

# 対向車線の車両観測による交通モニタリング 手法の実証実験

竹之内 篤<sup>1</sup>・河合 克哉<sup>2</sup>・伊川 雅彦<sup>3</sup>・桑原 雅夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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: lkawa.Masahiko@aj.MitsubishiElectric.co.jp

<sup>4</sup>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

本研究では、車両に搭載したカメラやミリ波レーダなどによって対向車線側の交通流を計測したデータ等を用いて交通状態を推定する手法を提案する。著者らは、プローブカーデータと車両感知器データを融合活用した交通状態の推定手法の提案を行ってきた。本研究では、近年自動車に搭載が進んでいるセンサを活用した対向車線の計測データを用いることで、路側の観測機器による定点観測を代替することを目指す。本稿では、幹線道路において、対向車線より実験観測したデータに提案手法を適用した結果について考察する。

**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による高精度測位の普及、通信・道路インフラの整備、車両のIT化や車載センサの普及によってプローブカーデータとして収集できる情報の種類、量が豊富となり、交通モニタリングへの活用が期待されている。

### (2) 既往研究

Daganzo<sup>1)</sup>は、道路区間における交通流の解析手法であるKinematic Wave理論に基づき、Variational Theoryを用いて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<sup>2)</sup>は、Variational Theoryを用いてプローブカー、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交通状態として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。推定可能区間を拡げるには、感知器を増

設する必要がある、設置・維持費用が問題となる。我が国では、高速道路・主要道路を中心に車両感知器が整備されているが、整備が進んでいない新興国では適用が困難である。また、自動車メーカーなどにおいては、会員から収集したプローブ情報を用いて渋滞情報を生成・提供するサービスを展開しているが、車両感知器データが持つ量的な情報を活用できず、提供情報は限定的となる。

上記問題を解決するため本研究では、カメラやミリ波レーダなど、車両搭載センサにより対向車線側の交通流を計測し、車両感知器データの代わりに用いて交通状態を推定する手法を提案する。当手法により、プローブカーから得られるデータのみより交通状態を推定することが可能となる。

これまで、河合、竹之内ら<sup>3)</sup>は、提案手法について、対向車線の車両観測データを用いた基礎的な解析手法について整理したと共に、推定モデルとして Variational Theory(VT)モデルを使い、仮想データに提案適用し、手法の有効性を確認してきた。

本稿では、提案手法を実データに適用する際の課題を把握するため、幹線道路において、対向車線より実験観測したデータに当手法を適用した結果について考察する。

## 2. Variational Theoryの概要

縦軸が距離，横軸が時間という2次元平面はタイムスペースダイアグラムであるが，この平面に垂直に車の累積高さを表す軸を追加した3次元の空間を考える．図1のように，タイムスペースダイアグラム上で累積高さがわかっている境界をBoundaryと言う．いま，BoundaryではないP点の累積高さをNPとすると，NPはBoundary上の任意の点Bの累積高さNBと，自分がBからPまで仮想的に移動したときに追い越される最大の台数 $\Delta BP_{max}$ を用いて次のように表すことができることをDaganzoが証明している．すなわち，自分がPにアクセス可能なすべての境界上の点BからPに向かって移動した場合のNB +  $\Delta BP_{max}$ の最小値がNPとなる．ここで重要なのは，NPを評価するためには自分がPにアクセスできるすべての方向からアクセスして，その最小値を求めなければならないということである．対象道路区間のすべての位置xについてFundamental Diagramが与えられているなら，その位置におけるFundamental Diagramのwave speedの最大値( $w_{max}(x)$ )と最小値( $w_{min}(x)$ )によって，自分の移動速度の上下限值がわかるので，下図のようにアクセスできる範囲もあらかじめわかる．そして，アクセスできる範囲の境界上の点すべてについて，累積高さNBがわかっていなければならない．また，Fundamental Diagramがわかっているならば，Relative Capacity (Daganzo \*)より， $\Delta BP_{max}$ も計算できる．

