

# 車線減区間における 確率的な渋滞現象に関する分析

加藤 大知<sup>1</sup>・後藤 梓<sup>2</sup>・中村 英樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 C1-2 (651))  
E-mail: katou.daichi@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 元・名古屋大学大学院助教 環境学研究科 都市環境学専攻  
現・国土技術政策総合研究所高度道路交通システム研究室 研究官  
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)  
E-mail: goto-a92uj@mlit.go.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 都市環境学専攻  
E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

近年、高速道路における渋滞現象は確率的に捉えられるようになり、発生確率の推定が行われてきたが、ボトルネックとなる要因別の車線利用特性などについては未だ不明確な点が多く、より詳細な分析が必要である。そこで本研究では、ボトルネック要因が明確な車線減区間を対象として車線別に車両感知器データの分析を行うことで、当該区間での渋滞発生、渋滞後捌け交通の特性を明らかにすることを目的とする。東名阪自動車道下り四日市 IC 下流部を対象として、各車線の臨界速度を設定することで渋滞判定を行ったところ、対象区間では絞り込まれる車線の交通量がその上流部で減少するため他の車線よりも渋滞発生が遅れることなど、車線別の現象特性の相違が明らかになった。さらに、これらには大型車混入率や平日休日などの違いが影響していることが示唆された。これらを踏まえて、渋滞発生確率モデルの推定を行うとともに、渋滞後捌け交通量についても車線別の特性を分析した。

**Keywords:** 都市間高速道路, 交通容量, 車線減区間, 渋滞発生時交通量, 渋滞発生確率, 渋滞後捌け交通量

## 1. はじめに

高速道路の渋滞を予測するために、交通容量とその変動特性を理解することが極めて重要であることは言うまでもない。特に今世紀に入ってからは、従来確定的と考えられてきた交通容量が、車群形成や個々の車両の微視的な挙動の影響により、確率的に変動するものと考えられるようになり、渋滞発生確率の推定が様々なボトルネックを対象として行われている<sup>1)2)3)</sup>。

その例として、Shawky and Nakamura<sup>4)</sup>は都市高速道路の渋滞発生確率の推定を、Ma et al.<sup>5)</sup>は都市間高速道路の渋滞発生確率と渋滞後捌け交通量モデルの推定を行っている。また、小林ら<sup>6)</sup>は、渋滞発生確率に対する様々な影響要因を考慮した一般化モデルを推定している。しかしながら、これらのモデルを用いた交通流シミュレーションでは交通状況の再現性は現時点において必ずしも十分でなく、各種のボトルネックにおける渋滞現象のより

精緻な分析が必要である。その一つとして、ボトルネック要因が明確な車線減区間においても、車線別の利用特性や交通容量に着目した研究は少ない。車線利用を適切に促すことが交通容量や交通流のサービス水準の向上に繋がる可能性を考えると、その重要性は明らかである。

そこで本研究では、都市間高速道路の車線減区間のボトルネックについて、車両感知器によって観測された車線別の交通量、速度のデータを用いて詳細に分析を行い、渋滞の現象特性を把握することを目的とする。このために、渋滞発生交通量の分布特性や渋滞発生確率、また渋滞への影響要因として車線利用率、大型車混入率についても併せて分析する。これらに加えて、車線減区間であることを考慮して、渋滞後の捌け交通についてもその特性を把握する。またすべての分析において、平日と休日の比較を行い、それぞれの特性の相違を把握する。

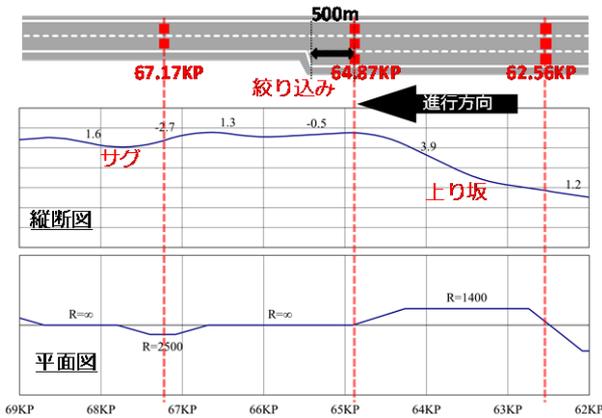


図-1 分析対象区間の幾何構造と車両感知器の位置

2. 分析方法

(1) 分析対象区間およびデータ

本稿では、図-1 に示す東名阪自動車道下り四日市 IC 下流区間を対象に分析を行う。東名阪自動車道は愛知県西部と三重県を結ぶ都市間高速道路であり、渋滞頻発区間が多く存在する。図-1 に示す本研究の対象区間はその一つであり、当該区間の構造には、上り坂に続いて第一車線の絞り込み、さらにサグがあるといった特徴がある。

