

東名阪の渋滞先頭地点遷移と交通容量および 渋滞疎密波と車群の構成に掛かる考察

米川 英雄¹・立松 和憲²

¹正会員 中日本高速道路㈱ 東京支社 (〒105-6011 東京都港区虎ノ門 4-3-1 城山トラストタワー)

E-mail:h.yonekawa.aa@c-nexco.co.jp

²正会員 中日本高速道路㈱ 名古屋支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 2-18-19 三井住友銀行ビル)

E-mail: k.tatematsu.aa@c-nexco.co.jp

東名阪自動車道(上) 鈴鹿 IC~四日市 IC 間の約 10km を対象に、渋滞先頭地点の遷移の状況を把握し、遷移の前後における交通容量を分析し、渋滞先頭地点遷移との交通容量との関係を把握した。139 渋滞中の 72 渋滞で遷移が発生しており、106 回の遷移中で 59 回の遷移が交通容量の大きくなる遷移であることを確認した。この結果より、渋滞疎密波のショックウェーブと車群の生成状況について推定し、既往研究との整合を確認した。車群が時々刻々と変化し、渋滞のショックウェーブを起こす車群が出来るタイミングにより、渋滞先頭地点の遷移が起こると推定した。

Key Words: traffic congestion, traffic capacity, ETC2.0 prove, traffic jam shockwave, vehicle groupe

1. はじめに

都市間高速道路の交通集中渋滞において、渋滞先頭地点が移動することは、従前から指摘されている。1996 年に実施された中央自動車道(上) 中野橋・岩殿トンネルの渋滞要因分析では、岩殿トンネル付近(66.5~67.35KP)で最初に渋滞が発生し、夜間になると直近下流の中野橋付近(59.7KP)で新たに渋滞が発生することが報告されている¹⁾。同様に、中央自動車道(上) 小仏トンネル付近では、小仏トンネル入口付近(40~41KP)で発生した渋滞が、薄暮から夜間にかけて、直近上流に位置する相模湖バスストップ付近(42.9KP)へ遡上する現象が観測されている²⁾。

ここで、渋滞ソフト対策として各社で実施されている速度回復案内板や走光型視線誘導灯システム(例えばドライブ・アシスト・ライト³⁾)は、渋滞先頭地点に適切に配置することで効果が発揮されるため、渋滞先頭地点を正確に把握する事および渋滞先頭地点の遷移メカニズムの解明は、このような渋滞対策の効果を最大化するために必要である。

そこで本論は、東名阪自動車道(上) 鈴鹿 IC~四日市 IC の約 10km を対象に、ETC2.0 サービスにおける路車間相互通信により取得できるプローブ情報を活用して、渋滞発生状況を分類し、渋滞先頭地点の遷移現象につい

て分析を行い、その原因について考察をする。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

これまで渋滞定着現象を明示的に表した研究は少ない。野中らは、渋滞先頭地点が遷移する現象に着目し、渋滞の先頭地点が落ち着くことを「定着」現象として捉え、渋滞現象を渋滞発生直前の交通現象からではなく、渋滞発生後の交通現象からアプローチすることを提案している⁴⁾⁵⁾。著名なボトルネックの下流で発生した事故渋滞を典型的な例として、事故車線規制が解除された後に渋滞先頭地点が頭崩れを起こしながら上流へ伝播し、ボトルネックに定着する現象を考察している。

また、稲野らは、東名高速道路(上) 岡崎 IC~豊田 JCT を対象として、約 2km ピッチで設置された車両感知器データより、同一 IC 区間内でボトルネックの位置が移動する現象の解明を試み、区間内の様々な地点が交通集中渋滞の発生、定着地点になるであろうことを指摘している⁶⁾。

さらに、石田らは、よりミクロな視点での渋滞定着現象の検証を行うため、名神高速道路(上) 一宮 IC ~一宮 JCT の約 4km を対象に、300~700m 間隔の可搬型簡易車両感知器データ設置し観測を行い、渋滞発生地点と定着地点が相違することを実証している⁷⁾。

筆者らは、東名阪自動車道（上）鈴鹿 IC～四日市 IC を対象に ETC2.0 プローブ情報の走行履歴データによる分析で、同一区間内で渋滞先頭地点の遷移が複数回発生することを実証した⁸⁾。しかしながら、この研究は、遷移回数 1 回のみに限定した分析で、かつ、平休や昼夜などに区分していない。

そこで本論では、渋滞先頭地点の遷移と交通容量との関係を、交通容量への影響要因を踏まえて分析を行い、その結果について原因の考察をするものである。

3. 分析対象の概要

(1) 分析対象期間と分析対象区間

分析対象期間は 2016 年 1 月 1 日(金)～12 月 31 日(土)から交通混雑期(1 月 1 日(金)～1 月 4 日(月), 4 月 28 日(木)～5 月 8 日(日), 8 月 6 日(土)～8 月 16 日(火), 12 月 28 日(水)～12 月 31 日(土))を除いた 336 日間を対象とした。

図-1 に分析対象区間を示す。対象区間は東名阪自動車道（上）鈴鹿 IC～四日市 IC の約 10km である。対象区間は、2016 年の年平均断面日交通量が約 92,000 台の重交通路線であり、関西圏と中京圏を結ぶ重要路線である。対象区間を含む草津 JCT～豊田 JCT には、対象区間のある新名神・東名阪・伊勢湾岸ルートとその代替である名神・東名ルートがある。草津 JCT～豊田 JCT 間の通常所要時間は、新名神・東名阪・伊勢湾岸ルートが約 100 分、名神・東名ルートが約 120 分である。対象区間の渋滞規模や事故等のインシデント発生により、相互に迂回が発生する区間である。

図-2 に 2016 年の渋滞発生状況と縦断線形を示す。図は、分析対象区間において 1 年で 5 回以上発生した 1km 以上かつ 15 分以上継続した交通集中渋滞の渋滞状況図である。図において、三角形の三角形の垂直線が立ち上がっている箇所が交通管制イベントに記録されているボトルネック箇所であり、三角形の高さがそのボトルネック箇所が発生した渋滞の回数であり、三角形底辺の長さがそのボトルネック箇所が発生した渋滞の平均最大渋滞長である。また、平均渋滞継続時間に応じて三角形の線色を分けている。

図に示すように、サグや上り坂が連続しているため、複数地点がボトルネックとなっており、2016 年で 416 件の渋滞が発生している。

(2) ETC2.0 プローブ情報の概要

ETC2.0 プローブ情報の走行履歴データ、挙動履歴データのうち、分析には走行履歴データを活用する。2016 年の分析対象区間における、ETC2.0 対応車載器を搭載し、アップリンクを許可した車両の混入率は、約 14% であった。走行履歴データは、200m 間隔もしくは 45 度

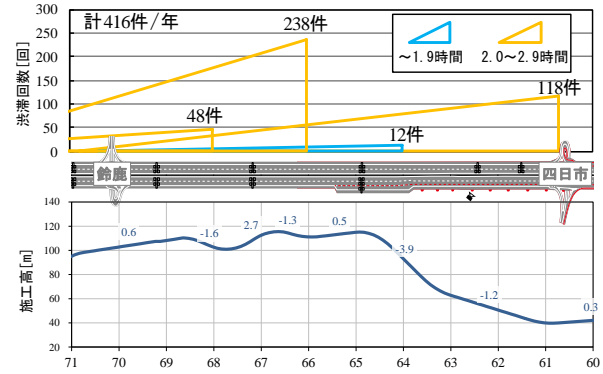


図-2 渋滞発生状況と縦断線形

以上の方向変化時に蓄積され、緯度経度や走行速度等の

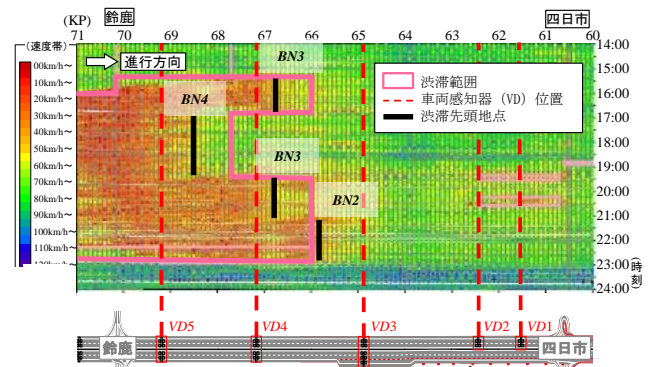


図-3 ETC2.0 プローブ情報の優位性

情報が取得できる。

図-3 に車両感知器データに対する ETC2.0 プローブ情報の優位性を示す。図は、走行履歴データの速度について、速度のタイムスペース図（以下「速度 TS 図」という）を描き、速度帯に色分けし、渋滞状況を可視化している。図中 BN2～BN4 は速度 TS 図から判読した渋滞先頭地点を示している。渋滞先頭地点の考え方については後述する。また、図には車両感知器（図中 VD）で判定した渋滞データ（桃色実線）を記載している。

図より、15 時 15 分頃に 67KP 付近で渋滞が発生し、その後 68KP 付近へ遷移し、さらに 67KP 付近、66KP 付近へと渋滞先頭地点が遷移している様子が分かる。一方で、67Kp 付近の BN3 と 66KP 付近の BN2 を先頭とする渋滞が発生している場合、車両感知器での判定は、67.17KP に設置された車両感知器（VD4）で渋滞を感知

