

# Variational Theory による 交通状態再現のロバスト性検証

熊倉 大起<sup>1</sup>・川崎 洋輔<sup>2</sup>・桑原 雅夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生非会員 大学院情報科学研究科〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: daiki.kumakura.t5@dc.tohoku.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東北大学研究員 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: kawasaki-y@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、車線変更・途中流入・運転挙動の個人差が、Variational theory (VT) による交通流再現にどの程度影響を与えるかを実証的に検証したものである。VT は交通流を再現する際に車線変更・途中流入・運転挙動の個人差等の交通変動要素を考慮しておらず、現実の交通流を再現できていない可能性がある。一方で VT に境界条件として入力するプローブ軌跡は車線変更による減速波等の情報をいくらか保持していると考えられる。よって、プローブ軌跡を境界条件として入力することで、車線変更の影響を間接的に加味して交通状態を推定できている可能性がある。そこで、この仮説検証のために本研究では、カメラ画像解析による全車軌跡を用いて、車線変更等の交通要素が VT の交通再現性に与える影響を実証的に検証した。検証の結果、Fundamental Diagram(FD)の揺らぎ(運転挙動の個人差)や車線変更は、VT が再現した交通状態に顕著な影響を与えるが、合流考慮の有無は、比較的程影響を与えないことがわかった。

**Key Words:** *fundamental diagram, variational theory, all vehicle trajectory*

## 1. はじめに

現在、道路上の車両感知器などの固定式装置による車両情報や、移動体から得られるプローブデータなどのセンシングデータが利用可能になってきた。また、これらのデータを用いて交通状態を推定する手法も提案されてきた。特に Kinematic Wave 理論の解法として Daganzo (2006)<sup>1,2)</sup>の提案した VT による交通状態の把握手法によって、高速道路のみならず一般道路の交通状態も推定できるようになった。しかしながら、Daganzo の提案した Variational theory (VT) では、区間途中の流入の交通影響を考慮できない。VT を拡張して区間途中の流入を考慮した研究に Mehran et al<sup>3)</sup> や Mehran and Kuwahara<sup>4)</sup> が存在する。この研究は、流入が既知の場合に、VT の推定する累積交通量を修正する方法を提案している。

しかし、実際に VT を用いる際には、区間途中の流入データが得られない(車両感知器が区間途中流入部にならない)場合が多い。また、VT は、車線変更や運転挙動の個人差を考慮していない(推定時空間で一つの Fundamental diagram (FD) を使用)といった課題もある。そ

のため、VT の推定結果は、現実の交通流を十分に再現できていない可能性がある。このような背景をふまえて、車線変更、途中流入、運転挙動の個人差が、どのように VT によって再現する交通状態に影響を与えるかを、実データと比較することにより定量的に検証する。その検証には、阪神高速道路におけるカメラ画像を解析して得られた全車両の走行軌跡データを使用した。

## 2. 全車両軌跡データによる交通状況分析

本章では、阪神高速道路の特定区間を対象に全車両軌跡データを用いた交通分析結果について述べる。具体的には、まず、全車両軌跡データの概要を述べるとともに、車線別の渋滞状況、個人の運転挙動のゆらぎ(FD の変動)ならびに車線変更発生状況、合流状況の分析結果について述べる。

