

## 音声による速度回復情報提供の交通性能改善メカニズムの実証分析

## Empirical Analysis of Traffic Performance Improvement Mechanisms by Audible Speed Recovery Information Provision

和田 健太郎<sup>1</sup>, 金崎 圭吾<sup>2</sup>, 西田 匡志<sup>3</sup>, 平井 章一<sup>4</sup>Kentaro WADA<sup>1</sup>, Keigo KANESAKI<sup>2</sup>, Tadashi NISHIDA<sup>3</sup> and Shoichi HIRAI<sup>4</sup>

本研究は、小仏トンネルに渋滞対策として導入された音声注意喚起（速度回復情報提供）システムによって、なぜ渋滞発生時交通量、渋滞発生後捌け交通量等の交通性能の改善がもたらされたのかを考察する。具体的には、近年提案された最新の交通流理論（Jin, 2018; Wada et al., 2020）に基づく実証分析をシステム導入前後のデータに対して行い比較する。そして、(i) 渋滞発生時/渋滞発生後捌け交通量の改善はボトルネック区間における「安全車間時間の短縮」という共通のメカニズムにより説明できること、(ii) 渋滞中のボトルネック下流の加速度向上は必ずしも捌け交通量の改善には繋がっておらずさらなる改善の余地があること、を示す。

This paper explores the improvement mechanisms of traffic performance such as the traffic capacity before congestion and the queue discharge flow rate by the audible speed recovery information provision introduced as a congestion measure at the Kobotoke tunnel of Chuo Expressway, Japan. Specifically, we apply the recent advanced traffic flow theory for endogenously describing the capacity drop phenomenon at sag and tunnel bottlenecks (Jin, 2018; Wada et al., 2020) to data measured before and after the introduction of the system and compare results. We then show that (i) the improvements in traffic capacity before congestion and the queue discharge flow rate can be explained by a common mechanism “reduction of safety time gap” within the bottleneck section; (ii) the improvement in acceleration during the congestion at the end of the bottleneck section does not result in that in queue discharge flow rate, and thereby there is room for further improvement.

**Keywords:** 音声案内, 交通容量, 渋滞発生後捌け交通量, 交通流理論, トンネル

Audible Information Provision, Capacity, Queue Discharge Flow, Traffic Flow Theory, Tunnel

## 1. はじめに

中央道上路線小仏トンネル付近は、国内有数の渋滞箇所であり、週末を中心に年間100件以上の渋滞が発生している。こうした渋滞への対策として、トンネル手前の付加車線により渋滞発生直前における車線利用率の平準化を図る対策<sup>1)</sup>や走光型視線誘導システムの運用が行われ、一定の渋滞削減効果が確認されている。

さらに、これらの対策に加え、2019年のゴールデンウィーク(GW)からは、スピーカーを用いた音声による注意喚起(速度回復情報提供)システムが運用されている<sup>2)</sup>。これは、トンネル壁面に設置したスピーカーから走行中のドライバーに対して音声案内を放送し、速度回復の促進を図るものであり、交通事故防止に向けた取り組みとしてリニューアル工事で試行的に実施した対策<sup>3)</sup>を渋滞対策に活用したものである。この音声

1 正会員, 博士(情報科学), 筑波大学 システム情報系

Member, Ph.D. (Inf. Sci.), Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba  
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 e-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp Phone: 029-853-3614

2 学生会員, 学士(社会工学), 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群

Student Member, BA (Policy Plann. Sci.), Degree Programs in Systems and Information Engineering, Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

3 正会員, 中日本高速道路(株) 八王子支社

Member, Hachioji Branch, Central Nippon Expressway Company Ltd.

4 正会員, 博士(工学), 中日本高速道路(株) 八王子支社

Member, Ph.D., Hachioji Branch, Central Nippon Expressway Company Ltd.

による速度回復情報提供の渋滞対策効果について、佐藤ら<sup>2)</sup>は、感知器およびETC2.0データを用いて検証を行なっている。そして、システム導入により渋滞発生時交通量、渋滞発生後捌け交通量ともに有意に改善すること、その結果大幅な渋滞削減が実現していることを示している。また、このような交通性能改善効果が得られた要因として、追従挙動の活性化の可能性を指摘している。しかし、要因については観測データに基づく推察に留まっており、その具体的なメカニズムは明らかになっていない。

本研究は、近年提案された最新の交通流理論<sup>4),5)</sup>に基づく小仏トンネル渋滞の実証分析により、音声注意喚起システム導入による交通性能改善メカニズムを考察することを目的とする。より具体的には、システム導入前後のデータによる理論モデルのキャリブレーションを行い、推定パラメータと観測交通量の関係を分析することにより、改善メカニズムを提示する。また、提示されたメカニズムに基づき、さらなる改善に向けた方向性についても議論を行う。

以上の分析は、「渋滞の先頭とはそもそもどこなのか？あるいはどこを考慮すべきなのか？」という基本的な事項から出発し、その地点を正確に把握(推定)して渋滞対策の効果評価をしている点の特徴である。分析結果は、その重要性を示唆するものとなっており、またそのためにいかに理論の考え方が有用であるかを示している。従って、本研究は、音声注意喚起システム(の評価)に限らず、より広い渋滞対策の設計やその効果評価に活用できる可能性がある。

## 2. 小仏トンネルと音声注意喚起システムの概要

本研究で対象とする中央道上り小仏トンネルは、図1の矢印に示すように、延長314m(40.8~40.5KP)の小仏第二トンネルと延長1618m(40.4~38.8KP)の小仏第一トンネルの2つのトンネルで構成されており、2つのトンネルの間はシェルターで覆われている。スピーカーによる音声案内は、エリア1(40.567~40.17KP)とエリア2(39.37~39.035KP)の2つの放送区間において行われている(図中の赤色部分)。小仏トンネル付近の勾配は、トンネル手前の相模湖BS付近からトンネル内に渡って上り坂が続いており、トンネル区間の勾配はほぼ全域に渡り上り2.3%である。一方、39KP付近から縦断曲線(2.3%→-4.5%)が導入され小仏トンネル出口付近がちょうどクレストの頂点になっている。