分析データは 2014~2015 年の 2 年分の車両感知器データである。これには、5 分間集計の車線別交通量と平均速度が記録されている。このうち、事故や故障車、交通規制などのある日は除外する。また天候による交通容量の影響<sup>3)</sup>を排除するため、晴天日のデータのみを使用する。

なお、対象区間は特に平日に大型車混入率が高く、これが渋滞に与える影響も考えられる。本研究では、大型車換算係数を 1.5 として台数の単位を pcu に換算して分析を行う。

(2) 対象区間のボトルネックの特定

まず、連続する地点の車両感知器データを用いて、各地点の5分間平均速度を速度階層別に色分けして表示した図(通称：速度コンター図)を用いて、ボトルネックとなっている箇所を特定する。例として、2014年2月17日(月)の速度コンター図(横断面平均)を図-2に示す。この図は横軸に位置(KP)、縦軸に時刻をとり、色で速度階層を表現している。色が赤に近いところで渋滞が発生していると考えられる。この例では、6:50頃に第一車線減少箇所から500m上流の64.87KPで速度低下が見られ、渋滞が発生していることがわかる。64.87KPは図-1に示すように、上流に上り坂、下流に車線減少があり、これが渋滞の原因であると考えられる。

また、67.17KP下流にはサグがあり、これが原因となり67.17KPから発生する渋滞も見られた。しかし今回は、

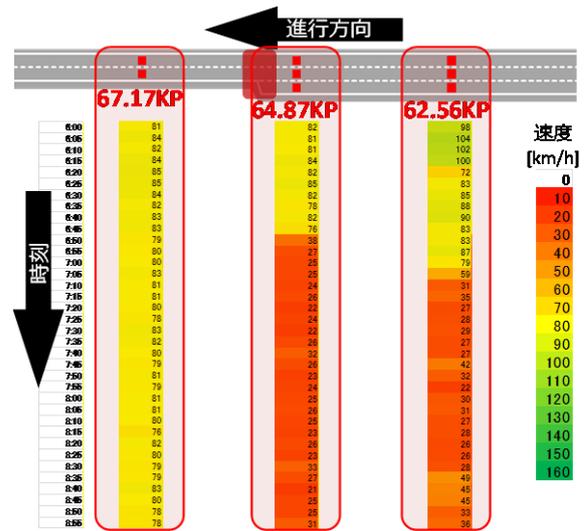


図-2 5分間平均速度の時空間変化(通称・コンター図)

車線減区間における渋滞の特徴分析を目的とするため、67.17KPから発生する渋滞は分析対象外とし、64.87KPの車両感知器データを用いて、このボトルネックの渋滞特性について分析する。

(3) 渋滞発生判定方法

Shawky and Nakamura<sup>4)</sup>などの既往研究では、主に交通量-平均速度(Q-V)図から臨界速度を読み取り、速度がそれを15分以上の間下回った場合を渋滞と判定している。しかしこの判定方法の場合、渋滞を判定する上で重要と考えられる速度の低下量を考慮できない。そのため、本研究では速度低下量も考慮に加えた判定方法を用いる。

本研究における判定は加藤ら<sup>7)</sup>と同様に、臨界速度を下回る状態が15分以上継続し、かつ臨界速度前後の速度低下量が閾値以上であることを判定基準とする。

なお、臨界速度および速度低下量の閾値はボトルネックによって異なり、今回の対象区間では、臨界速度と速度低下量に表-1に示すような閾値を設定することにより、適切な判定ができることがわかった。なお、渋滞後10分間、速度が臨界速度を上回った状態が継続する場合に渋滞回復と判定する。

以上の判定方法により抽出された渋滞件数を、表-2に示す。横断面全体での判定により抽出された渋滞件数は平日で36件、休日で74件となり、休日の渋滞のほうが多いことがわかる。また、車線ごとの渋滞件数はそれぞれ多少のばらつきがある。特に第一車線の平日の渋滞件数は横断面と比較して10件少なく、これは横断面としては渋滞として判定されるものの、第一車線は渋滞していないケースがあることを意味している。そのような場合の例として、2014年3月19日(水)の車線別のQ-V図を図-3に示す。第一車線の交通量が20~40[pcu/5min]程度と極端に少ないのは、これが絞り込まれる車線であり、利用を避