### (1) 分析対象箇所と全車両軌跡データの概要

本研究では阪神高速道路の 1 号環状線と 15 号線が合

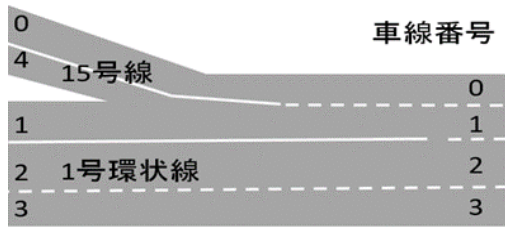


図-1 検証対象箇所略図

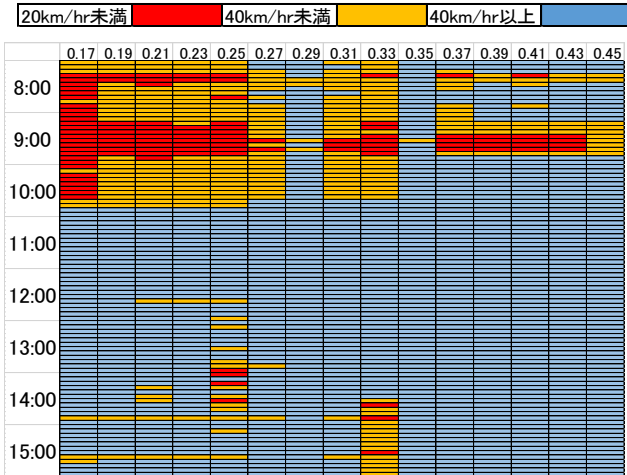


図-2 5月12日合流車線（車線0, 4）のRYG

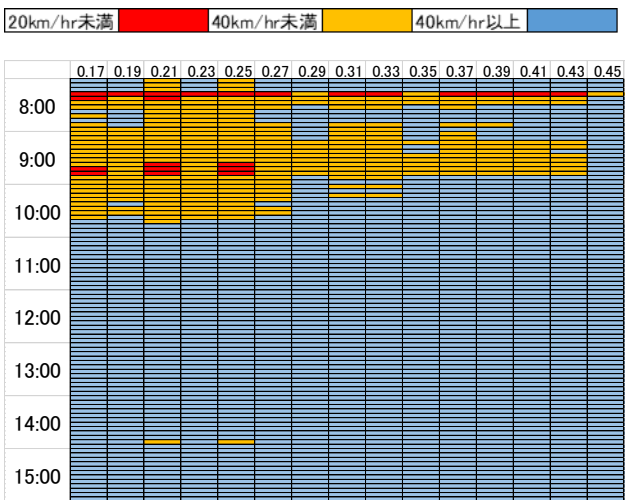


図-3 5月12日 本線（車線1, 2, 3）のRYG

流する部分を対象箇所とし、図-1 で車線を示す。

本研究で得られたデータは上記の箇所で行われた軌跡データで、個々の車両の1秒ピッチの車両位置（車線・区間上流からの移動距離）で構成される。全車両軌跡データは、車両軌跡の計測は図-1 の範囲をカバーする4台のカメラによって撮影された画像を1秒ピッチの車両位置を処理・推定することで取得した。カメラ撮影期間は、2016年5月10日、11日、12日の3日間である。全車両軌跡データの全データ容量は約16GBとなっている。次節より、渋滞状況、個人特性のばらつき（FDの揺らぎ）、分合流比、車線変更台数の分析結果について述べる。

## (2) 渋滞状況の分析

渋滞状況を把握するために RYG を用いて本線（車線1, 2, 3）と合流車線（車線0, 4）のそれぞれで空間平均速度を用いて渋滞を表現した。その結果の一例を以下の図-2, 図-3 で示す。

同図を見ると、0.17~0.27kp 間では時速 20km 以下の速度になることが多い。この区間は合流部の直近下流区間であり、合流摩擦による速度低下が発生していると推察される。また、合流車線（車線0, 4）と本線（車線1, 2, 3）の速度低下状況を比較すると、合流車線の方が本線よりも速度低下している状況が見受けられる。

## (3) 個人特性のばらつきの分析

本研究では v-s 関係（車尾距離 s と速度 v）の関係から、FD（交通流率 q と車両密度 k の関係）を求めた。以下に v-s 関係および FD の算定法について述べる。

まず、全車両軌跡データより求めた個々の車両速度より、低速・高速域の車両を異常値として除外した。具体には、 $20 \leq v \leq 90(\text{km/h})$  の範囲のものだけを分析に用いた。このデータを用いて、個々の車両の車尾距離 s(m) および速度 v(km/h) を計測した。そして、速度 5km/h ごとの平均車尾距離および標準偏差を算出して平均値および平均値±標準偏差の v-s 関係を可視化した。そのデータを用いて、対数近似により v-s 関係の近似曲線を推定した。次に v-s の近似曲線から求める v, s 値を q-k 関係に変換して FD を求めた。この v-s 関係を q-k 関係に変換する式を

$$q = k \times v \quad (1)$$

$$s = \frac{1}{k} \quad (2)$$

と定義する。

以下に v-s 関係および FD の推定結果を整理する。図-4 に3日間の平均 v-s 関係（平均値と標準偏差の和と差）の可視化結果を示す。対数近似の結果、平均値 v に対する s の近似式は、

