

都市間高速道路 2 車線区間における車群形成過程に関する基礎的考察*

A Study of Platoon Formation Process at Two-lane Expressway Bottlenecks*

小川喬之**・塩見康博***・宇野伸宏****

By Takayuki OGAWA**・Yasuhiro SHIOMI***・Nobuhiro UNO****

1. はじめに

現実の交通流には多様な車両が存在し、各車両の走行挙動特性は一台一台異なる。これによって走行速度の遅い車両に後方車両が追いついて形成されるのが車群である。越¹⁾はサグやトンネルをボトルネックとする渋滞メカニズムとして「車群がサグの上り勾配あるいはトンネルの入口にさしかかると、追越車線の車群の中に減速波が発生して、後方に増幅伝播し、車群が大きい場合には後尾車はついに追越車線上で停止あるいは徐行するに至る」との仮説を示した。このことを踏まえると、車群形成は渋滞発生の必要条件ともいえ、渋滞の有無に大きな影響を与えていると考えられる。すなわち、ボトルネック近傍における車群形成メカニズムを解明することが、効果的な渋滞対策を講じるの一助になると考えられる。

そこで本研究では、都市間高速道路のサグ部近傍の複数の地点で観測された交通流データを用い、サグ部上下流地点、及び車線ごとの車群形成特性を把握する。具体的には、観測車頭時間分布を用いて追従車頭時間分布を推定し、その結果設定した追従判定の閾値に基づいて車群を抽出した後、交通量、大型車混入率を説明変数として平均車群台数を推定する一般線形モデルを構築する。そして、そのパラメータを車線間、地点間で比較することにより、サグ区間における車群形成過程について考察を行う。最後に、交通量と大型車混入率を入力として車群台数分布を推定するモデルを幾何分布 (Geometric Distribution) Model²⁾を適用して構築し、交通量レベル毎に適合度の検証を行う。

2. 既存研究のまとめと本研究の位置づけ

石田ら³⁾は高速道路片側 2 車線区間を対象として、4km 区間 8 断面で得られたパルスデータを用いて、交通量レベルによって車群形成がどのように異なるかを定量的に解析している。その中で、交通量が大きくなるにつれて、車群を構成する車両数が増えることや、渋滞流中ではサグ部上り勾配下流で、車群が形成されやすくなることを示している。しかし、この研究では車群を判別する基準が明確化されておらず、その妥当性に関して疑問が残る。

また、Taweessilp et al.⁴⁾は交通量別の車群数、平均車群台数、追従走行車割合を片側 3 車線区間のある断面で観測し、車線ごとに比較することで、第 1 走行車線の車群数、平均車群台数、追従走行車割合が他の 2 車線と大きく異なることを指摘し、その違いを大型車混入率の差で説明している。さらに大型車混入率が車群に与える影響を把握するために、車群数、平均車群台数を大型車混入率 30%未満、30%～60%、60%以上の 3 段階で比較し、大型車の増加によって大きな車群ができやすくなると論じている。しかし、この研究では 1 断面のみで分析を行っているため、サグなどの道路構造でも同じような車群特性がみられるとは言い難い。大型車混入率についても、グラフから傾向を読み取るだけに留まっており、大型車が車群に与える影響を定量化できていない。

以上を踏まえ、本研究では高速道路 2 車線区間を対象とし、ボトルネックを含む単路部の連続した複数断面におけるデータを用いて、平均車群台数を交通量、大型車混入率によって推定するモデルを構築し、車群形成に影響を与える要因について検討する。さらに、幾何分布 (Geometric Distribution) Model を適用し、交通量と大型車混入率の関係で車群台数分布を推定、その実現象との適合度を検証する。

3. 追従車頭時間分布に基づく車群判別手法

(1) データ概要

本研究では、高速道路片側 2 車線区間として、1994 年 12 月 26 日～1995 年 1 月 9 日、1995 年 4 月 22 日～1995 年 8 月 9 日、1995 年 8 月 9 日～8 月 22 日の計 46 日間の晴天

