

## 反応時間依存型OV-CAモデルの提案とその検証について

### Proposal and Verification Of OV-CA Model Depending On The Reaction Time

○正 曾田 康秀<sup>\*1</sup>, 渡邊 明英<sup>\*1</sup>, 幸 弘美<sup>\*1</sup>  
Yasuhide SOTA<sup>\*1</sup>, Akihide WATANABE<sup>\*1</sup> and Hiromi YUKI<sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup>(株)東京建設コンサルタント TOKEN C.E.E. Consultants Co., Ltd.

Optimal velocity (OV) model, one of the car-following models, is suitable for reproducing the  $k$ - $Q$  curve in highway traffic data or the car-following motions in observed traffic flow, although the intrinsic parameters have to be fixed, depending on each traffic situation. In this paper, we propose the OV model, whose parameters are fixed by the stopping distance depending on the reaction time, and combines it with cellular automaton (CA), to apply it to the large-scale traffic simulations on the road networks. An illustrating example concerning an evacuation around Koto-delta region has been presented, to indicate the effectiveness of OV-CA model in accounting for the traffic congestion and the capacities of the road network.

**Key Words** : traffic flow, optimal-velocity, cellular automaton, evacuation simulator, road network

### 1. 緒 言

近年、豪雨や地震津波による被害を踏まえ、災害時の避難手段として車両による避難が考慮されている。一方で、車両による避難では、短時間に多くの車両が安全な方向に避難していくので、橋梁等のネック箇所を起点に渋滞が発生する可能性が高くなる。したがって防災の観点から、災害時の車両避難の有効性を検証するために、避難時における市街地での渋滞発生や渋滞時の車両の動きを的確に表現する避難シミュレーションモデルが望まれる。

車両の動きを数値的にもとめる交通流シミュレータは、各道路路上での車両密度に合わせて速度を変化させる密度タイプのモデル<sup>(1)</sup>と前方の車両の位置に合わせて車両速度を変化させる追従モデル<sup>(2)</sup>に大きく分けられる。既存の車両避難シミュレータでは計算コストの点で密度タイプモデルが主流である<sup>(3)</sup>。しかしながら、密度タイプモデルでは車両の減速条件が前方車両との位置関係から決まらないため、渋滞が発生する条件を的確に表現するのが困難である。一方、車間距離や各車両の反応時間が考慮される追従モデルは、前方車両との車間距離に合わせて各車両の動きが決まるため、渋滞時の動きを的確に表現することが可能である。特に追従モデルの一つである最適速度モデル(OVモデル)は、自由走行状態から渋滞状態への相転移などを的確に表せることが知られている<sup>(4)(5)</sup>。しかしながら、モデル中のパラメータ値をどのように決定するかが不明であることや、計算コストが掛かることなどから、OVモデルは道路ネットワーク上での大規模避難行動モデルにはこれまであまり適用されていない。本研究では、最適速度モデルのパラメータ値を高速道路や市街地での観測データと適合するように決定する。またそれをセルオートマトン(CA)法と組み合わせたOVモデルとCA法のハイブリット型モデル(反応時間依存型OV-CAモデル)を提案し、OVモデルを道路ネットワークに適用可能なものに拡張する。OV-CAモデルでは、追従車両のみでなく先頭車両についても反応時間から停止挙動を一括して導ける。したがって信号や障害物のある災害時の市街地での避難車両の多体問題を数値的に取り扱うことが可能になる。以下では、OV-CAモデルを江東デルタ内道路ネットワーク上の車両避難に適用した場合を考察する。

## 2. 反応時間依存型 OV-CA モデルの導出

追従モデルの一つであるOVモデルでは、前方車両との車頭間隔  $r$  によって、各車両の速度が最適速度関数の値に一致するように調整される。OVモデルでの各車両の速度  $v$  の時間変化は以下の式で与えられる<sup>(4)</sup>。

$$\frac{dv}{dt} = a_c (V_{op}(r) - v), \quad V_{op}(r) \equiv V_{\max} \theta(r - l_c) \left[ \frac{\psi_{ov}(r, m_c, d_c) - \psi_{ov}(l_c, m_c, d_c)}{1 - \psi_{ov}(l_c, m_c, d_c)} \right] \quad (1)$$

