

# 自由車・追従車構成に着目した車頭時間 分布モデルに関する研究

TIME HEADWAY DISTRIBUTION MODEL BASED ON THE COMPOSITION  
OF FREE AND CONSTRAINED FLOWING VEHICLES

田村 洋一\*・樗木 武\*\*

By Youichi TAMURA and Takeshi CHISHAKI

## 1. ま え が き

交通流の効果的管理を図る諸施策を検討するために、交通流現象の正確な把握が必要であることはいうまでもない。特に最近のように、全市民的に自動車が普及したにもかかわらず、道路施設整備が追いつけない状態では、交通の安全性や施設の有効利用を当面の策として論議することになるが、その前提として交通流の諸現象を精度よく解明し、有用な諸情報を提供することが一段と望まれるであろう。

交通流の基本は、自由あるいは追従的に走行する個々の車の集合体である。したがって、この意味で確率論的にアプローチする試みは交通現象把握の観点から本質的なものであるといえ、その面からの研究も多々ある。その際、交通流現象をどのような物理量でとらえ、正確に表現するかが常に問題になる。すなわち、交通流の物理量として、速度、密度、交通量、占有率などがあるが、これらのうちで交通流の内部構造に立ち入った根元的検討が可能であること、測定が直接的で容易であることなどを踏まえると、車頭間隔と交通量とが交通流記述の重要な基本量になると判断される。

本研究は、上述の認識に立ち、交通流の内部構造を分析する過程から、車頭時間の確率分布について検討し、そのモデルを提案するものである。周知のように、車頭間隔分布は、従来から多くの研究がなされているが<sup>1)~9)</sup>、それらのなかで、交通流を自由車、追従車の2面構成でとらえ、それぞれ異なる分布を仮定したいわゆる複合分布モデルの研究がある<sup>10)~12)</sup>。この種の研究は、交通流をその内部構造と関連して把握するうえで望ましい一法であり、その最初のものは、A. Schuhl<sup>13)</sup>による複合指数分布モデルの適用であろう。以来、指数分布、ガンマ分

布、アーラン分布、対数正規分布、正規分布などの組合せに基づく複合分布モデルの適用が検討されている<sup>14)~19)</sup>。

しかし、これら従来における基本的問題点として次のことが指摘できる。すなわち、従来の研究は交通流の自由車、追従車構成を単に複合分布モデル適用上の概念として用いたにすぎず、両者の定義は明確でなく、また、具体的なモデルの評価を観測分布の総括的取扱いにより把握しているにすぎない。このため、得られた分布モデルは計算に用いられた観測データの良好な再現性を与えるにしても、交通流の内部構造把握に直接寄与するものでない。換言すれば、従来研究成果である諸分布モデルは、観測データの表現を主たる目的に構築されたものであり、また、交通流記述のもう1つの基本量である速度分布と直接関係づけられていないことにも起因して、個々の交通状態の表面的な再現性を与えるにすぎず、非渋滞流から渋滞流に至る諸交通状態の変化に対応する一貫した汎用性、交通流の内部構造解明という点で大いに疑問が残る。そこで、本研究は、交通流が自由車と追従車とから構成されることを前提に、その内部構造が把握できること、現象に対する適合性が高いこと、交通状態の広範な変化に即応する汎用性があることを意図して、新たな車頭時間分布モデルの構築を図るものである。具体的には、非渋滞流から渋滞流に至る交通流を対象に、

- ① 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く車頭時間分布モデルの構築
- ③ モデルのパラメーターと交通量との関係

の3観点を中心に検討するものである。

本研究で用いた観測データは、国道2号線（小郡バイパス、牟礼江泊）、190号線（柳ヶ瀬、恩田、後潟）、202号線（福吉）の平坦で直線的な郊外部2車線追越禁止区間で観測されたものであり、表-1にその概要を示す。国道202号線での観測には、16mmメモーションカメラ

\* 正会員 工修 山口大学助手 建設工学科

\*\* 正会員 工博 九州大学教授 土木工学科

表-1 観測日時、対象区間およびデータ規模

Date and Duration	Location	No. of Observed Vehicles
22th. Sept. 1977 p.m. 1:55~3:00	Yanagase (Route 190)	459
22th. Sept. 1977 p.m. 4:52~6:05	"	1010
28th. Oct. 1977 a.m. 7:03~8:30	"	1201
27th. Sept. 1977 p.m. 3:45~4:25	Ogori By-pass (Route 2)	306
27th. Sept. 1977 p.m. 4:37~5:50	"	718
21th. Oct. 1977 a.m. 11:00~12:00	Mureedomari (Route 2)	907
27th. Oct. 1977 a.m. 10:43~12:00	"	701
28th. Oct. 1977 p.m. 3:51~4:40	Onda (Route 190)	517
11th. Nov. 1977 p.m. 3:50~5:35	"	1336
18th. Nov. 1978 p.m. 2:25~3:25	Ushirogata (Route 190)	416
18th. Nov. 1978 p.m. 3:30~5:00	"	1353
21th. Nov. 1978 a.m. 10:20~12:05	"	1004
21th. Nov. 1978 p.m. 12:40~1:46	"	615
21th. Nov. 1978 p.m. 2:04~4:06	"	1114
9th. Aug. 1981 p.m. 3:30~5:45	Fukuyoshi (Route 202)	1845

ラを用い、他の2路線での観測には、道路上2つの測定点への車の到着時刻をストップウォッチと8mmカメラの併用により記録し、解析に必要な諸量を求めたものである。各地点で一連のデータは、1分間ごとに集計し計算に用いている。なお、1分間データとしたことは、より安定した車頭時間分布モデルの作成を意図したことと、事後の研究になるが、交通量変動の諸分布に対し普遍的応用性をもたせることを配慮したことによる。

## 2. 自由車・追従車の定義と分離法

### (1) 自由車・追従車の定義

交通流の内部構造の解明で問題となるのは、自由車・追従車の定義である。従来の研究では、前章に指摘するように、自由車、追従車は車頭間隔分布モデルあてはめの結果として全交通流中に占めるそれぞれの割合を推定し分離するか<sup>3)~9)</sup>、あるいは、車群台数分布の研究<sup>10)~13)</sup>にみられるように、限界車頭間隔の設定により分離する方法が用いられている。しかしながら、いずれも自由車、追従車の定義が曖昧であり、このことは、自由車、追従車の定義が速度との関係で明確になされていないこ