*キーワード：交通流、交通容量、サービス水準

**学生員、京都大学大学院工学研究科

(京都府京都市西京区京都大学桂Cクラスター438号室、

TEL:075-383-3237、E-mail:ogawa@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

***正員、工博、京都大学大学院工学研究科

****正員、工博、京都大学経営管理大学院

時、昼間時間帯、非渋滞時を対象に、東北自動車道下り線 93.2kp, 94.0kp, 95.0kp 地点の走行車線、及び追越車線に設置されたループ式車両感知器による交通流パルスデータを用いる。当該地点は、94.0kp のサグ底部をボトルネックとする渋滞が発生する地点であり、93.2kp 地点はサグ部下り勾配、95.0kp 地点はサグ部上り勾配地点に相当する。図 1 にデータ取得地点の概要を示す。

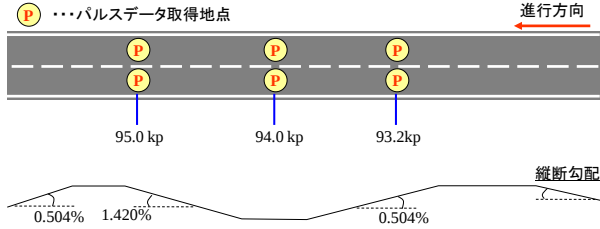


図 1 東北自動車道データ取得地点概略図

(2) 自由走行車両と追従走行車両の判別

本研究では観測された車頭時間分布を用いて追従／非追従走行を判別する車頭時間閾値を決定する。観測車頭時間分布は自由走行車両と追従走行車両の車頭時間分布が合成された分布であると考えられる。本研究ではこのうち追従走行車両の車頭時間分布に基づいて車頭時間閾値を決定するため、分布を分離する必要がある。したがって、以下で観測車頭時間分布から自由走行車両の車頭時間分布と追従走行車両の車頭時間分布を推定する Composite headway distribution model³⁾について説明する。

a) Composite headway distribution model

まず、追従車頭時間分布 $g(t)$ と自由走行車両の車頭時間分布 $h(t)$ が独立であると仮定すると、観測車頭時間分布 $f(t)$ は追従走行車両の割合 ϕ を用いて、 $g(t)$ と $h(t)$ の合成関数として次のように記述できる。

$$\begin{aligned} f(t) &= g_1(t) + h_1(t) \\ &= \phi g(t) + (1 - \phi)h(t) \end{aligned} \quad (1)$$

車頭時間が十分に大きい場合は全車両が自由走行していると考えられる。そこで、自由走行車両は観測地点にランダムに到着すると仮定すると、十分大きな車頭時間 $t(> T)$ の $f(t)$ は次のように表される。

$$f(t) = h_1(t) = A\lambda \exp(-\lambda t) \quad t > T \quad (2)$$

ただし、 λ は自由走行車の到着レート、 A は式(3)で表される標準化定数である。

$$A = \frac{1 - \phi}{\int_0^\infty \lambda e^{-\lambda t} \int_0^t g(s) ds dt} \quad (3)$$

車頭時間が上述の T より小さい場合は、自由走行車両と追従走行車両が混在している状態にある。車頭時間 $t(< T)$ で自由走行する車両は t より小さい追従車頭時間を持つ車両に限られるため、以上を踏まえると $h_1(t)$ は次のように表される。

$$h_1(t) = A\lambda \exp(-\lambda t) \int_0^t g(s) ds \quad (4)$$

ここで、式(1)から $g(t) = f(t) - h_1(t)/\phi$ より、

$$h_1(t) = \frac{A\lambda}{\phi} \exp(-\lambda t) \int_0^t [f(s) - h_1(s)] ds \quad (5)$$

