

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04637

研究課題名（和文）高速道路の単路部ボトルネック現象に対する交通流理論の構築と制御手法の開発

研究課題名（英文）Development of Traffic Flow Theory and Control Method for Sag and Tunnel Bottlenecks on Expressways

研究代表者

和田 健太郎（Wada, Kentaro）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：20706957

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：これまで、サグ、トンネル等の単路部ボトルネックにおける渋滞現象を説明するために、様々なミクロ（追従）モデルが提案されてきた。しかし、そのモデルの複雑さに起因する解析の困難さから、理論の確立には至っていない。本研究は、単純なモデリングが可能なマクロな交通流モデルをベースとした理論を構築し、その理論に基づく制御手法を開発することを目的とする。具体的には、まず、渋滞時に生じる特徴的な現象を時空間的に分類し、安定的な現象から順にモデルを構築・拡張した。そして、実観測データに基づき、理論の検証を行った。最後に、交通渋滞を緩和する運転挙動を導くとともに、現実の交通制御の評価を理論に基づき行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大な特色は、ミクロな視点でのモデル化が主流である単路部ボトルネック現象に対して、交通の流れの記述に力点を置くマクロな視点でモデル化を行う点である。これは、従来のアプローチからの大きな方向転換を志向するものであり、民間プローブやETC2.0、高度な画像処理技術による長時間全車両軌跡など、近年膨大に蓄積されつつある高解像度の交通流データと極めて親和性が高い。そのため、これらのデータによる検証を通じた信頼性の高い理論の構築が期待できる。さらに、本研究で得られる知見は実務的な課題に直結するものであり、学術研究としてのみならず、工学的、実務的にも大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：Various microscopic (car-following) models have been proposed to explain congestion phenomena at sag and tunnel bottlenecks. However, due to the complexity of these models, analyzing them has been challenging, and as a result, a well-established theory has not been developed. This research aims to develop a theory based on a macroscopic traffic flow model that allows for simple modeling and to create a control method based on this theory. Specifically, we first classified the characteristic traffic congestion phenomena in terms of space and time, and then we constructed and extended a model starting from the stable phenomena. Next, the theory was verified using actual observational data. Finally, we derived driving behaviors that alleviate traffic congestion and also evaluated real-world traffic control based on the proposed theory.

研究分野：交通工学

キーワード：交通流理論 サグ・トンネル Capacity Drop プローブ 感知器 交通制御 自動運転

1. 研究開始当初の背景

サグや上り坂、トンネル部は、車線減少や分合流等の明確な道路構造の変化がない単路部にも関わらず、周辺に比べ容量が低くなる交通上のボトルネックである。また、一旦渋滞が生じると、ボトルネックの捌け交通量が渋滞発生直後に比べ10～15%も低下する Capacity Drop (CD) が生じ、最終的にボトルネック周辺の交通状態がほぼ定常となる（以降、「安定渋滞状態」と呼ぶ）ことも知られている (Koshi et al., 1992)。この CD 現象は、渋滞の長時間化を招くため、渋滞の発生と並んで極めて重要な現象である。以上のような単路部ボトルネックにおける渋滞現象は長年に渡り認識されてきたが、現在でも国内の高速道路における主要な渋滞発生要因である。

このような単路部ボトルネックの渋滞メカニズムを理解・再現し、適切な交通制御・マネジメントを開発するために、個々の車両の加減速挙動を直接記述するマイクロな交通流モデル（追従モデル）が多く提案されてきた。しかし、現状のモデリングには2つの課題がある。1つ目は、モデル構造が非常に複雑であり、その物理的/数論的特性を理論的に解析することが難しい点である。2つ目は、従来研究の多くは渋滞発生の記述を意図したものであり、CD 現象は十分に説明されていない点である。

2. 研究の目的

本研究は、単路部ボトルネックにおける渋滞現象を説明しうる可能な限り単純なモデル・理論の構築を目指す。そして、新たに構築された理論に基づく制御手法の開発を最終的な目的とする。目的を達成するための基本戦略は、「安定的な現象を単純なモデルで説明する」という数理モデリングの基本に立ち返って、段階的にモデルを拡張し複雑な現象にアプローチしていくものである。より具体的には、図1に示すように、単路部ボトルネックで生じるいくつかの特徴的な現象を時空間的に分類し、最終的な渋滞安定状態からボトルネック顕在化時の確率的な現象へと時間を遡る順にモデル化の対象範囲を広げていく。

