

# 地点固有の潜在的車間時間の推定による 単路部ボトルネック位置判定の試み

葛西誠<sup>1</sup>・土橋礼佳<sup>2</sup>・松尾幸二郎<sup>3</sup>・長谷川裕修<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 秋田工業高等専門学校准教授 土木・建築系 (〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1-1)  
E-mail: kasai@akita-nct.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 秋田工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1-1)

<sup>3</sup>正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>4</sup>正会員 秋田工業高等専門学校准教授 土木・建築系 (〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1-1)

単路部ボトルネックをモデル化する研究はいくつかあり、車間時間が周辺より長くなると仮定することで表現する立場が多い。本研究ではこの観点を考慮して、繰り返し単路部を走行して得られた車間時間データに対して地点固有の潜在的な車間時間を推定し、ボトルネック位置の判定を試みる。いくつかのモデルを想定し予測性能を比較検討すると、地点固有の潜在的な車間時間は進行方向に沿って一定値をとる、すなわち空間的に不変であるとするモデルが最良として選択される。モデルの代替案の拡充やデータの代表性など議論する余地は多いものの、この結果を素朴に解釈するとボトルネックが生じるメカニズムについてこれまでと異なった視点が必要であることが示唆される。

**Key Words:** Time gap, Traffic capacity, State space model, Bayesian estimation

## 1. はじめに

単路部渋滞<sup>1)</sup>を引き起こす交通容量上のボトルネックがなぜ、どのようにして生じるのかを説明しようとするのは、効果的な渋滞対策立案に必要であろう。例えばこれまで開発されている渋滞対策のうち、速度回復表示板<sup>2)</sup>によるものはサグ部での無意識の速度低下がボトルネックの生じる原因だとし、それを抑制する施策として開発されたものである。近年効果が期待される音声による速度回復<sup>3)</sup>も同様の考えと言えよう。ただし、渋滞を根絶するには至っていないことを考えれば、より効果的な施策を考案する余地があるし、同時にボトルネックが生じるメカニズムもよりの確な描像がありえるだろう。

ボトルネックが生じる仕組みとして簡明なものは、ある速度に対して必要な車間距離が長くなるような区間が生じる、というものである。車頭時間が長くなる区間がボトルネックとなる、と換言することもできる。実際、物理学分野でよく使われるOVモデル<sup>4)</sup>を用い、最適速度関数がスケールダウンするという仮定を設け、ボトルネック現象が再現されているとする研究が2000年代にいくつかみられる<sup>5)7)</sup>。また近年でも単路部ボトルネックの交通容量は地点連続的に変化すると仮定すること、すなわち車頭時間が進行方向に沿って連続的に増大すると仮定するモデル<sup>8)</sup>によって良好にボトルネック部での速度回

復プロファイルが説明できるとする報告がなされている<sup>9)</sup>。この理論の強みは、理論的な明晰さのみならず縦断線形と交通容量の関係を対応付けられる可能性を有する点にある。車頭時間の進行方向に沿った増大は縦断勾配変化に伴う速度補償の遅れと解釈できる点がそれに該当する。一方で、必ずしも全てのサグがボトルネックとはならないことを考えると、縦断勾配変化と交通容量との関係、あるいは縦断勾配変化と車頭時間との関係は必ずしも簡単ではないことが想定される。地点での静的な車頭時間がボトルネックを生じる可能性だけでなく、何らかのダイナミクスが介在している可能性もあり得よう。いずれにしても、地点によって車頭時間が変わりうるものかどうか、この点を議論することが優先されると思われる。

このような問題意識の下、本研究は、地点固有の潜在的な車間時間が存在する、と考えることが妥当であるのかどうかを実験的に検証することを目的とする。単路を繰り返し走行して得られる車間時間データを元に、地点固有の潜在的な車間時間があるモデルと地点によらず潜在的な車間時間が一定と仮定する場合のモデルを仮定し、予測性能を比較検討する。

## 2. データ

単路部として秋田市内の自動車専用道路である秋田中央道路を選択した。ここを 2019 年 7 月 12 日(金), 9 月 11 日(水), 9 月 18 日(水), 10 月 11 日(金)の 13-16 時の時間帯に繰り返し走行した。全て非渋滞流であった。運転者は 1 名で普通運転免許取得後 15 年以上経過しており、日常的に自動車を運転している。走行に際しては、普段通りに運転するよう心掛け、先行車から離されても無理に追従しないようにした。ビデオカメラを自動車内部に設置し、ビデオ映像に移る車内の速度計から速度を判読し、映像に移る前方車のみかけの幅を計測した。なお、前方車の車幅を車種によらず一定とみなすことで、前方車のみかけの車幅の逆数を速度で除した値が車間時間に相当する次元の量となる (図-1)。判読は道路側方におよそ 50m 間隔で設置されている消火器を通過するタイミ