音声注意喚起システムで使用されるスピーカーは、トンネル内2つの放送区間の壁面に各8個ずつ計16個がそれぞれ約50m間隔で設置されている。このスピーカーは道路トンネルでの使用のために開発されたものであり、反響を抑える指向性を持っている。また、

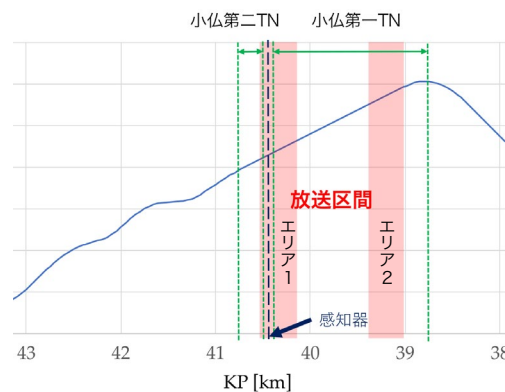


図1 小仏トンネルの縦断勾配と音声システムの配置

スピーカー間の遅延による波長調整により、高速走行中においても同一な音声が聴こえるよう設計されており、走行車両は1区間で同一のメッセージが2,3回繰り返し聴こえるようになっている。本システムはシェルター内の40.43KPに設置された感知器と連動しており、走行速度に応じて自動で放送が行われている。音声メッセージの内容は走行区間、速度閾値ごとに異なる(1分間平均速度が5回連続閾値を超えることで変化する)。上流のエリア1は、渋滞中の速度回復開始地点近傍であり、次のようなアナウンスがされている。

- 40~70km/h: 速度が低下しています。渋滞防止のため、速やかに速度回復願います。
- 40km/h以下: 渋滞の先頭は抜けました。速やかに速度回復願います。

一方、下流のエリア2では、上流の効果の持続・上乗せを意図して、以下のアナウンスがされている。

- 70km/h以下: 上り坂が続きます。引き続き速度回復願います。

システムは、2019年4月28日からエリア1のみで一部運用として始まり、5月4日から2つの放送区間での全面運用となった(その他詳細は佐藤ら<sup>2)</sup>を参照)。

## 3. 分析手法

本章では、実証分析の基盤となる、連続体交通流理論<sup>4),5)</sup>の考え方、および、理論モデルのキャリブレーション手法<sup>6)</sup>について示す。ここでの内容は、既存研究で示されたものであるが、紙面の制約等によりここでの説明が不十分なところもある。従って、本研究で行う実証分析上必要な事項については詳しく説明する。

### 3.1 連続体交通流理論の考え方

Jin<sup>4)</sup>, Wada et al.<sup>5)</sup>によって提案された高速道路単路部に対する連続体交通流理論は、渋滞発生後捌け交通量

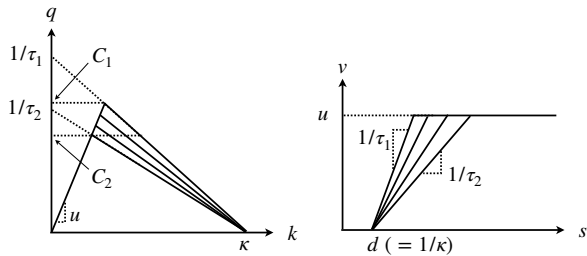


図2 交通量-密度FD(左)と車頭距離-速度FD(右)

が渋滞発生時のそれに比べて低下する“Capacity Drop”現象を主に説明するために開発されたものである。しかし、この理論の前提(仮定)は、ボトルネックの空間構造に関する有用な見方を提示しており、渋滞発生時の交通量の分析にも利用することができる。

その重要な仮定は、ボトルネックは“交通容量が空間的に連続的に低下する区間”である、というものである。これは、多くの渋滞分析において、明示的あるいは暗にボトルネックを空間上の一断面として捉えようとするのと対照的である。具体的には、この理論におけるボトルネックは、図2のように、Fundamental Diagram (FD) を空間的に連続的に変化させることにより記述される。左図は交通量と密度に関するFDである。ボトルネックを道路上の位置  $x = 0$  から  $x = L$  の区間であるとすると、渋滞流側のFDの傾きを徐々に緩くすることで、この区間の交通容量  $C(x)$  が  $C(0) = C_1$  から  $C(L) = C_2$  まで低下する様子を表している。このときパラメータとして連続的に変化しているのは、安全な車間距離を保って走行するために最低限必要な車間時間を表す安全車間時間 (time gap)  $\tau(x)$  であり、自由流速度、飽和密度パラメータ  $u, \kappa$  はそれぞれ変化しないとする。安全車間時間  $\tau(x)$  は  $\tau(0) = \tau_1$  から  $\tau(L) = \tau_2$  まで単調増加しており、右図の車頭距離と速度のFDで見ても、その傾きが緩くなっていくことに対応する。これは、サグやトンネルにおいて速度低下しているにもかかわらず、それが無意識がゆえに車頭(車間)距離を保とうとしている車両挙動であると解釈される<sup>6)</sup>。なお、 $C(x)$  と  $\tau(x)$  の関係は次の通りである。

$$C(x) = \frac{u\kappa}{1 + u\kappa\tau(x)} \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

この理論のもう1つの重要な仮定が、渋滞発生後捌け交通量が安定した渋滞状態におけるボトルネック近傍の速度回復プロファイルが追従状態(渋滞流)と Bounded Acceleration (BA) 状態(発進流)から構成されるというものである。ここで、BA 状態はドライバ自身の加速度限界に従って走行する状態を表し、ボトルネックを抜けたにもかかわらずそのことが明確に把握できず、アクセルを十分踏み込まない状態と解釈される<sup>6)</sup>(ま

