

対向観測プローブによる交通流モニタリング -Variational Theoryの適用と推計値の変動分析

河合 克哉¹・竹之内 篤²・伊川 雅彦³・桑原 雅夫⁴

¹正会員 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)
E-mail:Kawai.Katsuya@dn.MitsubishiElectric.co.jp

²非会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail:takenouchi@plan.civil.tohoku.ac.jp

³非会員 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)
E-mail:Ikawa.Masahiko@aj.MitsubishiElectric.co.jp

⁴正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

著者らは、プローブ車両や車両感知器による観測データを融合して交通状態を推定する手法を提案してきた。提案手法は、近年自動車に搭載が進んでいるカメラやミリ波レーダなどのセンサを活用し、対向車線の交通流を観測したデータを用いることで、路側の車両感知器による定点観測を代替することを目指す。提案手法では、(1)対象道路区間を走行するプローブ車両の走行軌跡と(2)対向車線を走行する車両が観測した車両情報から得られるデータをBoundary条件としてVariational Theory (交通流変分理論)を適用することで、時空間全体の車両軌跡を推定する。

本稿では、提案手法の基礎的な解析手法について述べるとともに、交通マイクロシミュレーションによって生成した交通データおよび実際の道路にて観測した交通データに提案手法を適用した結果について考察する。また、入力データの確率変動に起因する推定結果の変動について解析する手法を示す。

Key Words : vehicle trajectory, data assimilation, variational theory, environment recognition

1. はじめに

(1) 背景

道路交通における渋滞や事故、環境負荷などの諸問題に対し、交通流の把握は長年重要な課題であった。近年では、GPSによる測位技術の普及、通信・道路インフラの整備、車両の電子化や車載センサの普及により、プローブ車両から収集できる情報の種類、量が豊富となり、交通流モニタリングへの活用が期待されている。

(2) 既往研究

Daganzo¹⁾は、道路区間における交通流の解析手法として、Kinematic Wave Theory (波動理論)に基づくVariational Theory (交通流変分理論, 以下VT)を用い、効率的に車両軌跡を推定する方法を提案している。

さらに、Mehran, Kuwaharaら²⁾は、VTを用いてプローブ車両、車両感知器、信号から得られるデータを融合し、

道路区間を通過する全ての車両の軌跡を推定する手法を提案している。

(3) 目的

先に述べた既往研究では路側への車両感知器の設置を前提としており、車両感知器を設置していない区間には適用できない。推定可能な区間を拡げるためには、車両感知器を増設する必要があり、設置や維持の費用が問題となる。我が国では、高速道路や主要道路を中心に車両感知器が整備されているが、インフラ整備の進んでいない新興国においては適用が困難である。

また、自動車メーカーなどの民間企業においては、車両感知器データが持つ量的な情報を活用できず、提供できる情報は限定的なものとなる。

上記の問題を解決するために本研究では、カメラやミリ波レーダなどの車両に搭載されるセンサによって、対向車線側の交通流を計測し、既往研究における車両感知

器データを代替する手法を提案する。提案手法により、道路上を走行する車両から得られるデータのみから交通状態を推定することが可能となる。

本稿では、まず提案手法の基礎的な解析手法について述べる。次に、交通マイクロシミュレーションによって生成した交通データおよび実際の道路にて観測した交通データに提案手法を適用した結果について考察する。さらに、入力データの確率変動に起因する推定結果の変動について解析する手法を示す。

2. 提案手法

(1) Variational Theoryの概要

VTでは、時間および道路区間上の位置を軸にとる2次元平面（時空間図）を想定し、この図の上の各点における値として原点から各点までに累積した交通量を考える。時空間図上で累積交通量が既知の点を結んだものをBoundary（境界）と呼ぶ。累積交通量が既知ではない点Pの累積交通量をNP，Boundary上の任意の点Bの累積交通量をNB，仮想的な観測者が点Bから点Pまで移動したときに追い越される最大の台数を ΔBP_{max} とすると、NPは式(1)のように表せることが証明されている¹⁾。

$$NP = \inf\{NB + \Delta BP_{max}\}$$

for Boundary上の任意の点B (1)

図-1に示す通り、対象道路区間のすべての位置について、交通流率と密度との関係を示すFundamental Diagram（基本図、以下FD）が与えられているなら、その位置xにおける波動伝播速度 $w_{min}(x)$ から $w_{max}(x)$ の範囲が観測者の移動速度の範囲となる。また、Relative Capacity（相対容量）より、FDから ΔBP_{max} も計算できる。

(2) 従来研究におけるVTの適用例

VTをプローブ車両および車両感知器による観測データに適用した例として、Mehran, Kuwaharaらの研究がある。車両感知器が設置されている地点では、車の通過台数を計測することで、累積交通量を把握できる。また、プローブ車両の走行軌跡上では累積交通量は一定である。これらの観測データから、図-2の太線のように累積走行が既知であるBoundaryを定義できる。

対象区間が均質なFDを持つ場合であれば、図-2のようにFDの波動伝播速度の最大値と最小値の間で挟まれる太線のBoundaryのすべてから式(1)を評価すればよい。

さらにDaganzoは、線形のFDを仮定できる場合に式(1)の評価を簡便に行う方法を提案している。対象道路区間は図-3に示すような線形のFDを持ち、Forward Wave（前進波）の伝播速度を v 、Backward Wave（後進波）の伝播速度を $-w$ とする。ここでは簡単のために、全区間同じ

FDを持つと仮定する。ここで、図-4に示すように、時間軸を均一な時間単位 Δt を持つ微小区間に分割し、 Δt ごとに v と $-w$ の傾きをもつ有効リンクを配置し、その端点をノードとする探索ネットワークを構成する。リンクコストは、 v の傾きをもつ有効リンクはゼロ、 $-w$ の傾きをもつ有効リンクは $q_{max}\Delta t$ とする。このような探索ネットワークを時空間図上に構成した場合、任意のノードの累積交通量は原点Oからそのノードまでの最短経路コストになることが証明されている。

