

渋滞時の交通流現象に関する研究

A STUDY ON THE PHENOMENA OF CONGESTED TRAFFIC FLOWS

越 正毅*・岩崎 征人**・大蔵 泉***・西宮 良一****
By Masaki KOSHI, Masato IWASAKI, Izumi OHKURA
and Ryoichi NISHIMIYA

1. はじめに

交通流の基本的な性質をしることは、道路交通流の制御、さらには施設設計にとつていうまでもなく不可欠である。ことに今日のような交通状態のもとでは、渋滞状態までも含めた交通流の正確な理解が必要である。それにもかかわらず、渋滞時の交通現象に関しては、これまで個々の場合について断片的にしか解明されておらず、渋滞した流れを総合的に解析整理したものはほとんどなかった。

著者らはこれまで長年にわたって、交通現象の観測と解析とを数多く行ってきた。その結果、渋滞時の交通現象は非渋滞時とは大幅に性質を異にしており、従来の流体モデルや追従モデルをそのまま適用することができそうにないことをしった。

本稿で述べようとするのは、著者らがこれまでに蓄積してきたデータに基づく、主として渋滞状態における交通流現象の記述である。巨視的および微視的な交通流の諸性質を、ここではまだ十分互いの脈絡を持たせて記述するには至っていない。これらを体系的に説明するには、おそらくは新しい交通流モデルが必要なのであって、これについては現在作業中の段階である。

まず、本稿で用いる用語を以下のように定義する。

自由流：下流部の交通容量の制約を受けない状況における交通流を自由流とよぶ。一般にいう渋滞していない交通流である。この状況での交通流には、自由走行車と追従車とが混在している。

渋滞流：交通容量上の隘路に、その容量を超える交通需要が上流から到着したときに、その隘路の上流に出現する隘路交通容量の制約を受けた交通流を渋滞

流とよぶ。一般にいう渋滞した区間の交通流である。この状況の交通流は、すべて追従車によって形成されている。

粗(密)部：渋滞流の中で密度が相対的に低い(高い)部分を粗(密)部とよぶ。渋滞流は必ずしも一様な密度の交通流ではなく、往々にしてかなり大きな密度の変動を有している。

粗密波：渋滞流の粗部と密部との境界を粗密波とよぶ。粗密波は一般に静的ではなく、上流へ移動する性質を有している。

2. 在来の研究の概観

渋滞流に関する在来の研究はあまり多くない。渋滞流と非渋滞流とでは、密度や速度の変動の挙動が異なるということは、定性的には早くから知られていた。Mika ら¹⁾および Hillegas ら²⁾は、この2つの流れの境界について報告している。

Mika らは、交通流の短時間変動を解析し、オキュパンシ 15% を境として、'Steady flow' と 'Oscillatory mode' との2つの性質の異なる流れに分けられると述べている。Hillegas らの結果も同様に、オキュパンシ 15% を境界として、'Linear flow' と 'Nonlinear flow' とに区別できると述べている。

Mika らは 'Oscillatory mode' の流れが振動現象を呈することに着目し、これを定常時系列と仮定したうえで、パワースペクトル解析を行い、4分の周期があると述べている。交通流の短時間変動の周期については、1968年に片倉³⁾が渋滞時の交通量変動を解析し、200分の周期があることを述べている。それ以後もいくつかの研究^{4)~6)}が発表されているが、その結果は、片倉や Mika らが述べたと同様、おおむね 3~6 分の周期を指摘したものである。

また、Mika らは、同一の道路上での離れた2地点に

* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授
** 正会員 工修 武蔵工業大学講師 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部土木工学科
**** 正会員 工修 (株)三菱総合研究所

おける交通流変動の相関分析から、密度境界の移動速度を 16 mile/h(≒24 km/h) と推定した。渋滞した交通流での密度境界の移動速度については、その後も同様な手法を用いた研究^{4),5)}、および状態変動図や航空写真の目視による推定^{7),8)}などが行われた。これらの結果によれば、渋滞時の密度境界の移動速度は、ほぼ 15~20 km/h の範囲にあるといわれている。

Edie⁹⁾ は、交通量-密度相関が、自由流と渋滞流との間で不連続であることを初めて指摘した。この指摘は、本研究の結果と照らして見るときわめて重要な点である。

これらの研究は、交通現象の 1 つの側面を述べているものではあるが、渋滞流を全体的にとらえるには、断片的かつ皮相的である。

一方、微視的な見方としては、追従挙動からの接近¹⁰⁾がある。これらの研究のいくつかは、追従モデルから得られる速度と車頭距離との関係から出発して、密度-速度あるいは交通量-密度の相関を求め、交通現象を説明しようとしている。Gazis ら¹¹⁾ は式 (1) に示す一般追従モデルを提案し、式中のパラメーター (l, m) を変化させることによって、それまで提案されてきた種々の巨視状態モデルを表現できることを示した。

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha_0 \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t+T)}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} \cdot \{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

α_0 : 感応係数

l, m : 定数

T : 反応遅れ

May ら¹²⁾ は、式 (1) と実現現象の巨視量との整合を試みて式 (1) のパラメーター (l, m) を非整数に拡張した

これらの研究は、すべての交通状態を単一の追従モデルによって表現しようとしたものであり、自由流でも全車追従の状態を前提としているという点で実現現象とは合致していない。また、自由流でも渋滞流でも、車両が単一の追従モデルに従った挙動をするという仮定は、後に本稿で指摘するように、実現現象とは異なる。

その後 May ら¹³⁾ は、Edie⁹⁾ が指摘した交通量-密度相関の不連続性に着目し、実測から得られた広い密度領域の密度-速度相関を 2 つの領域 ('Free flow', 'Congested flow') に分け、それぞれの領域において、式 (1) のパラメーター (l, m) を実現現象に合致するように定めた。また、Ceder ら^{14),15)} は、車線性状別に 'Free flow' と 'Congested flow' 領域に対する式 (1) のパラメーター (l, m) を求めるとともに、式 (1) の α_0 についても、それぞれの領域で巨視量の実態に合致するように定めた。