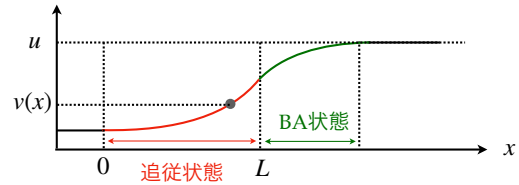
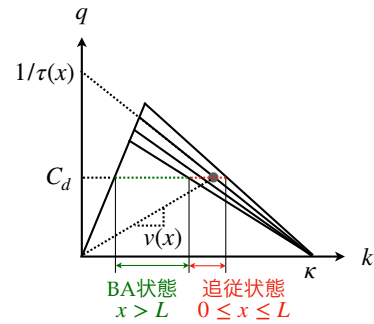


図3 安定渋滞状態の交通量-密度図(上)と速度回復プロファイル(下)の関係

たこのとき、一般に先行車両に追従できていない)。

具体的には、Newell の追従モデルと BA モデルを組み合わせた交通流モデルを仮定したとき、安定渋滞状態 (i.e., ボトルネック近傍の任意の地点の交通量、速度、密度の時間変化が十分小さい状態) においてはボトルネック区間 ( $0 \leq x \leq L$ ) では追従状態、ボトルネック下流 ( $x \geq L$ ) では BA 状態で速度回復することが理論的に示されている<sup>5)</sup>。図3(上図)にも示すように、追従状態はFDの速度に従った走行である。捌け交通量が  $C_d$  で安定したとすれば、FDの渋滞流側の傾きが緩くなるのに従って、(幾何学的に定まる)次式で速度回復する。

$$v(x) = \frac{1}{\{1/C_d - \tau(x)\}\kappa} \quad 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

追従状態における速度  $v(x)$  は、安全車間時間の空間変化率  $\tau_x(x) \geq 0$  のとき  $x$  についての増加関数となる。また、車間時間の  $x$  についての2階偏微分  $\tau_{xx}(x) \geq 0$  のとき、速度回復プロファイルの形状は下に凸となる(下図)。なお、安定状態における交通流の加速度は  $a(x) = v(x)v_x(x)$  となる<sup>4)</sup>が、これに式(2)を代入すると、

$$a(x) = \frac{\tau_x(x)}{\{1/C_d - \tau(x)\}^3 \kappa^2} \quad 0 \leq x \leq L. \quad (3)$$

一方、交通量-密度図(上図)において、FD内部に現れる状態がBA状態(発進流)である。本研究では、加速度限界を表現する典型的なモデルである TWOPAS モデルを仮定する<sup>4)</sup>。

$$a(x, v) = \{a_0 - g\Phi(x)\}(1 - v(x)/u) \quad x \geq L \quad (4)$$

ここで、 $a_0$  は加速度パラメータ、 $g$  は重力加速度、 $\Phi(x)$  は(小数表現の)勾配である。また、このときの速度

回復プロファイル ( $dv/dt = a(x, v)$  を解いたもの) は,  $\Phi_x(x) < 0$  (例えば, クレスト区間) でない限り, 上に凸の形状(凹関数)になる(下図).

さて, この理論によれば, 安定渋滞状態における渋滞の先頭は, 渋滞流(追従状態)から発進流(BA状態)に切り替わる地点, つまり, ボトルネック区間の下流端  $x = L$  である. 一方で, 従来研究では渋滞の先頭を, 速度回復開始地点(理論の  $x = 0$ ) とする考え方(例えば<sup>7)</sup>と, 実務上の渋滞判定基準速度(例えば 40km/h)以上となった地点とする考え方(例えば<sup>8)</sup>)がある. 前者は, 本理論の立場からは, ボトルネックを空間上の一断面(i.e., 渋滞流では速度回復しない)として捉えていると解釈できるが, トンネルやサグを考えた場合, ボトルネックを区間と考える方が自然である. 後者は, 経験則に基づくものでその理論的根拠は曖昧であるが, 速度回復開始地点の速度が 20~30km/h となることが多いことを考えれば, 結果的に本理論の渋滞の先頭とより近い. なお, 渋滞の発生地点と渋滞先頭との関係は以下のようになる. この理論では,  $C_2$  を超えた需要がボトルネック“区間”に到着した際に渋滞が発生するが, その地点はその需要レベルに応じて  $0 \leq x \leq L$  で変動する. いずれにしても, 渋滞発生地点は, 安定渋滞状態の渋滞の先頭( $x = L$ )よりは上流側, 速度回復開始地点( $x = 0$ )よりは下流側となる.

最後に, 安定渋滞状態における捌け交通量  $C_d$  と, パラメータ  $\tau(x)$ ,  $\tau_x(x)$ ,  $a_0$  の関係について見ておこう. 捌け交通量は渋滞の先頭で規定されるため,  $x = L$  におけるこれらの変数の関係が重要になる. 具体的には,  $x = L$  の地点は追従状態とも BA 状態とも解釈できるので, 次の関係式を満足しなければならない.

$$\frac{\tau_x(L)}{\{1/C_d - \tau(L)\}^3 \kappa^2} = \{a_0 - g\Phi(L)\} \left(1 - \frac{v(L)}{u}\right) \quad (5)$$

式(2)を代入して整理すると,

$$\frac{\{a_0 - g\Phi(L)\}}{\tau_x(L)} \{1/C_d - \tau(L)\}^2 \kappa \left(\{1/C_d - \tau(L)\} \kappa - \frac{1}{u}\right) = 1 \quad (6)$$

が得られる. これより, 他のパラメータを固定したとき,  $C_d$  と  $\tau(L)$  は反比例の関係にあること, 同様に,  $\tau_x(L)$  が小さくなると  $C_d$  が大きくなること,  $a_0$  が大きくなると  $C_d$  が大きくなることわかる. 最初の関係は, 渋滞先頭における安全車間時間が小さくなりより短い車頭距離で追従することで捌け交通量が大きくなることを表している. また, この車間時間の減少は, ボトルネック容量  $C_2$  を大きくすることにもなる(式(1)も参照). 最後の関係は, 渋滞先頭をより大きい加速度で速やかに抜けることにより捌け交通量が改善されることを表している. 2番目の関係はややわかりづらいが,  $\tau_x(x)$

は自車両の速度を追従する先行車両の速度にどの程度迅速に合わせたかを表している. 具体的には, 追従状態における車両  $n$  の地点  $x$  における速度  $v_n(x)$  と(安全車頭距離  $d$  下流の)先行車両の速度  $v_{n-1}(x+d)$  は次の関係<sup>\*1</sup>にある(詳細は文献<sup>5),6)</sup>を参照).

$$v_n(x) = \left[ \frac{1}{v_{n-1}(x+d)} + \tau_x(x) \right]^{-1} \quad (7)$$

つまり,  $\tau_x(x) = 0$  であれば, (安全車間時間/距離の間を開けて)先行車両の速度に合わせて追従していることを意味し,  $\tau_x(x)$  が大きくなるほど, 先行車両に比べて速度が小さく, 速度調整が遅れていることを表している. 従って, 速度回復中では,  $\tau_x(L)$  が小さいほど, 先行車両に合わせて迅速に速度回復することを意味し, その結果捌け交通量が改善することに繋がる.

