

サグによる交通渋滞発生と進展のシミュレーション

SIMULATION OF GENERATION AND DEVELOPMENT OF TRAFFIC JAM IN SAG ZONE

黒田 卓也, 脇田 佑希子, 清水 光輝, 北 栄輔

Takuya KURODA, Yukiko WAKITA, Hikaru SHIMIZU and Eisuke KITA

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)

Sag zone is one of the typical causes of traffic jam. It is pointed out in the previous study that the traffic jam due to sag zone occurs not in the sag zone but at the upstream of the sag zone. In this paper, cellular automata simulation is applied for discussing the behaviour of traffic jam due to sag zone. The simulation results show that the traffic jam occurs both at the upstream of sag zone and in the sag zone and that the effect of a sag zone to the traffic jam becomes stronger according to the increase of car density.

Key Words: Traffic Jam, Sag Zone, Cellular Automata.

1. はじめに

渋滞の発生原因には様々なものがある。交通事故や工事などによって道路の交通容量が減少して渋滞が発生するような場合は明確である。これに対して、明白な理由なく発生する自然渋滞と呼ばれる渋滞がある。自然渋滞は、運転者が気づきにくいだけで、実際には何らかの道路構造上のボトルネック構造が原因となっている。代表的なボトルネック構造として、サグ区間、トンネル、カーブ、合流部などがあげられる。これらのうちから、本研究ではサグ区間について考察することとし、サグ区間によって交通渋滞が発生する状況をセル・オートマトン法によってシミュレーションする。

サグ区間とは道路の勾配が連続して微妙に変化する区間である。変化が微妙なために運転者は勾配の変化に気づきにくく、その結果車両速度が徐々に変化して、最終的に渋滞が発生する。サグ区間による渋滞はサグ区間から 1 km 程離れた地点から発生し、その上流の渋滞は Stop-and-Go(SG) 波として現れると指摘されている⁽¹⁾。SG 波とは、高密度で車両がほとんど停止しているような渋滞クラスタ部と、低密度で車両がほぼ自由に走行している部分とが交互に現れる波である。SG 波は上流、つまり車両の走行方向とは逆方向に伝播する。サグ区間の交通渋滞を数値シミュレーションにより取り扱うには、個々の車両の微妙な速度変化を表現する必要がある。そこで、本論文の解析ではセル・オートマトン法を用いる。

ところで、交通流のシミュレーションに用いられるモデルは、マクロモデルとミクロモデルに大別できる^(2, 3)。マクロモデルは交通流を流体现象として連続の式により扱うのに

対し、ミクロモデルは車両一台一台の挙動を計算し、それらの相互作用の結果として交通流を表現する。

交通シミュレーションではかつてはマクロモデルが主に用いられており、1950 年代に Lighthill-Whitham によって 1 次元流体モデルが提案されている⁽⁴⁾。日本でも、武者らによって Burgers 方程式を適用した研究が行われている⁽⁵⁾。

ミクロモデルには、セル・オートマトンモデル、車両追従モデルなどがある⁽³⁾。交通に対するセル・オートマトンモデルの研究は、ルール 184 と名付けられたローカル・ルールに基づくモデルが最初と考えられる⁽⁶⁾。このルールでは車間距離が開いていても加速しないなど現実と異なる点があるので、このモデルに速度変化を加えたモデルが提案されている⁽⁷⁾。一方、車両追従モデルでは、自車両と前方車両との距離の関数によって車両速度を変化させる。このなかで、関数として最適速度関数と名付けられた関数を用いるのが、最適速度モデルである⁽³⁾。