これら May らおよび Ceder らの研究では、追従方程式のパラメーターを自由流と渋滞流とに分けて定める方が巨視的に実現現象と合致するといっているだけであって、追従挙動そのものが自由流と渋滞流とで違うのかどうかについては言及していない。また、自由流での車両がすべて追従車であるとみなしている点は、以前の研究¹²⁾と同様である。

渋滞時の粗密波の発生と伝播に関する研究としては、Newell¹⁶⁾ と桑田¹⁷⁾ の研究がある。Newell は、加速時と減速時とで追従車間距離が異なるという性質によって、粗密波の発生と伝播とを定性的に説明しようとした。しかしこのモデルは、密部では全車が必ず停止するという状態を前提としたものである。実現現象としては、道路および交通条件によって密部で停止する場合も、そうでない場合もあるので、実際の粗密波現象を説明するようなモデルとはなっていない。桑田は追従実験の結果から、加減速時の追従車間距離の違いと反応遅れとを確かめ、これに基づいて粗密波の発生と伝播とを説明しようとした。しかし、この研究も定性論の域を出ず、ひとつの試論にすぎない。

3. 本研究で用いたデータ

(1) データの収集

本研究で用いたデータは、すべて首都高速道路上で収集されたものである。表-1 には、使用したデータの収集方法、対象路線およびデータの規模等の概要を示した。現象の観測および実験は、(IV) の追従実験を除いては、首都高速道路公団の交通管制部局、および首都高速道路公団が委託者となった研究委員会組織によって実施されたものである。

(2) データの処理

㊸ 16 ミリカメラで撮影したフィルムからは、1 分間の交通量、平均密度および空間平均速度を読み取った。5号線を上り区間(表-1 のデータ No. I -c)については、各車両の時間-距離図を作成し、各撮影区間ごとに1分間の交通量、平均密度および空間平均速度を読み取った。

㊹ 航空写真については、各車両の時間-距離図を作成し、流れの状態を粗部と密部とに分類し、粗密各部での1分間換算の交通量、平均密度および空間平均速度を読み取った。さらに、追従挙動解析のために、粗密各部の5秒ごとの平均車頭距離と平均速度とを読み取った。

㊺ 感知器のパルス情報は磁気テープに収納された。感知器には、1ループ式と2ループ式との2つの形式が

表一 データの収集方法, 対象区間およびデータ規模

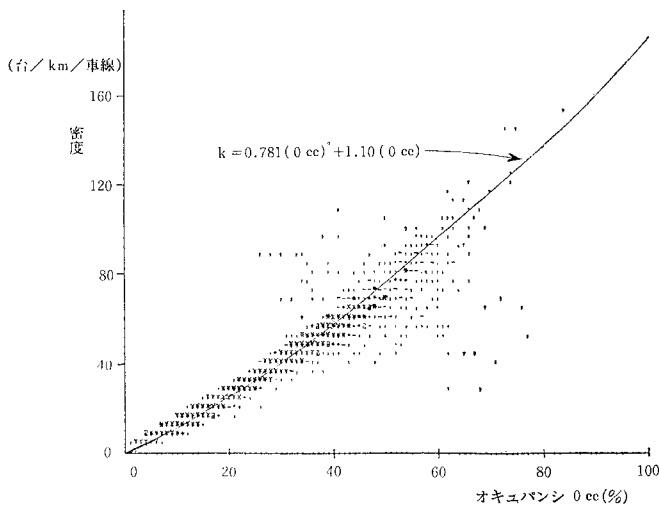
データ No.	収集方法	対象道路	区間長	測定時間 間隔	時間長	出典, 実測部局
I	16ミリカメラ	a) 環状線外回り { 入口 砂留トンネル } 出口	50 m	0.25 秒	2 時間	18) 7), 8) 首都高速道路公団 19)
		b) 7号線より大島団地	60 m			
		c) 5号線より	120 m	0.5 秒	10 時間	
		d) 4号線より千駄ヶ谷	1800 m	0.25 秒	8 時間	
			100 m	0.5 秒	20 時間	
II	航空写真	a) 3号線より谷町区間	1400 m	10, 20 秒	2時間 45分	20)
		b) 環状線神田橋区間	800 m	10 秒	36分	
III	車向感知器	a) 7号線 (上り, 下り)	10.6 km	1分	74 時間	7), 8) 首都高速道路公団
		b) 1号線 (上り)	9.0 km	1分	168 時間	
		c) 3号線 (上り, 下り)	11.8 km	1分	168 時間	
		d) 全 網	109 km	1分	38 時間	
IV	追従実験	7号線, 1号線, 環状線	—	0.2 秒	19 台・分	17)

あり, 2 ループ式では空間平均速度が各車の地点速度の調和平均値として出力されている. しかし, いずれの形式でも密度を直接に出力することはできない. 写真による実測密度と感知器情報 (オキュパンシあるいは計算密度) との照合解析の結果として, 両者の間に比較的良好な相関のあることが示されている^{27), 28)}. 本稿では, これらの結果を参考にして, 以下に述べるような処理を行って1分間の平均密度を求めた.

④ 2 ループ式の場合は, 交通量と空間平均速度 (地点速度の調和平均値) とが直接得られるので, 計算式 (交通量/空間平均速度) から密度を求めた. また, オキュパンシも同時に得られるので, 上で求めた密度とオキュパンシとの相関式を求めた. この結果,

$$k = 0.781(O_{cc})^2 + 1.10(O_{cc}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, k : 密度, O_{cc} : オキュパンシ
が得られた. 図一は, 実際の感知器データとの対応の例を示すものである.



図一 2 ループ式感知器による1分間オキュパンシと計算密度との対応例²⁷⁾ (3号線より, 走行車線)

上式は, 単純な回帰によったものではなく, 図一に示した以外の他の多くのデータも含めて, 原点を通る2次曲線のうちでもっとも適合のよいものを判断によって選んだものである²⁹⁾. これは, オキュパンシの高い領域での密度の変動が大きいため, 単純回帰で求めた密度を用いた交通量-密度相関図が, 実態と著しくかけ離れたためである. なお, 図一からも明らかなように, 80%以上のオキュパンシ領域でのデータが, 他の感知器も含めて, ほとんど得られていないので, 120 台/km/車線以上の領域についてはあまり信頼性がない.