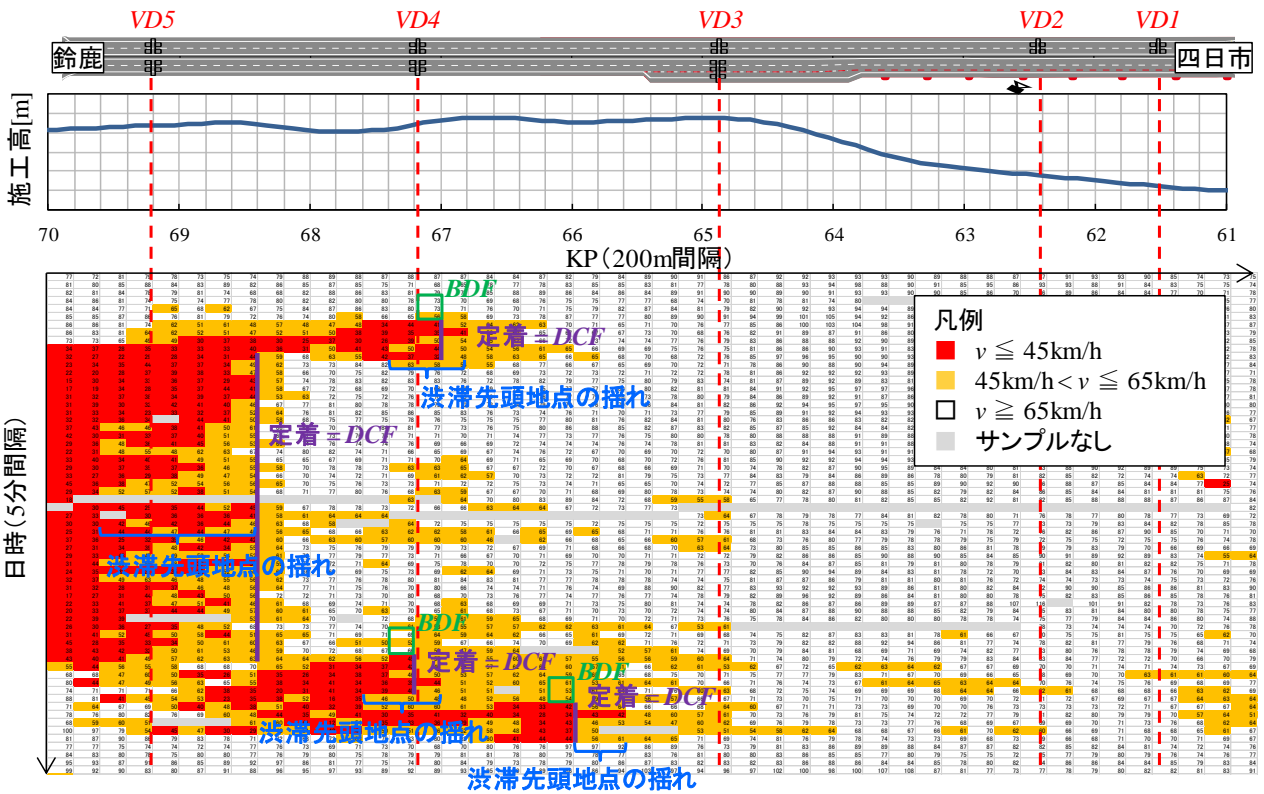


図4 渋滞判定方法

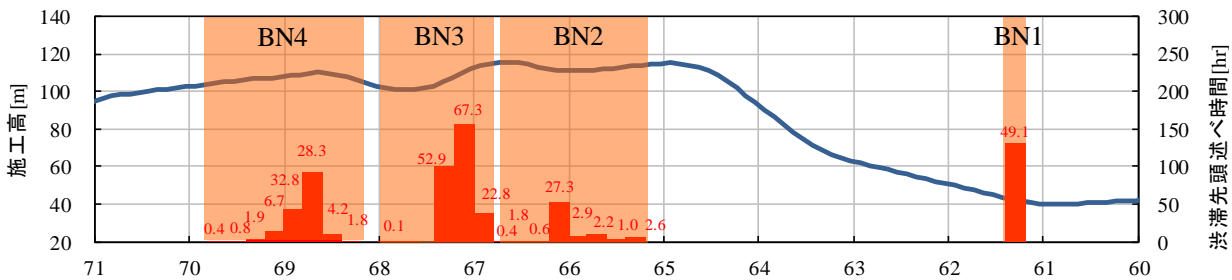


図5 渋滞発生地点と渋滞先頭延べ時間の関係

し、66KP 付近を先頭とする渋滞としている。このように、ETC2.0 プローブ情報による分析では、車両感知器の設置間隔によらない渋滞先頭地点の把握が可能となる。

本論では、より正確な渋滞先頭地点を把握し渋滞遷移現象を分析するため、ETC2.0 プローブ情報を用い渋滞の判定を行うこととする。

(3) 渋滞判定方法

図4 に渋滞判定方法を示す。図は、速度 TS 図の速度データを 200m 毎に 5 分間平均とした。この 5 分間平均速度が 45km/h 以下となり、かつその上流区間においても速度の低下が確認される場合を渋滞が発生したと判定した。渋滞中で速度が一時的に回復している場合も、疎密派の疎部と考えて渋滞が継続していると判断した。

ここで、200m は ETC2.0 プローブ走行履歴データの最少分解能であり、5 分間は ETC2.0 混入率 14% (前述)

から集計単位時間内に複数台の ETC2.0 プローブ車載器搭載車両の存在を狙って定めた。

図中に添え書きする「渋滞先頭地点の揺れ」「定着」「BDF」「DCF」については、後述する。

(4) ボトルネックの群化

図5 に図4 より判読した 200m 毎の渋滞先頭地点の渋滞先頭延べ時間を示す。道路構造と比較すると、サグまたは上り坂周辺で渋滞先頭地点であった時間が長くなり、その周辺に分布していることがわかる。岡村らは東名高速道路(上) 綾瀬バスストップ付近のサグにおけるフローティング調査結果から、「渋滞先頭地点は、一点に固定されるのではなく、刻々と動く」²⁾と考察している。この事例から、図5 に示した渋滞先頭延べ時間の分布は、同一ボトルネック内における「渋滞先頭地点の揺れ」と考えることができる。そこで、本論においては、「渋滞

先頭地点の揺れ」による先頭地点の違いは区分せず、道路構造と対比をすることで一つのボトルネック群とする。図に示すとおり、61.2KPをBN1、65.2KP～66.6KPをBN2、66.8KP～67.8KPをBN3、68.2KP～69.6KPをBN4とした。

(5) 渋滞先頭地点定着の定義

渋滞の先頭地点が一地点に定着するとは、渋滞のショックウェーブが同一地点で2回以上発生した場合とした。

ショックウェーブが2回以上発生したか否かの判断を、プローブで行うことは、そのサンプリング率が1.4%（前述）であることから困難である。実際に、図4においても5分間でサンプルが無い灰色が存在する。

また、車両感知器の平均速度で判断する事は煩雑である。車両感知器の収集周期は1分であり、ショックウェーブの発生を把握することは可能である。しかし、これは次の理由から難しい。一つは1分データを詳細に調べるという作業上の煩雑さを伴うこと、いま一つは図3に示したとおりBN2とBN3からのショックウェーブを一つのVD4感知器で判断せざるを得ないことである。

そこで、渋滞先頭地点定着の判断は、筆者ら既往の研究成果⁹⁾を準用し渋滞継続時間が15分以上である場合とした。その理由は次のとおりである。

図6に渋滞疎密波の周期とボトルネックまでの距離との関係を示す。図は筆者らの既往研究⁹⁾からの再掲である。図は交通集中渋滞2つと事故渋滞3つについて渋滞内の車両感知器の追越車線1分平均速度の速度変動周期をFFT分析した結果である。図より、交通集中渋滞である捌け量1,300以上の実線における、ボトルネックからの距離が0であるY軸切片の値は約10分である。これは、ボトルネックにおいて10分間隔でショックウェーブが発生していることを意味する。ショックウェーブが2回以上発生とは、疎密波周期が2周期分続くと考えがちだが、実は1周期半継続していれば、ショックウェーブが2回以上発生しているとみなせる。というのは、1周期の中には疎密波の密部（ショックウェーブ）と疎部がそれぞれ一つずつ含まれる。密部のみを2つ確認するためには1.5周期分を見れば良いということである。

4. 渋滞先頭地点遷移の状況

(1) 渋滞先頭地点遷移の発生回数

図4による渋滞判定により分析対象期間で227件の渋滞を抽出した。ここから、降雨及び事故等インシデントのある日を除外した。降雨は、気象庁のホームページに掲載されている1時間ごとの降水量から、降水があった時間を除外した。事故の除外は、分析対象区間とその上流の亀山JCT～鈴鹿ICで事故等イベントがある日を対象外とした。

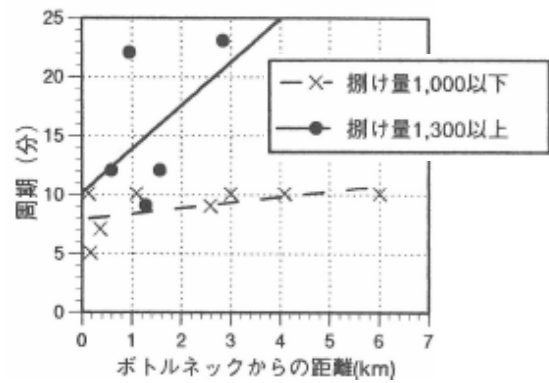


図6 渋滞疎密波周期とボトルネックまでの距離

表-1 ボトルネック群別の渋滞発生件数

BN群	BN4	BN3	BN2	BN1	計
発生件数	68 (30%)	84 (37%)	28 (12%)	47 (21%)	227 (100%)
降雨事故	▲16 ▲13	▲25 ▲5	▲13 ▲1	▲12 ▲3	▲66 ▲22
対象件数	39 (28%)	54 (39%)	14 (10%)	32 (23%)	139 (100%)

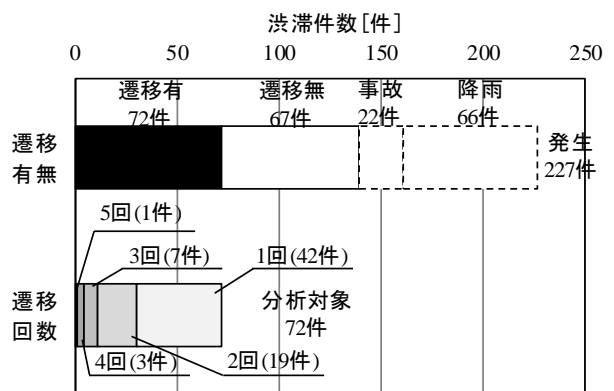


図7 渋滞先頭地点遷移の発生件数と遷移回数

表-2 分析対象の渋滞遷移数

遷移回数[回/件]	5	4	3	2	1	計
件数[件]	1	3	7	19	42	72
遷移数[回]	5	12	21	38	42	118

表-1 にボトルネック群別の渋滞発生件数を示す。227件の渋滞のうち、降雨、事故等によりそれぞれ66件、22件が対象外となり、139件が対象件数となった。

図7に渋滞先頭地点遷移の遷移回数毎の発生件数を示す。対象となる139件のうち、過半数の72件で遷移が発生している。さらに、72件のうち、遷移回数が1回のみが約6割を占めるが、最大で5回もの遷移が発生している渋滞もあった。表-2に遷移数を示す。

表-3（次頁）に分析対象72件の渋滞先頭地点遷移状況を示す。表は、渋滞を図4に示したように判読し、各ボトルネック群へ渋滞先頭地点が遷移した状況を模式図

表-3 渋滞先頭地点遷移状況の一例

遷移回数	4群 3群 2群 1群				発生件数	遷移回数	4群 3群 2群 1群				発生回数	遷移回数	4群 3群 2群 1群				発生回数		
	4群	3群	2群	1群			4群	3群	2群	1群			4群	3群	2群	1群			
1					3	2					1	2							1
1					5	2					1	3							1
1					5	2					1	3							1
1					3	2					4	3							1
1					8	2					1	3							1
1					12	2					1	3							1
1					2	2					9	3							
1					1	2					2	3							
1					9	2					1	3							
2					1	2					1	4							

凡例

として示している。横軸が車両進行方向、縦軸が時間の経過を示す。表より、全 32 パターンの遷移が存在し、ある特定のパターンに固定されていないことがわかる。

118 回すべての遷移を対象に、遷移前の渋滞先頭地点であったボトルネック群を遷移前先頭地点、遷移後の渋滞先頭地点となったボトルネック群を遷移後先頭地点として、渋滞発生回数を集計する。

表-4 に遷移前先頭地点と遷移後先頭地点とのクロス集計結果を示す。表より上流への遷移（表左下）が 61 回（52%）、下流への遷移（表右上）は 57 回（48%）と、上流遷移だけではなく、下流遷移も頻繁に発生していることがわかる。ボトルネック群別の遷移後先頭地点では、BN3 が 58 回（49%）と多く、次いで BN4、BN2 となり、BN1 への遷移は 4 回（3%）にとどまる。また、地点間