本研究で用いるモデルはセル・オートマトンモデルに基づいている。セル・オートマトンモデルでは、これまで速度変化を表現するためにタイムステップごとの車両移動距離(移動セル個数)を増減させるので、車両行動を制御するルールを定義するときに、かなり広い範囲について車両の存在を確認し、それらの車両と自車両の関係としてルールを定義する必要があった。そこで、本研究では車両速度を一様乱数によって表現する確率速度モデルを用いる⁽⁸⁾。このモデルでは、車両は各ステップあたり最大 1 セル移動するので車両行動を制御するルールを定義するときに参照するセルの範囲がかなり小さくなり、その結果ルールを簡略化できる。

解析対象として登り勾配をもつサグ区間を有する片側 1 車

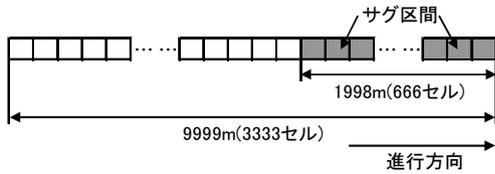


Fig. 1 サグ区間を含む1車線直線道路

線の自動車専用道路を考える．道路を多数の正方形セルの並びとして定義し，解析領域内に設置されたサグ区間を車両が通過するとき車両は負の加速度を受けるようにモデル化する．解析領域内にサグ区間を含む場合と含まない場合において観測地点における車両平均速度を比較し，サグ区間の有無によって渋滞形成の様子がどのように異なるのか，時間変化によって渋滞がどのように伝播していくのかを考察する．更に，サグ区間を含む場合において，典型的な状況での車両の挙動を追跡し，車両の地点によって車頭距離と速度がどのように変化するのかを調べ，サグ区間の効果を考察する．ここで，車頭距離とは，自車両と前方車両のそれぞれの先端（車頭）の距離を示す．

2. シミュレーション・モデル

2.1. 解析領域

本研究では，図1のような片側1車線の自動車専用直線道路を扱う．道路は多数のセルの並びとして表現され，並べたセルの数で道路の長さを表現する．1セルの大きさは3m×3mとし，対象領域を3333セル(9999m)，サグ区間を左端から2668番目のセル(8001m)から右端セル(9999m)までとする．車両の大きさの違いは無視し，道路上の連続する2セルを用いて車両を表現する．境界条件は開放境界条件とし，車両は左端から流入して右端から流出する．

サグ区間の減速度は，実際の自動車専用道路におけるサグ区間の勾配変化から導出する．財団法人省エネルギーセンターのデータ⁽⁹⁾によれば，東名高速道路におけるサグ区間として，東京方面では中井，秦野，伊勢原方面を，名古屋方面では秦野を挙げている．これらの角度変化の単純平均を取ると角度変化は約3.6%となっている．そこで，この値を元に負の一定加速度 α_{sag} を計算すると式(1)となる．

$$\alpha_{sag} = 9.81 \times \sin(\tan^{-1}(3.6/100)) \simeq 0.35 \quad (1)$$

この値を考慮して，本研究では $\alpha_{sag} = 0.3 \text{ (m/s}^2\text{)}$ を採用することとした．

2.2. シミュレーション・プロセス

本研究では，車両は，車間距離を安全車間距離に保とうとすると仮定する．各車両は，その前方車両との車間距離と安全車間距離に応じて速度を変更し，確率速度モデルのアルゴリズムに従って移動するかどうかを決定する．

車両の挙動を制御するために，速度を制御する速度ローカル・ルールと車両の移動を制御する移動ローカル・ルールを用いる．これらを用いて，シミュレーションは以下のように行われる．

