

高速道路サグ部における 渋滞時捌け交通量低下現象の実証分析

山田 拓弥¹・和田 健太郎²・大口 敬³

¹ 非会員 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: ymd5656@iis.u-tokyo.ac.jp

² 正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

³ フェロー会員 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

高速道路サグ部では、渋滞発生後に捌け交通量が渋滞発生時に比べて低下する現象 (capacity drop) が起こることが知られている。この原因の一つとして、「渋滞巻き込まれ時間の増加によるドライバの追従意欲の低下」が挙げられている。本研究は、渋滞が解消していく過程のデータから「渋滞巻き込まれ時間の減少とともに捌け交通量が増加する」という関係の有無を分析することでこの仮説を再考した。そして、この関係 (負の相関) が有意に認められること、また、その影響は無視できるほど小さくないこと、を示唆する結果を得た。

Key Words: Sag, Capacity drop, Time in the queue, ETC2.0 probe-data, Detector data

1. はじめに

サグ (上り坂) およびトンネル部は、通常の単路部区間よりも相対的に容量 (この容量を“渋滞発生時容量”と呼ぶ) が著しく低くなりうる交通上のボトルネックである。また、一度ボトルネック上流に待ち行列が発生すると、捌け交通量がさらに低下すること (capacity drop) が知られている。この種のボトルネックは長年に渡り認識されてきたものの (Edie and Foote¹⁾, Koshi et al.²⁾, 現在でも我が国の最も典型的な交通渋滞発生の原因である。例えば、都市間高速道路の交通渋滞のうち、約 80% がサグ・上り坂 (60%) やトンネル入口 (20%) で生じている (Xing et al.³⁾。

Koshi et al.²⁾は、東名高速道路の秦野サグにおいて、渋滞列先頭での捌け交通量と、ドライバが渋滞流の中を通過してきた時間、すなわち、“渋滞巻き込まれ時間”との関連性を示した。これによると、渋滞発生から安定状態への遷移時間の長さに関わらず、自由流から渋滞流への遷移は、渋滞巻き込まれ時間が 10 分にわずかに至らない時点で終了するとしている (capacity drop の第一段階)。また、安定渋滞中において、渋滞の頭からの捌け交通量は“渋滞巻き込まれ時間”が大きくなるに連れてわずかながら減少していくことも示している (capacity drop の第二段階)。また、前者は自由流と渋滞流における追従態

度の変化に起因し、後者は渋滞巻き込まれ時間の増加によるドライバの追従意欲の低下に起因する、という仮説が提示されている。

以降も中谷ら⁴⁾, 村重ら⁵⁾, 最近では、立松・米川⁶⁾により、渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量の関係が分析されている。中谷らは、関越自動車道花園 IC 付近のサグを対象に、渋滞発生から安定状態までの遷移時間が渋滞巻き込まれ時間で 30 分以内である、としている。村重らは、ある特定の区分線形関数 (先の第一段階は傾き負の直線, 第二段階は定数) を仮定した回帰分析を通して、様々な単路部ボトルネック箇所の安定状態に至る時間を分析し、ボトルネックによってその時間が広くばらつくことを示している。立松・米川は、東名阪自動車道の 4 つの単路部ボトルネックに対して、(第一段階と第二段階の区別をせず) 線形回帰分析を行い、渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量にはそれほど強い相関が見られない、としている。

本研究の従来と異なる着眼点は、渋滞延伸 (渋滞巻き込まれ時間増加) 時と渋滞解消 (渋滞巻き込まれ時間減少) 時にデータを分け、特に後者の時間帯で渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量の関係进行分析することである。こうした分析を行う大きな理由は、渋滞延伸時、特に、渋滞発生直後の時間帯においては、渋滞継続時間 (渋滞開始からの時間) を介した渋滞巻き込まれ時間と捌け交通

