

プローブデータを用いた単路における ボトルネックの安定性評価

安田 昌平¹・坂井 勝哉²・井料 隆雅³

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 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:k.sakai@port.kobe-u.ac.jp

³ 正会員 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:iryoy@kobe-u.ac.jp

交通流の研究における規範的な指標として、定常状態や均衡状態という概念が広く用いられている。一方で、観測データに基づく研究では、交通流のダイナミクスに着目し、交通容量の変動などについて指摘がなされている。本研究では、実ネットワークにおける時々刻々の走行履歴情報を取得できるプローブデータを用いて、シンプルなボトルネックモデルにより単路のボトルネック容量の変動を分析し、その安定性を日別、時間帯別に評価した。結果は、ボトルネック容量の安定性が保たれる時間帯と、そうでない時間帯が存在する可能性が示唆された。また、検知器より取得した流入交通量の変動をあわせて評価することで、交通流理論の model-based な分析における定常状態の仮定の妥当性を評価し、data-driven approach との併用について言及した。

Key Words: Bottleneck capacity, Probe-vehicle data, Steady-state, Model-based, Data-driven

1. はじめに

ビッグデータ時代の到来により、研究、実務の領域を問わず様々な分野でパラダイムシフトが起きている。実務面では、製造業の生産、流通工程においてビッグデータの知見を用いる industry4.0 というコンセプトが提唱されるなど、データを活用した業務効率化が求められている。研究面では、理論的に構築されたモデルを介して分析を行う model-based な手法に対して、大量のデータからモデル等を介さずに知見を見出す data-driven な手法の人気が高まっている。一方、data-driven な手法を用いて model-based な手法と同等の精度を期待する場合、その学習過程で多大な時間を要する場合が多い。交通分野においても、リアルタイムな情報提供が求められる旅行時間の推定などに用いられているのは、専ら代表的な model-based な手法であるマクロ交通流理論などである¹⁾。ビッグデータの観測によって得られた新たな知見を用いて、model-based な手法を発展させるなど、これら二つの手法を組み合わせる方法論の開発や、状況に応じて使い分けことが求められるであろう。

交通分野の model-based な分析において、規範的な指

標として均衡状態や定常状態という概念が広く用いられている。その中で、定常的なリンクコスト関数、一定の Fundamental Diagram などが仮定されるが²⁾、交通流のダイナミクスに着目した観測ベースの研究では、交通容量の変動などが指摘されている⁴⁾。ここで、model-based な手法と data-driven な手法の使い分けを想定するならば、流入交通量及び交通容量が安定している際には model-based な手法を、変動している際には data-driven な手法を用いるといった方法論が考えられる。そこで本研究では、プローブデータを用いて経時的にボトルネック容量の安定性を評価する手法を開発し、model-based な手法と data-driven な手法の使い分けに関する考察を得たいと考えた。分析対象はボトルネックを有する都市高速道路の単路部を選定し、ボトルネック容量は、流入交通量と旅行時間の変化率の関係を組み込んだシンプルなボトルネックモデルを用いて記述する。

2. 概要及び手法

本研究の対象区間は、阪神高速道路 3 号神戸線（上

り)の魚崎入路から深江出路付近の約 3km とした。当該区間では、深江出路以東にあるサグ部に起因する自然渋滞が頻繁に観測されており、ボトルネック容量の分析に適していると考えた。以下、ボトルネック容量の推定に用いたモデルと、各種データについて説明する。

(1) ボトルネックモデル

図-1のようなボトルネック容量 μ を持つ単路を考える。自由流旅行時間を TT_f 、時刻 t における待ち行列の台数を $N(t)$ とすると、時刻 t における旅行時間は以下の式(1a)で得られる。これを両辺 t で偏微分すると、流入交通量 x を含む式(1b)に変形できる。

$$TT(t) = TT_f + \frac{N(t)}{\mu} \tag{1a}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial TT(T)}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial N}{\partial x} \\ &= \frac{x - \mu}{\mu} \end{aligned} \tag{1b}$$