$$v = 46.28 \ln s - 102.21 \quad (3)$$

となった。なお、近似式は、Microsoft Excel により求めた。平均値と標準偏差の和と差分を考慮した近似式を推定すると、

$$\text{平均値+標準偏差} \quad v = 42.80 \ln s - 104.58 \quad (4)$$

$$\text{平均値-標準偏差} \quad v = 54.36 \ln s - 100.20 \quad (5)$$

となった。

図-4 の v-s 関係の平均値および平均値と標準偏差の和および差の近似値を用いて対数近似で推定した FD の可視化の結果を図-5 に示す。

図-5 の FD の平均値と平均値±標準偏差を比べると、以下のことがわかった。

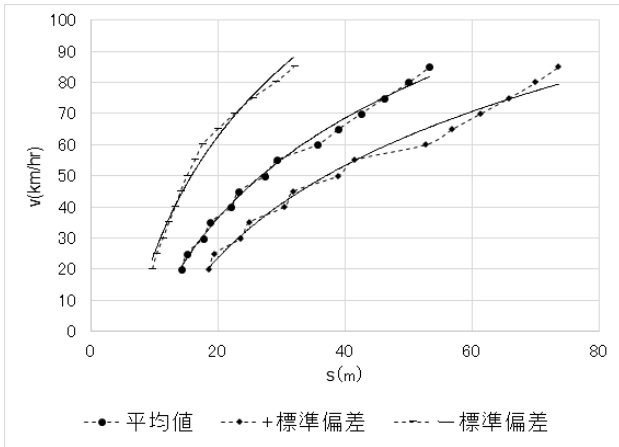


図-4 V-S 曲線 (対数近似)

