

連続体交通流理論に基づく 自発光ペースメーカーライトによる 渋滞対策の持続効果分析

中林 悠¹・甲斐 慎一郎²・和田 健太郎³・
外山 敬祐⁴・加藤 寛道⁴・石田 貴志⁵

¹正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-13-14 マルヤス機械ビル)
E-mail: nakabayashi@doro.co.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 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

⁴非会員 東日本高速道路株式会社 (〒339-0056 埼玉県さいたま市岩槻区加倉260)
E-mail: k.toyama.aa@e-nexco.co.jp, h.kato.af@e-nexco.co.jp

⁵正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-13-14 マルヤス機械ビル)
E-mail: t_ishida@doro.co.jp

自発光ペースメーカーライト (PML) によるソフト的な渋滞対策は、多くの地点において交通容量の増加と、それに伴う渋滞軽減を実現している。先行研究では、東京外環道(内)戸田西 IC 付近に設置された PML を対象に、対策前と対策直後から 3 年後までの 5 年間で交通容量を比較しており、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から 3 年後まででは年々低下している傾向であった。

本研究では、近年提案された連続体交通流理論に基づくモデルより交通容量等のパラメータを推定するとともに、理論によるボトルネック交通容量から対策の持続効果を分析した。分析の結果、理論によるボトルネック交通容量は、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から 3 年後まででは年々低下している傾向であり、先行研究と同様の結果を得られた。

Key Words: Congestion Measures, Pace-Maker-Light, Traffic Capacity, Capacity Drop, Monitoring

1. はじめに

東日本高速道路株式会社 (以降、「NEXCO 東日本」という) 管内における渋滞は、全体の 7 割程度が交通集中によるものである。この交通集中渋滞が発生する箇所の内訳は、単路部の「上り坂およびサグ部」が約 6 割と大部分を占めている¹⁾。単路部で渋滞が発生するメカニズムは、「交通量が増加するにつれて追越車線を走行する車両が増加し、大きな車群がボトルネックにさしかかるとアクセル操作が不十分なため速度低下が生じ、後方へショックウェーブとして伝わることで追越車線から発生する」とされている²⁾⁴⁾。

このような渋滞に対して、NEXCO 東日本では、ハー

ド・ソフト両面からの対策を実施しており¹⁾、ソフト対策としては、自発光ペースメーカーライト (以降、「PML」という) 対策⁵⁾⁹⁾や路面標示変更による対策¹⁰⁾¹³⁾、LED 表示板を用いた車線利用率平準化対策¹⁴⁾¹⁶⁾などの効果を報告している。これらソフト対策事例のうち、PML による渋滞対策に着目すると、東北道 (上) の福島トンネルおよび東北道 (下) の安達太良 SA 付近⁵⁾、東京湾アクアライン (上) の川崎浮島 JCT 付近⁶⁾⁸⁾、東京外環道 (内) の戸田西 IC 付近 (以降、「戸田西 IC 付近 (内)」という) など⁹⁾の事例が挙げられ、多くの地点で PML によって交通容量が増加し、渋滞軽減を実現している。

ただし、先に挙げた PML による渋滞対策効果検証⁵⁾⁹⁾

は、対策前後の2時点（期間）を対象に交通状態を比較したものであり、対策効果が持続しているかまでは確認していない。これを確認するため、先行研究¹⁷⁾では、戸田西 IC 付近（内）における PML を対象に、対策前と対策直後から3年後までの5年間で交通容量（渋滞発生時交通流率と渋滞中交通流率）を比較しており、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から3年後まででは年々低下している傾向を報告している。しかしながら、当該研究では交通容量を比較することに留まり、対策直後の増加や経時的な低下に関する改善・悪化メカニズムを説明していない。近年では、Jin¹⁸⁾、Wada et al.¹⁹⁾によって提案された連続体交通流理論に基づき、ボトルネック位置分析²⁰⁻²¹⁾や渋滞対策の効果検証²²⁻²³⁾が行われており、その一部では交通性能改善メカニズムを考察されている。

