

合流車両による交通渋滞緩和のためのセルオートマトンシミュレーション

CELLULAR AUTOMATA SIMULATION FOR IMPROVEMENT OF TRAFFIC JAM DUE TO MERGING VEHICLE

脇田佑希子¹⁾, 清水光輝¹⁾, 玉城龍洋²⁾, 北 栄輔³⁾

Yukiko WAKITA, Hikaru SHIMIZU, Tatsuhiro TAMAKI, and Eisuke KITA

¹⁾ 名古屋大学大学院情報科学研究科 (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町 1)

²⁾ 沖縄工業高等専門学校 (〒 905-2192 沖縄県名護市辺野古 905)

³⁾ 名古屋大学大学院情報科学研究科 (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町 1, E-mail: kita@is.nagoya-u.ac.jp)

When a slow vehicle goes through a toll gate and merges to the main road, the vehicle behind the merging vehicle has to decelerate, which occurs the traffic jam near the merging point of roads. When an one-lane merging road connects to a two-lane main road, some researchers pointed out that the traffic jam occurs first at the far main lane from the merging road. For discussing the reason and avoiding the traffic jam, we will perform the cellular automata simulation of the traffic flow near the merging point. The simulation results show that the multiple vehicle following model and the traffic flow separation are effective for improving the traffic jam.

Key Words: Vehicle Following Model, Cellular Automata, Merging Point, Traffic Flow Separation.

*

1. 緒論

交通渋滞の緩和は、安全で健康的な都市生活のために非常に重要となっている。大都市部では、市内一般道路の交通渋滞を緩和するために、自動車専用道路網を発達させている。しかし、車両数のなお一層の増大によって、自動車専用道路においても大きな渋滞が発生するようになってきている。ところで、料金所を通過して自動車専用道路に車両が合流する場合、合流車両は本線車両に比べて低速で進行しているので、合流車両の後方車両が減速する必要があり、交通渋滞が発生することになる。この渋滞に関して、次のような観察が報告されている。それは、本線車両が 2 車線であるところに 1 車線が合流する場合、車線が合流する側の本線車線ではなく、合流する側から遠い車線で最初に渋滞が発生することである。この原因として、合流された車線から遠い車線に車線変更する車両が多いことをあげている⁽¹⁾。本研究では、この状況をコンピュータシミュレーションし、改善する方法について検討する。シミュレーションでは、合流直後の車線変

更可禁止区間を設ける場合と設けない場合を考え、両方の交通流を比較する。

交通シミュレーションのために、さまざまなシミュレータが開発されている^(2, 3, 4, 5, 6)。このなかには、海外で開発されたものだけでなく、日本で開発されたものもある。交通流シミュレータはマクロモデルとミクロモデルに大別できる。マクロモデルでは、車両の流れを流体现象のように扱って解析するのに対して、ミクロモデルでは、車両 1 台 1 台の挙動をコンピュータ上で表現して、その創発現象として交通を表現する。本研究では、これまでミクロモデルの一つであるセルオートマトン法に基づくシミュレータを開発している^(7, 8)。本研究の解析では、料金所を通過して高速道路本線への流入直後の交通流シミュレーションを扱うので、マクロモデルではなく、車両個々の運動を表現できるミクロモデルを利用する。そして、シミュレータにおける車両の速度変化を表現するために、車両追従モデルの一つである Chandler モデル⁽⁹⁾に基づく方法を利用する。Chandler モデルでは、車両の加速度は前方車両との速度差に比例して変更される。本研究では、車両速度を更新するために、Chandler モデルと、それを前方複数台を考慮するように改良したモデルを用いる。なお、Chandler モデルを方 2 台に対して適用した研



Fig.1 Convoy

究は報告されているので、本研究では前方3台についての追従モデルを示す。多追従モデルを用いることで、渋滞を緩和できる。

本論文の構成は以下のようになっている。第2節で追従モデルと多追従モデルの安定性解析について述べる。第3節ではセルオートマトン法のアルゴリズムを、第4節では数値解析例を示す。第5節はまとめである。