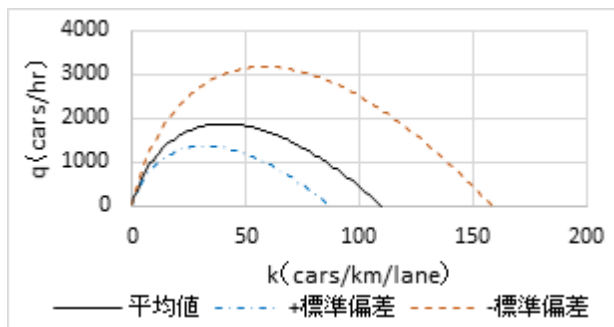


図-5 対数近似によるFD

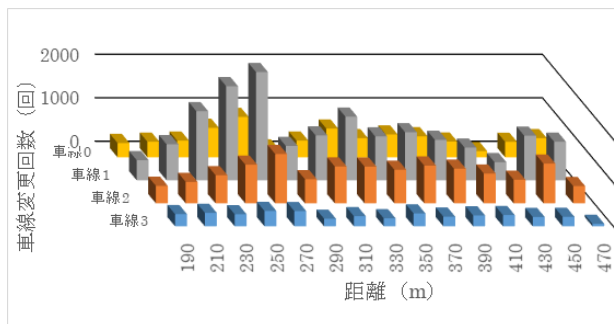


図-6 5月12日の距離別車線変更回数

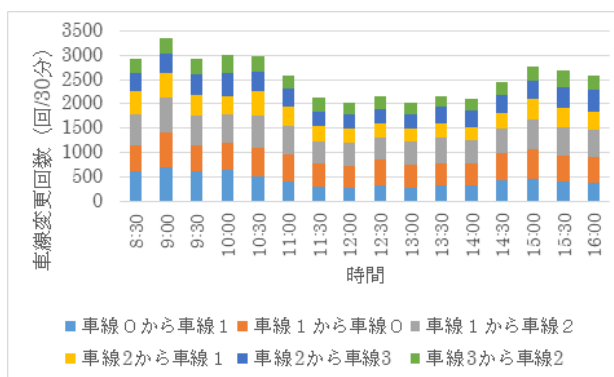


図-7 5月12日の車線変更回数の時間推移

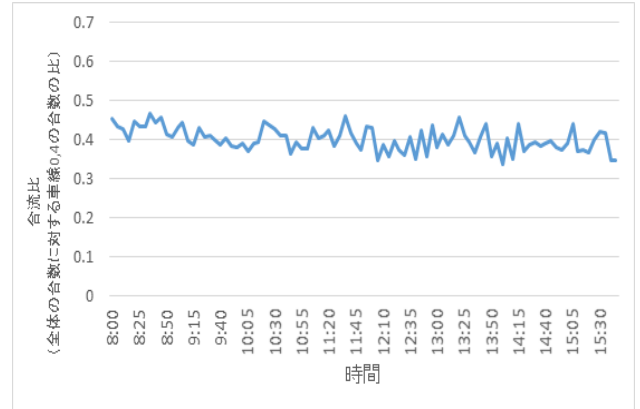


図-8 5月11日の合流比の時間推移

- 平均値+標準偏差では、最大フローレートは平均値に比べて、約7割程度、平均値-標準偏差では、最大フローレートは約2倍となった。
- 密度の値が大きくなるにつれて、標準偏差と平均値との関係が大きく乖離する傾向がみられた。

#### (4)車線変更状況の分析

個々の車両の車線変更位置と時間を分析し、車線変更と渋滞状況の分析を行う。まず、30分ごとに車線変更をした回数を算出するとともに、0.02kpごとの車線変更回数を算出した。その際、車線変更前の車線が分かるようにする。図-6に5月12日の距離別車線変更回数を、図-7に5月12日の車線変更回数の時間推移を示す。

分析により、車線変更が多く発生する位置は、支線との合流ハードノーズ下流の0.21~0.33kpで多いことがわかった。また、時間帯別の車線変更台数の推移をみると、車線変更発生回数は午前中に比較的多い傾向であった。

#### (5)分合流状況の分析

本研究では、車線1, 2, 3を本線、車線0, 4を合流線として考える。この本線と合流線を通った台数を5分毎に集計した。結果の一例を以下の図-8に示す。合流比は平均4割程度となっていること、時間帯別に見ると、合流比に大きなばらつきはないことが分かった。

### 3. Variational theory のロバスト性検証

本章では、2章までに得られた要素との関係について考察し、VTの性能について現実のデータとの比較を通して検証していく。まず、VTの概要について説明し、データの設定方法を示す。最後に、VTの推定結果と全車両軌跡データを比較して、車線変更等が、VTの再現性にどの程度影響を与えるか検証する。

(1) Variational theory の概要

VT の概要について説明する。対象区間では、区間途中の流出入がない FIFO (First In First Out) 条件を満たすと仮定する。forward wave speed  $u$  と backward wave speed  $-w$  が与えられた時、図-9 のように区分線形 FD が時空間上に敷き詰められた FD ネットワークを構築する。FD の最大フローレートを  $q_{max}$ 、最大密度を  $k_{jam}$  とする。青矢印は、forward wave speed  $u$  に付随したコスト 0 のリンク (以降 fw リンクという) を示す。赤矢印のリンクは、backward wave speed  $-w$  に付随したリンク (以降 bw リンクという) である。赤リンクのコストは、 $k_{jam}dx = q_{max}dt$  で示され、 $dx$  と  $dt$  は、図-9 に示すように時空間を区切る微小区間である。時空間上で累積交通量が既知のノードを境界ノードと定義する。時空間上の累積交通量が不明な任意のノード  $j$  に到達可能な境界ノード  $i$  のインデックス集合を  $\Omega_j$  と定義する。 $N_i$  と  $N_j$  をノード  $i$  と  $j$  の累積交通量とする。なお、 $N_i$  は境界ノードの累積交通量で既知である。ノード  $i$  とノード  $j$  間の累積交通量の変化量を  $Z_{ij}$  とする。Variational Theory によると、ノード  $j$  の累積交通量は以下のように示される。

$$N_j = \inf_i \{N_i + Z_{ij}\}, \quad i \in \Omega_j. \quad (6)$$

ここで、 $Z_{ij}$  は、FD ネットワーク上のノード  $i$  からノード  $j$  間の最短経路コストで与えられる。全ての  $Z_{ij}$  を計算した場合、ノード  $j$  の累積交通量は、 $N_i$  と  $Z_{ij}$  の和の最小値となる。式(6)の操作をすべてのノード  $j$  に対して繰り返せば、FD ネットワークの全てのノードの累積交通量を求めることができる。実際の道路交通に VT を適用する時の上流側(下流側)の境界ノードの交通量は、車両感知器により観測される個々の車両の到着時刻から与えればよい。