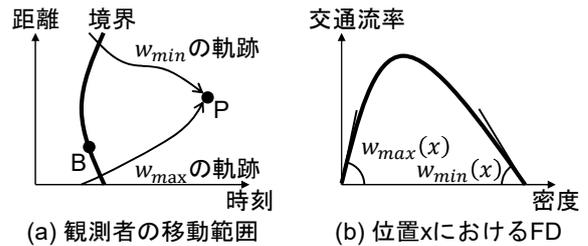


図-1 観測者の移動範囲

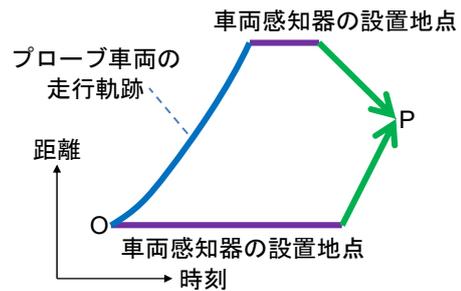


図-2 車両感知器とプローブ車両によるBoundary

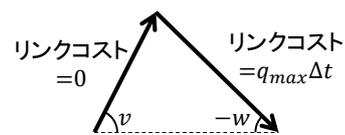


図-3 線形のFD

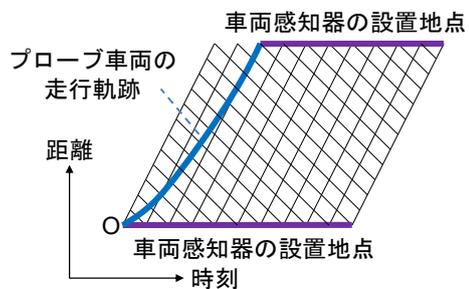


図-4 時空間図上の探索ネットワーク

(3) 本研究におけるBoundary条件の適用

前述のように従来は車両感知器データとプローブ車両軌跡によってBoundaryが構成されていたが、本研究は車両感知器の代わりに対向車線を走る車両が計測する観測データを用いる。この場合のBoundaryを模式的に書けば、図-5の様になる。実線はプローブ車両軌跡、破線は対向車線を走る車が計測した車の時空間位置である。実線と破線で構成されるBoundaryがある間隔で定義できれば、前述のVTをそのまま適用することにより、プローブ車両とプローブ車両の間を走行する一般車両の走行軌跡を推定できる。

ここで、Boundaryが得られた時にVTモデルにより正しく値が求められる領域を把握するため、推計可能領域を規定する座標を整理する。はじめに、図-6に示すように対向車線からの計測に基づくBoundaryが得られた場合、三角形C1C2C3の範囲が推計可能となる。ここでC1の座標を $[t_1, x_1]$ 、対向観測車両で計測した距離を L_o 、対向観測車両の走行速度を v_o とした場合、頂点C2およびC3の座標は式(2)および式(3)で記すことができる。

$$C2 = \left[t_1 + \frac{L_o}{v_o}, x_1 - L_o \right] \quad (2)$$

$$C3 = \left[t_1 + \frac{L_1}{w}, x_1 - L_1 \right],$$

$$L_1 = \frac{w(v_o+v)}{v_o(w+v)} L_o \quad (3)$$

加えて、プローブ車両軌跡に基づくBoundaryが得られた場合、四角形C4C2C3C5の範囲にこれを反映することで推計精度を向上できる。ここで対向観測車両がプローブ車両と交差するまでの距離を L_p 、プローブ車両の走行速度を v_p (ここでは v と等しいものと仮定) とすると、頂点C4およびC5の座標は式(4)および式(5)で記すことができる。

$$C4 = \left[t_1 + \frac{L_p}{v_o}, x_1 - L_p \right] \quad (4)$$

$$C5 = \left[t_1 + \frac{L_2}{w}, x_1 - L_2 \right],$$

$$L_2 = \frac{w(v_o+v)}{v_o(w+v)} L_p \quad (5)$$

さらに、プローブ車両軌跡を地点 x_1 まで得られた場合、四角形C5C3C7C6の範囲が推計可能となる。頂点C6およびC7の座標は式(6)および式(7)で記すことができる。

$$C6 = \left[t_1 + \frac{v_o+v}{v_o v} L_p, x_1 \right] \quad (6)$$

$$C7 = \left[t_1 + \frac{v_o+v}{v_o v} L_p + \frac{L_3}{w}, x_1 - L_3 \right],$$

$$L_3 = \frac{w(v_o+v)}{v_o(w+v)} (L_o - L_p) \quad (7)$$

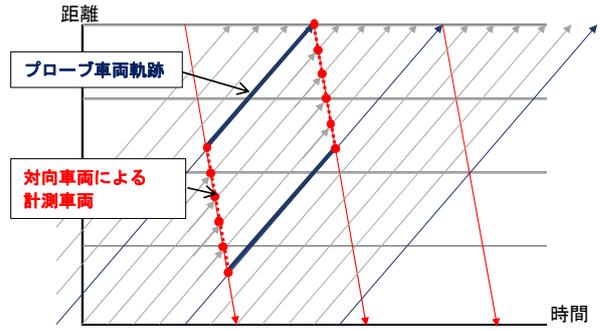


図-5 本研究におけるBoundary

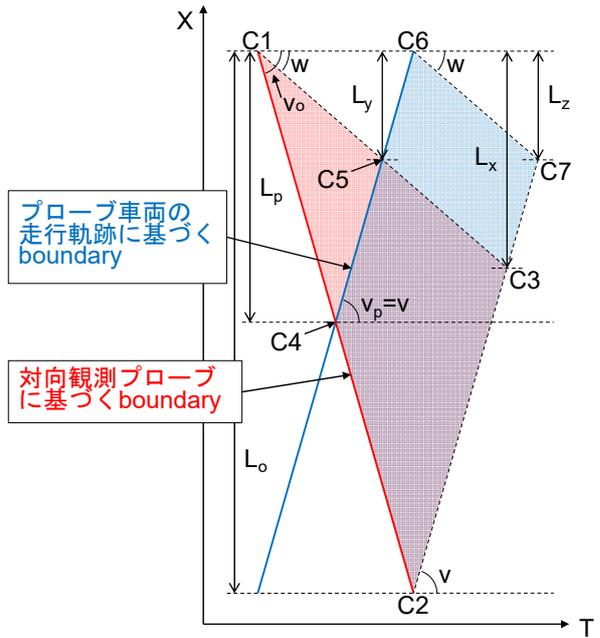


図-6 VTによる推計可能領域

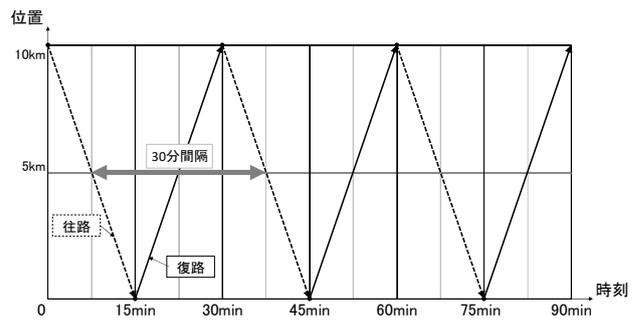


図-7 計測時間間隔の想定 (対向観測車両1台の場合)

(4) 対向車両による計測時間間隔の想定

前節までに、車両感知器データの代わりに、対向観測車両による観測データを用いて、交通状態を推定するアイデアを提示したが、本節では、今後、具体の交通シミュレーションや走行実験を実施することを念頭に、対向車両による計測時間間隔について、机上の整理を行う。

主要幹線道路を対象とし、図-7のように対向観測車両

が対象区間を観測しながら往復するとして、対象区間の区間長を $L = 10$ [km]，往路（計測方向）の旅行速度を $V_1 = 40$ [km/h]，復路（戻り方向）の旅行速度を $V_2 = 40$ [km/h]，折り返し時の所要時間を無視した場合，対向車両による計測時間間隔 t [min] は式(8)の通り算出される。

$$t = \left(\frac{L}{V_1} + \frac{L}{V_2}\right) * 60 = \left(\frac{10}{40} + \frac{10}{40}\right) * 60 = 30 \text{ [min]} \quad (8)$$

