

連続体交通流理論を用いた 渋滞情報板の設置検討と効果検証

木村 真也¹・甲斐 慎一郎²・和田 健太郎³

¹ 非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦 1-8-11)

E-mail: s.kimura.a@c-nexco-hen.jp (Corresponding Author)

² 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

³ 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

近年提案された連続体交通流理論は、Capacity Drop 現象に対する解釈とその汎用性が示され、渋滞対策の改善示唆を得ること等の応用が進んでいる。一方、これまで実施されてきた従来の渋滞対策をみると、経験則や実観測データのみ reliant 傾向にあり、効果的な対策実施には理論を用いることが重要であると考えられる。本論は、東名阪自動車道の亀山地区で発生する渋滞を対象に、連続体交通流理論に基づきボトルネック区間を推定し、LED 情報板によって渋滞終了までの距離をカウントダウン方式で情報提供する対策を実験的に実施した。その結果、交通容量が 11.8% 向上し、走行速度も改善され、渋滞規模の縮小を確認した。これにより、連続体交通流理論に基づいた渋滞対策は効果的であることの実証事例を得た。

Key Words: 渋滞対策, 連続体交通流理論, 情報提供, カウントダウン方式

1. はじめに

高速道路上のボトルネックは、一度渋滞が発生すると渋滞発生前に観測された交通容量よりも渋滞発生後の値が低下してしまうことが知られている¹⁾。この Capacity Drop (以下、CD) と呼ばれる現象について、近年では、Jin²⁾、Wada et al.³⁾によって提案された連続体交通流理論により実証的に分析され、現象の解釈がなされている⁴⁾。また、この理論を複数の区間において適用し、理論の汎用性についても確認が進み⁵⁾、さらには、既往渋滞対策の更なる改善提案まで示されている⁶⁾。このような理論を実務に応用する取組は、今後、これまで以上に効果的な渋滞対策を実施する上で非常に重要である。

そういった視点で、これまで各地で実施されてきた渋滞対策をみてみると、例えば、山田ら⁷⁾や中谷ら⁸⁾は、LED 表示板を使用して速度回復情報を提供している。また、亀岡ら⁹⁾は、路側に LED 発光灯を連続的に設置し、光の流れを作ることによって速度回復を促す対策を実施している。さらに、佐藤ら¹⁰⁾は、指向性スピーカーを用いて音声により速度回復を促す対策を実施している。これらはいずれも一定の対策効果が報告されている。しかしなが

ら、これら従来の対策は、現地の道路構造上の制約というやむを得ない部分を差し引いても、経験則に実観測データを重ねつつ対策位置や区間を決められたものが多く、理論に基づいて対策検討された事例は極めて少ない。

そこで本論は、連続体交通流理論を用いてボトルネック区間を推定し、渋滞流からの速度回復促進を目的とした渋滞情報板による対策を立案する。また、それに基づき現地実験を行い、渋滞中交通流率や速度回復状況の変化を確認することで効果を検証する。

2. 連続体交通流理論

Jin, Wada et al.によって提案された連続体交通流理論について、本論に直接関係する部分を概説する。

この理論では、ボトルネックは「交通容量が空間的に徐々に減少する区間」という仮定をおいている。これは、これまでも多く実施されてきた渋滞分析 (例えば、木村ら¹¹⁾) において、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。もう一つの仮定が、安定した渋滞状態におけるボトルネック近傍の速