そこで本研究では、先行研究¹⁷⁾で対象とした戸田西 IC 付近（内）における PML の交通容量改善・悪化メカニズムを考察することを念頭に、連続体交通流理論に基づくモデルより交通容量等のパラメータを推定するとともに、理論によるボトルネック交通容量から対策の持続効果を分析する。

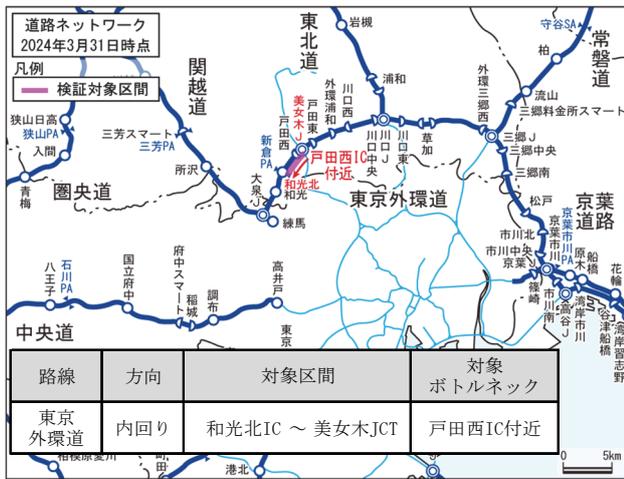


図-1 戸田西 IC 付近（内）における PML の設置箇所位置図

2. 分析概要

(1) PML の設置区間・運用内容

本研究で対象とする PML 設置区間は、図-1 に示す東京外環道（内）和光北 IC ~ 美女木 JCT であり、渋滞多発区間である。当該区間は片側2車線区間で、サグと IC 合流を原因としたボトルネック戸田西 IC 付近（内）が存在し、主に平日と土曜日の朝に渋滞が発生している。具体的な PML 設置区間は、図-2 に示すとおり 4.9~8.4kp の 3.5km であり、戸田西 IC 付近を包括する区間に設置されている。設置距離は、既往文献⁵⁻⁸⁾よりも長いことが特徴である。この区間は明かり部かつ遮音壁がない開かれた空間である。また、PML は左側路肩側と中央分離帯側の両側に設置されている。設置間隔は 10.0m、設置高さは 1.6m である。

次に、PML の運用内容を表-1 に示す。PML の発光色は明かり部のため緑、点灯パターンは 1 灯 3 滅である。また、設置区間は 4~5 つのブロックに区分しており、点灯速度は「非渋滞時運用（通常時運用）」が 80~90km/h、「混雑時運用」が 90km/h、「渋滞時運用」が段階的に 50~90km/h と、ブロックや制御方法によって点灯速度が若干異なる。

表-1 戸田西 IC 付近（内）における PML の運用内容

項目		内容	備考
発光色		緑	—
点灯パターン		1灯3滅	左側路肩側と中央分離帯側
タイマー制御	点灯速度	非渋滞時 90km/h	規制速度80km/h+10km/h
	渋滞時	50~80km/h	区間やブロック割により異なる
自動制御	点灯速度	通常時	80km/h 規制速度80km/h
		混雑時	90km/h 規制速度80km/h+10km/h
		渋滞時	50~90km/h 区間やブロック割により異なる