2. 車両追従モデル

車群が、連なって走行している様子を図1に示す。本研究では、前方1台の車両だけに応じて加速度を変化させる追従モデルとして Chandler モデルを用いる。これに加えて、Chandler モデルを前方3台の車両に応じて加速度を変化させるモデルを用いる。前者を単追従モデル、または単に追従モデル、後者を多追従モデルと呼ぶ。

2.1. 追従モデル

追従モデルは次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$\dot{v}_n(t + \tau) = k \cdot \{v_{n-1}(t) - v_n(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $v_n(t)$ は時間 t における車両 n の速度を示す。 τ は遅れ時間、 k は前方車両に対する感受率である。感受率 k は速度差に対する運転者の反応の強さを示す。

上式の解の一つは次式で与えられる。

$$v_n(t) = A_n \cdot e^{j \cdot w \cdot t} \quad (2)$$

ここで、 A_n , j , w は振幅、虚数単位、振動数を示す。

式(2)を式(1)へ代入すると次式を得る。

$$\frac{A_n}{A_{n-1}} = \frac{k}{k + j w e^{j \cdot w \cdot \tau}} \equiv G(w) \quad (3)$$

このモデルの安定性は、任意の w に対して $n \rightarrow \infty$ のときに $A_n \rightarrow 0$ となることである。このためには、 $|G(w)| < 1$ でなければならない。

テイラー展開

$$e^{j \cdot w \cdot \tau} \approx 1 + j \cdot w \cdot \tau \quad (4)$$

を用いると、関数 $|G(w)| < 1$ より以下の結果を得る。

$$|G(w)|^2 = \frac{k^2}{(k - w^2 \tau)^2 + w^2} < 1 \quad (5)$$

$$w^2 \tau^2 + 1 - 2k\tau > 0 \quad (6)$$

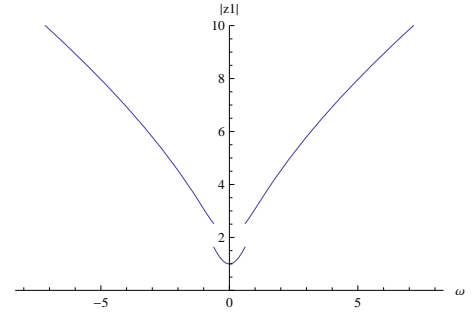
この関数は $w = 0$ で最小となるので、それが安定条件を満たすために次式を満たさなければならない。

$$k < \frac{1}{2\tau} \quad (7)$$

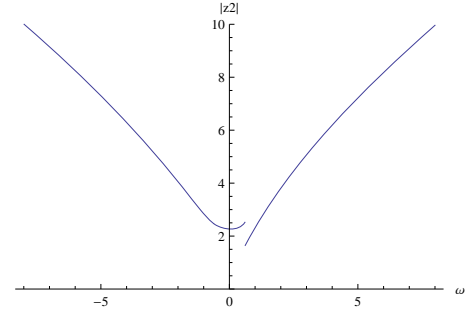
2.2. 多追従モデル

追従モデルを前方車両3台に拡張した多追従モデルは次式で与えられる。

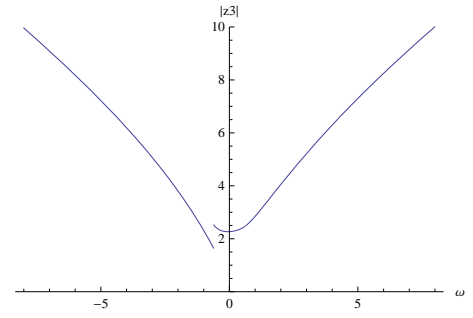
$$\dot{v}_n(t + \tau) = \sum_{i=1}^3 k_i \cdot \{v_{n-i}(t) - v_n(t)\} \quad (8)$$



(a) Function $|z_1|$



(b) Function $|z_2|$



(c) Function $|z_3|$

Fig.2 Three functions for multiple vehicles following model

ここで、 $v_{n-1}(t)$, $v_{n-2}(t)$, $v_{n-3}(t)$ はそれぞれ1台前、2台前、3台前の車両速度を示し、 k_1 , k_2 , k_3 はそれぞれに対する感度を示す。

