

交通流変分理論の最適化問題への緩和による プローブ車両データからの交通状態推定に関する基礎的考察

Traffic Flow Estimation with the Relaxation of Variational Theory into an Optimization Problem

○堀口 良太¹, 桑原 雅夫²
○Ryota HORIGUCHI¹ and Masao KUWAHARA²

本研究は、ある区間を走行するプローブ車両の時空間軌跡情報から、当該区間での時空間交通状態を推定する手法の理論的な枠組みを考察するものである。これは、交通量センサが設置されていない区間や、災害時にセンサがダメージを受けて情報が得られない場合でも、各種の通信手段でプローブ車両の軌跡情報が得られれば、それを元にどのような交通状態になっているかを推定し、適切な交通運用施策の実施に役立てることを目的としている。論文では、Daganzo が提唱する交通量変分理論(VT: variational theory)を最適化問題に緩和してやることで、プローブ軌跡を境界条件としてではなく、制約条件として扱うことで、現実的なプローブデータへの適用性改善を試み、数値実験を通して、VT を応用した交通状態推定に関する基礎的な考察を行う。

Keywords: 交通状態推定, 交通量推定, variational theory, kinematic wave theory, プローブデータ

1. はじめに

本研究は、ある区間を走行するプローブ車両の時空間軌跡情報から、当該区間での時空間交通状態を推定する手法の理論的な枠組みを考察するものである。これは、交通量センサが設置されていない区間や、災害時にセンサがダメージを受けて情報が得られない場合でも、各種の通信手段でプローブ車両の軌跡情報が得られれば、それを元にどのような交通状態になっているかを推定し、適切な交通運用施策の実施に役立てることを目的¹⁾としている。

本稿では、交通状態を時空間上の任意の点における累積交通量の高さを与える3次元曲面で表現する。Daganzo は、交通量の出入がない区間で交通量保存則と FIFO 原則を仮定したとき、三角形近似された交通量-密度関数

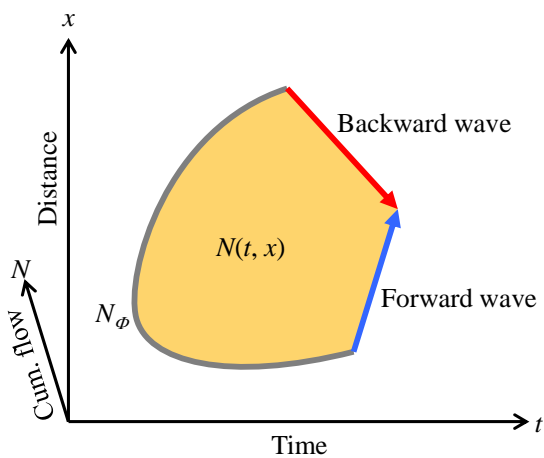


図1 交通量変分理論での交通状態推定範囲

に従う交通流に対して、時空間での任意の境界線 ϕ 上の累積交通量高さ N_ϕ を境界条件として、図1のように境界端部から 前進波(FW: Forward wave)と 後退波(BW: Backward wave)で進む軌跡が交わるまでの範囲の累積交通量を求める「交通量変分理論(VT: variational theory)」²⁾を提唱している。この境界条件は、交通量センサやプローブ軌跡などから与えることができ、計測原理の異なるデータを交通流の動学理論に基づいて融合できる柔軟性を併せ持つことから、様々な応用が取り込まれている³⁾⁴⁾⁵⁾。

しかしながら、現実のプローブデータに VT を適用する場合、理論での前提が現実にそぐわず、以下のように適用性が損なわれる場面が見られる。

- ① 区間中で車両が出入りしたり、複数車線があることで、交通量保存則や FIFO 原則が成立せず、プローブ軌跡が交差したり、途中で途切れたりして、整合性のある境界条件を与えられない。
- ② プローブデータの記録方式によっては、間欠的な位置情報しか得られず、時空間で連続した境界条件が形成されない。
- ③ 複数のプローブ軌跡が得られたとしても、それぞれを独立の境界条件として、個別に交通状態を推定するしかなく、総合的な活用ができない。

