

プローブカー軌跡とショックウェーブ理論を用いた交通状態推定

安田 昌平¹・瀬尾 亨²・井料 隆雅³・石原 雅晃⁴

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: s.yasuda@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: seo@civil.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

⁴正会員 阪神高速道路株式会社 計画部調査課 (〒 530-0005 大阪市北区中之島3-2-4)

E-mail: masaaki-ishihara@hanshin-exp.co.jp

交通状態推定に用いられる主な観測データとして、検知器データとプローブカーデータが挙げられるが、コストと観測範囲の観点からプローブカーデータの活用が盛んに研究されている。一方、プローブカーのみからは流率や密度などの量的な交通状態量は算出できないため、検知器データとの併用を行わずに交通状態量を算出したい場合、交通流理論等を用いた推定が必要である。プローブカーデータから取得できる速度情報を用いた流率・密度の単純な推定法として Fundamental diagram (FD) による速度-密度変換が考えられるが、自由流領域ではその推定が困難であることが指摘されている。本研究では FD とショックウェーブ理論を用いて、プローブカーデータから自由流領域を含めた交通密度を推定する手法を開発した。

Key Words : Shockwave theory, Fundamental diagram, Probe-vehicle data

1. はじめに

適切な道路計画や交通制御施策の策定において、交通状態の推定は重要な役割を果たす。これまで、道路上に設置された車両検知器を用いて、対応する区間の交通状態を推定する方法論が開発されてきた。しかしながら、検知器の設置・維持コストや観測可能範囲等の観点から検知器データの代わりにプローブカーデータを活用した方法論が盛んに研究されている¹⁾。

プローブカーデータのみからは流率や密度などの量的な交通状態量は算出できないため、検知器データとの併用を行わずにこれらの状態量を算出したい場合、Kinematic Wave 理論²⁾³⁾をはじめとする交通流理論を用いた推定が必要である。そのような推定の際、これまでには交通流理論の核となる Fundamental diagram (FD) をプローブカーデータから得るのが難しいという課題があった。近年、プローブカーデータのみを用いて FD を推定する方法論⁴⁾が開発されたことから、本研究では FD と交通流理論を用いて、プローブカーデータから密度を推定する手法を開発・検証する。

2. 方法論

流率・密度等の量的な交通状態量を速度から推定する方法として、FD を用いた速度-密度変換が考えられる。三角形 FD を仮定した場合、渋滞領域では速度に対して一対一で対応する流率・密度が存在するため、その推定は容易である。一方、自由流領域では同一の速度に対応する密度と流率の組み合わせが複数存在するため、その推定が困難であると指摘されている⁵⁾。

異なる密度の区間が隣接しており、それら不連続な密度の境界（以下、ショックウェーブと呼ぶ）の移動速度が得られたとき、Kinematic Wave 理論を用いて一方の密度からもう一方の密度を推定することが可能である。プローブカーデータから速度が分かっている場合の密度推定問題を考えると、渋滞領域の密度 k_c は速度 v_c から推定可能であるため、自由流領域と渋滞領域の境界となるショックウェーブの速度 w が得られたとき、これらを用いて自由流領域の密度 k_f を推定できる（図-1）。

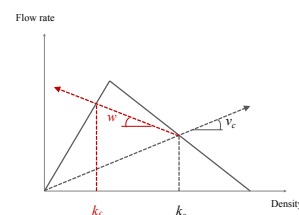


図-1 三角形FDを用いた密度推定

ショックウェーブの速度は、プローブカーデータから作成した時空間図等を活用し、渋滞領域の延伸・解消を時空間的に検知することにより推定する。

本研究では、自由流領域を含む密度の推定を以下の手順で行う。プローブカーデータを用いて対象路線の時空間図を作成する。各速度情報と所与の三角形 FD を用いて渋滞領域の特定および密度の推定を行う。画像処理技術を用いて時空間図から渋滞領域と自由流領域の境界を特定し、ショックウェーブの検知およびその速度の推定を行う。Kinematic wave 理論を用いて渋滞領域と隣接する自由流領域の密度を推定する。なお、今回は FD を検知器データから求めて所与としたが、原理的には Seo et al.⁴⁾の手法を用いプローブカーデータと渋滞密度から FD を推定可能である。

3. ケーススタディ

(1) 対象区間と使用データ

本研究で対象とする路線は、阪神高速道路 3 号神戸線（東行き）の京橋入口から西宮出口までの約 13.8km である（図-2）。対象区間内には生田川出入口・摩耶出入口・魚崎入口・深江出口・芦屋入口が存在している。

