

セル・オートマトンによる自動車専用道路のボトルネック現象の解析

玉城 龍洋[†] 安江 里佳[†] 北 英輔^{††}

確率速度モデルとセル・オートマトン法を用いた自動車専用道路の交通シミュレーションを用いて、自動車専用道路における代表的な交通障害である工事区間やサグ区間の交通流に対する影響について検討する。工事区間を含む道路での解析を通じて、これまでの理論では道路全体の交通量は工事区間の走行可能車線数だけに依存すると考えられていたのに対して、実際には工事区間の長さも影響を及ぼすことを示す。次に、サグ区間を含む道路の解析において、その交通流の挙動は工事区間を含む道路の場合と類似と考えられていたのに対して、実際には相違点があることを示す。

Estimation of Bottle-neck in Traffic Flow on a Freeway Using Cellular Automata

TATSUHIRO TAMAKI [†], SATOKA YASUE [†] and EISUKE KITA ^{††}

In this paper, the simulation scheme using cellular automata and the stochastic velocity model is applied to the effects of the road construction and the sag zone in a freeway to the traffic flow. Although it is predicted that the traffic flow of the freeway with the construction zone depends on the the number of the available lanes in the construction zone alone, the simulation results shows that the traffic flow in the freeway with the construction zone depend on both the number of the available lanes and the length of the construction zone. Next, the simulation results in the road with sag zone shows that the sag zone is different from the construction zone.

1. はじめに

著者らはこれまでに確率速度モデルと名付けた速度表現方法を用いるセル・オートマトン法による交通シミュレーションについて提案してきた。確率速度モデルでは、確率変数を用いて車両速度を表現する。そして、各タイムステップごとの車両移動距離の最大値を1セルに限定することにより、車両行動に関するローカル・ルールを単純化することを目的としている。

ところで、先の研究では提案したシミュレーションモデルを自動車専用道路の解析に適用し、シミュレーション結果を東名高速道路における実測値のデータと比較した。続いて、最高速度、加速度、車間距離、車両の初期配置などが交通流に与える影響について評価した。これに対して、本研究では自動車専用道路に交通を妨げるような障害物(ボトルネック)がある場合の

交通流の挙動についてシミュレーションを行う。本研究では、様々な場合を考えることができるボトルネックのうち、もっとも基本的で単純でありながら、自動車専用道路でしばしば見受けられる道路工事による車線規制の場合と、サグ区間の場合を検討する。

2. 提案するシミュレーション手法

2.1 解析領域

解析領域として片側1車線、2車線または3車線の自動車専用道路を考える。道路は多数の正方形セルの並びとして表現されており、解析例では大きさ $3m \times 3m$ のセルを3000セル一列に並べて一本の道路を表現する。シミュレーションでは、連続する2セルによって車両1台を表現しており、車両の大きさの違いは無視している。また、シミュレーションにおいて1タイムステップは実時間で0.1sと考えている。

2.2 確率速度モデル

確率速度モデルでは、最大速度 v_{max} で走行可能な車両が速度 $\tilde{v} (< v_{max})$ で走行するとき、車両の移動を以下のようにして実現する。

(1) しきい値 P_0 を次式より求める。

[†] 名古屋大学人間情報学研究科
Nagoya University, Graduate School of Human Informatics

^{††} 名古屋大学情報科学研究科
Nagoya University, Graduate School of Information Sciences

$$P_0 = \frac{\bar{v}}{v_{\max}} \quad (1)$$

- (2) $0 \sim 1$ の範囲で一様乱数 $P(x)$ を発生する。
- (3) $P(x) < P_0$ のときに、1セル進む。

2.3 基本行動ローカル・ルール

基本行動ローカル・ルールは2つある。直進ローカル・ルールと速度ローカル・ルールである。これらのローカル・ルールでは、車間距離に応じて速度を変更する。そこで、最初に、本研究で用いる車間距離の考え方について述べる。

2.3.1 安全車間距離

車両は前方車両との車間距離 G を安全車間距離 G_s に保とうとすると仮定する。まず、車両速度 v の車両がとるべき車間距離 G_s^0 は、自動車検査業務実施要領で次式と定められている。

$$G_s^0 = 0.15 \times v + 0.0097 \times v^2 \quad (2)$$

実際には G_s の最小値 G_s^{\min} は車両特性等に依存し、車両停車時 $v = 0$ においては $G_s = 0$ となる。まとめると、安全車間距離 G_s は次式で与えられる。

$$G_s = \begin{cases} \max(G_s^0, G_s^{\min}) & (v > 0) \\ 0 & (v = 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで $\max(G_s^0, G_s^{\min})$ は、両者の大きい方を与える。