$$NP = \inf_B \{NB + \Delta BP_{max}\} \quad (1)$$

for 境界上の任意の点B

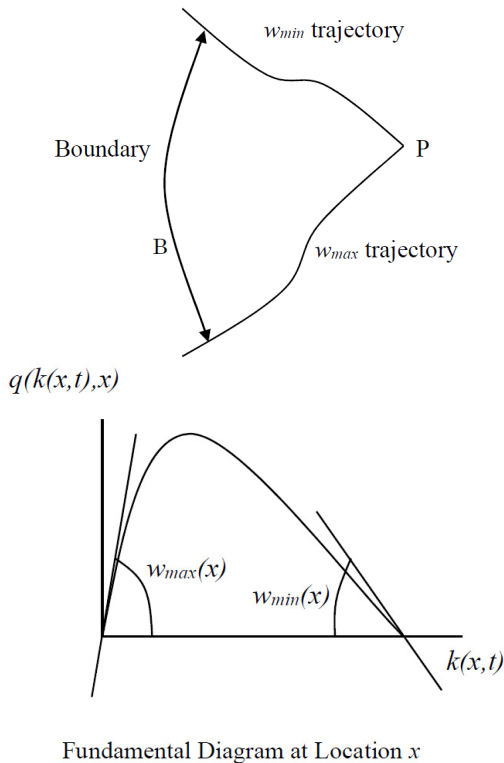


図1 移動観測者の移動範囲

## 3. 従来研究におけるVTの適用例

このVariational Theoryをプローブ車両の軌跡と車両感知器データを使って適用した例として，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，車の通過台数が計測できるので，累積高さがわかることになる．また，プローブ車両の軌跡上では累積高さは一定であるので，図2の太線のように車両感知器とプローブ軌跡によって累積高さが既知であるBoundaryが定義できる．

対象区間のFundamental Diagramがわかっているならば累積高さがわかっているP点にアクセスできる領域がわかるので，その範囲で式(1)を計算すればNPが求められる．均質なFDを持つ場合であれば，図2のようにFDのWave Speedの最大値と最小値で囲まれる太線のBoundaryのすべてから式(1)を評価すればよい．

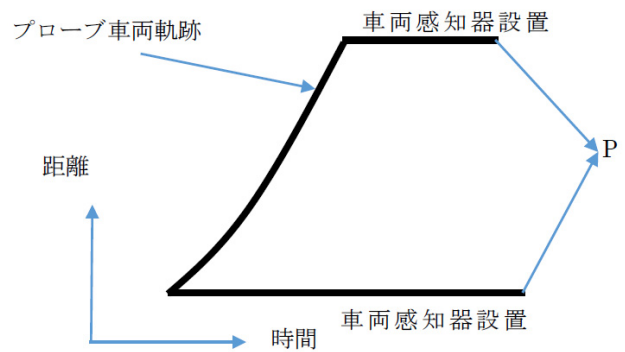


図2 車両感知器とプローブ車両軌跡によるBoundary

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．まず，時間軸を均一な微小区間に分割する．対象道路区間は線形のFundamental Diagram (図3)を持ち，Forward Wave Speedをv, Backward Wave Speedを-wとする(簡単のために，全区間同じFDを持つと仮定)．図4のように，離散化した時間軸においてごとにWave Speed vと-wの傾きをもつ線を書き，これらの線の交点をノード，ノード間をつなぐ有向リンクとするネットワークを構成する．リンクコストは，Forward Wave Speedの傾きを持つ場合にはゼロ，Backward Wave Speedの傾きを持つ場合はとする．このようなネットワークをタイムスペース上に構成した場合，任意のノードの累積高さは原点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．

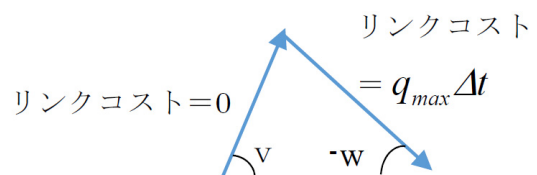


図3 Fundamental Diagram

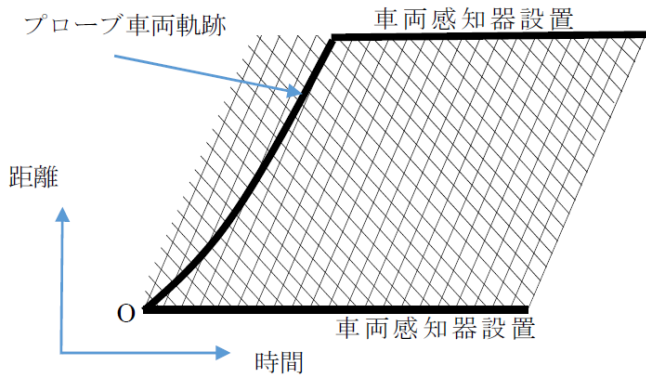


図4 タイムスペース上のネットワーク

#### 4. 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(図4), 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計測データを用いる. 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理論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.

