

渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析*

An Analysis of the Characteristics of Vehicle Platoons Resulting in the Occurrence of Traffic Congestion on Expressways *

邢健**・鶴元史***・石田貴志****・村松栄嗣*****

By Jian XING **・Motofumi TSURU***・Takashi ISHIDA****・Eiji MURAMATSU*****

1. はじめに

都市間高速道路単路部の渋滞は、凹状の縦断線形であるサグ部やトンネル部で発生することが、わが国では広く知られている。越による仮説は、サグ部やトンネル部においてある車両が速度低下した際、後続車がそれに気付かず同じ車間距離を保持しようと減速し、これが後続車に次々と増幅伝搬するというものである¹⁾。また、その後の研究ではこの仮説を裏付けるべく減速波の発生・伝搬状況を観測し、減速波は高密度流で増幅伝搬することが多く報告されている²⁾。

では、どのような交通条件の時に減速波が増幅伝搬し、渋滞が形成されるのか。これについては、いくつかの研究事例があるものの、未だその条件は明らかにされておらず、研究途上であると認識している。減速波が増幅伝搬し渋滞が形成される条件を明らかにすることは、渋滞の発生を制御したり、渋滞の発生を遅らせたりすることを可能とし、渋滞対策を検討する上で重要である。

減速波が増幅伝搬し渋滞が形成される条件について、塩見らは交通容量にバラツキがあるという観点から、個々の車両や車群に着目した分析の必要性を説いている³⁾。また、Xingらは渋滞発生前15分間において、車頭時間2秒以下の車両(フローレート1,800台/時・車線に相当)が約7割存在しており、絶えず高いフローレートが出現していることを明らかにし、車群に着目した分析の必要性について言及している⁴⁾。大口らはVTRより判読した個々の車両挙動から、渋滞発生時と非渋滞時の車群を比

*キーワード: 交通流, 車群特性, パルスデータ

** 正員, 工博, (財)高速道路調査会 研究部
(東京都港区芝4-17-5田町プレイス,
TEL03-6436-2089, E-mail: jian-x@express-highway.or.jp)

*** 非会員, (財)高速道路調査会 研究部
(東京都港区芝4-17-5田町プレイス,
TEL03-6436-2089, E-mail: m_tsuru@express-highway.or.jp)

**** 正員, 修(工), (株)道路計画 技術部
(東京都豊島区東池袋2-13-14 マルチ機械ビル5階,
TEL03-5979-8855, E-mail: t_ishida@doro.co.jp)

***** 非会員, 東日本高速道路(株) 関東支社
(埼玉県さいたま市岩槻区加倉260,
TEL048-758-6509, E-mail: e.muramatsu.aa@e-nexco.co.jp)

較し、渋滞発生時の車群は構成台数が多く、平均車頭時間が1.5秒程度(フローレート2,400台/時・車線に相当)となる傾向が高いことを明らかにしている⁵⁾。ここでは「密度差(個別車両の車頭時間と速度から算出した渋滞時と非渋滞時の密度差)20台/km以上の車両が2台以上到着」することを渋滞発生の判定基準として提案している。さらに、岡村は1分間交通量の5連続量が「40, 40, 30, 30, 30台以上/分」であることを渋滞に至る条件とする結果を導き出している⁶⁾。

ここで、渋滞を「ボトルネックを通過できずにここを先頭として上流に滞留した車両列の交通状態」と定義した場合⁷⁾、「密度差20台/km以上の車両が2台以上到着」とする渋滞発生の判定基準は、短時間の渋滞状況を検出するものであり、減速波を発生させる条件を明らかにしたものであると考えることができる。一方、岡村の1分間交通量の5分間連続量は、減速波を発生させる交通量と渋滞が延伸する(渋滞が形成される)交通量を区分して表現したものと考えられる。これは、減速波が発生しても、後続に大きな需要交通量が到達しなければ、渋滞状況が解消するという一般的知見と一致している。

本研究では、減速波が発生し上流へ増幅伝搬する条件を明らかにすることを目的として、車両感知器パルスデータより渋滞発生時の車群特性を分析する。具体的には、岡村の減速波を発生させる条件と渋滞を延伸させる条件を区分する考え方を踏襲し⁶⁾、渋滞を発生させた(減速波を発生させた)車群を抽出した後、同規模の車群通過後の交通量より減速波を延伸させる条件を分析する。