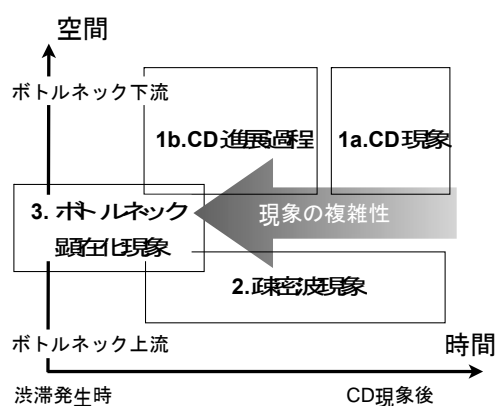


図1 単路部渋滞現象の時空間分類

3. 研究の方法

本研究は大きく3つのステップからなる：(1) 単路部ボトルネックにおける渋滞現象のモデリングと理論・シミュレーション解析、(2) 実データによる理論の検証、(3) 交通制御・マネジメント手法の開発・評価。

(1) 単路部ボトルネックにおける渋滞現象のモデリングと理論・シミュレーション解析

モデリングの手法としては、マクロな交通流モデル（連続体・流体モデル）の代表格である Kinematic Wave (KW) モデルを基本手法として採用する。その大きな理由は、モデルパラメータ（のほとんど）が直接観測可能であり、理論的な操作性や現象記述能力が高い上、基本枠組みがほぼ確立しているためである (和田ら, 2017)。最後の点は、それが故にアドホックな拡張が難しく、複雑性を抑えた単純化モデリングに繋がる可能性が高いという意味で重要である。以降では、具体的な内容を、図1の現象に関連づけて簡潔に述べる。

1. CD 現象は、捌け交通量を決めるボトルネック周辺の速度回復が極めて緩慢であることに起因すると考えられており (Koshi et al. 1992), KW モデルに単路部ボトルネックの効果と加速度限界を導入したモデルを解析する。そして、ボトルネック効果、加速度限界、CD 現象の関係を説明する理論を構築する。以降では、ここで解析するモデルを「提案モデル」、構築する理論を（単路部ボトルネックに対する）「連続体交通流理論」と呼び参照する。

2. 粗密波現象は、渋滞中の車両が stop-and-go を繰り返す状態であり、ボトルネックから一定程度離れた上流で典型的に生じる。こうした現象の解析はマイクロな交通流モデルによるアプローチが進んでおり (Treiber and Kesting, 2013), 本研究でも既存の追従モデルをベースとする。従来研究との違いは、提案モデルの解析で明らかになった CD 現象メカニズムを追従モデルに導入する点である。

3. ボトルネックの顕在化（渋滞発生時）現象は、需要のランダムな到着（車群の形成）、ボトルネックにおける（僅かな）速度低下、CD 現象の進展による捌け交通量の低下などの複合的な要因により、継続的な渋滞に至るか否かが決まる確率的な現象である。そのため、提案モデルに

需要、交通流パラメータ双方の確率変動を導入する。

(2) 実データによる理論の検証

本研究では、車両感知器データと車両軌跡データ（プローブデータ）を用いて連続体交通流理論の検証を行う。具体的には、理論が予測する定性的な交通流特性や定量的な交通容量を実観測データと照らし合わせることにより、理論の妥当性を検証する。またその過程で、異なる2種類のデータソースから提案モデルをキャリブレーションする方法を開発する。

(3) 交通制御・マネジメント手法の開発・評価

連続体交通流理論に基づき、どのような運転挙動の改善が交通渋滞（特にCD現象）の緩和に繋がるのかを検討する。具体的には、渋滞発生・CD現象の要因であるボトルネック効果と加速度限界を改善する運転挙動を想定し、そうした運転挙動をとる車両の混入率と交通容量改善効果を理論的・数値的に明らかにする。また逆に、現在実装されている交通制御を理論に基づく実証分析により評価することで、交通制御効果の発現メカニズムを考察するとともに、交通制御のさらなる改善が可能か否かについても検討を行う。