式(8)に式(2)を代入して整理すると次式を得る。

$$A_n = \frac{k_1 \cdot A_{n-1} + k_2 \cdot A_{n-2} + k_3 \cdot A_{n-3}}{k_1 + k_2 + k_3 + j \cdot w \cdot e^{j \cdot w \cdot \tau}} \quad (9)$$

式(9)の解は次式のように書き直すことができる。

$$A_n = \frac{C_1}{z_1^n} + \frac{C_2}{z_2^n} + \frac{C_3}{z_3^n} \quad (10)$$

ここで、 C_1 , C_2 , C_3 は定数係数であり、 z_1 , z_2 , z_3 は次式の特方程式の解である。

$$1 = \frac{k_1 \cdot z + k_2 \cdot z^2 + k_3 \cdot z^3}{k_1 + k_2 + k_3 + j \cdot w \cdot e^{j \cdot w \cdot \tau}} \quad (11)$$

式(10)より、 $n \rightarrow \infty$ の時、 $A_n \rightarrow 0$ を満たすためには、全ての w において $|z_i| > 1 (i = 1, 2, 3)$ でなければならない。

2.3. パラメータ設計

まず、多追従モデルについて考える。多追従モデルでは、全ての w において $|z_i| > 1 (i = 1, 2, 3)$ となる必要がある。ところで、 k_1 , k_2 , k_3 は各前方車両に対する感受率を表す。感

受率とは、先行車に対する反応の強さを表す正の定数である。従って、1台前方車両への感受率 k_1 は2台前方車両への感受率 k_2 よりも大きいと考えられる。そこで、 k_1, k_2, k_3 に関して、以下の条件をおく。

$$k_1 \geq k_2 \geq k_3 \quad (12)$$

$\tau = 1.0$ とおいて、式 (12) を満たすように k_1, k_2, k_3 を以下の値に設定する。

$$k_1 = 0.15, \quad k_2 = 0.10, \quad k_3 = 0.06 \quad (13)$$

これらのパラメータを式 (11) に代入し、 z_1, z_2, z_3 を w の関数として示すと、図 2 のようになる。縦軸は $|z_i|$ 、横軸は w である。

これよりパラメータが式 (13) の値をとるとき、全ての w で条件を満たしていることが分かる。

続いて、追従モデルについて考える。多追従モデルと同じく遅れ時間を $\tau = 1.0(\text{s})$ とすると、式 (7) より k は次式を満足しなければならない。

$$k < 0.5 \quad (14)$$

そこで、以下に述べる多追従モデルのパラメータ k_1, k_2, k_3 にあわせてパラメータ k を以下のように選択する。

$$k = k_1 + k_2 + k_3 = 0.31 < 0.5 \quad (15)$$

これらの値を用いて $|G(w)|$ を計算すると次式となる。

$$|G(w)|^2 = \frac{k^2}{(k - w^2\tau)^2 + w^2} = \frac{0.5^2}{(0.5 - w^2)^2 + w^2}$$

従って、

$$\lim_{w \rightarrow \pm\infty} |G(w)|^2 = 0, \quad \max |G(w)|^2 = |G(0)|^2 = 1$$

となることから、任意の w について $|G(w)| \leq 1$ を満たしていることがわかる。

3. セルオートマトン・シミュレーション

3.1. 解析領域の CA 表現

解析領域は正方形セルの集合として表現する。1セルのサイズは縦 3(m)、横 3(m) である。1台の車両は2セルで表現するので、サイズは縦 3(m)、横 6(m) となる。

3.2. シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れを箇条書きにして示すと以下のようになる。

1. タイムステップ t を初期化、つまり $t \leftarrow 0$ とする。
2. 車両を配置する。
3. $t \leftarrow t + 1$ とする。
4. 全ての車両と関連する車両との車間距離を測定する。
5. 行動ローカルルールを全ての車両に適用する。
6. 速度ローカルルールを全ての車両に適用する。
7. 移動ローカルルールを全ての車両に適用する。
8. $t < T$ ならば、ステップ 3へ戻る。