この式をボトルネック容量 μ について解くと、以下の式(1c)が得られる。

$$\mu = \frac{x}{\frac{\partial TT(t)}{\partial t} + 1} \tag{1c}$$

以上の式に、旅行時間の変化率と流入交通量を代入することで、各タイムステップにおけるボトルネック容量を推定する。

(2) データ

上記モデルによりボトルネック容量を算出するため、当該区間へ流入する交通量と、旅行時間の変化率が必要である。本研究では、それぞれ検知器とプローブデータより 5 分間隔で取得した。分析に用いるデータは、平成 27 年 12 月のものを用いているが、サーバーのメンテナンス等により対象期間中にプローブデータが取得されていなかった期間があったため、その期間のプローブデータは分析対象から除外した。検知器より取得した流入交通量を、各日別に色分けしてプロットしたものを図-2に示す。ここで、本研究ではボトルネック容量の安定性を評価することに焦点を当てていることから、交通量が

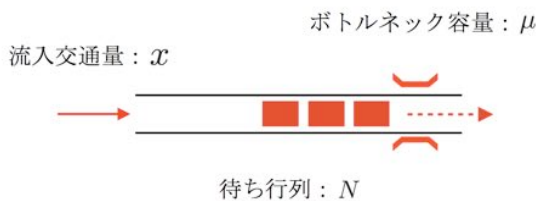


図-1 ボトルネックを含む単路と待ち行列

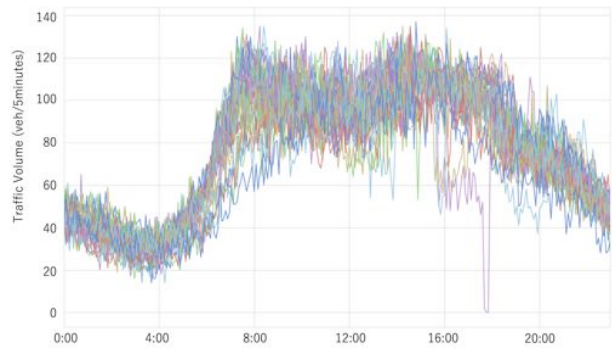


図-2 対象区間への流入交通量 (日別)

比較的少ない深夜帯や、交通量が大きく変動している午前 8 時までの時間帯はボトルネック容量の評価を行わないこととした。

プローブデータより取得した、対象期間における旅行時間の 5 分間集計値を図-3(a)に示す。ここで、プローブデータは検知器データと比較してサンプル数が少なく、観測誤差やマップマッチングの誤差による影響を受けやすい。そのため、本研究では旅行時間の時系列データにローカルレベルモデルを適用し、カルマンフィルターを用いて平滑化を行った。平滑化の過程と結果を、それぞれ図-3(b)と図-3(c)に示す。

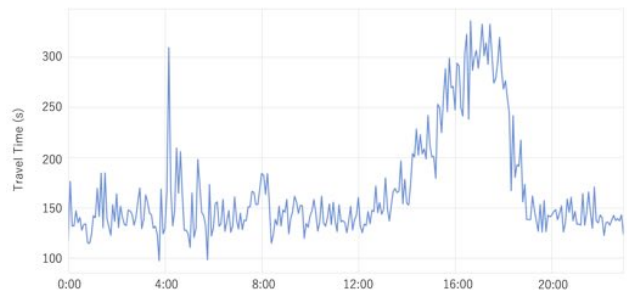


図-3(a) 対象区間の旅行時間 (5分間集計)

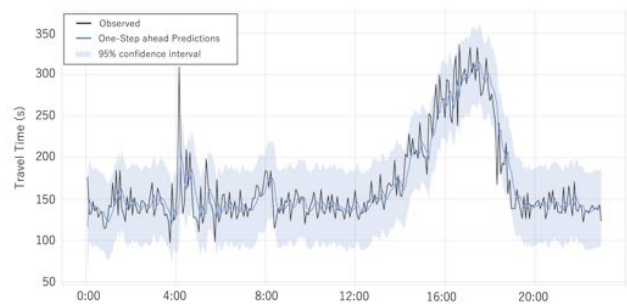


図-3(b) 対象区間の旅行時間 (観測値と予測線)

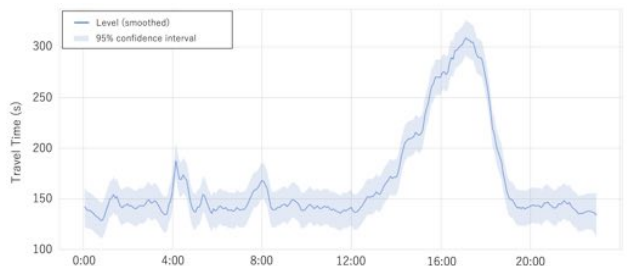


図-3(c) 対象区間の旅行時間 (平滑化後)