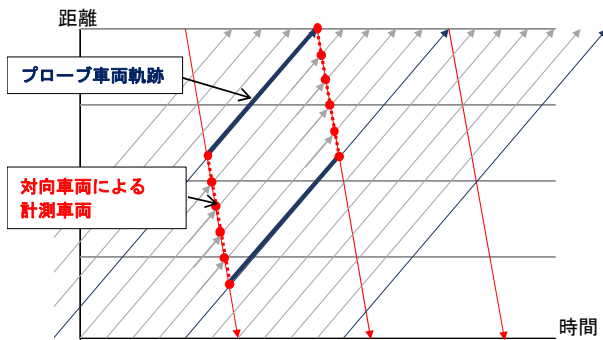


図5 本研究におけるBoundary

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 $L_0$ , 対向観測車両の走行速度を $v_0$ 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.

$$C2 = \left[ t_1 + \frac{L_0}{v_0}, x_1 - L_0 \right] \dots \dots \dots (2)$$

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

$$L_1 = \frac{w(v_0 + v)}{v_0(w + v)} L_0 \dots \dots \dots (3)$$

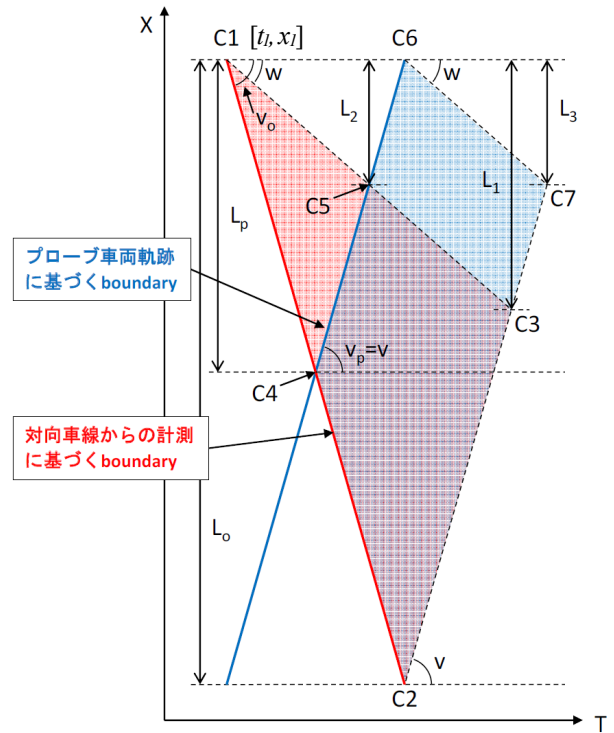


図6 VTによる推計可能領域

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)とした場合, 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.

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

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

$$L_2 = \frac{w(v_0 + v)}{v_0(w + v)} L_p \dots \dots \dots (5)$$

さらに, プローブ車両軌跡を地点 $x$ 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

$$C6 = \left[ t_1 + \frac{v_0 + v}{v_0 v} L_p, x_1 \right] \dots \dots \dots (6)$$

$$C7 = \left[ t_1 + \frac{v_0 + v}{v_0 v} L_p + \frac{L_3}{w}, x_1 - L_3 \right]$$

$$L_3 = \frac{w(v_0 + v)}{v_0(w + v)} (L_0 - L_p) \dots \dots \dots (7)$$

なお, 6章では, 本章で整理した関係式を用いて可能領域の座標を求め, 観測値と実測値の比較を行っている.

## 5. 実道におけるデータ観測調査

### (1) 調査概要

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(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1に示す。また、対象区間をOpenStreetMap上に表したものを図7に示す。

表1 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8 調査対象路線図

### (2) 調査結果

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8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9, 図10参照)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、ビデオ映像において確認されている。

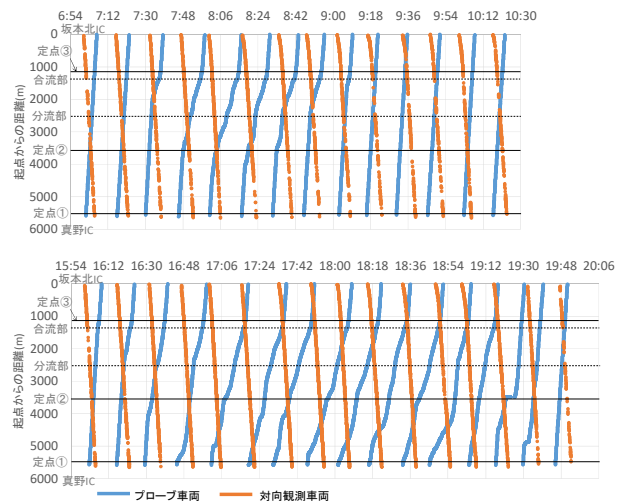


図8 観測車両軌跡(南行き)