表-1 渋滞判定に用いる臨界速度と速度低下量の閾値

		臨界速度[km/h]	速度低下量[km/h]
横断面合計		70	8
車線別	第一車線	60	5
	第二車線	65	10
	追越車線	70	10

表-2 抽出された渋滞件数

	横断面	第一車線	第二車線	追越車線
平日	36	26	33	33
休日	74	70	74	75

けるドライバーが多いためであると考えられる。

(4) 渋滞発生確率モデルの推定方法

本研究では既往研究<sup>1)</sup>などに倣い、確率的な渋滞発生を最尤推定法とPLM法の2つの方法を用いて推定する。

最尤推定法は、渋滞発生確率の分布が式(1)のようにワイブル分布に従うと仮定し、式(2)の対数尤度関数を最大化することで、渋滞発生確率を推定するものである。

$$F(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad (1)$$

$$L = \prod_{i=1}^n f(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F(q_i)]^{1-\delta_i} \quad (2)$$

ここに、 $F(q_i)$  : 渋滞発生確率、 $\alpha$  : 形状パラメータ、 $\beta$  : 尺度パラメータ、 $f(q_i)$  : 渋滞発生確率の確率密度分布、 $n$  : サンプル数、 $q_i$  : 時間*i*における交通量、 $\delta_i$  :  $q_i$ が渋滞発生時交通量(Breakdown Flow; BDF)のとき1、非渋滞時の交通量のとき0となるダミー変数、である。

また、PLM法は非渋滞時交通量と渋滞発生時交通量(BDF)から、式(3)に示す生存確率を推定する方法である。ここでは、生存確率における時間は交通量に、死亡確率は渋滞発生に置き換えられている。

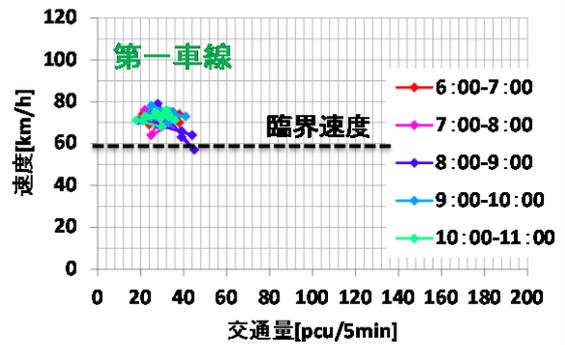
PLM法によって推定された渋滞発生確率は、観測データに基づくものであり信頼性が高いため、最尤推定法の結果の信頼性を検証するために用いている。

$$F(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i} \quad (3)$$

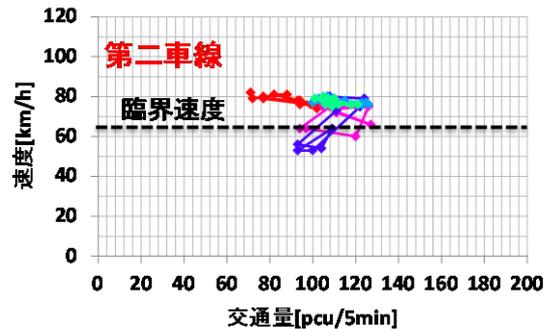
ここに、 $F(q)$  : 渋滞発生確率、 $q_i$  : 時間*i*における交通量、 $k_i$  :  $q \geq q_i$ となる交通量実現頻度、 $d_i$  : 交通量 $q_i$ のときの渋滞発生頻度、である。

3. 横断面全体での渋滞発生時の交通特性

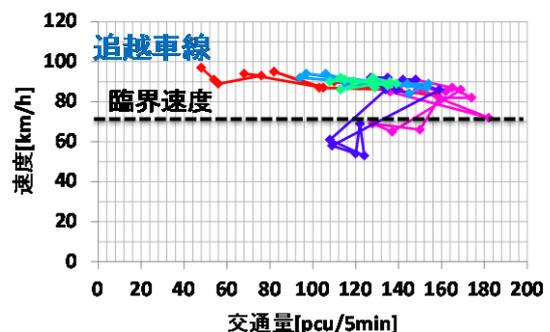
本章では横断面全体での渋滞発生判定の結果を用いて、まず、渋滞発生時交通量(BDF)および渋滞発生確率



(a)第一車線



(b)第二車線



(c)追越車線

図-3 交通量-平均速度(Q-V 図)