とに起因するものである。

本研究では、先行車の影響を受け、その希望速度以下の速度で走行することを強制されている車を追従車、希望速度を維持して走行している車を自由車と定義する。換言すれば、ある車が自由車であるか追従車であるかは、その車が希望速度より速度低下を生じているか否かにより決定され、表面的に追従走行しているように見えても、先行車の速度に等しいか、あるいはそれ以下の希望速度をもつ車は自由車である。したがって、ある車頭間隔が与えられるとき、その車頭間隔で走行している車の集合は、自由車と追従車で構成されることになる。このとき、自由車と追従車とを分離する問題は、それぞれの車頭間隔で走行する車の中で自由車、追従車の割合を推定する問題に帰着する。しかし、現実の交通流で個々の車の希望速度を直接知り、自由車、追従車を分離することはできないので、結局、交通挙動の表面に現われる自由車、追従車構成を反映する物理量を指標として、その構成割合を推定する方法を見出すことが現実的である。すなわち、連続する2台の車の相対速度分布と車頭間隔との関係に着目し、自由車率（追従車率）の概念を導入することにより交通流の自由車・追従車構成を推定的に求める方法がそれである。

### (2) 相対速度分布と車頭時間との関係

連続する2台の車の速度をそれぞれ  $X, Y$  とし、これらが正規分布に従うとき、両者の相対速度  $Z = X - Y$  の分布もまた正規分布となる。その平均  $\mu_z$ 、分散  $\sigma_z^2$  が次の諸式で与えられることは周知の事実である。

$$\begin{aligned} \mu_z &= \mu_x - \mu_y \dots\dots\dots (1) \\ \sigma_z^2 &= \sigma_x^2 - 2 \text{Cov}_{xy} + \sigma_y^2 = \sigma_x^2 - 2 \rho \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 $\mu_x, \mu_y$  :  $X, Y$  の平均、 $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  :  $X, Y$  の分散、 $\text{Cov}_{xy}$  :  $X$  と  $Y$  との共分散、 $\rho = \text{Cov}_{xy} / \sigma_x \sigma_y$

また上述の諸関係は、 $X, Y$  の分布が正規分布以外の場合でも近似的に成立する。したがって、相対速度の分布は先行車、後続車の速度分布、および、それらの相関関係を知ることにより求めることができる。

そこで、速度分布に関するこれらのパラメーターと車頭時間との関係を知るために、観測データを車頭時間1秒ごとにクラス分けし、対応する速度分布のパラメーターを計算した。その結果は図-1~図-4である。また、相対速度の観測データより計算された分散と車頭時間との関係を図-5に示す。図-1より、 $\mu_x, \mu_y$  はほぼ等しい値をとりながら、車頭時間が大きくなるにつれ、非渋滞流ではわずかず増大し、渋滞流では大きく減少することが理解できる。図-2より、 $\sigma_x, \sigma_y$  は非渋滞流、渋滞流のいずれにおいても車頭時間に関し変化せず一定で

あり、両者の値はそれほど大きな差はない。Cov<sub>xy</sub>は非渋滞流において車頭時間の増加に伴い減少し、渋滞流において車頭時間に関し一定である。図-4のρもまた同様である。ここで、ある車が渋滞、非渋滞のいずれに属するかの判定は、文献14)の研究成果を踏まえて、時速35kmを境界としてそれ以下の速度の車を渋滞車、それ以上の速度の車を非渋滞車として分類した。この速度境界値は必ずしも絶対的なものでなく不確定な面もあるが、このような境界設定によるパラメーターの推定精度はそれほど敏感に影響を受けるものでないことを確認している。

以上から、非渋滞流に関しては、μ<sub>x</sub>=μ<sub>y</sub>=μ<sub>f</sub>、σ<sub>x</sub>=σ<sub>y</sub>=σ<sub>f</sub>とみなすことができ、また、Cov<sub>xy</sub>、ρは車頭時間の関数、すなわち、Cov<sub>xy</sub>=Cov<sub>f</sub>(t)、ρ=ρ<sub>f</sub>(t)とすることができる。そこで、これらを式(1)、(2)に適用すると相対速度分布の平均は零となり、分散は車頭時間tの関数となるから、これをσ<sub>z</sub><sup>2</sup>=σ<sub>z</sub><sup>2</sup>(t)とすると

$$\sigma_{zf}^2(t) = 2\{\sigma_f^2 - \text{Cov}_f(t)\} = 2\sigma_f^2\{1 - \rho_f(t)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\rho_f(t) = \text{Cov}_f(t) / \sigma_f^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Cov<sub>f</sub>(t)、ρ<sub>f</sub>(t)はデータよりみていずれもtの減少関数となるので、σ<sub>z</sub><sup>2</sup>(t)はtの増加関数となる。ここ

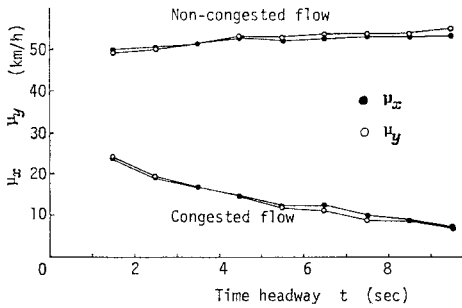
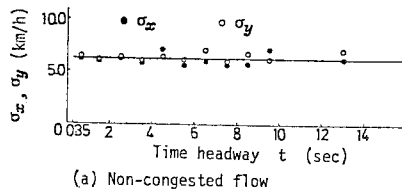