このため、本研究では解析的な VT の計算手順を最適化問題に緩和してやることで、プローブ軌跡を境界条件としてではなく、制約条件として扱うことで、現実的なプローブデータへの適用性改善を試みる。

1 正会員, 博士(工学)・TOE, (株)アイ・トランスポート・ラボ
〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 3-10 e-mail: rhoriguchi@i-transportlab.jp Phone: 03-5283-8527
2 正会員, Ph.D, 東北大学大学院

以降では、VT を最適化問題として記述した上で、評価値であるエネルギー関数を最小化する数値探索の計算機実験を通して、VT を応用した交通状態推定に関する基礎的な考察を行う。

2. 交通流変分理論の最適化問題への緩和

2.1 ネットワークを用いたVTの解法

VT は時空間をネットワーク空間に離散化して、各ノードの累積交通量を求める洗練された解法⁹⁾が示されている。ネットワークにはいくつかのパターンが提案されているが、ここでは図2に示した、FW（水色の線）とBW（桃色の線）が単位時間幅 Δt で並んで交差するネットワーク構成を用いる。ここで、各FWとBWには、時刻順に添字が降られ、 i 番目のFWと j 番目のBWが交差する点（ノード）における累積交通量を $N_{i,j}$ とすると、VTでは境界条件として与えられた既知の N_ϕ に隣接するノードから、次式(1)で逐次累積交通量を求める。

$$N_{i,j} = \min(N_{i,j-1}, N_{i-1,j} + \rho\Delta x) \quad (1)$$

ここで、 ρ : ジャム密度

Δx : グリッドの単位距離（図2参照）

である。即ち、非渋滞流では右辺カッコ中の第1項によって、FWに沿った1つ上流側のノードと同じ高さの累積交通量となり、渋滞流では第2項によって、BWに沿った1つ下流側のノードから、ジャム密度で並んだ台数分だけ高い累積交通量になることを示している。また、VTで求めた累積交通量曲面の高さ n の等高線を時空間に投影したものは、 n 番目に流入した車両の走行軌跡を示している。

2.2 エネルギー関数の導入

ここで、VTで求められた交通状態に対して、以下のエネルギー関数を導入する。

(1) FWのエネルギー

式(1)は、累積交通量曲面をFWに沿って前方に進むときは、必ず勾配が0以下であることを意味している。従って、図2青矢印のFWに対して次式(2)のエネルギー E_F を導入した場合、VTで求められた交通状態では、必ず E_F は0になる。

$$E_F = \begin{cases} 0, & \dots N_{i,j} \leq N_{i,j-1} \\ (N_{i,j} - N_{i,j-1})^2, & \dots N_{i,j} > N_{i,j-1} \end{cases} \quad (2)$$

(2) BWのエネルギー

同様に、式(1)は、累積交通量曲面をBWに沿って後方に戻るときは、必ず勾配が0以上かつ $\rho\Delta x$ 以下であることを意味している。従って、図2桃色矢印のBWに対して次式(3)のエネルギー E_B を導入した場合、VTで求められた交通状態では、必ず E_B は0になる。