また、図-8のように対向観測車両を2台導入し、対象区間を等時間間隔で走行させた場合、対向観測車両による計測時間間隔 t は15 [min] と算出される。

3. 仮想ネットワークにおける提案手法の適用

(1) 真とする交通状況データの生成

提案手法の有効性を確認するために、交通ミクロシミュレーションを用いて、図-9に示す仮想ネットワークにおいて、検証用に真とする交通状況データを生成する。なお、今回用いた仮想ネットワークは、すべてのリンクが片側1車線である。

交通シミュレーションの計算条件を表1に、OD交通量の設定条件を表2に示す。

交通シミュレーション上で生成するOD交通は、O1を起点、D1を終点とするものであり、途中流入交通が無い場合をCase1、N1交差点において途中流入交通がある場合をCase2とした。なお、総発生交通量はCase1とCase2において同程度となるように設定した。

シミュレーション結果に基づく車両走行軌跡図を図-10に示す。これを見ると、両方のケースとも開始5分後にN1を先頭に渋滞が発生し、開始20分後まで渋滞長が延伸している。その後、一旦渋滞長が縮小するものの、最後の20分で再び渋滞が延伸している。

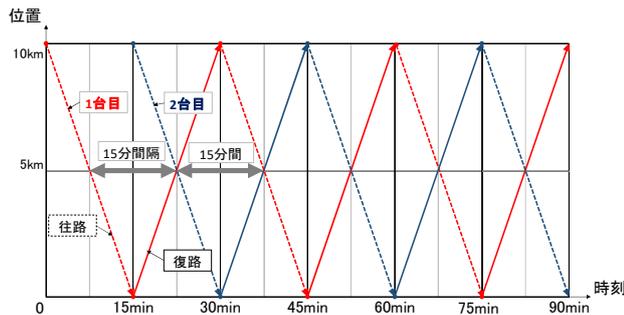


図-8 計測時間間隔の想定 (対向観測車両2台の場合)

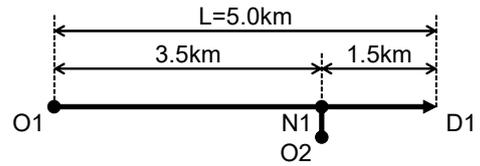


図-9 検証用の仮想ネットワーク

表-1 シミュレーションの計算条件

項目	設定値	参考	
計算時間	60 [min]	—	
FD	q_{max}	O1→N1 1,500 [veh/h] N1→D1 750 [veh/h]	・ q_{max} を固定し、車両ごとに v を $\pm 10\%$ 、 w を $\pm 20\%$ の範囲内でランダムに変動させて k_{jam} 、 k_c を設定
	v	60 [km/h]	
	w	15 [km/h]	

表-2 OD交通量の設定条件

Case	OD	交通量 [veh/h]		
		0~20分	20~40分	40~60分
1	O2→D1	0	0	0
	O1→D1	1,200	550	1,200
2	O2→D1	400	250	400
	O1→D1	800	300	800

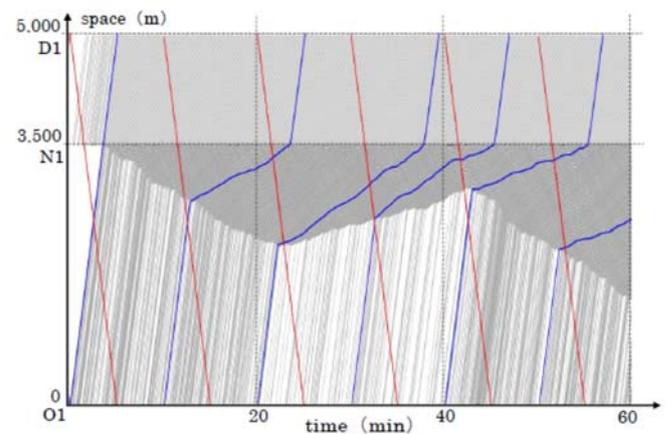
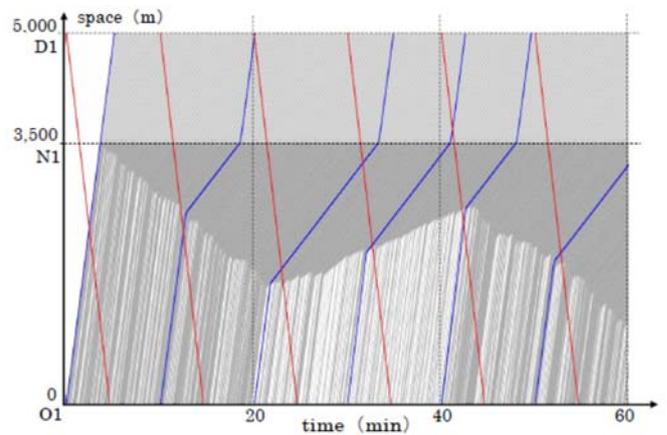


図-10 シミュレーション結果の車両走行軌跡図 (上段: Case1, 下段: Case2)

表-3 計測車両の走行条件

計測車両	走行条件
プローブ車両	・ 10分間隔で O1 から発生
対向観測車両	・ 10分間隔で D1 から発生 ・ 自由速度 (60km/h) で走行

表-4 VTの算定条件

項目	設定値
タイムステップ: Δt	1 [sec]
FD 高さ: Δx	3.33 [m]
FD: $q_{max}, v, w, k_{jam}, k_c$	・ シミュレーションの基本値と同一 ・ 各 FD 共通

(2) 提案手法の適用結果

前項において生成した交通状態を真とし、提案手法を適用した。ここで、推定の入力として仮定した計測車両の走行条件を表-3に示す。起点O1から発生する車両のうち、10分間隔に1台をプローブ車両として抽出し、当該車両の走行軌跡データを利用した。さらに、対向観測車両を10分間隔で仮定し、すれ違う車両の位置・時刻データを利用した。図-10において、プローブ車両を青で、対向観測車両の軌跡を赤で示している。なお、本検討においては計算の便宜上、観測誤差は考慮しないものとした。交通状態の推定に用いたVTの算定条件を表-4に示す。

Case1: 途中流入交通なし

まず、Case1の推計結果を示す。ここで、観測センサの組合せによる結果の差異をみるために、今回の提案手法として、(a)対向観測データのみ使用、(b)対向観測データに加え、プローブ車両データを使用の2ケース、従来手法として(c)上下流端のトラカデータに加え、プローブ車両データを使用の1ケースを実施した。なお、推計結果を横並びで比較するために、a)対向観測データのみを使用した場合の推計可能領域を、真値との比較対象領域として統一した。

(a)~(c)それぞれの推計結果を表す車両走行軌跡図を図-11~図-13に示す。図中に示す点線は、図-10に示す真の交通状況における渋滞末尾の位置を示すが、いずれの場合も高い精度で真の交通状態を近似していることがわかる。

さらに、提案手法の推計精度を定量的に評価するために、推計可能領域の平均速度について真値と比較した結果を表5に示す。これを見ると、いずれの場合も真値との誤差 ΔV は $\pm 1\text{km/h}$ 以下に収まっている。

なお、真値と推計値に若干の差異が生じる理由として、真値ではFDが確率変動しているが、VTでは同一のFDを設定していること、また、計測データをBoundaryとして設定する際に、離散化した探索ネットワーク上で近似していることが挙げられる。

