

都市間高速道路における 渋滞発生時の交通現象に関する分析

酒井 克典¹・下川 澄雄²・吉岡 慶祐³

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科交通システム工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:cska17008@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (同上)

E-mail:shimokawa.sumio@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学助手 理工学部交通システム工学科 (同上)

E-mail:yoshioka.keisuke@nihon-u.ac.jp

都市間高速道路のボトルネックにおける渋滞発生時の交通現象を扱った研究はこれまでも数多く行われてきた。この中で、渋滞発生時の交通状態量を表現しようとしたものとして、車群特性の観点から分析した研究があり、渋滞を発生させる車群に共通する特性を明らかにしている。しかし、この結果は同様の車群でも必ず渋滞が発生することを示しているわけではない。これは、車群だけでは個々の車両挙動特性が渋滞発生の原因となることを説明できない可能性があることを意味するものと考えられる。

そこで本研究では、都市間高速道路のボトルネックにおける渋滞発生時の交通現象について、車群に代わる新たな表現方法として、「マス」という概念を提案した。さらにこれを開越自動車道上り高坂サグで観測した車両挙動データに適用したところ、渋滞発生時の交通現象を表現できる可能性を示唆する結果が得られた。

Key Words : Expressway, Traffic Congestion, Bottleneck, Breakdown Flow Rate

1. はじめに

都市間高速道路の同一ボトルネック（以降、「BN」という）において、渋滞発生時の交通容量（以降、「BDF」という）は変動することが知られている。既往研究では渋滞の発生を確率的な現象と捉え、渋滞発生確率の推定を試みている。BDFが変動する要因については、天候や明暗などの交通環境や、休日ドライバーなど運転者特性の違いなどが既往研究で指摘されている。これに加え、大型車などの低速車両といった個々の車両挙動の影響も考えられるが、これを実証的に説明している研究はない。

一方、渋滞の発生過程に関する既往研究では、交通量の増加によって車群が形成され、減速波を後続車群に伝播させることに着目し、渋滞を発生させる車群を特定しようとした研究もみられる。しかし、同様の車群でも必ず渋滞は発生するわけではなく、とくに低速車両や減速車両が渋滞の要因となる場合などにおいては、車群の車頭時間やその大きさだけでは渋滞の発生をうまく説明できないケースも考えられる。

そこで、本研究では都市間高速道路のBNにおいて、

大型車の低速車両が渋滞の発生要因となる状況において、車群に代わる新たな表現方法を用いて、渋滞を発生させる車両挙動とさせない車両挙動とを比較することにより、渋滞発生時の交通現象を説明する新たな知見を得ようとするものである。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

岡村ら¹⁾は同一BNにおいてもBDFは一定ではなくばらつきが大きいことを示唆し、BDFに応じた渋滞発生確率を推定している。このBDFが変動する要因については、平休日や時間帯の違いを挙げている。しかし、この研究は車両感知器データを用いて渋滞を確率的に表現したに過ぎず、個々の車両挙動特性がBDFの変動に与える影響を明らかにしたものではない。

一方、渋滞発生時の車群特性に関する既往研究として、大口ら²⁾は追越車線において、平均車頭時間が1.5秒程度かつ大きな車群が到着すると渋滞を発生させる傾向にあることを示唆している。また、邢ら³⁾は追越車線において、車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数が

概ね20台以上の車群が到着すると減速波が発生し、その後1分間の交通量が30台/分以上、3分間の交通量が80台/3分以上の場合に高確率で減速波が延伸することを明らかにしている。しかし、いずれの研究も、渋滞が発生する際に共通する車群特性を示しているものであり、同様の車群において必ず渋滞が発生することを示すものではない。従って、単純に追越車線の車群に着目しても渋滞の発生をうまく説明できない場合も存在する。

この原因の一つとして、追越車線の車群形成には走行車線のある特定車両(低速車両や減速車両などの)の存在が車群形成や車群挙動特性に影響を及ぼしていることが推察される。そこで、本研究では渋滞の発生が走行車線における低速車両の存在に起因しているとの視点から、単に車群のみに着目するのではなく、渋滞を発生させた断面全体を1つのユニットとして表現することを試みる。さらに、渋滞を発生させたユニットを特定するとともに、ユニットを構成する車両の挙動特性について、渋滞を発生させないユニットと比較することにより、低速車両が要因となる渋滞発生時の交通現象を説明しようとするものである。