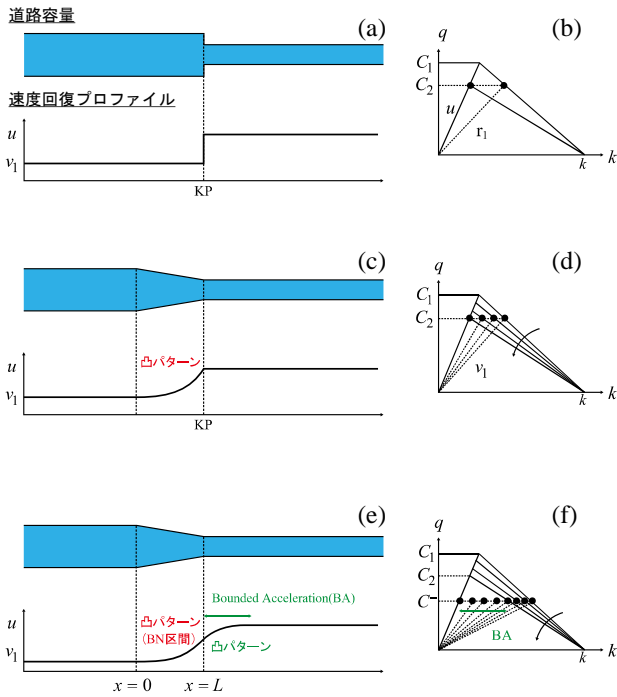


図-1 道路容量・速度プロファイルとFD

速度回復プロファイルは、追従状態（渋滞流）と Bounded Acceleration（以下、BA）状態（発進流）から構成されるというものである。それらを説明したものが図-1（左：道路容量と速度プロファイル，右：交通流率と密度の Fundamental Diagram（以下、FD））である。

図-1 を上から順にみていくと，図中(a)(b)が，先の説明のようにボトルネックを空間上の一断面と捉えた場合である。ボトルネックを一点として与えると，急激に変化する速度プロファイルとなる。次に，ボトルネックを，交通容量が空間的に徐々に減少する区間とした場合が図中(c)(d)である。しかしこれでは，交通容量が C_1 から C_2 にのみ移行し，理論が開発された主な目的の CD 現象が生じる説明にはならない。CD 現象が生じる状況は，安定渋滞中の交通流率が $C^- < C_2$ となるときに実現する状態である。すなわち，ボトルネック区間以降は，図中(f)に示すように FD の三角形内部を連続的に移動する BA 状態を表現する必要がある。この BA 状態を，加速限界の制約がある状態とし，次式で表す TWOPAS モデルを仮定する²⁾。

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

ここで， a_0 はパラメータ， g は重力加速度， $\Phi(x)$ は勾配である。このモデルは，現在速度 v が自由流速度 u に近づくほど加速度が小さくなることを表しており，図中(e)のような滑らかな速度プロファイルを記述することができる。



図-2 対象区間の位置図

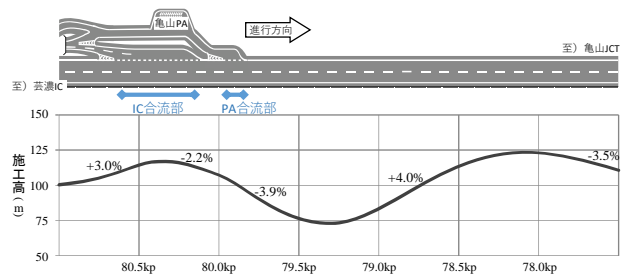


図-3 縦断勾配

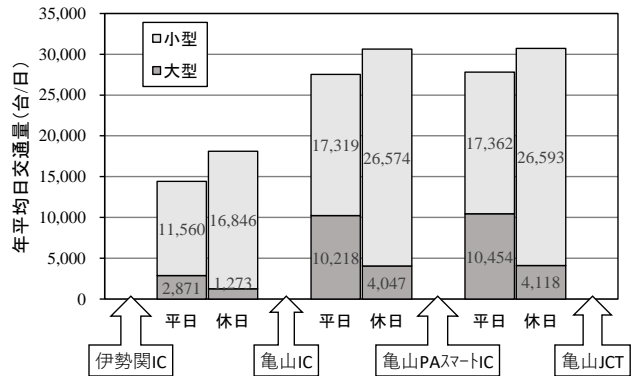


図-4 年平均日交通量（2023年）

3. 対象区間の概要

(1) 区間の概要

対象区間の位置図を図-2，縦断勾配を図-3 にそれぞれ示す。対象区間は，東名阪自動車道上り線の亀山 PA スマート IC～亀山 JCT に位置し，亀山 IC と亀山 PA からの合流後におけるサグにて渋滞が発生する区間である。