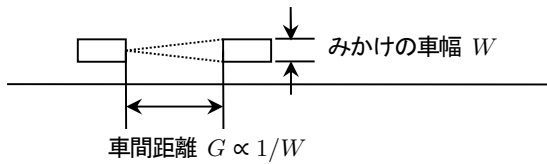


図-1 みかけの車幅と車間距離の関係

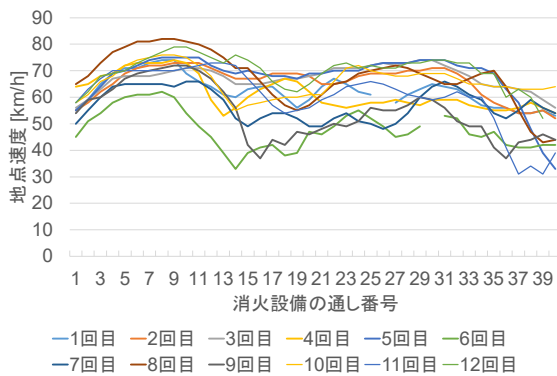


図-2 東行き速度

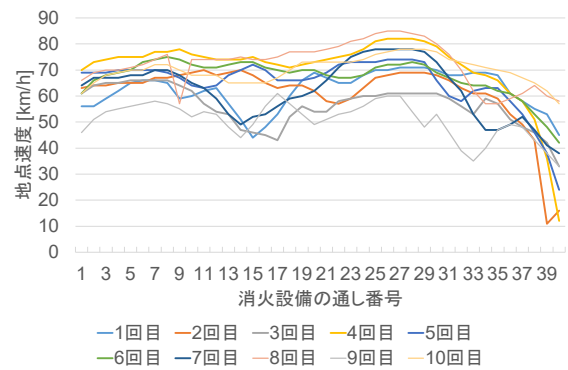


図-4 西行き速度

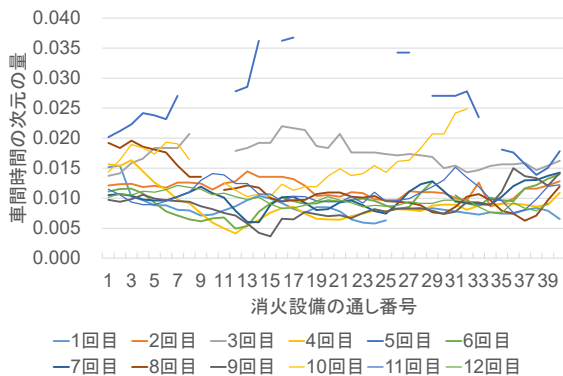


図-3 東行きの車間時間

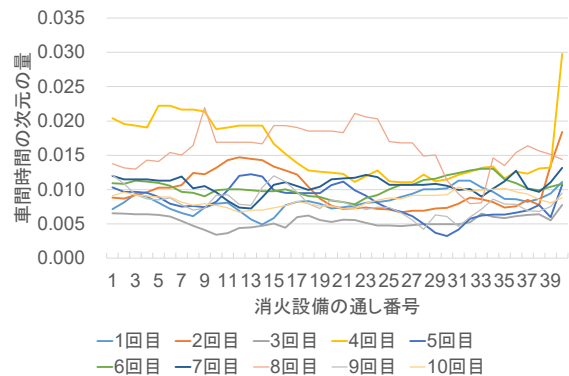


図-5 西行きの車間時間

ングで行なう。このようにして観測された速度と車間時間を図示する。東行きの速度と車間時間それぞれ図-2 および図-3、西行きの速度および車間時間を図-4 および図-5 に示す。図-2 および図-4 をみると、速度の変動パターンは走行回によらず比較的安定している。

なお図-3の線が途切れている部分は欠測を意味する。欠測箇所については、この後に示すように、地点固有の潜在的な車間時間および速度は進行方向に沿って滑らかに変化すると仮定をおいたシステムモデルを考えるため、計算過程で自動的に補間される。

