

道路交通流の内部構造に関する研究

——自由車・追従車の分離と車頭時間分布モデル——

田村 洋一*・樗 木 武**

Study on Inner Structure of Road Traffic Flow

——Classification of Free and Constrained Flowing Vehicles
and Headway Distribution Model——

Youichi TAMURA and Takeshi CHISHAKI

Abstract

The purpose of this work is to investigate the method to judge a vehicle whether it is free flowing one or not, and to apply the result to vehicular headway distribution models, particularly, to formulate headway distribution parameters as a function of traffic flow level. A number of authors have developed two component headway distribution models, and the basic assumption of models is vehicles on the road can be divided into two groups according whether or not they are interacting with the vehicle ahead. This assumption is agreeable, but practically the fraction of free or constrained vehicles is estimated without clear definition of free or constrained vehicle. Headway distribution models give a good fit to the data which used to estimate model parameters, but not assure estimated model parameters are applicable to other data under comparable conditions, and if functional formulas of models are changed the fraction of free or constrained vehicles may change.

In this paper, $\alpha(t)$, the fraction free flowing vehicles which follow the vehicle ahead with time headway t , are defined by use of variance and covariance of relative speed distribution, and headway distribution is divided into free and constrained part. For both of free and constrained part, translated longnormal distribution are used, and the new models by use of either free or constrained headway distribution model are developed. All headway distribution model parameters are formulated as a function of traffic volume. It becomes clear that traffic flowing patterns under free flow condition and congested flow condition are fundamentally different. All data used in this paper are collected for no-passing zone of rural two lane roads.

1. はじめに

道路交通流の基本的性質を知ることは、道路諸施設の合理的な設計・運用を行う上で、最も基本となるものであり、とくに、非渋滞時から渋滞時にいたる交通挙動を体系的に解明することは、交通制御施設の設計・運用を考える上で必要不可欠である。交通現象は個々の車の運動の集合体として出現するものであるから、その挙動の基本的性質を把握し、理論化するためには交通流挙動の内部構造を十分に解明することが必

要である。この観点より、道路交通流を記述する物理量が交通流を表現する指標として具備すべき要件としては、

- (1) 交通流挙動の内部構造をとらえ表現し得るものであること。
- (2) 直接測定が容易に行えること。
- (3) 安定した定式化が可能であり他の指標となる物理量を求める基本量となり得ること。
- (4) 交通制御施設により人為的に制御可能であること。

などが考えられる。これらのことを考慮すると、結局車頭間隔と速度とを交通現象記述の基本量として選定し諸検討を加えることが妥当であると判断でき、この

* 建設工学科

** 九州大学工学部土木工学科

意味でこれら2つの物理量に注目してその基本的性質を明らかにするとともにその相互関係について検討を加えることには意義がある。速度分布、車頭時間分布を考えるうえで最も問題となるのは交通流を構成している車が自由車であるか追従車であるかを判別することである。車頭時間分布に関する従来の研究のうちで代表的なものは交通流を自由車、追従車とからなる2面構成としてとらえそれぞれに異なった理論分布を当てはめ表現しようとする複合車頭間隔分布の研究であるが¹⁻⁹⁾、いずれのモデルにおいてもすでに著者らが指摘したように¹⁰⁾これらのモデルで導入されている自由車、追従車の概念はあいまいであり複合車頭間隔分布仮定の理念として用いられているに過ぎず、道路交通流の内部構造の解明、諸交通状態に対する適用上の汎用性といった点で疑問が残る。

以上のような問題点をふまえて本研究では、交通流が自由車と追従車で構成されることを前提として、その内部構造が把握できること、現象に対し適用性が高く、交通状態の変化に対して汎用性があることを意図して交通流モデルの構築をはかるものであり、具体的には、

- (1) 連続する2台の車の相対速度分布に基づいた自由車・追従車の定義と分離方法。
- (2) 自由車・追従車の分離に基づいた車頭間隔モデルの開発。
- (3) モデルのパラメータと交通量の関係。
- (4) 渋滞時、非渋滞時の交通特性。