2. 分析概要

(1) 対象地点

分析対象地点は、関越道(上)花園IC付近のボトルネックとしている。当該ボトルネックは、花園ICより約1km下流にある片側3車線道路のサグである。また、パルスデータは花園IC合流直後にある55.95kpの車両感知器(ボトルネックより約1km上流)より収集している(図-1参照)。なお、対象ボトルネックでは追越車線より渋滞が発生するため、本研究では追越車線を対象に分析する。

(2) 対象日

分析対象日は、平成21年4～5月のうち、表-1に示す渋滞が発生した休日の5日としている。対象日には、当該サグで渋滞が発生していること、事故を含めた異常事象がないこと、非降雨日であることを、現場所見やVTRより判読した速度データ等から確認している。

なお、表-1に示す渋滞発生時刻は、パルスデータより得られた1台1台の時系列速度より判読している。

(3) 分析方法

分析は、図-2に示すフローに従って実施している。

まず、渋滞発生日5日(上記(2)の対象日)に着目し、渋滞を発生させた車群を特定する。また、特定した5つの車群について特徴(フローレートや車群構成台数等)を整理する。この車群の特徴が減速波を発生させた車群条件となる。

次いで、平成21年4～5月の2ヶ月間を対象として、上記渋滞を発生させた(減速波を発生させたであろう)車群と同規模以上の車群を抽出した後、これを減速波延伸の有無別に区分し、減速波を延伸させた条件を車群通過後の交通量をもとに検討する。

最後に、減速波を発生・延伸させる上記条件を総合的に検証するほか、毎正1分間交通量での代用可能性を検証する。

3. 渋滞を発生させた車群の特定方法

(1) 渋滞を発生させた車群の通過時刻特定

渋滞発生地点は、対象車両感知器地点より約1km下流にある。そのため、1)渋滞を発生させたであろう車群が車両感知器設置地点を通過後、1km下流のサグで速度低下し、2)その減速波が上流に延伸して車両感知器が速度低下を検知するまで時間差がある。車両感知器パルスデータより直接把握可能な現象は、下流側から延伸した減速波による速度低下のみである。

そこで、本研究では上記1)に対応するよう、対象とする車群が上流に位置する車両感知器設置地点を通過してから下流のボトルネックを通過するまでの走行時間を算出する。また、2)に対応するよう、ボトルネックの累加滞留台数と渋滞延伸密度を1分単位で比較し、式(1)を満たす時間、いわゆる渋滞が延伸する時間を算出する。

1)走行時間と2)渋滞延伸時間の和が、渋滞を発生させた車群が車両感知器を通過してから、減速波を対象車両感知器が検知するまでの時間である。よって、車両感知器での速度低下時刻からその時間を遡った時刻が、渋滞を発生させた車群の車両感知器通過時刻となる。

なお、需要交通量と渋滞発生後捌け交通量はパルスデータより集計した1分間交通量より、密度はQK図より日

別に算出している。また、対象ボトルネックと車両感知器間の距離(L)は1kmである。

$$Q_i > K_0 * L \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_i = \sum (Q_d - Q_j)$$

$$K_0 = K_j - K_d$$

ここで、 Q_i : i分間のボトルネック累加滞留台数(台)
検知した速度低下時刻より遡って計上

Q_d : 需要交通量(台/分)

Q_j : 渋滞発生後捌け交通量(台/分)

K_0 : 渋滞延伸密度(台/km)

K_j : 渋滞時密度(台/km)

K_d : ボトルネック上流の密度(台/km)

L : ボトルネックと感知器間距離(km)