### 3.2 キャリブレーション手法

前節で示した理論モデルのキャリブレーション手法を説明する. この手法は, 各渋滞イベント毎に, 安定渋滞状態で観測された捌け交通量  $C_d$  および(空間平均)速度回復プロファイル  $v(x)$  から, ボトルネック区間, および, パラメータ  $\tau(x)$ ,  $a_0$  を推定するものである. キャリブレーションは, 次の3つの段階からなる: (i) ボトルネック区間 ( $x = 0, L$ ) の設定, (ii) 安全車間時間  $\tau(x)$  の推定, (iii) 加速度パラメータ  $a_0$  の推定. ただし, パラメータ  $u, \kappa$  は観測データや経験則から適当な値を予め設定しておく必要がある.

(i) では, まず, 渋滞流中の速度回復開始地点(KP)を速度回復プロファイルから特定し, その近傍の適当な地点をボトルネック区間の上流端  $x = 0$  とする. 続いて,  $x > 0$  において, ボトルネック下流端を設定する. 速度回復プロファイルが下に凸から上に凸へと変化する典型的な形状の場合, その変曲点の近傍の適当な地点を  $x = L$  とする. 形状から判断が難しい場合には, 速度レベル等(例えば, 40km/h 基準)から仮の地点を設定する. 後述するように, ボトルネック区間は速度回復プロファイルのみから最終決定するのではなく, モデルの当てはまりの良さを確認し調整する必要がある. 続く(ii)では, 式(2)の関係からボトルネック区間 ( $0 \leq x \leq L$ ) の車間時間  $\tau(x)$  を推定する. 最後の(iii)では, ここまでで推定したパラメータおよび勾配データ  $\Phi(L)$  を式(5)に代入することで加速度パラメータ  $a_0$  を推定する.

キャリブレーション手法の補足事項として3点述べる. 以上の手順からわかるように, この手法では, ボトルネック区間が一旦設定されると, パラメータ  $\tau(x)$ ,  $a_0$  が一意に定まる. 従って, 事実上, ボトルネック区間の設定がモデルの当てはまりの良さを調整するパラ



メータとなる。そのため, (iii) の手順の後にモデルの当てはまり具合をみて, (i) に戻りボトルネック区間を調整する必要がある。ここでの当てはまりの良さは, モデルによる速度回復プロファイルが観測データをどの程度うまく再現するかを意味するが, ボトルネック区間は観測データに合うように  $\tau(x)$  を推定しておりモデルと観測が合うことは自明である。つまり, ボトルネック下流の BA モデルによる速度回復プロファイルの再現度合いが実質的な評価基準である。なお, ボトルネックを抜けて自由流に至るまでの発進流 (BA) 状態はおよそ 1~数 km に渡るのが一般的であるが, 捌け交通量を決定する上で重要なのはボトルネック直下流のみである<sup>6)</sup>。従って,  $x = L$  から数 100m~1km 区間の当てはまりの良さを確認するのみで十分であろう。

2 点目は, 式 (5) に含まれる  $\tau_x(L)$  をどのように設定するかについてである。一般に, 速度回復プロファイル  $v(x)$  は連続的には観測されず, ある空間間隔  $\Delta x$  毎に個々の車両の観測値を集計して空間平均速度を算出せざるを得ない。必然的に, 以上の (ii) の段階では  $\tau(x)$  もその間隔でしか推定されず,  $\tau_x(L) \approx \{\tau(L) - \tau(L - \Delta x)\} / \Delta x$  と近似することになる。もちろん, これで当てはまりの良いモデルが得られる場合もあるが, 局所的な情報のみを用いているため, データのばらつきや精度の影響を強く受ける。この問題を回避するために, 和田ら<sup>6)</sup> では,  $0 \leq x \leq L$  の間の離散的な地点  $x_1 (= 0), \dots, x_i (= (i - 1)\Delta x), \dots, x_M (= L)$  で推定した  $\tau(x_1), \dots, \tau(x_i), \dots, \tau(x_M)$  に基づき連続な単調増加関数  $f(x | \beta)$  ( $\beta$  はパラメータ) をカーブフィッティングにより求め,  $\tau_x(L) = f_x(L | \beta)$  としている。より具体的には, 2 次関数  $f(x | \beta) = \beta_1 x^2 + \beta_2 x + \beta_3$  を仮定し,

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^M |\tau(x_i) - f(x | \beta)| \quad \text{s.t.} \quad f(x_M | \beta) = \tau(x_M)$$

によりパラメータ  $\beta$  を設定している。制約条件を課している理由は, 式 (5) の BA モデル (右辺) の速度  $v(L)$  と FD (左辺) の  $\tau(L)$  を整合させるためである。なお, カーブフィッティングにおける  $\beta$  もボトルネック区間を定めると一意に定まるため, 実質的なパラメータがボトルネック区間という点は変わらない。

最後に, 推定されたモデルの妥当性について述べる。本節のキャリブレーション法は, 安定渋滞状態のデータからパラメータを推定している。従って, この推定されたパラメータが妥当であると判断するためには, 安定渋滞状態以外の現象もうまく説明している必要がある。そこで, 推定された  $\tau_1 = \tau(0), \tau_2 = \tau(L)$  から求められるボトルネック上流端の容量  $C_1 = C(0)$  と下流端の容量  $C_2 = C(L)$  の間 (あるいは少なくともその近傍) に, 観測された渋滞発生時交通量があることを妥当性の判断基準とする。言い換えれば, 容量を超えた