ただし  $\psi_{ov}(r, m_c, d_c) \equiv \tanh[m_c(r - d_c)]$ ,  $\theta$  はヘビサイド関数、最適速度関数  $V_{op}$  は  $r = d_c$  に変曲点を持つ単調増加関数で、 $r < l_c$  でゼロ、 $r \gg d_c$  で最大速度  $V_{\max}$  に漸近する。 $a_c$  [1/s] はドライバー感応度 (ドライバー反応時間  $t_c$  の逆数)、 $m_c$  は  $r = d_c$  の周りで、どの程度の車頭間隔からブレーキを効かせるかを表すパラメータである。高速道路での観測におけるこれらのパラメータの最適解  $v_L(r) = 16.8(\text{Tanh}[0.0860(r - 25)] + 0.913)$  [m/s] となり、これを車両密度  $k = 1/r$  と交通量  $Q = kv$  の関係式に書き換えると、 $Q = 3.6kv_L(1000/k)$  [1/h] となる<sup>(5)</sup> (図1青)。これらのデータは最大速度  $V_{\max}$  が115 [Km/h] であり、より低い最大速度 (平均速度40 [Km/h]) での  $k-Q$  関係については、円形サーキットでの実験での実測値が得られている<sup>(6)</sup> (図1赤)。一方、信号の影響を受ける市街地での実測値としては、最小車頭間隔で無次元化された車両密度に対する速度の指数型最適解が報告されている<sup>(7)</sup>。この論文で得られている実験データ (図1茶色) を、最適速度関数型の関数形でフィットすると、近似関係式  $v_s(k) = 15.47(\text{Tanh}(2/k) - \text{Tanh}(2))$  [m/s] として、 $Q = 3.6kv_s(l_c k / 1000)$  [1/h] が得られる (図1緑)。図1から、 $k-Q$  関係は最大速度および信号の有無に強く依存することが分かる。式(1)からOVモデルでの走行車は  $r < d_c$  で速度をゼロに近づける。ドライバーは、道路上で停止距離を意識してブレーキを掛け始めるので、 $d_c$  は速度  $V_{\max}$  で走行している車両の停止距離  $\hat{r}_c = V_{\max} / a_H + V_{\max}^2 / (2\mu g)$  に比例すると考えられる。ただし  $g$  は重力加速度、 $\mu$  は道路の動摩擦係数、 $a_H$  は車両停止時の反応時間の逆数で、信号停止時では約0.1 [1/s]、追従時では  $a_c$  (約2.0 [1/s]) に等しくなる。 $d_c$  の  $\hat{r}_c$  との比例条件と、最大速度  $V_{\max}$  が115 [Km/h] のときの最適解が  $v_L(r)$  で表されるという条件から、最大速度  $V_{\max}$  での最適速度関数が  $a_H$ ,  $\mu$ ,  $l_c$  および車頭間距離  $r$  [m] を用いて

$$\bar{V}_{op}(r, l_c, V_{\max}, a_H, \mu) = V_{\max} \theta(r - l_c) \left( \frac{\psi_{op}(r, V_{\max}, a_H, \mu) - \psi_{op}(l_c, V_{\max}, a_H, \mu)}{1 - \psi_{op}(l_c, V_{\max}, a_H, \mu)} \right) \quad (2)$$

と表される。ただし  $\psi_{op}(r, V_{\max}, a_H, \mu) \equiv \text{Tanh}[0.0860(r - 0.0265\hat{r}_c(V_{\max}, a_H, \mu))]$ 。