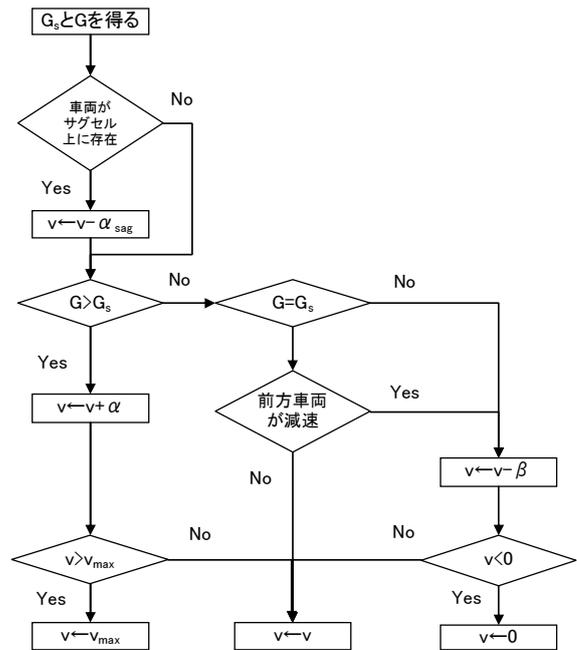


Fig. 2 速度ローカル・ルール

1. タイムステップ T を初期化する．($T \leftarrow 0$)
2. タイムステップを1だけすすめる．($T \leftarrow T + 1$)
3. 前方車両との車間距離 G を求める．
4. すべての車両に以下のルールを適用する．
 - (a) 自車両の速度 v から安全車間距離 G_s を求める．
 - (b) 速度ローカル・ルールを適用し，速度変更を行う．
 - (c) 移動ローカル・ルールを適用し，前方セルへの移動を決定する．
5. ステップ2へ戻る．

2.3. ローカル・ルール

以下では，安全車間距離，速度ローカル・ルール，移動ローカル・ルールについて述べる．

安全車間距離

安全車間距離を導出する式は，文献⁽¹⁰⁾で実測値を元に導出された次式を用いる．

$$G_s = -0.0028v^2 + 1.1122v - 24.498 \quad (m) \quad (2)$$

速度ローカル・ルール

速度ローカル・ルールのフローチャートを図2に示す．

まず，車両の速度 v から安全車間距離 G_s を求め，前方車両との車間距離 G を測定する．サグ区間による車両速度の低下をモデル化するために，車両がサグセル上にある場合，車両速度から α_{sag} だけ減速する．続いて，安全車間距離 G_s と車間距離 G の大小を比較し，速度の増減を決定する． $G > G_s$ の場合は加速度 α で加速し， $G < G_s$ の場合は加速度 β で減速する． $G = G_s$ の場合は等速を保つが，前方車両が減速している場合は減速する．

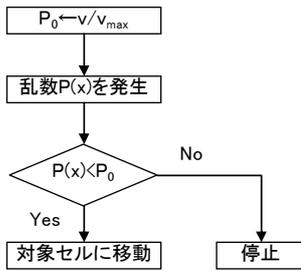


Fig. 3 移動ローカル・ルール

加速後の速度 v が最高速度 v_{max} より大きくなった場合は、 $v \leftarrow v_{max}$ として最高速度を超えないように修正する。同様に、 v が 0 より小さくなった場合は、 $v \leftarrow 0$ とし負の値にならないように修正する。加速度は実測データに基づく値を用いる⁽¹¹⁾。数値については 3.1 節で述べる。

移動ローカル・ルール

移動ローカル・ルールは、確率速度モデル⁽⁸⁾に従って車両が前方に進むかどうかを決定する。確率速度モデルでは、車両の移動は以下のようにして実現される。フローチャートを図 3 に示す。

1. 閾値 $P_0 = v/v_{max}$ を求める。ここで、 v と v_{max} はそれぞれ注目車両の速度と、解析領域内の全車両に設定された最大速度を示す。
2. 0~1 の範囲で、一様実数乱数 P を発生させる。
3. $P < P_0$ であるとき、そのタイムステップで車両を 1 セル進ませる。

上記のアルゴリズムでは $P_0=1$ のとき車両は毎タイムステップ 1 セル進むことになり、これが解析領域内に存在する車両にとっての最大速度 v_{max} となる。