を得る。これより、実観測から $f(t)$ を得ることにより $h_1(t)$ を推定し、式(1)に代入することで追従車頭時間分布 $g_1(t)$ をノンパラメトリックに推定できる。

b) 走行速度水準の考慮

上述のモデルは、走行速度によらず追従車両の割合、及び追従車頭時間分布は一定であるとの仮定に基づいている。しかし、実現象では走行速度レベルによって追従車両の割合、追従車頭時間分布は異なると考えられる。このことを考慮すると、式(1)は以下のように書き換えることができる。

$$f(t|v) = \phi(v) \cdot g(t|v) + \{1 - \phi(v)\} \cdot h(t|v) \quad (6)$$

ここで、 $f(t|v)$ は速度 v の車両の車頭時間分布、 $\phi(v)$ は速度 v で追従走行する車両の割合、 $g(t|v)$ は速度 v で追従する車両の車頭時間分布、 $h(t|v)$ は速度 v で自由走行する車両の車頭時間分布をそれぞれ表す。

速度 v で走行する車両の存在割合を $p(v)$ すると、観測車頭時間分布 $f(t)$ は式(7)のように表される。

$$\begin{aligned} f(t) &= \int_0^\infty p(v) \cdot \phi(v) \cdot g(t|v) dv \\ &+ \int_0^\infty p(v) \cdot \{1 - \phi(v)\} \cdot h(t|v) dv \end{aligned} \quad (7)$$

しかし、式(7)から直接追従車頭時間分布 $g(t|v)$ を導出するのは困難であるため、近似的な解法として走行速度を離散的に区分し、速度帯を 10km/h ごとに設け、各速度水準で走行する車両のみを抽出したデータセットを作成する。そして、各データセットについて、a) で示した手法で追従車頭時間分布を求める。具体的なノンパラメトリックな推定手順は Hoogendoorn⁵⁾ に則る。

c) 走行速度水準別の追従車頭時間分布推定結果

実際に観測車頭時間分布 $f(t)$ から推定した自由走行車両の車頭時間分布 $h_1(t)$ と追従走行車両の車頭時間分布 $g_1(t)$ の例として 93.2kp 地点の追越車線 100～110km/h のものを図 2 に示す。これより、観測車頭時間分布が自由走行車両の車頭時間分布と追従走行車両の分布に分離できていることが確認できる。

さらに、93.2kp における速度レベル別の追従走行車両の割合 $\phi(v)$ を車線別にプロットしたものを図 3 に示す。図より、走行車線の方が全般的に追従車両の割合が追越車線との比較で小さいこと、そして、走行速度が高くなるにつれて、追従走行車両が少なくなり、逆に 60km/h～70km/h の速度水準では車線を問わずほぼすべての車両が追従状態にあることが窺える。一般に追越車線を走行する車両の方が希望走行速度が高いと推察されることが、及び 60km/h～70km/h で走行する状態は密な交通流状態であると推察されることが、この結果は極めて妥当で

あると言える。

d) 追従車頭時間分布に基づく車群判別基準

本手法で推定される「自由車頭時間分布」とは、あくまでランダムな要因によって各車両に割り振られた車頭時間分布を意味している。すなわち、観測車頭時間分布からこの自由車頭時間分布を差し引いた追従車頭時間分布は、ドライバーの意思で決定された車頭時間分布と解釈できる。

そこで、追従車頭時間分布 $g_1(t)$ に着目し、ほぼすべての車両が追従状態にあると想定できる車頭時間を車群判別の基準とする。本研究では、90%タイル値を車頭時間閾値と設定する。追従車両を判別する車頭時間閾値を車線別にプロットしたものを図4に示す。車頭時間が各プロット値以下のものを追従走行車両、それより大きいものを自由走行車両としている。

閾値を速度帯別にみると、走行車線では60km/hから90km/hにかけて、追越車線では60km/hから100km/hにかけて小さくなり、最小値を取った後は増加し続けると