シミュレーションでは、1タイムステップは実時間で $\Delta T = 0.1$ 秒としている。また、最大タイムステップは $T = 200$ としている。

行動ローカルルールは車両の移動先を決定する。また、速

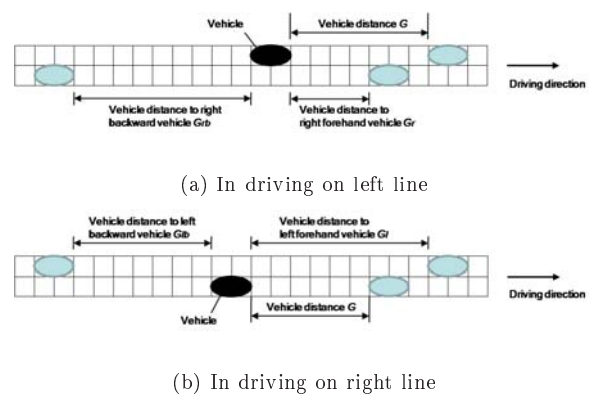


Fig. 3 Definition of Vehicle Distance

度ローカルルールは、車間距離に応じて速度を更新する。移動ローカルルールは確率速度モデルに従って移動する。ローカルルールについては後述する。

3.3. 車間距離の定義

車両が左車線を走行する場合を図 3(a) に、車両が右車線を走行する場合を図 3(b) に示す。黒い車両が自車両を、灰色の車両が他車両を示す。

車両が左車線を走行しているとき(図 3(a))、前方車両との車間距離 G 、右車線の前方車両との車間距離 G_r 、右車線の後方車両との車間距離 G_{rb} を計測する。車両が右車線を走行しているとき(図 3(b)) も同様であり、前方車両との車間距離 G 、左車線の前方車両との車間距離 G_l 、左車線の後方車両との車間距離 G_{lb} を計測する。これらの値は、後述するローカルルールにおいて車両行動の決定に用いる。

本研究では、車両は前走車に対して一定の安全な車間距離を保ちながら走行すると考える。この車間距離を安全車間距離 G_s と名付ける。各車両は前走車との車間距離が G_s より大きければ加速し、小さければ減速する。本研究では、実測データから走行車両が実際に採用する車間距離と車両速度 v から安全車間距離 G_s を次のように定めた⁽⁸⁾。

$$G_s = 0.0029 \cdot v^2 + 0.3049 \cdot v \quad (16)$$

3.4. 行動ローカルルール

行動ローカルルールは、車両がどの近傍セルに移動するかを決定する。なお、行動ローカルルールは移動先を決定するのみで、実際の移動は移動ローカルルールによって判断される。ローカルルールの処理の流れを以下に、フローチャートを図 4 に示す。

1. 自車両の走行車線を確認する。
2. 走行車線が左車線の場合は次のルールへ、走行車線が右車線の場合は 5へ進む。
3. 前方車両との車間距離 G が安全車間距離 G_s より小さく、かつ、 G が右前方車間距離 G_r よりも小さい場合、右車線変更ローカルルールを適用する。そうでなければ、現在の車線にとどまる。
4. 次の車両にルールを適用する。
5. G が G_s より小さく、かつ、 G が左前方車間距離 G_l よ