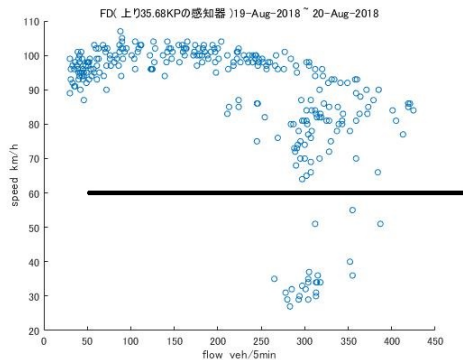


図 1 対象区間での Q-V 関係

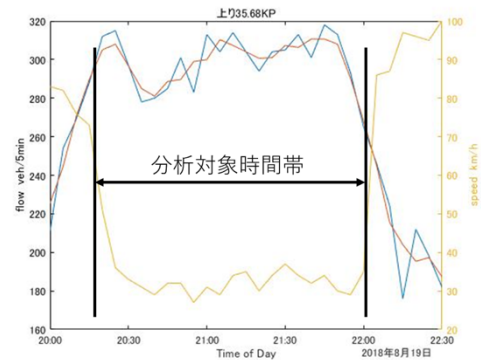


図 2 分析対象時間帯の設定

量の見かけ上の相関が含まれる可能性があるためである。つまり、渋滞開始直後には捌け交通量は（理由はなんであれ）安定状態まで時間とともに低下していくのは事実であり、また、（容量を超えた需要の到着により渋滞が発生した以上）渋滞は時間とともに伸びていく傾向にあるため、こうした時間帯を含むデータによる仮説の検証は適切でない可能性がある。また、ドライバの意欲低下という仮説は個人の心理/態度の問題であるので、それが正しいのであれば、渋滞延伸時か解消時かという交通流のマクロな状態とは無関係に成立していなければならない。以上の2つの理由から、本研究では、渋滞解消時を対象に「渋滞巻き込まれ時間の減少とともに捌け交通量が増加する」という関係が見られるのか、また、見られるとすればどの程度の定量的な影響があるのか、を実証的に分析する。

2. 利用データ

2.1 概要

本研究では、NEXCO 東日本管内の関越自動車道の高速道路上に設置されている ITS スポットに集約された ETC2.0 プローブ情報、車両感知器データの2つのデータを用いて分析を行った。ETC2.0 プローブには約 200m 毎に、運行ID、GPS時刻、緯度、経度、速度、上り下り情報、KP が記録されている。

車両感知器は関越自動車道に約 2km 毎に設置され、5分間隔で直前5分間の時間平均速度、交通量が記録されている。

具体的な分析対象地点は、交通集中による渋滞が頻発している下り線の高坂 SA 付近のサグ (33KP 付近) 区間とし、2018年8月に発生した4つの渋滞イベントを分析する。

2.2 利用データのクレンジング

ETC2.0 プローブデータにおいてエラー値と思われる

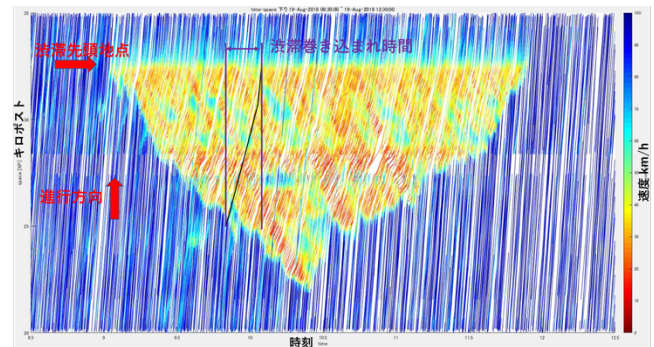


図 3 車両軌跡図による渋滞巻き込まれ時間の概念

ような値を除くために、増本ら⁴⁾に従い以下の処理を行った。

- ① 同一車両 (ID) 内で速度データが全て 0 [km/h] の場合、その車両情報内の全てのデータを除去
- ② 緯度経度、GPS 時刻から算出した速度情報とプローブデータ上の速度が 20 [km/h] 以上離れている場合除去
- ③ 速度が 255 [km/h] となっているデータを除去

2.3 渋滞巻き込まれ時間と渋滞発生後捌け交通量の算出方法

村重ら⁵⁾を参考に渋滞巻き込まれ時間と渋滞発生後捌け交通量を算出した。

(1) 渋滞判定

関越道の研究対象区間において Q-V 関係をプロットした結果を踏まえ (図 1)、本研究では 60 [km/h] を、渋滞流と自由流との境界を決定する基準値とした。また、この定義に基づいて交通量と速度を時系列にプロットした図を作成し (図 2)、分析対象時間帯として設定した。