表-4 遷移前先頭地点/遷移後先頭地点の発生頻度

遷移前 先頭地点	遷移後先頭地点				計
	BN4	BN3	BN2	BN1	
BN4	34 (29%)	5 (4%)	3 (3%)	42 (36%)	
BN3	25 (21%)	18 (15%)	1 (1%)	44 (37%)	
BN2	4 (3%)	17 (14%)	0 (0%)	21 (18%)	
BN1	1 (1%)	7 (6%)	3 (3%)	11 (9%)	
計	30 (25%)	58 (49%)	26 (22%)	118 (100%)	

の関係をみると、BN3 と BN4 や BN2 と BN3 など隣接する地点への遷移が多く、BN4 から BN3 への遷移が 34 回（29%）と最も多い。一方で BN1 と BN2 は隣接するボトルネック群ではあるが遷移の発生は少ない

表-5 平休昼夜別の渋滞先頭地点遷移回数

遷移前 先頭地点	→	遷移後 先頭地点	平日			休日			計
			昼	薄明	夜	昼	薄明	夜	
BN2	→	BN1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
BN3	→	BN1	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
BN4	→	BN1	1 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (0)
BN1	→	BN2	0 (0)	0 (0)	2 (2)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (2)
BN3	→	BN2	0 (0)	3 (3)	9 (8)	0 (0)	0 (0)	6 (4)	18 (15)
BN4	→	BN2	0 (0)	1 (1)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	3 (2)	5 (4)
BN1	→	BN3	1 (0)	2 (2)	3 (3)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	7 (6)
BN2	→	BN3	2 (0)	0 (0)	6 (3)	1 (0)	0 (0)	8 (2)	17 (5)
BN4	→	BN3	19 (0)	9 (8)	4 (3)	1 (0)	1 (1)	0 (0)	34 (12)
BN1	→	BN4	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
BN2	→	BN4	4 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (0)
BN3	→	BN4	19 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (0)	0 (0)	1 (1)	25 (1)
計			48 (0)	15 (14)	25 (20)	10 (0)	1 (1)	19 (10)	118 (45)

(2) 渋滞先頭地点遷移の要因別整理

渋滞と交通容量とは、密接に関係をしている。よって、渋滞先頭地点の遷移を分析するに際しては、交通容量に影響を及ぼす要因を考慮する必要がある。そこで、交通容量への影響要因の 카테고리毎に遷移の状況を分析することとした。今回の分析で影響要因として考えたのは、平休（ドライバー属性）、昼夜（明るさ）、降雨、渋滞巻き込まれ時間、大型車混入の影響の5つである。降雨は本分析に先立ち予め除外した（図-7参照）。渋滞巻き込まれ時間については、5章2節で詳述するとおり考慮しないこととした。大型車混入の影響は、交通容量を算出する際において、小型車換算交通量とすることでその影響を排除した（後述）。

平日休日の区分は、祝祭日を除く月曜日～金曜日を平日とし、土日祝祭日を休日とする。

昼夜については、薄明を含め3つに区分しており、太陽高度に基づき区分した。昼は太陽高度が0度より高い時間帯とし、夜は太陽高度が-6度以下とした。薄明は太陽高度が0度から-6度とした。遷移後先頭地点の渋滞開始時刻の太陽高度により区分をした。

表-5に渋滞先頭地点遷移状況の平休昼夜別集計結果を示す。表の数値は遷移回数を示しており、下段括弧書きは、遷移前・先頭地点と遷移後・先頭地点の昼夜区分が異なる回数を示す。当該区間は午後から渋滞が発生し夜まで続いたため、昼夜区分の異なりは明るさの変化でいうと暗変化ということになる。

暗変化による遷移をみている。表より、全118回に対し、暗変化がある場合に発生した遷移は約4割の45回である。暗変化がある場合の平休別をみると、平日39%（34回/88回）、休日37%（11回/30回）と平休で傾向に大きな相違はないが、休日は薄明の遷移がほぼないことが特徴的である。

遷移後先頭地点別にみている。遷移回数が1回は偶発的に発生したと考え、2回以上（図中薄黄色）に着目をする。遷移後先頭地点がBN1及びBN4となる場合は、すべて昼に遷移が発生している。特にBN3からBN4への遷移は19回と表中で最多である。一方、BN2への遷移は約8割が暗変化で発生しており、昼の遷移は発生していない。BN3への遷移は、昼夜問わず発生しており、BN4からBN3への遷移が19回と多い。また、暗変化の遷移も約4割発生している。

以上の結果から、渋滞先頭地点の遷移は地点により異なる発生傾向を示すことがわかった。BN2への遷移のほとんどは、暗変化で発生しており、中央道（上）岩殿トンネルや小仏トンネルで確認された遷移と一致する。一方で、分析区間全体で発生している遷移の大半は、暗変化のない場合に発生しており、特にBN3とBN4間の遷移に多い。

次章では、渋滞先頭地点の遷移と遷移前後の交通容量を分析する。

5. 渋滞先頭地点遷移の交通容量比較

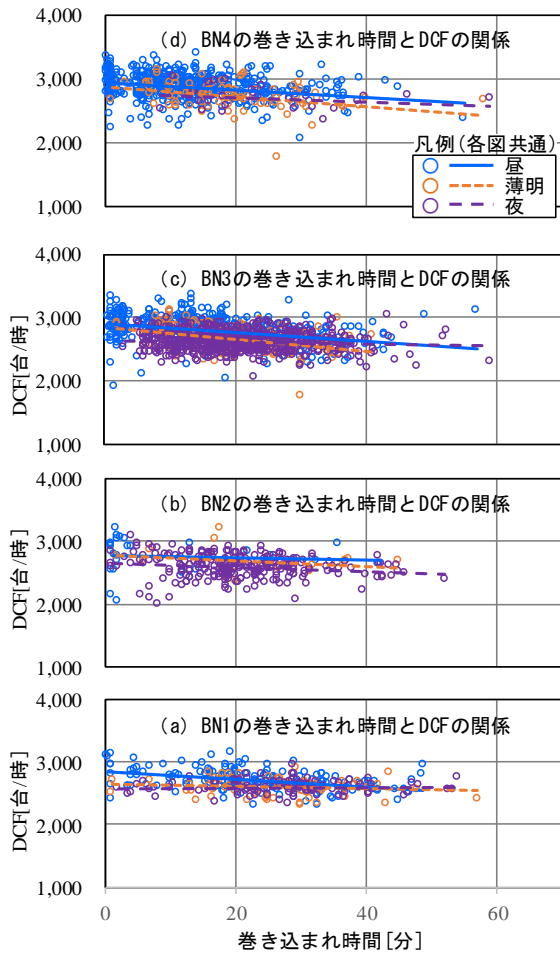


図-8 渋滞巻き込まれ時間と DCF の関係

渋滞と交通容量とは密接な関係にあり、渋滞先頭地点の遷移にも交通容量が関係していると考えられる。本章では、渋滞先頭地点遷移の遷移前後において、交通容量を比較することで、渋滞先頭地点遷移の解明を目指す。

(1) 交通容量の定義

交通容量は、渋滞発生時交通量と渋滞中捌け交通量の2種類を取り扱う。渋滞発生時交通量は、渋滞先頭地点遷移のうち下流への遷移において、遷移後の渋滞が発生した時刻の直前の15分間フローレートと定義し、以降BDF (Breakdown Flow) と表記する。渋滞中捌け交通量は、渋滞開始から終了までの5分間フローレートと定義し、以降DCF (Discharge Flow) と表記する。

(2) 渋滞巻き込まれ時間の考慮

DCFは渋滞巻き込まれ時間の増加により低下する事が知られている¹⁰⁾。DCFの算出に当たっては、渋滞巻き込まれ時間を考慮したい。そこで、渋滞巻き込まれ時間の大小によるDCFの低下を確認する。

巻き込まれ時間の算定は、ETC2.0プローブ情報の走行履歴データを用いることとした。具体的には、ETC2.0プローブ車両1台毎に、渋滞末尾からDCFを算出した

表 6 回帰式と相関係数の絶対値 (n=20 以上)

BN群	平休区分	昼夜区分	回帰式と相関係数の絶対値	n
BN4	平日	昼	$y = -5.21x + 2929$ ($ R = 0.241$)	417
		薄明	$y = -8.25x + 2890$ ($ R = 0.423$)	64
	休日	昼	$y = -8.73x + 3021$ ($ R = 0.378$)	106
BN3	平日	昼	$y = -3.75x + 2887$ ($ R = 0.164$)	309
		薄明	$y = -9.22x + 2843$ ($ R = 0.402$)	113
		夜	$y = -1.76x + 2641$ ($ R = 0.112$)	410
	休日	昼	$y = -7.62x + 2875$ ($ R = 0.440$)	152
		薄明	$y = -6.64x + 2762$ ($ R = 0.175$)	36
		夜	$y = -1.28x + 2656$ ($ R = 0.064$)	201
BN2	平日	昼	$y = -8.11x + 2844$ ($ R = 0.247$)	21
		夜	$y = -3.54x + 2642$ ($ R = 0.183$)	125
	休日	夜	$y = -3.36x + 2664$ ($ R = 0.177$)	125
BN1	平日	昼	$y = -5.72x + 2808$ ($ R = 0.393$)	113
		薄明	$y = -5.58x + 2720$ ($ R = 0.275$)	44
		夜	$y = -1.78x + 2700$ ($ R = 0.179$)	32
	休日	昼	$y = -7.99x + 2925$ ($ R = 0.524$)	63
		薄明	$y = -0.53x + 2641$ ($ R = 0.078$)	25
		夜	$y = -0.22x + 2576$ ($ R = 0.023$)	66

車両感知器までの渋滞通過時間を、ETC2.0プローブ車両の感知器通過時刻で感知器5分間交通量の渋滞巻き込まれ時間とした。5分間に複数台のETC2.0プローブ車両があった場合には平均値とした。

図-8にボトルネック群別の渋滞巻き込まれ時間とDCFの関係を示す。直線は回帰直線である。色分けは、青色が昼、橙色が薄明、紫色が夜である。

図より、各ボトルネック群ともに、渋滞巻き込まれ時間によるDCFの低下がわずかにある。

表6に回帰式と相関係数の絶対値を示す。表より、回帰係数は全てのカテゴリで負となっているが、相関係数を見ると、相関があると言える0.4以上は、全18カテゴリ中4カテゴリのみである。

また、図7の回帰直線の右端は、巻き込まれ時間0分付近のデータのバラツキ内となっている。

野中らも、渋滞巻き込まれ時間の影響が見られない地点を確認しており、地点特性が分析上の問題であるかなどを見極める必要があるとしている¹⁰⁾。

本論では、渋滞巻き込まれ時間がDCFへ与える影響は少ないと判断し、DCFに対して渋滞巻き込まれ時間の影響を考慮しないこととした。

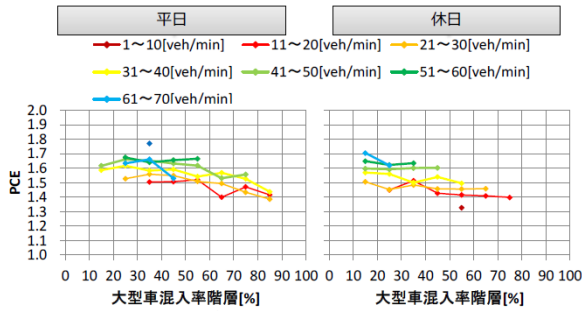


図-9 PCE 算出結果

(3) 小型車換算の交通容量

交通容量に影響を及ぼす要因の一つに大型車の混入による影響がある。前章までの渋滞先頭地点遷移の分析に際しては、遷移前後で大型車の混入率が極端に変わるとは考えにくいので、大型車の混入による影響はないものとして扱ってきた。しかし、交通容量を算出し、平日と休日の比較や昼夜の比較を行うに際しては、大型車の混入による影響は無視できない。そこで、本分析における交通容量の単位は、小型車換算交通量 (PCU) とする。