図-1 μ<sub>x</sub>、μ<sub>y</sub>と車頭時間との関係



(a) Non-congested flow

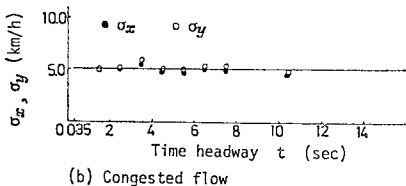


図-2 σ<sub>x</sub>、σ<sub>y</sub>と車頭時間との関係

で、最小車頭時間をt<sub>0</sub>とすると、t=t<sub>0</sub>のとき、Cov<sub>f</sub>(t)、ρ<sub>f</sub>(t)はそれぞれ最大値Cov<sub>f</sub>max、ρ<sub>f</sub>maxをとり、t→∞のときいずれも零となるから、したがってσ<sub>z</sub><sup>2</sup>(t)はt=t<sub>0</sub>、t→∞でそれぞれ最小値、最大値をとる。そこで、σ<sub>z</sub><sup>2</sup>(t)の最大値をσ<sub>z</sub><sup>2</sup>max、最小値をσ<sub>z</sub><sup>2</sup>minとすれば

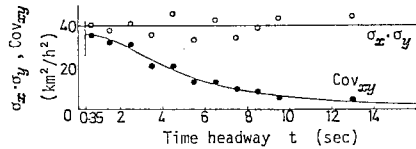
$$\sigma_{zf}^2 \text{max} = 2\sigma_f^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_{zf}^2 \text{min} = 2(\sigma_f^2 - \text{Cov}_f \text{max}) = 2\sigma_f^2(1 - \rho_f \text{max}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

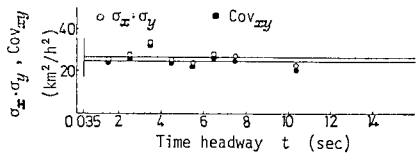
したがって、Cov<sub>f</sub>(t)を定式化することにより、σ<sub>z</sub><sup>2</sup>(t)が定式化できる。そこで、図-3(a)のデータに対して曲線のあてはめを行えば、Cov<sub>f</sub>(t)として式(7)が得られた。

$$\text{Cov}_f(t) = \frac{B}{A(t-t_0)^2 + 1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、t:車頭時間(s)、t<sub>0</sub>=0.35(s)、A=0.055(s<sup>-2</sup>)、



(a) Non-congested flow



(b) Congested flow

図-3 σ<sub>x</sub>・σ<sub>y</sub>、Cov<sub>xy</sub>と車頭時間との関係

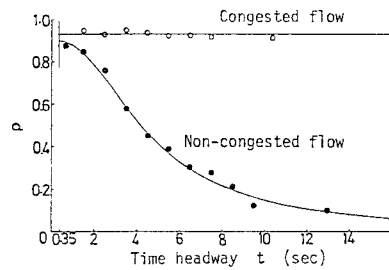


図-4 ρと車頭時間との関係

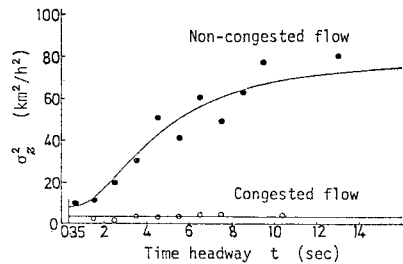


図-5 σ<sub>z</sub><sup>2</sup>と車頭時間との関係

$B=36.00(\text{km}^2/\text{h}^2)$ . なお、 $t_0=0.35(\text{s})$  は観測データの最小値を採用した. 式 (7) を式 (4) に代入すれば  $\rho_f(t)$  が求められ, 式 (3) に代入すれば  $\sigma_{zf^2}(t)$  が求められる.

一方, 渋滞流では, 非渋滞流と同様に,  $\mu_x=\mu_y=\mu_c$ ,  $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_c$  とおくことができ, また  $\text{Cov}_{xy}=\text{Cov}_c$ ,  $\rho=\rho_c$  でいずれも定数となる. したがって, 渋滞流において相対速度分布の平均は零, 分散  $\sigma_{zc^2}$  は定数となり次式で表わされる.

$$\sigma_{zc^2}=2(\sigma_c^2-\text{Cov}_c)=2\sigma_c^2(1-\rho_c)\dots\dots\dots(8)$$

ここに,

$$\rho_c=\text{Cov}_c/\sigma_c^2\dots\dots\dots(9)$$

以上の結果から, 非渋滞流, 渋滞流における速度分布と相対速度分布の関係が明らかになり, また, おのおののパラメーターが車頭時間の関数として定式化できた. こうして得られた理論値が 図-2~図-5 に示す実線であり, データより求めたものとよく合致しているといえる.

(3) 自由車率・追従車率の定義と誘導

前節の結果を, 交通流の自由車・追従車構成の観点から考察しよう. すなわち, 先行車・後続車の速度の相関が, 非渋滞流では車頭時間の減少に伴い高くなり, 渋滞流では常に高い水準で一定であること, 相対速度分布の分散は非渋滞流では車頭時間の減少に伴い減少し, 渋滞流では常に小さな値をとり, 一定であるとみなし得ることから, 相対速度分布が交通流の内部構造を反映していると判断できる. そこで, 相対速度分布の分散を指標として, 自由車・追従車の構成割合を定式化することが妥当であると考えられる. また, 渋滞流はすべて追従車で構成され, 非渋滞流のみ交通流の内部構造が変化するとみなすこともできる.

そこで, 非渋滞流における相対速度分布の密度関数について次式を仮定する.

$$\phi_f(z)=\alpha\phi_{ff}(z)+(1-\alpha)\phi_{fg}(z)\dots\dots\dots(10)$$

ここに,  $\phi_f(z)$ : 相対速度分布の密度関数,  $\phi_{ff}(z)$ : 全車自由走行時の相対速度分布の密度関数,  $\phi_{fg}(z)$ : 全車追従走行時の相対速度分布の密度関数,  $\alpha$ :  $\phi_f(z)$  に

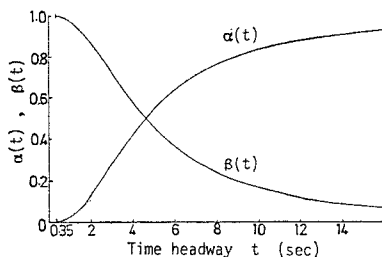


図-6  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$  と車頭時間との関係

おいて  $\phi_{ff}(z)$  の占める割合.