以上4点を主要課題として検討を加えるものである。

なお、本研究で用いられた観測データは全て郊外2車線追越禁止区間での交通観測により得られた結果を1分間データとして集計処理したものである。

2. 相対速度分布と自由車率 $\alpha(t)$ の誘導

2.1 先行車・後続車の速度分布と相対速度分布

連続する2台の車に注目し、先行車と後続車の相対速度を次式で定義する。

$$Z = X - Y \tag{1}$$

- Z: 相対速度
- X: 先行車の速度
- Y: 後続車の速度

このとき、相対速度の平均 μ_z 、分散 σ_z^2 は先行車・後続車の速度の平均 μ_x, μ_y 、分散 σ_x^2, σ_y^2 および共分散 $Cov(xy)$ を用いて次式で表わされる。

$$\mu_z = \mu_x - \mu_y \tag{2}$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 - 2Cov(xy) + \sigma_y^2 \tag{3}$$

式(3)は

$$\rho = \frac{Cov(xy)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \rho: \text{相関係数} \tag{4}$$

なる関係より、次式のように表現することもできる。

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 - 2\rho\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 \tag{5}$$

ここで相対速度分布と車頭時間との関係を考える。後続車の車頭時間を t とすれば t が十分大であれば、後続車は先行車と独立に、その車の自由速度で走行し共分散 $Cov(xy)$ 、相関係数 ρ は共に零が近づくと推察される。一方、車頭時間 t が小さくなるにつれ後続車は次第に自由を失ない、ついには先行車に完全に追従するようになり、このとき $Cov(xy)$ は $\sigma_x\sigma_y$ へ、 ρ は 1 へ近づくと推察される。したがって、 μ_z, σ_z^2 は車頭時間の関数として表わされる。すなわち

$$\mu_z(t) = \mu_x - \mu_y(t) \tag{6}$$

$$\sigma_z^2(t) = \sigma_x^2 - 2Cov_{xy}(t) + \sigma_y^2(t) \tag{7}$$

あるいは

$$\sigma_z^2(t) = \sigma_x^2 - 2\rho(t)\sigma_x\sigma_y(t) + \sigma_y^2(t) \tag{8}$$

また、 $\mu_x, \mu_y(t), \sigma_x, \sigma_y(t)$ の関係について考察すると、完全自由走行状態においては、 $\mu_y(t), \sigma_y(t)$ は μ_x, σ_x に等しくなる。また完全追従状態においては、後続車は先行車の挙動に完全に拘束されるので、このときにも $\mu_y(t), \sigma_y(t)$ は μ_x, σ_x にほぼ等しくなるものと考えられる。したがって、

$$\mu_y(t) = \mu_x = Const. = \mu \tag{9}$$

$$\sigma_y^2(t) = \sigma_x^2 = Const. = \sigma \tag{10}$$

とするのは、無理のない仮定である。式(9)(10)を、式(6)(7)(8)に代入し整理すれば、

$$\mu_z(t) = 0 \tag{11}$$

$$\sigma_z^2(t) = 2[\sigma^2 - Cov_{xy}(t)] \tag{12}$$

$$\sigma_z^2(t) = 2\sigma^2[1 - \rho(t)] \tag{13}$$

全ての車が自由走行する場合には、 $\rho = 0, Cov(xy) = 0$ となり、このとき σ_z^2 は最大値 $2\sigma^2$ を取る。全ての車が追従走行する場合には、 σ_z^2 は最小値 $2[\sigma^2 - Cov^*(xy)]$ あるいは $2\sigma^2[1 - \rho^*]$ を取る。(全ての車が停止している場合を除き、全ての後続車が先行車と全く等しい速度で走行することは現実には生じ得ないの