(2) 渋滞日時・場所の特定

渋滞データからサグや上り坂、トンネル等の単路部ボトルネックを原因とする渋滞日時・場所を探し出し、その周辺に関してプローブデータから車両軌跡図を描い

表 1 プローブデータの例 1

Time	Speed	KP
'20180819204651'	87	40.627
'20180819204700'	87	40.398
'20180819204709'	84	40.179
'20180819204718'	81	39.965
'20180819204728'	53	39.764
'20180819204754'	19	39.56
'20180819204820'	30	39.358
'20180819204840'	50	39.145
'20180819204859'	25	38.948
'20180819204934'	33	38.741
'20180819205015'	30	38.543
'20180819205036'	36	38.342

表 2 プローブデータの例 2

	Time	Speed	KP
1	'20180819204931'	56	34.694
2	'20180819204945'	49	34.49
3	'20180819205000'	54	34.286
4	'20180819205014'	51	34.085
5	'20180819205028'	54	33.874
6	'20180819205041'	59	33.667
7	'20180819205054'	53	33.458
8	'20180819205106'	63	33.249
9	'20180819205117'	81	33.043

た(図 3)。これにより、渋滞の先頭地点が可視化される。また、対象とする渋滞が別の箇所・時間帯の渋滞との影響を受けていないこと、を確認した。なお、捌け交通量へのその他の影響要因として知られている明るさの影響を除いて考えるために、日の出日の入りの時間を跨がない時間を対象時間とした。

車両軌跡図から渋滞先頭地点と思わしき地点を特定した後、その場所から直近下流にある感知器を渋滞先頭地点と定義し、そこでの交通量を渋滞発生後捌け交通量とした。直近下流とする理由は、上流側(すなわち待ち行列の中)の感知器では、疎密波(stop-and-go wave 交通)の影響で交通量が大きく変動してしまうためである。つまり、より交通流が安定している地点を観測点として選択している。

(3) 渋滞巻き込まれ時間の算出

ある車両が(プローブの測定において)60km/hを2回連続で下回った場合、その下回った1回目から渋滞に巻き込まれたと判断した。例えば表1のようなプローブデータの場合、渋滞に入った場所は39.764KPで、その時刻は2019年8月19日20時47分28秒となる。

前節で指定した渋滞先頭地点直近下流の感知器(今回は33.49KP)を通過する時刻を渋滞抜け出し時刻とする。そのために、以下の計算を行った。指定した感知器

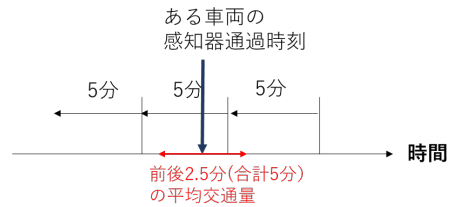


図 4 捌け交通量の計算方法

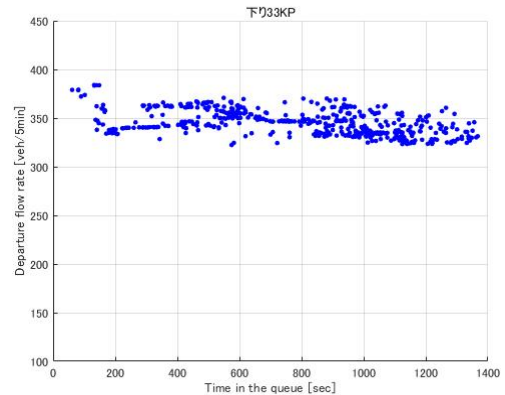


図 5 渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量

の直近時間前後での速度・時刻・位置を取得する。表2の場合、それは6行目と7行目に当たる。その2つ間での速度変化は線形(つまり等加速度)と仮定して、等加速度直線運動としてその中にある感知器を通過する時刻を算出した。そして求めた渋滞抜け出し時刻から渋滞に入った時刻を引くことで渋滞巻き込まれ時間とした。

(4) 渋滞発生後捌け交通量の算出

感知器は直前5分の交通量(全車線合計、大型車の乗用車換算係数1.7)を測定し、その時刻の交通量として算出している。車両の感知器通過時刻は、(3)で求めた渋滞抜け出し時刻と等しい。感知器通過時刻は秒単位でわかるため、その前後の時刻のデータを用いて秒単位での平均を取ることによって5分交通量を求め、渋滞発生後捌け交通量とした。