PCU を算出するには、PCE (大型車の小型車換算係数) が必要となる。PCE に関する既往研究は多数存在するが、加藤らが東名阪自動車道において大型車混入率階層別に分析をしている¹⁾。図-9にその結果を再掲する。本分析では、この結果から大交通量 (青線・緑線) の場合を参考として、PCE を平日・休日ともに全大型車混入率階層において 1.6 を用いることとした。

(4) 渋滞先頭地点遷移の交通容量

表-7に渋滞先頭地点遷移 1 回ごとに、遷移前後の交通容量を比較した結果の一部を、遷移一覧として示す。表は、表-5 のカテゴリ一別発生回数のうち複数回発生したカテゴリの遷移 106 回を対象としている。

表中、遷移前と遷移後の欄が交通容量であり、単位はともに PCU/時/2 車線である。

表において、遷移前の交通容量は全て DCF であるが、遷移後の交通容量は、下流遷移が BDF、上流遷移が DCF である。

表中、差分の欄は、交通容量の遷移前後差で、三角を付した遷移は、遷移に際し交通容量が大きくなった遷移である。表中、最下行が遷移回数の集計で、交通容量が小さくなる遷移が 47 回、交通容量が大きくなる遷移が 59 回となった。

渋滞先頭地点の遷移は、交通容量の大きな地点でたまたま渋滞が発生し、その後に交通容量の小さな地点へ渋滞の先頭が移動する場合もある。しかし、交通容量の大小では説明のできない渋滞先頭地点遷移があり、こちらのほうが多いということが分かった。

表-8 (次頁) に、表-7 の遷移で渋滞先頭地点遷移の前

表-7 遷移 1 回毎の交通容量の比較

遷移前 先頭地点	遷移後 先頭地点	年月日	遷移前	遷移後	差分 (前-後)
BN4	→ BN1	2016/1/10	DCF 3,288	BDF 3,144	144
BN4	→ BN1	2016/12/18	DCF 3,240	BDF 3,120	120
BN1	→ BN2	2016/1/21	DCF 3,216	DCF 3,072	144
BN1	→ BN2	2016/2/26	DCF 3,084	DCF 3,168	▲ 84
BN3	→ BN2	2016/1/7	DCF 3,216	BDF 3,228	▲ 12
BN3	→ BN2	2016/1/22	DCF 3,396	BDF 3,144	252
BN3	→ BN2	2016/1/26	DCF 3,288	BDF 3,228	60
BN3	→ BN2	2016/1/27	DCF 3,060	BDF 3,180	▲ 120
BN3	→ BN2	2016/2/12	DCF 3,156	BDF 3,204	▲ 48
BN3	→ BN2	2016/3/10	DCF 3,468	BDF 3,312	156
BN3	→ BN2	2016/3/25	DCF 3,132	BDF 3,108	24
BN3	→ BN2	2016/3/27	DCF 2,916	BDF 2,952	▲ 36
BN3	→ BN2	2016/8/3	DCF 3,624	BDF 3,432	192
BN3	→ BN2	2016/8/20	DCF 2,808	BDF 2,916	▲ 108
BN3	→ BN2	2016/10/18	DCF 3,228	BDF 3,132	96
BN3	→ BN2	2016/10/21	DCF 3,072	BDF 3,360	▲ 288
BN3	→ BN2	2016/10/22	DCF 2,976	BDF 3,216	▲ 240
BN3	→ BN2	2016/11/4	DCF 3,156	BDF 3,216	▲ 60
BN3	→ BN2	2016/11/13	DCF 3,108	BDF 3,336	▲ 228
BN3	→ BN2	2016/11/20	DCF 2,868	BDF 3,024	▲ 156
BN3	→ BN2	2016/12/6	DCF 3,036	BDF 3,096	▲ 60
BN3	→ BN2	2016/12/10	DCF 2,856	BDF 2,916	▲ 60
BN4	→ BN2	2016/2/11	DCF 3,216	BDF 3,264	▲ 48
BN4	→ BN2	2016/3/26	DCF 3,216	BDF 2,988	228
BN4	→ BN2	2016/11/5	DCF 3,216	BDF 2,916	300
~					
BN2	→ BN4	2016/8/2	DCF 3,528	DCF 3,252	276
BN2	→ BN4	2016/11/4	DCF 3,600	DCF 3,300	300
BN3	→ BN4	2016/2/4	DCF 3,504	DCF 3,528	▲ 24
BN3	→ BN4	2016/2/9	DCF 3,072	DCF 3,000	72
BN3	→ BN4	2016/2/25	DCF 3,576	DCF 3,528	48
BN3	→ BN4	2016/2/25	DCF 3,576	DCF 3,420	156
BN3	→ BN4	2016/2/27	DCF 3,372	DCF 3,336	36
BN3	→ BN4	2016/3/4	DCF 3,540	DCF 3,420	120
BN3	→ BN4	2016/3/25	DCF 3,420	DCF 3,396	24
BN3	→ BN4	2016/3/26	DCF 3,132	DCF 3,204	▲ 72
BN3	→ BN4	2016/3/31	DCF 3,456	DCF 3,360	96
BN3	→ BN4	2016/4/18	DCF 3,456	DCF 3,360	96
BN3	→ BN4	2016/4/19	DCF 3,432	DCF 3,300	132
BN3	→ BN4	2016/4/20	DCF 3,396	DCF 3,504	▲ 108
BN3	→ BN4	2016/7/3	DCF 3,132	DCF 3,228	▲ 96
BN3	→ BN4	2016/7/21	DCF 3,480	DCF 3,636	▲ 156
BN3	→ BN4	2016/7/25	DCF 3,468	DCF 3,528	▲ 60
BN3	→ BN4	2016/7/29	DCF 3,384	DCF 3,372	12
BN3	→ BN4	2016/8/23	DCF 3,360	DCF 3,372	▲ 12
BN3	→ BN4	2016/9/10	DCF 3,000	DCF 2,988	12
BN3	→ BN4	2016/9/15	DCF 3,204	DCF 3,384	▲ 180
BN3	→ BN4	2016/10/12	DCF 3,456	DCF 3,504	▲ 48
BN3	→ BN4	2016/10/18	DCF 3,432	DCF 3,540	▲ 108
BN3	→ BN4	2016/10/24	DCF 3,492	DCF 3,504	▲ 12
BN3	→ BN4	2016/11/10	DCF 3,384	DCF 3,612	▲ 228
BN3	→ BN4	2016/12/18	DCF 3,240	DCF 3,240	0
対象遷移回数 計106回	交通容量の低い地点への遷移 (差分が0を含む正の回数)				47回
	交通容量の高い地点への遷移 (差分が負の回数)				59回

後地点の組合せによる回数を示す。表において、欄内の右側括弧付き数字は、回数の内数で交通容量が大きくなる遷移の回数を示す。

a) 遷移の方向による発生状況

表-8 の上側三角の範囲が上流方向遷移であり、下側三角の範囲が下流方向遷移である。渋滞先頭地点遷移の上下流の状況は、上流側遷移が (2+5+16+4+24=) 51 回、下流側遷移が (18+2+3+32=) 55 回であり、遷移の方向は上下流でほぼ同じである。交通容量の大きくなる遷移は、上流方向遷移が 51 回中で (1+2+13+1+12=) 29 回と約 6 割弱、下流方向遷移が 55 回中で (12+0+1+17=) 30 回と約 5 割強となっており、交通容量の大きくなる遷移の発生状況に、遷移の方向（上流・下流）による違いは無いと言える。

b) 遷移の前後地点による発生状況

遷移前後地点の組合せによる遷移状況を見る。

表-8 より、遷移回数が二桁で遷移の発生が多いボトルネックの組合せは、BN2 と BN3 間と BN3 と BN4 間であり、他の組合せは一桁で且つ 5 回以下である。

遷移回数が二桁の BN2・BN3 間および BN3・BN4 間の遷移について、遷移の方向を見る。表-8 より、BN2・BN3 相互間および BN3・BN4 相互間の遷移は、ともに上流側遷移と下流側遷移の両方向ともにある。

遷移回数が一桁の遷移は、表-8 より、BN1⇒BN3、BN2⇒BN4、BN4⇒BN1、BN4⇒BN2 が隣接地点ではなく、BN1⇒BN2 は隣接地点であっても図-5 から分るとおり距離が遠い。

以上より、渋滞先頭地点の遷移の多くは、距離の短い隣接地点間で発生し、上流遷移・下流遷移の両方向ともに発生していることが分かった。

c) 多発する遷移の地点組合せの交通容量の大小

遷移が多発する BN2・BN3 相互間 BN3・BN4 相互間で、遷移に際して交通容量の大小を見る。

表-8 より、BN2・BN3 相互間および BN3・BN4 相互間の 4 つの遷移回数に占める交通容量の小から大への遷移回数は、全て半数以上となっている。

BN3・BN4 相互間では、交通容量の小から大への遷移の割合が約半数 (12/24 と 17/32) であり、BN2・BN3 相互間の同割合は (13/16 と 12/18) となっており、BN3・BN4 相互間のそれより大きい。いずれにしても、交通容量の小から大への遷移が、特定の地点間遷移に限定されているものではないことが分かった。

d) ボトルネックの交通容量

渋滞先頭地点が遷移する際に、遷移前後のボトルネックでは交通容量が拮抗していると考ええる。そこで、ボトルネックの交通容量を確認する。

図-10 (次頁) に、ボトルネック別の交通容量を四分位法の箱ひげ図で示す。ボトルネックの定義は、図-5 で

表-8 遷移 BN 組合せ別の遷移回数と交通容量大小

		遷移後				総計
		BN1	BN2	BN3	BN4	
遷移前	BN1		2 (1)	5 (2)		7 (3)
	BN2			16 (13)	4 (1)	20 (14)
	BN3		18 (12)		24 (12)	42 (24)
	BN4	2 (0)	3 (1)	32 (17)		37 (18)
計		2 (0)	23 (14)	53 (32)	28 (13)	106 (59)

() は内数で交通容量小から大への遷移回数

説明したとおり、渋滞先頭地点の揺らぎを考慮した範囲を持っている。交通容量は、5 章 1 節で定義した BDF と DCF の 2 種類とし、値は 5 章 3 節で定義した PCE=1.6 とした PCU (PCU/時) で示す。また、交通容量は 4 章 2 節で定義した要因の平休・昼夜に区分した。図中の数値は中央値を示している。また、図中右側の括弧書きはサンプル数を示し、サンプル数が 10 未満は参考である。

全ボトルネックからデータ数が多い平日の昼間の DCF に着目をして、ボトルネック間の交通容量を見る。

図より、平日・昼の DCF において、BN2~BN4 の箱ひげ図の箱である四分位範囲は、相互に重なっていることが分かる。一方、平日・昼の DCF の BN1 の箱は、BN2~BN4 の箱とは重なっていない。よって、BN2~BN4 間では、交通容量が拮抗しており、BN1 とは交通容量が拮抗していないと言える。