3. 分析対象地点とBDF特性

(1) 分析対象地点

本研究の分析対象地点は関越自動車道上り高坂サグ(33.0kp付近)である。当該区間は図-1に示すように、見通しの良いほぼ直線の片側4車線の道路で一番左側には付加車線(ゆずり車線)が設置されている。なお、付加車線の利用車のほとんどは坂戸西SICへの流出車両であるため、今回の分析では対象外としている。

(2) 分析対象地点のBDF特性

図-2は2015年休日の車両感知器5分間データを用いて、交通量ランク別の渋滞発生数と渋滞非発生数を示すとともに、既往研究⁹⁾の方法に基づき式(1)に示すワイブル分布を仮定した渋滞発生確率曲線を最尤推定法により推定したものである。

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

ここに、 $F(q)$: 渋滞発生確率、 q : 交通量(pcu/5min)、 α, β : 分布形状を示すパラメータ

なお、図-2では雨天時の渋滞も対象外としているが、天候や平休日の違いといったBDFの変動要因を取り除いても、日によって値が異なりばらつきが大きいことがわかる。これは、BDFの変動要因が既往研究で示される要因以外にも存在することを意味し、その一つとして、低速車両等の個々の車両挙動特性が考えられる。

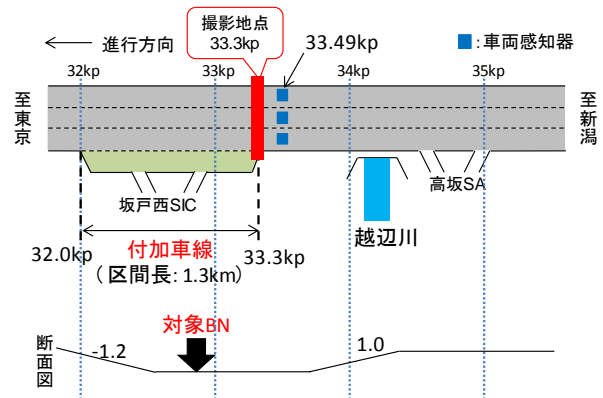


図-1 高坂サグ付近の断面図

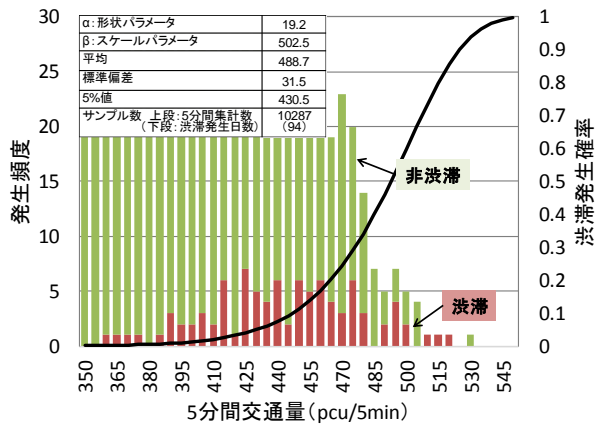


図-2 渋滞発生確率曲線(2015年)



図-3 調査風景

(3) 調査概要および使用データ

大型車のような特定の低速車両が渋滞の発生に及ぼす影響を把握するため、図-1のとおりBN直近上流において、図-3のように高速道路上に設置されている跨道橋からのビデオ撮影により車両挙動調査を実施した。本研究では、そのうち大型車の低速車両が渋滞の発生に起因した、2017年7月16日(日)の調査結果を用いることとする。

(4) 調査日の渋滞発生状況

図-4は同日の車両感知器データより作成した速度コンター図である。この日の渋滞は、高坂サグを先頭とする典型的な交通集中渋滞である。本研究では、渋滞の定義

をこれまでの既往研究に倣い「60km/h以下での低速走行が、15分以上継続した状態」としている。図-5に示す分析対象地点である33.3kpにおける全車線1分間平均速度の変化によると、60km/h以下となった時刻は15時15分であることから渋滞発生時刻を15時15分とし、それよりも前の時間帯を渋滞発生前として分析を行った。