全車自由走行となるのは,  $t \rightarrow \infty$  のときであり, 全車追従走行となるのは,  $t=t_0$  のときであるから, 前節に定義した  $\sigma_{zf^2\text{max}}$ ,  $\sigma_{zf^2\text{min}}$  を使い, かつ  $\mu_z=0$  であることを考慮し式 (10) より相対速度分布  $\phi_f(z)$  の分散  $\sigma_{zf^2}$  を求めれば次式となる.

$$\sigma_{zf^2}=\alpha\sigma_{zf^2\text{max}}+(1-\alpha)\sigma_{zf^2\text{min}}\dots\dots\dots(11)$$

上式を  $\alpha$  について解けば次式が得られる.

$$\alpha=\frac{\sigma_{zf^2}-\sigma_{zf^2\text{min}}}{\sigma_{zf^2\text{max}}-\sigma_{zf^2\text{min}}}\dots\dots\dots(12)$$

式 (12) において,  $\sigma_{zf^2}$  は車頭時間の関数であり  $\sigma_{zf^2\text{max}}$ ,  $\sigma_{zf^2\text{min}}$  はいずれも定数であるから, 結局,  $\alpha$  は車頭時間の関数  $\alpha=\alpha(t)$  となり, 式 (5), (6) および式 (7) を用いて式 (13) が得られる. また,  $\beta(t)=1-\alpha(t)$  とおけば式 (14) が得られる.

$$\alpha(t)=\frac{A(t-t_0)^2}{A(t-t_0)^2+1}\dots\dots\dots(13)$$

$$\beta(t)=\frac{1}{A(t-t_0)^2+1}\dots\dots\dots(14)$$

式 (13), (14) の誘導過程から明らかなように,  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$  は車頭時間  $t$  で走行する車の中での自由車, 追従車の割合を表わすものと考えられ, その意味で, これらを自由車率, 追従車率とよぶことにする.  $\alpha(t)$  と  $\beta(t)$  と車頭時間との関係を 図-6 に示す.

3. 車頭時間分布モデル

これまでの考察の結果, 非渋滞流は自由車と追従車とから構成され, 車頭時間によりその構成割合が変化し, 渋滞流はすべて追従車で構成されるといえる. したがって, 渋滞流は非渋滞流の考察成果を踏まえることにより論ずることができるので, ここでは, 非渋滞流における自由車・追従車構成とその車頭時間分布モデルについて検討することにする.

先に定義した  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$  を用いて, 非渋滞流における車頭時間分布は, 自由車に関するものと追従車に関するものとに分けることができる (図-7). このとき, 全

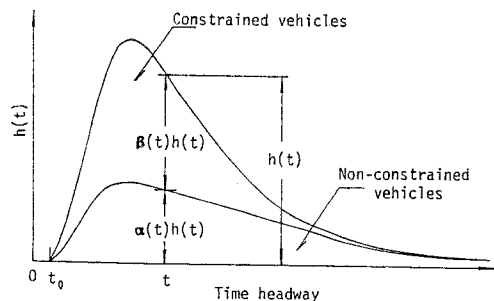


図-7 車頭時間分布の構成

交通流中に自由車・追従車が占める割合を、それぞれ自由車割合  $P_f$ 、追従車割合  $P_g$  とすると、 $P_f + P_g = 1$  であり、次式で求められる。

$$P_f = \int_{t_0}^{\infty} \alpha(t) h_f(t) dt \dots\dots\dots(15)$$

$$P_g = \int_{t_0}^{\infty} \beta(t) h_f(t) dt \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 $h_f(t)$ ：非渋滞流における車頭時間分布の密度関数。

自由車、追従車の車頭時間分布の密度関数をそれぞれ  $f(t)$ 、 $g(t)$  として

$$\alpha(t) h_f(t) = P_f f(t) \dots\dots\dots(17)$$

$$\beta(t) h_f(t) = P_g g(t) \dots\dots\dots(18)$$

なる関係を仮定すれば、 $h_f(t)$  は

$$h_f(t) = P_f f(t) + P_g g(t) \quad (\text{モデル 1}) \dots\dots\dots(19)$$

と表わされる。上記モデルの場合、 $P_f$ 、 $P_g$  は  $h_f(t)$ 、 $f(t)$ 、 $g(t)$  の車頭時間の平均をそれぞれ  $T$ 、 $T_f$ 、 $T_g$  とするとき、次式により計算可能である。

$$P_f = \frac{T - T_g}{T_f - T_g} \dots\dots\dots(20)$$

$$P_g = \frac{T_f - T}{T_f - T_g} \dots\dots\dots(21)$$

ここに、 $T = 3600/Q$  (s)、 $Q$ ：交通量 (VPH)

他方、式 (17)、(18) をそれぞれ個別に解くことにより、

$$h_f(t) = \frac{P_f}{\alpha(t)} f(t) \quad (\text{モデル 2}) \dots\dots\dots(22)$$

$$h_f(t) = \frac{P_g}{\beta(t)} g(t) \quad (\text{モデル 3}) \dots\dots\dots(23)$$

を得る。これらのモデルは、 $h_f(t)$  を  $f(t)$ 、 $g(t)$  のいずれか一方のみで表わし得ることを意味し興味深い、さらに詳しく検討すると、式 (22)、(23) はそれぞれ次のように展開される。

$$h_f(t) = P_f f(t) + P_f \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} f(t) \dots\dots\dots(24)$$

$$h_f(t) = P_g \frac{\alpha(t)}{\beta(t)} g(t) + P_g g(t) \dots\dots\dots(25)$$

式 (24)、(25) の右辺第 1 項は自由車、第 2 項は追従車に関する車頭時間分布を表わしており、結局、これらのモデルは、暗黙のうちに次式を仮定したものにはかならない。

$$f(t) = \frac{P_g}{P_f} \frac{\alpha(t)}{\beta(t)} g(t) \dots\dots\dots(26)$$

$$g(t) = \frac{P_f}{P_g} \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} f(t) \dots\dots\dots(27)$$