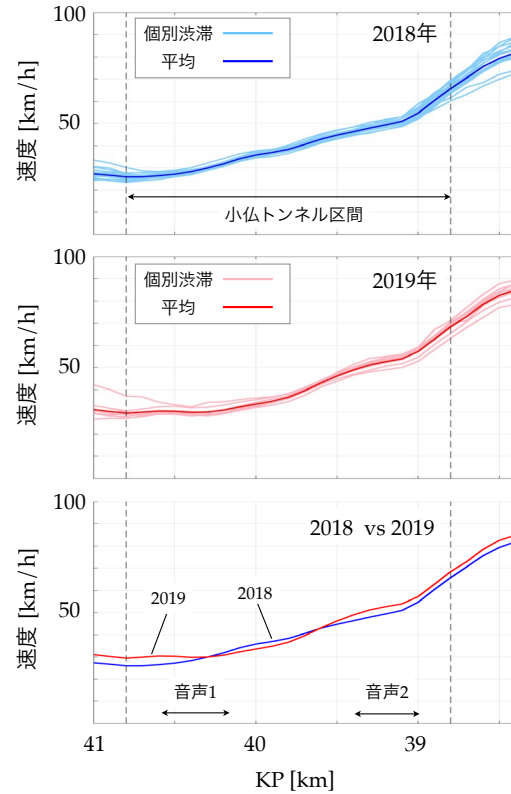


図 4 安定渋滞状態の観測速度回復プロファイル

需要の到着により渋滞に至るというマクロな渋滞発生現象を説明できるとき, 推定が妥当であると判断する。

#### 4. 実証分析

本章では, 前章の理論に基づき小仏トンネル渋滞の実証分析を行う。具体的には, 4.1 ではまず, 分析対象日時・区間を明確化した上で渋滞発生時および渋滞発生後の交通量の改善実績を概観する。4.2 では, 音声注意喚起システム導入前後のキャリブレーション結果について示す。そして, 4.3 では, 交通性能改善実績とキャリブレーション結果を照らし合わせるにより, そのメカニズムを考察する。

##### 4.1 分析対象日時・区間と交通性能改善実績

分析対象とする渋滞イベントは, NEXCO 中日本で抽出された, システムの運用が開始された 2019 年の GW から 6 月末の 2 ヶ月間と, その比較対象であるシステム導入前 2018 年の同期間のものとする。ただし, システムの一部のみが運用されていた 2019 年の GW 前半, 小規模渋滞 (渋滞長がトンネル区間をカバーしない, 十分な ETC2.0 プローブが確保できない等), データ欠損のあるイベントは除外した。最終的に対象とした渋滞イベントは, 2018 年は 18, 2019 年は 9 つ (全

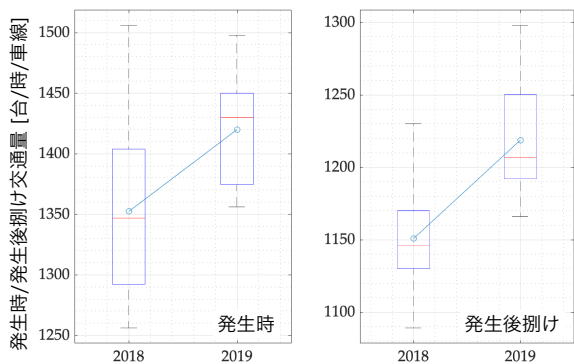


図5 システム導入前後の交通量

て休日・祝日)である。

図4に全対象イベントの安定渋滞状態の速度回復プロファイルを示す。薄い実線は各イベントの速度回復プロファイルであり、後述する渋滞発生後捌け交通量の計測時間帯に対象区間を走行したETC2.0プローブデータの空間平均(100m毎)により算出している。一方、濃い実線は全渋滞イベントの(空間)平均値である。システム導入前後を比較すると、佐藤ら<sup>2)</sup>でも言及されているように、音声システムの導入されているトンネル抗口付近、後半以降の速度の上昇が顕著であるが、トンネル中間における速度が低下している。また、速度回復開始地点はシステム導入前では40.7KP付近、導入後では40.2KP付近であることがわかる。一方、下に凸から上に凸に速度が変化する顕著な変曲点としては、39KP付近が挙げられる。しかし、この地点は、既に60km/h弱の速度に達しており渋滞流とみなすには速度が高く、また、近傍(38.73KP)の感知器の車線別の速度を見ると5~10km/hの速度差が生じているため(渋滞流中では一般に車線間速度差はほとんどない)、渋滞の先頭/ボトルネック下流端の候補から外した。39KP付近はクレストの始点にあたり、その影響で発進流中でも下に凸の速度回復をしていると考えられる。よりマイナーな変曲点候補としては(特に2019年)、39.5KP付近が挙げられる。ただし、その形状のみから適当なボトルネック下流端を決めるのは難しいため、41~39.3KPの100m毎でキャリブレーションを行い、その候補点から39KPまでの当てはまりのよさでその地点を特定する。

図5は、システム導入前後の渋滞発生時交通量と渋滞発生後捌け交通量の箱ひげ図(箱の上下端は75, 25%タイル、赤線は中央値)に平均値をプロットしたものである。渋滞発生時交通量は佐藤ら<sup>2)</sup>と同様、40.43KPの感知器速度が40km/h以下に低下した最初の5分を除いたその直前15分間のフローレートとし、渋滞発生後捌け交通量は、上述の対象区間が渋滞状態にある(i.e.,