2.3.2 直進ローカル・ルール

- (1) 自車両の直前セルにおける車両の存在を確かめる。
- (2) 車両が存在しないならば $P_0 \leftarrow v/v_{\max}$ とする。車両が存在するならば $P_0 \leftarrow 0$ とする。
- (3) $0 \sim 1$ の範囲で一様乱数 $P(x)$ を発生する。
- (4) $P(x) < P_0$ ならば1セル進む。 $P(x) > P_0$ ならばその場に止まる。

2.3.3 速度ローカル・ルール

- (1) $G_s = G$ の場合、現在速度 v を維持する。
- (2) $G_s > G$ の場合、 $v \leftarrow v - \alpha$ とする。(減速)
- (3) $G_s < G$ の場合、 $v \leftarrow v + \alpha$ とする。(加速)
- (4) $v > v_{\max}$ の場合、 $v \leftarrow v_{\max}$ とする。

ここで、 v_{\max}, α は設定された最大速度と加速度を示す。シミュレーションにおいて、 α は国土交通省の評価データ¹⁾を参考にして設定している。

2.4 行動ローカル・ルール

本研究では、解析対象として片側1車線、2車線または3車線の自動車専用道路を考える。そのため車線数毎に車両の行動ローカル・ルールを定義する。

2.4.1 1車線行動ローカル・ルール

- (1) 自車両と前方車両の車間距離 G を評価する。
- (2) v から G_s を式(3)により計算する。

- (3) 速度ローカル・ルールに進み、速度を変更する。
- (4) 確率速度モデル(2.2節)に従って前方へ進む。

2.4.2 2車線行動ローカル・ルール

- (1) v から G_s を式(3)により計算する。
- (2) 走行車線の前方車両との車間距離 G_0 と隣車線の前方車両との車間距離 G_1 を評価する。
- (3) $G_0 > G_1$ ならば、 $G \leftarrow G_0$ とする。 $G_0 < G_1$ ならば車線変更を行い、 $G \leftarrow G_1$ とする。
- (4) 速度ローカル・ルールに進み、速度を変更する。
- (5) 確率速度モデル(2.2節)に従って前方へ進む。

2.4.3 3車線行動ローカル・ルール

- (1) v から G_s を式(3)により計算する。
- (2) 車線を路肩側から a, b, c とする。そして、各車線における自車両と前方車両との車間距離 G_a, G_b, G_c として評価する。
- (3) 自車両がレーン b を走行している時 $G_0 \leftarrow G_b$ とし、 G_a, G_b の大きい方を G_1 とする。
- (4) 自車両がレーン b 以外を走行している時 $G_1 \leftarrow G_b$ とし、走行レーンをレーン 0 、走行レーンの車間距離を G_0 とする。
- (5) 2車線道路の行動ローカルルールに進む。

2.5 ボトルネックセルの定義

工事区間の場合

工事区間を構成しているボトルネックセルには車両が進入できないことを表現するために、プログラム上ではボトルネックセルに車両が停止しているようなデータを定義することで処理する。

サグ区間の場合

本研究では、緩やかな坂道による車両速度の低下をモデル化するために、サグ区間を構成しているボトルネックセルを通過する車両に対して、負の一定加速度 α_s を与えることにする。 α_s は²⁾をもとに設定している。

具体的なアルゴリズムにおいては以下ようになる。

- (1) $v \leftarrow v - \alpha_s$ ($\alpha_s = 0.3m/s^2$)
- (2) 通常道路における速度ローカル・ルールに進む。

3. 解析例と議論

3.1 短い工事区間を含む2車線直線道路

解析対象として、路肩車線において左端から1500番目のセルから2セル分(6m)だけ工事区間を設定した片側2車線の自動車専用道路を考える。車両流は左側から流入して、右側へ流出するので、道路の左端と右端には周期境界条件を取る。解析に用いたパラメータ値は最大速度 $80Km/h$ 、加速度 $0.6m/s^2$ 、最小安全車間距離 $0m$ とし、車両は最初車両密度に比例して