なお、調査地点の直近上流(33.49KP)の車両感知器で観測されたBDFは454pcu/5minであり、これを図-2と比較すると、渋滞発生確率は0.1程度に相当する。しかし、他の渋滞発生日と比較するとBDFそのものは低い値ではない。

4. 渋滞発生前の交通状況と交通現象を表現する新たな方法の提案

(1) 渋滞発生前の交通状況

図-6はビデオデータより抽出した渋滞発生前の交通状況を示している。渋滞発生前の状況を整理すると、全車線で車がほとんど走っていない時間帯が続いた後、第1,第2車線に低速大型車が並走する状況が確認された。その後、短い間隔で車が到着するため徐々に速度が低下していき渋滞が発生した。これは、第1,第2車線が低速大型車によってブロックされ、追い越しが第3車線からでしかできなくなり、後続車が第3車線に集中することによって渋滞発生に結びついたことが考えられる。

(2) 渋滞を発生させる低速大型車(仮説の検証)

今回の分析地点である33.3kpはBNの上流地点であり、低速大型車が通過してから分析地点で渋滞が発生するまでには時間差が生じるため、低速大型車の並走が渋滞を発生させる要因であることを明確にする必要がある。そこで、低速大型車の速度とショックウェーブの伝播速度からショックウェーブの発生位置を確認する。低速大型車の並走がショックウェーブ発生の原因であると仮定すると、低速大型車が分析地点の33.3kpを通過してからショックウェーブが到達するまでの時間は、低速大型車がショックウェーブの発生位置までに到達する時間とそこからショックウェーブが伝播するまでの時間の和である。低速大型車が通過してからショックウェーブが到達するまでの時間は約4.1分、大型車の速度は観測より75km/h、伝播速度は図-4の速度コンター図から0.3km/minであったことから、衝撃波の発生位置は式(2)より算出される。

$$\frac{(33.3-X)}{75/60} + \frac{(33.3-X)}{0.3} = 4.1 \quad (2)$$

ここに、X：衝撃波の発生位置(kp)

その結果、ショックウェーブの発生位置は32.3kp付近であることがわかった。この地点は、図-1を見ると、サ

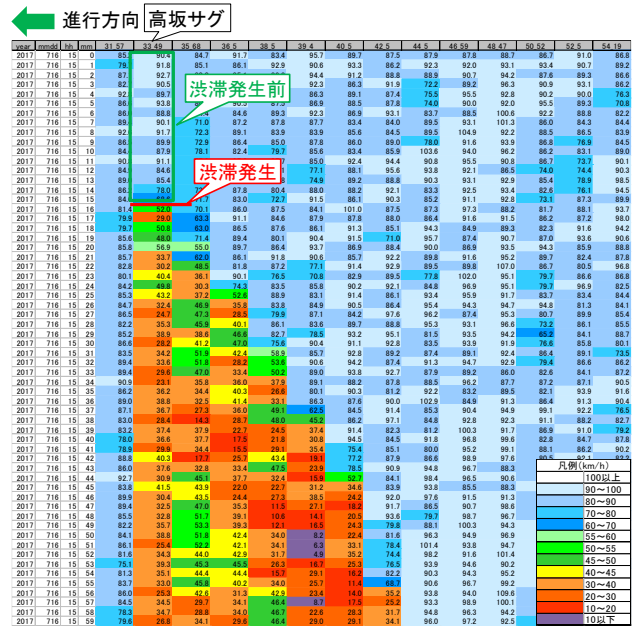


図-4 速度コンター図

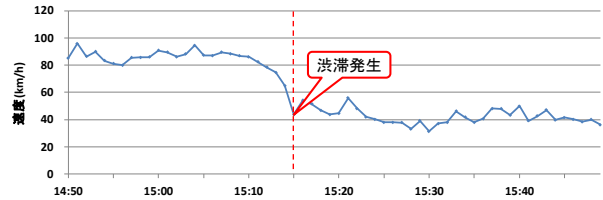


図-5 調査地点(33.3kp)における全車線1分間平均速度



図-6 渋滞発生前の交通状況

グ底を過ぎて上り勾配に差し掛かる地点であり、低速大型車の並走がショックウェーブ発生の原因であるとの仮説は妥当であると考えられる。

(3) 渋滞発生前の車群特性分析

図-7は渋滞発生前の25分間(14時50分~15時15分)において、車群の定義を3秒とした場合における、追越車線(第3車線)の各車群の構成台数と平均車頭時間を示した図である。大口ら³⁾の既往研究によると、平均車頭時間が1.5秒程度かつ車群構成台数が20台程度で渋滞を引き起こしていることを示しているが、これに比べて、前述の並走する低速大型車と同じ時刻に通過した渋滞発生の要因になったと思われる車群は、車群構成台数が少なく平均