⑤ 1 ループ式では速度は出力されず, 交通量とオキュパンシとが得られるだけである. そこで密度については, 上の④で求めた式 (2) を用いて推定した. したがって, これら感知器データの個々の1分値はかなりの誤差を含むものであり, データを集散的に扱うことはできても, 個別の値について議論することはできない性質のものである. 写真観測データのみに基づいて解析ができれば精度上の制約は免れるが, 反面写真観測の技術的・経済的な制約を受けて時間・空間的に十分な量のデータを収集することが困難となり, 解析結果の一般性を確かめることが難しくなる.

⑥ 追従実験¹⁷⁾で得られたデータについては, 1台ごとに車間距離と速度とを読み取った.

表記単位としては, 感覚的な理解の容易さを考慮して交通量は車線ごとの実測1分間値の1時間換算値を, 密度は車線ごとの1 km 換算値を用いている.

4. 粗密波現象の特性

粗密波は, 渋滞流に特有な現象であり, 渋滞検出の攪乱要因となっているが, その

性質や生成過程についてはまだよく知られていない。本章では、粗密波の巨視的性質についての解析結果を述べる。

(1) 粗密波の時間-距離分布

図-2 は、粗密波を視覚的に表現したものである。ここでは、粗部と密部とが視認しやすいように感知器から得られた1分間交通量と空間平均速度の積(運動エネルギーに相当)を状態量として用い、これを濃淡で時間-距離図上に表わした。データは環状線との合流部(浜崎橋)を下流端とする1号線上り方向の約9 km 区間での14か所の感知器情報である。図-3 は、同様に環状線との合流直前の分流(環状線内・外回りへの分流)点を下流端とする3号線上り方向の1.3 km 区間の航空写真真データから、50 m 区間ごとの20秒間平均速度を示したものである。

図-2 および 図-3 ともに、交通の進行方向とは逆に上流へ伝播する粗密波がみられる。この伝播速度は、図-2 では18~20 km/h、図-3 ではほぼ18 km/h であって、車線によらずほぼ同じであり、また、首都高速道路での他の研究結果^{4), 8)} やアメリカ合衆国での結果^{1), 5), 21)} とほぼ一致する値である。長い渋滞区間での粗密波の状態は、図-2 によって示ることができる。これによれば、粗密波は並行する車線でほとんど同時に発生し、伝播することが認められる。また、渋滞区間の上流と下流とでは濃淡の様子が異なり、上流ほど粗密の差が大きいたることが知られる。隘路直近上流での粗密波の状態は 図-3 から示ることができる。この区間

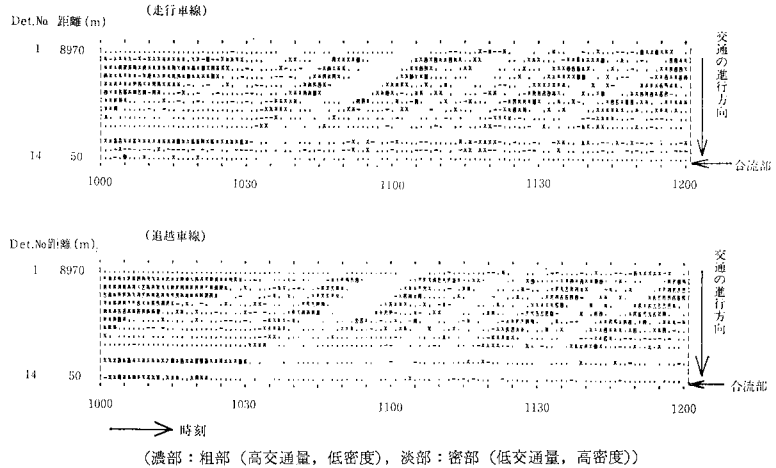


図-2 時間-距離平面での1分間交通量×平均速度(運動エネルギー)による粗密波の濃淡表示²²⁾(感知器データ, 1号線上り)

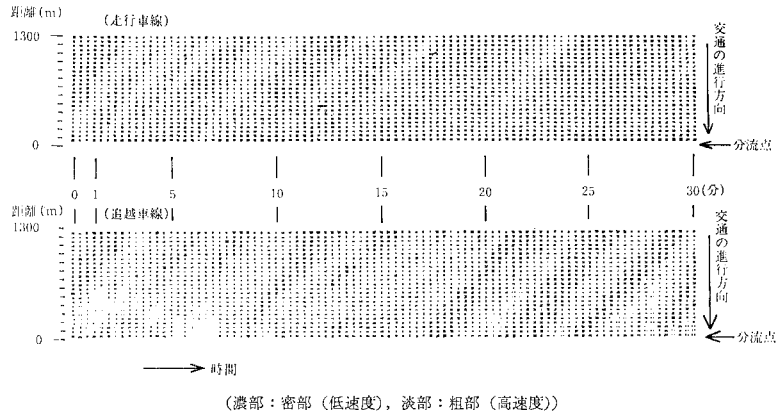


図-3 時間-距離平面での50 m 区間の20秒間平均速度による粗密波の濃淡表示²⁰⁾(航空写真真データ, 3号線上り)

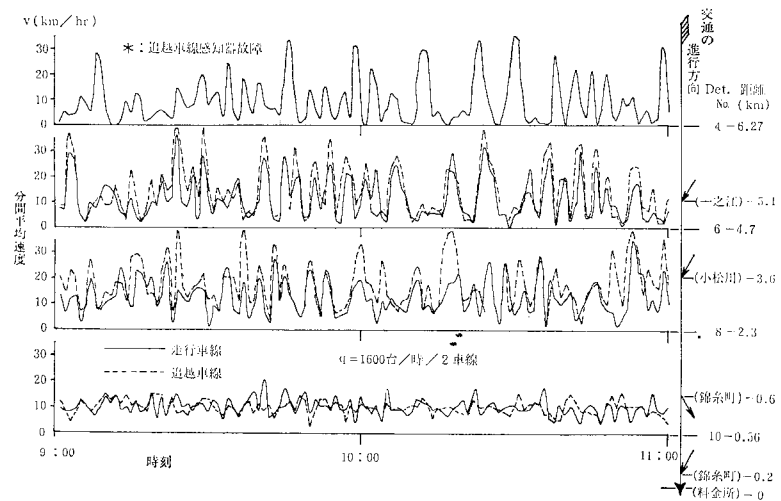


図-4 車線別・感知器別の1分間平均速度の変動(22のデータによる, 7号線上り)