(2) 交通概況

対象区間の年平均日交通量を図-4 に示す。亀山 IC は名阪国道にアクセスし，そこからの流入交通が多く，亀山 IC を境にして交通量が多くなる。

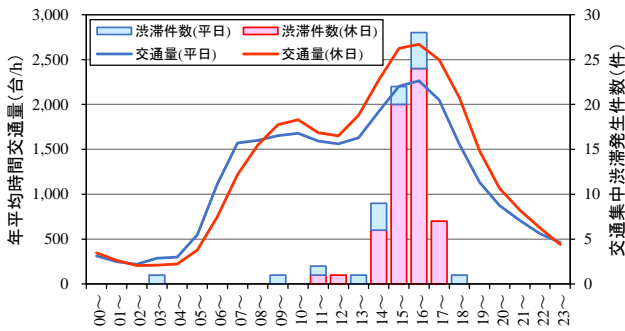


図-5 時間交通量と渋滞発生時間帯 (2023年)

また、図-5 に示す時間交通量と渋滞発生時間帯をみると、交通集中渋滞はほぼ休日午後に発生していることがわかる。このことから、対象区間の渋滞中における利用者は、普段から利用している人よりも、いわゆるサンデードライバーが多くいるであろうことが窺える。

4. 対策立案

(1) ボトルネック区間の推定

対象区間における対策立案のため、連続体交通流理論を用いてボトルネック区間を推定する。推定に用いるデータは、ETC2.0 プローブデータ、車両感知器データ、勾配データ、渋滞データである。ETC2.0 プローブデータと渋滞データは渋滞中の速度プロファイル（空間平均速度）を、車両感知器データは交通流率と密度の FD を、勾配データは TWOPAS モデルのパラメータにそれぞれ使用する。対象期間は、2023 年 11 月とし、交通集中渋滞の実績のあった計 10 日間で推定する。

図-6 にボトルネック区間推定結果の一例を示す。青細線が個車、青太線が空間平均速度、青太点線が標準偏差の範囲をそれぞれ表し、黄点線が理論により推定した結果である。推定する際は、ボトルネック区間の範囲を上下流それぞれ縮小拡大し変更してみたが、最も実データと理論モデルがフィットしたケースを採用している。なお、他の日においても同様な結果を得ている。

この推定により得られたボトルネック区間について対策を立案する。

(2) 対策内容の着想

前節の推定により得られたボトルネック区間で、如何に速度回復を促進させるかを考える際、インシデント発生時の渋滞状況から着想を得て立案を行った。以降に具体的な渋滞状況を示す。

図-7 に対象区間における事故渋滞発生時の速度カウンター図を示す。図中、渋滞先頭が上流側に凹んでいる時間帯が事故車両による影響を受けていた状況である。

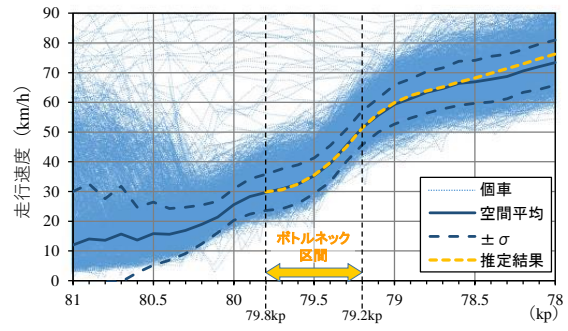


図-6 ボトルネック区間の推定結果 (2023年 11月 3日)