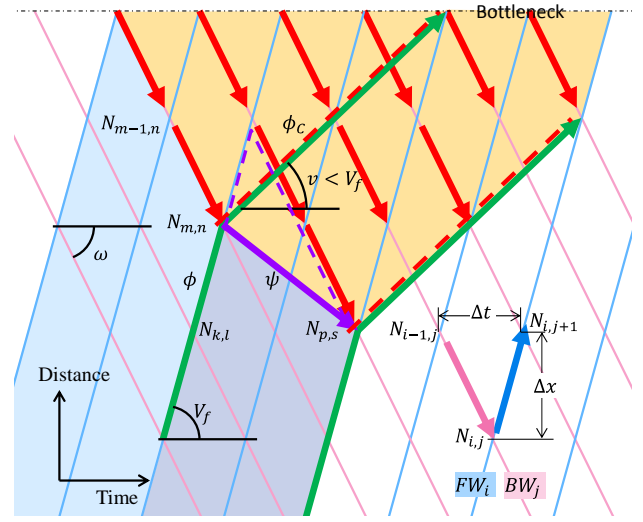


図2 VTネットワーク構成と制約条件設定リンク

$$E_B = \begin{cases} 0, \dots N_{i-1,j} \leq N_{i,j} \leq N_{i-1,j} + \rho\Delta x \\ (N_{i-1,j} - N_{i,j})^2, \dots N_{i-1,j} > N_{i,j} \\ (N_{i-1,j} + \rho\Delta x - N_{i,j})^2, \dots N_{i,j} > N_{i-1,j} + \rho\Delta x \end{cases} \quad (3)$$

(3) プローブ軌跡のエネルギー

VTで求めた交通状態と整合がとれたプローブ軌跡（図2緑の線）は、累積交通量曲面の等高線に沿っている。このため、プローブ軌跡 ϕ 上の任意のノード間で、式(4)のエネルギー E_ϕ を導入した場合、 $N_{i,j}$ と ϕ の整合がとれていけば必ず0になる。

$$E_\phi = (N_{i,j} - N_{k,l})^2, \dots \forall N_{i,j}, \forall N_{k,l} \in \phi \quad (4)$$

(4) 渋滞区間中BWのエネルギー

プローブ軌跡 ϕ のうち、特に渋滞流となっている区間 ϕ_c （図2赤点線）上のノードにおける累積交通量 $N_{m,n}$ は、BWに沿った1つ下流のノードの累積交通量 $N_{m-1,n}$ から $\rho\Delta x$ だけ増えている。この渋滞流が下流にある既知のボトルネックから延伸していると仮定すれば、さらにBWに沿ってボトルネック位置に至るまで（図2赤矢印）、次式(5)のエネルギー E_C が0になる。

$$E_C = (N_{i-1,j} + \rho\Delta x - N_{i,j})^2, \dots \forall N_{i,j} \in \phi_c \quad (5)$$

(5) ショックウェーブ（SW）波面軌跡のエネルギー

仮に、複数のプローブ軌跡の速度変化点を繋ぐようにSW波面の軌跡 ψ （図2紫矢印）が与えられたとして、SW前後の渋滞流の速度から流率がわかれば、もしくは下流のボトルネック容量が既知であれば、それらの速度変化点間の次式(6)のエネルギー E_ψ を導入したとき、その値が0になる。

$$E_\psi = (N_{m,n} + \Delta Q(s - n) + \rho \Delta x(p - m) - N_{p,s})^2, \quad (6)$$

$$\dots \forall N_{m,n}, \forall N_{p,s} \in \psi$$

$$\Delta Q = Q_D(1 - V_f/\omega) - \rho V_f \quad (7)$$

ここで、 V_f :FW 速度

ω :BW 速度 (<0)

Q_D :渋滞中の流率

である。即ち、ノード(m, n)から図2 紫点線に沿って(p, s)に達する経路の累積交通量変化分が、 N_{mn} と N_{ps} の差に等しいことを意味している。

2.3 エネルギー最小によって求められる交通状態

以上で導入したエネルギーを合計すると、VT で求められた交通状態と整合するプローブ軌跡やSW 波面軌跡が与えられた場合にゼロとなり、全ての合計も最小となる。これは必要条件ではあるが、十分条件ではないため、制約条件であるプローブ軌跡やSW 波面軌跡のエネルギーを最小にする交通状態は一意には定められない。しかしながら、制約条件を追加していくことで、解の範囲が狭くなり、その精度が改善されていくと期待される。

