

小仏トンネルにおける速度回復喚起 メッセージ変更の影響分析

甲斐 慎一郎¹・和田 健太郎²・佐野 昌嗣³・平井 章一⁴

¹正会員 株式会社アイ・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: kai@i-transportlab.jp (Corresponding Author)

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

³非会員 中日本高速道路株式会社 八王子支社 高速道路事業部 (〒 192-8648 東京都八王子市宇津木町 231)

E-mail: m.sano.aa@c-nexco.co.jp

⁴正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 交通技術課

(〒 160-0023 東京都新宿区西新宿 1 丁目 23-7)

E-mail: s.hirai.aa@c-nexco-het.jp

中央自動車道の小仏トンネルでは、スピーカーを用いた音声による速度回復情報の提供を行う渋滞対策が実施されている。渋滞中交通流率（捌け交通量）のさらなる改善可能性の検証を目的として、2023 年 4 月下旬に渋滞時の上流側と下流側の音声メッセージの入れ替えを行った。本研究では、この変更による渋滞時の交通流の変化について分析する。具体的には、まず、渋滞中交通流率を、音声メッセージ入れ替え前後ともに前年同時期と比較した。その結果、音声メッセージの入れ替えによる影響はほぼみられなかった。一方、速度回復プロファイルの形状については、音声の入れ替えに関わらず経年的な変化が見られる結果となった。そして、連続体交通流理論に基づいて安全車間時間や加速度のパラメータなどを推定し、前述の変化がどのような走行挙動の変化を意味するのかを考察した。

Key Words: tunnel, capacity drop, queue discharge flow rate, continuum traffic flow theory

1. はじめに

中央自動車道上り線小仏トンネルでは、渋滞対策として、2019 年のゴールデンウィーク (GW) から、スピーカーを用いた音声による渋滞時の速度回復情報の提供が行われている。これは、図-1 に示すように、小仏第 1 トンネルと第 2 トンネル内に 2 つの放送区間を分け、連動トラカン（感知器）で渋滞を判定した上で、渋滞中の緩慢な加速を防ぐために表-1 に示すメッセージを音声で放送するものである。この対策の実施により、ボトルネックの渋滞発生時交通流率や渋滞中の平均速度が対策実施前と比較して上昇することが確認されている¹⁾。

この対策の交通流改善メカニズムを把握するために、和田ら²⁾ は交通流理論に基づき装置導入前後の効果検証を行っている。この研究では、装置導入後の渋滞先頭（39.6KP）付近の交通流改善メカニズムを、渋滞先頭における安全車間時間（安全な車間距離を保って走行するために最低限必要な時間）の短縮を用いた説明を行っている。また、さらなる改善の可能性についても言及している。より具体的には、図-1 の音声エリア

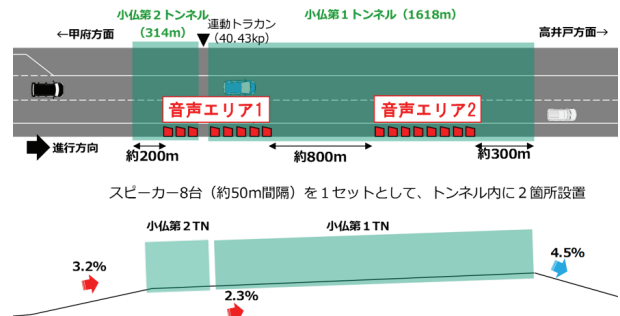


図-1 音声による速度回復情報提供装置の概要

表-1 音声メッセージ

期間	～2023/04/25	2023/04/26～
音声 エリア1	渋滞の先頭は抜けました。速やかに速度回復願います。	上り坂が続きます。引き続き速度回復願います。
音声 エリア2	上り坂が続きます。引き続き速度回復願います。	渋滞の先頭は抜けました。速やかに速度回復願います。

1 と音声エリア 2 の間において、装置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、加速度上昇の効果が先行車両の対する速度回復遅れの増加に打ち消されていると推測されることから、装置導入前程度に速度が回復すれば、理論上、約 2.3% の捌け交通量が改善可能であると述べている。

速度回復の対策案として、音声エリア 1 のアナウンス改善が挙げられている。2023 年 4 月 25 日までの音声エリア 1 のアナウンスは、「速度回復開始地点＝渋滞の先頭」という考えのもと設定されていたが、同研究では、渋滞の先頭は速度回復開始地点の約 1km 弱下流と推定されている。つまり、渋滞先頭手前の音声エリア 1 で「渋滞の先頭は抜けました」というアナウンスがされることにより、音声エリア 1 と音声エリア 2 の間で加速が緩慢になった可能性がある。