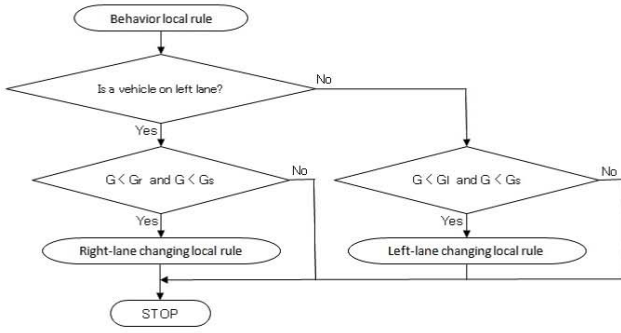


Fig. 4 Behavior Local Rule

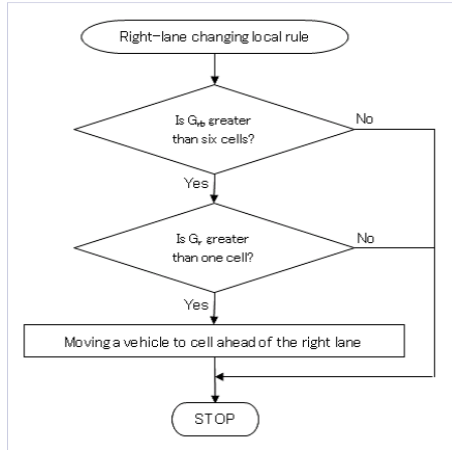


Fig. 5 Lane Change Local Rule

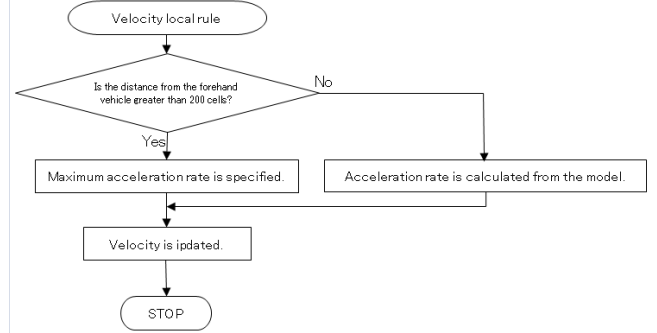


Fig. 6 Velocity Local Rule

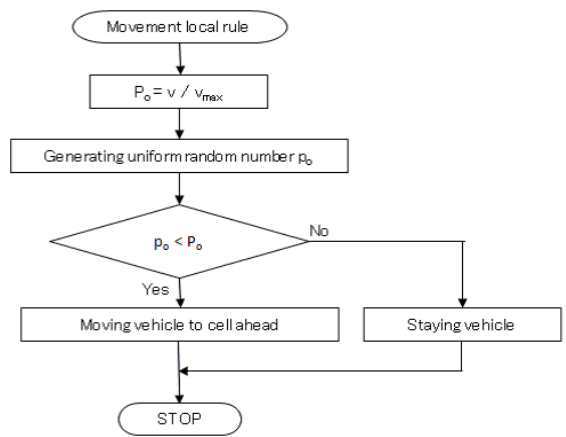


Fig. 7 Movement Local Rule

りも小さい場合、左車線変更ローカルルールを適用する。そうでなければ、現在の車線にとどまる。

6. 次の車両にルールを適用する。

3.5. 車線変更ローカルルール

車線変更には右車線変更と左車線変更の2種類があるが、左右が入れ替わるだけなので、車両が左車線を走行して右に車線変更する右車線変更ローカルルールについてのみ説明する。フローチャートを図5に示す。

G_{rb} が6セル(18m)以上であり、かつ、 G_r が1セル以上であれば、右前セルを移動先セルとし、そうでなければ自車両の前方セルを移動先セルとする。

3.6. 速度ローカルルール

速度ローカルルールは、車間距離に応じて速度を変更する。ローカルルールの処理の流れを以下に、フローチャートを図6に示す。

1. 前方車両との車間距離 G が200セル(600m)以上はなれているときに十分離れたと判断し、加速度 \dot{v}_n を最大加速度 $\dot{v}_n = 2.4(\text{m}/\text{sec}^2)$ に設定し、ステップ3へ移動する。
2. $G < 200$ セルならば、式(1)(追従モデル)または式(8)(多追従モデル)によって加速度 \dot{v}_n を求める。
3. 速度 v_n を次式により更新する。

$$v_n \leftarrow v_n + \dot{v}_n \times \Delta T$$

ここで、 ΔT は1タイムステップあたりの実時間を示す。この場合、 $\Delta T = 0.1$ である。

ここで用いる最大加速度の値は実測データを考慮して定められた値である⁽⁸⁾。

3.7. 移動ローカルルール

本研究のモデルでは、車両の移動をモデル化する車両遷移モデルとして確率速度法⁽⁷⁾を用いる。確率速度法は、1タイムステップで最大1セルしか進まない車両遷移モデルである。アルゴリズムを図7に示す。