また、これらのモデルでは、式 (22)、(23) の一般形のまま  $P_f$ 、 $P_g$  をモデル 1 の場合のように車頭時間の平均により表現することはできないが、モデル 3 は  $\beta(t)$  として、式 (14) を用いるとき、式 (23) が

$$h_f(t) = P_g \{ A(t - t_0)^2 + 1 \} g(t)$$

$$= P_g A(t - t_0)^2 g(t) + P_g g(t) \dots\dots\dots(28)$$

となることから、 $g(t)$  の平均  $T_g$  と分散  $V_g$  とを用い、 $P_f$ 、 $P_g$  を次のように求めることができる。

$$P_f = \frac{A \{ V_g + (T_g - t_0)^2 \}}{A \{ V_g + (T_g - t_0)^2 \} + 1} \dots\dots\dots(29)$$

$$P_g = \frac{1}{A \{ V_g + (T_g - t_0)^2 \} + 1} \dots\dots\dots(30)$$

以上、式 (17)、(18) を仮定することにより、3 種類の車頭時間分布モデルが導かれた。これらのうち、モデル 1 は右辺が確率密度を表わすことが確かめられ、また  $P_f$ 、 $P_g$  と分布の統計量との間には整合性が保証され、本研究の提案とするものである。モデル 2、3 は  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  の内容によっては、右辺が確率密度関数を表わすことを必ずしも保証するものでない。また、式 (13)、(14) の  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  はデータへの回帰曲線より任意的に与えられたものであるから、式 (25) をモデルに利用することは可能でも、式 (26)、(27) が成立することを保証するものではない。これらのことから、式 (22)、(23) のモデルは理論上存在するが、その活用においては問題が多いことを付言しておく。

#### 4. 観測データによるモデルの評価

##### (1) モデルのあてはめ

観測データを用いて提案モデルを具体的に求めるが、非渋滞流、渋滞流における車頭時間分布の密度関数をそれぞれ  $h_f(t)$ 、 $h_c(t)$  とすれば、 $h_f(t)$  は自由車、追従車の車頭時間分布の密度関数  $f(t)$ 、 $g(t)$  により、 $h_c(t)$  は追従車のみの単一分布により表現される。そこで、これらに対しどのような理論分布を仮定するかが問題となるが、これまで著者らが種々の理論分布について検討を行った結果、いずれも対数正規分布を仮定する場合は最も良好な結果を与えることが判明した。すなわち、 $f(t)$ 、 $g(t)$ 、 $h_c(t)$  に対して次の対数正規分布を仮定する。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_f (t - t_0)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t - t_0) - \xi_f}{\zeta_f} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots(31)$$

$g(t)$ 、 $h_c(t)$  は、式 (31) においてパラメーター  $\xi_f$ 、 $\zeta_f$  をそれぞれ  $\xi_g$ 、 $\zeta_g$  および  $\xi_c$ 、 $\zeta_c$  に置換したものである。

観測データへのあてはめにあたり、非渋滞流においては車頭時間の観測データを自由車に関するものと、追従車に関するものとに分ける必要がある。そこで本研究では、車頭時間を 0.3 秒ごとにクラス分けし、各階級値に対する  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  を計算し、これらを各クラスのデー

夕頻度に乗ずることにより、自由車、追従車に関する車頭時間分布を推定的に求め分離した。そのうえで、これらをデータとして  $f(t)$ ,  $g(t)$  に対する仮定理論分布のあてはめを行い、各交通量レベルに対する  $f(t)$ ,  $g(t)$  を定式化した。また、自由車、追従車の車頭時間が分離された結果、 $P_f$ ,  $P_g$  は定義から明らかなように、自由車、追従車それぞれの総和と全データとの比で求められる。

一方、渋滞流は、非渋滞流の場合と同様なクラス分けを行い、直接、 $h_c(t)$  に対する仮定理論分布のあてはめを行えばよい。

以上の考え方により、まず  $f(t)$ ,  $g(t)$ ,  $h_c(t)$  に基づく車頭時間の平均と分散を求め、これらと交通量との関係を定式化する。次いで、その結果を用い分布のパラメーターと交通量との関係を定式化し、さらに得られたパラメーターを用いた計算値と観測データとを比較し、その適合度を検討するものである。

(2) 車頭時間分布の平均・分散と交通量との関係

非渋滞流、渋滞流のデータより各交通量レベルにおける車頭時間の平均・分散を推定し、交通量（1分間交通

量を時間交通量に換算したもので定義する）との関係として、 $n$  次曲線を仮定のうえ回帰演算を行った結果次の諸式を得た。データと回帰曲線との対比を 図-8 に示す。

$$\left. \begin{aligned} T_f &= 1.4064 \cdot 10^3 Q^{-0.7460} \quad (\text{s}) \\ V_f &= 2.4225 \cdot 10^5 Q^{-1.1558} \quad (\text{s}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

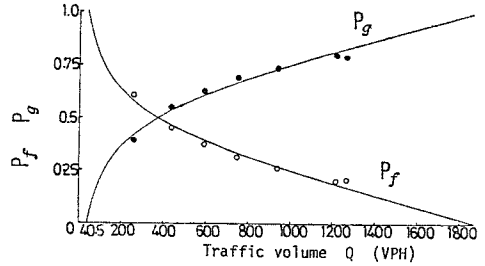
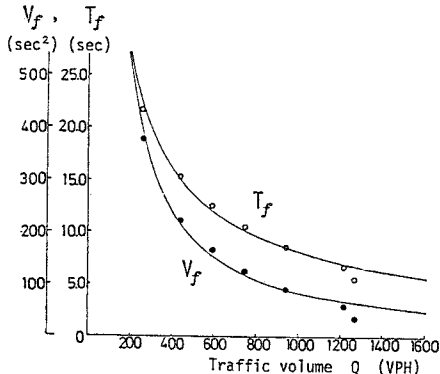
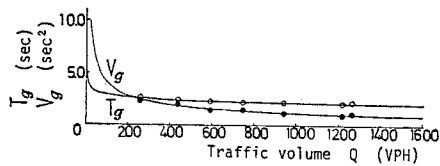