この研究結果を踏まえ、(一社)交通工学研究会の自主研究「高速道路単路部の渋滞現象記述理論の実務への応用」での活動の一つとして、2023 年 4 月 26 日から、表-1 に示すように音声エリア 1 と音声エリア 2 でメッセージ内容を入れ替えて運用し、その効果を検証することとした。「渋滞の先頭は抜けました」という音声メッセージを、渋滞の先頭より下流側の音声エリア 2 でアナウンスすることにより、音声エリア 1 と音声エリア 2 の間の速度回復遅れが回避され、捌け交通量が改善されるか否かを実験するものである。

本研究では、音声エリア 1 と音声エリア 2 のメッセージを入れ替えによる、渋滞時の交通流の変化について分析を行う。具体的には、まず、渋滞中交通流率（渋滞発生後捌け交通量）を、音声メッセージ入れ替え前後とも、前年同時期と比較する。次に、速度回復プロファイルを同様に比較する。最後に、連続体交通流理論に基づき安全車間時間や加速度等のパラメータを推定し、速度回復プロファイルの変化がどのような走行挙動の変化を意味するのかを考察する。

2. 交通状況の整理

(1) 分析対象期間の設定と渋滞イベントの選定

交通状況の分析にあたり、交通状況を整理する。まず、分析対象期間を、表-2 に示す 4 期間に設定した。音声変更前後の変化を確認する場合、表-2 の 2023GW 前と 2023GW 後の比較が考えられる。しかし、交通状況の変化には、季節変動や経年変化の影響も考えられることから、音声変更後に対する前年同時期の比較対象として 2022GW 後の期間を、変更前に対する前年同時

表-2 分析対象データ

	名称	期間	音声	件数
1	2022GW 前	2022/03/01～ 2022/04/26	変更前	7
2	2022GW 後	2022/04/27～ 2022/06/30	変更前	16
3	2023GW 前	2023/03/01～ 2023/04/25	変更前	13
4	2023GW 後	2023/04/26～ 2023/06/30	変更後	16

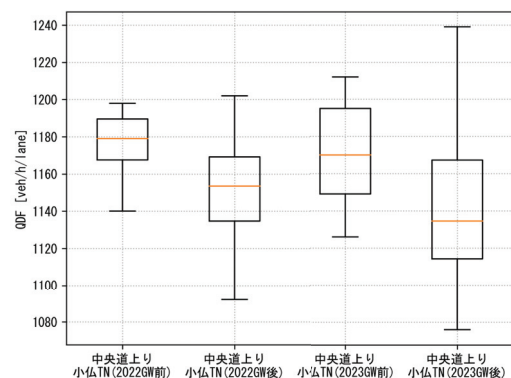


図-2 渋滞中交通流率 (QDF) の比較

期の比較対象として 2022GW 前の期間を分析対象に含める。

続いて、各期間中の典型的な渋滞現象を対象に分析するため、渋滞先頭が一定でない渋滞や、上下流の事故や渋滞の影響を受けていると推測される渋滞、分析に用いる ETC2.0 プローブデータが正常に記録できていない渋滞などを除外の上、渋滞イベントを整理した。各期間中の渋滞イベント件数は、表-2 の件数の項の通りである。

(2) 渋滞中交通流率

音声メッセージの入れ替えによって渋滞中交通流率が改善されたかを確認するため、各渋滞イベントで観測された感知器交通量を集計の上、各期間の渋滞中交通流率に統計的な有意差が見られるかを検証する。渋滞中交通流率の計算に用いる感知器データは、図-1 に示す音声エリア 1 の区間内に位置する 40.43KP 地点の値を使用した。各期間の渋滞中交通流率 (QDF) の比較結果を図-2 に示す。

渋滞中交通流率は、2022 年、2023 年とも GW 前より GW 後の方が低下している。2023GW 前後、および 2022GW 後と 2023GW 後の集計結果に対して、マン・ホ