3. 解析例

3.1. パラメータ設定

シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。シミュレーション回数は 40,000 タイムステップとする。車両は領域の左端から流入し、右端から流出する。進入する車両の発生確率は 10, 30, 50 % の 3 つでシミュレーションを行う。最高速度は実際の走行状況を考慮し 80 km/h とし、車両流入時の速度は 60 km/h とする。加速度の値は、文献⁽¹¹⁾で示されている、実測データに基づく設定を用いる。サグ区間の減速度は、2.1 節で導出した値を用いる。

3.2. 地点平均速度の変化

サグ区間の有無によって車両速度がどのように変化するかを調べるため解析対象領域の 100 m 毎に観測地点を設け、その地点を通過する全車両の平均速度の変化を測定する。車両発生確率 10, 30, 50 % における地点平均速度を、それぞれ図 4, 図 5, 図 6 に示す。図の横軸は車両の位置座標、縦軸は車両の平均速度である。

サグ区間が存在する場合、車両発生確率によらず、サグ区間 (8001 m ~ 9999 m) よりもある程度前の地点 (7700 m ~

Table 1 解析パラメータ

セルサイズ	3 (m) × 3 (m)
最大タイムステップ	40000
車両配置	車両流入型
境界条件	開放境界条件
車両発生確率	10, 30, 50 %
最高速度	80 (km/h)
車両流入時速度	60 (km/h)
加速度	$0.6 < \alpha < 2.4$ (m/s ²)
減速度	$1.2 < \beta < 3.0$ (m/s ²)
サグ区間減速度	0.3 (m/s ²)

8000 m) から平均速度が低下し始め、サグ区間内ではサグ区間が存在しない場合の 7 割程度の平均速度となっている。このことより、サグ区間において確かに車両速度が低下するこ