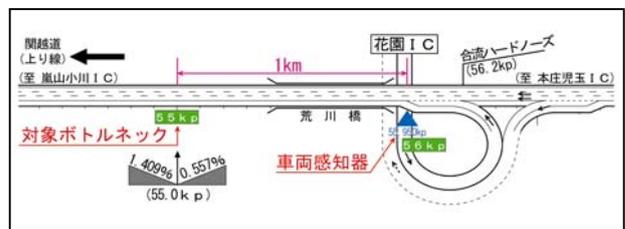


図 - 1 調査地点位置図

表 - 1 分析対象日

日付	渋滞発生時刻	渋滞発生時交通量 15分間70-レート (台/時)	天候
平成21年4月19日(日)	14:34	4,300	晴
平成21年4月26日(日)	15:09	4,676	晴
平成21年5月3日(日・祝)	16:05	4,552	晴
平成21年5月4日(月・祝)	14:03	5,060	晴
平成21年5月24日(日)	15:54	5,468	晴

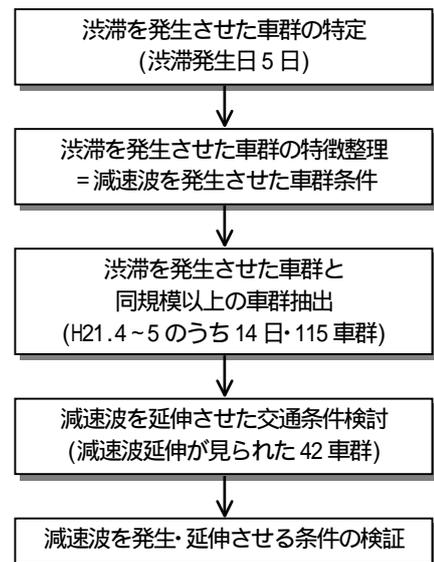


図 - 2 本研究の分析フロー

(2) 渋滞を発生させた車群の特定

既往文献の多くでは、車群の定義(車群の切れ目)を車頭時間1.5~5.0秒としている³⁾。本研究では、車頭時間によって車群を可視化できるグラフ(図-3)を作成し、車群を定義する車頭時間をこの範囲で変化させるを試みる。図-3は、横軸が時刻、縦軸下段が車群フローレート、上段の実線が個々の車両の速度、棒グラフの太さが車群の持続時間を表している。また、棒グラフの上に車群の構成台数を示している。

車群を定義する車頭時間を変化させた結果、車頭時間2秒未満の場合に、前述(1)で特定した時刻の車群を「渋滞を発生させた車群」として最も特徴づけることができる。また、筆者らの先行研究結果⁴⁾によると、渋滞発生前15分間の追越車線における車頭時間は2秒未満が大半を占めている。よって、本研究では両者を鑑みて車群を定義する車頭時間を2秒未満とし、渋滞を発生させた車群を抽出している。