(2) VT のロバスト性検証の目的

VT は、車線変更等の交通現象をモデル内で明示的に扱っていないが、VT に境界条件として入力するプローブ軌跡は車線変更による減速波等の情報をいくらか保持していると考えられる。よって、プローブ軌跡を境界条件として入力することで、車線変更の影響を間接的に加味した交通状態推定できていく可能性があると考えられる。

上記の仮説検証のために、車線変更や分合流が VT の推定結果に与える影響を分析する。具体的には、車線変更が多い場合と少ない場合、合流考慮する場合としない場合において、VT の推定精度の比較を行うことで VT のロバスト性検証を行った。

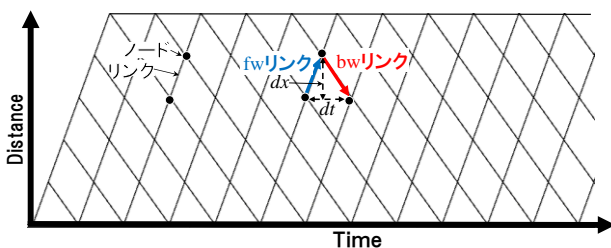


図-9 FD ネットワーク

(3) VT の計算条件

本研究では、FD、プローブデータ、車両感知器データを入力データとする。

FD の設定について述べる。VT に入力する FD は、2 章において推定した FD から、必要なパラメータのみを読み取り設定した。FD のパラメータは、図-10 に示す通りである。表-1 に本検証で設定した FD のパラメータを示す。

プローブデータの設定について述べる。全車両軌跡データから 5%、10% で抽出した車両軌跡をプローブデータとして使用した。全車両軌跡データから分析対象区間の流入・流出断面を通過した車両の通過時刻を車両感知器データとして使用した。

最後に検証ケース設定の考え方を述べる。車線変更・合流挙動の違いによる VT の再現精度の検証のため、車線変更台数の大小(多い・少ない)および合流考慮の有無の組み合わせでケースを設定した。

まず、車線変更の影響評価のためのケース設定について述べる。渋滞時を評価する時間帯は、2 章で述べた渋滞発生状況 (RYG) より 5 月 12 日の 9:30~10:00 に設定した。また、2 章で述べた車線変更の分析結果より、車線変更の多い区間を 0.21~0.33kp、少ない区間を 0.33~0.45kp とした。

次に、分合流評価のケースについて述べる。合流を考慮するパターンと考慮しないパターンの比較によって行うこととした。図-11 に示す通りに、合流を考慮するパターンの場合は黄色枠線内の車線 0, 1, 2, 3 の 4 車線を

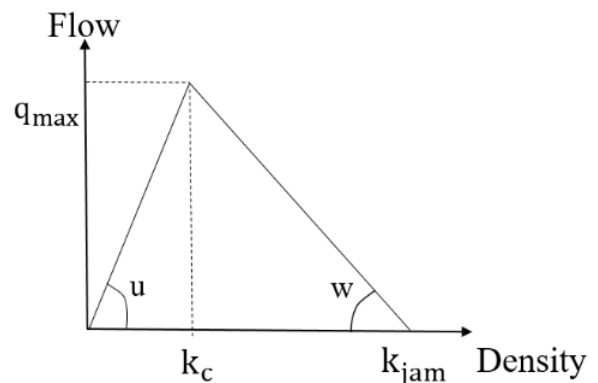


図-10 FD のパラメータ (諸量)

表 1 FD のパラメータ

項目	設定値
$k_c$	29.17(cars/km/lane)
$k_{jam}$	113.60(cars/km/lane)
$q_{max}$	1750.04(cars/hr)
forward wave speed $u$	60.00(km/hr)
backward wave speed $w$	22.06(km/hr)