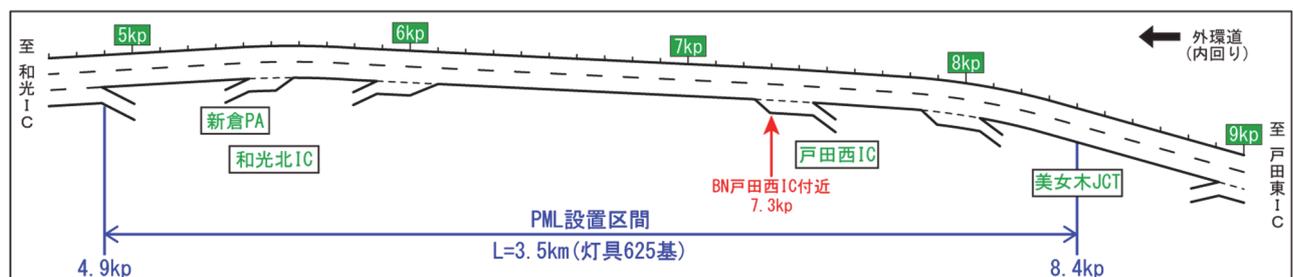


図-2 戸田西 IC 付近（内）における PML の設置区間

PMLによる渋滞対策は、令和2年7月13日(月)から設定時間帯に応じた「タイマー制御」による運用を開始し、その後、令和3年6月29日(火)より交通状況に応じた「自動制御」による運用に変更をしている。

なお、本研究では、PMLの点灯速度が比較対象期間により若干異なるものの、同じような点灯速度帯であることから、PMLの点灯有無の違いのみに着目する。

(2) 対象期間

持続効果分析の対象期間について述べる。表-2に示すとおり、対策前を令和元年9～11月、対策直後を令和2年9～11月、対策1年後を令和3年9～11月、対策2年後を令和4年9～11月、対策3年後を令和5年9～11月の各年3ヶ月ずつの5時点(期間)とする。

3. 交通概況整理

(1) 交通量

PMLの持続効果を分析するにあたり、比較対象期間の基礎情報として、和光北IC～戸田西IC(内)における6.600kpの車両感知器データより、平均日交通量と平均大型車混入率を整理し表-3に示す。平均日交通量をみると、対策前と対策直後から2年後までは、43～44千台/日と概ね同程度であり、新型コロナウイルスによる影響は小さい。一方で、対策3年後は41千台/日と対策前と比べてやや減少している。また、平均大型車混入率をみると、対策前と対策直後から2年後までは、22～23%であり、概ね同程度である。一方で、対策3年後は25%と対策前と比べてやや増加している。

次に、平均時間交通量の変化を確認する(図-3)。対策前後ともに朝方の交通量が多く、渋滞発生時間帯と一致している。朝方は、対策前と比べて対策直後から対策2年後の6～9時台にやや増加しており、PMLによる対策効果が発現しているものと想定される。一方で、対策3年後は全体的に交通量がやや減少しているようであるものの、後述する渋滞発生状況の変化でも示すとおり、対策直後から2年後までと同規模の渋滞が発生している。

(2) 渋滞発生状況

当該ボトルネックの渋滞回数と渋滞量を図-4に示す。3ヶ月あたりの渋滞回数は、対策前が124回であったのに対して、対策直後は89回となり35回(28%)減少、対策1年後は85回となり39回(31%)減少、対策2年後は93回となり31回(25%)減少、対策3年後は79回となり45回(36%)減少している。また、3ヶ月あたりの渋滞量も対策前の921km・時に対して、対策直後から3年後で452～666km・時となり、25～51%

表-2 PMLの持続効果分析期間

年次	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平成31年 令和元年									対策前			
令和2年						●			対策直後			
令和3年						▲			対策1年後			
令和4年									対策2年後			
令和5年									対策3年後			

※●：令和2年7月13日(月)より、PML「タイマー制御」運用開始
 ※▲：令和3年6月29日(火)より、PML「自動制御」運用変更

表-3 比較対象期間の平均日交通量と大型車混入率

項目	対策前 (令和元年)	対策後			
		直後	1年後	2年後	3年後
平均日交通量 (台/日)	43,525	42,529	42,789	43,082	41,452
平均大型車 混入率(%)	23.3	22.2	22.5	22.5	24.7