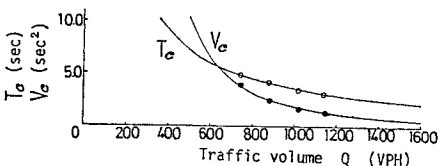
図-9  $P_f$ ,  $P_g$  と交通量との関係



(a) Non-congested flow : non-constrained vehicles

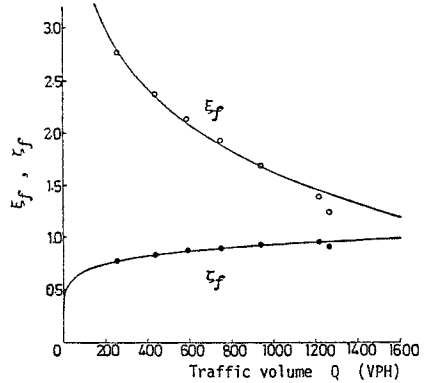


(b) Non-constrained flow : constrained vehicles

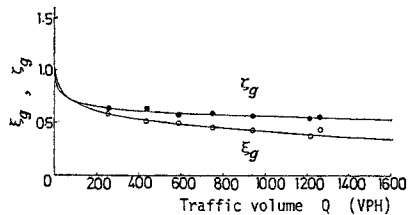


(c) Congested flow

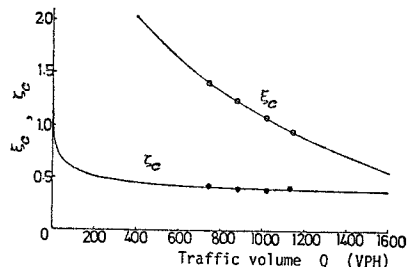
図-8 車頭時間分布の平均・分散と交通量との関係



(a) Non-congested flow :  $f(t)$

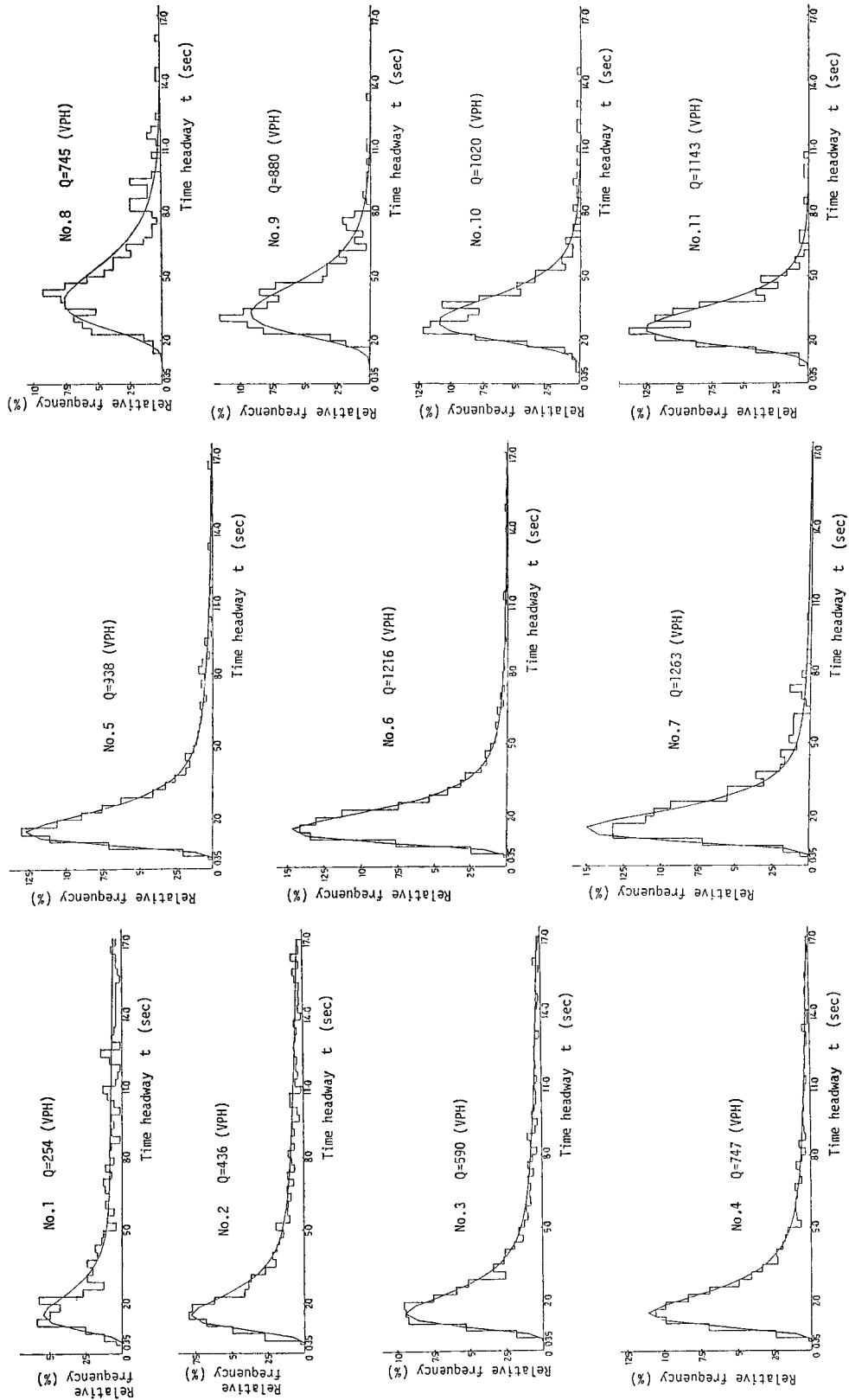


(b) Non-congested flow :  $g(t)$



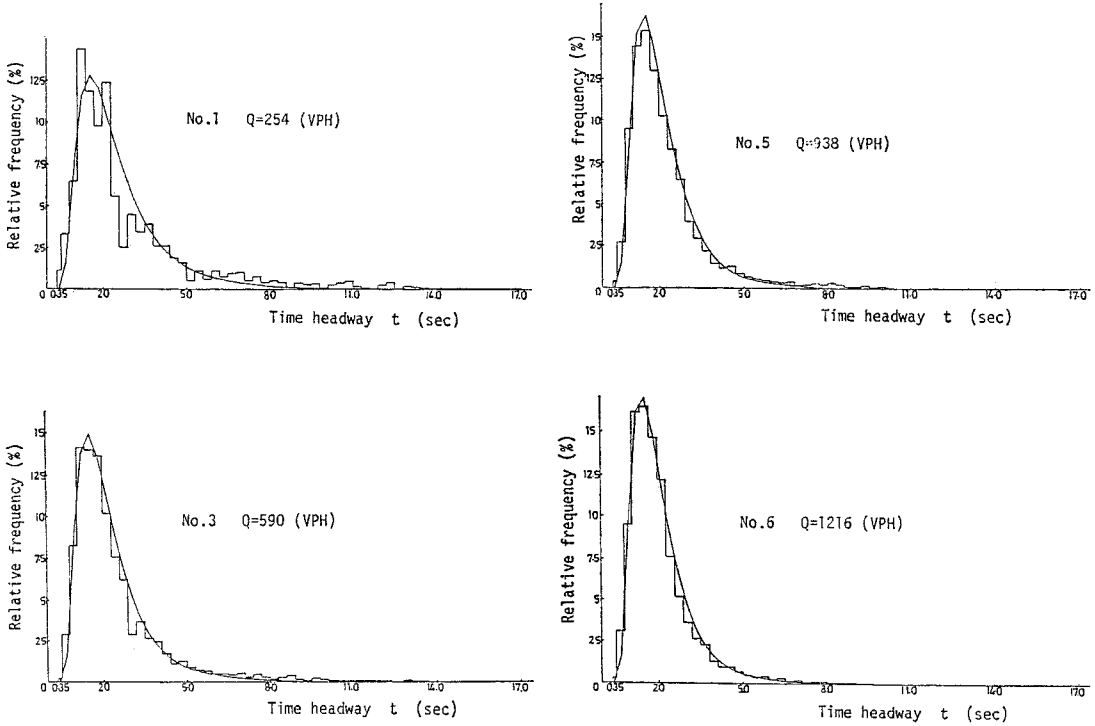
(c) Congested flow :  $h_c(t)$

図-10 車頭時間分布モデルのパラメーターと交通量との関係

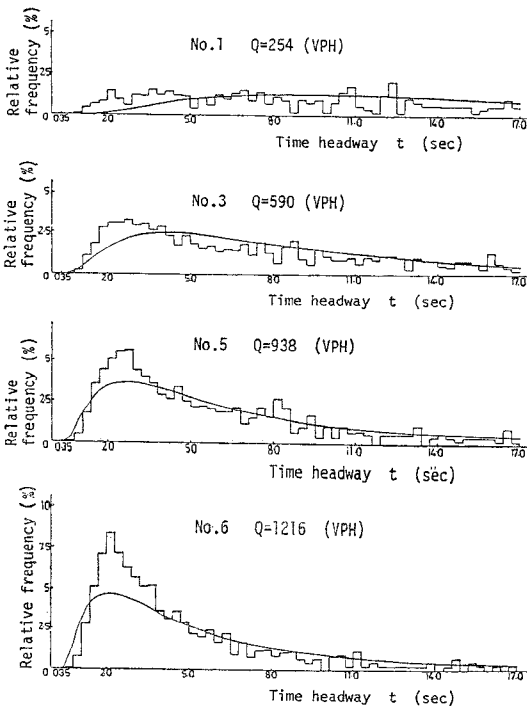


No.1 - No.7 : Non-congested flow ; No.8 - No.11 : Congested flow

図11 車頭時間分布モデル (モデル1) による車頭時間分布の表現 (折線: 計算値, 柱状図: データ値)



(a) Non-congested flow : Constrained vehicles



(b) Non-congested flow : non-constrained vehicles

図-12 車頭時間分布モデルによる  $f(t)$ ,  $g(t)$  の表現  
(折線：計算値，柱状図：データ値)

$$\left. \begin{aligned} T_\theta &= 5.4035 Q^{-0.1366} \quad (\text{s}) \\ V_\theta &= 5.3511 \cdot 10 \cdot Q^{-0.5614} \quad (\text{s}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(33)$$