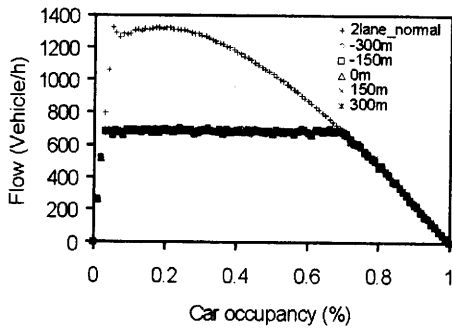


図1 車両密度と交通量の関係図(短い工事区間の場合)
Fig.1 Traffic flow and car occupancy (Short construction zone)

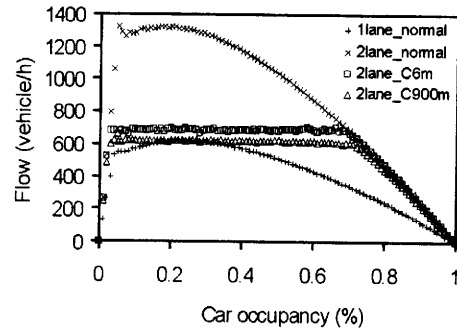


図2 車両密度と交通量の関係図(長い工事区間の場合)
Fig.2 Traffic flow and car occupancy (Long construction zone)

ランダム配置する。左端から 1500 番目のセルを観測地点 0m とし、道路に沿って 1500 番目のセルの左右に 50 セル (150m) 毎で車両観測地点を計 5 地点設定する。

十分な時間が経過した後の交通量を図 1 に示す。図 1 には、工事区間のない道路における解析も示す。横軸にはセルのうち車両によって占められたセルの割合である車両の道路占有率 (%) を、縦軸には各観測地点における 1 時間に通過する車両台数である交通量 (台数/h) を取る。なお、工事区間を含まない 2 車線道路での最大交通量は 1321 台/h であった。従って、工事区間を含む場合の 2 車線道路での最大交通量 683 台/h は、工事区間を含まない場合のほぼ半分となっていることがわかる。ボトルネックがある道路では、最大交通量はボトルネックを通過する車両台数で決定されることが知られており、この現象がシミュレーションによってよく再現されていることがわかる。

3.2 2車線直線道路における工事区間長の影響

工事区間の長さが交通流に与える影響を調べるために、路肩車線において左端から 1500 番目のセルから 3 セル (6m) または 300 セル (900m) の工事区間を設定した片側 2 車線の自動車専用道路を考える。解析に用いたパラメータは先の例題と同じとし、先の例題と同じ観測地点をとる。

図 2 に車両密度と交通量の関係図を示す。プロットは 5 つの観測地点で得られた交通量の平均である。図のラベルにおいて、1lane_normal は工事区間を含まない 1 車線道路、2lane_normal は工事区間を含まない 2 車線道路、2lane_C6m は短い工事区間 (6m) を含む 2 車線道路、2lane_C900m は長い工事区間 (900m) を含む 2 車線道路を示す。長い工事区間の場合の結果

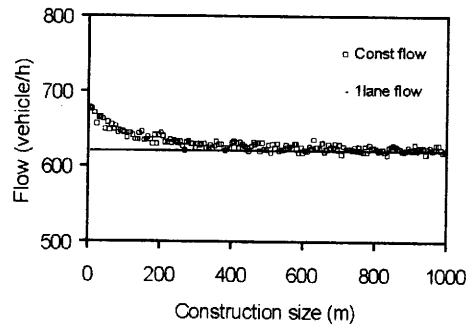


図3 交通量に対する工事区間長の影響
Fig.3 Effect of construction zone length to traffic flow

と短い工事区間の結果は定性的に一致している。しかし、長い工事区間の場合は短い工事区間の場合に比べて最大交通量は小さく、その値は工事のない 1 車線道路の最大交通量と一致している。

図 2 から工事区間長は最大交通量に影響を与えることがわかった。そこで、1 車線直線道路において最大交通量となる車両密度 0.23 に車両密度を設定し、工事区間長を変化させて交通量を測定した結果を図 3 に示す。比較のために工事区間を含まない 1 車線直線道路の交通量も点で示してある。図 3 から、工事区間長が 600m を越えると工事区間を含む 2 車線道路の最大交通量は一定となり、工事区間を含まない 1 車線道路の最大交通量と一致していることが分かる。工事区間長 600m というのは、この解析対象の全長 9000m の約 7% であり、観測地点に関しては周期境界条件の影響は無視できる。このことから、最大交通量は工事