で、 $\rho = 1$, $Cov(xy) = \sigma_x \sigma_y$ は現実には成立し得ないと考えられる。

2.2 自由車率 $\alpha(t)$

相対速度分布の密度関数を $\phi(z)$ とし、次の関係が成立するものと仮定する。

ここに、

$$\phi(z) = \alpha \phi_f(z) + (1 - \alpha) \phi_g(z) \quad (14)$$

$\phi(z)$: 相対速度の密度関数

$\phi_f(z)$: 全車自由走行時の相対速度の密度関数

$\phi_g(z)$: 全車追従走行時の相対速度の密度関数

α : $\phi(z)$ において $\phi_f(z)$ の占める割合

このとき、相対速度の分散に関して次式がえられる。

$$\sigma_z^2 = \alpha \sigma_f^2 + (1 - \alpha) \sigma_g^2 \quad (15)$$

ここに σ_f^2 , σ_g^2 はそれぞれ全車自由走行時、全車追従走行時の相対速度分布の分散であるから、したがって

$$\sigma_f^2 = 2\sigma^2 \quad (16)$$

$$\sigma_g^2 = 2[\sigma^2 - Cov^*(xy)] \quad (17)$$

あるいは

$$\sigma_g^2 = 2\sigma^2(1 - \rho^*) \quad (18)$$

ここで α は σ_z^2 が車頭時間の関数であるから、結局 $\alpha = \alpha(t)$ であり、式 (15) を α について解き、式 (16) (17) (18) を代入し整理すると、

$$\alpha(t) = 1 - \frac{Cov_{xy}(t)}{Cov^*(xy)} \quad (19)$$

あるいは

$$\alpha(t) = 1 - \frac{\rho(t)}{\rho^*} \quad (20)$$

となり、 α は結局車頭時間の関数となる。また式 (14) の仮定より α は車頭時間 t で走行する車における自由車の割合を表わすものと考えられ、この意味でこれを自由車率と呼ぶことにする。

式 (19) (20) より

$$1 - \alpha(t) = \frac{Cov_{xy}(t)}{Cov^*(xy)} \quad (21)$$

$$1 - \alpha(t) = \frac{\rho(t)}{\rho^*} \quad (22)$$

$\rho^* = 1$ が成立する場合には追従車率 $1 - \alpha(t)$ は相関係数に等しくなる。

2.3 観測データによる $\alpha(t)$ の決定

Fig. 1~4 にそれぞれ渋滞時、非渋滞時の σ_x , σ_y ,

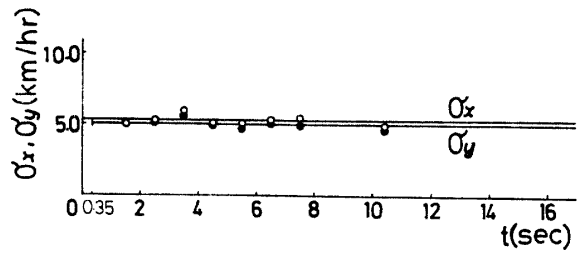


Fig. 1 Standard deviation of leaders and followers speed σ_x , σ_y versus time headway t , data from congested flow (\circ σ_x , \bullet σ_y).

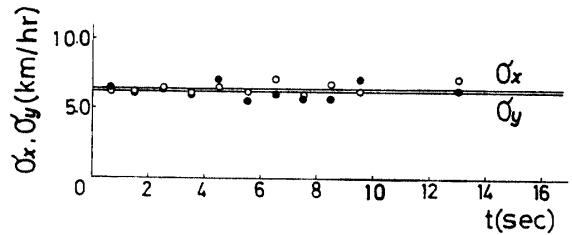


Fig. 2 Standard deviation of leaders and followers speed σ_x , σ_y versus time headway t , data from non-congested flow (\circ σ_x , \bullet σ_y).