各ボトルネックの交通容量の拮抗状況と、表-8 の遷移回数の多少 (BN2~BN4 は多く、BN1 は少ない) とは、整合していることが分かった。

(5) 渋滞先頭地点遷移と交通容量のまとめ

本章の結果をまとめると、渋滞先頭地点の遷移は、

- ・距離の短い隣接ボトルネック地点間で多発する。
- ・渋滞先頭地点の遷移に際し、交通容量が大きくなる遷移がある。
- ・渋滞先頭地点の遷移は、交通容量が拮抗しているボトルネック間で多発する。

ということが判明した。

次章以降では、この交通容量の大小関係で説明できない遷移について考察をする。第 6 章では、渋滞先頭地点遷移のメカニズムを考察し、第 7 章では、そもそも交通容量の算定に問題はなかったのかの確認をする。

6. 渋滞先頭地点遷移メカニズムの推定

本章では、「渋滞先頭地点の遷移に際し、交通容量が大きくなる遷移がある」という前章の結果について、そのメカニズムを推測し、推測したメカニズムに関して既往研究との整合を確認する。

発生した渋滞の過半数 (72/139) で渋滞先頭地点の遷移が起こり、渋滞先頭地点遷移の過半数 (59/106) で交

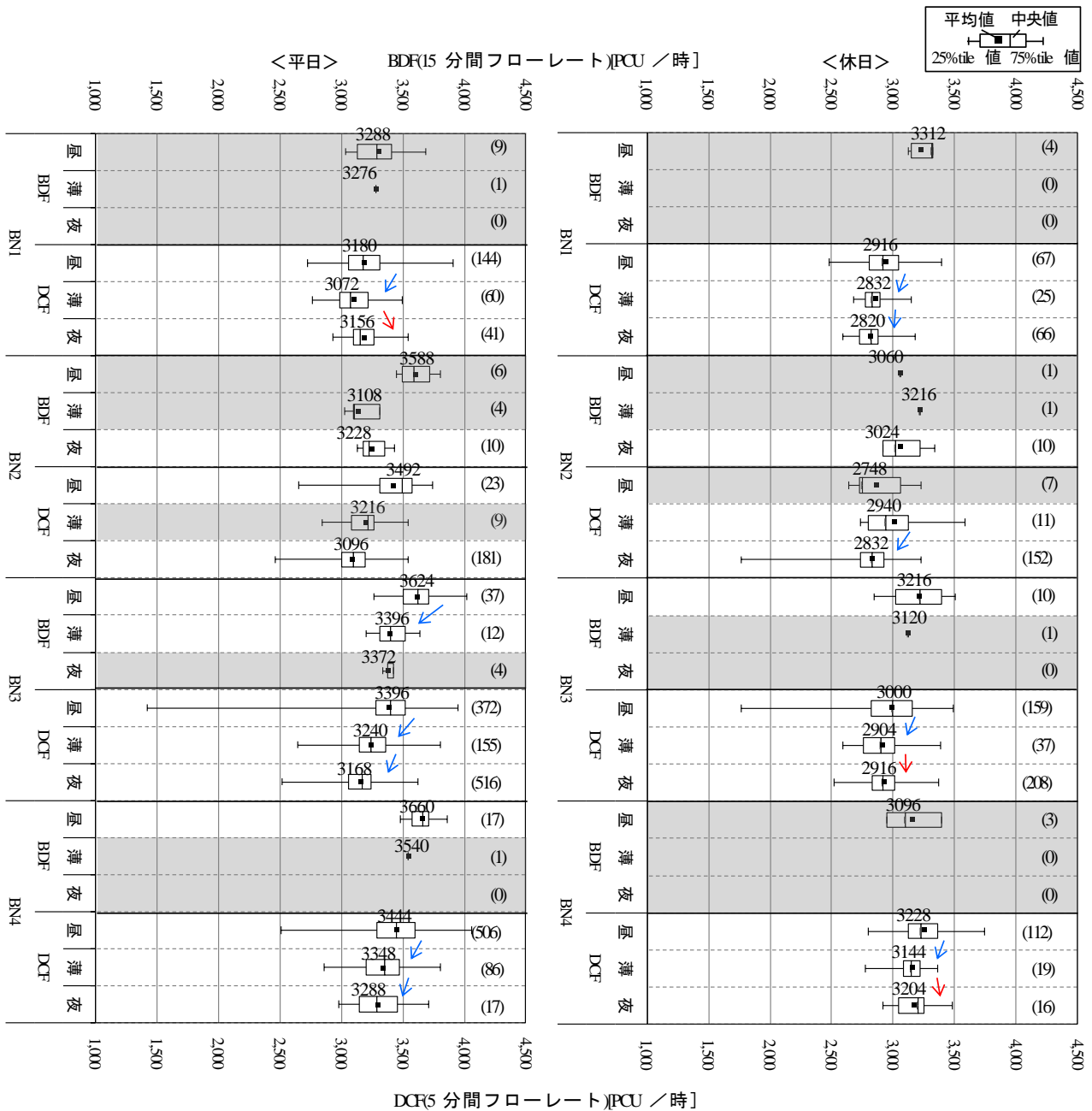


図-10 ボトルネックの交通容量

通容量が大きくなっていた。このことから、渋滞先頭地点の遷移は偶発的に発生したのではなく、何らかのメカニズムがあると思料する。そのメカニズムとは、交通流の基本的な性質（または真理）に起因しているものと考えられる。基本的な性質でなければ、頻繁に発生する筈が無いと考える。この遷移のメカニズムが交通流の基本的な性質であるならば、過去の既往研究にもその一旦が表れていた筈である。そこで、メカニズムの推定を行うとともに、推定したメカニズムの既往研究との符合を確認するものである。

渋滞先頭地点遷移には、下流遷移と上流遷移の両方向があった。下流遷移は DCF から BDF であり、上流遷移は DCF から DCF として交通容量を比較した。

遷移のメカニズムも下流遷移と上流遷移とは異なるとも思えるが、メカニズムが基本的な交通流の性質であるならば、遷移の方向に関わらず共通するものと考えて、遷移方向を区分せずに推定をする。

(1) 渋滞先頭地点遷移メカニズムの推定

渋滞先頭地点が交通容量の小さな地点から大きな地点へ遷移するメカニズムとして考えたものは、『車群の大きさが時々刻々と変化する』というものである。

ボトルネックに大きな車群が到着し渋滞に至る事は、越らが「追越し車線を漫然とあるいは意図的に比較的低速で走行する車両のために、より高速の車が追い越しをするのを妨げられて大きな車群が形成されてしまう」¹²⁾

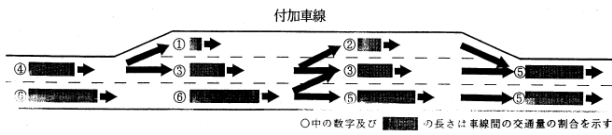


図-11 車線利用率のイメージ

と述べている。これは、渋滞発生時 (BDF) のメカニズムを説明したもので、渋滞発生直前の追越し車線利用率は 60%に達し、渋滞発生後には 50%になるといわれている。

筆者らは、越らが言う「大きな車群」が「時間と場所を問わずに発生する」と推定をした。『追越し車線への車両の偏りで大きな車群の発生が、渋滞下流はもとより渋滞内であっても起こり、渋滞先頭地点が下流方向や上流方向に遷移をする』というのが筆者らの推測である。

この推測が、過去研究の成果と符合するか否かを確認することで、この推測の妥当性を検証する。

(2) 追越し車線への車両の偏り

筆者らの推測の根幹である『追越し車線への車両の偏り』について既往研究を確認する。

図-11 に車線利用率のイメージを示す。図は栗原らの論文¹³⁾からの再掲である。図中の黒い四角が車線利用率を表している。図の意味するところは、右端のボトルネックに対して直前の左側に付加車線を設置すると、ボトルネックでの車線利用率が平準化し BDF を増加させられるということである。

BDF の車線利用率が追越：走行=6:4 (図左端) であるところを、DCF と同様の 5:5 (図右端) へ、ボトルネック直前付加車線の設置で車線利用率を変えることで断面としての交通容量を増加させられるというものである。

図の付加車線が無い通常の単断面の車線運用においては、車線利用率が渋滞発生前には図左端の追越：走行=6:4 となり、渋滞発生後には図右端の同 5:5 となる。

筆者らは、図右端の車線利用率が 5:5 の DCF の状態から、図左端の 6:4 に近い状態になることが、頻繁に発生すると推測したのである。

図-12 に追越し車線への車線変更の事例を示す。図は、邢らの研究¹⁴⁾からの再掲で、東名高速道路上り線の秦野中井 IC 付近のサグにおける渋滞発生前の追越し車線の 1991 年 7 月 28 日 (日) の各車両の走行軌跡である。

図中に追記したとおり、14 時少し前に kp46.85 付近で新たな車両が発生している。この車両は走行車線から追越し車線へ車線変更をしてきた車両である。

図中に示した追越し車線への車線変更が、渋滞を抜けた直後はもとより、渋滞中においても発生するというのが筆者らの推測である。

下流方向への渋滞先頭地点の遷移は、渋滞 (車線利用

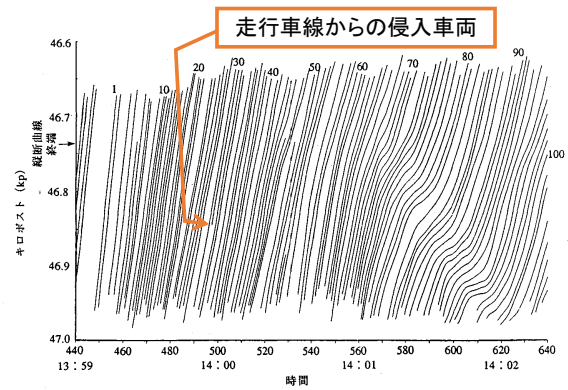


図-12 ショックウェーブの始まり

率が 5:5 の DCF) を抜けた後に、追越し車線への車両の偏りが発生することで、下流にて再度ショックウェーブが発生することで説明が出来る。

しかし、上流側への遷移では、渋滞中において、走行車線から追越し車線へ車線変更が行われ、追越し車線への車両の偏りが発生しなければならない。追越し車線への車両の偏りというのは、渋滞が終わったとの認識をして、少しでも先を急ごうとしての行動と推定するが、渋滞中における渋滞が終わったと誤認させる交通状態とは如何なものであろうか。

ここからは、上流遷移に限定して推定の妥当性を確認する。

渋滞中で渋滞が終わったかのような交通流の状態とは、一つが高速度渋滞流であり、いま一つが渋滞疎密波の疎部であると考えられる。

次節以降で、高速度渋滞流と渋滞疎密波について、既往研究を参照し、渋滞渦中においても追越し車線へ車両が偏るとい推測が成立するかを確認する。

(3) 高速度渋滞流

本節では今回分析対象とした鈴鹿～四日市間が渋滞渦中でも速度が高くなるという様子を確認する。

図-13 に今回対象区間を含み上流側をも含んだ速度の様子を示す。図は筆者らの渋滞迂回行動の分析¹⁵⁾からの再掲で ETC2.0 走行履歴による速度状況を示したものである。速度の色 (速度階級) は図-3 に同じである。図中に示した「3 車線から 2 車線へ絞り込み」の箇所は亀山ジャンクションの合流加速車線の終端である。