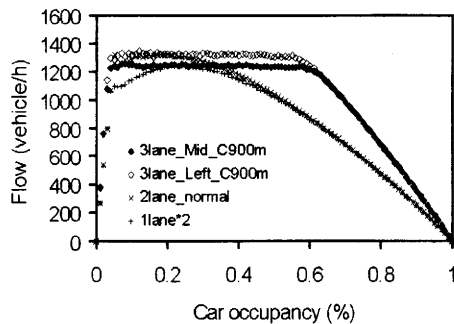


図4 車両密度と交通量の関係図 (工事区間を含む3車線道路)
Fig.4 Traffic flow and car occupancy (Three-lane road including road construction zone)

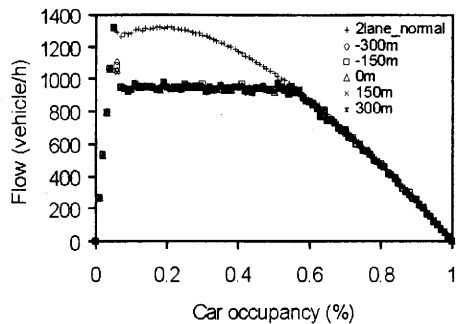


図5 車両密度と交通量の関係図 (サグ区間を含む2線直線道路)
Fig.5 Traffic flow and car occupancy (Two-lane road including sag zone)

区間長の長さにも依存すると考えられる。

3.3 工事区間を含む3車線直線道路

解析対象として左端から1500番目のセルから300セル(900m)分の工事区間を路肩側車線または中央車線に設定した片側3車線の自動車専用道路を考える。解析に用いたパラメータ値は先の解析例と同じである。

図4に車両密度と交通量の関係図を示す。比較のために、工事区間を含まない2車線道路の交通量と1車線道路の交通量を2倍したものと同じグラフに示す。グラフに付けられたラベルは、1lane*2は1車線道路交通量の2倍値、2lane_normalは2車線道路交通量、3lane.Left.C900mは路肩側工事の3車線道路、3lane.Mid.C900mは中央車線工事の3車線道路を示す。図から、工事区間を路肩側と中央車線にとった場合で、交通量のグラフは定性的には一致しているにもかかわらず、工事車線が中央の場合では路肩側の場合に比べて最大交通量が8%程度小さくなっていることがわかる。また、図ではわかりづらいが、中央車線に道路工事を有する片側3車線道路の最大交通量は、片側1車線道路の交通量の2倍に一致するのに対して、路肩車線に道路工事を有する片側3車線道路の最大交通量は、片側2車線道路の交通量に一致していることが分かる。このことから次のような考察が得られる。第1の点は、片側2車線道路の交通量は、わずかではあるが片側1車線道を単純に2倍したよりも大きくなることである。そして、第2の点として片側3車線道路で道路工事を路肩側と中央車線のいずれにとるかということに関しては、路肩側にとる場合、残り車線は片側2車線道路としての傾向を示すのに対して、中央側にとる場合、残り車線は片側1車線道路が2本としての傾向を示すということである。

3.4 サグ区間を含む2車線道路

解析対象として左端から1500番目のセルから50セル(150m)分のサグ区間を定義した片側2車線の自動車専用道路を考える。解析に用いたパラメータ値は先と同じである。

図5に車両密度と交通量の関係図を示す。比較のために、サグ地点を含まない片側2車線道路の交通量も示す。図から各観測地点での交通量はほぼ同じ値を取っていることがわかる。そして、車両密度の増加とともに交通量は増加し、車両密度0.04付近でメタ安定分岐現象が発生した後、車両密度0.55まで交通量がほぼ一定となっている。最大交通量はサグ区間を含まない通常の直線道路と比較して約30%減少している。工事区間によるボトルネックの場合と比較して大きく異なる点は、サグ区間においてはメタ安定分岐現象が観測されることである。これは、工事区間によるボトルネックとは異なり、サグ区間では車両の初期配置によっては高速流が発生しうることを示している。

謝辞 本研究の遂行にあたって(財)豊田理化学研究所の平成13年度研究助成をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省. 自動車燃費一覧について. <http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpilist/02.pdf>, 2002.
- 2) 省エネルギーセンター. 平成5年度燃料消費効率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). <http://www.eccj.or.jp/fuel/>, 1993.