イントニーの U 検定を行ったところ、5%水準では有意な差は見られなかった。したがって、メッセージ入れ替え前後や、入れ替え後と前年同時期（入れ替え前）の比較において、渋滞中交通流率の改善は見られなかったと言える。なお、10%水準では、2022GW 前後、2023GW 前後、2022GW 前と 2023GW 後の組合せに関しては有意な差が見られ、音声メッセージの入れ替えに関わらず GW 前後で差が見られることから、2022 年、2023 年とも GW 前後で季節変動による影響が生じていると考えられる。

(3) 速度回復プロファイル

次に、各期間の速度回復プロファイルの変化を比較した。図-3 に 2022GW 後と 2023GW 後を比較したものを示す。グラフの細線は、渋滞 1 イベントの地点毎の空間平均速度、太線は、全イベントの空間平均速度を表す。2022 年 GW 後と比較して 2023 年 GW 後の方が音声エリア 1 の区間の途中から速度が上昇しており、一見、音声メッセージの改善によって音声エリア 1 と音声エリア 2 の間の速度回復遅れが回避されたように見える。しかし、2022GW 前と 2023GW 前を比較した図-4 でも同様の形状になっていることから、これは、音声メッセージの入れ替えの影響ではなく、経年変化によるものと推測される。

図-5 に 2022GW 前後、図-6 に 2023GW 前後を比較したものを示す。速度回復プロファイルを見ると、2022 年、2023 年とも GW 後の方が全区間で速度が低下している。これは、GW 前より GW 後の方が捌け交通量が低くなっていることで、上流側の速度も低くなっている影響と考えられ、図-2 の渋滞中交通流率の傾向とも一致する。

以上の結果から、各期間の速度回復プロファイルは、音声メッセージの入れ替えによる影響よりも、季節変動や経年的な変化の影響を受けていることが示唆される結果となった。したがって、以降の分析においては、それらも含めて考察も行っていく。

3. 連続体交通流理論

渋滞中交通流率や速度回復プロファイルから示唆された走行挙動の変化について、より詳細な分析を行うことを目的として、高速道路単路部の連続体交通流理論^{4),5)}に基づくモデルを用いて推定される各種パラメータの考察を行う。連続体交通流モデルの推定は、和田ら³⁾と同様の方法を用いるため、推定手法の詳細については省略する。なお、同様の方法を用いる研究として、甲斐ら⁶⁾、和田ら²⁾、金崎ら⁷⁾の研究が存在する。本研

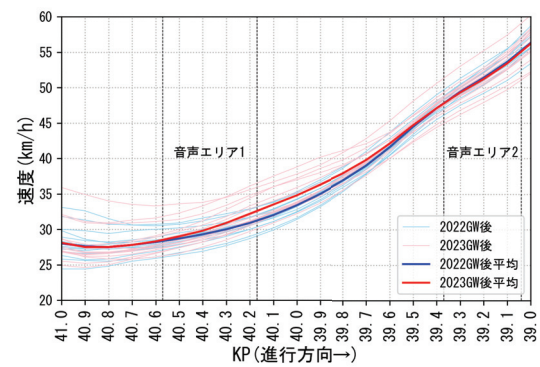


図-3 速度回復プロファイルの比較 (2022,2023 年 GW 後)

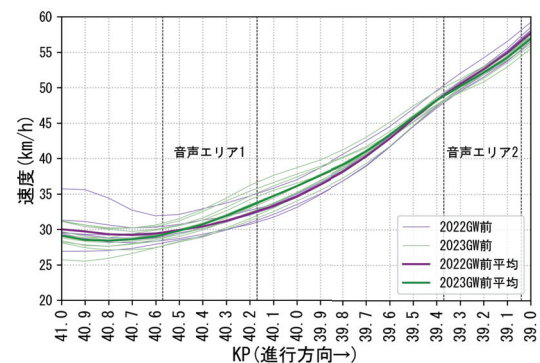


図-4 速度回復プロファイルの比較 (2022,2023 年 GW 前)

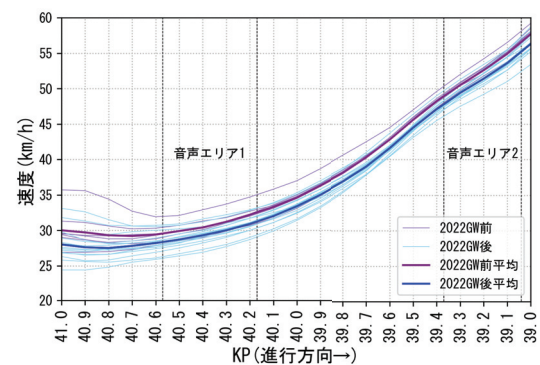


図-5 速度回復プロファイルの比較 (2022 年 GW 前後)