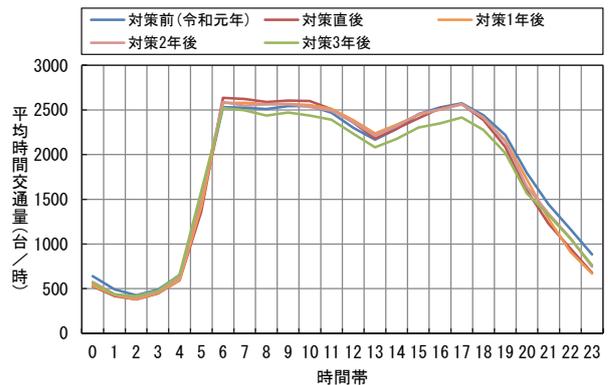


図-3 比較対象期間の平均時間交通量

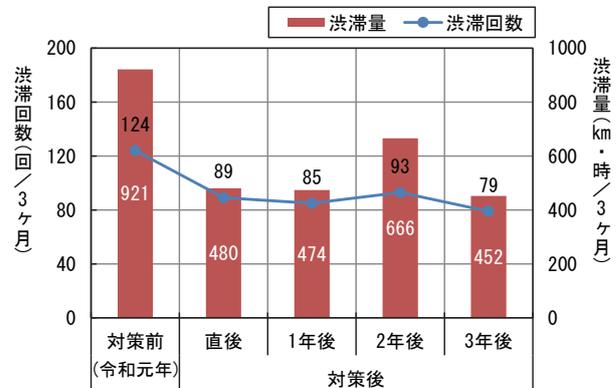


図-4 比較対象期間の渋滞回数と渋滞量

減少している。

渋滞回数と渋滞量ともに、対策前と比べて対策後に大きく減少している。しかしながら、対策 2 年後に渋滞がやや増加しており、対策直後に観測している交通容量の増加効果が年々小さくなっている可能性がある。

4. 連続体交通流理論に基づくパラメータの推定

連続体交通流理論に基づくパラメータの推定については、例えば甲斐ら²¹⁾の研究に詳しい。

(1) 連続体交通流理論の概要

Jin¹⁸⁾, Wada et al.¹⁹⁾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では、ボトルネックは単一の地点でなく空間的に連続の区間と仮定し、この区間を $0 \leq x \leq L$ とする。また、この区間において安全車間時間 (safety time gap) $\tau(x)$ が連続的に増加すると仮定する。このとき、結果として各地点 x の交通容量 $C(x)$ は次の式のように減少する。

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

ここで、 u は自由流速度、 k は飽和密度である。つまり、 $C(0)$ はボトルネック区間手前の交通容量を表し、ボトルネック下流端の交通容量 $C(L)$ がボトルネック容量を表す。

この理論のもう 1 つの重要な仮定が、渋滞中交通流率 (QDF) 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と Bounded Acceleration (以降、「BA」という) 状態、つまり渋滞流と発進流から構成されるというものである。具体的には、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 (図-5 上段)¹⁹⁾。また、通常は追従状態の速度回復プロファイルが下に凸、BA 状態では上に凸となるので、 $x = L$ はその変曲点となる (図-5 下段)。

このとき、渋滞中交通流率 (QDF) が C_d で安定したとすれば、ボトルネック区間内の地点 x における速度は次式のとおりとなる。

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

また、渋滞安定中の加速度¹⁸⁾は $a(x) = v(x)v_x(x)$ ($v_x(x) = \partial v(x)/\partial x$) であり、これに式(2)を代入すると、

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

一方、BA 状態の加速度は、次の TWOPAS モデルで表現されるとする¹⁸⁾。

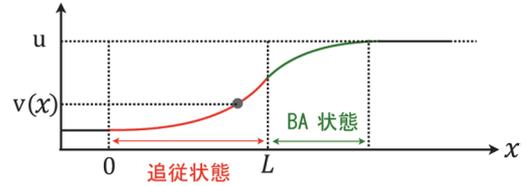
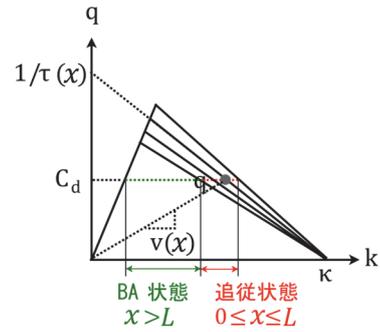