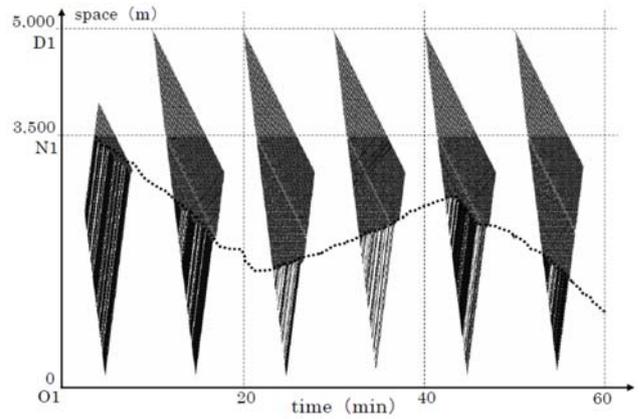


図-11 推計結果 (Case1, a:対向観測のみ)

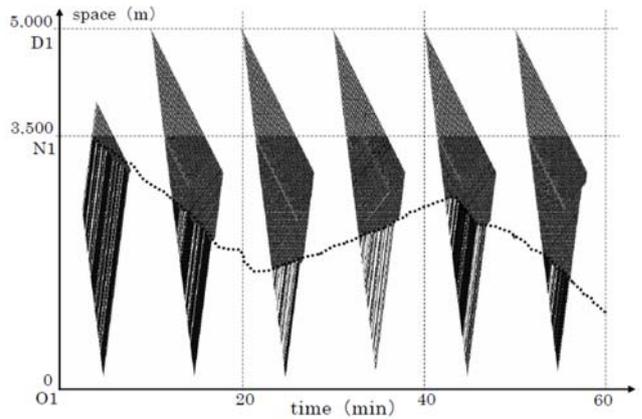


図-12 推計結果 (Case1, b:対向観測+プローブ)

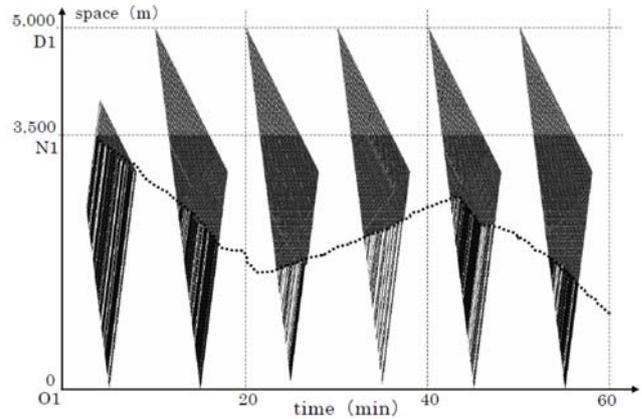


図-13 推計結果 (Case1, c:定点観測+プローブ)

表-5 平均速度の真値と推計値 (Case1)

平均速度 [km/h]						
領域	①	②	③	④	⑤	⑥
真値	49.3	21.2	14.7	16.5	21.9	15.8
a:対向観測のみ	48.6	20.4	14.1	15.4	20.8	15.3
b:対向観測+プローブ	48.6	20.8	14.2	15.8	21.5	15.4
c:定点観測+プローブ	48.9	21.5	14.8	16.6	22.0	15.9
真値との差分 [km/h]						
領域	①	②	③	④	⑤	⑥
真値	-	-	-	-	-	-
a:対向観測のみ	-0.7	-0.8	-0.5	-1.1	-1.2	-0.5
b:対向観測+プローブ	-0.7	-0.4	-0.4	-0.8	-0.4	-0.5
c:定点観測+プローブ	-0.4	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1

Case2: 途中流入交通あり

続いてCase2の推計結果を示す。ここでは(a)対向観測データのみ使用、(b)対向観測データに加えてプローブ車両データを使用、の2ケースの推計結果を図14～図15に示す。これを見ると、途中流入交通がある場合においても、真の交通状態の渋滞末尾を概ね近似していることがわかる。これは、合流地点における流入後の交通流を計測した対向観測データを用いているため、この推計範囲において流入交通の影響を受けていないためと考えられる。さらに、推計可能領域の平均速度について真値と比較した結果を表-6に示す。これを見ると、(a)対向観測データのみの場合には走行速度を過大に評価しているが、(b)プローブ車両データを併用した場合は、プローブ車両軌跡により推計値が更新されるため、推計精度が(a)よりも改善されている。

ここまで見てきたとおり、提案手法によって、途中流入交通の有無に関わらず渋滞末尾の位置を高い精度で再現できた。また、平均速度の推計において、途中流入交通の影響について定点観測に対する優位性があることが分かった。

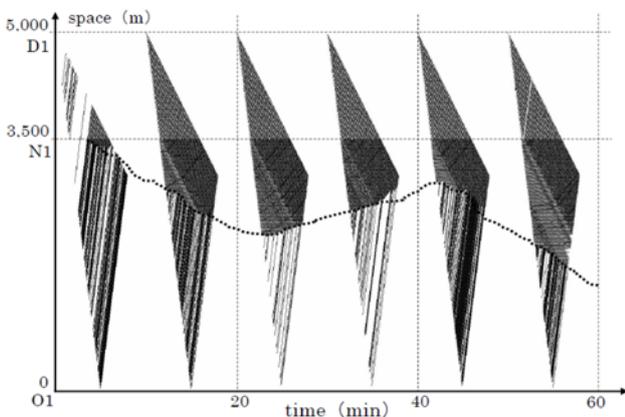


図-14 推計結果 (Case2, a:対向観測のみ)

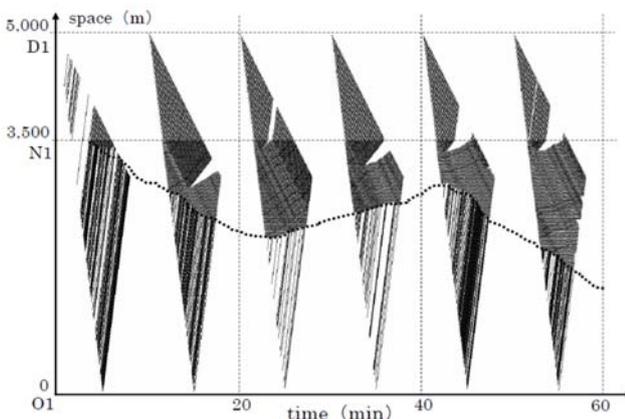


図-15 推計結果 (Case2, b:対向観測+プローブ)

表-6 平均速度の真値と推計値 (Case2)

平均速度 [km/h]						
領域	①	②	③	④	⑤	⑥
真値	48.7	16.1	10.3	12.9	17.6	8.3
a:対向観測のみ	54.8	20.6	12.0	16.4	23.4	10.7
b:対向観測+プローブ	55.1	19.2	10.7	13.9	17.6	8.7

真値との差分 [km/h]						
領域	①	②	③	④	⑤	⑥
真値	-	-	-	-	-	-
a:対向観測のみ	6.1	4.5	1.7	3.5	5.8	2.4
b:対向観測+プローブ	6.4	3.1	0.4	1.0	0.0	-0.2