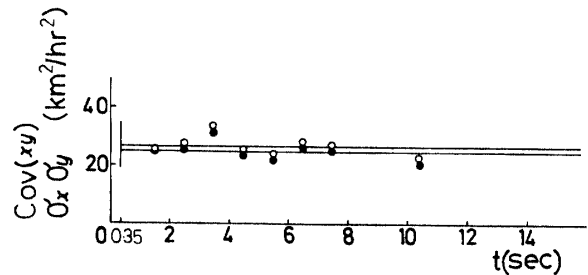


Fig. 3 The product of standard deviation of leaders and followers speed $\sigma_x \sigma_y$ versus time headway t , and covariance of speed $Cov(xy)$ versus time headway t , between successive vehicles, data from congested flow (\circ $\sigma_x \sigma_y$, \bullet $Cov(xy)$).

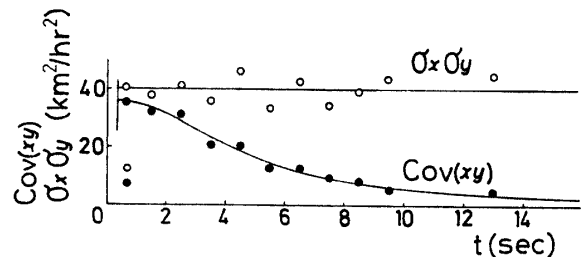


Fig. 4 The product of standard deviation of leaders and followers speed $\sigma_x \sigma_y$ versus time headway t , and covariance of speed $Cov(xy)$ versus time headway t , between successive vehicles, data from non-congested flow (\circ $\sigma_x \sigma_y$, \bullet $Cov(xy)$).

$\sigma_x \sigma_y$, $Cov(xy)$ と車頭時間との関係を示す。これらの図より見てとられるように、非渋滞時の $Cov(xy)$ を除いて他は全て車頭時間に対して一定であり、渋滞時・非渋滞時ともに σ_y は σ_x よりやや小さめの値を取るが、全体的に見て両者はほぼ等しいと見なし得ることがわかる。渋滞時においては、 $\sigma_x \sigma_y$, $Cov(xy)$ も車頭時間に関係なく一定であり相関係数の平均値は 0.9323 であって、非渋滞時における ρ の最大値を常に上まわっている。このことから、渋滞時においては、全ての車が追従走行しているものと見なし得る。非渋滞時における $Cov(xy)$ に対して、回帰曲線の当てはめを行った結果、次式を得た。

$$Cov_{xy}(t) = \frac{Cov^*(xy)}{A(t-t_0)^2 + 1} \quad (23)$$

ここに

$$Cov^*(xy) = 36.0$$

$$A = 0.055$$

$$t_0 = 0.35 \text{ (最小車頭時間, sec)}$$

式 (23) を式 (19) (21) に代入することにより、結局、 $\alpha(t)$, $1-\alpha(t)$ として次式が得られる。

$$\alpha(t) = \frac{A(t-t_0)^2}{A(t-t_0)^2 + 1} \quad (24)$$

$$1-\alpha(t) = \frac{1}{A(t-t_0)^2 + 1} \quad (25)$$

式 (23) を用いて相対速度の分散、相関係数を計算した結果を示したのが Fig. 5, 6 であり、回帰曲線は、データの傾向を良好に表わしていることがわかる。Fig. 7 に $\alpha(t)$, $1-\alpha(t)$ を示す。

本研究以前には、 σ_z^2 と車頭時間 t との関係については、成長曲線などのような、データプロットの傾向を良く表わしそうな曲線を当てはめていたが、ここで、

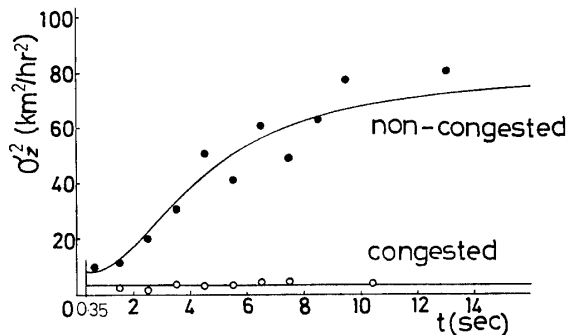


Fig. 5 Variance of relative speed σ_z^2 versus time headway t , and regression curves (○ congested, ● non-congested).