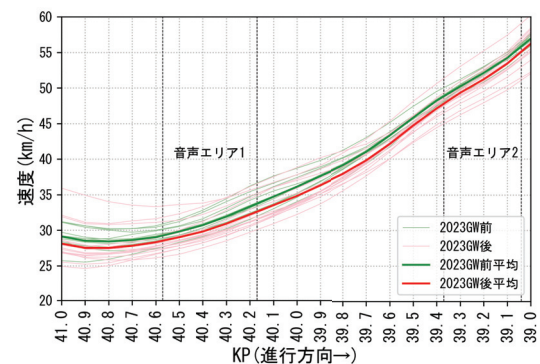


図-6 速度回復プロファイルの比較 (2023 年 GW 前後)

表-3 推定パラメータ等

期間	$x(0)$ [KP]		$x(L)$ [KP]		$\tau(0)$ [sec]		$\tau(L)$ [sec]		$\tau_x(L)$ [sec/km]		$a_0 - \Phi(L)$ [m/s ²]		$C(0)$ [veh/h/lane]		$C(L)$ [veh/h/lane]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
2022GW 前	40.5	0.00	39.5	0.03	2.21	0.04	2.50	0.05	0.34	0.03	0.22	0.02	1438	25	1285	23
2022GW 後	40.5	0.00	39.5	0.03	2.24	0.05	2.55	0.07	0.37	0.03	0.20	0.02	1418	28	1265	29
2023GW 前	40.5	0.00	39.5	0.05	2.21	0.05	2.50	0.07	0.28	0.04	0.17	0.02	1432	23	1285	30
2023GW 後	40.5	0.00	39.5	0.06	2.26	0.08	2.57	0.11	0.31	0.05	0.18	0.03	1406	42	1256	47

$x(0)$: ボトルネック区間の開始地点 (速度回復開始地点) の KP; $x(L)$: ボトルネック区間下流端の KP; $\tau(0)$: ボトルネック区間の開始地点における安全車間時間パラメータ; $\tau(L)$ はボトルネック区間下流端の安全車間時間パラメータ; $a_0 - \Phi(L)$: ボトルネック区間下流端における勾配による重力加速度を差し引いた交通流の加速度パラメータ; $\tau_x(L)$: ボトルネック区間下流端における安全車間時間の変化率, すなわち速度調整の緩慢さを示すパラメータ; $C(0)$: ボトルネック区間の開始地点における推定交通容量; $C(L)$: ボトルネック区間下流端の推定交通容量 (= ボトルネック交通容量)

究では, 連続体交通流モデルの推定を効率的に実施するため, ボトルネック推定プログラムを開発し分析に用いる. プログラムの概要等については付録を参照されたい. 連続体交通流モデルを推定する際の自由流速度 u は, 感知器の 1 日分の交通量から作成した FD の自由流速度から設定した. また, 飽和密度は, 乗用車の最小車頭距離を 7m と想定し $\kappa = 140$ [veh/km] と設定した.

(1) ボトルネック区間とモデルパラメータの推定

表-3 に推定されたボトルネック区間 ($0 \leq x \leq L$) とパラメータ等を示す. 推定されたボトルネック区間は概ね 40.5~39.5 [KP] で, 期間による違いはほぼ見られない.

安全車間時間は空間的な交通容量を決定するパラメータの 1 つである. 空間的な交通容量 $C(x)$ と安全車間時間パラメータ $\tau(L)$ の関係式は次式で表される.

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

ボトルネック上流端における安全車間時間パラメータ $\tau(0)$ の平均値は, 2022, 2023 とも GW 前よりも GW 後の方が大きく, 2022GW 前と 2023GW 前, 2022GW 後と 2023GW 後ではほぼ同じ値である. また, ボトルネック下流端における安全車間時間パラメータ $\tau(L)$ の平均値についても同様である. したがって, 2022 年と 2023 年の同時期比較では, ボトルネック区間における空間的な交通容量は変化しておらず, 推定された $C(0)$, $C(L)$ の平均値もほぼ変わらない.