## 3. 状態空間モデルによる地点固有の潜在的車間時間のモデル

地点によって潜在的な車間時間が異なるのかどうかを検討するために、簡単に想定されるいくつかのモデルを仮定し、予測性能を比較することで検討する。

Model-1 では、潜在的な車間時間が地点によらず不変であると仮定する (図-6)。Model-2 では、地点固有の潜在的な車間時間は、進行方向に沿ってなめらかに変化する、すなわち進行方向に関する (空間的な) 1 階差分が白色雑音にしたがう、と仮定する (図-7)。

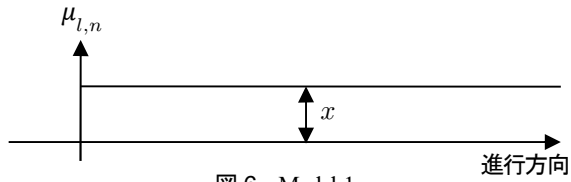


図-6 Model-1

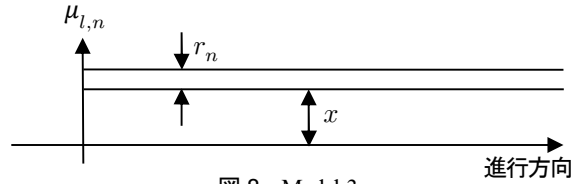


図-8 Model-3

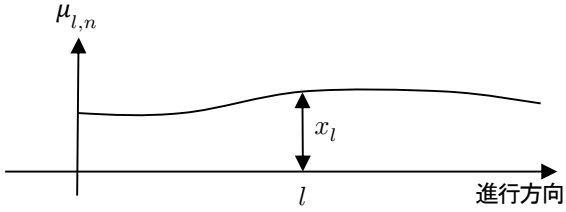


図-7 Model-2

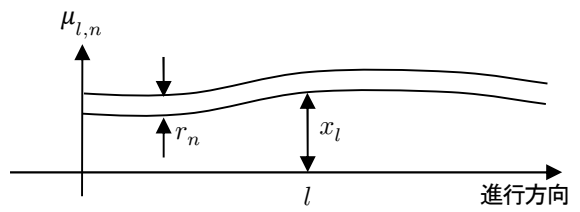


図-9 Model-4

Model-3 は、Model-1 を基本とするが、走行毎に「地点固有の潜在的な車間時間」から一定の偏差が生じる（1 回の走行を通じて常に車間時間が長くなるか短くなる）と仮定する（図-8）。Model-4 は Model-2 を基本とし、空間的になめらかな変動をする地点固有の潜在的な車間時間から、走行毎に一定の偏差が生じる（1 回の走行を通じて常に車間時間が長くなるか短くなる）と仮定する（図-9）。

上記を式で表せば、以下の通りとなる：

$$\begin{cases} \mu_{l,n} = x & \text{(Model-1)} \\ \mu_{l,n} = x_l & \text{(Model-2)} \\ \mu_{l,n} = x + r_n & \text{(Model-3)} \\ \mu_{l,n} = x_l + r_n & \text{(Model-4)} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_l - x_{l-1} \sim N(0, \sigma_w) \quad \text{(Model-2 and Model-4)} \quad (2)$$

$$r_n \sim N(0, \sigma_r) \quad \text{(Model-3 and Model-4)} \quad (3)$$

$$Y_{l,n} \sim N(\mu_{l,n}, \sigma_Y) \quad (4)$$

ここに、 $\mu_{l,n}$ :走行回 $n$ 地点 $l$ における車間時間の推定値、 $x_l$ :地点 $l$ 固有の車間時間、 $x$ :地点に依存しない車間時間(定数)、 $r_n$ :走行回 $n$ に固有の車間時間の系統的なずれ、 $Y_{l,n}$ :走行回 $n$ 地点 $l$ における車間時間の測定値、 $\sigma_w, \sigma_r, \sigma_Y$ :標準偏差。

パラメータ推定にはベイズ推定を行なうソフトウェアである stan<sup>10)</sup>を使用する。このソフトウェアはハミルトニアン・モンテカルロ法による事後分布の推定を行なうものである。