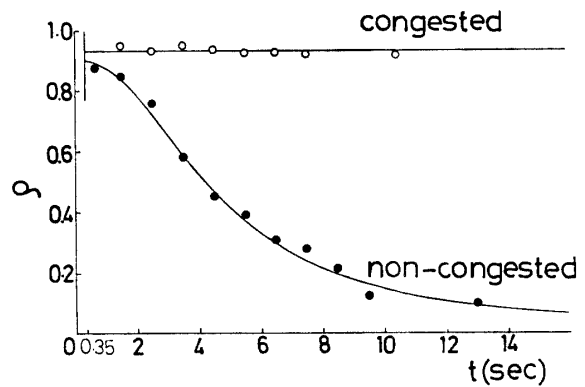


Fig. 6 Correlation coefficient of speed ρ versus time headway t , between successive vehicles and regression curves (○ congested flow, ● non-congested flow).

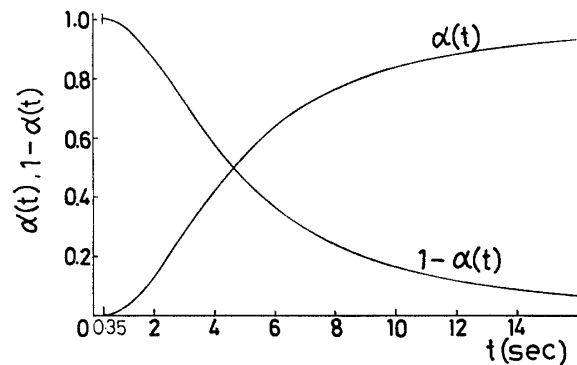


Fig. 7 $\alpha(t)$ and $1-\alpha(t)$ curves.

σ_z^2 は相対速度分布と関係付けられた関係式により表現することが可能となった。

3. 車頭時間分布モデル

3.1 自由車割合 P_f , 追従車割合 $1-P_f$ の誘導

前節で求められた $\alpha(t)$ あるいは $1-\alpha(t)$ を用いることにより、車頭時間分布を自由車に対するものと追従車に対するものとに分類可能となった。ここで全交通流中に自由車の占める割合を P_f , 追従車の占める割合を $1-P_f$ とすると、車頭時間の密度関数 $h(t)$ は、自由車、追従車の車頭時間の密度関数のいずれか一方のみを用いて、次式で表わすことができる。

$$h(t) = \frac{P_f}{\alpha(t)} f(t) \quad (26)$$

$$h(t) = \frac{1-P_f}{1-\alpha(t)} g(t) \quad (27)$$

ここに $f(t)$: 自由車の車頭時間の密度関数
 $g(t)$: 追従車の車頭時間の密度関数

式 (26) (27) はいずれも $t=t_0$ から無限大まで積分すれば 1 になるから、したがって

$$P_f = \frac{1}{\int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{\alpha(t)} f(t) dt} \quad (28)$$

$$1 - P_f = \frac{1}{\int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{1 - \alpha(t)} g(t) dt} \quad (29)$$

$\alpha(t)$ の関数形からみて、式 (29) の方が解き易く、また追従車の車頭時間分布は分布形が安定しており、対数正規分布で良好に表わされることから、ここでは $g(t)$ として次式を用いて $1 - P_f$ を算出する。

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_\theta(t-t_0)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t-t_0) - \xi_\theta}{\zeta_\theta} \right)^2 \right\} \quad (30)$$

とすると

$$1 - P_f = \frac{1}{\int_{t_0}^{\infty} \{A(t-t_0)^2 + 1\} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_\theta(t-t_0)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t-t_0) - \xi_\theta}{\zeta_\theta} \right)^2 \right\} dt} \quad (31)$$