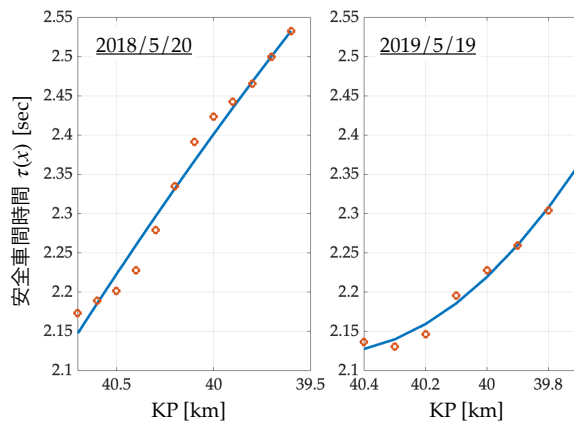


図6 推定例:安全車間時間(点:直接推定, 実線:2次曲線近似)

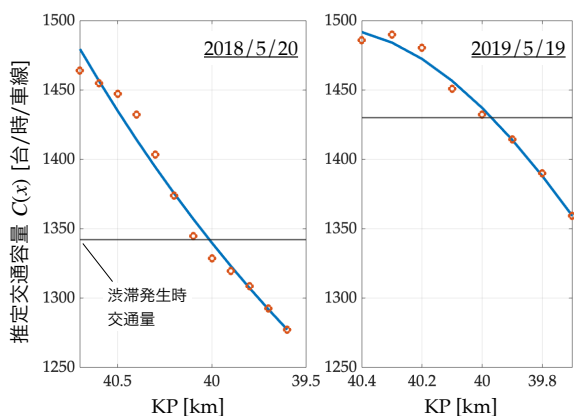


図7 推定例:交通容量(点:直接推定, 青実線:2次曲線近似)と渋滞発生時交通量(黒実線)

速度コンター図から渋滞末尾が当該区間より明らかに上流にあると判断される)全時間の平均フローレートとした。渋滞発生時交通量は平均値で5.0%増加しており、渋滞発生後捌け交通量の改善は5.9%である(いずれもマン・ホイットニーのU検定で5%水準で有意に差が認められる)。より詳細にみると、後者では分布全体が上方方向にシフトしているのに対して、前者では主に小さい交通量レベルが発生しなくなっていることがわかる。なお、交通量の低下率(1-発生後捌け交通量/発生時交通量)の平均値は、システム導入前では14.7%、導入後で14.1%であり大きな差はない。

#### 4.2 キャリブレーション結果

キャリブレーション結果の一例を図6-図8に示す。図6は、安全車間時間 $\tau(x)$ の推定結果であり、空間平均速度から直接推定した結果、実線がそれをカーブフィッティングした結果を表す。システム導入前の2018年5月20日では、ボトルネック区間は40.7~39.6KP(1.1km)

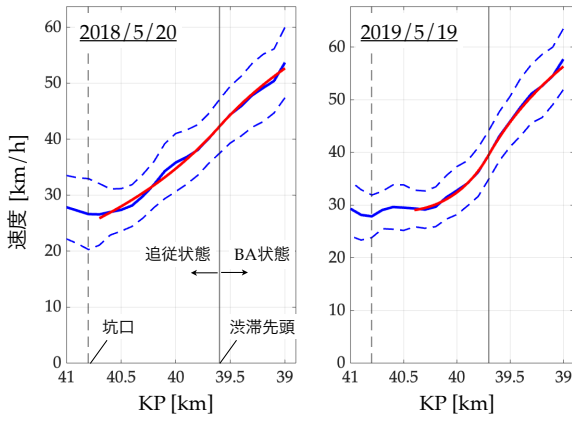


図8 推定例：速度回復プロファイル（青実線：平均，青点線：平均 ± 標準偏差，赤実線：モデル）

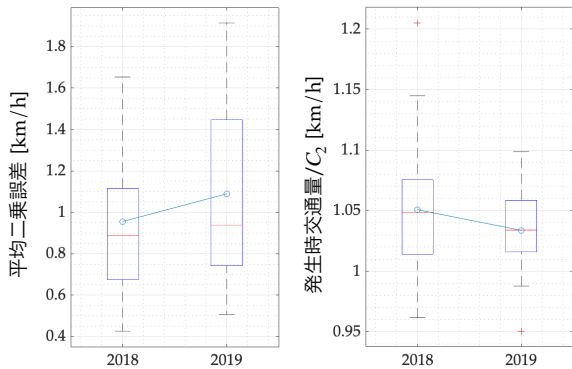


図9 モデルの当てはまり（左図）と妥当性（右図）

と推定されており，システム導入後の2019年5月19日では40.4~39.7KP (0.7km) と推定されている．ボトルネック下流端の推定値はおおよそ一致しているが，ボトルネック上流端の推定値はシステム導入後では下流に移動している．これは，図4でも見たシステム導入後の坑口付近で速度が上昇していること，および，速度回復開始地点をボトルネック上流端と仮定する理論がもたらす帰結である．図7は，推定した安全車間時間を式(1)に代入することで求めた交通容量  $C(x)$  である．システム導入後ではボトルネック下流部分の安全車間時間の短縮により，導入前より容量の空間的な低下が抑制されていることが見てとれる．また，渋滞発生時交通量が  $C_1 = C(0)$  と  $C_2 = C(L)$  の間に収まっており，キャリブレーションが妥当であることがわかる．最後の図8は，実測とモデルによる速度回復プロファイルを比較したものである．この図より，渋滞先頭から39KPまでの500m強のBA状態（発進流）の当てはまりも良好であることがわかる．

全渋滞イベントのキャリブレーションの当てはまり (i.e., BAモデルの再現性) と妥当性 (i.e., 渋滞発生時交通量とボトルネック容量との関係) の結果を図9に示す．