4. 研究成果

(1) 単路部ボトルネックにおける渋滞現象のモデリングと理論・シミュレーション解析

本研究で提案したモデルは、ラグランジュ座標系（車両とともに移動する座標系）における連続体モデルであり、標準的なKWモデルの仮定に加え、次の2つの仮定を置いている：(a) 地点依存の安全車間時間、(b) 有界加速（BA: Bounded Acceleration）。前者は、勾配変化やトンネル進入により「（無意識に）速度低下しているにもかかわらず、車間距離を一定に保とうとする」という従来から指摘されているサグ・トンネル部の追従遅れ挙動を、安全車間時間パラメータの空間的な変化（増加）という形でモデル化したものである。これはマクロに見れば、図2右のように基本図（FD: Fundamental Diagram）の渋滞流側の傾きが緩やかになることに対応する。結果として、図2左上に示すように、道路容量がサグ・トンネル区間で徐々に減少するボトルネック効果を表すことになる。後者は、明確な道路構造変化のない単路部では渋滞先頭が把握しづらく、ボトルネックを抜けたにもかかわらずアクセルを十分に踏み込まない加速遅れを表す。

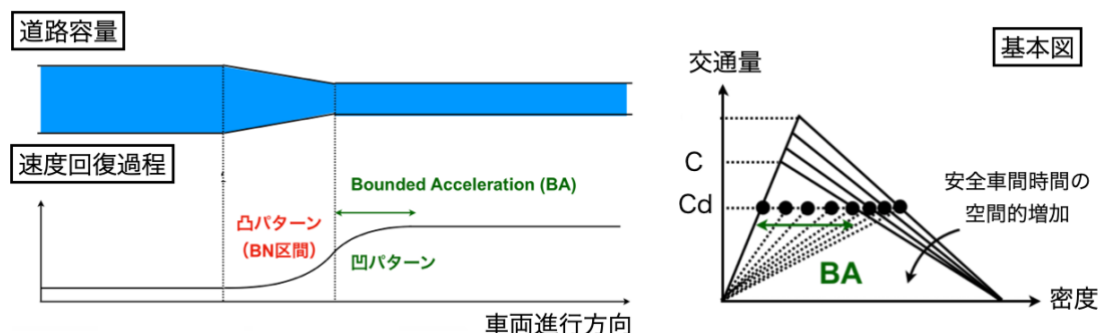


図2 提案モデルの模式図（左上：道路容量の変化，左下：速度回復過程，右：基本図）

まず、提案モデルの初期値問題を理論的に解析し、CD現象の発生・進展メカニズムを明らかにした：一旦渋滞するとボトルネック区間での追従遅れとその下流での加速遅れ（BA）が相互に強化しあい、渋滞先頭での連鎖的な捌け交通量低下・速度低下を引き起こす。また、この速度低下過程が縮小写像による不動点問題として記述できることを見出し、任意の状態からある安定的な状態に収束することを証明した。つまり、渋滞発生後にCD現象が発生しボトルネック周辺では最終的に安定状態が実現するという、現実の交通流特性が提案モデルにより表現できることを理論的に示した。図2のFDにおける $C \rightarrow C_d$ の交通量低下がCD現象を表し、左下がこの安定渋滞状態における緩慢な速度回復過程を表す。さらに、ドライバの運転挙動がそれぞれ異なることを考慮した提案モデルの確率的拡張を行い、より現実的な状況でも以上の解析結果が頑健に成立することを示した。これらの成果は、ボトルネック効果と加速度限界、CD現象の関係を解析的に示した従来にない理論であり、交通流理論分野の進展に寄与するものである。

以上で提案したモデルは、CD現象を明快に記述することができるが、ボトルネック区間上流での粗密波現象を再現することはできない。そこで、提案モデルにおけるボトルネック効果を既存の追従モデル（Intelligent Driver Model）に組み込み、シミュレーション分析を行った。結果、適切にパラメータの組みを選べば、CD現象と粗密波現象を同時に再現できることがわかった。しかし、そのパラメータの組みを選ぶ基準は明確になっておらず、また、既存のモデル（e.g.,