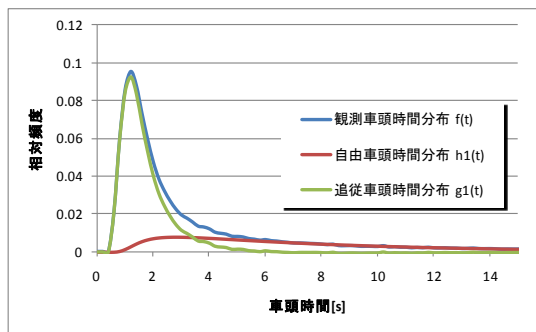


図2 車頭時間分布の分離 (93.2kp, 追越車線, 100~110km/h)

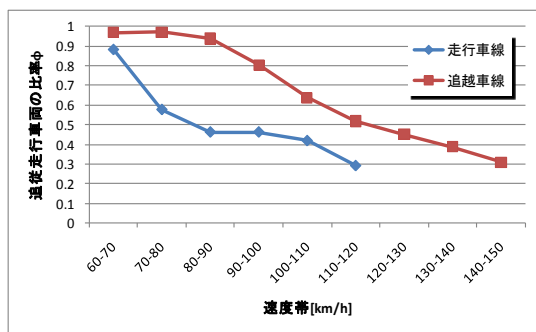


図3 追従走行車両の比率 (93.2kp)

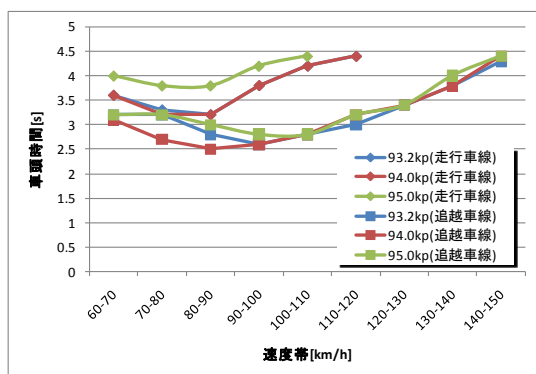


図4 追従走行車両の車頭時間閾値

いう傾向が見られる。これは、走行速度が高くなると、ドライバーは大きめの車間距離を取ろうとし、逆に走行速度が低いと小さい車間距離を取るようになるが、最低限の車間距離は保とうとするために車頭時間が大きくなってしまいう関係があるためと考えられる。

閾値を車線別に比べた時、全地点、90km/h以上の速度帯では走行車線の閾値が追越車線より1秒ほど大きいことがわかる。実交通流を考えると、追越車線を走行する車両は走行車線に比べて希望走行速度が高いことや、車間をつめて走行する車両が多いことが想定され、このような各車線を選択する車両の走行特性の違いから車頭時間閾値に車線間で差が出たと考えられる。

以上より、車頭時間水準を地点、車線、車両速度帯別に算出する本研究の手法は、各要因の特徴を捉えていると言える。

4. 車線別・地点別車群特性の分析

(1) 概略

本章では、第3章における追従車両の判別基準に基づき、実観測データより車群を抽出する。そして、まず、1つの車群に含まれる車両台数である車群台数に着目し、その平均値である平均車群台数と交通量、大型車混入率との関係調べる。その上で、交通量、大型車混入率を被説明変数として、各地点、各車線で観測された平均車群台数を推定する一般線形モデルを構築し、推定されたパラメータを比較することでサグ区間の車群形成過程について考察する。

(2) 交通量に対する車群台数特性

まずは、実際に観測された車群台数分布が地点間、車線間でどのような特性を示すかを把握する。図5に各地点、各車線の車群台数分布を示す。図は車線交通量が600[veh/h/lane]程度の時(1月5日)と、1200[veh/h/lane]程度の時(12月31日)の車群台数分布である。これより、いずれの交通量レベルでも、車線間では単独走行車両の台数に差異があるものの、地点間では特徴的な差異はないと考えられる。