#### 4. 推定結果

対象区間における東行きの計 12 回走行分のデータに対してパラメータ推定を行なった結果を表-1 に、西行きの計 10 回の走行分のデータに対してパラメータ推定を

行なった結果を表-2 に示す。収束の状況を示す $\hat{R}$ は全てのモデルのパラメータにおいて 1.05 を下回っており、収束していると判断される。東行き、西行きのいずれに対しても、WAIC<sup>11)</sup>の順序は小さい順に Model-3, Model-4, Model-1, Model-2 である。予測能力が最も高いモデルは WAIC が最小の Model-3 である。すなわち、地点固有の車間時間が地点によらず不変である、と仮定するモデルが支持される。

Model-1 と Model-2 を比較すると、Model-2 での仮定：「地点固有の潜在的な車間時間が進行方向に沿ってなめらかに変動する」より、Model-1 での仮定：「地点固有の潜在的な車間時間は地点によって不変である」の方がより説明力が高いことを意味する。Model-3 と Model-4 の違いも、やはり地点固有の潜在的な車間時間が進行方向に沿ってなめらかに変動するか不変であるかであり、地点によらず不変であるとの仮説が支持される。

なお Model-1 と Model-3 (Model-2 と Model-4) との違いは、地点固有の潜在的な車間時間から走行毎に一定の偏差が生じると仮定するか否かである。Model-3 (Model-4) の方が WAIC は小さいため、走行毎に一定の偏差が生じると考えるほうが妥当であると言える。

上記の推定結果は、対象区間の縦断線形等と対応付けて考察することが本来は望ましいであろう。縦断線形データを入手した上でモデルの試行錯誤を行なうことや考察することは近い将来の課題と位置付ける。ただし、この対象区間がサグ状の縦断線形を有する区間であることは事実であり、縦断勾配変化に対応するのが遅れると仮定するこれまでの研究に従えば潜在的な車間時間が地点によって異なってもよいにもかかわらずそれを支持しない結果となったことは、今後のボトルネックが生じる仮説を考える上で参考にすべきことと言えよう。

表-1 東行き走行データに対するパラメータ推定結果

変数	Model-1			Model-3		
	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$
$x$	$1.19 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2} - 1.24 \times 10^{-2}$	1.001	$1.23 \times 10^{-2}$	$8.47 \times 10^{-3} - 1.59 \times 10^{-2}$	1.008
$\sigma_w$	-	-	-	-	-	-
$\sigma_r$	-	-	-	$5.80 \times 10^{-3}$	$3.71 \times 10^{-3} - 9.49 \times 10^{-3}$	1.003
$\sigma_Y$	$5.43 \times 10^{-3}$	$5.10 \times 10^{-3} - 5.82 \times 10^{-3}$	1.002	$3.06 \times 10^{-3}$	$2.87 \times 10^{-3} - 3.28 \times 10^{-3}$	0.9992
サンプル数	453			453		
WAIC (2×サンプル数×WAIC)	-3.80 (-3441)			-4.36 (-3946)		
変数	Model-2			Model-4		
	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$
$x$	-	-	-	-	-	-
$\sigma_w$	$3.51 \times 10^{-4}$	$4.86 \times 10^{-5} - 8.30 \times 10^{-4}$	1.014	$2.79 \times 10^{-4}$	$9.29 \times 10^{-5} - 5.46 \times 10^{-4}$	1.004
$\sigma_r$	-	-	-	$5.81 \times 10^{-3}$	$3.70 \times 10^{-3} - 9.29 \times 10^{-3}$	1.001
$\sigma_Y$	$5.37 \times 10^{-3}$	$5.02 \times 10^{-3} - 5.73 \times 10^{-3}$	1.001	$3.01 \times 10^{-3}$	$2.81 \times 10^{-3} - 3.21 \times 10^{-3}$	0.9994
サンプル数	453			453		
WAIC (2×サンプル数×WAIC)	-3.78 (-3425)			-4.33 (-3922)		