Treiber & Kesting, 2013) が表現することができる現象との関係も十分明らかではない。これらの点については、今後の課題である。

最後に、渋滞発生のゆらぎを表現する確率モデルを提案モデルに基づき構築し、モンテカルロ・シミュレーションにより渋滞発生確率の特性を解析した。ここでのモデルは、渋滞発生に関わる需要の確率変動と交通容量（運転挙動パラメータ）の確率変動を分解して扱う従来にない枠組みである。結果、モデルにより得られる渋滞発生確率分布が現実に観測されるシグモイド型となること、渋滞発生確率の分布形状を決める支配的要因が運転挙動パラメータの変動であること、などが明らかになった。

(2) 実データによる理論の検証

連続体交通流理論の検証としてはまず、安定渋滞状態の速度回復過程の様子やそこでの交通状態が理論の予測と定性的に一致するかを確認した。理論によれば、CD現象に伴う極めて緩やかな速度回復過程は追従状態とBA（発進流）状態より構成され、通常、前者が（下に）凸のパターン、後者が凹（上に凸の）パターンを示す（図2左下）。実際、図3左の実測の速度回復過程（関越道下りの高麗川橋付近の安定渋滞中のデータ）は凸から凹のパターンに変化している。また、感知器データから、その変曲点（32.6KP）前後で運転挙動が追従からBAへと変化していることが確認された。

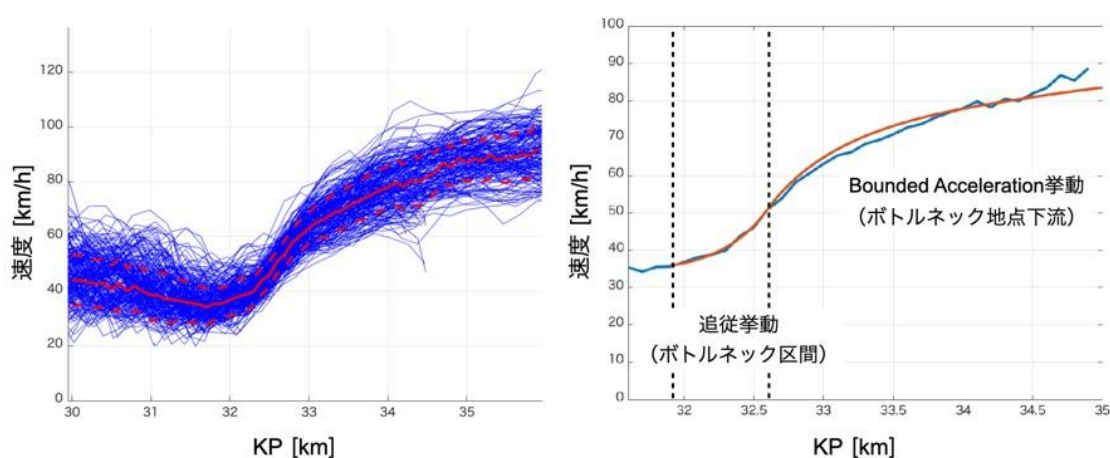


図3 理論の検証（左：実測の速度回復過程（青線：各車両，赤実線：空間平均，赤点線：空間平均土標準偏差），右：モデルによる再現（青線：実測，赤線：モデル）

定量的な検証では、安定渋滞中の捌け交通量データと速度回復過程のデータからFD（特に安全車間時間パラメータ）および加速度パラメータをキャリブレーションする方法を開発した。この手法により推定されたモデルは実測の速度回復過程を良好に再現可能である（図3右）。また、より重要な結果として、以上のキャリブレーション結果として推定される（渋滞発生前の）交通容量 C は、渋滞発生時のデータは一切使用していないにもかかわらず、渋滞発生時の交通量にほぼ一致することも確認された。これは、提案理論の予測が定量的にも妥当であることを示している。

以上の検証をタイプの異なる複数の単路部ボトルネック（関越道上り高坂サービスエリア付近、東名上り日進バス停付近、名神上り蟬丸トンネル付近）でも行い、理論の汎用性を確認した。また、キャリブレーション結果として推定される渋滞発生前の交通容量の空間変化と道路勾配変化との関係についても考察を行い、サグ部のどの区間（下り区間、下り→上りの変化区間、上り区間）がボトルネックとして顕在化するかは、地点によってまちまちであることも明らかになった。この結果は、渋滞対策を行うべき区間が勾配のみからは必ずしも決まらず、各ボトルネック毎に慎重な検討が必要であることを指摘するものである。