4. 実走行データにおける提案手法の適用

(1) 真とする交通状況データの観測

提案手法の検証用に実道上でデータを計測するにあたり、ある一定の道路区間（以下、対象区間）と時間帯（以下、対象時間）を設定し、その範囲で boundary の生成元となる(1)プローブ車両の走行軌跡、(2)対向観測車両の走行軌跡と車両計測情報を収集した。これらは同一の計測装置を搭載した複数の車両（以下、計測車両）が対象区間を往復することで、併せて収集する。同時に、真の交通状況として比較するために、対象区間に計測地点を設定し、(3)定点観測による車両計測情報を収集した。さらに、推定に対する外乱の影響を把握するために、(4)他道路と交差・分合流する地点における流出入台数を計測した。

なお、本研究において道路交通調査を実施した、路線・区間・日時を表-7に示す。また、対象区間をOpenStreetMap上に表したものを図-16に示す。

調査結果の概要について以下に整理する。なお、本稿では、観測当日に渋滞が発生していた南行き（真野IC→坂本北IC）方向の道路交通状況を整理対象とした。

はじめに、プローブ車両並びに対向観測車両の車両軌跡を図-17に示す。プローブ車両の軌跡をみると、7:30-9:00及び16:30-19:30頃にかけて、一部区間において速度低下が発生していたことが分かる。

また、定点及び分合流部の時間交通量（図-18、図-19参照）をみると、雄琴ICにおける流入交通量が、流出交通量を上回り、雄琴ICより下流側の定点3において交通量が増加している状況が把握できる。なお、現地の観測では、雄琴ICの合流部がボトルネックとなり渋滞が生じていたことが、ビデオ映像で確認されている。

表-7 調査対象時間・区間

項目	内容
対象時間	2016年8月23日(火) 7:00~10:30, 16:00~20:00
対象区間	一般国道161号線(湖西道路) 坂本北IC~真野IC 片側1車線の自動車専用道路



図-16 調査対象路線図

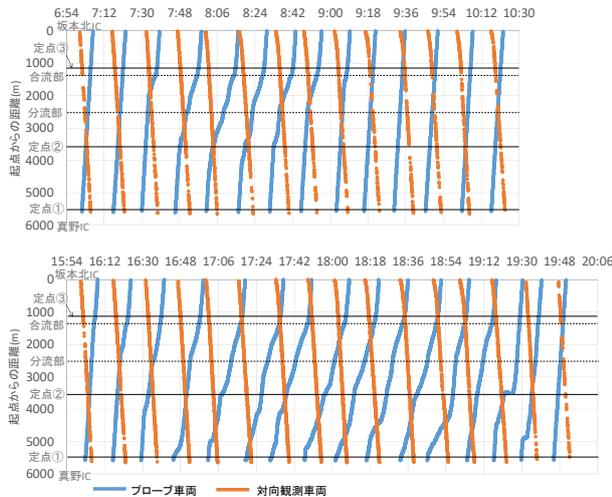


図-17 観測車両の走行軌跡(南行き)

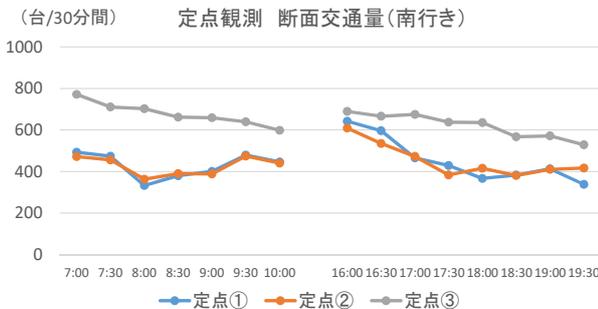


図-18 定点観測による断面交通量(南行き)

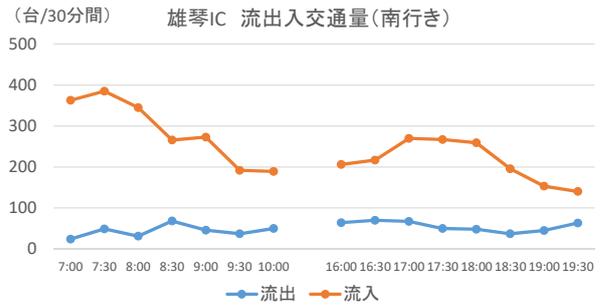


図-19 雄琴ICにおける流出入交通量(南行き)

表-8 VTの算定条件

項目		設定値
タイムステップ: Δt		1 [sec]
FD 高さ: Δx		3.38 [m]
FD 条件	交通容量: q_{max}	通常部 1,600 [veh/h] ボトルネック部 1,100 [veh/h]
	Forward wave の伝搬速度: v	60 [km/h]
	Backward wave の伝搬速度: w	15 [km/h]

(2) 提案手法の適用結果

観測した真の交通状態に対し、提案手法を適用し、計測車両より得られた観測データに基づき、VT を用いて交通状態を推計する。なお、交通状態の推定に用いた VT の算定条件を表-8 に示す。ここで、観測センサの組合せによる結果の差異をみるために、(a)対向観測データのみ使用、(b)対向観測データに加えてプローブ車両データを使用、の2ケースを実施した。

観測値に対する推計値の評価方法を以下に整理する。両者の比較に用いる評価指標には、定点観測断面における交通流率(時間当たり交通量)を採用する。

本稿では VT の計算対象時間帯を 17:00 から 19:30 とした。なお、この時、定点2及び定点3において推計可能である時間領域は図-11 の様に示される。この場合、推計可能領域は時間的に不連続となるため、個々の時間領域(①~⑩)において観測値と推計値を比較する。

図-11 によると、定点2では、(a)と(b)で推計可能な時間領域は共通となるが、定点3では、(b)の推計可能な時間領域は、(a)よりも長くなる事が分かる。

交通流率について観測値と推計値を比較した結果を表-9及び表-10に示す。

a) 対向観測車両データのみ使用

対向観測車両データのみを用いた場合、定点2の結果をみると、推計領域10組のうち、誤差率 $\pm 20\%$ 以上の領域は5組(N_e1,5,7,8,10)となった。また、定点3の結果をみると、誤差率 $\pm 20\%$ 以上の領域は1組(N_e8)となった。

b) 対向観測車両データ+プローブ車両軌跡データ

対向データに加えてプローブ車両軌跡を用いた場合、

定点 2 の結果をみると、推計領域 10 組のうち、誤差率 ±20%以上は 2 組 (№1,5) となった。また、定点 3 の結果をみると、誤差率±20%以上は 1 組 (№5) となった。

ここで、定点 3 において(a)よりも誤差率が増加する領域が存在するが、これは、プローブ車両軌跡により推計領域が拡大したこと、及び拡大した推計領域の中に、後述する途中流出入交通の影響を受ける領域が含まれることによるものと推察される。