これより

$$1 - P_f = \frac{1}{A \exp \{2(\xi_\theta + \zeta_\theta^2)\} + 1} \quad (32)$$

したがって

$$P_f = \frac{A \exp \{2(\xi_\theta + \zeta_\theta^2)\}}{A \exp \{2(\xi_\theta + \zeta_\theta^2)\} + 1} \quad (33)$$

以上のことから、これまで、データプロットの傾向を良く表わしそうな曲線を当てはめていた P_f , $1 - P_f$ が車頭時間分布と関係付けられる形で表現することができた。

3.2 車頭時間分布のパラメータ

Fig. 8~13 に渋滞・非渋滞時の車頭時間分布の平均

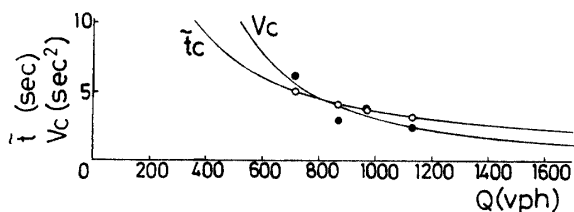


Fig. 8 Mean \bar{t}_c and variance V_c of headway versus traffic volume Q , data from congested (\circ \bar{t}_c , \bullet V_c).

値と分散、および対数正規分布のパラメータと交通量との関係を示す。図中に示される平均車頭時間、分散に対して n 次曲線による回帰計算を行いそれぞれ次の結果を得た。

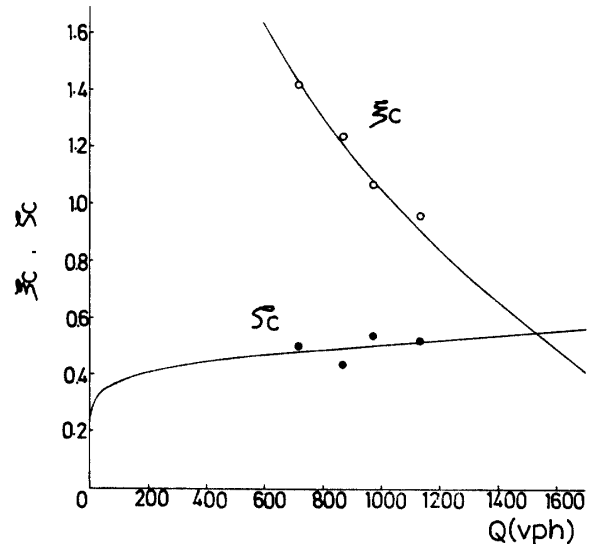


Fig. 9 Parameter ξ_c and ζ_c of displaced lognormal distribution versus traffic volume Q and regression curves, data from congested flow (\circ ξ_c , \bullet ζ_c).

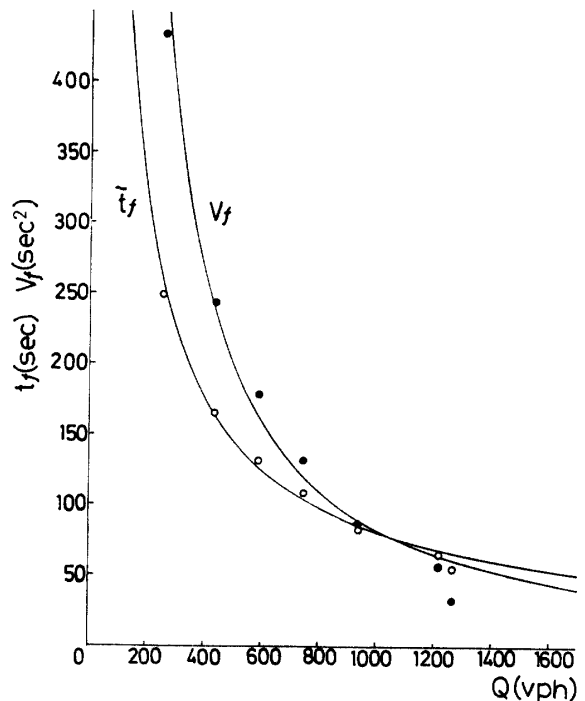


Fig. 10 Mean \bar{t}_f and variance V_f of freely flowing vehicles headway versus traffic volume Q and regression curves, data from non-congested flow (\circ \bar{t}_f , \bullet V_f).