本研究で用いるデータは、2018 年 6 月の 1 ヶ月間において対象区間に設置されている検知器から取得された 5 分間毎の交通流率および交通密度情報と、同期間で取得された Electronic Toll Collection System 2.0 プローブカーデータ⁶⁾（以下、ETC2.0 データと呼ぶ）である。検知器データは本方法論で所与としている三角形 FD の推定および本方法論で推定された密度と比較するための観測データとして用いるものである。ETC2.0 データは対象区間を走行した車両の軌跡を抽出した後、日本デジタル道路地図（3003 版）データの対象リンクへ最短距離で紐付け処理を施したものをを用いた。

(2) 三角形 FD の推定

各ランプ間について、対応する検知器から取得した 5 分間毎の交通流率および交通密度を用いて三角形 FD を推定した。各ランプ間の速度分布から自由流領域と渋滞流領域の境界となる速度を確認し、それぞれの領域で線

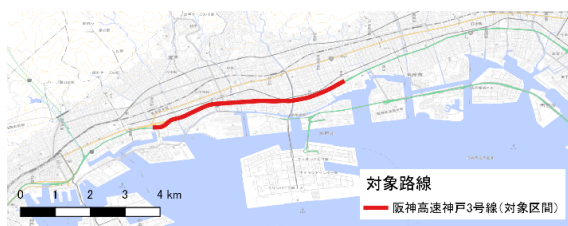


図-2 対象区間 背景図：国土地理院
(<https://maps.gsi.go.jp/development/iciran.html>)

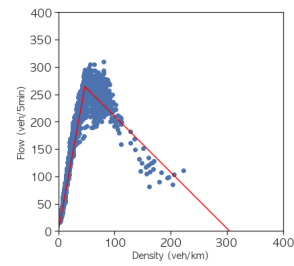


図-3 推定された三角 FD（魚崎-深江間）

形回帰を行った。推定には 2018 年 6 月 1 日から 15 日のデータを用いた。例として、魚崎-摩耶間で推定された三角形 FD を図-3 に示す。

(3) 時空間図の作成

対象区間を 500m 毎のセグメントに、時間を 5 分毎のタイムステップに分割し、各セルを通過した ETC2.0 の車両軌跡を用いての平均速度を計算する（図-4）。セグメント m 、タイムステップ n で区切られる領域の平均速度は、Edie の定義⁷⁾より

$$v_{mn} = \frac{\sum_{a \in A} d_a^{mn}}{\sum_{a \in A} t_a^{mn}} \quad (1)$$

で計算される。ここで A はセグメント $m \in M$ 、タイムステップ $n \in N$ で作られる領域を通過した車両の集合、 d_a^{mn} と t_a^{mn} はそれぞれセグメント m 、タイムステップ n で区切られる領域を通過した軌跡の走行距離および走行時間とする。作成した時空間図の一例として、2018 年 6 月 11 日の結果を図-5 に示す。図の縦軸について、対象区間の上流端である京橋入口付近を基準とした累積距離を設定している。また後述する画像処理のため、時間方向に

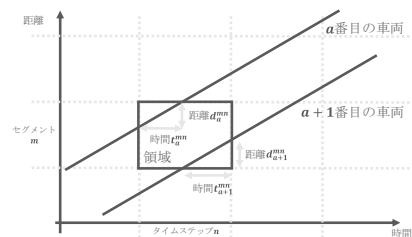


図-4 時空間図の作成

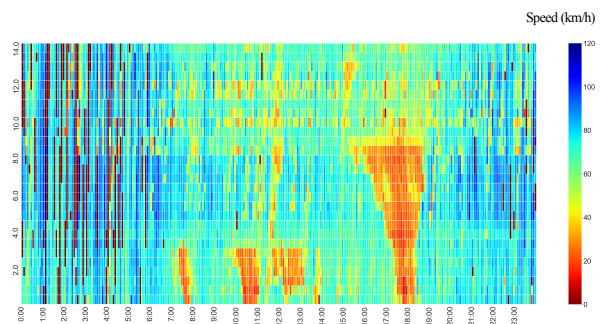


図-5 時空間図（2018 年 6 月 11 日）

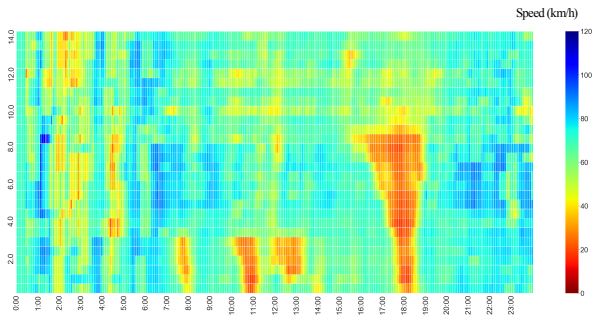


図-6 平滑化した時空間図 (2018年6月11日)