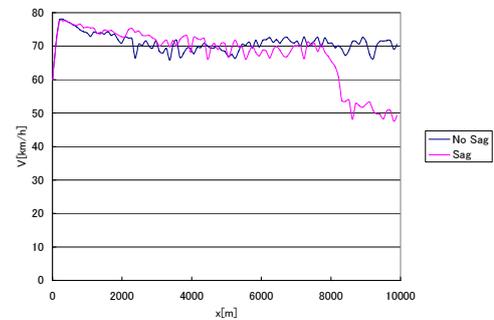


Fig. 4 車両発生確率 10% における地点平均速度

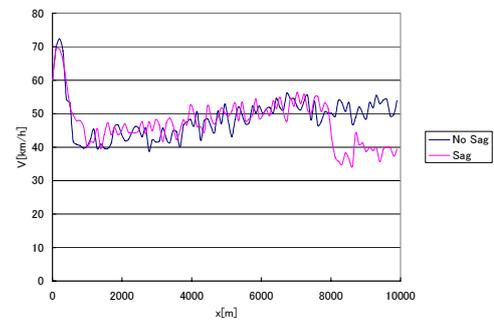


Fig. 5 車両発生確率 30% における地点平均速度

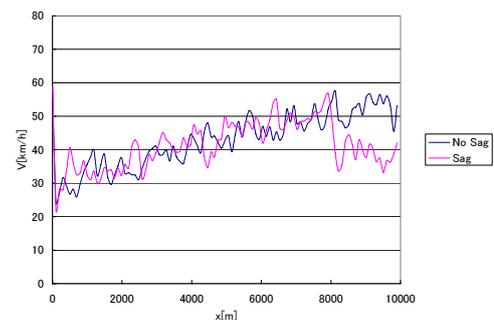


Fig. 6 車両発生確率 50% における地点平均速度

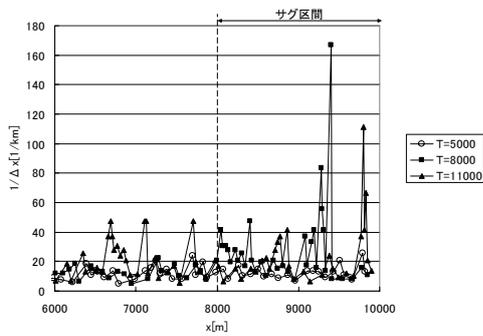


Fig. 7 車両発生確率 10%における渋滞形成の変化

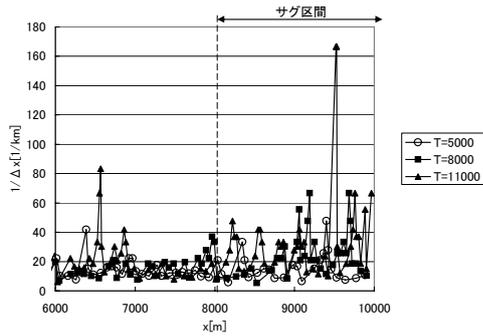


Fig. 8 車両発生確率 30%における渋滞形成の変化

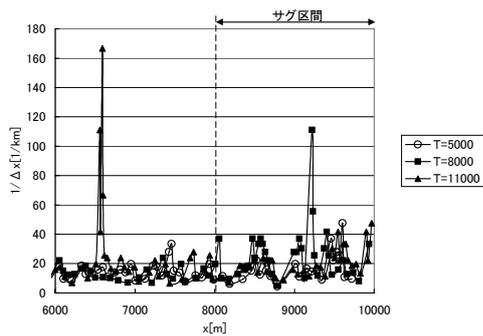


Fig. 9 車両発生確率 50%における渋滞形成の変化

とが分かる．また，車両発生確率を高くすると流入後に平均速度が低下する減少が見られるが，これは車両発生確率を高くしたことによって車両流入地点付近で一時的に車両密度が高くなり，車間距離が安全車間距離より小さい車両が増加し，平均車両速度が低下していることによると考えられる．

3.3. 5分毎の渋滞形成の変化

実際の自動車専用道路においては，渋滞はボトルネックのすぐ近くからでなく，ある程度上流から発生すると言われている．また，文献⁽¹⁾は，サグ区間上流の渋滞は，Stop-and-Go(SG)波として現れると述べている．SG波はボトルネックから1 km程離れた地点から発生し，走行方向とは逆方向に伝播するとされている．しかし，ボトルネックの形状や車両台数，速度，加速度といった走行状況によって，SG波の発生地点，すなわち渋滞の発生位置は異なるのではないかと考えられる．

そこで，サグ区間を含む直線道路において，ある程度小さ

い時間経過において渋滞形成の様子がどのように変化していくかを調べるため，5分毎に解析領域に存在する車両の位置座標と車両密度がどう変化するかを調査する．観測するタイムステップは $T = 5000$ ， $T = 8000$ ， $T = 11000$ の時点とする．車両発生確率 10, 30, 50 %における渋滞形成の変化を図7，図8，図9に示す．図には，サグ区間(8001~9999 m)とその手前区間(6000~8000 m)を拡大して表示している．横軸は車両位置 x ，縦軸には車頭距離の逆数 $1/\Delta x$ である．車頭距離の逆数 $1/\Delta x$ が大きな値を示しているところが渋滞しているところである．

これらより，車両発生確率によらず，サグ区間よりもある程度前の地点からサグ区間内にかけて，車両密度が大きくなっている箇所が増えていることがわかる．これは，渋滞はサグ区間内だけでなく，サグ区間の手前から発生することを意味している．

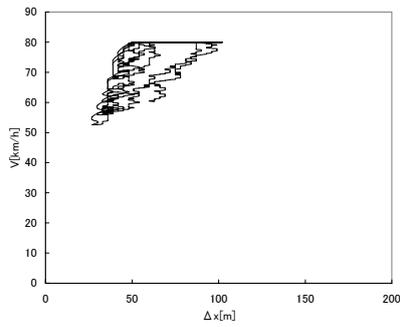
車両発生確率が30%以上になると，6000 mから8000 mの区間において，タイムステップが進むにつれて車両密度が大きくなっている箇所が増えている．車両発生確率が高い，つまり車両台数が多い場合は，タイムステップが進むにつれてサグ区間上流において渋滞が形成される場所が増える．よって，車両台数が多くなると，サグ区間のある程度手前の地点え発生した渋滞がサグ区間上流に進展していることが分かる．これは現実に観測される場合に対応している．また，本シミュレーションの結果ではサグ区間上流部における渋滞発生位置は1 km前とはならなかったが，これはボトルネックの形状と走行状況の違いによると考えられる．