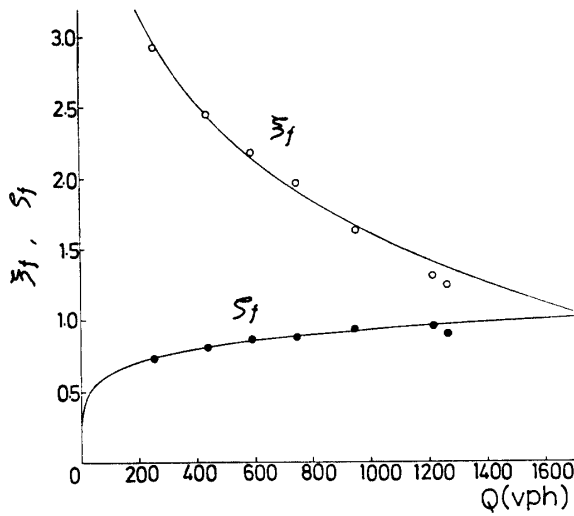


Fig. 11 Parameter ξ_f and ζ_f of displaced lognormal distribution versus traffic volume Q and regression curves, data from non-congested flow (\circ ξ_f , \bullet ζ_f).

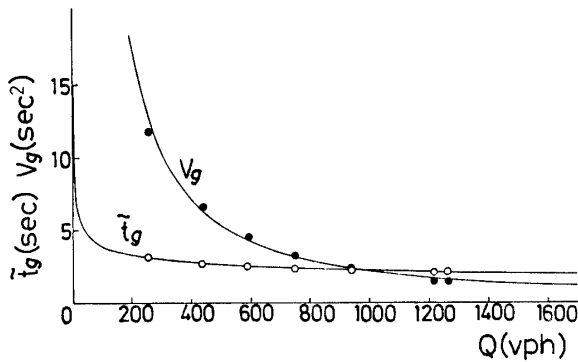


Fig. 12 Mean \bar{t}_g and variance V_g of constrained flowing vehicles headway versus traffic volume Q and regression curves, data from non-congested flow (\bullet \bar{t}_g , \circ V_g).

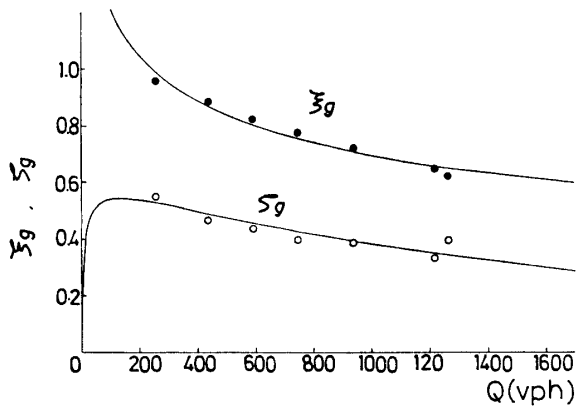


Fig. 13 Parameter ξ_g and ζ_g of displaced lognormal distribution versus traffic volume Q and regression curves, data from non-congested flow (\bullet ξ_g , \circ ζ_g).