なお, 同一箇所を対象にした和田ら²⁾の研究で推定されたボトルネック下流端における安全車間時間パラメータは, 音声情報装置導入前の 2018 年に平均 2.51 [sec] 程度であったものが, 導入後の 2019 年には平均 2.34 [sec] 程度となっている. また, 金崎ら⁷⁾の研究でも, 導入前の 2018 年夏に平均 2.43 [sec] であったもの

が, 導入後の 2019 年夏には平均 2.30 [sec] となっている. 今回推定された 2022, 2023 の GW 前後の $\tau(L)$ は, これらの研究で推定された音声情報装置導入前の値と同程度かやや大きい値となっており, 交通容量が音声情報装置導入前と同程度かそれ以下に低下している可能性が示唆される.

安全車間時間の変化量は, 先行する車両の速度に対してどの程度迅速に追従しているかを表すパラメータである. 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, 安全車間距離 d を開けて追従される先行車両 $v_{n-1}(x)$ 関係式は次式で表される^{3),5)}.

$$v_n(x) = \left[\frac{1}{v_{n-1}(x+d)} + \tau(x) \right]^{-1} \quad (2)$$

つまり, $\tau_x(x) = 0$ であれば先行車両に遅れ無く追従していることを意味し, $\tau_x(x)$ が大きくなるほど速度調整が遅れることを表す. $\tau_x(L)$ を 2022 年と 2023 年で比較すると, 2023 年の方が小さくなっており, ボトルネック区間下流端における速度調整遅れが減少していることが伺える.

勾配による重力加速度を差し引いたボトルネック区間下流端の加速度 $a_0 - \Phi(L)$ も, 2022 年と比較すると 2023 年の方が小さくなっている.

(2) 考察

ボトルネックの位置は各期間とも変化が無く, ボトルネック下流端の安全車間時間やそれを元に推定した空間的な交通容量は, 2022 年, 2023 年とも GW 前後でわずかに差が見られる. 前章では, 渋滞中交通流率について, 音声メッセージを入れ替えても変化は見られず, 2022 年, 2023 年とも GW 前後で差が見られる結果を示したが, ボトルネック区間の潜在的な交通容量を推定した結果についても同様の傾向となった.

しかし, ボトルネック下流端における安全車間時間の

変化量や加速度については、2022 年より 2023 年の方が値が小さくなっており、ボトルネック下流端では 2023 年の方が「迅速に追従しているが加速度は低くなっている状況」であることが推測される。連続体交通流モデルは、ボトルネック区間内におけるこれらのパラメータを推定することも可能である。そこで、ボトルネック上流端から下流端まで、これらのパラメータ推定を地点別に行い、ボトルネック区間における全体的な車両の走行状態がどのように変化しているのかを詳しく見ていく。

4. 地点毎のパラメータ等の推定

各期間のボトルネック区間 ($0 \leq x \leq L$) において、推定パラメータにどのような変化が見られるかを考察するため、安定渋滞状態における連続体交通流理論の関係式を用いて、地点毎のパラメータを推定する。安定渋滞状態において、連続体交通流モデルのボトルネック区間 ($0 \leq x \leq L$) では、次式で速度回復する²⁾。

$$v(x) = \frac{1}{\{1/C_d - \tau(x)\}\kappa} \quad 0 \leq x \leq L \quad (3)$$

ここで、 C_d は渋滞安定時の捌け交通量 (i.e., QDF) である。また、安定状態における交通流の加速度が $a(x) = v(x)v_x(x)$ となることから、次式が導かれる。

$$a(x) = \frac{\tau_x(x)}{\{1/C_d - \tau(x)\}^3 \kappa^2} \quad 0 \leq x \leq L \quad (4)$$

これらの関係式を用いて、ボトルネック区間 ($0 \leq x \leq L$) における地点毎の推定パラメータ $\tau(x)$, $\tau_x(x)$ 、およびそれらを用いて計算可能な地点毎の加速度 $a(x)$ の計算結果について考察を行う。

(1) パラメータ等の推定

図-7 に、地点別、期間別の $\tau(x)$ を示す。2022 年、2023 年とも、GW 前の方が全体的に $\tau(x)$ が小さく、GW 後の方が大きい。また、グラフの形状を比較すると、2022 年は GW 前後いずれも上流から下流に向けて $\tau(x)$ が徐々に増加していくのに対して、2023 年は GW 前後いずれも上流から下流まで $\tau(x)$ の増加量概ね一定であることが伺える。