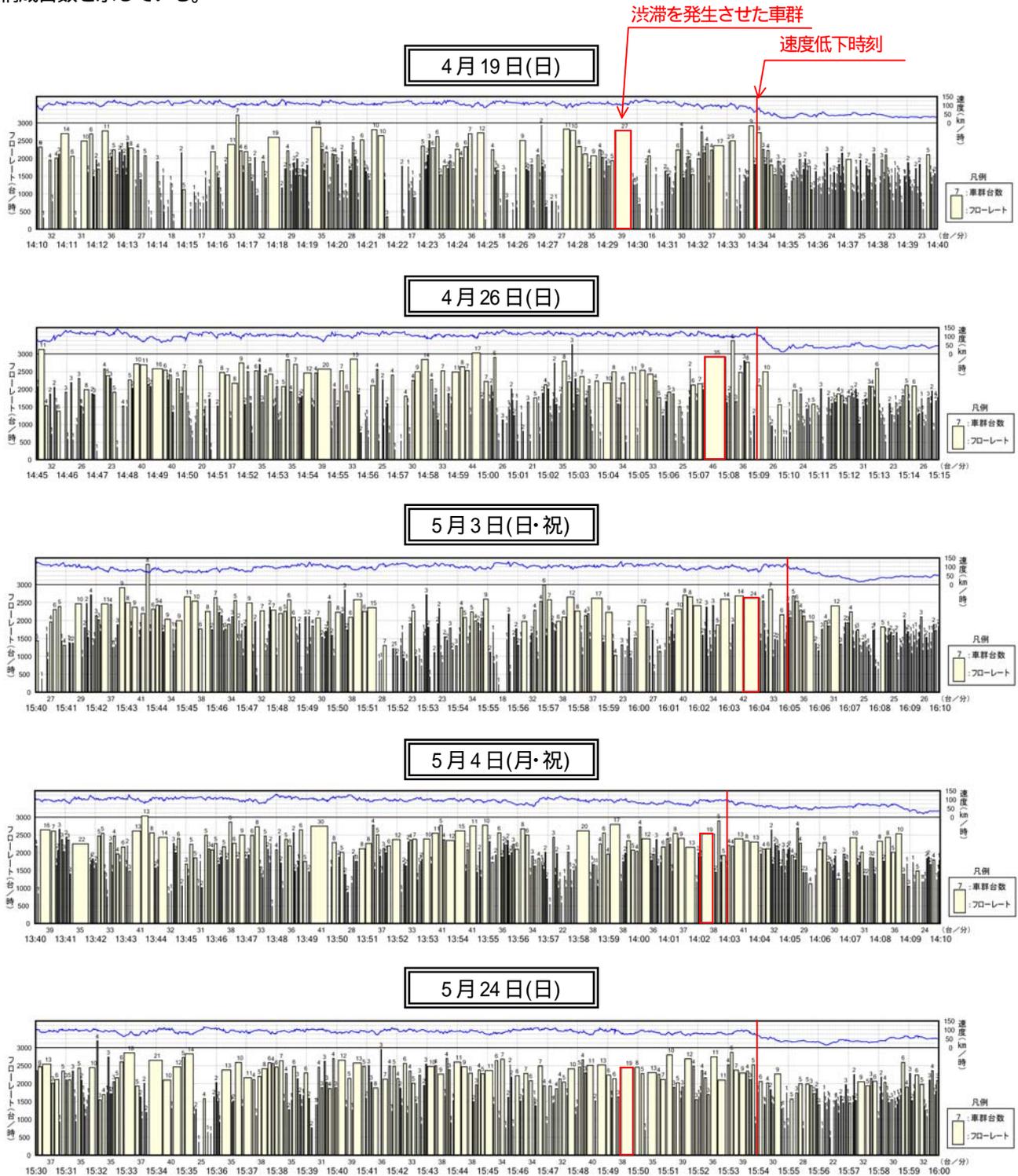


図 - 3 渋滞発生日における車群の可視化例(追越車線：車頭時間2秒未満を車群と定義)

4. 渋滞を発生させた車群の特徴

表-2は、対象5日間における渋滞を発生させた車群の特徴を整理した結果である。

渋滞を発生させた車群のフローレートは2,400台/時(40台/分)以上であり、この車群の平均車頭時間は1.5秒(=3,600/2,400)となる。渋滞発生時の平均車頭時間が1.5秒程度となるものが多い傾向にあるという大口らの記述⁵⁾、当初2分間の交通量40台/分以上とする岡村の記述⁶⁾と一致している。なお、本研究で整理するフローレートには後続の車群との車頭時間も含まれているため、車群内の車頭時間はこれより小さい。

また、車群の構成台数は19台以上であることから、観測日から判断できる渋滞を発生させた車群、いわゆる減速波を発生させた車群の条件は、車頭時間2秒未満を車群と定義した場合「車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数概ね20台以上」と考えることができる。

5. 渋滞発生条件の検討

(1) 分析方法

前述で抽出した減速波を発生させた車群の条件と同様の車群が到達しても、渋滞に至る場合と至らない場合があると考えられる。そこで、渋滞に至るプロセスを「減速波の発生」と「減速波の延伸」に区分し、これら事象が起こるその他条件を分析する。

具体的には、1)減速波を発生させた車群と同規模以上の車群を抽出、2)その車群を減速波延伸の有無別に区分し、3)その条件を1分間交通量より検討する。

(2) 減速波を発生させた可能性がある車群の抽出

平成21年4～5月のうち、減速波を発生させた車群と同規模以上の車群(フローレート2,400台/時以上、かつ車群構成台数19台以上)を抽出した結果、14日間(降雨日と渋滞発生状況が異常であった日は対象外)で115個の車群となった。多い日では、このような車群が1日あたり18個出現している。