6 タイムステップで移動平均をとり平滑化処理を行った。例として平滑化を行った2018年6月11日の時空間図を図-6に示す。

(4) 渋滞流領域の密度推定

平滑化処理を行った時空間図のうち速度が三角形 FD の自由流速度を下回る区間について、三角形 FD と速度から密度を推定した。結果の例を図-7に示す。

(5) 対象とする渋滞流領域の特定

平滑化処理を行った時空間図について、45km/h以下の領域を抽出した後、当該領域が15分以上連続かつ2km以上連続する範囲を特定し、対象とする渋滞流領域と定義した。このうち、2018年6月の対象期間のうち、突発事象の影響でない渋滞が頻繁に観測された摩耶-魚崎間および魚崎-深江間の渋滞を分析対象とした。特定した渋滞流領域の例を図-8に示す。

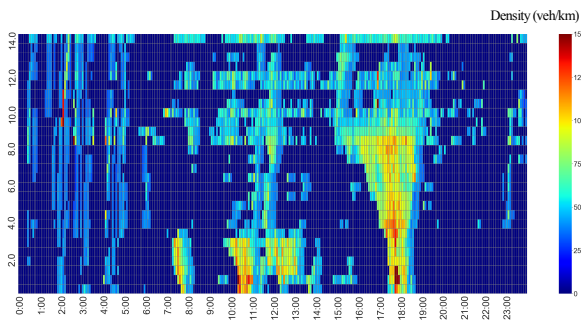


図-7 時空間図 (密度) (2018年6月11日)

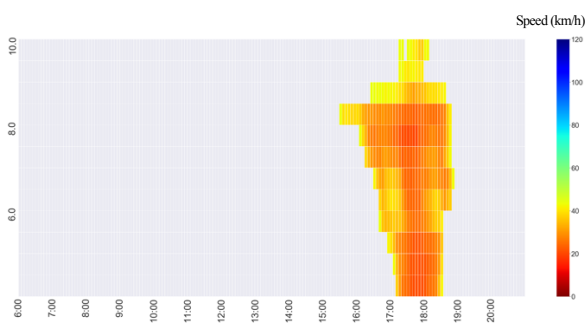


図-8 対象とする渋滞流領域の速度 (2018年6月11日)

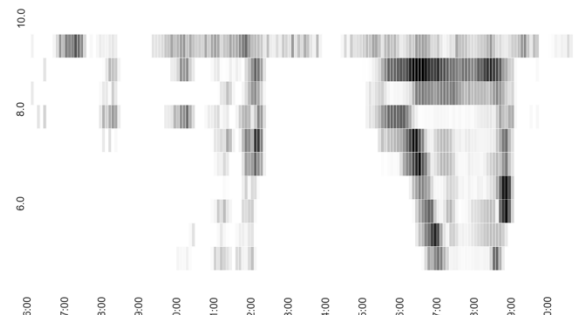


図-9 Sobel edge detection によって検出された境界 (2018年6月11日)

(6) ショックウェーブ速度の推定

ショックウェーブの検知には、平滑化した時空間図に対して境界線検出の画像処理アルゴリズムである Sobel edge detection⁸⁾を用いて境界線検出を行い(図-9)、対象とする渋滞領域と隣接する範囲のショックウェーブを検知した。また境界線検出で得られた指標値を重みとして重み付き線形回帰を用いて、各ショックウェーブの速度を推定した。

(7) 自由流領域の密度推定

対象とした渋滞領域と隣接する自由流領域の密度を三角形 FD・渋滞流領域の密度・ショックウェーブ速度から推定した。(4)で推定した結果を含め、推定した密度と、検知器データから取得された密度を比較した例を図-10~図-12に示す。比較に用いた検知器は摩耶出口-魚崎入口間および魚崎入口-深江出口間に設置された検知器であり、それぞれ対象区間上流から約 6.1km 地点および 8.6km 地点に設置されている。図の推定密度はこれらの地点と対応するセルの密度を示している。