1. 車両速度 v と領域内で全ての車両に対して設定された最大速度 v_{max} から閾値 P_0 を求める。

$$P_0 = \frac{v}{v_{max}} \quad (17)$$

2. 0から1の範囲で一様乱数 p_0 を発生する。
3. $p_0 < P_0$ のとき車両は移動先セルに進み、そうでなければそのセルにとどまる。

4. 解析結果

4.1. 解析領域

解析対象として、片側1車線の自動車専用道路に別の方向から道路が合流し、片側2車線道路として流れていく場合を考える(図8)。この状況をモデル化するために、2車線道路の上流側では2本の1車線道路、下流側では1本の2車線道路となる解析領域を考える。解析領域を図9に示す。通常自動車専用道路の合流部などでは、2車線道路に1車線が合流す

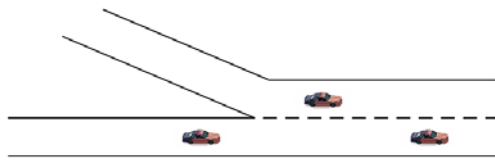


Fig. 8 Illustration of Merging Point

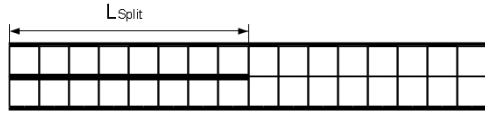


Fig. 9 Object Under Consideration

る．その際、合流車は合流車線に近い側にいったん入り、遠い側に車線変更していく．シミュレーションしようとしている車線変更禁止区間は、この近い車線から遠い車線への車線変更を制御することが目的である．そこで、図9のような解析領域をとる．道路長は1200mであり、車両の最大速度は $v_{max} = 80(\text{km/h})$ とする．両端点の境界条件は周期境界条件であり、左端から流入し、右端から流出する．解析では、初期車両配置と速度は一樣乱数で定める．そして、異なる乱数で20回のシミュレーションを行い、その平均値を表示する．

4.2. 交通量の比較

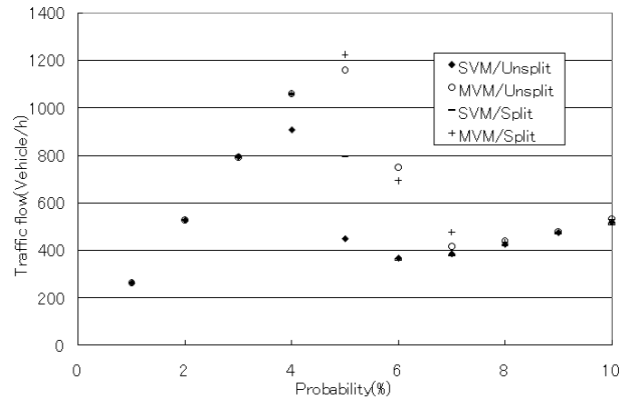
合流点からの車線変更禁止区間の長さ L_{Split} を $L_{Split} = 240\text{m}$ とする場合と、 $L_{Split} = 960\text{m}$ とする場合を比較する．解析結果を図10に示す．横軸に2車線全ての道路長に対して総車両長が占める割合である車両占有率を、縦軸には解析領域の右端で測定した単位時間(1時間)あたりの交通量を示す．車両占有率は1から10%まで、1%ずつ変化して測定する．グラフには、車線変更禁止区間を設けない場合の結果も示す．ラベルにおいて、SVMとMVMは単追従モデルと多追従モデルを示す．また、SplitとUnsplitは車線変更禁止区間を設ける場合と設けない場合を示す．

車線変更禁止区間が短い場合について、図10(a)をみると次のことがわかる．最大交通量は車両占有率が5~6%のときに観測されている．また、追従モデルと多追従モデルを比較すると、多追従モデルのほうが交通量が多く、追従モデルの2倍以上である．また、車線変更区間を配置した場合のほうが、交通量が大きくなっている．その効果は、追従モデルで50%程度、多追従モデルでも10%程度の交通量増加となっている．また、車線変更禁止区間が短い場合と長い場合を比較すると、長い場合のほうが、より高い車両占有割合でも交通量が多く状態を保っている．