3.4. 注目車両の車頭距離と速度の挙動

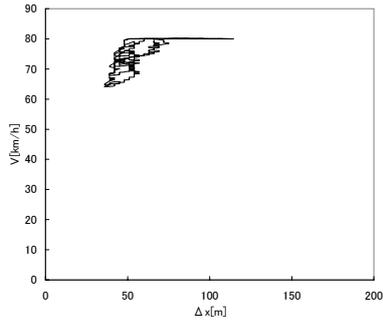
サグ区間を含む場合において，解析領域内の地点において車両の挙動がどのように変化するかを調べるため，注目車両の車頭距離 Δx と速度 v の挙動を調査する．ここで，注目車両とは，解析領域全体に車両が行き渡った後の典型的な状況下において発生し解析領域を完全に通過する車両とし，実際のシミュレーションにおいてはシミュレーション開始後300番目に発生した車両とする．また，車頭距離とは，自車両と前方車両のそれぞれの先端(車頭)の距離を示す．

車両発生確率 10,30,50 %における注目車両の車頭距離と速度の挙動を図10，図11，図12に示す．それぞれのグラフにおいて，0~5000 m地点，5001~7500 m地点，7501~8000 m地点，8001~10000 m地点のグラフを別図に記載している．図の横軸は注目車両の車頭距離，縦軸は注目車両の速度である．

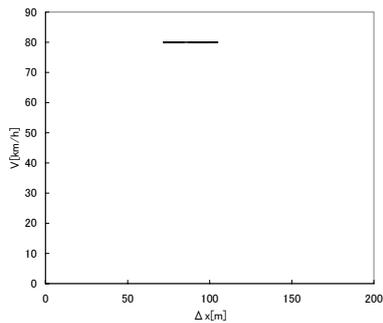
車両発生確率によらず，注目車両の車頭距離と速度の挙動はループを描くことが分かる．解析領域上流(0~5000 m)においては大きなループを描き，中流以降(5001~7500 m)においてはループは小さくなる．サグ区間内(8001~10000 m)においては，速度の低下したループを描く．図においては，縦方向につぶれたループとなっている．すなわち，車両は低速で車間距離が詰まった状態と，高速で車間距離が開いた状態の2つの状態を往復する．解析領域上流においては状態の揺らぎが大きく，中流以降は揺らぎは小さくなる．サグ区間