この式から、最適速度関数は  $V_{\max}$  と  $a_H$  のみで一意的に表される。高速道路の最大速度を115 [Km/h]、市街地およびサーキットの最大速度を40 [Km/h] とし、 $a_H$  を市街地で0.1 [1/s]、それ以外で2.0 [1/s]、 $\mu = 0.8$ ,  $l_c = 5$  [m] として図示すると、図1のようになり、高速道路、円形サーキット、市街地での定常車両流の  $k-Q$  曲線の違いを説明することが可能である。また前方の敷居線を越えて先頭車両の最大速度が  $V_{\max}$  から  $v_{\max} (< V_{\max})$  に減速される場合、敷居線から距離  $r$  だけ手前の位置での先頭車両の運動方程式は、

$$\frac{dv}{dt} = a_c (\sigma_{op}(r, l_c, V_{\max}, v_{\max}, a_H, \mu) - v) \quad (3)$$

と表される。ただし、

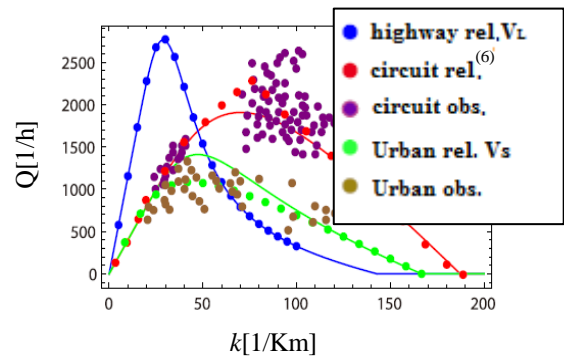


Fig.1 : Parameter dependence of  $k-Q$  relation obtained by the optimal velocity, eq. (2).

(Red line:  $V_{\max} = 40$  [Km/h],  $a_H = 2.0$  [1/s].

Blue line:  $V_{\max} = 115$  [Km/h],  $a_H = 2.0$  [1/s].

Green line:  $V_{\max} = 40$  [Km/h],  $a_H = 0.1$  [1/s].)

$\sigma_{op}(r, l_C, V_{max}, v_{max}, a_H, \mu) \equiv \bar{V}_{op}(r, l_C, V_{max} - v_{max}, a_H, \mu) + v_{max}$ . 特に敷居線が停止線の場合は (3) で  $v_{max} = 0$  となり, は車間距離  $r$  での追従車両の運動方程式に一致する. 以上から, 市街地で先頭車両と追従車両が混在する場合の車両多体系の運動方程式を, 式 (3) で統一的に表すことが可能になる.

### 3. 反応時間依存型 OV-CA モデルの導入

最適速度関数(2)で与えられる反応時間依存型OVモデルとCAのハイブリット型モデル (OV-CAモデル) を道路ネットワークに適用し, 道路ネットワーク上での渋滞発生条件を考察する. OV-CAモデルでは, 各道路リンクの各通行帯を縦断方向に0.4[m]のセルで分割し, 各道路リンクの各車線ごとにセル座標から成る車両ID 登録配列を導入する. 以下では, 車両長さを最小車頭間隔-2[m] とし, 車両の存在するセルのセル座標には, その車両の個別IDを登録し, 車両の存在しないセルには-1 の値を登録しておく. したがって, 各車両は自分のいる車線のセル位置から前方のセルを探索し, 最初に負でない値を持つセル位置から, 前方車両のID と位置を確認できる. また各セル座標を導入した道路リンクをノード上で接合し, 車両を道路リンク上で遷移させる. OV-CAモデルでは, 道路リンクを遷移する際に, 近接車両の車体が重ならないようにすることが重要である. 複数車線が合流する場合(図2(a))や交差点右左折時(図2(b))では, 他の道路リンクからの車両が合流する可能性があるため, 各車両は遷移先道路リンクのみでなく, その道路リンクと繋がる他の道路リンクの車両位置を確認する必要がある. したがってそれらの場合には, そのノードで繋がる各道路リンク上の各車線上での車両位置を考慮し, 車両の遷移判定条件をもとめる必要がある. OV-CAモデルでは, 各車線上のセル座標を順次探索できるため, 低計算コストで近傍車両位置の探索が可能である. 以上から, OV-CAモデルは, OVモデルを大規模な道路ネットワーク上での渋滞状態へ適用するためのモデルとして有効であると考えられる.