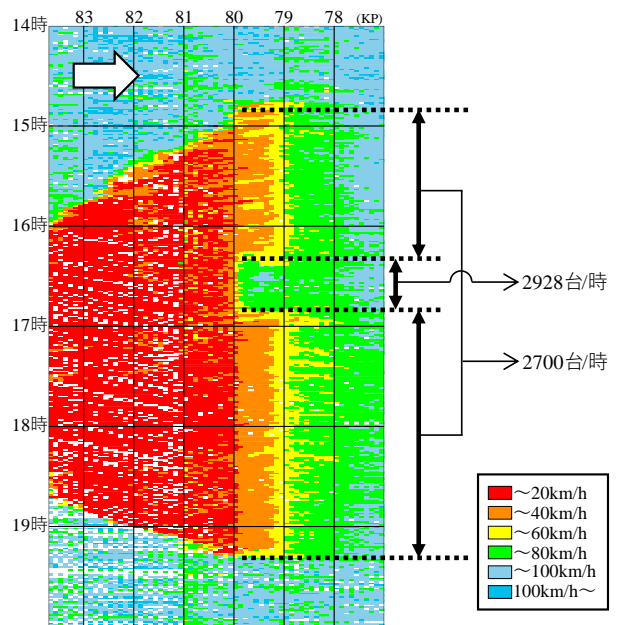


図-7 事故渋滞発生時の速度カウンター図 (2023年 11月 19日)

NEXCO 中日本調べによる事故調査で確認すると、事故車両は二輪車と乗用車で、渋滞の中を低速走行中に二輪車が乗用車に追突した後、亀山 IC の加速車線 (80.1kp 付近) に停止していたもので、本線側は車線閉塞がなかったことを確認している。

まず、事故車両の影響がある時間とそうでない時間で交通流率をみると、事故車両の影響がある時間帯の方が 2928 台/時で、その他の時間の 2700 台/時よりも交通流率は明らかに高い。また、渋滞先頭付近の速度帯に着目すると、事故車両の影響がある時間のみ急激に速度回復している様子がわかる。これは、事故車両が目印となり、多くの利用者が「ここで渋滞が終わった」と明確に認識できたことでボトルネックからの速度回復がスムーズに行っている事例ではないかと考える。すなわち、通常交通集中渋滞においても、明確に渋滞から抜け出ることが情報提供されることにより、渋滞中交通流率は改善できることを示唆するものであると考えられる。このことは、従来の渋滞対策⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾の考え方もも整合している。

他方、渋滞対策としてではないが、利用者の行動変容を促す対策事例がある。平山ら¹²⁾は、車線減少部にて早めの車線変更を促す対策に絞り込み部までの残距離を知らせるカウントダウン標識を採用している。この事例では、カウントダウン標識による効果よりも同時に実施した矢印路面標示の効果の方が高いとの結果が示されている。また、日常においてもカウントダウンの効果には触れることがある。例えば、マーケティング分野で「本日より」や「あと〇〇時間でセール終了」といった表示があると、普段は買うか迷っていた商品でも「今買わないと損かも」と思うことや、仕事の締め切りが近づくと、普段より集中して作業を進めることができるようになることがある。こうしたカウントダウン効果は、道路交通でも案内標識や信号機等に採用され、当然のように広く活用されているものである。

以上のことに着想を得て、対策を立案した。次節で具体的な対策内容を記載する。

(3) 対策内容

図-8に対策概要、図-9に対策後の現地写真を示す。対策は4基の仮設LED情報板を使用し、ボトルネック区間に対して、抜け出るまでの残距離を「渋滞終了」の表示とともに「残り300m」「残り200m」「残り100m」といった具体的な数値で明示し、最後は、速度回復が促進されるようなピクトサインとしている。これら渋滞情報板の設置位置は、ボトルネック区間を抜け出る際の初速を上げることを企図したため、全体的に区間内の上流側へ寄せている。

また、本対策は渋滞中交通流率の改善を目的とした対策であるため、渋滞中のみ表示できるようボトルネック区間内(79.5kp)と自由流区間(78.0kp)にそれぞれ仮設センサーを設置し、交通流率と速度の関係で渋滞判定を行って、動的な制御を実施している。