そこで、それぞれの制約に相当するエネルギーを最小化することで、どのように解の範囲が限定されていくかを考察する。

まず、プローブ軌跡のエネルギーを最小化する場合、そのプローブ軌跡に渋滞区間があれば、そこからBW に沿って下流ボトルネックまでの範囲(図2 オレンジのハッチング)にあるノードの累積交通量高さの相対関係が決まる。さらに、この場合、自由流から渋滞流に変わる速度変化点からBW に沿って下流ボトルネックに到達する経路が見かけ上のSW に遭遇するFW の範囲(図2 水色のハッチング)でも、累積交通量高さの相対関係が決まる。さらに、SW 波面軌跡のエネルギーを最小化する場合、上と同様にそのSW に遭遇するFW の範囲(図2 青のハッチング)で累積交通量高さの相対関係が決まる。

3. 計算機実験

以上で導入したエネルギー関数の最小化によって、どのように交通状態が求められるかを、表1 に示した条件の単路区間で、数値実験によって確認した。この場合、区間下流端がボトルネックとなっており、上流端から図3 で示したような、ボトルネック容量を超える2つのピークを持つ20秒毎の到着パターンを与えたとき、図4 に示したような累積交通量曲面が求められる。これを正解として、以降ではプローブ軌跡が与えられた場合に、到着パターンを未知変数としてエネルギーを最小化するパターンを数値探索で求め、制約条件が増えることで、精度が向上していくことを段階的に確認する。なお、数

表1 数値実験の条件

パラメータ	記号	値	単位
FW 速度	V_f	15.000	m/sec
BW 速度	ω	-10.000	m/sec
ジャム密度	ρ	0.125	pcu/m
区間容量	Q_c	0.750	pcu/sec
臨界密度	K_c	0.050	pcu/m
下流端捌け容量	Q_d	0.400	pcu/sec
区間長	L	300	m
グリッドの単位時間幅	Δt	1	sec
グリッドの単位距離	Δx	6	m

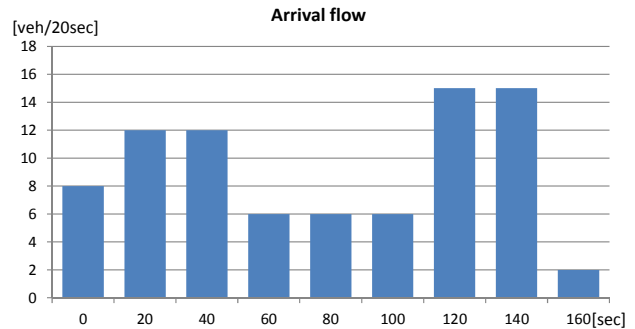


図3 設定到着交通量パターン

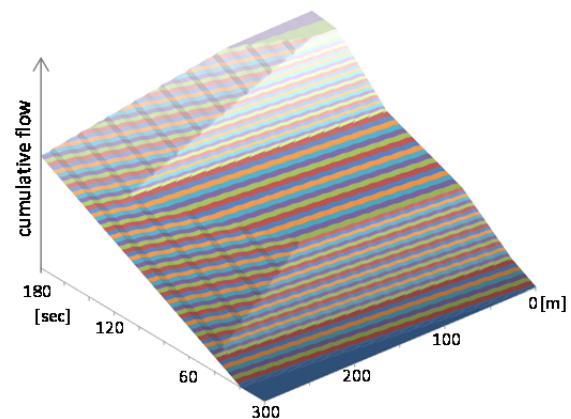
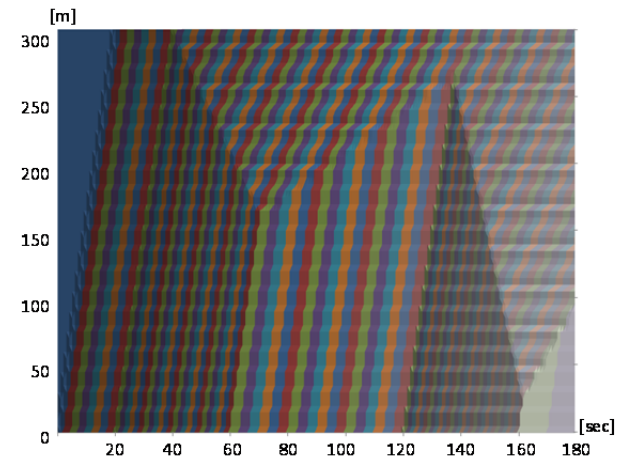