について分析する。そして、渋滞発生の要因として、渋滞発生前後の大型車混入率、車線利用率について考察を行う。

(1) 横断面全体での渋滞発生 5 分前交通量

本研究ではBDFとして、渋滞発生5分前交通量を適用する。これは、渋滞判定した後、発生時刻の前後の交通量を確認したところ、ほぼすべての渋滞について発生時刻の5分前で最大値となり、最も渋滞に大きな影響を及ぼす交通量であると考えられるためである。また車両感知器は、車線減地点から500m上流に位置し、感知器を通過した車両が、車線減地点に到着するまでの時間や、渋滞列が感知器の位置まで到達する時間を考慮した結果である。

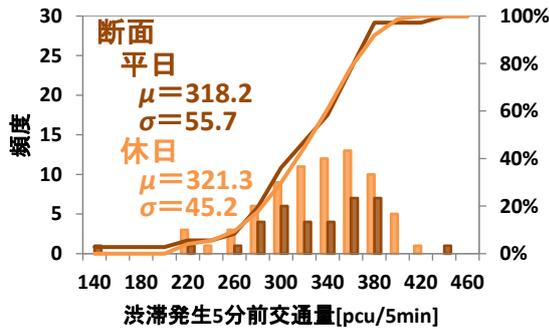


図-4 渋滞発生 5 分前交通量(横断面全体)

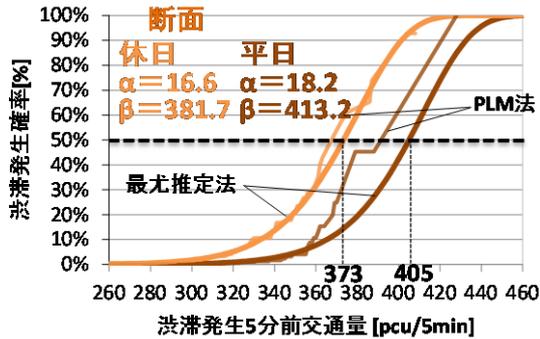


図-5 渋滞発生確率(横断面全体)

図-4 に、横断面の渋滞発生 5 分前交通量の累積分布を平日、休日別に示す。平均値は平日、休日でそれぞれ 318, 321[pcu/5min]である。一般的に平日と休日のドライバー特性を考慮すると、平日のほうが運転に慣れたドライバーが多いため、BDFが大きくなると言われることが多いが、対象区間ではこれらに大きな差がないことが分かった。

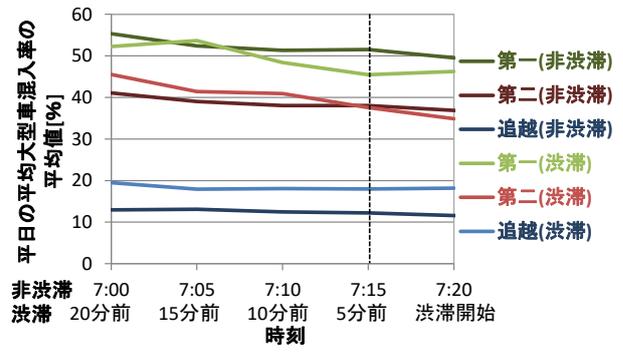
(2) 横断面全体での渋滞発生確率

図-5 は、平日、休日別の横断面の渋滞発生確率の推定結果である。休日に関しては、最尤推定法の結果と PLM 法の結果が概ね一致しており、最尤推定法による結果の信頼性は高い。しかし平日については乖離が生じており、最尤推定法による推定結果の信頼性が十分でない可能性があることに注意が必要である。最尤推定法に基づく渋滞発生確率が 50%のときの渋滞発生 5 分前交通量を比較すると、平日、休日それぞれ 405, 373[pcu/5min]となることから、休日のほうが 30[pcu/5min]程度少ない交通量でも渋滞が発生しやすいことがわかる。

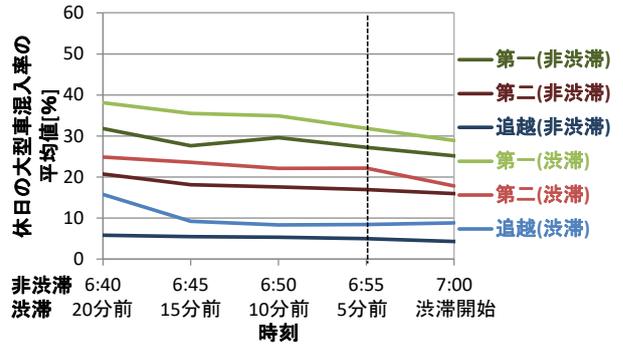
図-4 の渋滞発生 5 分前交通量では平日、休日ではほぼ差がないにもかかわらず、図-5 の渋滞発生確率が平日、休日異なる結果となった原因は、平日には高い交通量でも渋滞しない場合が多いためであると考えられる。