図より、「3 車線から 2 車線へ絞り込み」と示した箇所を境として、渋滞中の速度を示す色で見て、左側は真っ赤であるのに対し、右側は橙や黄色のある事が分る。今回の分析対象区間は、上流側に東名阪と新名神が合流する亀山ジャンクションがあり、このジャンクションで合流をする手前では極端に速度が遅いが、ジャンクションを通過すると速度が高くなり、渋滞が終わったとの認

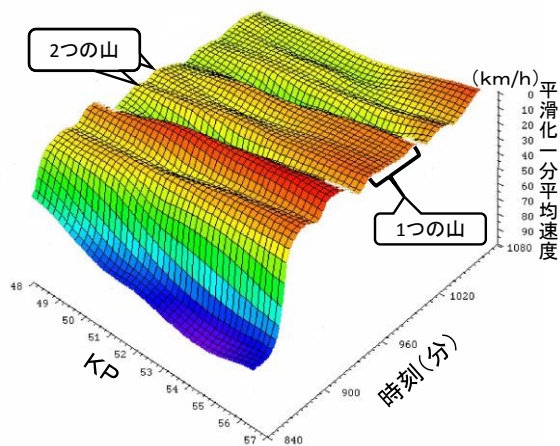


図-16 渋滞疎密波の発生状況

においては、渋滞疎密波の波長や周期が、ボトルネックから上流に遡るに従い、長くなっている。この波長(図-14)と周期(図-6)における、ボトルネックから遠ざかるに従い増加する現象について確認をする。

何故、このことを確認するかを以下に述べる。

渋滞疎密波の波長や周期が、ボトルネックからの距離で変化するという事は、ショックウェーブが上流伝播に際して、変化をしているということである。すると、渋滞疎密波の疎部についても上流伝播に際して変化を考えると考えられ、疎部という隙間が継続して上流へ遡らずに、上流伝播の途中で無くなり、追越し車線への車両の偏りが起こり難くなるのではとの懸念を確認する。

図-16に渋滞疎密波の状況を示す。図の縦軸は速度(km/h)であり、縦軸の上側が低速領域で下側が高速領域である。図の平面左軸はKPであり、図の路線は東名上り線であり秦野中井IC付近である。進行方向は、軸の右から左となる。図の平面右軸は時刻であり0時00分からの経過分として表示している。図の平面右軸900(分)とは、15時00分のことである。図中、車両は手前から奥へと進行する。図は1991年7月28日(日)の東名上り線追越し車線のものである。

図-16の元データは、概ね2km間隔に設置したダブルループコイル式車両感知器からパルスを集計し、1分毎に集計をした1分間平均速度を元とし、時間軸方向および距離軸方向ともに平滑化処理を行って描画したものである。図の波形表面に表示する黒線のメッシュは200m×5分の日盛り線である。

図-16より、KP48で840分+5目盛り×5分=14時25分頃から黄色となり渋滞の第一のショックウェーブ(渋滞疎密波の密部)が発生し、KP57に到達したのは840分+10目盛り×5分=14時50分頃であると分る。このように、図の波形の尾根に相当する部分が渋滞疎密波のショックウェーブである。

図-16においてKP48付近で発生したショックウェーブ

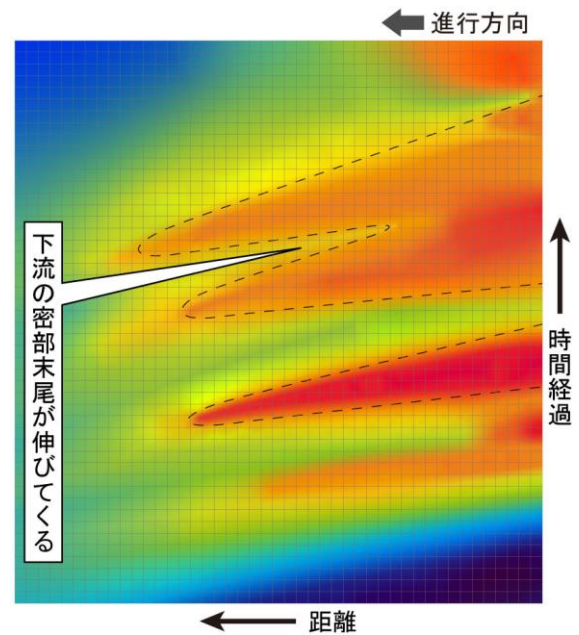


図-17 渋滞疎密波の発生状況の模式図

のうち「2つの山」と示す3番目と4番目の尾根が、9km上流のKP57へ伝播した時には図中に「1つの山」と示すとおり一つの大きな台地状に合成していることが分る。これは、渋滞のショックウェーブ(渋滞疎密波の密部)がボトルネックから上流へ伝播するに際し、前後のショックウェーブが一つにまとまる様子を表している。

渋滞渦中では、ショックウェーブが上流へ伝播するに際して、二つのショックウェーブが一つに合成することがあると判った。このことから、図-6や図-14において、渋滞疎密波の周期や波長がボトルネックから遠ざかるに従い長くなるという結果となっているものと思料する。

渋滞ショックウェーブが上流伝播に際して疎密波の合成が発生するというのは、渋滞疎密波の疎部が無くなり、追越し車線への車両の偏りが起きにくくなって、渋滞先頭地点の上流側遷移が起こりにくくなると思われる。

渋滞のショックウェーブが合成する理由を考えてみる。

図-17にショックウェーブの上流伝播の様子を模式的に表したものを示す。図-17は、図-16を上方より俯瞰して平面的に表したものである。

図-17は、4番目のショックウェーブが3番目のそれと繋がる時には、4番目のショックウェーブの末尾が伸びることで3番目のショックウェーブと繋がってしまうという様子を示したものである。

ショックウェーブの末尾が伸びるというのは、車両が複数のショックウェーブを通過し「またか」となり余裕を持って減速をすることでショックウェーブの末尾が伸びると推定される。このような渋滞低速部末尾において、複数台前方のブレーキランプやハザードランプを見て、後方の車両が車間距離に余裕を持って減速し低速部の末尾に着くという現象は、筆者らが日常の道路管理におい

でも、頻繁に目撃しているものである。

この現象を追従挙動として考えると、追従挙動の鈍化と言えよう。つまり、渋滞巻込まれ時間の増加に伴い捌け交通量が低下するという既往研究¹⁰⁾とも符合する。ショックウェーブの経験回数が渋滞巻込まれ時間であり、経験回数の増加が巻込まれ時間の増加となって追従行動が鈍化し捌け交通量が低下すると考えられる。

今回対象とした区間では、渋滞巻込まれ時間の増加に伴う捌け交通量の低下が見られなかった(図-8)。ということは、今回対象区間では、渋滞疎密波のショックウェーブが合成しないと考えられる。

図-18 に、東名阪の今回対象区間における、渋滞疎密波の状況を推定した模式図を示す。図に示すとおり、全てのショックウェーブは合成することなく上流へ伝播し続けると考える。

すると、運転者は、渋滞疎密波の疎部を渋滞上流であっても経験し、「渋滞は終わった」ものと認識して、追越し車線への車両の偏りが発生し、大きな車群に成長し、渋滞渦中のボトルネックにおいてもショックウェーブが発生することになる。

本章の3節から本節までにより、今回分析対象区間の東名阪では、ジャンクションでの合流後で渋滞中の速度が上昇し、運転者の渋滞が終わったとの認識により、走行車線の低速車両を追い越そうとして、渋滞渦中であっても追越し車線への車両の偏りが発生する。その渋滞渦中の追越し車線への車両の偏りを可能とする渋滞疎密波の疎部の継続的な上流への伝播も推定された。

以上より、今回分析対象区間の東名阪では、ボトルネックのBDFを超える大きな車群が発生し、渋滞先頭地点の上流遷移が起こると推定する。

次節では、渋滞疎密波の疎部の延長が、追越し車線への車両の偏りからBDFを超える大きな車群の生成に充分であるか否かを確認する。

(6) 渋滞疎密波疎部の長さの妥当性

本章4節で得た、渋滞疎密波の疎部の延長の約1.8kmという長さが、追越し車線への車両の偏りからショックウェーブを発生させるだけの大きな車群を生成し得るかの検証を行う。

図-16の東名における第3ショックウェーブと第4ショックウェーブの合成までの距離は、kp48で発生しkp57で合成していることから、9kmということになる。渋滞疎密波の疎部の1.8kmは、ショックウェーブが合成するまでの9kmより十分に短いので、第3ショックウェーブの後に第4ショックウェーブが発生したと考える。

図-16では、kp48において繰り返しショックウェーブが発生していることから、1.8kmの渋滞疎密波疎部があれば、同一のボトルネックにおいて繰り返しショックウ

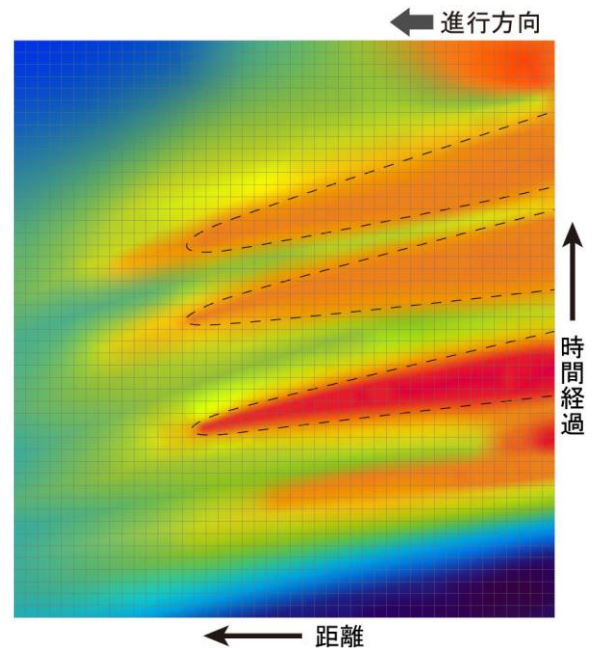


図-18 渋滞疎密波の発生状況(東名阪の推定)

ェーブが発生するということになる。

さらに、この疎部延長1.8kmという長さが、追越し車線への車両の偏りからショックウェーブを発生させるだけの大きな車群に成長し得るかを他の既往研究からも確認を行う。

図-19(次頁)にBN1での渋滞先頭からの速度回復状況を示す。図は筆者らの既往研究¹⁰⁾からの再掲である。図に示す細線は、ETC2.0プローブの一台毎の走行履歴の速度を示している。図中に示す太線は、これら一台毎の速度の地点平均を表している。橙は四日市ICから下流(図中右側)での暫定三車線運用後であり、水色は同運用前である。

図より、水色の場合には、渋滞先頭から約1kmで通常速度(規制速度の80km/h)に回復している。このことは、運転者が渋滞を通過したとの認識から1km進行した時には通常の走行速度に戻るということである。

このことから、渋滞が終わったとの誤認から追越し車線への車両の偏りが始まるのには1kmもあれば充分であると言えよう。

(7) 渋滞先頭地点遷移メカニズムのまとめ

本節では、本章における渋滞先頭地点遷移の原因となるメカニズムを推測し、既往研究との符合を確認した。

筆者らは「追越し車線への車両の偏りが、時間と場所を問わずに起こり、大きな車群が出来て、この車群の大きさが、現在発生している渋滞の先頭地点とは異なるボトルネックのBDFを超えることで、渋滞先頭地点が遷移する」と推定をした。