ここで、本研究で分析対象としているボトルネック容量は、待ち行列が存在していることを前提として計算されるものである。図3より、当該区間において旅行時間が長い時間帯は、主に正午から 20 時付近であると判断できるため、それ以外の時間帯はボトルネックの分析から除外することとした。この時間帯は、先に述べた交通量が大きく変動している時間帯と一致していないため、ボトルネック容量の変動については正午から 20 時までの時間帯について評価することとする。

(3) ボトルネック容量計算例

ここまでで説明したモデルとデータセットを用いて、実際にボトルネック容量の変化率を算出する。プローブデータの欠損による除外日以外は、当該期間中の全ての日程についてボトルネック容量の変動を計算するが、本稿では代表日として、平成 27 年 12 月 22 日のデータを示す。当該日における流入交通量と旅行時間のグラフを図4 及び図-5 に示す。ここで、旅行時間の変化率と流入交通量からボトルネック容量とその変化量を算出するが、ノイズ除去のため、計算にはそれぞれの前後 30 分の移動平均を用いた。算出したボトルネック容量とその移動平均のグラフを図-6 に示す。またその 5 分間の変動量と、流入交通量の変動量を図-7 に示す。ここで、流入交通量の変動は需要側の変動を、ボトルネック容量の変動は供給側の変動を表しており、これらがどちらもゼロである時に交通流理論の定常状態が成り立つと定義する。ボトルネック容量の変動量と流入交通量の変動量を評価し、

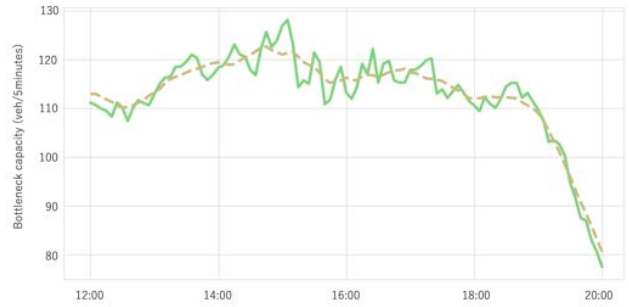


図-6 12月22日(火)におけるボトルネック容量とその移動平均

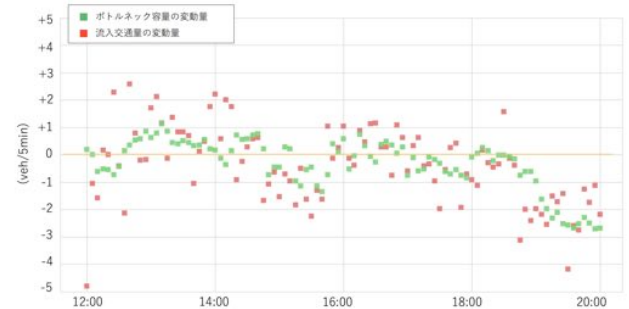


図-7 12月22日(火)におけるボトルネック容量の変動量及び流入交通量の変動量

どちらも変動が見られない時間帯には従来の交通流理論に基づく model-based な手法を、そうでない時間帯には、交通流理論を介さず、データのみから知見を見出す data-driven な手法を用いることが合理的である。