図4 VT で求められた累積交通量曲面
(上:等高線コンター、下:3D表示)

値探索では、到着パターンの初期値を全て0とした。また、数値探索の手法を精査することは本論文の主眼ではないため、ここでは、Microsoft Excel のソルバー（GRG 非線形）を適用した。

(1) 渋滞区間を含まないプローブ軌跡が与えられたとき

まず、渋滞区間を含まないプローブ軌跡が与えられた場合を考える。ここでは、図5上の時空間図に青矢印で示された軌跡の両端点について式(4)を適用した。初期状態で全ての範囲の累積交通量高さが0であるため、当然ながら図5下のように初期状態から変化せず、この場合は正解に近づかない。

(2) 渋滞区間を含むプローブ軌跡が与えられたとき

次に、渋滞区間を含むプローブ軌跡が与えられた場合を考える。ここでは、図6上の2本の赤矢印の端点についてそれぞれ式(4)を適用し、渋滞区間の軌跡について、式(5)を適用した。

その結果、2.3で考察したとおり、渋滞区間の軌跡から下流のBWに沿った範囲と、そこからFWに沿って上流に遡る範囲の累積交通量が求められた。また、実験では20秒毎の到着交通量を求めているので、プローブ軌跡のエネルギーを最小にするためには、上流端の到着時刻が40~60秒での交通量も求めることになり、プローブ軌跡より後の範囲でも累積交通量高さが求まった。

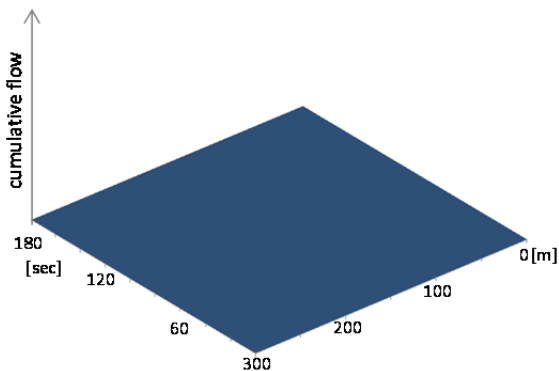
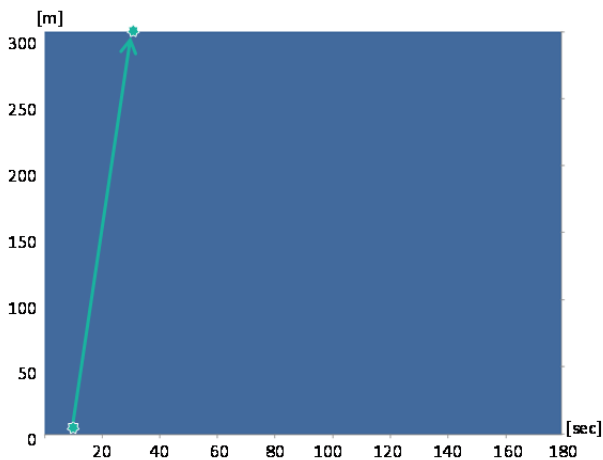


図5 渋滞区間を含まないプローブ軌跡が与えられたときの数値探索結果の累積交通量曲面

図7は数値探索によって求められた到着交通量パターンである。この場合、20~60秒の最初のピークについては、ばらつきはあるものの、合計で正解24台に対して25.5台と、比較的良好に交通量が推定されている。

(3) 断片的なプローブ軌跡が与えられたとき

次に、区間全体を走行しない、断片的なプローブ軌跡が与えられた場合を考える。ここでは、図8上のように、それぞれ黄色、水色、緑色のプローブ軌跡について式(4)を適用する。また、各プローブ軌跡に渋滞区間が含まれているため、該当する範囲に式(5)を適用した。