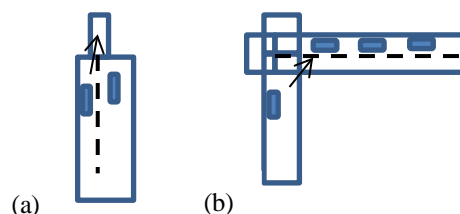


Fig.2 : Examples of halt and deceleration for OV-CA model. (a) the road link transitions when the number of lanes decrease, (b) the road link transitions, when vehicles take right turn..

### 4. 数値計算による反応時間依存型 OV-CA 多体モデル検証

以下では, OV-CAモデルの市街地での適用例として, 隅田川と荒川で囲まれた江東デルタ地域(図3, 総世帯数約30万)から一定方向に避難する車両の数値計算を行い, 渋滞発生条件を調べる. 数値計算の設定条件としては, 江東デルタ内で一定時間内に一様ランダムに避難車両を発生させ, 最寄りの道路位置から隅田川上の橋梁上を通過して西側の域外に避難させる. 各避難車両の避難経路の経路検索にはダイクストラ法を用い, あらかじめ隅田川を渡った先に目標点(図3赤)を定め, 各車両位置から各目標点までの到達時間が最短になるように目標点および最短経路を選ぶ. ただし目標点は複数あるので, 各車両は到達時間の逆数に比例する確率分布に従ってランダムに目標点を選ぶこととする. 経路選択については, ここ数年スマートフォンなどによる渋滞情報を走行車両がリアルタイムで取得できる. したがって今後, 渋滞情報を考慮した避難行動が重要になると考えられる. OV-CAモデルでは, 各道路リンクの平均車両密度に式 (2) を適用して平均移動速度が割り出せるので, 各経路ごとの渋滞を考慮した経路検索が可能である. したがって, 以下では計算開始から10分間で全ての車両を出発させ, 渋滞を考慮しない最短経路に従って避難行動を取る場合と, 5分間隔で渋滞を考慮した経路再検索を行い最短経路および目標点をリセットする場合での避難完了時間を考察する. また10分間の間に発出する車両数を変えた場合の避難車両の渋滞発生について考察する.

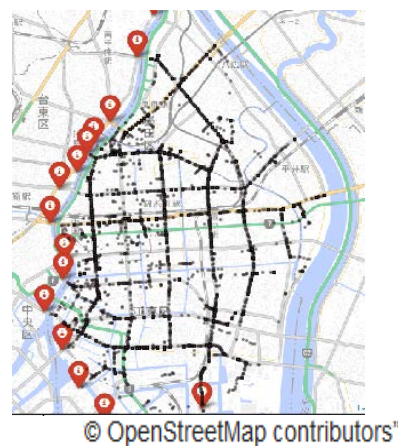


Fig.3 : Vehicle positions 20minutes after the start of evacuation (black). Each vehicle runs toward one of the destinations(red).

道路ネットワーク上での交通流数値計算においては, 各交差点の実際の信号位置に信号を設置する. また簡単のため, 交通規制で避難車両以外の一般車両は域内では通行していないとする. 図3の江東デルタ内から出発した車

両は、車両間相互作用がない場合（渋滞がない場合）は平均で約20分程度、遅くても50分程度で域外に到達する（図4(a) 青）。一方OV-CAモデルの車両間相互作用を考慮し、10分以内に出發させる車両数を増加させると、域外到達時間が渋滞により延びる。特に車両台数が2万台以上では、経路再検索した場合でも、平均到達時刻が2時間を超え、90%の車両避難完了時刻が車両台数5万台で6時間程度に及ぶ（図4）。