では、粗部および密部の成長や消滅および粗密部の車線間での非同期など、過渡的な現象が出現している。

(2) 交通流変動の周期性

図-4 および 図-5 は、7号線上路方向錦糸町料金所を下流端とする渋滞流について、上流の感知器の1分間平均速度の変動を示したものである。下流端の交通量は、図-4 の場合約1600台/時、図-5 の場合11:00~12:00 に約560台/時、12:00~13:00 に約1400台/時であった。速度変動は、いずれの交通量レベルにおいても、上流ほど振幅が大きくなる傾向が認められるが、速度の上限は約40km/hである。低交通量の図-5の12:00以前と、高交通量の図-4とを比べると、高速度部(粗部)の形はあまり変わらず、低速度部(密部)の継続時間が異なっている。図-4での車線別の速度変動をみると、上流になるほど車線間での変動の同期が顕著になっているのが認められる。

図-6は図-4の、図-7は図-5の走行車線での1分間交通量と平均速度の積の変動について、パワースペクトル解析の結果を示したものである。低交通量の場合(図-7)は、高交通量の場合(図-6)に比べて、比較的特定の周期への集中がみられるが、高交通量の場合は必ずしも明瞭でない。また、両図ともに、50分以上と2.5分以下の成分が上流では下流に比べて減少している。

交通流の短時間変動については、いくつかの研究^{1)~6)}によって3~6分の周期があるとされてきたが、これらの多くは隘路からの距離・交通量レベルなどの条件を限定していない。今回の解析結果からみて、渋滞流の短時間変動は、必ずしも一定の周期成分からなるものではなく、隘路からの距離や交通量レベルによって周期成分が変化すると考える方がよさそうである。

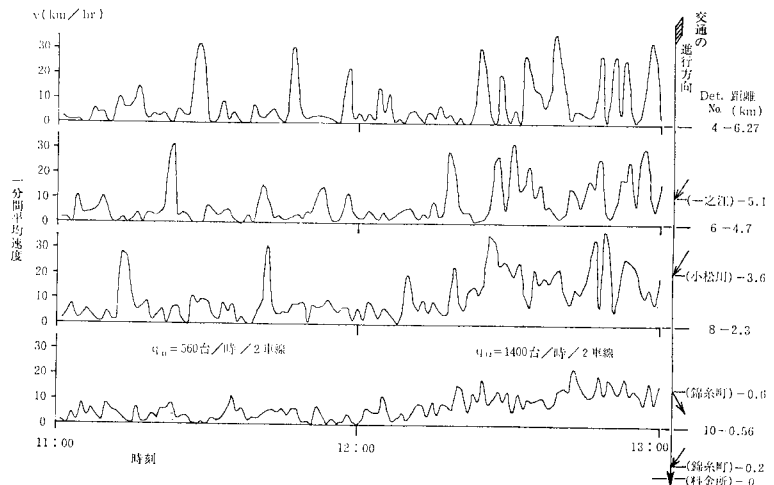


図-5 感知器別の1分間平均速度の変動(22のデータによる、7号線上り、走行車線)

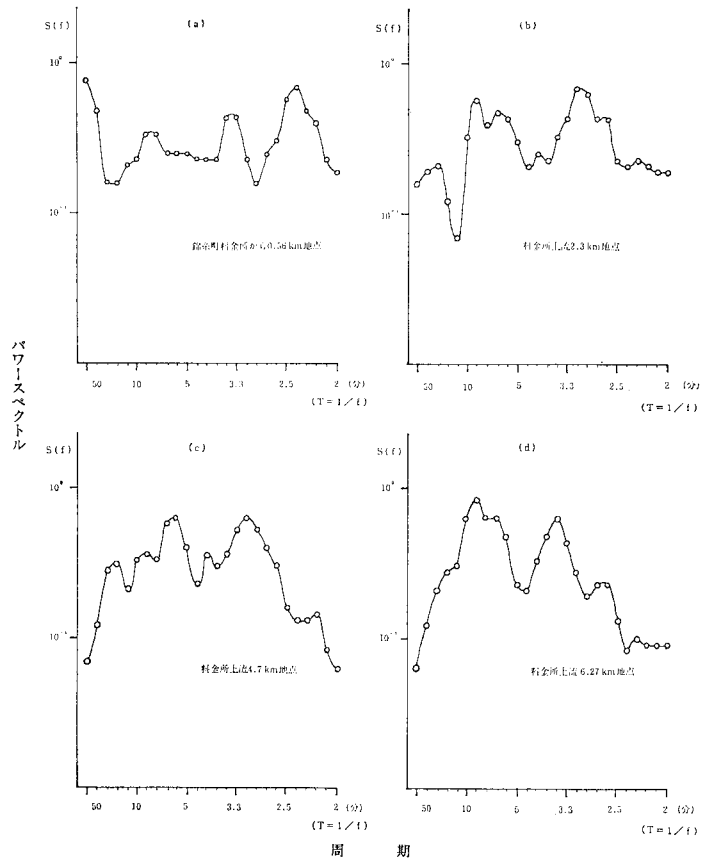


図-6 渋滞時における交通量×平均速度(運動エネルギー)の1分間変動のパワースペクトル²²⁾(高交通量時、7号線上り、走行車線)

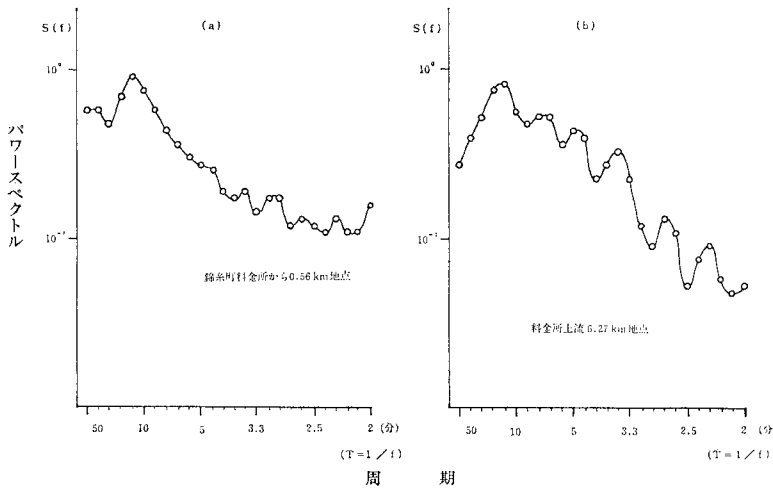


図-7 渋滞時における交通量×平均速度(運動エネルギー)の1分間変動のパワースペクトル²³⁾(低交通量時, 7号線上り, 走行車線)