車頭時間も長い。すなわち、本研究で用いたデータにおいて、低速大型車の並走が要因となる渋滞の発生は、車群だけでは特定はできないことを示すものである。このような低速大型車の車両挙動特性が渋滞発生の要因となる現象を表現するには、単に車群のみではなく全車線を包括する何らかの表現方法が必要であると考えられる。

(4) 渋滞発生前の交通現象の新たな表現方法

前述の通り、渋滞が発生する直前においては、速度の低い大型車の並走など渋滞のきっかけとなる何らかの要因が発生していることが想定される。この低速大型車の並走による第3車線への影響はもとより第1, 第2車線の交通特性の変化を比較分析するためには、車群単位ではなく断面全体を大きな車両のかたまりとし、これを1つのユニットとして扱う必要がある。そこで本研究ではこれを表現する方法として、図-8に示すようにマス(Mass)という新たな表現方法を提案する。なお、本研究では、このマスを以下のように定義する。

- ① 各車線について車頭時間3秒未満の車両が連続しているものを「車群」とする。
- ② いずれかの車線に車群が存在している時間の間隔が2秒未満であれば1つの「マス」とする。
- ③ ただし、1つのマスが10秒以上継続しないものはマスとして認めない。

(5) 渋滞発生前におけるマスの抽出

図-9は、渋滞発生前後における観測断面上を通過した際の車頭時間と速度を車線別に示すとともに、前述の定義に基づき、マスの分類を行ったものである。渋滞が発生する前の約10分間においては5つのマスに分類された。ここで、M4の第1, 第2車線の先頭車に着目すると前述の並走する低速大型車であることがわかる。

5. マスを用いた交通特性分析

ここでは、M4を渋滞を発生させるマス、M1, M2, M3を渋滞をさせないマスとして、各マス内の基本交通特性や個々の車両の走行特性などを比較し、両者にどのような違いがあるのか検証を行う。