0.19~0.45kp の区間で VT を実行するが、考慮しないパターンの場合には黄色枠線内の車線 1, 2, 3 のみで 0.17~0.45kp の区間で VT を実行し、比較は合流が完了した 0.19kp 以降の 3 車線で行うこととした。以上をまとめた検証ケースの設定を表-2 に示す。以降は、この表に従って検証結果を述べる。

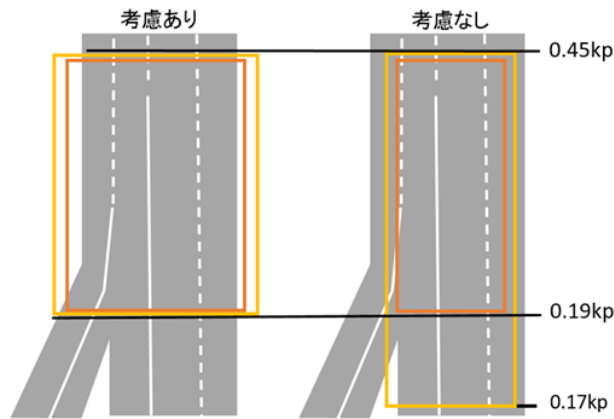
(4) 評価指標の設定

本研究では、真値(全車両軌跡)と VT による推定との差分を VT の推定精度と定義する。この差分は、メッシュの空間平均速度による RMSE を用いることとした。RMSE の算出方法は以下の通りである。

まず、図-12 に示すように Time-Space 上において微小時間 dt、微小区間 dx で区切ったメッシュを考える。そのメッシュのインデックスを図-12 のように  $i=\{1, 2, \dots, I\}$  とし、メッシュ  $i$  の空間平均速度を求める。

メッシュ  $i$  における全車両軌跡データによる空間平均速度を  $v_i$ 、VT による推定された空間平均速度を  $\hat{v}_i$  と定義する。上記より、RMSE を、

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{|I|} \sum_{i=1}^I (v_i - \hat{v}_i)^2} \quad (7)$$



黄色枠線：VT 実行区間 オレンジ枠線：評価区間  
 図 8 分合流を考える際の検証区間

表-2 ケース設定

ケース	渋滞状況	交通要素	日時	区間	分析車線
case1 (車線変更評価)	渋滞	車線変更多い	12日 9:30~ 10:00	0.21~ 0.33kp	0 ~3
		車線変更少ない		0.33~ 0.45kp	
case2 (分合流評価)	渋滞	分合流考慮あり	12日 9:30~ 10:00	0.19~ 0.45kp	0 ~3
		分合流考慮なし		0.19~ 0.45kp	

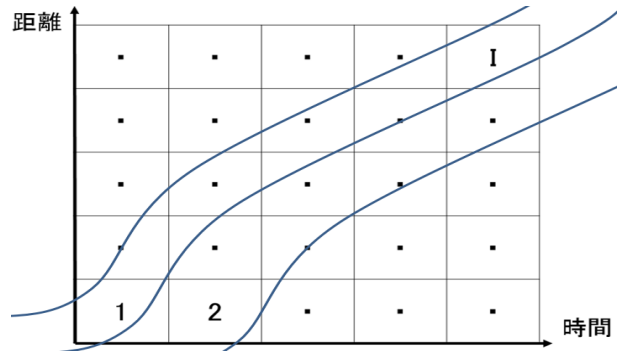


図-12 Time-space 図

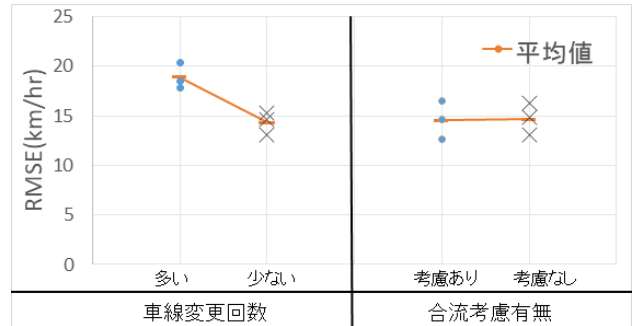


図-13 車線変更と合流考慮の有無に対する RMSE 試算結果

と定義する。本研究では RMSE を算出する際のメッシュサイズの設定は  $dt=300$  (秒) ,  $dx=20$  (m) とした。

(5) VT の検証結果

車線変更・合流考慮の有無の違いによる VT の再現精度の検証のため、それぞれのケースで VT を実行した。図-13 で 5 月 12 日 9:30~10:00 の渋滞状況での車線変更が多い区間と少ない区間での比較、及び合流部での合流を考慮した場合と考慮なしの場合の比較を示す。同図を見ると、車線変更が多い区間の方の誤差が大きいこと、合流の考慮の有無では誤差があまり変わらないことが分かる。今回分析したケースからは、VT による交通流再現は合流の有無にはあまり影響を受けず、車線変更の有無によって影響を受けることがわかった。