走行軌跡(表-1のデータ No. I, II)の検討結果から推測すると, おそらくは車線変更車の存在によるものと思われる。

5. 交通量, 密度および速度の相関

渋滞時交通流の巨視量(交通量, 密度および速度)の相関特性は, 必ずしもよくしられていない。ここでは, 渋滞時の交通流を含む交通量-密度相関について, その一般的な性質, 交通量-密度平面上での粗部と密部との分布さらには隘路からの距離との関係などについて考察しよう。

(3) 粗密波の車線間同期現象

図-8は, 3号線上り方向谷町分流部を下流端とする上流約2.4 km地点での走行および追越車線の1分間オキュパンシの変動に関する相互相関である。計測時間中の両車線の平均オキュパンシはともにほぼ45%であり, 平均的には両車線とも同様な交通状態であった。相互相関関数は, ずらし時間零で正の最大値を示し, 両車線の交通流変動が同期していたことを示している。

図-9は, 5号線上り方向竹橋分流部から0.5, 1.0および1.2 km上流における約100 m区間の1分間平均速度変動の車線間相関を示したものである。これによれば, 隘路に近い下流(0.5 km地点)での相関は低く(相関係数: $r=0.31$), 上流にゆくほど高く(1.0 km: $r=0.71$, 1.2 km: $r=0.85$)なっていることがわかる。粗密波が並行する車線間で同期する現象は, 他の研究結果²²⁾からも得られている。この同期の理由については, いまだ断定的な結論を得ていないが, 渋滞流中での車両

よう。

(1) 交通量-密度相関の一般的な性質

図-10は, 16ミリカメラ(表-1のデータ No. I-

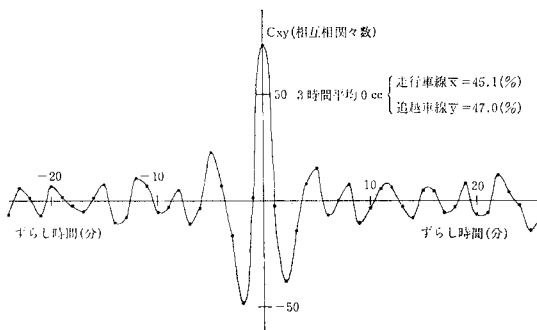


図-8 1分間オキュパンシの車線間相関(22のデータによる, 3号線上り, 谷町分流部上流2.4 km地点)

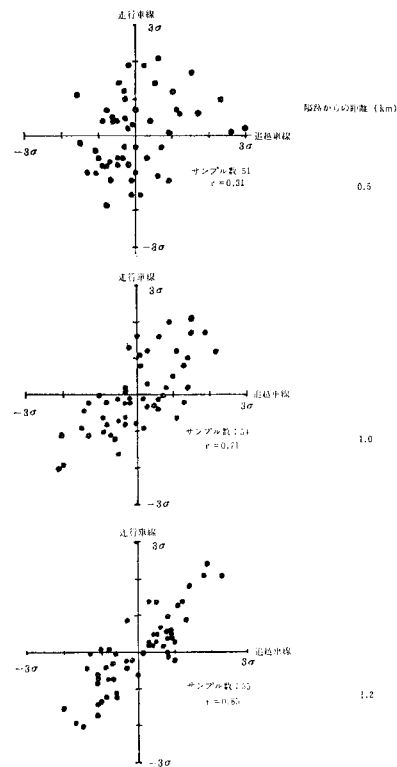
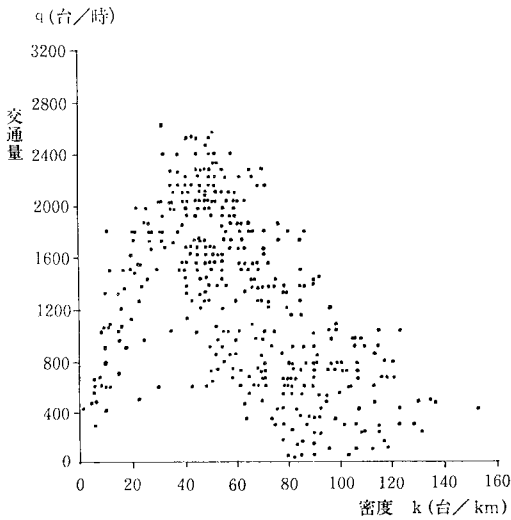
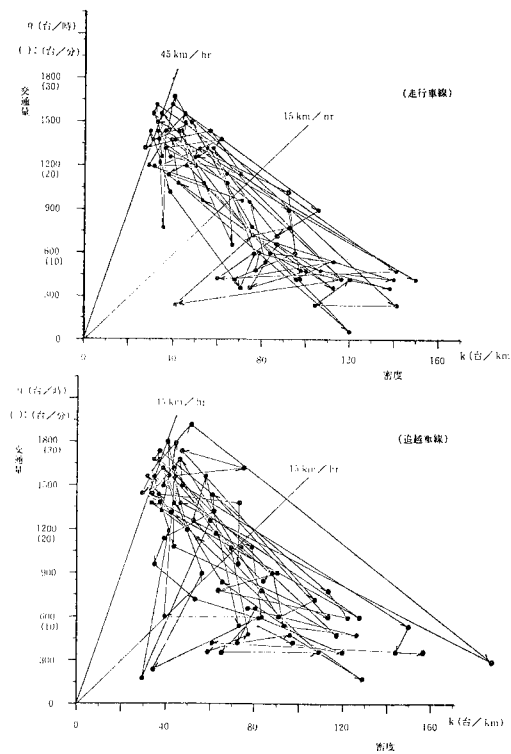