(1) マス内の基本交通特性

表-1は各マスの継続時間、先頭車速度、車両台数(車線利用率)、平均速度、密度、平均車頭時間、大型車台数(大型車混入率)、末尾速度を示した表である。

渋滞を発生させたマスであるM4をみると、他のマスと比較して継続時間や密度が最も大きいわけではない。マス自体も最も密でかつ大きいものが渋滞を引き起こし

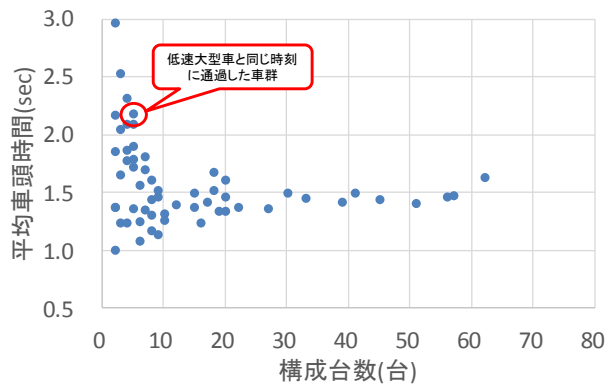


図-7 各車群の構成台数と平均車頭時間の関係

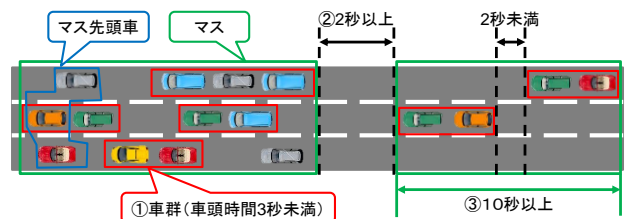


図-8 マスの定義

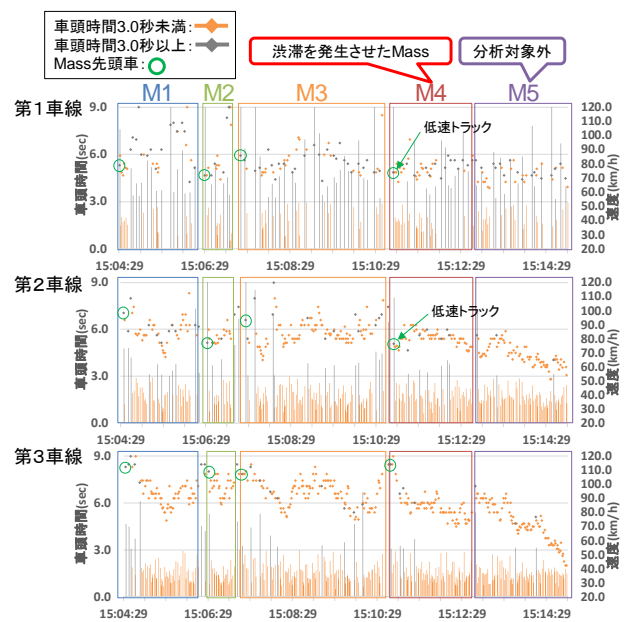


図-9 車頭時間と速度の分布(マスの抽出)

ているわけではないことがわかる。

第1, 第2車線の先頭車速度は、M2とM4が他のマスと比較して低く、第3車線の密度が高くなっている。これは、第1, 第2車線の先頭車が低速のため第3車線にシフトする車が多く、密度が高くなった可能性が考えられる。これに対し、第3車線の平均速度を比較するとM2よりM4のほうが約15km/h低い。これは第1, 第2車線の先頭車が大型車であり、またマス内に存在する大型車交通量の違いが追越をし難くさせている可能性がある。

さらに、各マスの末尾速度に着目すると、M4の第2,

第3車線の速度が80km/h以下となっている。このことから、M4の末尾車速度が低い影響で、同様に後続で形成されているであろうマスが追いつくような状況となり、さらなる速度低下を引き起こした可能性が推察される。

(2) 第2車線と第3車線の相対速度

図-10は、第2車線と第3車線の車両が観測断面を同時に通過した際の第2車線と第3車線の相対速度（第3車線の速度－第2車線の速度）を示したものである。M1, M2, M3は0~30km/hにかけて広く分布しているのに対し、M4はほとんどが10km/hを下回っているのがわかる。このことから、M4は第3車線からのスムーズな追い越しが難しい状況にあったことがうかがえる。

(3) マスを構成する車両の走行挙動特性

図-11は、全車線における各マスの車頭時間分布を比較したものである。渋滞の要因となったM4の車頭時間分布は、他のマスと比較して明確な特徴があるわけではない。従って、これだけでマスを構成する車両の走行挙動特性の違いを見出すことはできない。

そこで、マス内を構成する個々の車両の走行挙動特性を把握するため、大口ら³⁾の研究を参考に個別車両の仮想的な見かけ上の換算交通流率、換算密度を以下の式(3)、(4)のように定義した。

$$q_i = \frac{3600}{h_i} \quad (3)$$

$$k_i = \frac{q_i}{v_i} \quad (4)$$

ここに、 q_i ：換算交通流率(台/h)、 h_i ：前方車と車頭時間(sec)、 k_i ：換算密度(台/km)、 v_i ：速度(km/h)であり、 i は個別車両を示す。

図-12は低速車を追い抜こうとする車両が集中する第3車線の車両の走行挙動特性を把握するため、4つのマスの第3車線における見かけ上のQ-V図、K-V図を比較したものである。同程度の換算交通流率および換算密度においてM1, M2, M3と比較してM4の速度が低く、さらにM4は換算交通流率および換算密度が大きいほど速度が低下する傾向が強いことがわかる。このことから、M4は渋滞を発生させないマスと比較して、非効率な交通状況が生じていることを示すものである。この理由として、低速車による閉塞で速く行こうとする車が強引な車線変更を行い、後続車が減速を余儀なくされるような状況が生じているためであると推察される。