その結果、図8下に示したような累積交通量曲面が求められた。累積交通量が求められた範囲は2.3で考察し

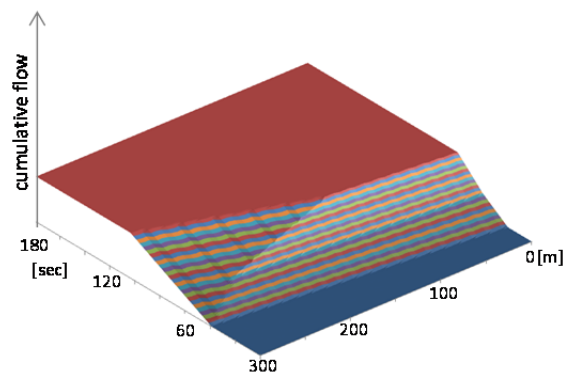
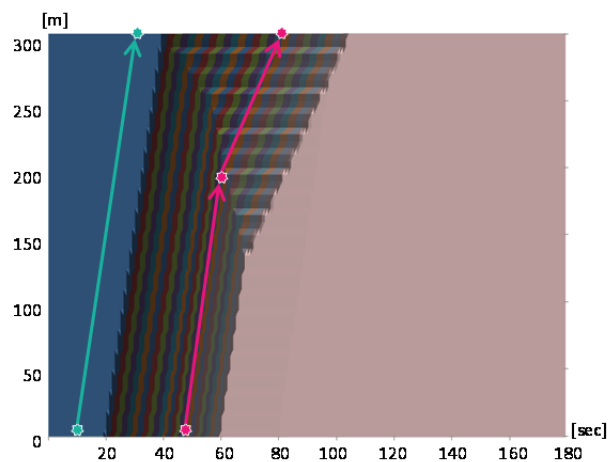


図6 渋滞区間を含むプローブ軌跡が与えられたときの数値探索結果の累積交通量曲面

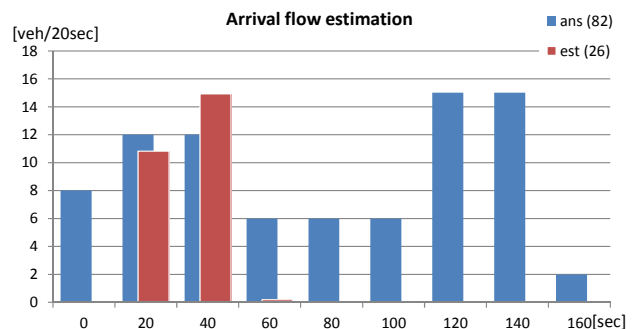


図7 推定された到着交通量パターン(2)

た通りだが、ここでは各軌跡の影響が及ぶ範囲（例えば水色と緑の軌跡の渋滞区間が含まれる渋滞領域）が重なることで、複数の制約を加味した推計になっていることがわかる。ただし、黄色と水色のプローブ軌跡の間は、正解では渋滞長が連続して短くなっているところが、一旦渋滞長が0になり、その後また渋滞が延伸する状況となっており、この領域に制約条件が不足していることがわかる。

図9に数値探索によって求められた到着交通量パターンを示した。この場合、総量は正解82台に対して71台と近づいたが、正解が2つのピークに対して、3つのピークを持つパターンになっている。