今回の推計結果をみると、定点 3 の推計結果については、各 Case とも一定精度の結果を得ることができた。また、定点 2 についても、(b)の様子にプローブ車両軌跡データを Boundary 条件として組み合わせて使うことで、推計精度の向上が図られることが確認できた。定点 3 において定点 2 よりも誤差率が抑制された理由は、定点 3 が分流地点および合流地点の下流に位置し、流出入後の交通流を計測した対向観測データを用いて推計できているためと考えられる。

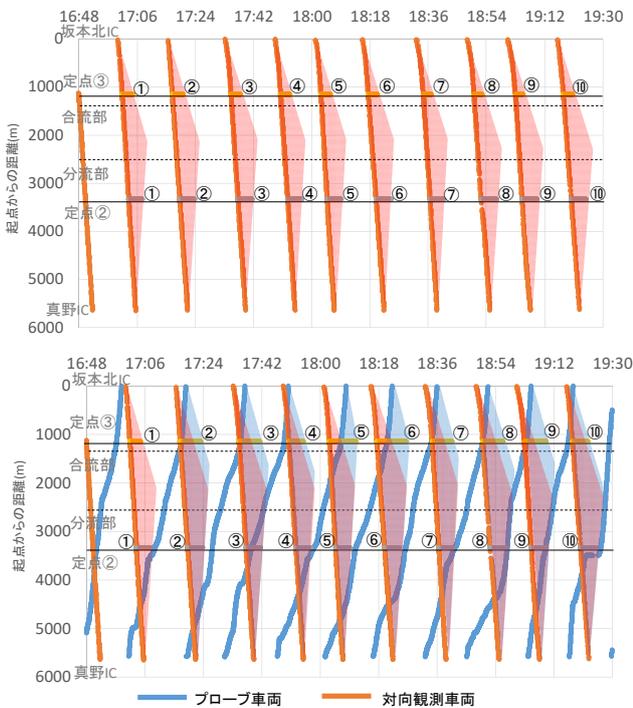


図-11 評価対象とする時間領域

(上段：(a)対向観測データのみ、

下段：(b)対向観測データ+プローブ車両データ)

表-10 交通流率の真値と推計値 (定点3)

交通流率 [台/h] と 誤差率 [%]										
領域	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
真値	1410	1500	1212	1245	1314	1304	1124	1068	1129	1123
a	-9	-17	2	2	-5	-2	9	24	19	13
b	-9	-16	-7	-7	-23	-13	-1	4	2	9

5. 途中流出入に関する考察

今回の推計結果について、観測値との誤差が発生した主な要因の一つとして、区間途中の流出入交通量を考慮しなかったことが挙げられる。図-6において、ある対向車線観測データとプローブ車両軌跡データが Boundary 条件として与えられた時の推計可能領域を示したが、これに対して、地点 A において途中流出入交通が発生した場合、途中流出入交通の影響を受ける推計領域は図-12 の様に示すことができる。

しかし、言い換えると、今回の提案手法は、途中流出入交通が存在したとしても、ある推計領域においては影響を受けないことから、従来の路側の車両感知器データを Boundary 条件として使用する推計手法と比較して、この点に関しては長所を有する。例えば、対向観測車両による図中の赤矢印区間の計測は、地点 A における流入流出後の交通流を計測できており、この観測のみによって赤枠三角形の領域の推定ができる。このように、対向観測車両データには、定点の車両感知器では得られない情報を持っているという優位性がある。

なお、途中流出入交通により受ける影響の大きさについては、流出入のタイミング、台数、流出入地点からの距離によって変化するため一概には言えないが、実際の路線への適用に際しては、課題となるところである。

また、観測値との誤差が発生する要因として、この他に、本研究のテーマではないが、ボトルネック部の存在やドライバー個人の FD 変動等が挙げられ、推計結果を見る際にはこれらの影響も考慮する必要がある。

表-9 交通流率の真値と推計値 (定点2)

交通流率 [台/h] と 誤差率 [%]										
領域	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
真値	997	833	799	668	1013	835	621	776	1018	273
a	-30	-3	-8	-2	-21	11	27	41	-15	195
b	-30	-3	5	-2	-21	13	16	16	-1	14

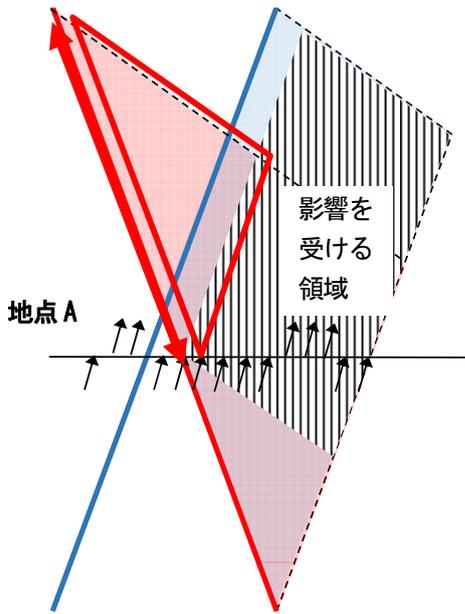


図-12 途中流出入交通の影響を受ける領域

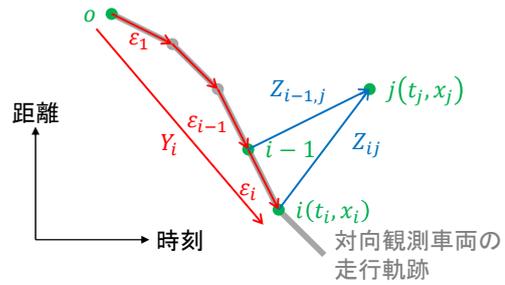


図-13 解析対象

6. 提案手法における推定誤差の解析

(1) 解析の概要

提案手法を実際の交通流に適用することを考えると、ドライバーの運転挙動や端末交通量といった入力条件のばらつきによる影響を考慮する必要がある。本節では、対向観測車両の1回の走行から得られる Boundary 条件を用いた推定を対象に、入力条件の確率変動が推定結果に与える影響を解析的に明らかにする。

提案手法における探索ネットワーク上に解析対象を図示したものを下図に示す。ここでは、Boundary の始点を原点ノード o とし、 o から任意のノード(対象ノード j)までの累積交通量を解析する。対象ノード j の累積交通量は原点ノード o から j までの最小経路費用として算出されるため、 o から j までの最小経路費用がとる確率変動を求め、その期待値を計算する。

対象ノード j に到達可能な経路候補のうち、ある Boundary 上のノード(Boundary ノード i)を経由する最短経路は唯一に決めることができるので、経由する Boundary ノード毎に最小費用を算出する。ここで、対象ノード j に到達可能な経路が経由する可能性のある Boundary ノードの集合を $\Omega_j : \{1, 2, 3, \dots, n_j\}$ と定義する。原点ノード o から Boundary ノード i を経由して対象ノード j まで到達する経路を、Boundary 上の部分経路(o から i まで、下図の赤線)と内部の部分経路(i から j まで、下図の青線)に分類し、それぞれの最小費用を算出する。さらに、これらの部分経路を合わせた全体経路を最短経路として選択する確率を解析する。