(4) マス内の速度変化

図-13および図-14は、第2、第3車線において各マスの速度変動を比較した図である。M1, M2, M3は速度低下と回復を繰り返す傾向にあるが、M4は速度回復がで

表-1 各マスの基本データ

	車線	M1	M2	M3	M4
継続時間	全車線	1分47秒	37秒	3分22秒	1分56秒
先頭車速度	第1	79.1km/h	72.0km/h	85.7km/h	74.2km/h
	第2	98.6km/h	77.4km/h	93.5km/h	76.6km/h
	第3	112.5km/h	107.5km/h	107.5km/h	114.3km/h
台数(利用率)	第1	35台(24%)	18台(28%)	52台(18%)	40台(23%)
	第2	47台(32%)	18台(28%)	101台(35%)	59台(34%)
	第3	63台(44%)	28台(44%)	136台(47%)	73台(43%)
平均速度	第1	91.0km/h	92.1km/h	81.6km/h	78.2km/h
	第2	86.6km/h	81.7km/h	85.7km/h	80.5km/h
	第3	94.4km/h	98.1km/h	93.8km/h	84.8km/h
密度(流率/平均速度)	第1	12.9台/Km	19.0台/Km	11.4台/Km	15.9台/Km
	第2	18.3台/Km	21.4台/Km	21.0台/Km	22.7台/Km
	第3	22.5台/Km	27.8台/Km	21.8台/Km	26.7台/Km
平均車頭時間	第1	3.13sec	2.17sec	3.90sec	2.88sec
	第2	2.23sec	1.91sec	1.95sec	1.88sec
	第3	1.67sec	1.51sec	1.75sec	1.58sec
大型車台数(混入率)	第1	3台(9%)	0台(0%)	10台(19%)	9台(23%)
	第2	3台(6%)	1台(6%)	4台(4%)	4台(7%)
	第3	1台(2%)	0台(0%)	1台(1%)	1台(1%)
末尾速度	第1	77.4km/h	107.5km/h	114.3km/h	85.7km/h
	第2	82.8km/h	80.0km/h	107.5km/h	74.2km/h
	第3	98.6km/h	101.4km/h	107.5km/h	80.0km/h

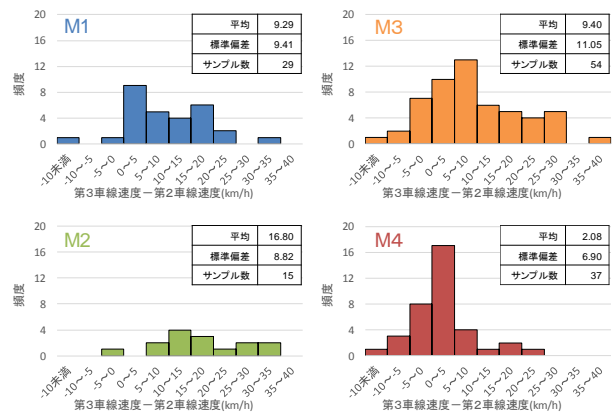


図-10 第2車線と第3車線の相対速度(発生頻度分布)

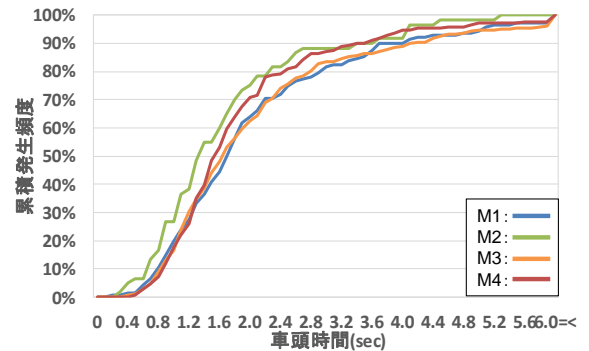


図-11 車頭時間分布累積曲線(全車線)