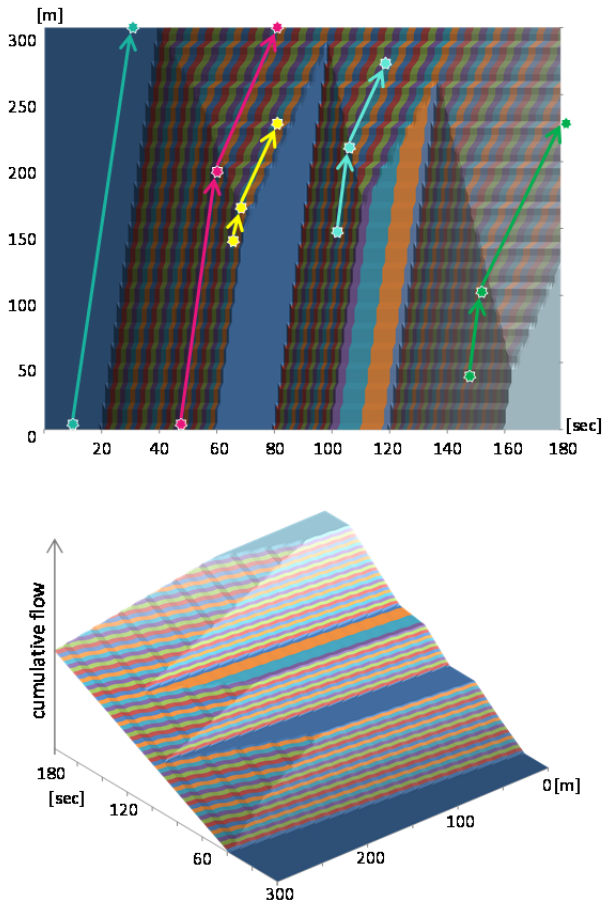


図8 断片的なプローブ軌跡が与えられたときの数値探索結果の累積交通量曲面

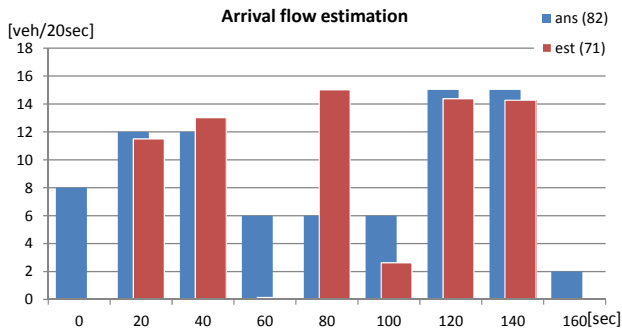


図9 推定された到着交通量パターン(3)

(4) SW 波面の軌跡が与えられたとき

続いて、これらプローブ軌跡の速度変化点を繋いで、図10上のピンク点線の矢印で示したSW波面の軌跡が与えられた場合を考える。即ち、3本のピンク点線の両端に対して、それぞれ式(6)を適用する。

この場合、SW波面からFWに沿った上流側の範囲でも累積交通量高さが求められるため、(3)で不十分であった黄色と水色のプローブ軌跡の間の領域についても影響が及び、(3)で見られたような渋滞長の伸び縮みが抑制されている。