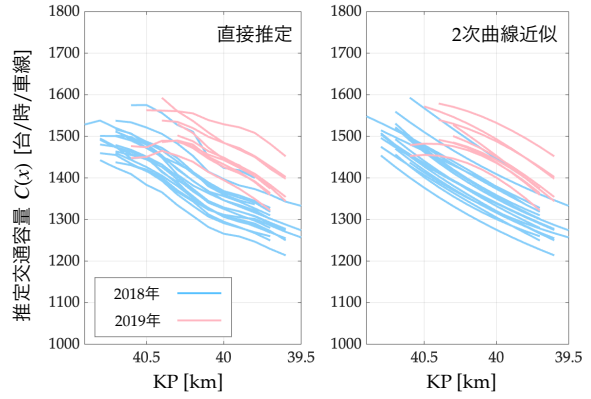


図10 推定交通容量

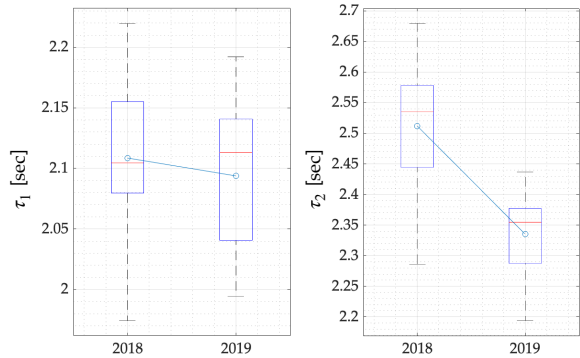


図11 ボトルネック上下流端の安全車間時間

当てはまりについては平均二乗誤差が平均で1km/h，最大でも2km/h以下と良好である．妥当性についても，おおよそ渋滞発生時交通量が  $C_2$  以上になっており，悪くても  $C_2$  の近傍 (95%以上) におさまっており，一定の妥当性が確保されたと言える．

### 4.3 交通性能改善メカニズムの分析

#### (1) 渋滞発生時交通量

渋滞発生時交通量の改善メカニズムを考察するために，全渋滞イベントの推定交通容量を図10に示す．この図より，ボトルネック上流 (2018年：40.7KP付近，2019年：40.4KP付近) の交通容量は大きく変わらないものの，システム導入後のボトルネック下流 (39.6KP付近) の交通容量が改善していることがわかる．これら容量を決める推定安全車間時間の分布 (図11) を見ても，そのことは確認することができる ( $\tau_1$ ：ほぼ改善なし， $\tau_2$ ：平均7%の改善)．以上より，音声エリア1の (渋滞発生前の) 速度回復情報提供を受け，その下流側のボトルネック下流端に至る過程で追従挙動が改善された (i.e., より短い安全車間時間により走行することにより，渋滞発生時交通量の改善に繋がったと考察することができる)．また，このメカニズムは，システム導入後に低いレベルの渋滞発生時交通量が生じな



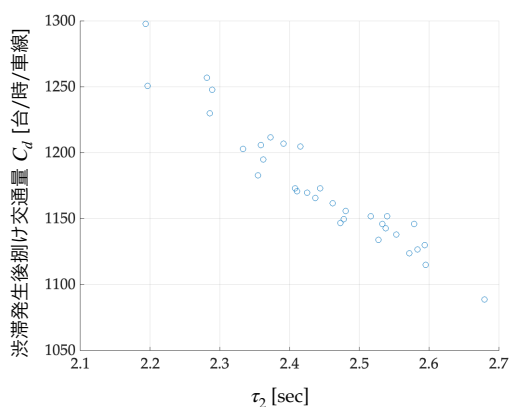


図 12 安全車間時間  $\tau_2$  と捌け交通量  $C_d$  の関係

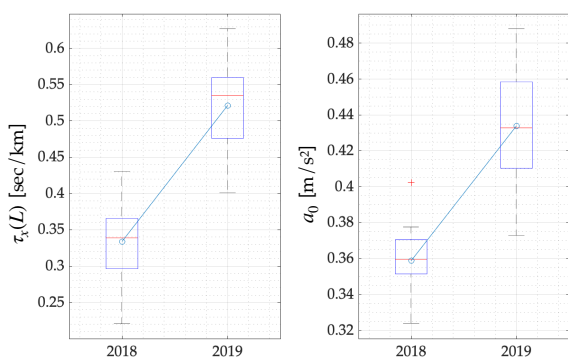


図 13 安全車間時間の空間変化率  $\tau_x(L)$  (左図) と加速度パラメータ  $a_0$  (右図)

くなること (図 5) と整合的である。

## (2) 渋滞発生後捌け交通量

続いて、渋滞発生後捌け交通量の改善メカニズムについて考察する。式 (6) で述べたように、この考察には、渋滞の先頭 (ボトルネック下流端) での  $\tau_2 = \tau(L)$ ,  $\tau_x(L)$ ,  $a_0$  のシステム導入前後の変化について総合的に評価する必要がある。まず、全渋滞イベントの渋滞先頭の安全車間時間  $\tau_2$  と捌け交通量  $C_d$  の関係を図 12 に示す。この図より、捌け交通量  $C_d$  と安全車間時間  $\tau_2$  はほぼ反比例の関係にあることがわかる。一方、安全車間時間の空間変化率  $\tau_x(L)$  と加速度パラメータ  $a_0$  の推定結果 (図 13) をみると、前者で平均 56% 上昇、後者で平均 20% の上昇となっている。

前章の理論と照らし合わせると次のように考察することができる。捌け交通量  $C_d$  と安全車間時間  $\tau_2 = \tau(L)$  が反比例の関係にあることから、式 (6) の  $\{1/C_d - \tau(L)\}$  はほぼ一定値を取っている。また、 $u, \kappa$  は与件のパラメータであり、各項の積が一定値 (i.e., 1) をとるという関係より、 $\{a_0 - g\Phi(L)\}/\tau_x(L)$  も (ほぼ) 一定値をとる。つまり、渋滞発生後捌け交通量の改善は、渋滞発生時交通量と同様、渋滞先頭の安全車間時間  $\tau_2$  の短縮

で説明される。逆に、加速度パラメータ  $a_0$  の上昇 (i.e., 渋滞先頭からの速やかな加速) の効果は、 $\tau_x(L)$  の上昇 (i.e., 先行車両に対する速度回復の遅れの増加) に打ち消され、捌け交通量の改善に繋がっていない。