(3) 交通制御・マネジメント手法の開発・評価

交通制御手法の開発としてはまず、CD現象のメカニズムに基づき、追従遅れを解消する運転挙動「Gradient Compensation (GC)」と加速遅れを解消する運転挙動「Quick Acceleration (QA)」を想定し、それらがどのようなメカニズムでCDの軽減に寄与するかを考察した：前者は渋滞先頭を通過する速度を上昇させ、後者は渋滞先頭下流の加速度が上昇する。そして、それらの挙動が自動運転車両の一機能（e.g., Adaptive Cruise Control）として実装される状況を考え、自動運転車両の混入率とCD比率（安定渋滞中の捌け交通量と渋滞発生時の交通容量の比）の関係を理論およびシミュレーションにより分析した。その結果、次のような特性が明らかになった（図4）：

- 追従遅れを回避するGC自動運転車両は混入率の増加とともにCDの負の影響を低減する。

- 加速遅れを回避する QA 自動運転車両は一部の車両のみではその効果はほとんど発現しない。

以上の結果は、ボトルネック区間での GC 運転挙動が平均的に効く一方、ボトルネック下流での QA 運転挙動は低性能（加速遅れが大きい）車両に効果を打ち消され効果が発現しづらいことを示している。つまり、CD の負の影響を低減するためには、第一義的にボトルネック区間（速度回復過程の凸パターン部分）の運転挙動を改善することが肝要であることが示唆された。なお、この示唆と関連すると思われる現実の興味深い事例が阪神高速道路における走光型視線誘導システムの実験で示されている（増本ら, 2018）。これらの関係を明らかにすることで、より効率的な交通制御の運用につながる可能性があり、今後の重要な研究課題であると考えられる。

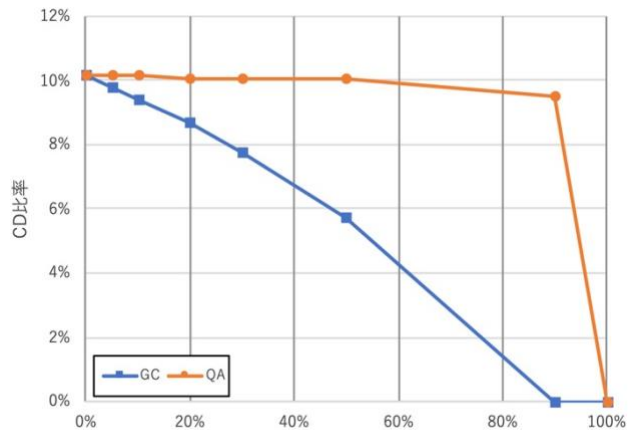


図4 自動運転車両の混入率と CD 比率

本研究の最後に、現在実装されている交通制御の評価として、中央道上り小仏トンネルの音声注意喚起（速度回復情報提供）システムの評価を理論に基づき行なった。具体的には、システム導入前後（2018/2019年）のデータによる提案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した。結果、

- 渋滞発生時の交通（容）量および安定渋滞中の捌け交通量の改善はボトルネック区間の下流部分の「安全車間時間の短縮」という共通のメカニズムで説明できること（図5）、
- 渋滞先頭下流の加速度向上は必ずしも捌け交通量の改善につながっておらず、さらなる改善の余地があること、