4. 結論

本研究では、阪神高道路で観測された全車両軌跡データを使って、VT による交通流再現が、車線変更・分合流の考慮によって、どのように影響されるのかを定量的に分析した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- ・個人特性による FD の変動は、密度の値が大きくなるにつれて標準偏差が大きくなっていくこと。
  - ・今回のデータ解析からは、合流の大小は VT の再現精度にあまり影響を与えないが、車線変更が多くなると VT の再現精度がかなり低下すること。
- 今後の課題は以下のように考える。

- 1) FD の揺らぎに対する VT のロバスト性の検証:3 章で推定した FD (平均値, 平均値±標準偏差) を VT に入力し, FD の変動が VT の交通流再現性にどの程度影響を与えるか実証的に分析する必要がある.
  - 2) 多様なケースによる検証: 本研究では, 渋滞有無や車線変更, 合流状況が異なる 2 ケースを設定し評価を行った. その結果, 車線変更や合流の VT の推定精度に与える影響を明らかにした. ただし, 本結果の一般性を高めるには, さらに多様なケースを設定・検証することが必要と考える.
- 2005.
  - 2) Daganzo, C. F.: A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation Research Part B*, Vol.39, pp.934-950, 2005.
  - 3) Mehran, B., Kuwahara, M. and Naznin, F.: Implementing kinematic wave theory to reconstruct vehicle trajectories from fixed and probe sensor data, *Transportation Research Part C:Emerging Technologies*, Vol.20(1), pp.144-163, 2012.
  - 4) Mehran, B. and Kuwahara, M.: Fusion of probe and fixed sensor data for short-term traffic prediction in urban signalized arterials, *International Journal of Urban Sciences*, Vol.17(2), pp.163-183, 2013.
  - 5) 桑原雅夫, 大畑長, 瀧川翼, 阿部公一, 今井武: プローブデータと車両感知器データを融合活用した都市間高速道路における交通状態の推定, 2013
  - 6) 高安杏奈, 原祐輔, 和田健太郎, 桑原雅夫: 入力データの確率変動を考慮した交通状態推定-Variational Theory に基づいた解析と検証-, 2016

**謝辞:** 本論文の執筆にあたり阪神高速道路(株)に全車両軌跡データを提供いただいた。また、本研究は、一般社団法人交通工学研究会との共同研究より助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Daganzo, C. F.: A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions, *Transportation Research Part B*, Vol.39, pp.187-196,

(2017. 7. 31 受付)

## ROBUSTNESS INSPECTION OF VARIATIONAL THEORY ON ITS TRAFFIC FLOW REPRODUCTION

Daiki KUMAKURA, Yosuke KAWASAKI and Masao KUWAHARA

This research empirically examines how the individual differences in lane change, intermediate flow, and driving behavior affect the traffic flow reproduction by Variational Theory(VT). When reproducing the traffic flow, VT does not take into consideration the traffic fluctuation factors such as lane change, intermediate flow, driving behavior, there is a possibility that the actual traffic flow may not be reproduced. On the other hand, the probe trajectory input as boundary condition to VT seems to hold some information such as deceleration wave due to lane change. Therefore, by inputting the probe trajectory as a boundary condition, we think that the traffic condition estimation could be made indirectly considering the influence of lane change. So, in order to verify this hypothesis, this research empirically examined the influence of traffic factors such as lane change on traffic reproducibility of VT using all vehicle locus by camera image analysis. As a result of verification fluctuation of fundamental diagram (individual difference of driving behavior) and lane change considerably affects the traffic condition reproduced by VT, but it turned out that the presence or absence of consideration of confluence does not have much influence.