図-8 に、地点別、期間別の $\tau_x(x)$ を示す。2022 年と 2023 年で傾向がわかれており、2022 年と比較すると、2023 年の方が地点毎の変化量の変化が小さくなっている。すなわち、2023 年の方が地点間の追従遅れの差が小さくなっていると言える。

最後に、地点毎の加速度 $a(x)$ を図-9 に示す。 $a(x)$ についても、2022 年と 2023 年で傾向がわかれており、2022

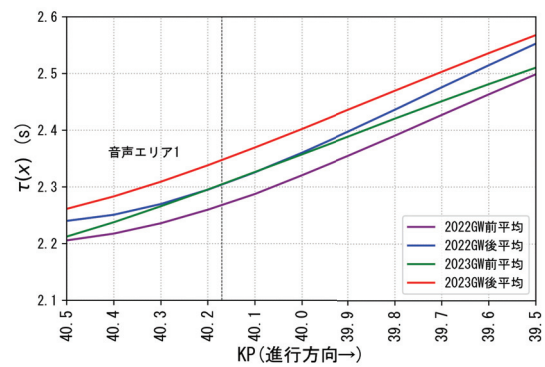


図-7 安全車間時間 $\tau(x)$ の比較

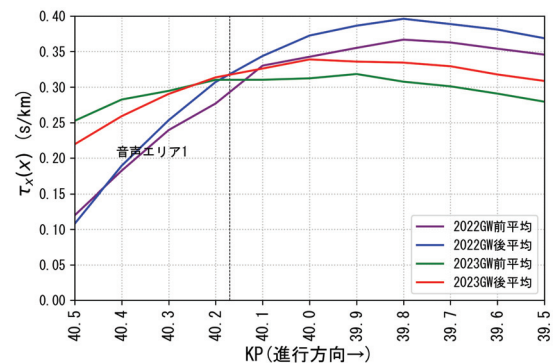


図-8 安全車間時間の変化量 $\tau_x(x)$ の比較

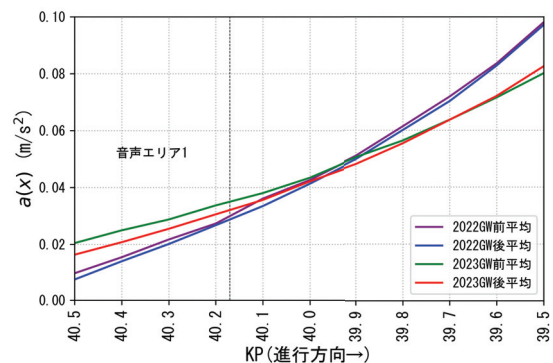


図-9 加速度 $a(x)$ の比較

年は低い加速度から下流に向けて踏み込んでいくような加速を行うような結果になっているのに対して、2023 年は 2022 年より高い加速度から緩やかに加速するような結果となっている。

(2) 考察

以上の結果から、2023 年の方が「迅速に追従しているが加速度は低くなっている状況」は、ボトルネック区間全体でも見られる結果となった。また、ボトルネック前半から後半にかけての $\tau_x(x)$ は、2022 年より 2023 年の方が変化が少なくなっている。これは、和田ら²⁾ が装置導入前後を対象に推定した、安全車間時間の変化

と逆の傾向である。より具体的には、2023 年の速度回復プロファイルは、装置導入前（2018 年）の形状に近づいている。このことは、直ちに速度回復情報提供装置の効果が低減していることを意味するものではないが、走行挙動が変化していることを鑑み、効果の持続性については確認が必要であろう。

5. おわりに

本研究では、中央自動車道の小仏トンネルにおいて、スピーカーを用いた音声による速度回復情報提供装置の音声メッセージの入れ替えによる渋滞時の交通流の変化について、観測データや連続体交通流モデルの推定パラメータの結果から分析した。しかし、音声メッセージの入れ替えに伴う捌け交通量への変化は見られなかった。また、分析の過程において、2022 年と 2023 年のボトルネック区間の走行状態を比較したところ、2023 年の方がボトルネック区間における安全車間時間の変化量や加速度の変化が小さくなっており、経年により走り方が変化している可能性が示唆された。その示唆に対し、今後、速度回復情報提供装置の持続性の効果について検証していくことは有意義であると考えられる。