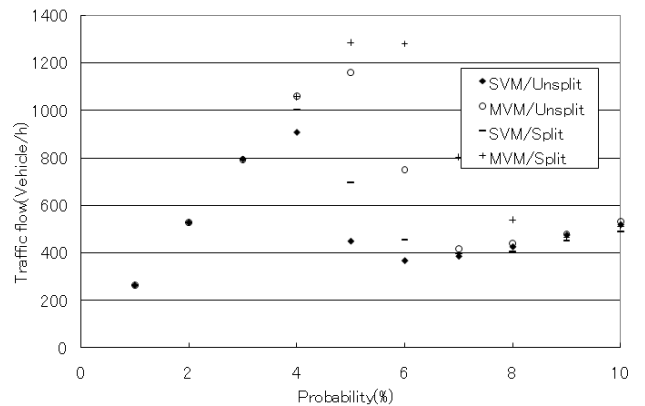
4.3. ブレーキ時間の検討

以上の結果のうち、車線変更禁止区間を配置するほうが交通量が大きくなることは、直感的には違和感を感じる．そこで、その理由について、詳しく検討する．

異なる車両占有率について、車両が減速する時間を測定した結果を図11に示す．横には道路長に対する車両占有率を、



(a) $L_{Split} = 240\text{m}$



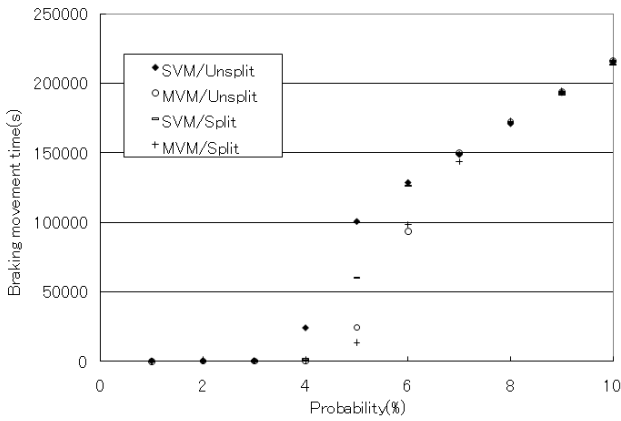
(b) $L_{Split} = 960\text{m}$

Fig. 10 Traffic Flow

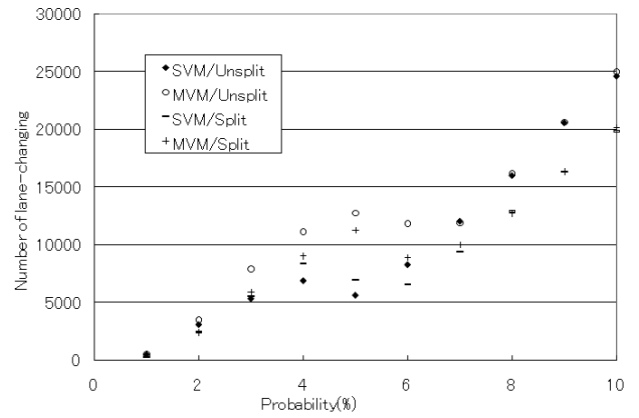
縦軸には総ブレーキ時間を示す．総ブレーキ時間とは、各車両において速度ローカルルールから求めた加速度が負値となるタイムステップの総数を示す．これらより、 L_{Split} によらず、車両占有率5%での総ブレーキ時間を長い方から並べると、SVM/Unsplit, SVM/Split, MVM/Unsplit, MVM/Splitとなっていることがわかる．つまり、車線変更禁止区間を設けない場合よりも設ける場合のほうが、そして、追従モデルよりも多追従モデルのほうが、よりブレーキ時間が短くなっている．ブレーキ時間が短いほうが平均速度が増大することになり、これが交通量の増大に寄与していると予想される．

次に、ブレーキ時間の長短の原因を考察するために、車線変更の頻度を確認すると図12のようになる．横軸には車両占有率を、縦軸には車線変更の回数を示す．車両占有率5%での車線変更の回数が多い順番にならべると、MVM/Unsplit, MVM/Split, SVM/Unsplit, SVM/Splitとなっていることがわかる．