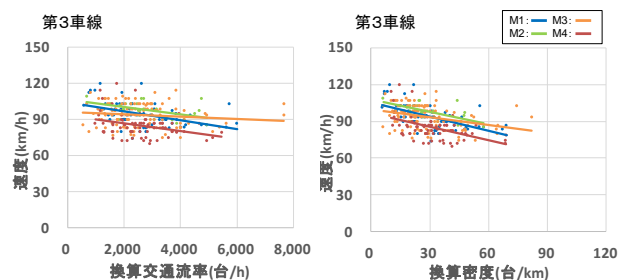


図-12 見かけ上のQ-V図、K-V図(第3車線)

きずに低下したままの状況が続く傾向にある。これは、M4では前述のように後続車が減速を余儀なくされるような非効率な交通状況が続き、速度が回復できない状態になっているためであると推察される。

6. おわりに

本研究では、渋滞発生の要因を表現する新たな方法として、「マス」という表現方法を導入し、渋滞を発生させるマスとさせないマスとに分けて分析を行った。その結果、渋滞を発生させるマスについて、以下のような特徴が見受けられた。

- ① 第1, 第2車線の先頭車速度が低く、第3車線の平均速度が低い。
- ② 第3車線と第2車線の相対速度が低く、第3車線からのスムーズな追い越しができていない。
- ③ 見かけ上のQVK図で見ると換算交通流率または換算密度が大きいほど速度が低下する傾向にあり、非効率な交通状況が生じている。

このように、渋滞発生状況を断面全体を含めて1つのユニットとして考えることで、車群のみでは説明できなかった低速大型車の並走が渋滞の要因となる交通現象を表すことができる可能性を示唆する結果が得られた。

今後の課題として、渋滞を発生させるマスが上流からどのように形成されるかなど、さらに特徴を分析する必要がある。さらに、同一地点においてBDFの異なる渋滞発生前状況を観測し、共通的な条件や相違点を見出し、BDFが変動する要因の分析につなげていきたい。

謝辞

本研究の実施に際して、東日本高速道路株式会社関東支社管理事業部道路管制センター交通技術課からデータ提供を受けた。ここに謝意を表す。

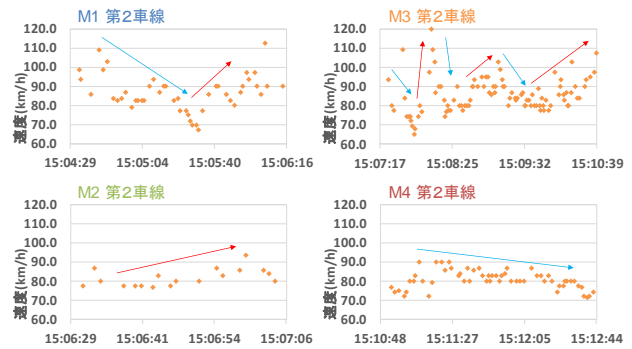


図-13 マス内の速度(第2車線)

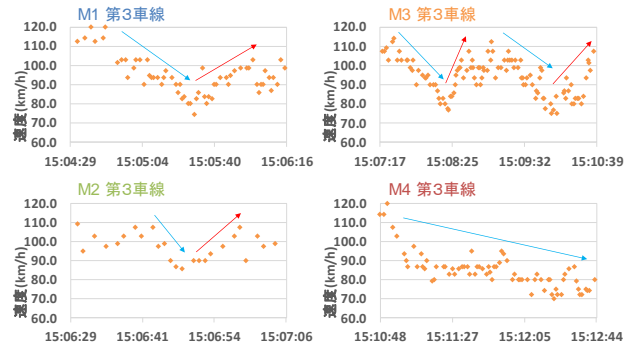


図-14 マス内の速度(第3車線)

参考文献

- 1) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(上), 高速道路と自動車, Vol.44, No.2, pp.31-38, 2001.
- 2) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 3) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, pp.27-34, 2001.
- 4) 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, VOL.42, No.82, 2010.11.
- 5) 稲野晃, 中村英樹, 内海泰輔: 複数ボトルネックを含む高速道路区間における渋滞現象の確率的解析, 高速道路と自動車, Vol.52, No.1, pp.19-29, 2009.

(2018.4.27 受付)

ANALYSIS OF TRAFFIC BEHAVIOR AT THE TIME OF TRAFFIC CONGESTION OUTBREAK ON EXPRESSWAY

Katsunori SAKAI, Sumio SHIMOKAWA and Keisuke YOSHIOKA