(3) 大型車混入率

図-6 は、(a)平日と(b)休日の渋滞発生時、非渋滞時別の大型車混入率の平均値の時間変化を示す。渋滞時の横



(a)平日



(b)休日

図-6 大型車混入率の時間変化

軸は、すべての渋滞件数について渋滞開始 20 分前を基準に、5 分毎の時刻を使用した。非渋滞時の横軸は、渋滞判定の結果、平日は 7:20、休日は 7:00 に渋滞開始となる件数が最も多かったため、その時刻に合わせた。また、図中の破線は渋滞発生への影響が最も大きいと考えられる渋滞発生 5 分前の時刻をそれぞれ示している。まず、平日と休日を比較すると、渋滞/非渋滞を問わず、すべての車線において平日のほうが大型車混入率が高いことがわかる。また、平日、休日ともに、追越車線でも最低、第二車線、第一車線の順に値が上昇することもわかる。

渋滞時と非渋滞時を比較すると、平日、休日ともに概ね渋滞時の大型車混入率のほうが高くなっている。これより、大型車が渋滞へ影響を及ぼしていることが考えられる。

(4) 車線利用率

図-7 は、朝ピークの渋滞時と非渋滞時の交通量と車線利用率の関係を示している。第一車線では非渋滞時で 10%程度と極端に低く、渋滞発生後は第一車線の交通量が増えるため、30%程度まで高くなる。第二車線では、非渋滞時、交通量の増加とともに車線利用率が低くなり、渋滞発生後はさらに低くなる。そして追越車線では非渋滞時、交通量の増加とともに車線利用率が上昇し、渋滞発生後は若干低下する。

図-8 は、(a)平日(b)休日の渋滞発生時、非渋滞時別の車線利用率の平均値の時間変化を示す。横軸に関しては、

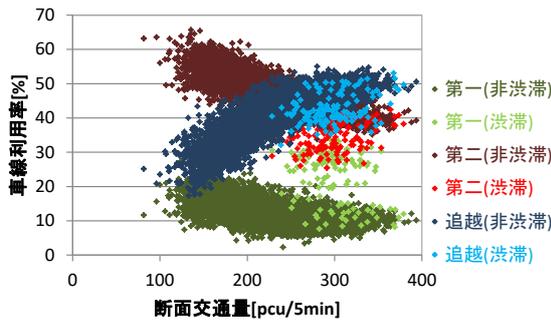
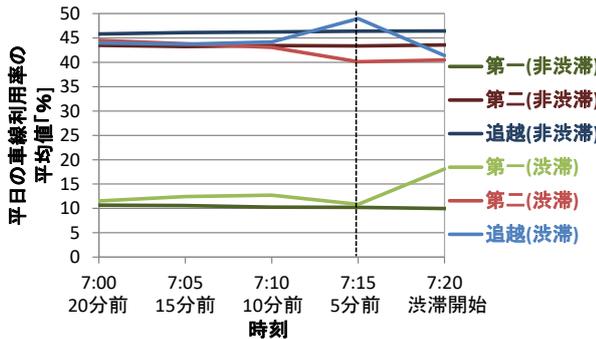
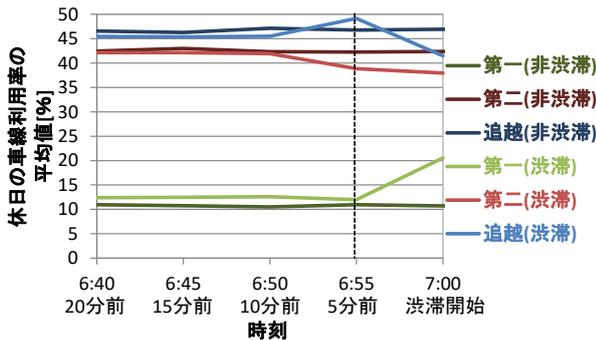