(5) 渋滞延伸時と解消時の区別

以上で算出した渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量の関係をプロットしたものが、図5である。このプロットには当然、渋滞延伸時のものと渋滞解消時のものが混在している。1章でも述べたように、本項では特に渋滞解消時の関係に注目する。そこで、渋滞巻き込まれ時間と渋滞を抜け出す時刻(指定感知器の通過時間)の関係(図6)から渋滞延伸中と解消中の境界時刻を定めた(以降では、渋滞延伸中のプロットを青、解消中のプロットを赤で示す)。

なお、図6を見ると、プロットが密になっている渋滞

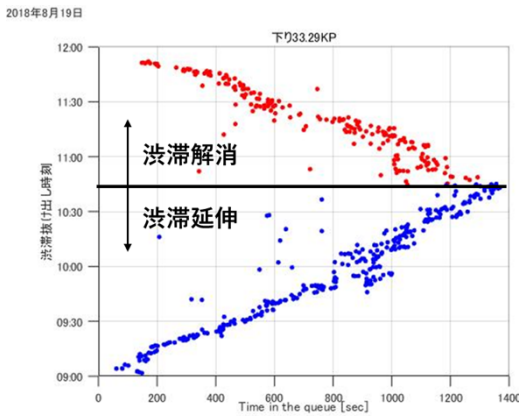


図 6 渋滞巻き込まれ時間と渋滞抜け出し時刻

表 3 分析対象日の結果のまとめ

		延伸時	解消時	渋滞継続時間[h]	最大渋滞長[km]
19日(日)	ρ	-0.5551	-0.6166	3	10
	p 値	1.5E-08	1.1E-08		
14日(火・お盆)	ρ	-0.6561	-0.4615	6	20
	p 値	5.3E-30	4.6E-07		
3日(金)	ρ	-0.336	-0.5472	6	20
	p 値	1.1E-05	3.5E-11		
2日(木)	ρ	-0.2291	-0.1366	3	7
	p 値	0.0494	0.1941		

巻き込まれ時間と疎になっている部分がある。こうしたデータの偏りは、プローブカーの混入率と待ち行列の延伸/解消速度に依存するが、これらは個々のドライバの追従挙動とは無関係である。従って、これらの影響をなくし、局所的な揺らぎの影響を抑えるために、各渋滞巻き込まれ時間毎の平均値を取り、代表値とした。

3 結果と考察

結果を図7~図10に示す。本稿の主眼は渋滞解消時の渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量の関係（赤色のプロット）であるが、参考のために渋滞延伸時の関係も示している。これらの図より、渋滞巻き込まれ時間の減少とともに捌け交通量が増加している様子がみてとれる。こうした（線形とは限らない）単調関係の強さをスピアマンの順位相関係数としてまとめたのが表3である。表中のp値は、相関が0よりも小さいという対立仮説に対しての帰無（無相関）仮説の検定結果を表す。有意水準5%とすると、8月2日を除いて、負の相関が認められる。8月2日については、渋滞規模が小さく渋滞巻き込まれ時間の最大値が小さいためか、そのような関係は統計的に有意ではない。

より定量的に渋滞巻き込まれ時間と捌け交通量の関係を見るために、線形回帰分析を行った。その結果が、図7~図10に示した直線（ピンク実線）である。当てはまりの悪い8月2日を除くと、回帰直線の傾きは、-0.00622

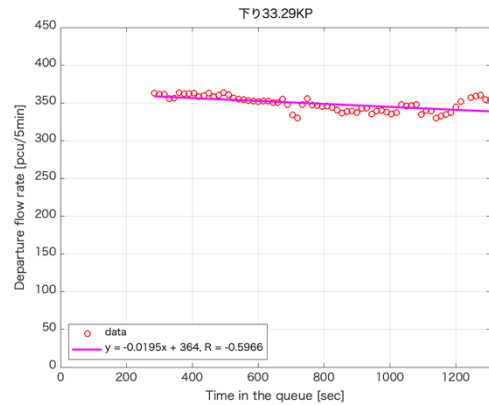
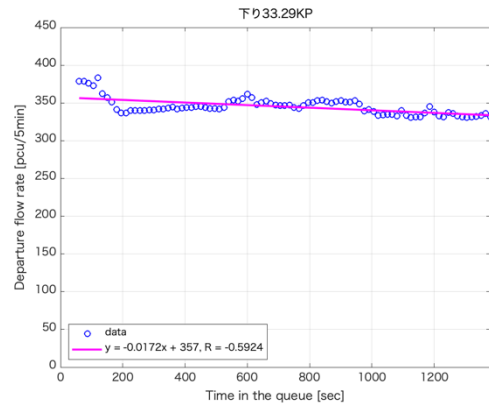


