入し、シミュレーションを行う。本実験では、全車両 30 台の車両に対し、渋滞緩和車の台数を 2 台から 30 台まで徐々に増やす。なお 100step から渋滞緩和車を投入し、メタ安定相へ遷移するかを調べる。

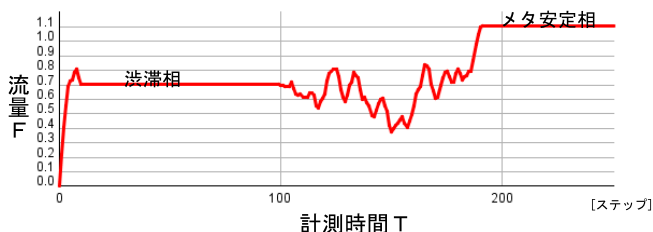


図 4: 流量変化図

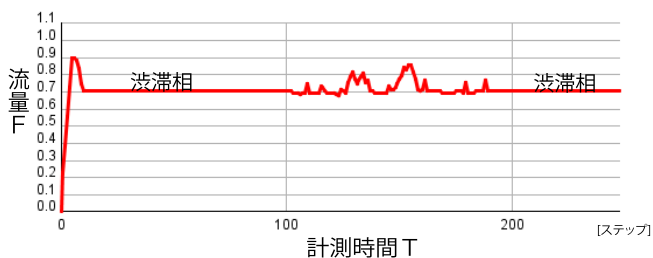


図 5: 流量変化図

#### 4.3 実験結果

図 4 と図 5 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 4) と成功しなかった場合 (図 5) の流量の変化を示す。図 4 では約 80step で渋滞解消に成功し、0.7 から 1.1 へと流量が変化しているが、図 5 では流量の増加は見られない。そこで提案モデルが渋滞相からメタ安定相へと遷移させるまでにかかる時間 (以下渋滞解消時間) と渋滞緩和車の投入数との関係を調査した。これを図 6 に示す。なお、減速確率  $P = 0$ 、計測時間  $T = 1000$  とし、渋滞解消失敗時は 300step 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 6 より、渋滞緩和の成否は、渋滞緩和車の割合を増やすと平均して渋滞解消時間が減少することがわかる。

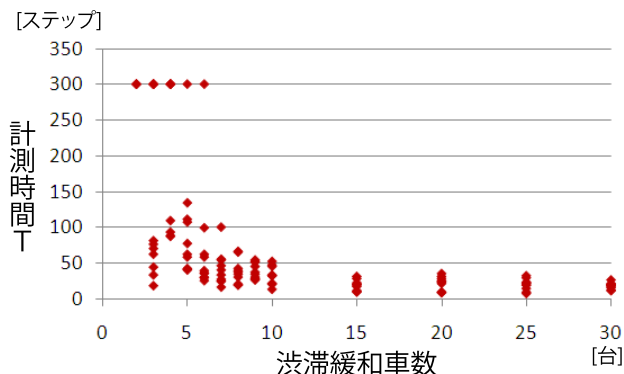


図 6: 渋滞緩和車数と渋滞解消時間の関係

#### 4.4 渋滞緩和車の配置と移行時間の実験と解析

一方、図 6 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ている時と同等の時間で渋滞解消に成功している場合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時での渋滞解消時間のばらつきに着目し、同じ渋滞緩和車の割合での成功・失敗の差、成功した場合の渋滞解消時間差の原因を調査した。そのために図 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。なお図 6 では、緑円を渋滞緩和車、赤円を停止している車、青円を走行中の車とした。

渋滞解消時間はそれぞれ (1) では 65step、(3) では 116step、(4) では 92step で成功し、(2) では 300step 以上かかり渋滞緩和に失敗している。(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ことがわかる。また (3) と (4) より、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くなることがわかる。そこで (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 の中の "1" は渋滞緩和車、"0" は他の車と定義する。

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	渋滞解消時間 [ステップ数]
2	11	121 ~ 150
2	101	300 以上
3	111	91 ~ 120
3	1011or1101	91 ~ 120
3	10101	300 以上
5	11111	61 ~ 90