図-5 QK 図 (上段) と速度回復プロファイル (下段) の関係

$a(v, x) = \{a_0 - g\phi(x)\}(1 - v(x)/u) \quad x \geq L \quad (4)$
 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。よって、 $a_0 - g\phi(x)$ は地点における重力加速度を考慮した車両加速度を表す。最後に、 $x = L$ の地点では、追従状態であり BA 状態でもあるので、次の関係式が成り立つ。

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

式(5)にパラメータの値を代入すると C_d が内生的に決まる、というのがこの理論の構造である。

なお、渋滞中交通流率 C_d と各種パラメータの関係は次のようにまとめられる²²⁾。他のパラメータを固定したとき、 C_d と安全車間時間 $\tau(L)$ は反比例の関係になり、 $\tau_x(L)$ が小さくなると (先行車両の速度への調整が迅速になると²²⁾ C_d が大きくなる。また、加速度パラメータ a_0 が大きくなると C_d が大きくなる。

(2) 理論モデル・キャリブレーション

本研究では、甲斐ら²¹⁾、和田ら²²⁾にて示されたキャリブレーション方法を用いる。この手法では、自由流速度 u 、飽和密度 k が一定の条件下において、まず、ボトルネック区間 $[0, L]$ を速度回復プロファイルに基づき設定する。次に C_d と $v(x)$ 、つまり渋滞中交通流率 (QDF) とボトルネック区間内の速度回復プロファイルが観測により与えられると、式(2)を $\tau(x)$ について解くことにより安全車間時間 $\tau(x)$ が一意に定まる。さらに、定まった $\tau(x)$ および勾配 $\phi(x)$ を用いれば、式(5)を a_0 について解くことによりパラメータ a_0 も一意に定まる。

キャリブレーションの入力については次のように設定した。自由流速度 u はボトルネック区間の交通容量推定と BA モデル推定の際のそれぞれで設定し、前者は渋滞

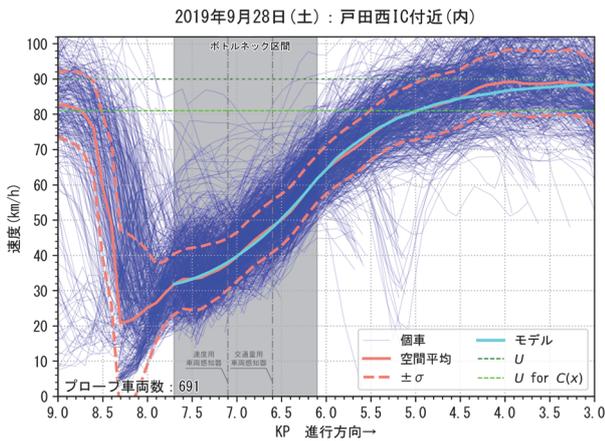


図-6 キャリブレーション結果 (速度回復プロファイル) の例

発生前の自由流速度から、後者は各渋滞イベントでボトルネック直下流の速度がおおよそ一定になった速度から設定した。飽和密度 k_j は、140 台/km/車線と設定した。渋滞中交通流率 (QDF) は、交通量が安定する渋滞発生 30 分後から渋滞終了までのフローレート値とした。これを用いたキャリブレーション結果の一例を図-6 に示す。

5. PML の持続効果分析

戸田西 IC 付近 (内) における渋滞発生時交通流率 (BDF) を図-7 に、渋滞中交通流率 (QDF) を図-8 に示す。これら BDF, QDF はキャリブレーション時に設定した渋滞時間に基づき、車両感知器データより集計した結果である。また、BDF は渋滞発生直前の 5 分間フローレート、QDF は渋滞中のフローレートである。