下流側への渋滞先頭地点遷移は、この推定で説明が付

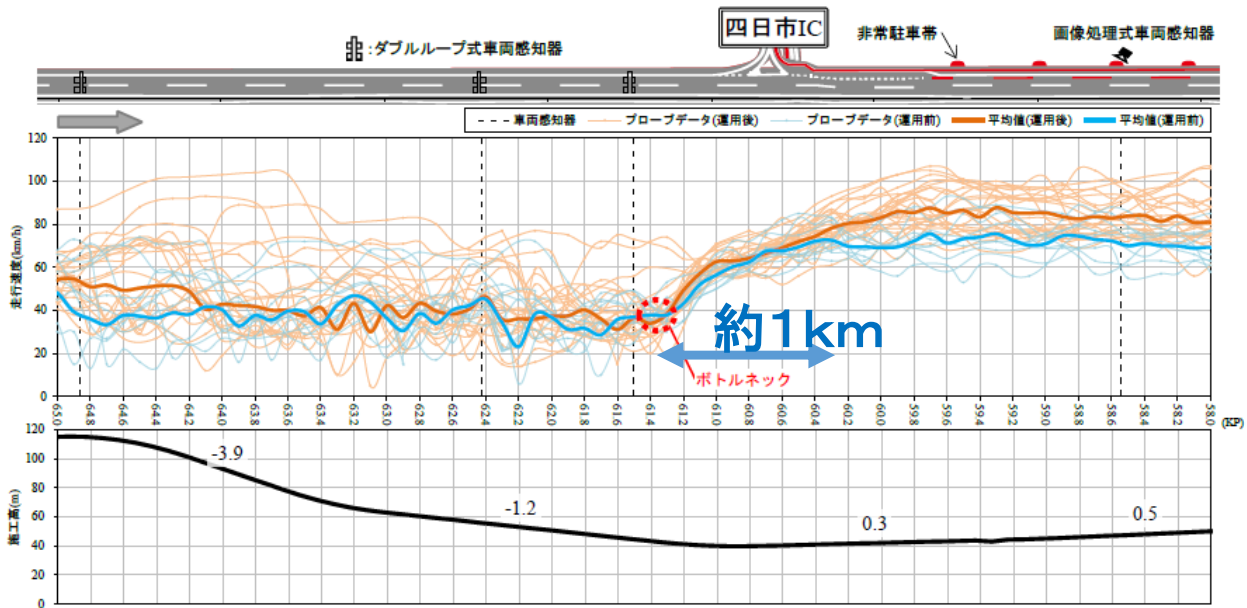


図-19 渋滞先頭からの速度回復状況

くが、上流側への遷移について、追越し車線への車両の偏りが起こるのかを既往研究で確認した。

上流側遷移となる渋滞渦中での追越し車線への車両の偏りが、渋滞疎密波の疎部で起こると考え、渋滞疎密波の性状を確認した。

渋滞疎密波の疎部は、ボトルネック付近では、波長約 3km 中に約 1.8km 存在することを得た。この疎部 1.8km 中で追越し車線へ車両が偏るであろうことを、ボトルネックからの発進流が約 1km で通常速度に戻ることから、十分に起こりうると確認をした。すなわち、渋滞の先頭地点では、渋滞疎密波の疎部により、追越し車線へ車両の偏りが起こり、ボトルネックを通過出来ない大きな車群が発生した時に、次のショックウェーブが発生するという事を繰り返すと考えた。

渋滞疎密波の上流への伝播に際しては、渋滞疎密波が合成することを明らかとした。渋滞疎密波が合成を起こす原因を、追従挙動の低下であると推定した。

今回対象の東名阪では渋滞巻込まれ時間の増加による DCF の低下が見られないことから、東名阪では追従挙動が低下が起こらずに、渋滞疎密波の合成も起こらないと推定した。渋滞疎密波の疎部 1.8km が、ボトルネックで発生した形状のまま上流へ伝播し、上流において渋滞渦中でも渋滞疎密波の疎部が存在することで、ボトルネックと同様にショックウェーブからの発進流（車線利用率 5:5）から、疎部 1.8km を進行する間に追越し車線への車両の偏りが起こり、追越し車線に大きな車群が出来て、大きな車群が通過することの出来ない交通容量の拮抗するボトルネックの存在により、そのボトルネックでショックウェーブが発生し、渋滞先頭地点の遷移が起こ

ると推定した。

今回対象の東名阪において追従挙動が低下しない理由は、今回対象区間がジャンクションでの合流直後であり、高速度渋滞流であることが、大きな要因であると考えた。

よって、渋滞先頭地点が遷移をするというのは東名阪の特有の現象と考える。

一方で、渋滞先頭地点遷移の原因となる交通流のメカニズムであるところの「追越し車線への車両の偏り」からくる「大きな車群の生成」は、一般的な交通現象であると考えられる。というのは、下流側への遷移、下流での別の渋滞の発生、同一渋滞内での渋滞先頭地点における、ショックウェーブの繰り返し発生も、この車群の変化で説明が付くからである。

また、大きな車群の生成のみならず、出来た車群の解消も、車群の先頭車両が走行車線へ復帰すれば起こる訳であるから、追越し車線であれ、走行車線であれ、『車群が時々刻々と変化している』というのが、筆者らの推定するところである。

ここで、車群が時々刻々と変化するという事に関して、既往研究との符合を確認する。その既往研究とは、渋滞発生確率¹⁷⁾である。

追越し車線への車両の偏りによる大きな車群の発生とその解消は、渋滞中のみに関わらず、自由流においても時々刻々と起こる交通流の基本的な性質と考える。2車線の道路で追越し車線と走行車線の車線利用率が 6:4 になって渋滞が発生するが、渋滞が発生しない程度の車群でも片方向全車線交通量は大きくなる場合もある。

車線利用率が 55:45 の場合で追越し車線の車群がショックウェーブを発生させる交通量に僅かに達しなければ、

ショックウェーブは発生せず渋滞はしない。この時の片方向全車線交通量は、ショックウェーブが発生した時の車線利用率 6:4 の片方向全車線交通量より大きくなるのは自明である。

このように、車線利用率が 6:4 であったり 55:45 であることが頻繁に発生するので、実態の渋滞発生確率は 100% を観測することが無い。つまり、車群状況が時々刻々と変化するということが、自由流であれ渋滞渦中であれ、頻繁に起こっていると考えられる。

以上より、渋滞先頭地点が遷移するというのは、自由流であれ渋滞流であれ、車群が時々刻々と変化をし、渋滞に至る大きな車群が発生する時間的・場所的タイミングにより、起こるものとする。

渋滞先頭で 2 回目のショックウェーブが発生する場合においては、車群が時々刻々と変化をすることで、先行するショックウェーブからの発進流（DCF であり車線利用率は 5:5 となる）から、次のショックウェーブが発生するまでの間の疎密波疎部（約 1.8km）において、車線利用率が 6:4 に変化し、次のショックウェーブの発生に至ると考える。このことを繰り返すことで、渋滞先頭地点が定着する。

また、渋滞先頭地点が上流へ遷移をする場合においては、渋滞疎密波の疎部の上流への遡上により、渋滞渦中においても、ショックウェーブからの発進流から追越し車線への車両の偏りと、大きな車群の生成が起り、交通容量が拮抗するボトルネックがあつて、そのボトルネックの BDF を通過出来ない大きな車群が出来た時に、そのボトルネックでショックウェーブが発生し、渋滞先頭地点が遷移すると推定する。

7. 交通容量算出方法の妥当性確認

本章では、交通容量の算出方法にそもそも問題は無かったのかとの観点で、前章の推定を踏まえ確認を行う。

(1) 離隔距離

6 章において、渋滞疎密波の疎部 1.8km の中で、車群の大きさが変化し、大きな車群が発生しショックウェーブを引き起こすと推定した。すると、このショックウェーブを引き起こした交通量を観測するのに、設置間隔 2km の車両感知器では、ショックウェーブの発生位置と車両感知器の位置との関係によっては、ショックウェーブを生起させた大きな車群の交通量を観測出来ないということになる。ボトルネックと車両感知器との位置関係を確認する。

前掲の図-5 からボトルネック位置を、図-4 から車両感知器位置を得る。

図-5 の BN1 の発生最頻値 kp61.2~kp61.4 に対し、図-4

の車両感知器は VD1 が kp61.5 であり、離隔距離は 0.3km である。同様に、BN2 は kp66.0~kp66.2 に対し VD3 が kp67.2 と離隔距離 1.2km、BN3 は kp67.2~kp67.4 に対し VD3 が kp67.2 と離隔距離 0.2km、BN4 は kp68.6~kp68.8 に対し VD5 が kp69.2 と離隔距離 0.6km となっている。

離隔距離の少ない 2 つのボトルネック間の渋滞先頭地点遷移における交通容量の大小関係を確認する。離隔距離の少ないボトルネックは、BN1 と BN3 である。表-8 において、BN1 から BN3 への全 5 回の遷移中で、交通容量が大から小となったものが 3 回、小から大となったものが 2 回あり、離隔距離が少なくとも交通容量の大小関係は一定していない。

次に、離隔距離の大きな 2 つのボトルネック間も見る。離隔距離の大きなボトルネックは、BN2 と BN4 間である。表-8 において、BN2 と BN4 との遷移は、上流遷移が 4 回のうち交通容量大となる遷移が 1 回、下流遷移が 3 回のうち交通容量大となる遷移が 1 回となっている。離隔距離が大きくても交通容量の大小関係は一定していない。

また、表-7 の上から 5 行目から続く「BN3→BN2」の下流遷移における、交通容量の差分を見てみると、DCF から BDF となる遷移であるにも関わらず、値が正で交通容量が小さくなる場合も多々見られる。

次節以降では、BDF や DCF の交通容量の算出に際して、そもそも問題は無かったのかを確認する。

(2) BDF の交通量

今回の分析に際して BDF は、片方向全車線計とし、単位時間は岡村らの論文²⁾ から渋滞発生前 15 分間交通量とした。

6 章の考察において、渋滞のショックウェーブの発生状況を、邢らの研究¹⁹⁾ から見たが、この研究で邢らは、「車群の 95~97 台目でほぼ停止」、「この車群は…約 3 分間」と報告している。3 分間約百台をフローレートにすると、2000 台/時/追越し車線となる。これが車線利用率 6:4 であるなら、片方向全車線計のフローレートは、約 3300 台/時ということになる。

これと本結果とを対象してみる。

邢らの研究と同様の休日昼間における本研究の BDF は、図-10（前掲）より中央値が、BN3 で 3216PCU/時/2 車線（n=10）と、BN1 で 3312PCU/時/2 車線（n=4）となっており近い値となっている。さらに、邢らの報告より得た 3300 台/時は、BN1 と BN3 の BDF の四分位範囲内にあり、妥当なものと言えよう。

しかし、表-7 のように一つ一つの遷移を見るようなミクロな分析をする際には、邢らの報告にあるとおり、追越し車線に着目し 3 分間交通量を算出することが良いものとする。

遷移をマイクロに考えてみる。ここで、追越し車線でショックウェーブを生起させた交通量を、FCS (Flow Created Shockwave) と呼ぶこととする。

渋滞渦中で何度もショックウェーブが発生している状態において、一つのショックウェーブの上流側交通量は、先行するショックウェーブの捌け交通量である。すると、一つのショックウェーブの上下流交通量は、渋滞巻込まれ時間の増による捌け交通量の低下が無いという前提で、同じということになる。つまり、一つのショックウェーブの需要交通量と供給交通量は同じである。これを追越し車線に限定してみると、ショックウェーブからの発進流の追越し車線交通量は車線利用率 5:5 として DCF/車線数となるが、次のショックウェーブを起こす FCS の時には車線利用率が 6:4 となり DCF/車線数より大きくなる。ショックウェーブの上下流の片方向全車線交通量は同一であるので、車線利用率の違いのみで DCF/車線数 < FCS となる。