表 2 より、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した方が渋滞解消に成功し、渋滞解消時間を短くできるという結果を得た。また、どの渋滞緩和車の割合でも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が分かった。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、解消されていることも示す。

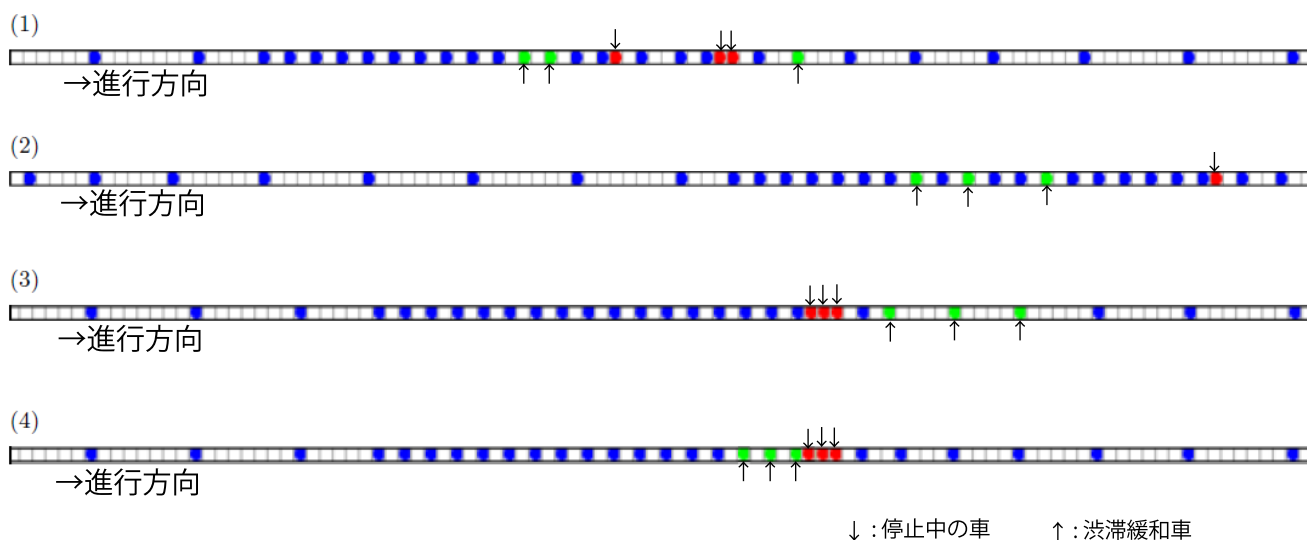


図 7: 渋滞緩和車の配置

## 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することで渋滞解消を可能にする研究がある [4]。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 [4] の結果には関連性があると考えられる。これについては、より詳細に今後調査したい。

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。このためには、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がなければ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することが考えられる。

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、渋滞が長くなる以前に渋滞緩和車を投入することで、渋滞緩和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することは可能である。

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、今後複数車線に対して実験を行う。具体的には [4] と同様の結果を得ることができるのか、また速度を落とした渋滞緩和車を追い抜いていく車の存在がどの程度渋滞解消時間に影響を

与えるかについて実験したい。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していくことが今後の課題である。

## 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、渋滞緩和車が多い方が渋滞解消時間を減らせると想像できるが、実際には渋滞緩和車の配置により渋滞解消の時間が変わってくるの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。

なお、本研究は一部科研費 (22300056) の助成を受けている。

## 参考文献

- [1] 国土交通省: 渋滞状況 渋滞データの概要 . <http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/jutai/index-d.html>[Accessed 2009.1.18]
- [2] 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. 電子情報通信学会 和文論文誌 D 2009. pages 1935-1944.
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic *J. de Physique I France, vol.2, pp.2221-2229, 1992*
- [4] 西成活裕. 「渋滞」の先頭は何をしているのか?, 宝島社, 2009.