図-4 12月22日(火)における流入交通量

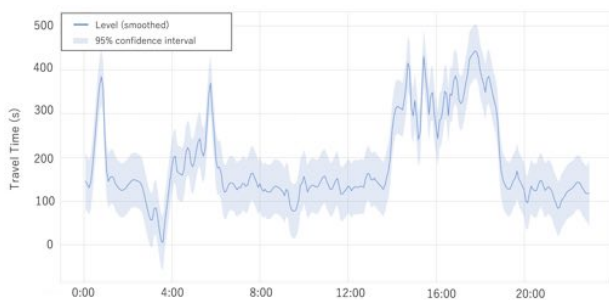


図-5 12月22日(火)における旅行時間

3. 結果と今後の課題

前章で得られたボトルネック容量の変動量及び流入交通量の変動量について、その安定性は、変動値が連続して同じ符号を取っている時間帯の累積値により判断する。具体的には、その累積値が当該日における容量及び交通量の平均値の 3%を超えた場合にその指標が安定していないとした。本操作により、各日、各時間帯は三種類に分類される。一つ目は、ボトルネック容量、流入交通量共に安定している「定常状態」、二つ目は、流入交通量が安定していない「非定常状態(交通量)」、三つ目は、流入交通量は安定しているが、ボトルネック容量が安定していない「非定常状態(ボトルネック容量)」である。ここで挙げた三つの状態は、これまで議論してきた通り、需要側(流入交通量)と供給側(ボトルネック容量)のそれぞれについて安定性を評価することで分類されている。ここで、本線上に検知器が設置されている高速道路を例にとると、需要側の変動は比較的観測しやすいと言える。一方で、供給側の変動は需要に対する影響の変化

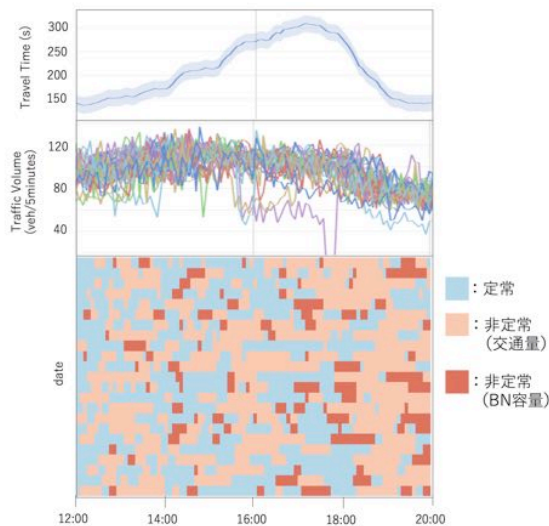


図-8 定常, 非常推定結果

を観測しなければならないという点で、比較的困難であると言えよう。本研究では、ボトルネック容量の推定に旅行時間の変化率を用いていることから、供給側の変動として旅行時間への影響を反映していると考えられる。ここで、対象期間各日における各時間帯の状態推定結果を図-8に示す。特に、流入交通量が定常であるが、ボトルネック容量が非常である箇所（濃い赤色の箇所）については、供給側の変動が交通流に影響を及ぼしている可能性がある。供給側の変動要因を詳しく分析したい場合、この箇所を中心に、機械学習などの **data-driven** な手法で分析を行うことが必要であると考えられる。また、定常状態と推定された箇所（水色の箇所）については、従来の交通流理論を適用し、**model-based** な分析を行うこ

とができると考えられる。

本研究ではシンプルなボトルネックモデルを用いてボトルネックの安定性を評価したが、安定性の評価指標を、モデルを介さない **data-driven** な手法により開発することも考えられる。今後の課題として、本研究で得られた推定結果の個別分析などを基に、定常状態と非常状態の判別手法についてより精緻な方法論を開発し、交通ネットワーク分析における **model-based** 手法と **data-driven** 手法の使い分け及び融合に寄与したい。

謝辞：本研究で用いた検知器データは、阪神高速道路株式会社より、ETC2.0 プローブデータは国土技術政策総合研究所より貸与を受けたものである。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Simon Oh, Young-Ji Byon, Kitae Jang, and Hwasoo Yeo. "Short-term travel-time prediction on highway: a review of the data-driven approach." *Transport Reviews* 35.1 (2015): 4-32.
- 2) Wardrop, John Glen. "Some theoretical aspects of road traffic research." *Inst Civil Engineers Proc London/UK/*. 1952.
- 3) Cassidy, Michael J. "Bivariate relations in nearly stationary highway traffic." *Transportation Research Part B: Methodological* 32.1 (1998): 49-59.
- 4) Coifman, Benjamin, and Seoungbum Kim. "Extended bottlenecks, the fundamental relationship, and capacity drop on freeways." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45.9 (2011): 980-991.

(2018.4.27 受付)

EVALUATING THE STABILITY OF BOTTLENECK CAPACITY IN A TRAFFIC CORRIDOR USING PROBE VEHICLE DATA

Shohei YASUDA, Katsuya SAKAI, Takamasa IRYO