そこで、車群形成特性を表す代表値として単位時間(1時間)あたりに観測された車群の平均車群台数に着目する。平均車群台数は当該時間帯の交通量レベルに大きく影響を受けることが考えられる。その関係を概観するため、図6に各車線の車線交通量と平均車群台数の関係を示す。これより、平均車群台数は交通量に対して指数関数的に増加する傾向にあることが窺える。

(3) 大型車混入率に対する車群台数特性

車群台数に影響を与えているものとして大型車が既存

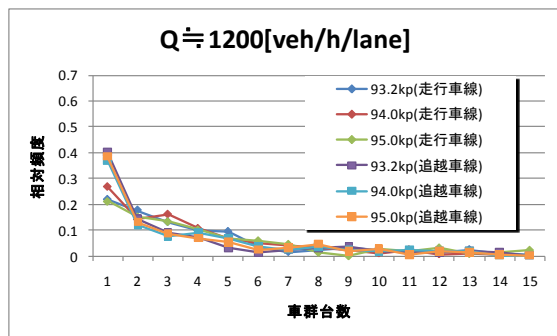
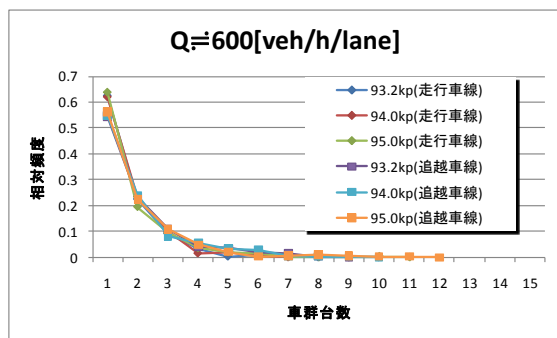


図5 実観測による車群台数分布

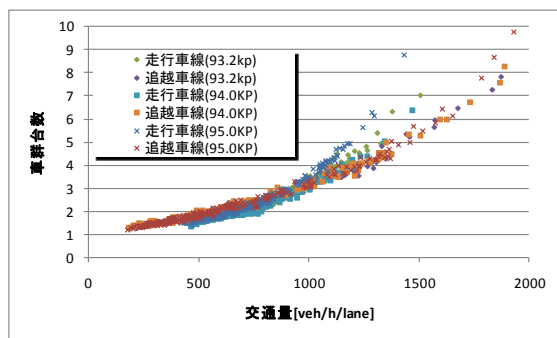


図6 車線交通量に対する平均車群台数

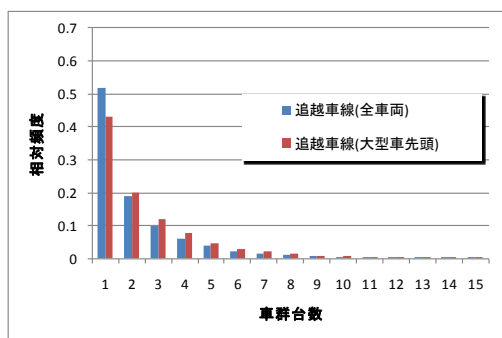
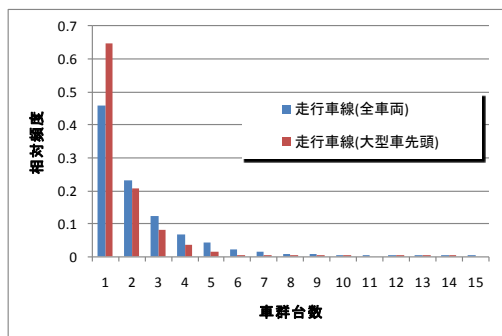


図7 先頭車両別の車群台数分布 (94.0kp)