$$\left. \begin{aligned} T_c &= 3600 Q^{-1} \quad (\text{s}) \\ V_c &= 4.8472 \cdot 10^7 Q^{-2.4746} \quad (\text{s}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(34)$$

ここに、 $Q$ ：交通量 (VPH)

またデータを分離することにより得られた  $P_f, P_\theta$  の値と、式 (32), (33) の  $T_f, T_\theta$  を式 (20), (21) に代入して得られる計算値との比較を 図-9 に示す。データ値と計算値とはよく一致しているが、計算値は、交通量 40 VPH 以下のところで  $P_f$  が 1 より大となり、1850 VPH 以上で負となり、この点不合理である。しかし、 $P_f$  が 1 以上となる部分に対しては  $P_f=1$ ,  $P_f$  が負となる部分に対しては  $P_f=0$  とおけば、提案モデルの実用上の意義は何ら損なわれるものではない。すなわち、交通量 40 VPH 以下では理論的に全車自由車とみなすもので、1850 VPH は本観測で対象とした道路・交通条件下における最大交通量 (可能交通容量相当値) であると理解できる。

(3) パラメーターと交通量との関係

車頭時間分布モデルとして、式 (31) を仮定するとき、モデルのパラメーターと分布の平均・分散との間には

$$\xi_f = \ln(T_f - t_0) - \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{V_f}{(T_f - t_0)^2} + 1 \right\} \dots\dots\dots(35)$$



表-2 車頭時間分布モデルの  $\chi^2$  適合度検定

Data No.	Q	d.f.	Chi Square	Good Fit
1	254	10	11.39	Yes
2	436	12	19.32	Yes
3	590	13	21.51	Yes
4	747	14	17.67	Yes
5	938	12	13.71	Yes
6	1216	11	10.34	Yes
7	1263	9	14.24	Yes
8	745	7	8.96	Yes
9	880	7	6.92	Yes
10	1020	8	4.89	Yes
11	1143	8	3.34	Yes