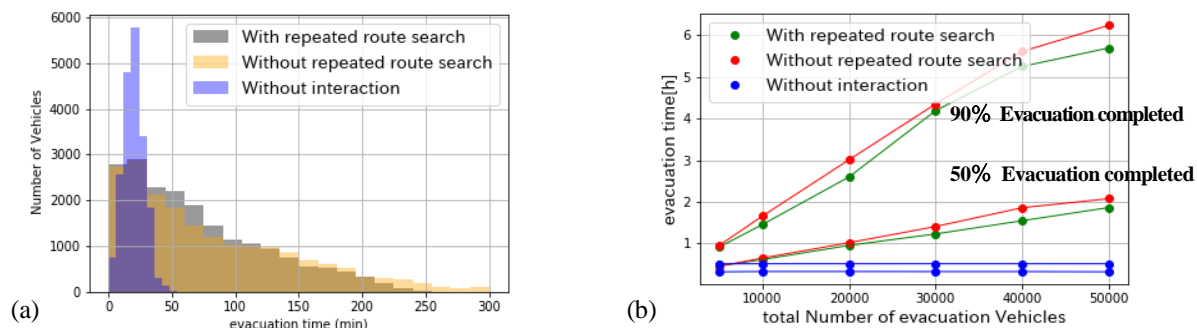


Fig4 : (a) Relative frequency distribution of the evacuation time, when 20k vehicles depart within 10minutes.

(b) Evacuation time against the total number of evacuation vehicles. The evacuation time when 50% and 90% evacuees arrive at one of the destinations are depicted.

## 5. 結 語

本研究では、相転移など一次元車両流での渋滞状態への遷移を表現するのに適したOVモデルを、市街地でのネットワーク上に適用できるように拡張した。我々が提案したOV-CAモデルでは、各車両の周辺の車両位置をセル探索で実行でき、低計算コストでOVモデルを適用することが可能である。またこのモデルでは車道合流部での合流や車線変更なども表現できるので、複数車線の多い都心部での避難シミュレーションにも適用可能である。今回我々はテストケースとして、江東デルタ内の道路ネットワーク内にOV-CAモデルを適用し、隅田川西側への車両避難シミュレーションを実行した。数値実験の結果から10分間に1万台を越える車両が避難を開始すると、渋滞により避難完了時間が急激に延びることが確認できた。この領域の車両保有率が3割程度であることから、全車両保有世帯が車両で避難するのは困難である。車両規制のない場合さらに避難完了時間が延びることが予想され、効率の良い事前避難には公共交通機関など他の手段を併用する必要があると言える。ただし出発時間に広がりを持たせれば渋滞が緩和されることから出発時間を地域ごとにずらすなどの手段も有効だと思われる。以上の点からOV-CAモデルを用いた数値計算は、今後車両避難を含めた避難計画を立てる上で有効な手段になると考えられる。

## 文 献

- (1) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太, “ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について”, 交通工学, Vol.32, No.4, p.39-44, 1997.
- (2) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, 土木学会論文集, Vol.660, pp.39-51, 2000.
- (3) 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田智, 小島優: 大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- (4) 杉山雄規: 交通流の物理(<特集>交通流), ながれ: 日本流体力学会誌, Vol.22, No.2, pp.95-108, 2003.
- (5) 中山章宏: 一次元交通流の追従模型(<特集>交通流の数値), 応用数値, Vol.12, No.2, pp.113-108, 2002.
- (6) Tadaki, S., Kikuchi, M., and Fukui, M.: Critical density of experimental traffic jam, *Traffic and Granular Flow '13*, pp.505-511, 2015.
- (7) 高木相, 谷口正成, 鈴木祥介: 道路交通流における走行車両の車頭時間・速度測定装置, 計測自動制御学会東北支部第237回研究集会, pp. 1-8, 2007.