図-7 交通量と車線利用率の関係



(a)平日



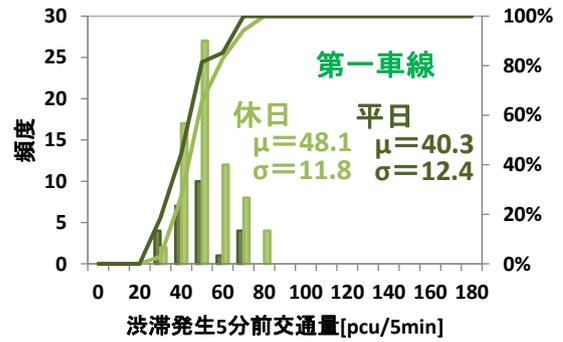
(b)休日

図-8 車線利用率の時間変化

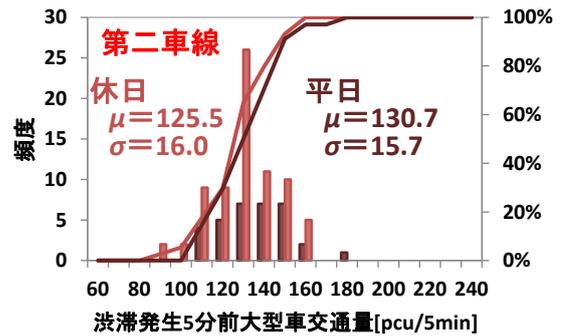
は前項と同様である。車線利用に関しては平日と休日では大きな差は見られなかった。渋滞時に着目すると、渋滞発生5分前に第二車線の車線利用率が減少し、追越車線で増加していることが分かる。これは、渋滞しそうな状況に気付いたドライバーが先を急いだ結果、第二車線から追越車線へ車線変更したためだと考えられる。また、渋滞発生時は追越車線の利用率が低くなり、逆に第一車線は高くなっていることが分かる。これは渋滞発生後、追越車線、第二車線から、あまり利用されていない第一車線へ車両が流れているためであると考えられる。

#### 4. 車線別の渋滞特性

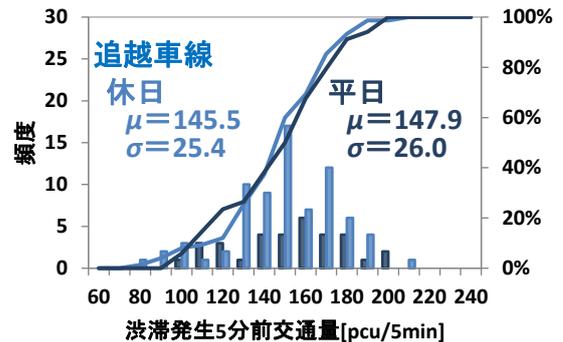
3章で断面渋滞発生時の渋滞特性を分析した結果、車線ごとに利用の特性が異なることが分かった。そこで本



(a)第一車線



(b)第二車線



(c)追越車線

図-9 渋滞発生5分前交通量(車線別)

章では車線別の渋滞判定の結果より、各車線の渋滞発生5分前交通量、および渋滞発生確率について分析を行う。

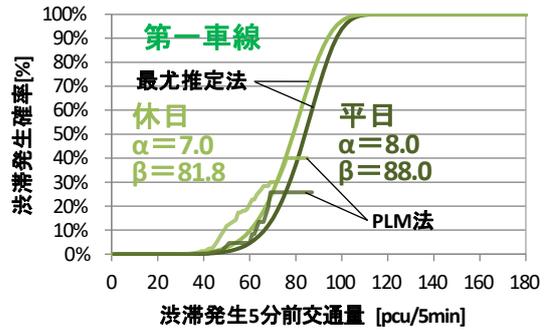
##### (1) 車線別の渋滞発生5分前交通量

図-9(a),(b),(c)に、それぞれ第一車線、第二車線、追越車線の渋滞発生5分前交通量の累積分布を示す。平均値について、平日、休日と比較すると、第二車線、追越車線については僅かながら平日のほうが大きい。第一車線については休日のほうが8[pcu/5min]程度大きい。検定の結果、第一車線のみ有意な差(p値=0.067)があることが分かった。つまり、第一車線については休日のほうが上手く利用できており、逆に平日のドライバーは絞り込みを把握しており第一車線の利用を避けていることが考