5. 効果検証

(1) 検証対象日

効果検証は、渋滞情報板の対策を実施しLEDの点灯実績があった内、インシデントや他のボトルネックの影響を受けていない日を選定している。その結果、対策後は2024年お盆期間中の8/14・8/15・8/16の計3日となり、比較する対策前も前年のお盆期間中の、8/13・8/14・8/17とした。なお、お盆期間中という特殊な交通状況下であることを鑑み、参考として、対策前はボトルネック区間推定時に使用した2023年11月分も確認する。

(2) 交通容量の変化

渋滞中交通流率の変化を図-10に示す。図は、渋滞発生中に観測された5分間交通量の分布を表している。こ

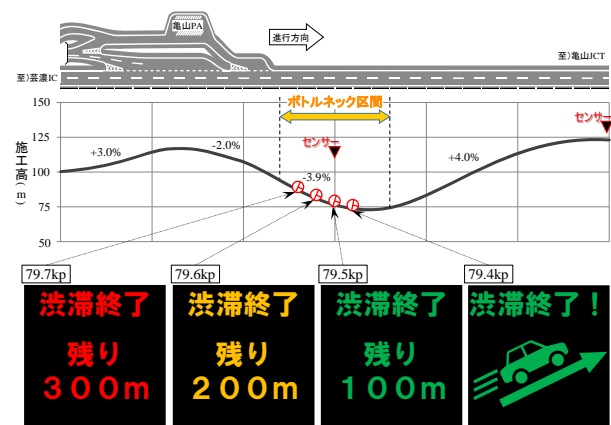


図-8 対策概要



図-9 対策後の現地写真(79.5kp付近)

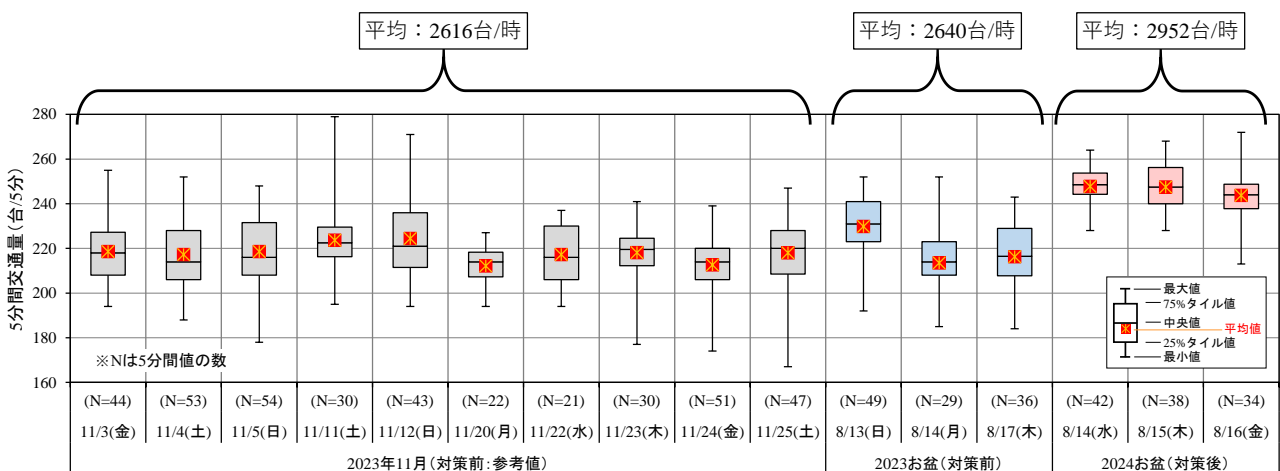


図-10 渋滞中交通流率の変化

の各分布の平均値が各渋滞サンプルごとの渋滞中交通流率にあたる。

対策前をみると、各日でばらつきはあるものの、2023年11月とお盆では大きな差はなく、5分間交通量の時間フローレートを期間ごとにみても、2616台/時と2640台/時となっている。一方、対策後では、対策前と比較し各日の分布自体が上にきており、対策後期間の平均は2952台/時に上昇している。これは、対策前のお盆期間よりも11.8%の向上である。