の研究⁴⁾でも示唆されている。そこで、大型車が先頭車両である車群を抽出し、その特性の違いを車線間で比較する。図7に全観測車群、及び大型車が先頭である車群の車群台数分布を車線別に示す。ただし、ここでは代表として94.0kp地点のみを示す。図より、走行車線では大型車が先頭となる車群台数のほうが小さく、追越車線では大型車が先頭となる車群台数のほうが大きいことがわかる。表1に示すように先頭車両速度自体は車線を問わず大型車の場合の方が低いことより、走行車線では大型車に追いつく一般車両が追越車線に車線変更することで、車群が分散され、追越車線では大型車によって、その後方に大きい車群が形成されやすくなるためと考えられる。

表1 先頭車両別の車群先頭車両平均速度

	93.2kp		94.0kp		95.0kp	
	走行車線	追越車線	走行車線	追越車線	走行車線	追越車線
全車両	100.2	117.8	97.3	115.9	97.8	114.8
大型車先頭	96.2	108.8	94.6	107.9	94.6	106.1

単位: [km/h]

(4) 平均車群台数推定モデルの構築

ここまでの集計的な分析より、平均車群台数には交通量と大型車混入率が大きく影響していることが示唆された。そこで本研究では、その2つを説明変数とし、平均車群台数の自然対数値を被説明変数とする重回帰モデルを構築する。さらに、交通量や大型車混入率に対する平均車群台数の関係は車線間で異なると考えられるため、交通量、大型車混入率に加え、追越車線ダミーと交通量、並びに大型車混入率の交互作用項を考慮した、式(8)で表される一般線形モデルを適用する。ただし、大型車混入率は1時間当たりの交通量に対する大型車混入台数の割合として定義される。

$$\ln(\bar{n}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot (x_1 x_3) + \beta_3 \cdot x_2 + \beta_4 \cdot (x_2 x_3) \quad (8)$$

β_0 : 定数項

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: 係数

$\bar{n}$: 平均車群台数

x_1 : 交通量[千台/時/車線]

x_2 : 大型車混入率

x_3 : 車線ダミー(走行車線 = 0, 追越車線 = 1)

このモデルでは、走行車線における交通量のパラメータが β_1 となり、追越車線における交通量のパラメータが $(\beta_1 + \beta_2)$ となることを表している。大型車混入率についても同様のことが言える。 β_2, β_4 の推定結果が統計的に有意となる場合、走行車線と追越車線とでは交通量、大型車混入率が平均車群台数に与える影響が異なることを表す。

表2に各地点のモデル推定結果を示す。モデルの説明力の大きさは、決定係数である R^2 が0.97以上と高く、このモデルがよく当てはまっていることがわかる。

表2 モデル推定結果

	93.2kp		94.0kp		95.0kp	
	非標準化係数	t値	非標準化係数	t値	非標準化係数	t値
(定数)	0.01	0.98	0.03	3.16 *	-0.03	-2.57 *
交通量	1.20	105.05 *	1.11	91.69 *	1.29	93.16 *
大型車混入率	-0.53	-18.12 *	-0.49	-15.82 *	-0.43	-13.99 *
交通量×車線D	-0.08	-8.23 *	0.01	0.78	-0.11	-10.31 *
大型車混入率×車線D	0.67	10.14 *	0.65	9.68 *	0.69	10.31 *
F値	4159.84 *		3742.31 *		3575.23 *	
調整済み R ²	0.98		0.98		0.97	

(*p=0.01,**p=0.05)

各パラメータの推定結果に着目すると、まず、定数項が93.2kpでは非有意、94.0kpでは正、95.0kpでは負になっていることがわかる。定数項が大きいほど、潜在的に平均車群台数が大きいことを表している。ここでは、ボトルネックであるサグの底部にあたる94.0kpの定数項が他の地点と比較して大きいため、94.0kpは平均車群台数が潜在的に大きい地点であると言える。さらに、大型車混入率や交通量のパラメータの推定結果を地点、車線ごとに比較するために、各地点の交通量と大型車混入率のパラメータを車線別にプロットしたものを図8に示す。