BDF, QDF とともに、先行研究¹⁷⁾と同様、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から 3 年後まででは年々低下している傾向である。

次に、連続体交通流理論に基づくモデルより推定した、理論によるボトルネック交通容量 $C(L)$ を図-9 に示す。これをみると、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から 3 年後まででは年々低下している傾向がみられる。PML による渋滞対策は、車両感知器データによる交通容量のみでなく、理論による交通容量からも、石田ら²⁴⁾が指摘する交通容量の経年的な低下が影響していることを確認できた。

6. まとめと今後の課題

本研究では、戸田西 IC 付近 (内) における PML の交通容量改善・悪化メカニズムを考察することを念頭に、連続体交通流理論に基づくモデルより交通容量等のパラ

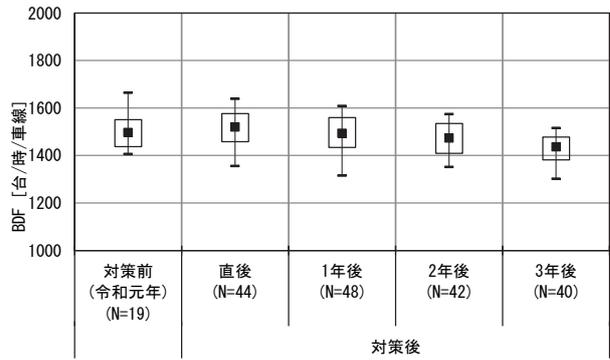


図-7 車両感知器データによる渋滞発生時交通流率

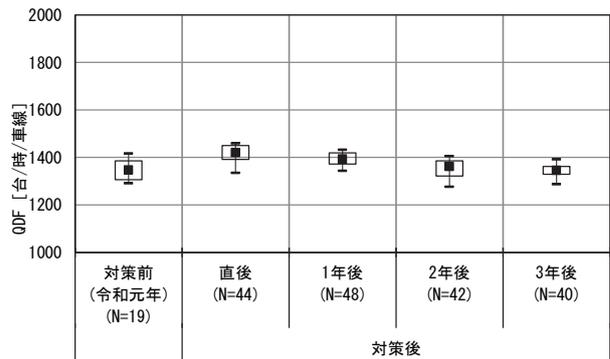


図-8 車両感知器データによる渋滞中交通流率

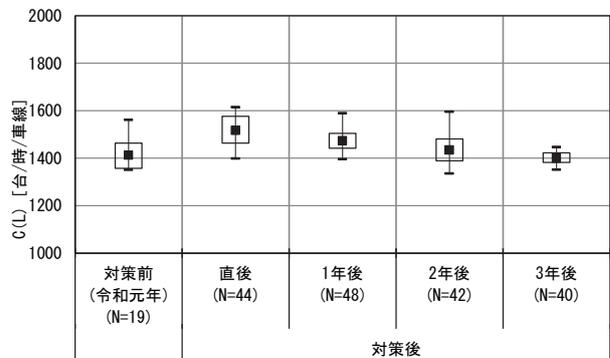


図-9 理論によるボトルネック交通容量

メータを推定するとともに、理論によるボトルネック交通容量から対策の持続効果を分析した。

理論によるボトルネック交通容量は、対策前と比べて対策直後に増加したものの、対策直後から 3 年後まででは年々低下している傾向がみられた。PML による渋滞対策は、車両感知器データによる交通容量のみでなく、理論による交通容量からも、石田ら²⁴⁾が指摘する交通容量の経年的な低下が影響していることを確認できた。