(3) 走行速度の変化

渋滞中の速度プロファイルを図-11に示す。図中、寒色系が対策前お盆、暖色系が対策後、灰色が参考値としての対策前11月で、各渋滞日の平均値を示している。前節と同様に、対策前の11月とお盆は速度プロファイルが一致しているが、対策後は、ボトルネック区間およびその上流で、対策前よりも走行速度が高くなっている。このことから、今回実施した対策により、ボトルネック区間の緩慢な追従状況が改善され、走行速度が上昇したことで、前節の交通容量も向上したものと推察する。また、対策前後それぞれお盆期間における速度コンター図を図-12に示す。これをみると、対策後はいずれも渋滞先頭が～60km/hレンジと～40km/hレンジが交互に現れ、くしのような状態になっている様子が見られる。速度プロファイル上で確認した走行速度の上昇は、この部分の変化によるものであると考えられる。以上のことから、対策後はボトルネックの影響が軽減されていることが窺える。

さらに図-12で、各日の12時間交通量と併せてみると、対策後の2024/8/14は、対策前の2023/8/13よりも午後の交通需要が多いにもかかわらず渋滞規模は小さくなっている。これは、交通容量が向上したことによるものであると考えられる。

6. おわりに

本論では、連続体交通流理論を用いてボトルネック区間を推定し、その推定により得られた位置に渋滞終了をカウントダウン方式で提供する渋滞情報板を仮設・表示させた際の交通容量と走行速度の変化について確認・考察した。その結果、交通容量は+11.8%と飛躍的に向上し、走行速度も改善され、渋滞規模が縮小したことを確認した。これは、連続体交通流理論により適切なボトルネック区間を推定し、明確なメッセージ性のある情報を提供することで、渋滞を大きく削減できることの実証事例になったと考える。ただし、今回の対策区間特有の結果である可能性や、効果検証サンプルが少ないことには留意する必要がある。

また、効果検証については、観測事実のみにフォーカスしており十分とは言い難い。本論では、交通容量の改善を走行速度上昇と関連付けて推察したが、改善結果を正確に解釈をする上では、理論を用いて安全車間時間や加速度の変化等ドライバー観点からの検証が必要である。