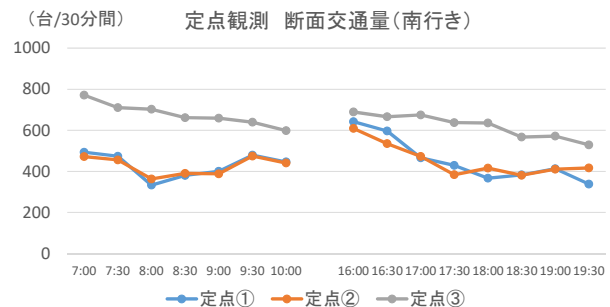


図9 定点観測 断面交通量(南行き)

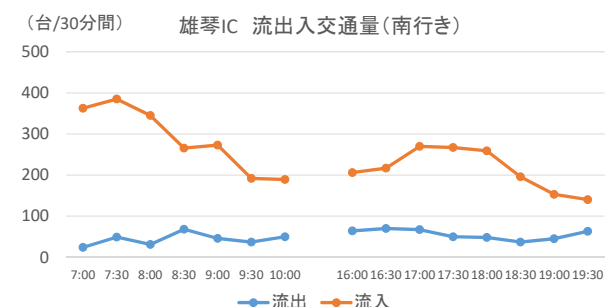


図10 雄琴IC 流出入交通量(南行き)

## 6. 観測データに対する提案手法の適用

### (1) 推計条件

5章において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2に示す。

表2 Variational Theoryの算定条件

項目		設定値
タイムステップ		1秒
FD高さ		3.38m
FD条件	交通容量 : Qmax (ボトルネック部)	1,600台/h (1,100台/h)
	Forward wave speed :V	65km/h
	Backward wave speed :W	15km/h

また、本稿では、VTの境界条件の与え方により、2つの推計ケースを設定した(表3参照)。

表3 推計ケース設定

ケース 1	対向観測車両データのみ
ケース 2	対向観測車両データ+プローブ車両軌跡データ

## (2) 評価方法

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の様に表示される。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、Case1とCase2で推計可能な時間領域は共通となるが、定点3では、Case2の推計可能な時間領域は、Case1よりも長くなることが分かる。

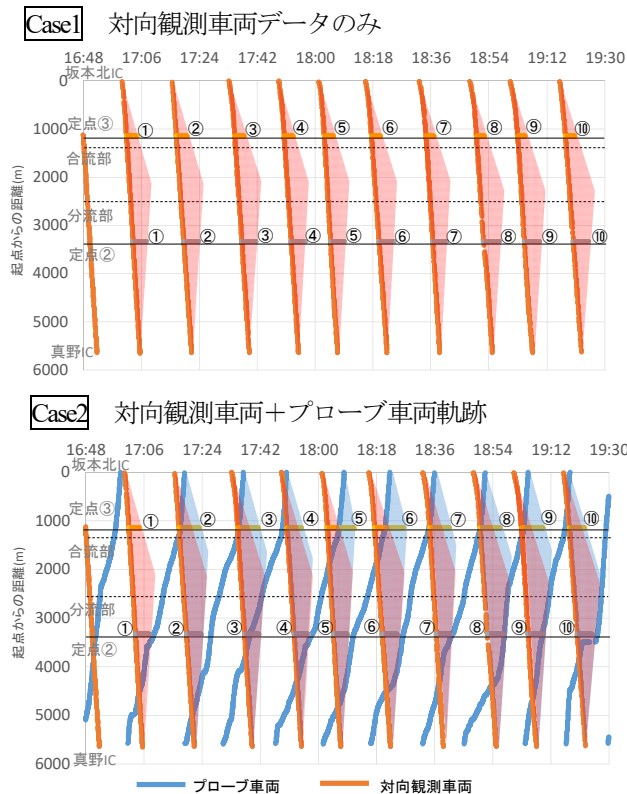


図11 評価対象とする時間領域

## (3) 推計結果

前項に示した方法に従い、交通流率について観測値と推計値を比較した結果を表4及び表5に示す。

### 1) Case1 : 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±20%以上の領域は5組(No.1,5,7,8,10)となった。また、定点3の結果をみると、誤差率±20%以上の領域は1組(No.8)となった。

表4 観測値と推計値との比較 (Case1)