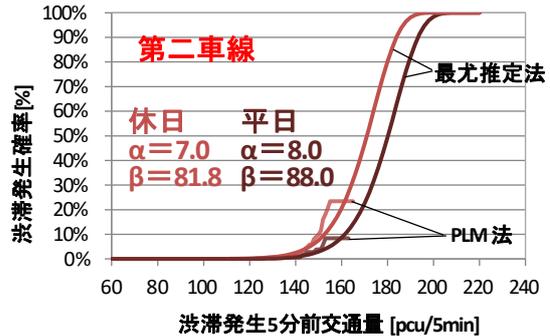
えられる。このことが、休日の断面での渋滞発生5分前交通量の増加に繋がり、3章(1)で述べた平日のほうがBDFが大きくなるという一般的な特性とは異なる結果が生じた可能性があると考えられる。

(2) 車線別の渋滞発生確率

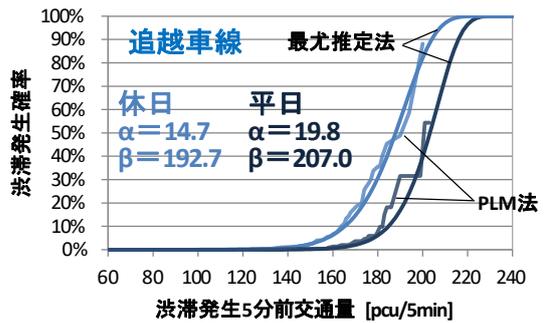
図-10(a),(b),(c)に、それぞれ第一車線、第二車線、追越車線の渋滞発生確率の推定結果を示す。追越車線については最尤推定法と PLM 法の推定結果が概ね一致しているため、最尤推定法の推定結果の信頼性は高いが、第一車線、第二車線については、実績データが少ないことから、十分な信頼性があるとは言い難い。いずれの車線においても、休日のほうが渋滞発生確率が高くなる結果となり、3章(2)の横断面全体でみた場合と同様のことが言える。



(a)第一車線



(b)第二車線



(c)追越車線

図-10 渋滞発生確率(車線別)

5. 渋滞中の捌け交通量に関する分析

(1) 横断面全体の渋滞後捌け交通量(DCF)

図-11 に、横断面でみた渋滞後捌け交通量の平均値の時間変化を示す。この図より、渋滞開始から20分間は平日、休日ともに渋滞後捌け交通量(Discharge Flow; DCF)が低下していることが分かる。これは渋滞に巻き込まれたドライバーの追従意欲の低下が及ぼした結果であると推測できる。渋滞開始20分後以降については、休日は収束しながらもさらに徐々に低下していくのに対して、平日はむしろ徐々に増加する傾向がみられる。この差は、平日の朝ピーク時には先を急ぐドライバーが多く、休日はレジャー目的交通主体のため急ぐドライバーが少ないことに起因するものと考えられる。

(2) 車線別の渋滞後捌け交通量

渋滞中の車線利用特性を把握するために、車線別の渋滞後捌け交通量(DCF)を図-12 に示す。追越車線、第二車線については、横断面全体で見た場合と同様に、渋滞開始後の20分間は捌け交通量が低下しているのに対し、第一車線では増加していることが分かる。これは、渋滞開始とともに追越車線、第二車線から、交通量の少ない第一車線へ車両が流れているためである。

6. おわりに

本研究では、車線減区間における渋滞発生の特性を把握するために、第一車線の絞り込みがある東名阪自動車道下り四日市 IC 下流区間を対象に分析を行った。

平日と休日と比較することにより、横断面全体での渋

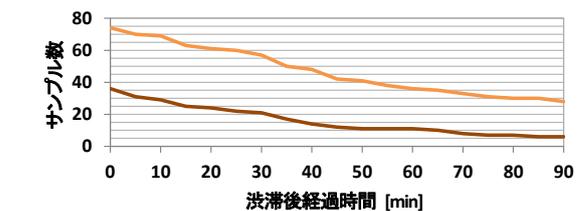
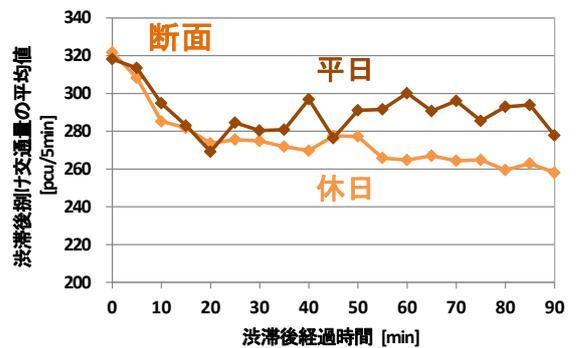


図-11 渋滞後捌け交通量とサンプル数(横断面全体)