(3) 速度低下を伴う車群の抽出

上記115個の車群について、当該車群通過後5分(減速波延伸は数分)以内の速度低下(80km/h未満)有無を整理した結果、42個の車群に速度低下がみられた。

ただし、ボトルネック上流の車両感知器パルスデータを用いているため、速度低下が発生していない173個の車群の中には、下流ボトルネックで速度低下しているサンプルが存在する可能性がある。よって、ここでいう速度低下したサンプルは、上流の車両感知器まで減速波が伝播しているサンプルになる。

(4) 減速波を発生させた車群を含む1分間交通量速度低下を伴う42車群について、対象車群を含む1分間交通量(対象車群末尾より前1分間)をみると、35台/分(=2,100台/時)以上が大半を占める(図-4参照)。減速波を発生させた車群フローレート40台/分より小さいものの、平均車頭時間1.7秒に相当し決して小さな値ではない。

そこで、減速波を発生させた車群の条件「車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数概ね20台以上」が「1分間交通量35台/分以上」に代用可能か後ほど検証する。

(5) 減速波を延伸させる条件

対象とする115個の車群のうち、減速波が上流へ延伸した車群は42個、減速波が延伸しなかった車群は73個である。図-5は減速波延伸の有無別に、対象車群通過後の1分間交通量を整理したもの、図-6は同様に対象車群通過後の3分間交通量を整理したものである。

減速波が延伸したサンプルをみると、車群通過後1分間で30台/分以上が大半を占め、3分間では80台/分以上が大半を占める。よって、減速波を延伸させる条件を「対象車群通過後1分間の交通量が30台/分以上、かつ対象車群通過後3分間の交通量が80台/分以上」と考える。

ここで図-3をみると、例えば5月4日の13時49分頃に出現した車群フローレート2,749台/時、車群構成台数30台の車群は、車群通過後の交通量が小さかったため減速波の延伸がみられなかったと考えられる。

表-2 渋滞を発生させた車群
(追越車線：車頭時間2秒未満を車群と定義)

日付	車群通過時刻	車群フローレート(台/時)	車群構成台数(台)	車群平均速度(km/h)
平成21年4月19日(日)	14:29:18	2,784	27	107.2
	14:29:49			
平成21年4月26日(日)	15:07:15	2,912	35	101.7
	15:07:56			
平成21年5月3日(日・祝)	16:03:22	2,623	24	82.2
	16:04:03			
平成21年5月4日(月・祝)	14:02:07	2,525	19	92.3
	14:02:32			
平成21年5月24日(日)	15:49:28	2,443	19	76.9
	15:49:53			

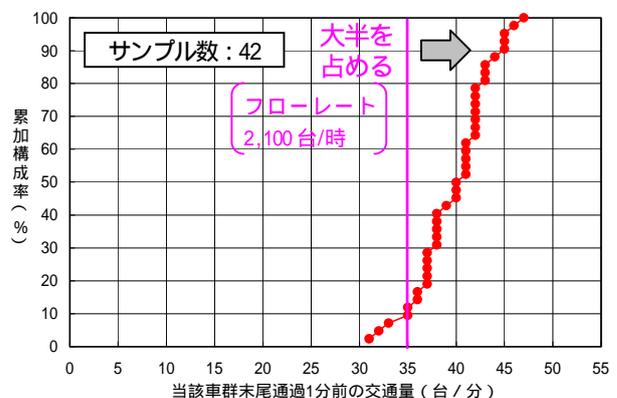
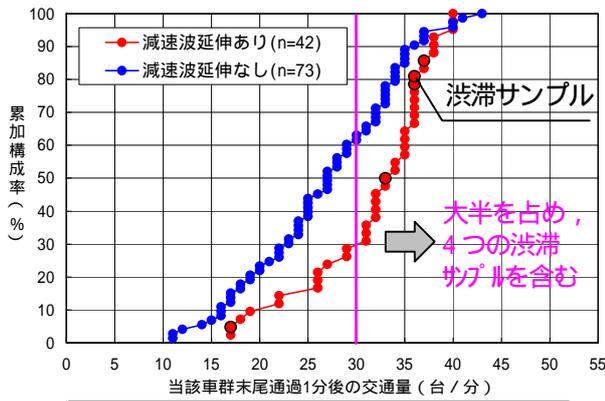
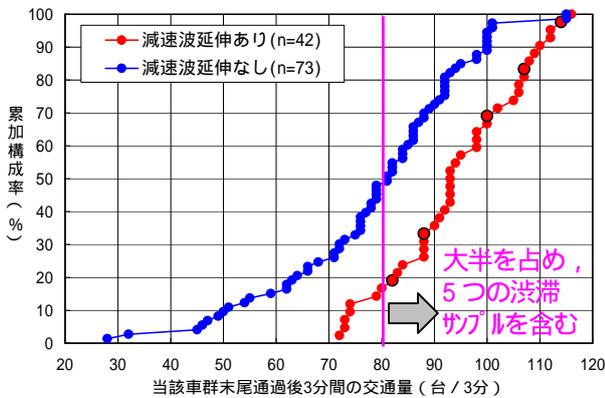