図11に数値探索によって求められた到着交通量パターンを示した。この場合は、2つのピークがあるパターン

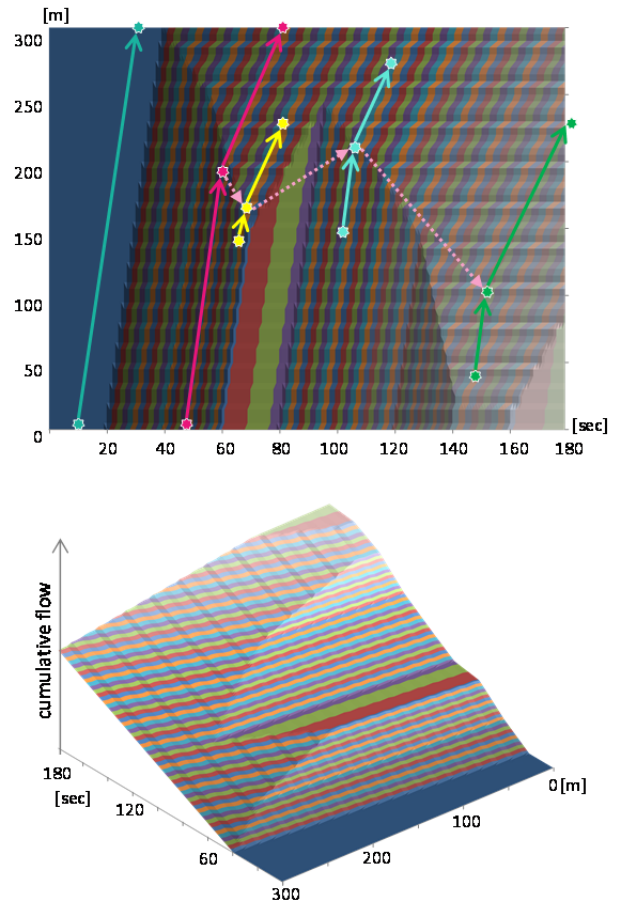


図10 SW波面軌跡が与えられたときの数値探索結果の累積交通量曲面

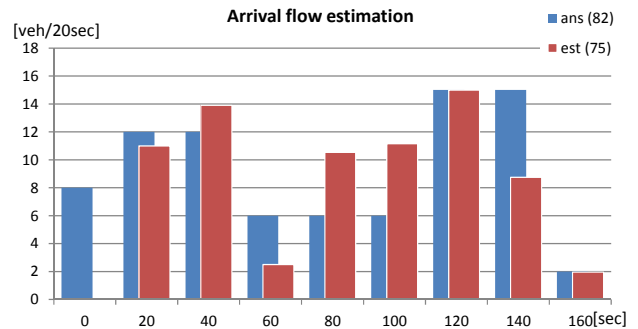


図11 推定された到着交通量パターン(4)

ンが求められた。また、総量も正解 82 台に対して 75 台となり、最初の 20 秒間での 8 台分を除いて、ほぼ正しい量となっている。

4. おわりに

以上において、交通流変分理論(VT)を最適化問題に緩和し、プローブ軌跡やショックウェーブ軌跡を制約条件として与えた場合の、交通状態推定手法について、基礎的な考察を行った。VT 最適化問題として記述するにあたっては、ボトルネック位置や容量を既知としたり、プローブ軌跡の形状からショックウェーブ波面の軌跡を推定したり、いくつかの前提をおいている。これらは、プローブデータから直性得られる情報ではなく、いわばヒューリスティックな情報を援用していることになるが、VT では 1 つの境界条件に対して独立に交通状態を推定するのに対して、最適化問題に緩和した場合は、得られた観測データやヒューリスティックな情報を総合して、より確度の高い交通状態が推計できることを計算機実験によって確認した。

今後は、より現実的な状況での交通状態推定を目標とし、現実のプローブデータで見られるような誤差の影響や、区間途中の出入交通量の影響を考慮した、ロバストな交通状態推定手法の構築に取り組む。また、効率的な数値探索手法についても、検討の必要がある。

謝辞

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 委託研究「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発・課題 A ソーシャル・ビッグデータ利活用アプリケーションの研究開発—多様なデータ融合による災

害時のモビリティ支援」の一環として行ったものである。研究推進にあたり、貴重な意見をいただいた「データ指向型モビリティ情報生成グループ (通称 DOMINGO)」のプロジェクトメンバーに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 大畑長, 浦山利博, 花井健太, 彦坂健太, 花房比佐友, 今井武, 津田博之, 江藤和昭: 災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合解析システムの紹介, 土木計画学研究発表会春大会, 2013.6.
- 2) C. F. Daganzo: A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 187-196. 2005.
- 3) B. Mehran, M. Kuwahara: Fusion of probe and fixed sensor data for short-term traffic prediction in urban signalized arterials, *Special Issue for the International Journal of Urban Sciences on Urban Transportation*, DOI:10.1080/12265934.2013.776291, 2013. 4.
- 4) 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, 土木計画学研究発表会春大会, 2013. 6.
- 5) 瀧川翼, 和田健太郎, 桑原雅夫: 動的信号制御のネットワーク設計問題としての定式化, 土木計画学研究発表会, 秋大会, 2013.11.
- 6) C. F. Daganzo: A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 934-950. 2005.