渋滞交通に対しては、この場合には全ての車が追従車となっているから、車頭時間分布は単一分布となる。車頭時間分布の平均、分散に関して次式が得られた。

$$\begin{cases} \bar{t}_c = 3600/Q \\ V_c = 8.13 \cdot 10^5 Q^{-1.8087} \end{cases} \quad (34)$$

非渋滞交通に対しては、複合分布モデルが対応し、自由車に対しては

$$\begin{cases} \bar{t}_f = 2.9 \cdot 10^3 Q^{-0.8517} \\ V_f = 5.6 \cdot 10^5 Q^{-1.2780} \end{cases} \quad (35)$$

追従車に対しては

$$\begin{cases} \bar{t}_g = 12.4 Q^{-0.2496} \\ V_g = 1.72 \cdot 10^4 Q^{-1.3003} \end{cases} \quad (36)$$

各分布モデルのパラメータと平均、分散との間には次の関係があるので、式 (34)~(36) を用いて、分布のパラメータは直ちに計算し得る。

$$\begin{cases} \xi = \ln(\bar{t} - t_0) - \frac{1}{2} \ln \left[\frac{V_g}{(\bar{t} - t_0)^2} + 1 \right] \\ \zeta = \sqrt{\ln \left[\frac{V_g}{(\bar{t} - t_0)^2} + 1 \right]} \end{cases} \quad (37)$$

P_f $1-P_f$ もまた交通量の関数として表わされる。分布の各パラメータのデータプロットと回帰曲線は良好な一致を示している。また、 P_f , $1-P_f$ についてもデータプロットと回帰曲線は良好な一致を示している。

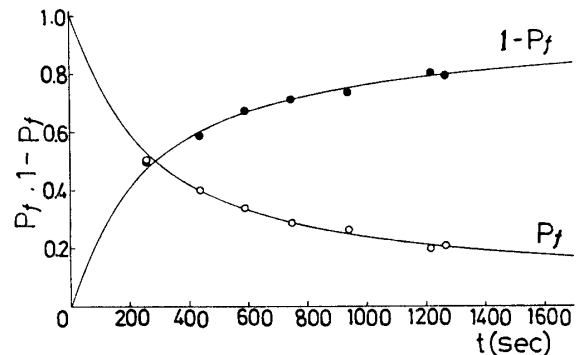


Fig. 14 P_f and $1-P_f$ versus traffic volume Q and regression curves.

4. おわりに

本研究では、先行車、後続車の相対速度分布に基づいて、自由車率 $\alpha(t)$ を誘導し、これを用いることにより自由車、追従車の分離が可能となり、また車頭時間分布モデルの全てのパラメータを交通量と関係付け

て求めることが可能となった。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 先行車，後続車の速度の分散，共分散は，非渋滞時の共分散を除いて，他は全て車頭時間に関係なく一定であると見なし得る。
- (2) 渋滞流においては，全ての車は追従車であると見なし得る。
- (3) 自由車割合 P_f は交通量の関数として表現することが可能となり，データとの一致は良好であった。
- (4) その他の全ての車頭時間分布のパラメータもまた交通量の関係として与えられ，データと回帰曲線とは良好な一致を示した。

本研究の遂行に当たり，九州大学工学部土木工学科道路研究室の皆様にご協力頂いた，ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Schuhl A.: Eno Foundation, p. 59 (1955)
- 2) Greenberg I.: Austral. Road Res., **2**, 14 (1966)
- 3) Tolle J.E.: Traffic Engng. + Control, **13**, 22 (1971)
- 4) Tolle J.E.: Transpn. Res. Rec., No. 456, 56 (1976)
- 5) Buckley D.J.: Austral. Road Res. Bd., **1**, 153 (1962)
- 6) 高田弘: 土木学会論文報告集, No. 124, 28, (1965)
- 7) Buckley D.J.: Transpn. Sci., **2**, 107 (1968)
- 8) Katakura M.: Proc. of JSCE, No. 189, 107 (1971)
- 9) 田村洋一: 山口大学工学部研究報告, **31**, 327(1981)
- 10) 田村洋一, 橋本 武: 九州大学工学集報, **55**, 89 (1982)

(昭和57年4月20日 受理)