図-9 隘路からの距離と1分間平均速度の車線間相関(5号線上り, 竹橋分流部を下流端として)



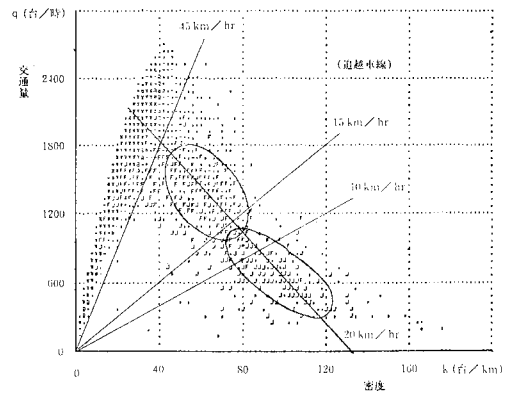
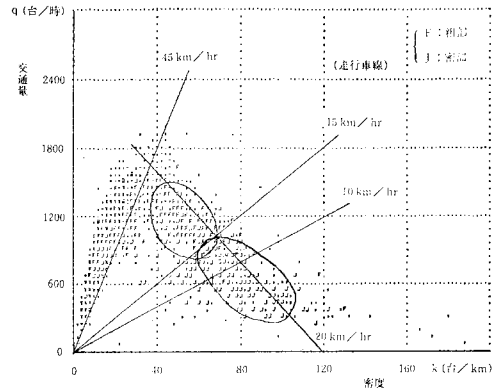
図一10 1分間交通量-密度相関¹⁹⁾(写真観測(16mmデータ),4号線上り,千駄ヶ谷区間道越車線)



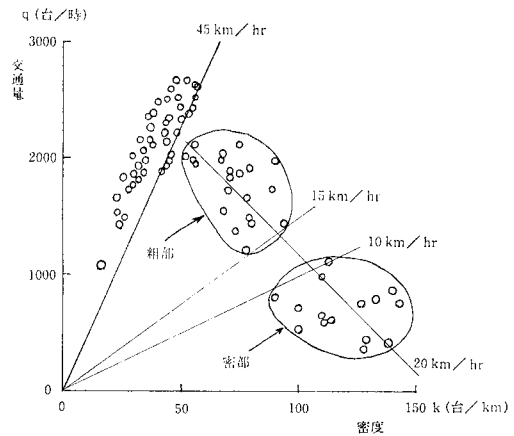
図一11 渋滞時(90分間)における1分間交通量-密度相関の遷移挙動²²⁾(センサーデータ,1号線上り,浜崎橋合流部上流4.7km地点)

d) による1分間交通量と密度との相関である。渋滞時の交通量と密度との変動の大きいことがわかる。データの集計単位時間を5分とした場合¹⁹⁾についても同様な傾向が認められた。

図一11は、1分間交通量と密度との時系列挙動の例



図一12 交通量-密度平面上での粗部と密部との分布²²⁾(センサーデータ,1号線上り,浜崎橋合流部上流2.4km地点,1分間値)



図一13 交通量-密度平面上での定速走行車群の分布(航空写真データ,3号線上り,走行車線)

を示したものである。データは、1号線上り方向浜崎橋合流部を下流端とする上流4.7km地点の渋滞時の90分間センサー情報である。交通量-密度平面上での速度(交通量/密度)をみると、両車線ともにほぼ45km/hを上限としていることが認められる。低交通量(約900台/時/車線=15台/分/車線,以下)での密度変動が大きい

のは、1つには基本となる1分データに含まれる車両台数が少なくなることによるものである。

(2) 交通量-密度平面上での粗部と密部との分布

図-12は、1地点の感知器情報による交通量と速度との積の変動パターンから、渋滞流の中の粗部および密部を判別し、粗密各部の1分間平均の交通量と密度とを求め、粗部をF、密部をJと表示したものである。なお、粗密部の判別ができなかったものは、FあるいはJ以外の記号で表示した。これによれば、FとJとはともに広い領域に分布しているが、大部分はそれぞれ図中○印の領域に含まれることがわかる。

図-13は、航空写真(表-1のデータ No. II-a)による時間-距離図から、粗部および密部での定速走行車群を抽出し、これら車群について作成した交通量-密度相関である。図中の○印は、それぞれ粗部と密部とを示すものである。

図-11, 12 および 図-13 に示されるように、交通流の状態は、交通量-密度平面上でほぼ次のように判別できそうである。

- ① 自由流と渋滞流との境界と考えられる速度はほぼ45 km/h である。

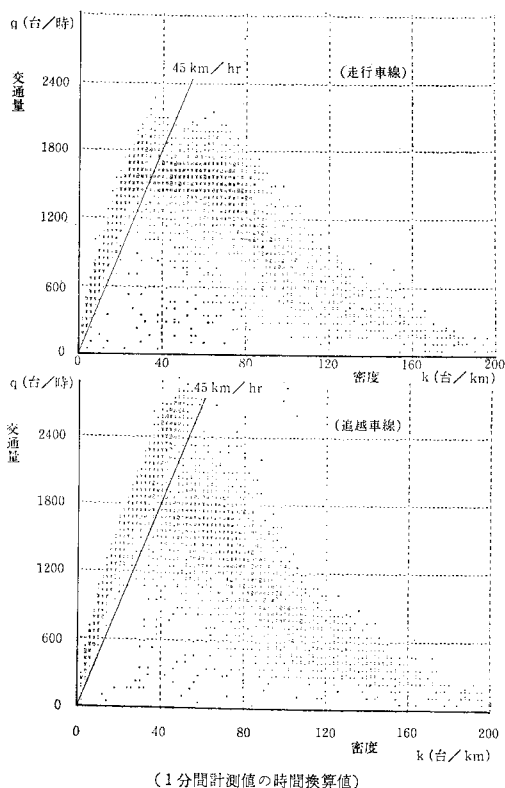


図-14 合流部から十分離れた地点(5.7 km)での1分間交通量-密度相関²²⁾(感知器データ, 1号線上り)