図 7 8/19 (日) 9時~12時の渋滞

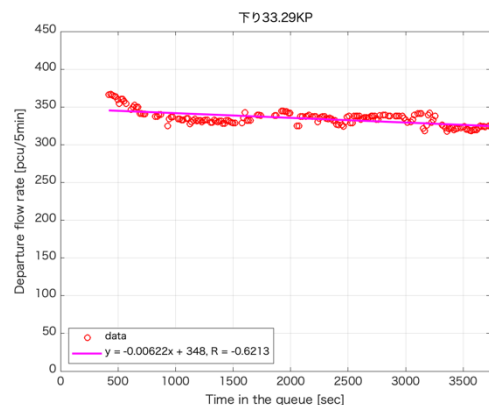
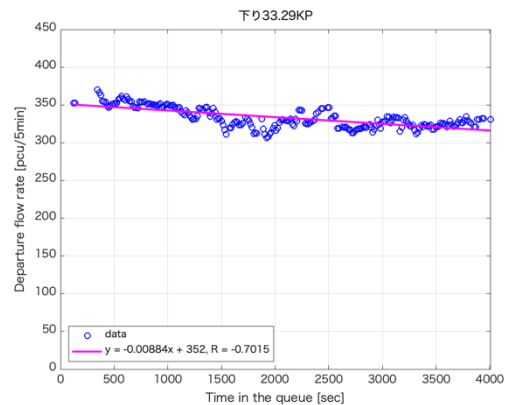


図 8 8/14 (火・お盆) 7時~13時の渋滞

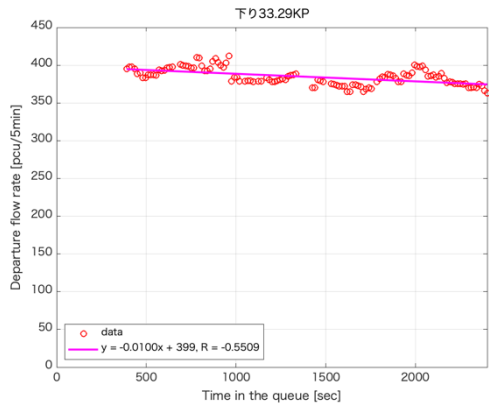
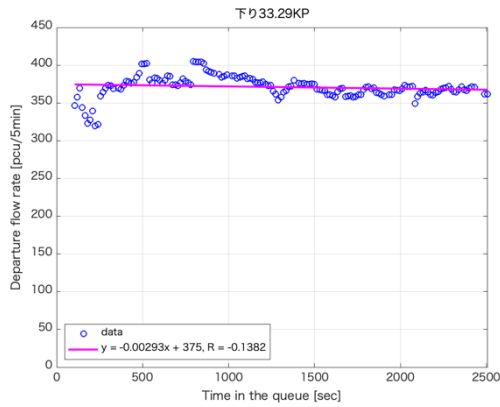


図 9 8/3 (金) 8時半~14時の渋滞

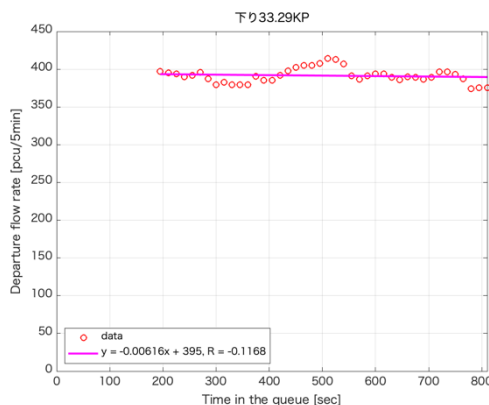
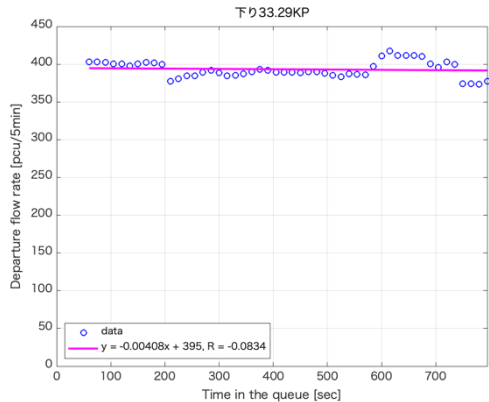