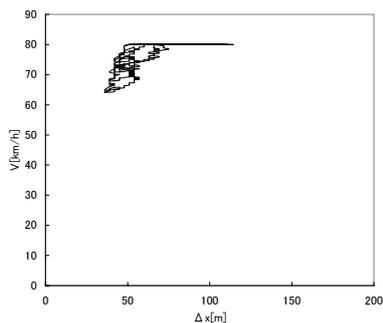
(a) 0 ~ 5000 m 地点



(b) 5001 ~ 7500 m 地点



(c) 7501 ~ 8000 m 地点

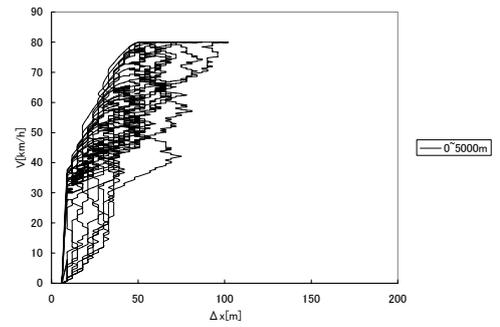


(d) 8001 ~ 10000 m 地点

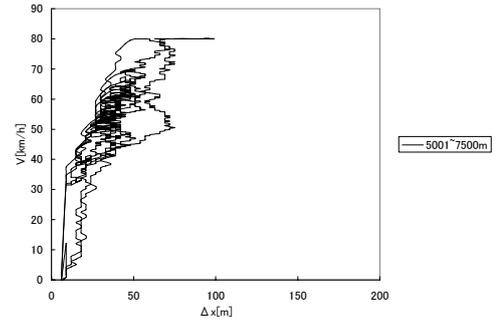
Fig. 10 車両発生確率 10%における注目車両の車頭距離と速度の挙動

内においては減速するため車両速度が低下した上で2つの状態を往復する。

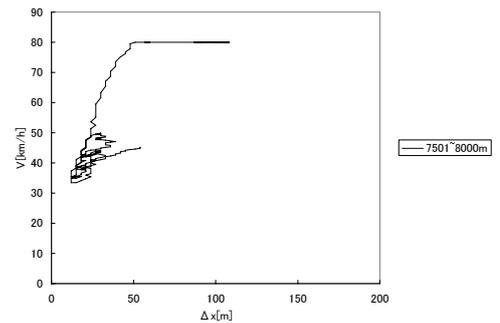
文献⁽¹⁾のシミュレーション結果と比較すると、解析区間上流と中流以降においては定性的に似通った結果となっているが、サグ区間内の挙動が異なっている。これは、本シミュレーションがセル・オートマトン法を用い、サグ区間内にお



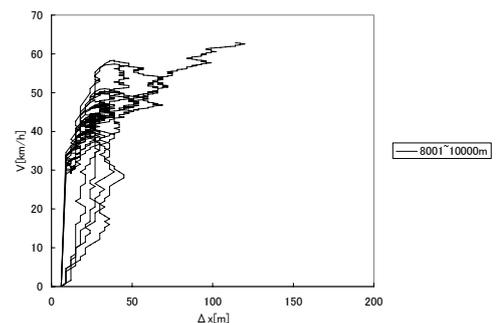
(a) 0 ~ 5000 m 地点



(b) 5001 ~ 7500 m 地点



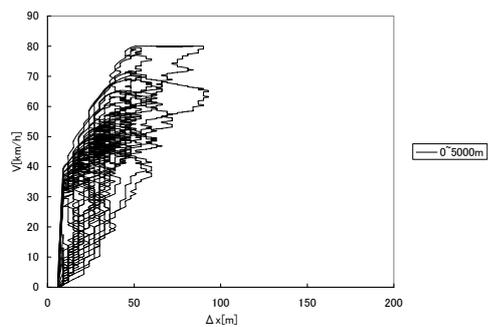
(c) 7501 ~ 8000 m 地点



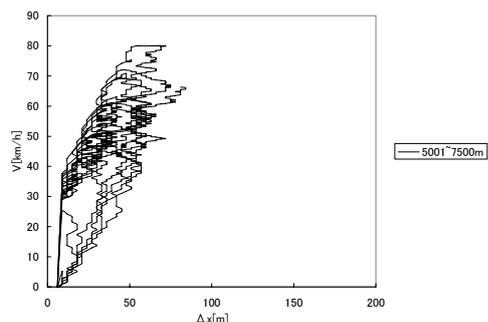
(d) 8001 ~ 10000 m 地点

Fig. 11 車両発生確率 30%における注目車両の車頭距離と速度の挙動

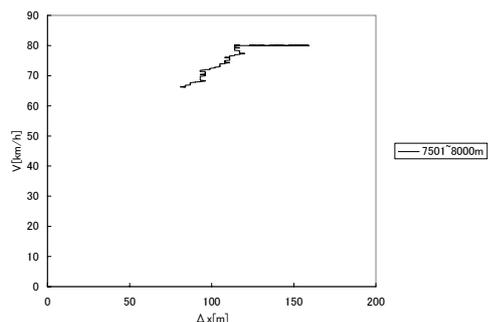
ける減速度を定め、車両の加速度を変化させているのに対し、文献⁽¹⁾のシミュレーションが最適速度モデル⁽³⁾を用い、ボトルネック区間内において最適速度が低下すると定め、車両の追従挙動を記述する最適速度関数を変更していることによる違いと考えられる。