図-4 速度低下した場合の当該車群末尾通過前1分間交通量の累加構成率



区分	平均値 (台/分)	標準偏差 (台/分)	サンプル数	t値
減速波延伸あり	32	6.4	42	3.41
減速波延伸なし	27	7.7	73	

図 - 5 減速波延伸有無別の当該車群通過後交通量の累加構成率(車群通過後1分間)



区分	平均値 (台/分)	標準偏差 (台/分)	サンプル数	t値
減速波延伸あり	94	12.4	42	4.97
減速波延伸なし	79	17.9	73	

図 - 6 減速波延伸有無別の当該車群通過後交通量の累加構成率(車群通過後3分間)

6. 渋滞発生条件の検証

(1) 渋滞発生条件

前述の分析結果から、減速波を発生・延伸させる条件を整理すると以下ようになる。

- 1) 車群フローレート2,400台/時以上、かつ車群構成台数概ね20台以上の車群が通過
- 2) 車群通過後の追越車線交通量が30台/分以上
- 3) 車群通過後の追越車線交通量が80台/3分以上

(2) 渋滞発生条件の検証

ここで、交通量出現パターン別に減速波を延伸させた車群の割合を集計した結果を表-3に示す。表-3の表側は、減速波を発生させた車群末尾を基準としてそれより前の1分間交通量(減速波を発生させた車群を含む)を表している。また、表頭は車群末尾が通過してからの1分間交通量と3分間交通量を表している。これらの交通量は、

表 - 3 交通量出現パターン別にみた減速波を発生させた車群に占める減速波を延伸させた車群の割合

		上段: 車群通過後1分間		下段: 車群通過後3分間	
		30台/分以上	30台/分未満	30台/分以上	30台/分未満
		80台/3分以上		80台/3分未満	
当初1分間	35台/分以上	25/48 (52%)	8/18 (44%)	2/6 (33%)	4/21 (19%)
	35台/分未満	3/5 (60%)	0/3 (0%)	0/0 (0%)	0/14 (0%)
	区分なし	28/53 (53%)	8/21 (38%)	2/6 (33%)	4/35 (11%)

※減速波を発生・延伸させた車群の出現数(42車群) / 対象車群出現数(115車群)
※集計時間は毎正1分ではない

表 - 4 交通量出現パターン別にみた減速波を延伸させた車群を含む交通量出現回数の割合

		上段: 車群通過後1分間		下段: 車群通過後3分間	
		30台/分以上	30台/分未満	30台/分以上	30台/分未満
		80台/3分以上		80台/3分未満	
当初1分間	35台/分以上	22/271 (8%)	5/101 (5%)	0/23 (0%)	4/111 (4%)
	35台/分未満	8/765 (1%)	2/606 (0%)	1/189 (1%)	0/2455 (0%)
	区分なし	30/1036 (3%)	7/707 (1%)	1/212 (1%)	4/2566 (0%)

※減速波を発生・延伸させた車群を含む交通量出現数(42サンプル) / 交通量の出現数(4521サンプル)
※集計時間は毎正1分

車群末尾を基準とした1分単位で集計しているため、毎正1分ではないことに留意していただきたい。

表中の数値の左側は減速波を発生させた車群通過後、減速波の延伸が確認できた42個の車群の内訳、数値右側は減速波を発生させたであろう「車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数概ね20台以上」に合致する115個の車群内訳である。