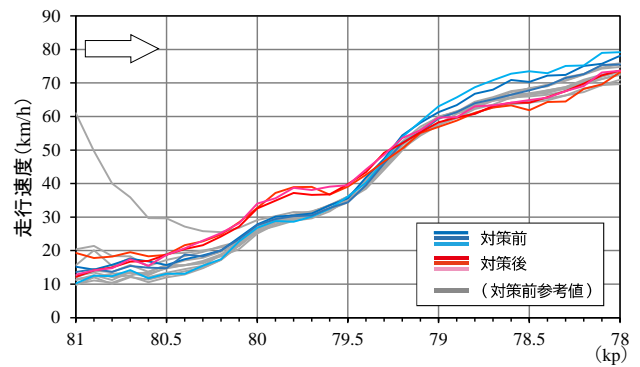


図-11 速度プロファイルの変化

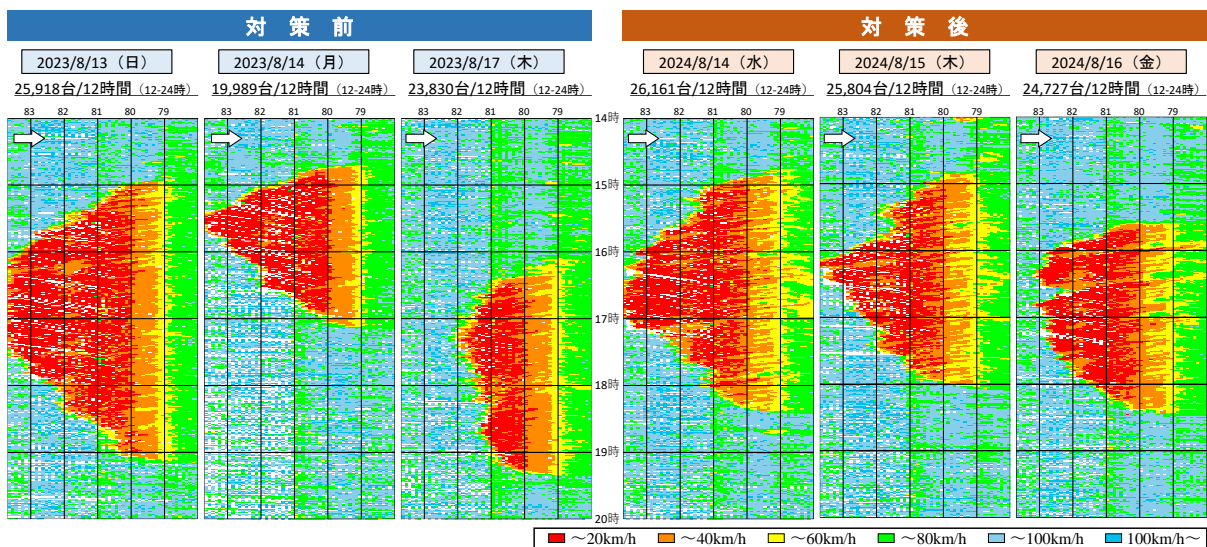


図-12 対策前後の速度コンター図（お盆期間）

謝辞：今回の実験は、データ提供や機材の調達・設置等について中日本高速道路（株）名古屋支社交通技術課の皆さま、セフテック（株）の塩原顧問に多大なご協力をいただいた。また、本論の内容は、（一社）交通工学研究会の自主研究委員会（高速道路単路部の渋滞現象記述理論の実務への応用）にて議論した内容の一部であり、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) 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, No.458/IV-18, pp. 65-71, 1993.1.
- 2) Jin,W.-L. : Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part B:Methodological*, Vol.107, pp. 41-56, 2018.
- 3) Wada,K.,Martinez,I., 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.
- 4) 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, 第 8 巻, 第 3 号, pp. 1-10, 2022.
- 5) 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, 第 9 巻, 第 2 号 (特集号 A), pp.A_280-A_287, 2023.
- 6) 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, 第 9 巻, 第 2 号 (特集号 A), pp.A_326-A_334, 2023.
- 7) 山田芳嗣, 阿部重雄, 長瀬博紀：LED 表示板を活用した渋滞対策について, 第 23 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.205-208, 2003.10.
- 8) 中谷了, 皆方忠雄, 佐藤久長, 市川昌：渋滞巻き込まれ時間を考慮した LED 標識による速度回復情報提供の効果検証, 第 25 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.173-176, 2005.10.
- 9) 亀岡弘之, 小根山裕之, 渡部義之, 櫻井光昭：走光性を活用した路側発光体の動的点滅制御による渋滞緩和の効果検証, 交通工学研究発表会論文集, Vol. 33, 2013.
- 10) 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.
- 11) 木村真也, 矢田浩規, 近田博之, 米川英雄：ITS スポットプローブによる上社地区ボトルネック分析, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 50, 2014.
- 12) 平山裕太, 中林悠, 隅田俊哉：付加追越車線における車線変更誘導対策の効果検証, 第 35 回日本道路会議, 2023.

(Received October 3, 2024)

(Accepted October 3, 2024)

CONSIDERATION OF THE INSTALLATION OF TRAFFIC CONGESTION INFORMATION BOARDS USING CONTINUUM TRAFFIC FLOW THEORY AND VERIFICATION OF THEIR EFFECTIVENESS

Shinya KIMURA, Shinichiro KAI and Kentaro WADA