このような結果になる ( $\{1/C_d - \tau(L)\}$  がほぼ一定値をとる) 大きな要因は、渋滞先頭における速度がシステム導入前後でほとんど変わらないことである (式 (2) も参照)。つまり、放送区間外のトンネル中間でシステム導入前より速度が低下していることが速度回復の遅れを招き、音声エリア 2 の影響と考えられる渋滞先頭下流の加速度上昇の効果を相殺していると考察することができる。追従挙動は安全車間時間の短縮という面で改善されているが、先行車両に対する速度調整という面ではむしろ悪化していることになる。

以上は、渋滞発生時/渋滞発生後捌け交通量はともに改善しているが、先述した交通量の低下率は改善していない現状を説明している (推定した容量を用いて算出した Capacity Drop 比率  $(1 - C_d/C_2)$  も導入前が 10.7%, 導入後が 11.3% と改善していない)。逆に言えば、低下率 (より厳密には Capacity Drop 比率) という面では改善の余地がある<sup>\*2</sup>。ではどの程度改善可能であるのか、 $\tau_x(L)$  のみシステム導入前の平均値 (その他パラメータはシステム導入後の平均値) とした試算をしてみると、 $C_d = 1246.5$  [台/時/車線] となった (このときの渋滞先頭の速度は  $v(L) = 46.5$  km/h であり、現状より約 5 km/h 高い)。つまり、何らかの対策によりシステム導入前程度の速度調整遅れが実現したとすれば、約 2.3% の捌け交通量の改善が理論上可能である。

こうした対策の 1 つとしては、音声エリア 1 のアナウンスの改善が挙げられる。この区間の渋滞中では「速度回復開始地点 = 渋滞の先頭」という考えのもと渋滞の先頭を抜けたというアナウンスがされているが、今回推定した渋滞の先頭は約 1 km 弱下流である。速度回復のためにドライバーにその理由を的確に伝えるという現在の方針を踏襲しつつもより適切な状況説明がなされ、トンネル中間の速度回復遅れを回避することができれば、捌け交通量のさらなる改善 (i.e., Capacity Drop 比率の改善) が可能になるものと予想される。

## 5. おわりに

本研究では、小仏トンネルに渋滞対策として導入された音声注意喚起 (速度回復情報提供) システムによって、なぜ渋滞発生時交通量、渋滞発生後捌け交通量等の交通性能の改善がもたらされたのかを考察した。具体的には、近年提案された最新の交通流理論<sup>4),5)</sup>に基づく実証分析をシステム導入前後のデータに対して行い、それぞれ、ボトルネック区間/渋滞の先頭の位置、ボトルネック区間の安全車間時間、ボトルネック下流



の加速度パラメータを推定した。その結果, (i) 渋滞発生時/渋滞発生後捌け交通量の改善はボトルネック区間の下流部分における「安全車間時間の短縮」という共通のメカニズムにより説明できること, (ii) 渋滞中のボトルネック下流の加速度向上は必ずしも捌け交通量の改善には繋がっておらずさらなる改善の余地があること, が示された。また, (i) は交通量分布の改善パターンが渋滞発生時と渋滞発生後でなぜ異なるのか, (ii) は捌け交通量低下率はなぜ改善されなかったのか, をも説明可能であることも示された。

今回の分析では, 理論により渋滞現象の様々な側面が整合的に説明されており, その結論もある程度妥当なものだと考えられる。ただし, この結論/結果をより確かなものにするためには, 理論から示唆された渋滞対策の改善が本当に交通性能の改善をもたらすのかを実験・検証していく必要があるであろう。また, 小仏トンネル, 音声注意喚起システムに限らず, 様々なボトルネックや渋滞対策に対して理論を展開することも, この方向の重要な課題である。その取り組みの1つとしては, 甲斐ら<sup>9)</sup>があるので合わせて参照されたい。

#### 謝辞

本研究に対しては, 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)の佐藤久長氏から有益なコメントを頂いた。また, 本稿の修正にあたっては匿名の査読者からの有益なコメントを参考とした。本研究は, JSPS 科研費・基盤研究C(課題番号19K04637)の助成金を受けた研究の一部である。ここに記し, 感謝の意を表します。

#### 補注

\*1 ここでは, 交通状態が時間に依存しない状況を考えているため, 自車と先行車の速度関係における時間のズレの記述は省略している。

\*2 Capacity Drop 比率を改善する車両挙動の詳細については, 和田ら<sup>10)</sup>を参照。

#### 参考文献

- 1) 森山陽一, 三橋正彦, 平井章一, 大口敬: 中央道小仏トンネル付近における右付加・左絞込み付加車線形態の運用実験, 交通工学研究会論文集, Vol.30, pp.29-32, 2010.
- 2) 佐藤久長, 西田匡志, 柏木悠, 櫻井光昭, 青木隆志: スピーカーを用いた音声案内による速度回復情報提供の効果分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.77, No.1, pp.1-11, 2021.
- 3) 中日本高速道路(株): スピーカーを用いた『音声』による注意喚起システムの導入～交通事故防止に向けた取り組み～, [https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news\\_release/4302.html](https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/4302.html), 2018(2022年5月2日閲覧)。
- 4) Jin, W.-L.: Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.107, pp.41-56, 2018.
- 5) Wada, K., Martínez, I., Jin, W.-L.: Continuum car-following model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.113, pp.260-276, 2020.
- 6) 和田健太郎, 邢健, 大口敬: 高速道路サグ・トンネル部における渋滞発生後捌け交通量の低下メカニズム, 交通工学論文集, Vol.8, No.3, pp.1-10, 2022.
- 7) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和: 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, Vol.IV-18, No.458, pp.65-71, 1993.
- 8) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 都市間高速道路における単路部渋滞先頭地点の交通現象, 交通工学, Vol.35, No.6, pp.48-56, 2000.
- 9) 甲斐慎一郎, 和田健太郎, 堀口良太, 邢健: 連続体交通流理論に基づく国内複数のサグ・トンネルにおける交通容量低下の実証分析, 交通工学研究発表会論文集, Vol.42, pp.513-517, 2022.
- 10) 和田健太郎, 甲斐慎一郎, 堀口亮太: 高速道路サグ・トンネル部における渋滞発生後捌け交通量を改善する走行挙動, 交通工学論文集, Vol.8, No.2, pp.A.1-A.8, 2022.