今後の課題としては、速度回復情報提供装置の効果の持続性を確認するため、装置をオン・オフにした場合の交通状況データを分析し、検証を進めて行くことが挙げられる。

付録 ボトルネック推定プログラムの開発

ボトルネック近傍における連続体交通流モデルの推定について、渋滞イベントの交通状況を効率良く分析し、かつ各種観測データや推定パラメータを一元的に確認できるようにするためのプログラムを開発した。ボトルネック推定プログラムの UI（ユーザーインターフェース）のイメージを図-11 に示す。ボトルネックの推定にあたって必要な入力データは以下の通りである。

- ・渋滞イベントデータとそれに対応するボトルネック区間等の設定ファイル
- ・勾配データ（路線、方向、KP 毎の勾配量（%）が整理されているもの）
- ・ETC2.0 プローブデータ
- ・感知器データ

また、アウトプットは以下の通りである。

- ・ボトルネック区間前後含めた時空間速度・軌跡図
- ・時間帯別感知器交通量・車線別速度グラフ
- ・渋滞時間帯のトレンドからの乖離交通量（累積交通量から一定のトレンド（渋滞イベント毎に変わる）を差し引くことで累積図における変化点を見



図-10 ボトルネック推定プログラムの UI

やすくしたもの。曲線のうち線形のトレンドを持つ部分が交通流率が一定の部分を表す³⁾)

- ・渋滞イベント発生日 1 日分の感知器交通量を基にした FD と自由流速度
- ・ボトルネック推定の過程で算出される各種パラメータ

このプログラムは、作業者が適切なボトルネック区間を選べば、各種インプットデータの集計から連続体交通流モデルの推定までを一貫して自動的に行うことが可能である。推定上の留意点としては、ボトルネック区間 [KP] の選定（推定）自体は、作業者が図-10 のアウトプット一覧を見ながら、試行錯誤をしてキャリブレーションを行う必要があることが挙げられる。

プログラムの処理の流れを以降に示す。まず、渋滞イベントデータに入力された渋滞開始時刻と渋滞時間、渋滞先頭位置等を基に、ボトルネック推定に必要な感知器や ETC2.0 プローブデータの集計時間帯を決定する。

次に、集計時間帯で BDF（渋滞発生時交通流率）と QDF（渋滞中交通流率）を計算する。本プログラムで自動計算される BDF は、渋滞開始時刻の前 60 分から後 30 分の間で最大となる 15 分間フローレートで、QDF は、BDF の記録時刻から 30 分後（渋滞時間が 1 時間 30 分未満の場合は 15 分後）から渋滞終了時刻の 10 分前までの 5 分間フローレートの平均値としている。

次に、渋滞安定状態における ETC2.0 プローブデータの速度回復プロファイルを作成する。まず、QDF を計測する時間帯の個車の ETC2.0 プローブデータを 100m ピッチで集計し、対称指数円滑移動平均フィルタ（symmetric exponential moving average filter: sEMA）⁸⁾ を用いてスムージング処理を行う。（なお、スムージング処理は適