No. 1~No. 7 : Non congested flow  
 No. 8~No. 11 : Congested flow  
 Q : Traffic volume (VPH), d.f. : Degree of freedom  
 Significance level=5%

$$\zeta_f = \sqrt{\ln \left\{ \frac{V_f}{(T_f - t_0)^2} + 1 \right\}} \dots \dots \dots (36)$$

の関係がある。  $\xi_g, \zeta_g$  および  $\xi_c, \zeta_c$  は式 (35), (36) で  $T_f, V_f$  をそれぞれ  $T_g, V_g$  および  $T_c, V_c$  と置換したものである。上式に式 (32)~(34) をそれぞれ代入することにより、パラメーターと交通量との関係が求められるが、その結果を 図-10 に示す。計算値はデータとよく一致している。

(4) モデルの適合度検定

$f(t), g(t), h_c(t)$  の理論分布として、対数正規分布を仮定した場合の各パラメーターと交通量との関係が定式化されたので、非渋滞時、渋滞時の車頭時間分布は交通量を与えるのみで計算可能になる。 図-11 は観測データに対応する交通量により計算されたパラメーターを用いて得られたモデル  $h_f(t), h_c(t)$  と観測データの分布との比較を示す。また 表-2 にモデルの観測データに対する適合度を  $\chi^2$  検定した結果を示す。

これらの結果から、提案モデルは、1秒以下の車頭時間の頻度をやや過小評価する傾向はあるものの、いずれの交通量状態に対しても現実のデータを十分良好に表現していることがわかる。また、 $f(t), g(t)$  に対するデータとモデルとの比較の一例を 図-12 に示すが、いずれもモデルは妥当な表現を与えているといえる。

5. む す び

本研究は、 郊外 2 車線追越禁止区間における非渋滞流、渋滞流を対象とし、 連行する 2 台の車の速度の相関と車頭時間との関係に基づいて交通流を構成する車を自由車、追従車に分離することにより、自由車、追従車構成の観点から交通流の内部構造を明らかにすること、および、車頭時間分布を自由車、追従車のそれに基づいて記述し定式化することを提案した。その過程で得られた

事項を要約すると以下のとおりである。

(1) 連行する 2 台の車の速度の相関は、渋滞流では車頭時間に関係せず高い水準で一定であり、非渋滞流では車頭時間が小さくなるほど高くなり、渋滞流の水準に近づく。このことから、渋滞流は追従車のみから、非渋滞流は自由車、追従車とから構成されるとみなし得る。

(2) 非渋滞流における自由車、追従車構成の変化は、相対速度分布の変化に反映されるとみなすことができ、車頭時間分布は、相対速度分布の分散を指標として導かれる自由車率  $\alpha(t)$ 、あるいは追従車率  $\beta(t)$  により、自由車に関するものと追従車に関するものとに分離可能であり、車頭時間分布からみた自由車・追従車という交通流の内部構造を明らかにすることができる。

(3) 郊外 2 車線追越禁止区間の交通流における車頭時間分布は、非渋滞流は自由車・追従車のいずれにも対数正規分布を仮定した複合分布モデルを、追従車のみの渋滞流は単一对数正規分布モデルを適用することにより良好に表現される。

(4) 各分布モデルのパラメーターは、各分布のパラメーターと交通量との関係を定式化した結果を用いることにより、交通量との関係が定式化され、各交通量レベルにおける車頭時間分布が交通量を与えるのみで一元的に表現される。

なお、本研究は一般国道 2 車線追越禁止区間を対象として定式化されたものであるが、追越しの許される 2 車線道路でも、交通量の増加に伴い実際上、追越しはほとんど不可能となることから、ここで得られた内容はそのままこれらの区間に対しても適用可能であると推察される。また、本研究で提案した自由車、追従車の分離に基づく一連の交通流分析手法は、多車線道路、高速道路の交通流の分析に対しても有効であると考えられ、今後の研究課題としたい。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、多大な励ましとご援助を賜った 山口大学建設工学科 曾田忠義教授に深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Greenberg, I. : The log-normal distribution of headways, Austral. Road Res., Vol. 2, pp. 14~18, 1966.
- 2) Tolle, J.E. : The lognormal headway distribution model, Traffic Engineering +Control, Vol. 13, pp. 22~24, 1971.
- 3) Schuhl, A. : The probability theory applied to distribution of vehicles on two lane highway, Poisson and traffic, Eno foundations, pp. 59~75, 1955.
- 4) Buckley, D.J. : Road traffic headway distributions, Proc. Austral. Road Res. Bd., Vol. 1, pp. 153~187, 1962.
- 5) 高田 弘：電子計算機を利用したシミュレーションによる道路交通流の解析，土木学会論文報告集，No. 124，

- pp. 28~40, 1965.
- 6) Buckley, D.J. : A semi-poisson model of traffic flow, *Transpn. Sci.*, Vol. 3, pp. 107~133, 1968.
  - 7) Katakura, M. : Time headway distribution of traffic flow, *Proc. of JSCE.*, No. 189, pp. 107~115, 1971.
  - 8) Tolle, J.E. : Vehicular headway distribution : testing and results, *Transpn. Res. Rec.*, No. 456, pp. 56~64, 1976.
  - 9) Wasielewski, P. : Car-following headways on freeways interpreted by the semi-poisson headway distribution model, *Transpn. Sci.*, Vol. 13, pp. 36~55, 1979.
  - 10) Miller, A.J. : A queueing model for road traffic flow, *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B*, Vol. 23, pp. 64~75, 1961.
  - 11) Underwood, R.T. : Traffic flow and bunching, *J. Austral. Road Res.*, Vol. 2, pp. 8~25, 1963.
  - 12) Daou, A. : On flow within platoons, *Austral. Road Res.*, Vol. 2, pp. 4~13, 1966.
  - 13) Taylor, M.P.A. et al. : A comparison of some bunching models for rural traffic flow, *Transpn. Res.*, Vol. 8, pp. 1~9, 1974.
  - 14) 田村洋一・樽木 武：渋滞・非渋滞時の交通現象について，第34回土木学会中国四国支部年次学術講演概要集，pp. 248~249, 1982.

(1982.9.6・受付)