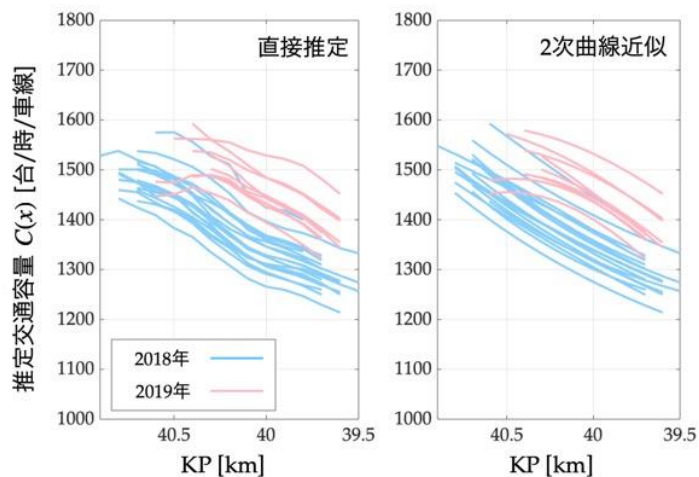


図5 システム導入前後の推定交通容量の変化

が明らかとなった。この研究における一連の分析では、様々な観測交通流の特性が理論により整合的に説明されており、その結論もある程度妥当であると考えられる。ただし、この結果をより確かなものとするために、今後は理論から示唆された渋滞対策の改善の方向性が実際に改善をもたらすのかを実験・検証していく必要があると考えられる。

(4) まとめと今後の展望

本研究は、単路部ボトルネックに対する、従来にないマクロな交通流理論の構築、その実データによる検証、理論に基づく交通制御法の開発と評価、と総合的に取り組んだものであり、交通流理論の進展に貢献するとともに実務にも展開できるポテンシャルを持っている。今後としては、高速道路技術者とともに、これらの方法論や知見を実務でも活用可能な形へ整備し、その取り組み結果を再び理論にフィードバックする、よい循環を生み出していくことが重要であると考えられ、そのための体制づくりにも着手している（和田ら, 2022）。

<引用文献>

Koshi et al.: Capacity of sags and tunnels on Japanese motorways, *ITE Journal* 62(5),17–22,1992.

和田ら：Kinematic Wave 理論の近年の発展：変分理論とネットワーク拡張，土木学会論文集 D3 73(5), I 1139–I 1158, 2017.

Treiber & Kesting: *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*, Springer, 2013.

増本ら：阪神高速道路における速度回復誘導灯の効果検証と効率的な運用方法について，交通工学論文集 4(3), B_1–B_9, 2018.

和田ら，交通工学研究会自主研究「高速道路単路部の渋滞現象記述理論の実務への応用」，https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~wadaken/JSTE_TFT.html, 2022. (2023年6月4日閲覧)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 甲斐 慎一郎, 和田 健太郎, 堀口 良太, Xing Jian	4. 巻 9
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_280-A_287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.9.2_A_280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 和田 健太郎, 金崎 圭吾, 西田 匡志, 平井 章一	4. 巻 9
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_326-A_334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.9.2_A_326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金崎 圭吾, 和田 健太郎	4. 巻 78
2. 論文標題 連続体交通流モデルに基づく高速道路サグ・トンネル部における渋滞発生確率の解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_911-I_918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.78.5_I_91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 甲斐 慎一郎, 和田 健太郎, 堀口 良太	4. 巻 78
2. 論文標題 追従モデルによる高速道路サグ部のCapacity Drop現象の再現	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_963-I_971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.78.5_I_96	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 和田 健太郎, 甲斐 慎一郎, 堀口 良太	4. 巻 8
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_1-A_8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.8.2_A_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 和田 健太郎, Xing Jian, 大口 敬	4. 巻 8
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.8.3_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kentaro Wada, Irene Martinez, Wen-Long Jin	4. 巻 113
2. 論文標題 Continuum car-following model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 260-276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2019.05.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 和田健太郎, 甲斐慎一郎, 堀口良太
2. 発表標題 単路部ボトルネックにおけるCapacityDropを低減する走行挙動: 連続体交通流理論に基づく一考察
3. 学会等名 第41回交通工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Wada, Irene Martinez, Wen-Long Jin
2. 発表標題 Continuum car-following model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks
3. 学会等名 International Symposium on Transportation and Traffic Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Vickerman, R. (Ed.), Kentaro Wada, Toru Seo and Yasuhiro Shiomi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 4569
3. 書名 International Encyclopedia of Transportation, Volume 4, "Bottleneck" (pp.134-142) and "Flow Breakdown" (pp.143-153)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Kentaro Wada (和田健太郎) Web Page https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~wadaken/ 和田 健太郎 (Kentaro Wada) - マイポータル - researchmap https://researchmap.jp/wadaken/ 高速道路単路部の渋滞現象記述理論の実務への応用 (交通工学研究会 自主研究) https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~wadaken/JSTE_TFT.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

米国	カリフォルニア大学アーバイン校			
----	-----------------	--	--	--