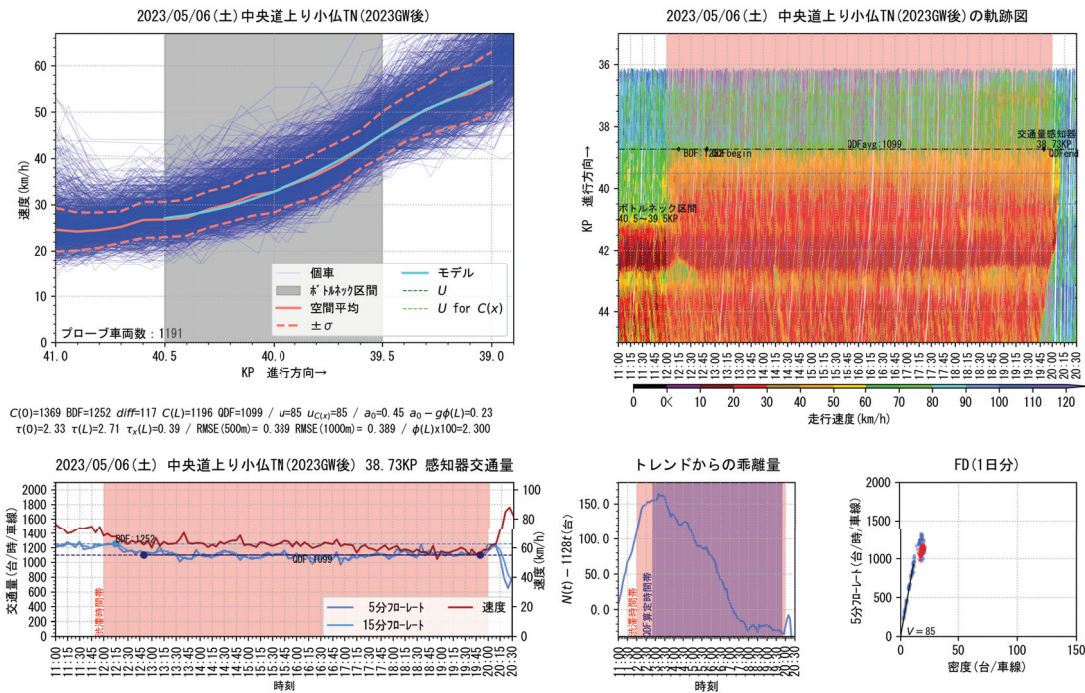


図-11 アウトプット一覧

用しないこともできる)

最後に、処理した個車データから地点毎の空間平均速度を計算し、それをグラフで描画したものを速度回復プロファイルとする。ボトルネック区間の速度回復プロファイルの平均値に対して、和田ら²⁾が示す手法で下に凸の2次関数によるフィッティングを行い、ボトルネック区間下流端から数百メートル下流まで Bounded Acceleration (BA) モデルの推定を行う。

これらの一連の内容が渋滞 1 イベント毎にバッチ処理されるようになっており、ボトルネックの推定作業者は、アウトプット一覧の内容を確認して、ボトルネック区間の位置などのキャリブレーションを繰り返し実施する。

謝辞: 本研究は、(一社)交通工学研究会の自主研究「高速道路単路部の渋滞現象記述理論の実務への応用」の研究の一部である。また、本研究は JSPS 科研費・基盤研究 B (課題番号 23K26218) 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。

REFERENCES

- 1) 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. [Sato, H., Nishida, T., Kashiwagi, Y., Sakurai, M. and Aoki, T.: Analysis of the effectiveness of voice guidance utilizing speakers for the provision of speed recovery information, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.77, No.1, pp.1-11, 2021.]
- 2) 和田健太郎, 金崎圭吾, 西田匡志, 平井章一: 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. 交通工学論文集, Vol.9, No.2, pp.A.326-A.334, 2023.

- [Wada, K., Kanesaki, K., Nishida, S. and Hirai, S.: Empirical analysis of traffic performance improvement mechanisms by audible speed recovery information provision, *JSTE Journal of Traffic Engineering*, Vol.9, No., pp.A.326-A.334, 2023.]
- 3) 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. [Wada, K., Xing, J. and Oguchi, T.: On the mechanism of capacity drop at freeway sag and tunnel bottlenecks, *JSTE Journal of Traffic Engineers*, Vol.8, No.3, pp.1-10, 2022.]
- 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. and Jin, W.-L.: Continuum carfollowing model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.113, pp.260-276, 2020.
- 6) 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, 交通工学論文集, Vol.9, No.2, pp.A.280-A.287, 2023. [Kai, S., Wada, K., Wada, K. and Xing, J.: Empirical analysis of capacity drop phenomenon at multiple sag and tunnel bottlenecks on expressway in Japan. *JSTE Journal of Traffic Engineers*, Vol.9, No.2, pp.A.280-A.287, 2023.]
- 7) 金崎圭吾, 和田健太郎, 西田匡志, 平井章一, 寺田弘明: 音声による速度回復情報提供の交通性能改善効果の持続性に関する分析. 交通工学研究発表会論文集, Vol.43, pp.189-195, 2023. [Kanesaki, K., Wada, K., Nishida, S. and Hirai, S.: Empirical analysis of traffic performance improvement mechanisms by audible speed recovery information provision, *JSTE Proceedings of the conference of Traffic Engineers*, Vol.43, pp.189-195, 2023.]
- 8) Thiemann, C., Treiber, M. and Kesting, A.: Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data. *Transportation Research Record*, Vol.2088, No.1, pp.90-101, 2008.

(Received October 3, 2024)

(Accepted October 3, 2024)

IMPACT ANALYSIS OF THE CHANGE OF SPEED RECOVERY INFORMATION
PROVISION AT KOBOTOKE TUNNEL

Shin-ichiro KAI, Kentaro WADA, Masatsugu SANO and Shoichi HIRAI