- ② 渋滞流中の粗部と密部との境界はあまり明瞭でないがほぼ10~15 km/h である。
- ③ 粗密部の平均的な伝播速度はほぼ20 km/h である。

(3) 隘路からの距離と交通量-密度相関

図-14は、1号線上り方向浜崎橋合流部の上流約5.7 km 地点での交通量-密度相関である。自由流の最大交通量は、走行車線で約2100台/時、追越車線で約2800台/時となっている。これらの値は、1分間値の1時間換算値であって、1時間にわたって実現し得る交通量を必ずしも意味するものではない。この最大交通量は、渋滞がこの地点に到達していない状態で出現したものである。交通量と密度との分布状態からみて、図に示した45 km/h の速度によって自由流と渋滞流とを区別できそうである。この地点が合流部から十分離れた地点であることを考えるならば、4. で述べた交通流変動の特性からみて、図-14は粗密波現象が十分明瞭になった地点での交通量-密度相関であるといえる。

図-15 および 図-16 には、隘路直近上流での交通量-密度相関を示した。図-15のデータは、1号線上り方向浜崎橋合流部の上流約0.4 km 地点のものであり、図-16のデータは、1号線上り方向平和島料金所(6ブ

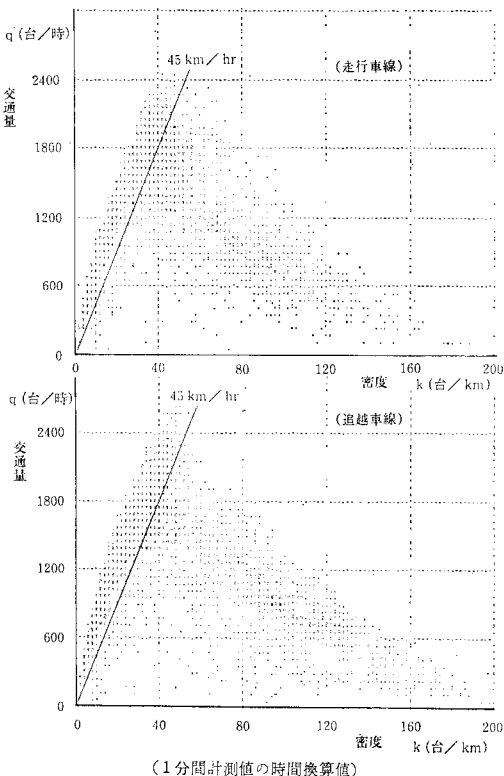


図-15 合流部直近上流地点(0.4 km)での1分間交通量-密度相関²²⁾(感知器データ, 1号線上り)

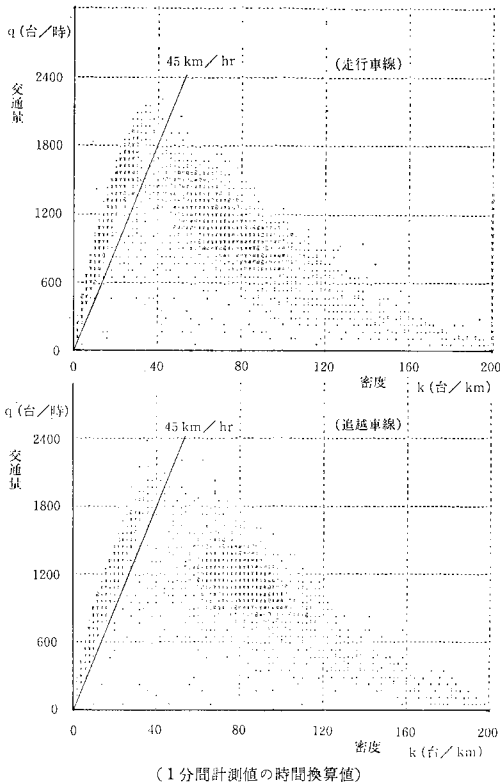


図-16 料金所直近上流地点(0.5 km)での1分間交通量-密度相関²²⁾(感知器データ,1号線上路)

ース)の上流約0.5 km地点のものである。自由流と渋滞流との境界は、料金所直近上流(図-16)では明瞭であるのに、合流部直近上流(図-15)では明瞭になっていない。

料金所直近上流の渋滞流現象は、料金所の交通容量すなわち開放ブース数に依存して定まる。しかも隘路直近上流であるから粗密波は顕著でなく、比較的一様な流れとなっている。このことが、図-16の渋滞流が中位の交通量レベル(800~1600台/時/車線)に集中しており、自由流に近い高速で高交通量の渋滞流(粗波)が出現しない理由である。一方、合流部直近上流の交通現象が、合流交通量に依存することは上と同様であるが、この合流交通量は合流相手の環状線の交通状態によって大きく変動する。このために合流部の直近上流ではさまざまな交通量レベルの渋滞流が生じがちである。加えてこの地点は合流部の0.4 km上流であって、軽度の渋滞の末尾になりやすく、またときに粗密波が生ずることもある。このようなことから、自由流と渋滞流との間の遷移状態がしばしば生じ、また渋滞流自体も広い範囲に分布するために、自由流との境界が明らかに現われないのであろうと考えられる。

図-12~15 および 図-16 のいずれにおいても、交通流の交通量-密度相関は、これまで広く認められてき

たうえに凸のひとつの曲線とはやや異なっていることが認められる。自由流は右上り、渋滞流は右下りのそれぞれ別個の交通量-密度相関を示し、全体としては、ギリシャ文字の‘s’の裏返しのような形状となっており、自由流と渋滞流とは不連続と考えてよさそうである。このように、自由流と渋滞流とで交通量-密度相関が不連続であるとすれば、密度-速度相関すなわち追従車間距離と速度との関係も不連続でなければならないことになる。この点については次章で検討される。

6. 交通流における速度と車間距離との関係

前章で検討した交通量、密度および速度といった巨視量の相関は、そもそも個々の車両挙動における速度と車間距離との関係という微視的現象から生じたものである。そこで、ここでは車両の追従挙動に関する解析結果を示し、巨視的現象との対応について考察する。

図-17 は、追従実験¹⁷⁾のうちの1台の追従車から得られた速度と車間距離との関係を示したものである。図中、Aは加速状態(加速度 $\geq 0.1g$)、Dは減速状態(加速度 $\leq -0.1g$)および●印等は定速走行状態を示している。これによれば、40~45 km/h付近を境界として速度と車間距離との関係が、2つの異なるグループに分かれているようにみえる。実験時の交通状態から判断して、この速度以下の領域は渋滞時の追従走行でありこの速度以上の領域は自由流での走行である。渋滞流では、Newell¹⁶⁾が着目したように、加速時の方が減速時より大きな車間距離をとる傾向が認められる。