減速波発生条件は車群に依存することから表側の当初1分間交通量は「区分なし」を、表頭は「車群通過後1分間交通量30台/分以上」かつ「3分間交通量80台/3分以上」を参照すると(表-3の赤枠)、53車群のうち28車群、約53%に減速波の延伸がみられた。

車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数概ね20台以上の車群が到達した場合、当該車群通過後の交通量が条件を満たすと、高い確率で減速波が延伸するといえる。

(3) 連続1分間交通量データでの代用可能性検証

車両感知器データが毎正1分であることから、減速波を発生・延伸させる条件を連続1分間交通量データで代用可能か検証する。検証にあたっては、上記「5.(4) 減速波を発生させた車群を含む1分間交通量」の結果をもとに、減速波を発生させる車群条件を「1分間交通量35台/分以上」とし、減速波を延伸させる交通量の条件は前述までと同様としている。

この条件に当てはまる交通量をみると(表4の青枠)、減速波を延伸させた車群を含む交通量出現割合は8%と低い。また、「1分間交通量35台/分以上」を「1分間交通量40台/分以上」としても、出現割合は約22%に留まり、表3に示す50%を超える高い割合にはならない。

これは、「35台/分」または「40台/分」の中に相当数の小さな車群が含まれるためであり、大きな交通量が出現しても上記1)~3)の条件に合致する車群が到達しなければ渋滞に至らないということになる。

7. まとめ

本研究では、減速波が発生し上流へ増幅伝搬する条件を車両感知器パルスデータより分析し、追越車線において「車群フローレート2,400台/時以上、車群構成台数概ね20台以上」の車群が通過することで減速波が発生し、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、高い確率で減速波が延伸することを明らかにしている。

特に、減速波の発生は毎正時の1分間交通量だけではうまく説明できず、車群に着目することでこれを説明できることを明示している。減速波の発生=「渋滞のきっかけ」は一定条件を満たす車群によって生起しており、車群に着目することの重要性を示唆している。

なお、上記条件を既往研究と比較すると、減速波を発生させる車群条件のうち車群フローレート2,400台/時以上(=40台/分)については、渋滞発生時の平均車頭時間が1.5秒程度となるものが多い傾向にあるという大口らの記述⁵⁾、当初2分間の交通量40台/分以上とする岡村の記述⁶⁾と一致している。また、減速波を延伸させる条件は、連続3分間の交通量が各30台/分以上とする岡村の記述⁶⁾と一致しており、本研究結果と概ね一致している。

しかし、本研究では減速波の発生・延伸条件を明らかにしているものの、渋滞が形成される条件については把握できていない。本研究で観測した減速波が発生・延伸した42事象のうち実際に渋滞した事象は5事象であり、残りの37事象について、小規模な渋滞が発生していたのか、渋滞に至らなかったかは不明である。

今後は、減速波の発生・延伸条件をもとに渋滞形成の条件を明らかにする必要があると考える。具体的に、本研究の対象地点はボトルネックと車両感知器位置が1km離れており、いくつかの仮定を設定しているため、ボトルネック地点においてパルスデータを収集するとともに、その他地点での検証も踏まえ減速波の発生・延伸条件を精緻化し、これを発展させて渋滞形成の条件を明らかにすることが望まれる。

参考文献

- 1) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 2) Jian XING, 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.
- 3) 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一: 新しく提案する渋滞判定手法に基づいた渋滞発生確率推定モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.33, No.304, 2006.
- 4) Jian XING, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 車両感知器パルスデータを用いた渋滞発生時交通現象分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, No.265, 2010.
- 5) 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.
- 6) 岡村秀樹: 渋滞発生確率による交通容量に関する研究, 高速道路と自動車, Vol.49, No.12, pp.20-31, 2006.
- 7) 越正毅編著: 交通工学通論, p.112, 1989.
- 8) SURASAK Taweessilp, Izumi OKURA, Fumihiko NAKAMURA: Study on Platoon Characteristics on a Multi-Line Expressway, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, pp.909-918, 2001.