つまり、渋滞の先頭地点が一地点に留まる場合も、渋滞の先頭地点が遷移する場合も、追越し車線交通量のみを見た場合には、常に DCF/車線数 < FCS となる。

FCS が一定であったとしても、その時の車線利用率が一定ではない(走行車線の車群状況が一定ではない)ことで、片方向全車線交通量が変化する。

渋滞先頭地点が遷移するか否かと同一渋滞先頭地点で渋滞が定着するかは、メカニズムとしては追越し車線の車群が FCS を超過するかしらないかで同一である。ショックウェーブが発生するかしらないかは、追越し車線の車群の大きさと FCS との関係で決まり、FCS が拮抗するボトルネックがあれば渋滞先頭地点が遷移すると考える。

以上のとおり、マイクロでみると、ショックウェーブの発生は、追越し車線の車群と FCS との関係とによって起こると言えよう。

マクロに戻ってみると、図-10 の BDF が分布を持つのは、FCS 時の車線利用率の相違や集計時間 (3 分と 15 分) の相違、ボトルネックと交通量観測位置との離隔などによるものと考えられる。

FCS の追越し車線 3 分間交通量ということが妥当であることを既往研究から確認する。筆者らが渋滞判定の単位時間を決めた研究¹⁹⁾では、交通管制システムの全面リブレースに際し、車両感知器の観測速度から渋滞を判定する方法の見直しを行っている。新しくなった交通管制システムにおける渋滞判定は、車線毎に 1 分移動 3 分間平均速度により判定することとした。この車線毎 3 分間と邢らが報告した追越し車線 3 分間という時間が一致しているのである。つまり、渋滞開始を判定する 3 分とショックウェーブを生起させた車群 3 分間の時間が一致しており、マイクロな分析をする際には、追越し車線に着目し 3 分間交通量を見るというのは妥当であろう。

以上より、BDF については、渋滞発生前 15 分間交通量 (台/時/片方向全車線計) で問題はないが、マイクロな分析をする際には、FCS を見る方が良いと言えよう。

(3) DCF の交通量

今回の分析に際して DCF は、片方向全車線計の 5 分間交通量とした。

図-10 (前掲)における箱ひげ図のひげの左右端の範囲である最少最大の範囲 (レンジ) は、BDF と DCF とを比較すると、BDF が狭く DCF が広がっている。そもそも BDF と DCF とではデータ数が大きく異なるものの、DCF はバラツキが大きいのと言えよう。

DCF がバラつく理由は、渋滞疎密波によるものと考えられる。渋滞中の QV 関係は正比例することが過去の様々な研究で報告されている。車両感知器の 5 分間の平均速度が高く交通量の大きな時間帯は、渋滞疎密波の疎部が車両感知器を遡上している時間帯であり、平均速度が低く交通量の小さな時間帯は、渋滞疎密波のショックウェーブが遡上している時間帯である。

車両感知器がボトルネックに近い位置にあると、疎密波の周期 10 分のうち、疎部が 60% で 6 分となり密部 (ショックウェーブ) が 40% の 4 分となることは前述の説明から自明である。これを 5 分間隔で観測すると、疎部と密部とを交互に観測することとなり、5 分間交通量がバラつくことになる。図-10 では DCF のバラつきから代表値として中央値を明示した。バラつく DCF を中央値で見れば疎密波の影響を回避出来ているように思えるが、ボトルネックと車両感知器との位置関係によっては中央値が必ずしも妥当ではない。

図-6 の最大周期約 25 分で渋滞疎密波の疎密割合 6:4 とすると、疎部が 15 分で密部 10 分となり、5 分間交通量の個数とすると、疎部が 3 個、密部が 2 個となり、DCF を 5 分間交通量の中央値で代表させることは、交通量の大きい疎部側に偏ることになる。

DCF の算出にあたっては、ボトルネックと車両感知器との離隔を考慮した渋滞疎密波周期によって DCF 算出の単位時間とすることが、安定し正確な DCF の算出になると言える。

なお、表-7 での DCF は、当該渋滞定着における同一昼夜区分である時間帯の全ての 5 分間交通量の平均としている。ボトルネックと車両感知器との離隔距離の最大は BN2 の 1.2km であった。離隔距離 1.2km の BN2 では、渋滞疎密波の周期が図-6 (前掲)によると約 15 分となり、疎密割合は疎部 9 分、密部 6 分と想定され、若干正確性を欠いていたと言えよう。

(4) 交通容量算出方法の妥当性確認のまとめ

BDF の算出では、今回の渋滞発生前 15 分間交通量で

概ね妥当であるとの結果を得た。ただし、渋滞ショックウェーブの発生や渋滞先頭地点遷移を分析するようなマイクロな現象を分析する場合にあっては、追越し車線に着目をした3分間交通量（FCS）が良いとの結果を得た。

DCF の算出では、ボトルネックと車両感知器との離隔距離に基づく渋滞疎密波の周期を単位時間としたDCFとすることが望ましいとの結果を得た。

8. あとがき

東名阪自動車道上り線の鈴鹿 IC～四日市 IC 間における、渋滞先頭地点の遷移を把握した。遷移に際する遷移前後の交通容量を分析した。結果は、139 渋滞のうち過半数の 72 渋滞で渋滞先頭地点の遷移が発生しており、106 回の遷移の中で、交通容量の小さい状態から大きい状態となる遷移が過半数の 59 回であることを確認した。

渋滞先頭地点の遷移がおこる原因の推定では、渋滞先頭地点が遷移をするメカニズムとして、『車群が時々刻々と変化している』との推測を行い、渋滞疎密波やショックウェーブ発生の際の研究との整合を確認した。

『車群が時々刻々と変化している』との推定は、渋滞先頭地点が同一地点で遷移しない場合においても、ショックウェーブが繰り返し発生することを説明できた。渋滞渦中において上流の別なボトルネックへ渋滞先頭地点が遷移する場合も、渋滞疎密波疎部が上流への遡上することで、渋滞疎密波疎部により大きな車群が出来てショックウェーブが発生することで、渋滞先頭地点が遷移することとなるとの推定を行った。ただし、渋滞先頭地点遷移は、東名阪における特有の事象と推定した。

交通容量の算出に際しては、一つ一つのショックウェーブの発生や、別のボトルネックでの新たなショックウェーブの発生である渋滞先頭地点の遷移というマイクロな分析を行う場合の交通容量にあっては、追越し車線に着目した3分間交通量が良いとの見識を得た。この時に、交通量を観測する車両感知器とボトルネックとの離隔距離に配慮する必要も見出された。

結論としては、渋滞の継続が、先行するショックウェーブ先頭の発進流の状態から、短い渋滞疎密波疎部（約 1.8km）の車両通過で、追越し車線への車両の偏りが起こり、ボトルネックを通過出来ない大きな車群が生成され、再度ショックウェーブが発生することで、渋滞の継続となると推定した。このメカニズムは、渋滞の先頭が同一地点に留まる場合であっても、渋滞の先頭が他のボトルネックに遷移する場合であっても、共通して適合するメカニズムであった。

東名阪で渋滞先頭地点が上流へ遷移をするのは、交通容量の拮抗するボトルネックが近接して存在し、かつ、渋滞巻き込まれ時間の増に伴う渋滞捌け交通量の低下が無

いことから、渋滞疎密波の形状が渋滞先頭地点で発生したままの形で上流へ伝播することで、上流においても渋滞先頭地点と同じ形状の渋滞疎密波疎部が存在することで、渋滞先頭地点と同じように追越し車線への車両の偏りから大きな車群の生成で、渋滞内の別のボトルネックでショックウェーブが発生することで、渋滞先頭地点の遷移となると推定した。

今後は、これら得られた成果の検証を行ってゆきたいと考えている。

謝辞：本研究に際しては、ETC2.0 プローブデータの抽出・整理および基本的な集計に際して、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）の木村真也氏のご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団東京第三管理局：渋滞ボトルネック実態調査報告書，pp.6-12，1997.
- 2) 岡村秀樹，渡辺修治，泉正之：都市間高速道路における単路部渋滞先頭地点の交通現象，交通工学，Vol.35，No.6，2000.
- 3) 立松和憲，川島陽子，田中信一郎：東名阪自動車における新たな渋滞対策「ドライブ・アシスト・ライト」の計画と運用—渋滞対策検討における ETC2.0 プローブ情報の活用—，第 73 回年次学術講演会，2018
- 4) 野中康弘，石田貴志，長井伸太郎：高速道路単路部における渋滞定着地点の幾何構造特性に関する一考察，第 23 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.5-8，2003.
- 5) 野中康弘，石田貴志，内山久雄：都市間高速道路単路部における渋滞定着要因に関する一考察，土木計画学研究・講演集，vol.26，2002.
- 6) 稲野晃，中村英樹，内海泰輔：ボトルネックが連続する区間における渋滞現象の分析，土木計画学研究・講演集，vol.36，2007.
- 7) 石田貴志，野中康弘，米川英雄：高速道路単路部における渋滞定着現象の実証的研究，交通工学論文集，第 1 巻，第 2 号(特集号 B)，ppB_26-B_31，2015.
- 8) 立松和憲，木村真也，米川英雄：東名阪自動車道における渋滞遷移現象に関する考察，交通工学論文集，第 4 巻，第 1 号(特集号 B)，ppB_31-B_37，2018.
- 9) 永関久信，米川英雄：渋滞疎密波現象に関する調査報告，交通工学 31 巻 2 号，pp.9-19，1996.3.
- 10) 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.
- 11) 加藤大地，柿本祐史，中村英樹：高速道路の車線減区間における大型車の乗用車換算係数に関する分析，第 56 回土木計画学研究発表会・講演集.
- 12) 越正毅，桑原雅夫，赤羽弘和：土木学会論文集 No. 458/IV-18，pp.66-71，1993.1.
- 13) 栗原光二，日置洋平：高速道路ボトルネックの交通容量改善策，土木計画学研究・論文集 No.12，pp.731-

- 738, 1995.8.
- 14) 邢健, 越正毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.1.
- 15) 木村真也, 鶴元史, 川島陽子, 米川英雄: ITS スポットプローブによる東名阪道の渋滞迂回状況分析, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM)第 50 卷 No274, 2014.11.
- 16) 木村真也, 野中康弘, 森本紘文, 米川英雄: ITS スポットプローブデータを用いた渋滞現象分析～東名阪自動車道四日市地区暫定片側 3 車線効果検証～, 交通工学研究発表会論文集(CD-ROM)第 33 卷No.27, 2013.9.
- 17) 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 回交通工学研究発表会論文集, 2006.11.
- 18) 小川清香, 山口孝, 米川英雄: 情報提供に用いる車両感知器の平均速度に関する一考察, 交通工学研究発表会論文集(CD-ROM)第 33 卷No.58, 2013.9.
- (2019.x.x 受付)

TRANSFER BETWEEN BOTTLENECK POINTS WITH TRAFFIC CAPACITY
ON E23HIGASHI-MAIHAN Exp AND JAM SHOCKWAVES BY A FLEET

Hideo YONEKAWA and Kazunori TATEMATSU