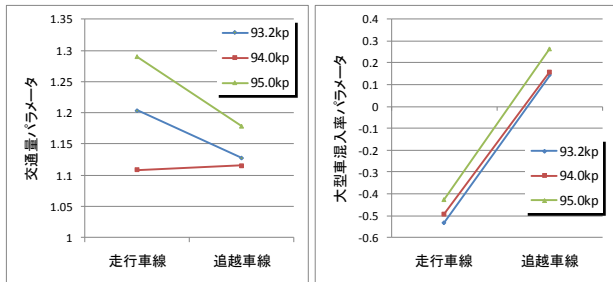


図8 推定パラメータ(左:交通量 右:大型車混入率)

まず、交通量のパラメータに着目すると、94.0kpでは追越車線ダミーと交通量の交互作用のパラメータが統計的に非有意となり、車線間で差がないという結果になった。他の地点では、車線間でパラメータに差があり、どの地点でも走行車線のパラメータのほうが大きい。94.0kpでのみ車線間で有意差がない。すなわち、同程度の交通需要が各車線で観測される場合、サグの上下流地点では追越車線の方が大きい車群ができにくい傾向にあるのに対し、サグ底部ではその傾向は窺えない。また、95.0kpのパラメータが他の地点より大きいのは、上り勾配によって減速する車両が両車線に存在し、大きい車群が発生しやすくなるためと考えられる。

次に、大型車混入率のパラメータが全地点で走行車線では負、追越車線では正になっていることがわかる。これは、図7で示した大型車が先頭となる車群の車群台数の車線別の違いからも明らかである。さらに、地点ごとに比較すると、95.0kpでは両車線で大型車混入率のパラメータが他の地点に比べて大きいことがわかる。これは94.0kpから95.0kpにかけての上り勾配によって大型車が大きく減速し、その結果特に追越車線の平均車群台数が増加する傾向にあるためと考えられる。

5. 車群台数分布推定モデル

上述の平均車群台数推定モデルは説明力が強く、実現象で考えられる車群形成状況も表せている。そこで、このモデルで推定した平均車群台数を既存の車群台数分布推定モデルである幾何分布 (Geometric Distribution) Model²⁾の入力に用い、それによって推定された車群台数分布が実際に観測された車群台数分布とどの程度適合するかを考察する。ここで、幾何分布モデルとは、先行車両と後続車両が同一の車群に属する確率を p とし、ベルヌイ試行を仮定したうえで i 台の車群が形成される確率 $\text{Pr}[i]$ を次式で算出するものである。

$$\text{Pr}[i] = (1 - p) \cdot p^{i-1} \quad (9)$$

また、 $\text{Pr}[i]$ の分布の平均 $\bar{n}$ は、次式で表される。

$$\bar{n} = \frac{1}{1 - p} \quad (10)$$

この $\bar{n}$ が平均車群台数であるため、 p は平均車群台数を用いて次のように表される。

$$p = 1 - \frac{1}{\bar{n}} \quad (11)$$

上式の $\bar{n}$ に4. で推定した平均車群台数を代入することによって、交通量と大型車混入率を所与として車群台数分布を推定できるようなモデルを構築することができる。このモデルが実際に観測された車群台数分布とどの程度適合しているかを調べるため、交通量レベルを600[veh/h/lane]以下、600[veh/h/lane]以上1200[veh/h/lane]以下、1200[veh/h/lane]以上の3段階に分け、各地点、各車線で当該交通量レベルのデータをそれぞれ1時間分抽出し、 χ^2 検定によってモデルの適合性を検証する。

表3に χ^2 検定の結果を示す。まず、走行車線では、交通量が小さい時、および中程度の時については全地点で5%有意水準において帰無仮説「推定値は実観測値を的確に再現している」が採択され、的確に観測車群台数分布を推定していることがわかる。しかし、交通量が大きい時については94.0kp以外の地点で帰無仮説が棄却されている。次に追越車線に着目すると、交通量が小さい時には的確に車群台数分布を推定していることがわかる。しかし、交通量が中程度、および大きい時には全地点で帰無仮説が棄却され、適合度が低いことがわかる。