領域No.	交通流率 観測値 (台/hr)	推計値		交通流率 観測値 (台/hr)	推計値	
		(台/hr)	誤差率(%)		(台/hr)	誤差率(%)
1	997	702	△ 30	1,410	1,282	△ 9
2	833	806	△ 3	1,500	1,250	△ 17
3	799	731	△ 8	1,212	1,233	2
4	668	654	△ 2	1,245	1,265	2
5	1,013	804	△ 21	1,314	1,254	△ 5
6	835	926	11	1,304	1,283	△ 2
7	621	791	27	1,124	1,221	9
8	776	1,096	41	1,068	1,329	24
9	1,018	864	△ 15	1,129	1,344	19
10	273	806	195	1,123	1,271	13

※網掛けは誤差率±20%以上

### 2) Case2 : 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(No.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(No.5)となった。

ここで、定点3においてCase1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。

表5 観測値と推計値との比較 (Case2)

領域No.	交通流率 観測値 (台/hr)	推計値		交通流率 観測値 (台/hr)	推計値	
		(台/hr)	誤差率(%)		(台/hr)	誤差率(%)
1	997	702	△ 30	1,410	1,282	△ 9
2	833	806	△ 3	1,398	1,172	△ 16
3	799	840	5	1,247	1,153	△ 7
4	668	654	△ 2	1,293	1,200	△ 7
5	1,013	804	△ 21	1,321	1,016	△ 23
6	835	939	13	1,231	1,071	△ 13
7	621	720	16	1,190	1,180	△ 1
8	776	899	16	1,132	1,180	4
9	1,018	1,006	△ 1	1,152	1,170	2
10	273	312	14	1,094	1,196	9

※網掛けは誤差率±20%以上

## (4) 考察

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、Case2の様にプローブ車両軌跡データを境界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。

なお、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境界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の様を示すことができる。

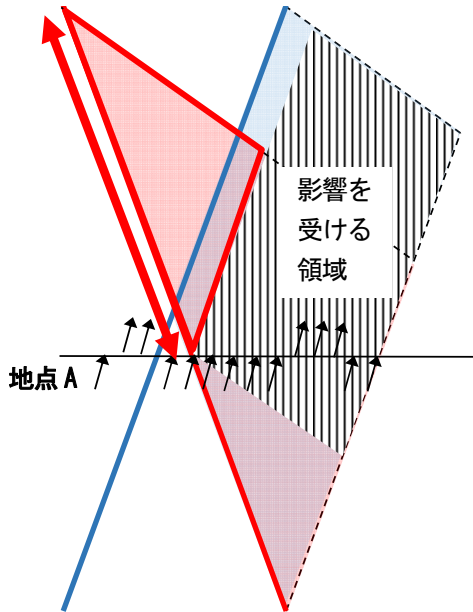


図12 途中流出入交通の影響を受ける領域

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境界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。

## 7. おわりに

本稿では、Variational Theoryを用い、プローブカー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について、提案手法を実データに適用する際の課題を把握するため、幹線道路において、対向車線より実験観測したデータに当手法を適用した結果について考察した。今後は、計測機器の誤差が推計結果に与える影響を解析的に分析し、対向車両に設置する計測機器に求められる計測精度を明らかとすると共に、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たい。

また、対向観測車両データより境界条件を設定する際に、本稿では観測車両の車両軌跡に沿って累積台数を設定したが、仮想の車両感知器を想定したある断面の累積台数に置き換えることで、境界条件の数を増やすことが可能となる。もっとも、ある断面の累積台数は観測値ではなく、仮値となるため、VTを用いて推計するには状態空間モデルの枠組みを用いる等の工夫が必要であり、今後は、今回の提案手法の拡張を併せて検討したい。

謝辞：本研究は、三菱電機株式会社との「交通管制システムにおけるプローブ活用検討」プロジェクト及び、一般社団法人交通工学研究会との「交通管制のための交通状況と交通需要の推定技術」プロジェクトとの協力を得たものである。両者ともここに記して感謝の意を表したい。

## 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.
- 3) 河合 克哉, 伊川 雅彦, 竹之内 篤, 桑原 雅夫: 対向車線の車両観測による交通状態のモニタリング手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, 第53回土木計画学研究発表会, 2016.6
- 4) 河合 克哉, 伊川 雅彦, 竹之内 篤, 桑原 雅夫: 対向車線の車両観測による交通状態のモニタリング手法へのVariational Theoryモデルの適用, 第14回ITSシンポジウム, 2016.11

## Demonstration experiment of traffic monitoring method from observation of opposed lane traffic

Atsushi TAKENOUCI, Katsuya KAWAI, Masahiko IKAWA and Masao KUWAHARA