図 10 8/2 (木) 9時半~12時半の渋滞

~0.0195 となっている。これは、10分渋滞巻き込まれ時間が変化(渋滞中の平均速度を 30 [km/時] とすると 5 [km] の渋滞長の変化)すると一時間一車線換算捌け交通量で 10~50 台程度の変化が生じることを意味する。例えば、capacity drop の第一段階で捌け交通量が 1500 [台/時/車線] となったとすると、そこから 10 分間の渋滞巻き込まれ時間の増加で 1%~数%捌け交通量が低下することになり、無視できる影響ではないと考えられる。

4 おわりに

本研究は、渋滞が解消していく過程のデータから「渋滞巻き込まれ時間の減少とともに捌け交通量が増加する」という関係を分析することで、capacity drop 現象の第二段階(安定状態における捌け交通量の低下)の要因を「渋滞巻き込まれ時間の増加によるドライバの追従意欲の低下」とする仮説を再考した。そして、その関係(負の相関)が有意に認められること、また、その影響は無視できるほど小さくないこと、を示唆する結果を得た。今後の課題としては、分析対象地点、渋滞イベントを増やして分析精度を高めることが挙げられる。

なお、本稿では、capacity drop 現象の第一段階(自由流から渋滞安定状態に至るまでの捌け交通量の低下)については分析対象外である。この現象については、近年、交通流理論に基づく新たな仮説が提案され、その実データによる検証も始まっている。こうした研究の進展については、Jin⁸⁾、和田ら⁹⁾¹¹⁾、Wada et al.¹⁰⁾を参照されたい。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費・基盤研究 C (課題番号：19K04637) 助成を受けた研究の一部である。本研究を進めるにあたり、(株) 高速道路総合技術研究所より貴重なデータをご提供頂いた。また、同研究所の邢健氏には、サグ部の交通渋滞現象の分析について広くアドバイス頂いた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Edie, L. C. and Foote, R. S.: Traffic flow in tunnels, *Highway Research Board Proceedings*, Vol. 37, pp. 334-344, 1958.
- 2) Koshi, M., Kuwahara, M. and Akahane, H.: Capacity of sags and tunnels on Japanese motorways, *ITE Journal*, Vol.62, No.5, pp.17-22, 1992.
- 3) Xing, J., Muramatsu, E. and Harayama, T.: Balance lane use with VMS to mitigate motorway traffic congestion, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol.12, No.1, pp.26-35, 2014.
- 4) 中谷了, 皆方忠雄, 佐藤久長, 石川昌: 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集, pp.173-176, 2005.

- 5) 村重至康, 野中康弘, 山口孝: 渋滞発生後捌け交通量に及ぼす渋滞巻き込まれ時間の影響に関する一考察, 第 30 回交通工学研究発表会論文集, pp.181-184, 2010.
- 6) 立松和憲, 米川英雄: 渋滞先頭地点の遷移に関する分析, 交通工学論文集, Vol.5, No. 2 (特集号 B), pp.B_65-B_74, 2019.
- 7) 増本裕幸, 宇野伸宏, 山崎浩気, 亀岡弘之, 山本浩司, 山本隆: ETC2.0 プローブ情報を用いた都市間高速道路における速度低下に関する分析, 交通工学論文集, Vol.3, No.4 (特集号 A), pp.A_74-A_83, 2017.
- 8) Jin, W.L.: Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks. *Transportation Research Part B*, Vol.107, 41–56, 2018.
- 9) 和田健太郎, Irene Martinez, Wen-Long Jin: 高速道路サグのボトルネック現象を表現する連続体追従モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.57, 08-03 (CD-ROM), 2018.
- 10) Wada, K., Martinez, Irene, Jin, W-L: Continuumcar-following model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part C*, In Press.
- 11) 和田健太郎, 邢健, 大口敬: 連続体交通流理論に基づく高速道路サグ部における Capacity Drop 現象の実証分析, 第 17 回 ITS シンポジウム 2019 予稿集, 4-A-02, 2019.