適合度が低くなる原因としては、本研究で構築した平均車群台数推定モデルの推定値と実際の観測値との誤差によるものと、幾何分布モデルによる推定車群台数分布と実際の観測車群台数分布との誤差によるものが挙げられる。前者についてはモデルの説明力も高く、誤差は小さいと考えられるため、主な原因は後者の幾何分布モデルの誤差であると推察される。幾何分布モデルでは、相前後する車両が同一の車群に属する確率が独立に決定さ

れると仮定している。しかしながら、現実には低速度で走行する車両が存在すると後続の車両が追いつき、車群が形成されるなど、交通流は独立ではないと考えられる。さらに、その傾向は交通量が大きくなるほど顕著となる。このため、交通量が小さい時は的確に推定できているものの、交通量が大きくなると適合度が低くなるため、幾何分布モデルは交通量が大きくなると車群台数分布を的確に推定できないと言える。

表3 χ^2 検定によるモデルの検証

走行車線	93.2kp			94.0kp			95.0kp		
交通量	515	940	1311	527	917	1267	518	899	1245
χ^2_0	0.21 *	2.07 *	37.79	5.27 *	5.63 *	17.8 *	5.49 *	7.40 *	51.83
df	4	8	11	4	8	11	4	9	10
$\chi^2_{0.05,df}$	9.49	15.51	19.68	9.49	15.51	19.68	9.49	16.92	18.31

追越車線	93.2kp			94.0kp			95.0kp		
交通量	543	951	1330	540	970	1349	551	1007	1373
χ^2_0	6.09 *	27.59	91.43	9.27 *	46.93	56.83	3.98 *	29.36	77.57
df	5	9	10	5	8	11	5	9	11
$\chi^2_{0.05,df}$	11.07	16.92	18.31	11.07	15.51	19.68	11.07	16.92	19.68

交通量[veh/h/lane], df: 自由度

6. まとめと今後の課題

本稿では、都市間高速道路2車線区間の単路部ボトルネックにおける車群形成過程に着目した。車群判別では追従車頭時間分布が走行速度によって変化すると視座の下、実観測データを用いて追従車頭時間分布を推定し、その結果より実交通流で考えられる状況を捉えた車頭時間閾値を決定した。また、平均車群台数が交通量、大型車混入率によって変化していると考え、それらを説明変数として平均車群台数を推定するモデルを構築し、各変数のパラメータを車線別に比較した。その結果、大型車が平均車群台数に与える影響は車線間で異なること、また、サグ底部では交通量に対する平均車群台数の変化に車線間で差がないという知見を得た。そして最後に、推定された平均車群台数を既存の車群台数分布推定モデルである幾何分布モデルに代入することで交通量、大型車混入率を所与とする車群台数分布推定モデルを構築し、交通量が小さい時は的確に推定できることを示した。

今後は、対象地点を増やして、より詳細に車群形成状況を把握する。また、その上で、よりの確に車群形成状況を推定可能なモデルの構築、およびそのモデルを用いて車群を分散させる施策の検討などを行っていききたい。

最後に、本研究を進めるにあたっては、東北大学 桑原雅夫教授より貴重なデータをお借りいたしました。ここに記して謝意を示します。

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，第371号／IV-5，pp.1-7，1986
- 2) Miller,A.J.：A queuing model for road traffic flow, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol.23, pp.64-75, 1961
- 3) 石田友隆，桑原雅夫，Edward Chung：都市間高速道路における車群特性に関する定量的分析，第29回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, Vol.28, 2003
- 4) Taweelilp,S., Okura,I and Nakamura,F.：Study of characteristics on a multi-lane expressway, Journal of Infrastructure Planning Review, Vol.18, No.5, pp.909-917, 2001
- 5) Hoogendoorn,S.P.：Unified approach to estimating free speed distributions, Transportation Research Part B, Vol.39, pp.709-727, 2005