滞発生 5 分前交通量に差がなく、一般的に知られている特性とは異なることが分かった。その理由として、第一車線の渋滞発生 5 分前交通量(BDF)が平日より休日のほうが大きいことが可能性として挙げられた。また、横断面の渋滞発生 5 分前交通量に差がないにもかかわらず、渋滞発生確率に関しては休日よりも平日のほうが渋滞し易く、50%の場合で 30[pcu/5min]程度の差があることが分かった。また、渋滞発生 5 分前の車線利用率の変化として、第二車線から追越車線への車線変更があることが推測された。渋滞後捌け交通量(DCF)に関して平日と休日と比較した結果、渋滞開始から 20 分程度まで低下することは共通であるが、その後は平日のほうが捌け交通量が大きいことがわかった。車線別でみると、追越車線、第二車線は渋滞開始時から逡減するのに対し、第一車線では増加し、渋滞後は第一車線へ車両が流れていることが推測された。

本稿では、車線利用特性について、単一のボトルネックのみを対象に分析を行い、主に平日と休日の比較を行った。しかし、車線減区間において、より効率的な車線運用を考える場合、他の車線減区間を持つボトルネックとの比較分析を行う必要がある。また、今回は大型車の乗用車換算係数を 1.5 と仮定して分析を行ったが、この値によっても結果が異なってくる可能性も否定できない。これらの事項などについて、さらに分析を進めて行くことが、今後の課題である。

謝辞

本研究に実施に際して、データの提供など数々の便宜を図っていただいた、中日本高速道路株式会社名古屋支社の関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

1) Brion, W., Geistefeldt, J., Regler, M.: Reliability of Freeway Traffic Flow :A stochastic Concept of Capacity, Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.125-144, 2005.  
 2) Jian Xing・佐藤久長・高橋秀喜・吉川良一：高速道路のボトルネック交通容量分布及び渋滞発生確率の推定, 第26回交通工学研究会発表会論文集, pp.49-52, CD-ROM,

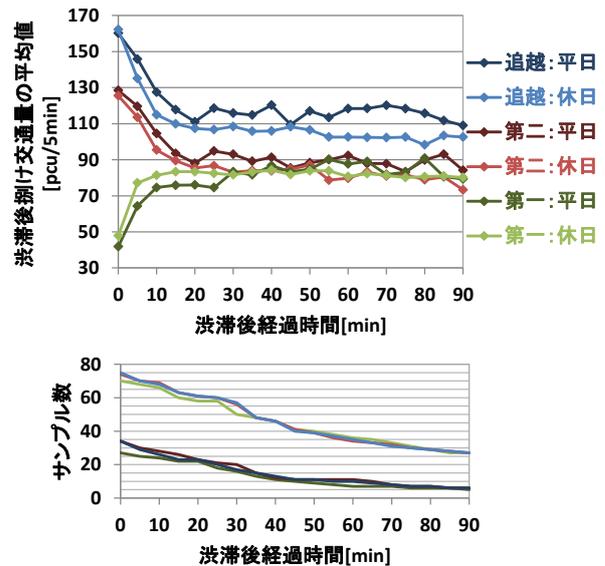


図-12 渋滞後捌け交通量とサンプル数(車線別)

2006.  
 3) Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M. and Morita, H.: Does weather affect highway capacity, Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, 2006.  
 4) Shawky, M. and Nakamura, H.: Characteristics of Breakdown Phenomena in Japan Urban Expressway Merging Sections, 86th TRB Annual Meeting, 10 pages, CD-ROM, 2007.  
 5) Ma, D., Nakamura, H. and Asano, M.: Stochastic Modeling on the Relationship between Breakdown and Discharge Flow Rates at Intercity Expressway Bottlenecks, Proceedings of Infrastructure Planning, No.47, 8 pages in CD-ROM, 2013.  
 6) 小林正人・中村英樹・浅野美帆・米川英雄：都市間高速道路におけるボトルネック交通容量の確率的特性分析, 第31回交通工学研究会論文集, pp.133-138, CD-ROM, 2011.  
 7) 加藤大知・後藤梓・中村英樹：都市高速道路における渋滞の確率的特性に関する分析, 第31回交通工学研究会論文集, pp.33-40, CD-ROM, 2016.

(2017. 4.28受付)

AN ANALYSIS ON STOCHASTIC CHARACTERISTICS OF BREAKDOWN AT A MOTORWAY LANE-DROP SECTION

Daichi KATO, Azusa GOTO and Hideki NAKAMURA