(2) Boundary上の部分経路の最小費用

需要変動や対向観測車両が搭載する車載センサの検知誤差による対象区間の端末交通量の変動は、Boundary 上における変動として考えられる。このことから、これらの変動は Boundary 上の部分経路における最小費用 Y_i の変動として扱える。ここで、対向観測車両が生成する Boundary は、時間軸上で単調増加(空間軸上では逆方向に進むため単調減少)するため、 Y_i の確率分布は独立ではなく互いに相関を持つ。すなわち、 $t_i > t_k$ であれば $x_i \leq x_k$ であり、 $Y_i \geq Y_k$ でなければならない。また、需要変動や検知誤差は過去の変動が累積して次の変動に影響を与える。これらのことから、ノード $i-1$ からノード i までの変動成分を含む交通量を ε_i (ただし $i \in \Omega_i$) を考える。 ε_i の確率分布は再生性のある独立同一分布 (independent identical distribution, iid) であると仮定する。また、この確率分布の期待値および分散を、 μ_{ε_i} および $\sigma_{\varepsilon_i}^2$ と定義する。再生性のある確率分布としては、ポワソン分布 (Poisson distribution)、正規分布 (Normal distribution) などがあり、以降では正規分布を例にとって記述する。

$$\varepsilon_i \sim iid N(\mu_{\varepsilon_i}, \sigma_{\varepsilon_i}^2) \quad (9)$$

この時、 Y_i は ε_i の和として表すことができ、下式に示す期待値 μ_{Y_i} 、分散 $\sigma_{Y_i}^2$ の正規分布に従う。

$$Y_i = \sum_{k=1}^i \varepsilon_k \sim iid N(\mu_{Y_i}, \sigma_{Y_i}^2) \quad (10)$$

$$\mu_{Y_i} = \sum \mu_{\varepsilon_i} \quad (11)$$

$$\sigma_{Y_i}^2 = \sum \sigma_{\varepsilon_i}^2 \quad (12)$$

(3) 内部の部分経路の最小費用

運転挙動のばらつきによる車両軌跡の変動は、ネットワークの内部における変動として考えられる。このことから、これらの変動は内部の部分経路における最小費用 Z_{ij} の変動として扱える。一般に、Boundary ノード i から対象ノード j への累積交通量の変化は、次のように書ける。

$$Z_{ij} = \int_{t_i}^{t_j} \sup_{k(x,t)} (q(k(x,t), x) - k(x,t)u(x,t)) dt \quad (13)$$

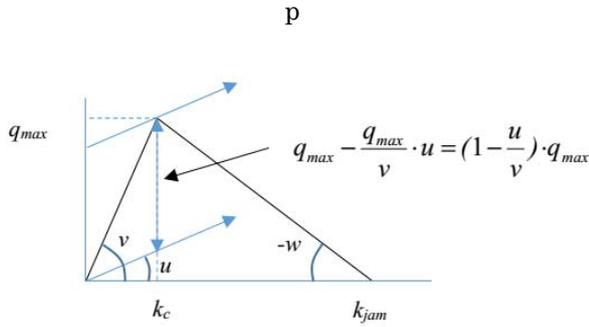


図-14 線形のFD

ここで、図-14の通り、Forward Wave と Backward Wave が線形で表される FD を仮定する。ここで、Boundary ノード*i*経由の経路における最大交通流率および臨界交通密度を、 q_{max}^{ij} および k_c^{ij} と定義する。

q_{max}^{ij} および k_c^{ij} は、それぞれが正規分布に従い、他の Boundary ノード経由の経路における最大交通流率および臨界交通密度と IID であると仮定する。ここで、 q_{max}^{ij} の期待値および分散を μ_q および σ_q^2 と定義し、 k_c^{ij} の期待値および分散を μ_k および σ_k^2 と定義する。

$$q_{max}^{ij} \sim iid \ N(\mu_q, \sigma_q^2) \quad (14)$$

$$k_c^{ij} \sim iid \ N(\mu_k, \sigma_k^2) \quad (15)$$

この時、 Z_{ij} は下式に示す期待値 $\mu_{Z_{ij}}$ 、分散 $\sigma_{Z_{ij}}^2$ の正規分布に従う。

$$Z_{ij} = \int_{t_i}^{t_j} q_{max}^{ij} \left(1 - \frac{u}{v}\right) dt = q_{max}^{ij} \left(1 - \frac{u}{v}\right) (t_j - t_i)$$

$$= q_{max}^{ij} (t_j - t_i) - k_c^{ij} (x_j - x_i) \sim iid \ N(\mu_{Z_{ij}}, \sigma_{Z_{ij}}^2) \quad (16)$$

(4) 経路費用の最小値分布

原点ノード *o* から Boundary ノード *i* を通って対象ノード *j* まで行く経路の累積交通量 U_{ij} は次式のように表せる。

$$U_{ij} = Y_i + Z_{ij} \quad (17)$$

よって、全ての経路費用の最小値分布は次のように書ける。

$$P(\min PathCost > n)$$

$$= P(U_0 > n, U_1 > n, \dots, U_i > n)$$

$$= P(Y_0 + Z_{0j} > n, Y_1 + Z_{1j} > n, \dots, Y_i + Z_{ij} > n) \quad (18)$$

7. 提案手法における推定誤差の近似計算

(1) 近似計算の概要

前節で導出した最小値分布は、 Y_0, Y_1, \dots, Y_i の確率変動が互いに相関があるため、解析的に求めるのは困難である。そこで、Clark 近似法を用いることで累積交通量の期待値と標準偏差を求める。

Clark 近似法は Clark によって提案された近似計算法であり、二つの多変量正規分布に従う確率変数の最大値を新たな多変量正規分布に従う確率変数として近似するという手法である。この手法では、各確率変数の期待値および分散から 2 つの確率変数の共分散および相関係数を算出し、これらに基づいて複数の確率変数の相関係数と最大値を再帰的に求める。本章では、確率変数 X の期待値および分散を $E(X)$ および $V(X)$ と書き、2 つの確率変数 X と Y の共分散および相関係数を $Cov(X, Y)$ および $\rho(X, Y)$ と書く。また、簡潔表現のため、添え字の j は省略する。

(2) 多変量正規分布の確認

まず、累積交通量 U_{ij} が多変量正規分布であることを示す。

式(2)と式(8)より、 ε_i と Z_{ij} は正規分布するので、iid な標準正規分布 x_{ij} および標準多変量正規分布 X を下式の通り定義できる。

$$x_{ij} = \frac{\varepsilon_i - \mu_{\varepsilon_i}}{\sigma_{\varepsilon_i}} = \frac{Z_{ij} - \mu_{Z_{ij}}}{\sigma_{Z_{ij}}} \sim iid \ N(0, 1) \quad (19)$$

$$X = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij})^t \quad (20)$$

よって U_{ij} は次のように標準多変量正規分布 X の線形変換で表すことができるので、多変量正規分布であり、Clark 近似の適用が可能である。

$$U_{ij} = AX + C \quad (21)$$

Where

$$A = \begin{pmatrix} \sigma_{\varepsilon_1} + \sigma_{Z_{1j}} & 0 & \dots & 0 \\ \sigma_{\varepsilon_1} & \sigma_{\varepsilon_2} + \sigma_{Z_{2j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\varepsilon_1} & \sigma_{\varepsilon_2} & \dots & \sigma_{\varepsilon_i} + \sigma_{Z_{ij}} \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$X = \begin{pmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \vdots \\ x_{ij} \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$C = \begin{pmatrix} \mu_{\varepsilon_1} + \mu_{Z_{1j}} \\ \mu_{\varepsilon_1} + \mu_{\varepsilon_2} + \mu_{Z_{2j}} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^i \mu_{\varepsilon_{1k}} + \mu_{Z_{ij}} \end{pmatrix} \quad (24)$$