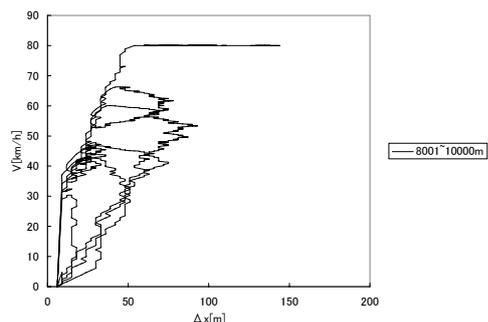
(a) 0 ~ 5000 m 地点



(b) 5001 ~ 7500 m 地点



(c) 7501 ~ 8000 m 地点



(d) 8001 ~ 10000 m 地点

Fig. 12 車両発生確率 50%における注目車両の車頭距離と速度の挙動

4. 結論

本研究では、ボトルネックの典型例であるサグ区間を対象としてセル・オートマトンモデルによる直線道路の交通流シミュレーションを行い、サグ区間の効果と渋滞形成の様子やその伝播、また車両の挙動の変化について考察を行った。

サグ区間が存在する場合、車両発生確率によらず、サグ区

間よりもある程度前の地点から平均速度が低下し始め、そこからサグ区間に渋滞が形成される。また、注目車両の車頭距離と速度の挙動はループを描き、解析領域上流においては大きなループを描くが、中流以降はループは小さくなる。サグ区間内においては減速するため車両速度が低下したループを描く。

車両発生確率を高くすると、解析領域全体においても渋滞が形成される場所が時間経過によって増え、サグ区間のある程度前の地点からサグ区間内において発生した渋滞は、時間が経つに従ってサグ区間上流に影響し、サグ区間上流部においても次第に渋滞が発生する。加えて、注目車両の車頭距離と速度の挙動から、車両発生確率を高くすると、サグ区間の直前区間において車両は安定走行しなくなることがわかる。すなわち、渋滞の形成とその伝播には車両台数が大きな要因となっていると考えられる。

参考文献

- (1) 只木進一, 山本祥平, 日永田泰啓. ボトルネックによる渋滞形成. 第 12 回交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集, pp. 53-56, 2006.
- (2) 森下信. セルオートマトン 複雑系の具象化. 養賢堂, 第 1 版, 2003.
- (3) 杉山雄規. 交通流の物理. ながれ, Vol. 22, pp. 95-108, 2003.
- (4) M. J. Lighthill and G. B. Whitham. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society London*, Vol. A299, p. 317, 1955.
- (5) T. Musha and H. Higuchi. Traffic current fluctuation and the Burgers equation. *Japan Journal of Applied Physics*, Vol. 17, p. 811, 1978.
- (6) S. Wolfram. *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, 1 edition, 1994.
- (7) K. Nagel and M. Schreckenberg. Cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I France*, Vol. 2, pp. 2221-2229, 1992.
- (8) 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.
- (9) 省エネルギーセンター. 平成 5 年度燃料消費効率化改善に関する調査報告書 (自動車の省エネルギー走行技術), 1993.
- (10) 脇田佑希子. 車両特性の違いが交通流に与える影響. 名古屋大学情報文化学部 卒業論文, 2005.
- (11) 安江里佳. セル・オートマトンによる都市交通シミュレーション. 名古屋大学大学院人間情報学研究科 修士論文, 2003.