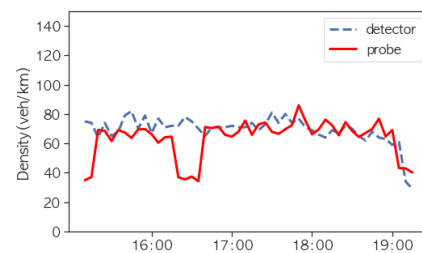
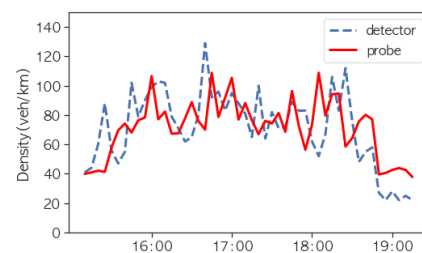


図-10 推定密度と観測密度の比較
摩耶-魚崎間 (上) と魚崎-深江間 (下)
(2018年6月10日)

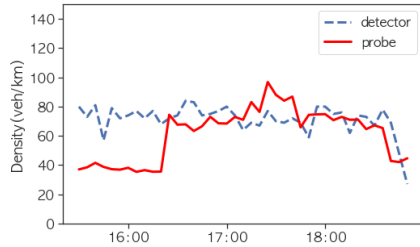
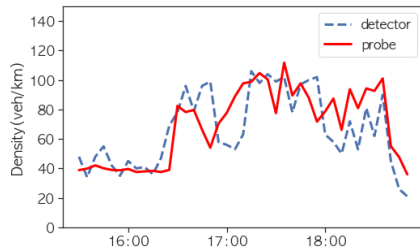


図-11 推定密度と観測密度の比較
摩耶-魚崎間（上）と魚崎-深江間（下）
(2018年6月11日)

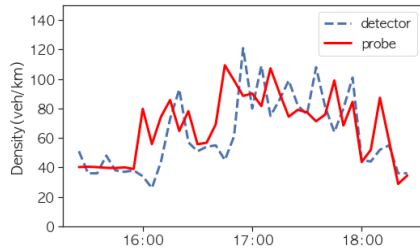


図-12 渋滞領域の特定と密度の推定
摩耶-魚崎間
(2018年6月24日)

4. 考察

ケーススタディの結果より、適切な三角形FDが与えられた場合、プローブカーデータのみを用いて交通密度を一定の精度で推定できることを示した。本ケーススタディでは三角形FDの推定に検知器データを用いたが、プローブカーデータのみを用いた三角形FDの推定手法についても既に開発されており、本方法論と組み合わせることで、検知器データを用いず量的な指標を推定する方法論を構築できよう。

本研究の課題として、今回の推定結果には大きな誤差も含まれているため、細部の改善が必要な点が挙げられる。特に、本方法論の結果はショックウェーブの定義に大きく依存するため、渋滞領域の定義や画像処理アルゴリズム等についてより適切なものを選定する必要がある。

参考文献

- 1) Seo, T., Bayen, A. M., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey. *Annual reviews in control*, 43, pp.128-151, 2017.
- 2) Lighthill, M. J. and Whitham, G. B.: On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society A*, 229, 1178, pp.317-345, 1955.
- 3) Richards, P. I.: Shock waves on the highway, *Operations Research*, 4, 1, pp.42-51, 1956.
- 4) Seo, T., Kawasaki, Y., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Fundamental diagram estimation by using trajectories of probe vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, pp. 40-56, 2019.
- 5) Herrera, J. C. and Bayen, A. M.: Incorporation of Lagrangian measurements in freeway traffic state estimation, *Transportation Research Part B: Methodological*, 44, pp. 460-481, 2010.
- 6) Yasuda, S., Iryo, T., Koyama, Y., and Sakai, K.: Characteristics of ETC2.0 probe data compared to road traffic census data, *ISTS and IWTDCS 2018*, Matsuyama, Japan, 2018.
- 7) Edie, L.C.: Discussion of traffic stream measurements and definitions. In: Almond, J. (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 139-154, 1963.
- 8) Vincent, O. R. and Folorunso, O.: A descriptive algorithm for sobel image edge detection. In *Proceedings of Informing Science & IT Education Conference*, California: Informing Science Institute, 40, pp. 97-107, 2009.

(2019.10.4 受付)

TRAFFIC STATE ESTIMATION BASED ON TRAJECTORIES OF PROBE-VEHICLES AND SHOCK WAVE THEORY

YASUDA Shohei, SEO Toru, IRYO Takamasa and ISHIHARA Masaaki