今後は、PML による渋滞対策の交通容量改善・悪化

メカニズムを考察するために、連続体交通流理論に基づくモデルのパラメータ（加速度や安全車間時間など）の分析および考察を継続していく予定である。

謝辞：本分析は、（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る。また、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) NEXCO 東日本企業サイト：高速道路の渋滞対策，
https://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/detail_07.html，
2024 年 9 月 30 日閲覧。
- 2) 越正毅：高速道路トンネルの交通現象，国際交通安全学会誌，Vol. 10, No. 1, pp. 32-38, 1984.
- 3) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，Vol. 371/IV-5, pp. 1-7, 1986.
- 4) 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. 458/IV-18, pp. 65-71, 1993.
- 5) 鎌田恭典，渡部聡，安斎潤哉，柴田健一：渋滞対策を目的とした自発光ペースメーカーの開発と運用について，交通工学研究発表会論文報告集，Vol. 33, pp. 181-184, 2013.
- 6) NEXCO 東日本 本社 管理事業本部 交通部交通課，東北支社 管理事業部 交通技術課，関東支社 管理事業部 交通技術課：LED 発光パネル（ペースメーカー）を活用した渋滞緩和対策，道路行政セミナー2013 年度 11 月号，pp. 1-11, 2013.
- 7) 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，第 1 巻，第 4 号（特集号 B），pp. B_1-B_8, 2015.
- 8) 加藤寛道，多原裕二：東京湾アクアラインにおけるペースメーカーライトの運用と効果検証について，土木計画学研究発表会・講演集，Vol. 53, 2016.
- 9) 本間英貴，加藤寛道，石垣博将，松田雄太，中林悠，石田貴志：東京外環自動車道における PML による渋滞対策の効果検証，交通工学研究発表会論文集，Vol. 42, pp. 435-442, 2022.
- 10) 後藤誠，鎌田恭典，外山敬祐，小宮奈保子，清宮広和，石田貴志：都市間高速道路 JCT 分流部におけるチャンネルゼーションの効果検証分析，交通工学研究発表会論文集，Vol. 39, pp. 629-634, 2019.
- 11) 本間英貴，鎌田恭典，小宮奈保子，清宮広和，清田祐太郎，石田貴志：東京外環道（外）美女木 JCT 交差点における案内標識および路面標示変更による渋滞対策の効果検証，交通工学研究発表会論文集，Vol. 41, pp. 465-470, 2021.
- 12) 本間英貴，鎌田恭典，小宮奈保子，清宮広和，中林悠，石田貴志：東京外環道（内）大泉 JCT 付近における車線運用変更による渋滞・事故対策の効果検証，交通工学研究発表会論文集，Vol. 41, pp. 471-478, 2021.
- 13) 本間英貴，加藤寛道，石垣博将，清宮広和，中林悠，石田貴志：関越道（下）における車線キーブグリーンラインによる渋滞対策の効果検証，交通工学研究発表会論文集，Vol. 42, pp. 269-275, 2022.
- 14) 原田秀一，深瀬正之，前島一幸，佐藤久長，瀬古賢司：車線利用率平準化による高速道路の渋滞対策効果検証，交通工学，Vol. 42, No. 5, pp. 74-79, 2007.
- 15) 原田秀一，深瀬正之，前島一幸，Jian XING，瀬古賢司：高速道路での車線利用率平準化による渋滞対策に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol. 26, No. 5, pp. 881-888, 2009.
- 16) 後藤誠，南肇，外山敬祐，松下健介，石田貴志：都市間高速道路における LED 標識を用いた車線利用率平準化渋滞対策の実証的研究，交通工学研究発表会論文集，Vol. 38, pp. 213-220, 2018.
- 17) 中林悠，長内圭太，外山敬祐，清宮広和，石田貴志：都市間高速道路における自発光ペースメーカーライトによる渋滞対策の持続効果検証，交通工学研究発表会論文集，Vol. 44, pp. 465-470, 2024.
- 18) Jin,W.-L.：Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks，*Transportation Research Part B:Methodological*，Vol.107, pp. 41-56, 2018.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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, 2024.
- 24) 石田貴志，大口敬，邢建，後藤誠：都市間高速道路における交通容量の経年変化に関する研究，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.77, No.5, pp.I_925-I_938, 2022.