表-2 西行き走行データに対するパラメータ推定結果

変数	Model-1			Model-3		
	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$
$x$	$1.01 \times 10^{-2}$	$9.71 \times 10^{-3} - 1.05 \times 10^{-2}$	1.002	$1.02 \times 10^{-2}$	$7.74 \times 10^{-3} - 1.27 \times 10^{-2}$	1.002
$\sigma_w$	-	-	-	-	-	-
$\sigma_r$	-	-	-	$3.85 \times 10^{-3}$	$2.40 \times 10^{-3} - 6.47 \times 10^{-3}$	1.002
$\sigma_Y$	$3.94 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-3} - 4.22 \times 10^{-3}$	1.013	$2.34 \times 10^{-3}$	$2.18 \times 10^{-3} - 2.51 \times 10^{-3}$	1.005
サンプル数	400			400		
WAIC (2×サンプル数×WAIC)	-4.12 (-3292)			-4.62 (-3698)		
変数	Model-2			Model-4		
	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$	事後平均	95%信用区間	$\widehat{R}$
$x$	-	-	-	-	-	-
$\sigma_w$	$2.57 \times 10^{-4}$	$5.42 \times 10^{-5} - 5.68 \times 10^{-4}$	1.007	$3.34 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4} - 5.88 \times 10^{-4}$	1.003
$\sigma_r$	-	-	-	$3.93 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-3} - 6.99 \times 10^{-3}$	1.002
$\sigma_Y$	$3.91 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-3} - 4.20 \times 10^{-3}$	1.001	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.08 \times 10^{-3} - 2.39 \times 10^{-3}$	1.001
サンプル数	400			400		
WAIC (2×サンプル数×WAIC)	-4.09 (-3272)			-4.45 (-3558)		

## 5. おわりに

本研究では単路部の繰り返し走行データを元に、地点固有の車間時間を推定し、進行方向に沿って車間時間が異なるのかを検討した。いくつかのモデルによる比較検討によると、車間時間は地点によって変わらないとの考

えを支持する結果となった。

もちろん、このことがOVモデルの最適速度関数が地点によって変化しないと直ちに結論付けるにはまだ議論の余地がある。データ観測に係る点で言えば、繰り返し走行しているドライバーは1人に限定されていることが大きな影響を及ぼしている可能性がある。また、そもそ

も走行している秋田中央道路内に単路部ボトルネックが存在していないのであれば地点固有の潜在的な車間時間が地点によらず一定値であることも不思議ではない(ただし、当該道路内にサグは存在しているので一般的なサグ部における渋滞に至る仮説が述べるどころの「アクセルの補償遅れ」「速度低下」はあって然るべきである。これが渋滞するサグとしないサグの違いを暗示しているのかもしれない)。

今後の検証によるところは大きいものの、いずれにしても単に地点毎に車間時間が異なると考えるのは早計であるように思われる。

**謝辞**：本研究は豊橋技術科学大学令和元年度高専連携教育研究プロジェクトの一部として行われたものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，No.371/IV-5，pp.1-7，1986.
- 2) 遠藤元一，中川浩，深瀬正之，橋本弾：東京湾アクアラインの渋滞対策について，交通工学論文集，Vol.1，No.4，pp.B\_1-B\_8，2015.
- 3) 矢澤秀樹，横田昌弘，今野晋，佐藤久長，鈴木直也，山本浩司：効果的なスピーカーによるトンネル内注意喚起システムの開発，第17回ITSシンポジウム論文集，6pages，2019.
- 4) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Dynamic model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical Review E*, Vol.51, pp.1035-1042, 1995.
- 5) 杉山雄規：交通流の物理，ながれ，Vol.22，No.2，pp.95-108，2003.
- 6) Kikuchi, M., Sugiyama, Y., Tadaki, S. and Yukawa, S.: Formulation of Synchronized Flow at the Upper Stream of Bottleneck in Optimal Velocity Model, *IFAC Proceedings*, Vol.36, No.14, pp.347-351, 2003.
- 7) 只木進一，山本祥平，日永田泰啓：ボトルネックによる渋滞形成，応用力学研究所研究集会報告，No.18，ME-S5，5pages，2007.
- 8) Wada, K., Martinez, I. and Jin, W.-L.: Continuum Car-following Model of Capacity Drop at Sag and Tunnel Bottlenecks, *Transportation Research Part C*, 2019. (in Press)
- 9) 和田健太郎，邢健，大口敬：連続体交通流理論に基づく高速道路サグ部における Capacity Drop 現象の実証分析，第17回ITSシンポジウム論文集，7pages，2019.
- 10) 松浦健太郎：StanとRでベイズ統計モデリング，共立出版，2016.
- 11) Watanabe, S.: Asymptotic Equivalence of Bayes Cross Validation and Widely Applicable Information Criterion in Singular Learning Theory, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.11, pp.3571-3594, 2010.

(2020.3.8 受付)

## TRIAL TO PREDICT POSITION OF CAPACITY BOTTLENECK BY ESTIMATION OF SPATIALLY INHERENT LATENT TIME GAP

Makoto KASAI, Ayaka DOBASHI, Kojiro MATSUO, Hironobu HASEGAWA