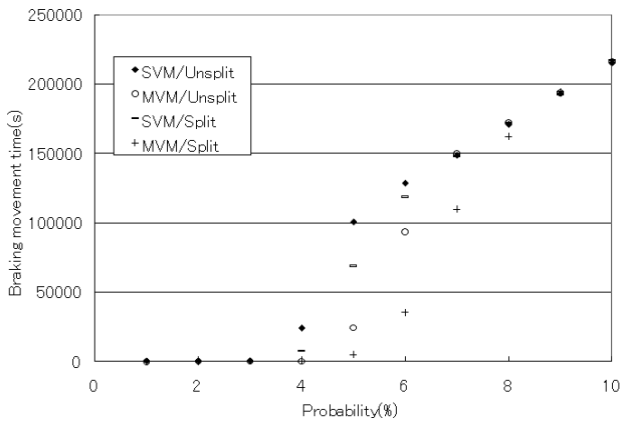
以上のことより以下の推測が成り立つ．まず、交通渋滞は速度低下によって起こっている．そして、総ブレーキ時間の長い方が、また、1回あたりのブレーキ時間の長い方が速度低下は大きい．車線変更禁止区間を設けると車線変更回数が増えるので、割り込みによるブレーキ回数を減少することができて、交通渋滞を緩和している．また、多追従モデルを用



(a) $L_{Split} = 240m$

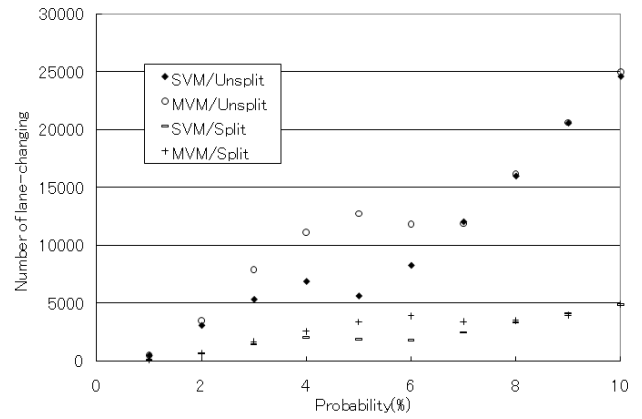


(a) $L_{Split} = 240m$



(b) $L_{Split} = 960m$

Fig. 11 Total breaking Time



(b) $L_{Split} = 960m$

Fig. 12 Number of Lane Changing

いとブレーキ時間が減少して車線変更が多くなることから、車線変更することでブレーキを踏むような状況を回避することができて、交通渋滞を緩和できている。

5. 結論

本研究では、料金所を通過して自動車専用道路に合流するときの合流部付近での交通渋滞緩和のために車線変更禁止区間をもうけることの有効性について検討した。車両の速度制御モデルとして、前方車両1台だけに依存する追従モデルと前方3台に依存する多追従モデルを用いた。

シミュレーションでは、本線が片側1車線道路に1車線の道路が合流し、その後2車線道路となる場合を考えた。シミュレーション結果より、車線変更禁止区間を設けない場合よりも設ける場合のほうが、そして、追従モデルよりも多追従モデルのほうが、交通量が增大することを確認した。

参考文献

- (1) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡邊亨. ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態. 交通工学, pp. 1-11, 2000.
- (2) アイ・トランスポート・ラボ. 街路網交通流シミュレーションモデル AVENUE.

- (3) 国土交通省. 国土交通省国土交通省道路局 ITS.
- (4) フェニックス・リサーチ. 交通流シミュレータ NETSIM 日本語版.
- (5) 豊田中央研究所. NETSTREAM.
- (6) 藤井秀樹, 仲間豊, 吉村忍. 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発 (第2報: 歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較). 日本シミュレーション学会論文集, Vol. 25, No. 4, pp. 46-52, 2006.
- (7) 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄輔. 確率速度モデルとCA法による交通シミュレーション. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 3, pp. 858-869, 2004.
- (8) T. Tamaki, S. Yasue, and E. Kita. City traffic simulation using cellular automata with stochastic velocity model. In *Proceedings of The 2004 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDP2004)*, Vol. 12, pp. 440-441, 2004. (CD-ROM).
- (9) R. Chandler, R. Herman, and W. Montroll. Traffic dynamics; studies in car-following. *Operations Research*, Vol. 6, pp. 165-184, 1958.