(3) 相関係数の算出

期待値および分散が既知である 2 つの確率変数の相関係数の求め方を以下に示す。

$0 < \varepsilon_{ik}$ の時、確率変数 U_i と U_{i-k} の共分散 $Cov(U_i, U_{i-k})$ は以下のように表せる。

$$E(U_i, U_{i-k}) = E(Y_i + Z_i)(Y_{i-k} + Z_{i-k})$$

$$= E(Y_{i-k} + \varepsilon_{ik} + Z_i)(Y_{i-k} + Z_{i-k})$$

$$\begin{aligned}
 &= E(Y_{i-k}Y_{i-k}) + E(Y_{i-k})E(Z_{i-k}) + E(\varepsilon_{ik})E(U_{i-k}) \\
 &\quad + E(Z_i)E(U_{i-k}) \\
 &= V(Y_{i-k}) + E(Y_{i-k})E(Y_{i-k}) + E(Y_{i-k})E(Z_{i-k}) \\
 &\quad + E(\varepsilon_{ik})E(U_{i-k}) + E(Z_i)E(U_{i-k}) \\
 &= V(Y_{i-k}) + E(Y_{i-k})E(U_{i-k}) \\
 &\quad + E(\varepsilon_{ik})E(U_{i-k}) + E(Z_i)E(U_{i-k}) \\
 &= V(Y_{i-k}) + E(U_i)E(U_{i-k}) \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Cov(U_i, U_{i-k}) &= E(U_i, U_{i-k}) - E(U_i)E(U_{i-k}) \\
 &= V(Y_{i-k}) \quad (26)
 \end{aligned}$$

これにより, $Y_{i-k} < Y_i$ の時, 確率変数 U_i と U_{i-k} の相関係数 $\rho(U_i, U_{i-k})$ は以下のように算出できる.

$$\begin{aligned}
 \rho(U_i, U_{i-k}) &= \frac{Cov(U_i, U_{i-k})}{\sqrt{V(U_i)}\sqrt{V(U_{i-k})}} \\
 &= \frac{V(Y_{i-k})}{\sqrt{V(Y_i + Z_i)}\sqrt{V(Y_{i-k} + Z_{i-k})}} \\
 &= \frac{V(Y_{i-k})}{\sqrt{V(Y_i + Z_i)}\sqrt{V(Y_{i-k} + Z_{i-k})}} \quad (27)
 \end{aligned}$$

(4) 最大値の再帰計算

Clark は多変量正規分布に従う U_1, U_2 を考えるとき, 確率変数 $Max(U_2, U_1)$ の 1 次モーメント α_{12} および 2 次モーメント β_{12} が式(28)と式(29)のように求まることを示した.

$$\alpha_{12} = E(U_1)\Phi(\gamma) + E(U_2)\Phi(-\gamma) + c\phi(\gamma) \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{12} &= (E(U_1)^2 + V(U_1))\Phi(\gamma) \\
 &\quad + (E(U_2)^2 + V(U_2))\Phi(-\gamma) \\
 &\quad + (E(U_1) + E(U_2))c\phi(\gamma) \quad (29)
 \end{aligned}$$

Where

$$\phi(\omega) = (2\pi)^{-(1/2)} \exp\left(\frac{-\omega^2}{2}\right) \quad (30)$$

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\omega} \phi(t) dt \quad (31)$$

$$c^2 = V(U_1) + V(U_2) - 2\sqrt{V(U_1)V(U_2)}\rho(U_1, U_2) \quad (32)$$

$$\gamma = \frac{E(U_1) - E(U_2)}{c} \quad (33)$$

上記のモーメントを用いることで $Max(U_1, U_2)$ は次の正規分布で近似することができる.

$$Max(U_2, U_1) \sim N(\alpha_{12}, \beta_{12} - \alpha_{12}^2) \quad (34)$$

また, 相関係数 $\rho(U_3, Max(U_2, U_1))$ は以下のように求まる.

$$\begin{aligned}
 \rho(U_3, Max(U_2, U_1)) \\
 &= \frac{\sqrt{V(U_1)}\rho(U_1, U_3)\Phi(\gamma) + \sqrt{V(U_2)}\rho(U_2, U_3)\Phi(-\gamma)}{(\beta_{12} - \alpha_{12}^2)^{1/2}} \quad (35)
 \end{aligned}$$

これを用いて, 確率変数 U_3 と $Max(U_2, U_1)$ に式 (30)~式(33)を適用することで, $Max(U_3, Max(U_2, U_1)) =$

$Max(U_3, U_2, U_1)$ の 1 次モーメント α_{123} および 2 次モーメント β_{123} が式(28)式(29)と同様に求まる.

$Max(U_3, U_2, U_1)$ の期待値と分散は次式のようになる.

$$\begin{aligned}
 &Max(U_3, U_2, U_1) \\
 &= Max(U_3, \max(U_2, U_1)) \sim N(\alpha_{123}, \beta_{123} - \alpha_{123}^2) \quad (36)
 \end{aligned}$$

これを U_i まで繰り返すことで, $Max(U_1, U_2, \dots, U_i)$ の期待値を求めることができる.

8. おわりに

本稿では, プローブ車両データと車両感知器データを融合活用して交通状態を推定する既往手法を応用し, 車両感知器データの代わりに対向車線を走行する車両からの計測データを用いる手法を提案した. 提案手法では Variational Theory を用い, 時空間図上の累積走行台数の Boundary 条件を構成する要素として, 対向車線を走る車両が計測した車両の時空間位置と, プローブ車両軌跡を用いる.

提案手法の有効性を評価するために, 交通マイクロシミュレーションによって生成した交通データおよび実際の道路にて観測した交通データを用い, 提案手法を適用した結果について考察した. 今後は, 提案手法の多車線区間や一般道への適用における実務上の課題を明らかにしていく.

また, 入力データの確率変動による交通状態の変化を調べるために, 対象区間の端末交通量の変動と運転挙動による FD の変動とに分割して考え, 各ノードの累積交通量の期待値と標準偏差の近似解を求める手法と, その解を利用した交通流率の変動の解析法を提示した. 今後は, 推定結果を利用する具体的なアプリケーションを定義し, 対向観測車両の走行周期や設置する計測機器に求められる計測精度を明らかにしていく.

参考文献

- 1) Carlos F. Daganzo: On the Variational Theory of Traffic Flow: Well-Posedness, Duality and Applications, *American Institute of Mathematical Sciences*, Vol. 1, No.4, pp.601-619, 2006.
- 2) Babak Mehran, Masao Kuwahara and Farhana Naznin: Implementing Kinematic Wave Theory to Reconstruct Vehicle Trajectories from Fixed and Probe Sensor Data, *19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp-247-268, 2011.