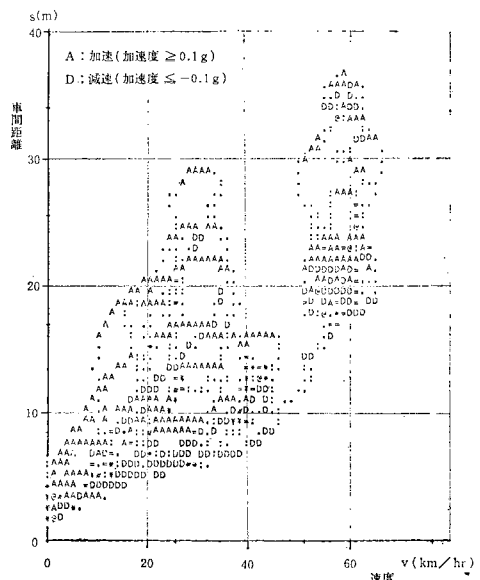
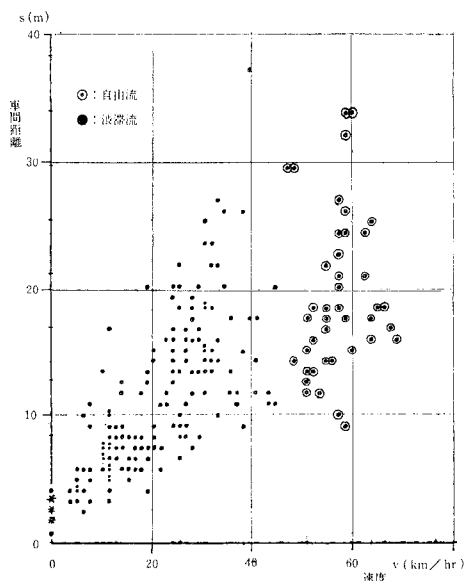
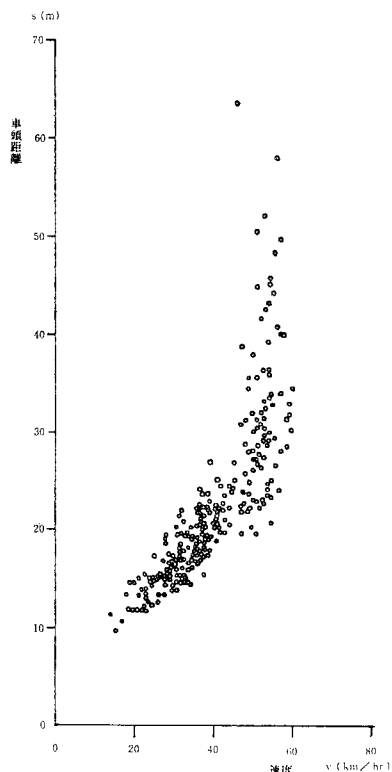


図-17 追従実験¹⁷⁾におけるある1台の追従車両の速度と車間距離との関係²²⁾

図一18は、追従実験¹⁷⁾で得られたすべてのデータから、加減速度の小さい ($-0.1g < \text{加減速度} < 0.1g$) 定速走行状態を抽出したものである。図中、●印は自由流で



図一18 追従実験¹⁷⁾におけるすべての追従車両の定速走行状態での速度と車間距離との関係²²⁾ ($-0.1g < \text{加減速度} < 0.1g$ の状態)



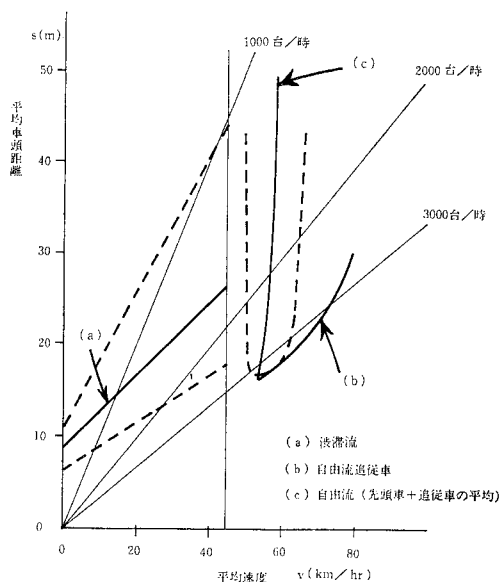
図一19 写真観測 (16 mm) による 1 分間平均速度と平均車頭距離との関係 (環状線外回り, 汐留トンネル入口)

の走行を、●印等は渋滞流での走行を示している。図一17と同様に、40~45 km/h 付近を境界として自由流と渋滞流との2つのグループに分かれているといえそうである。

図一17および図一18ともに、速度に対する車間距離の変動が大きいことを示しており、特に図一17では、速度と車間距離との関係が、同一の車両においてすら大きく変動することが読み取れる。

図一19は、汐留トンネル入口での1分間平均速度と平均車頭距離との関係を示したものである。自由流での関係は、先頭車と追従車との混在した状態の平均的な関係を示している。図一17および図一18に比べ、平均化による影響によって全体として変動が小さくなっている。自由流と渋滞流との境界は、図一17, 18ほどには明瞭ではないが、ほぼ 45 km/h のあたりに認めることができる。

これらのデータから、車両の速度と追従車間距離との関係は、自由流と渋滞流とは異なっているということは明らかであり、Ceder¹⁵⁾の用いた密度-速度相関データとも合致する。したがって、微視的な追従モデルから、巨視的な交通量、密度および速度の相関を導き出すにあたって、自由流と渋滞流とを区別せずに、単一の追従モデルを適用することは正しくない。また、自由流領域にも追従モデルを適用することは、自由流での車両がすべて追従車であるとする前提に立つことになり、論理的に誤りである。自由流では、全車が追従状態にあるのではなく、先頭車と追従車が混在しているからである。この意味で、Cederら^{14), 15)}の密度-速度相関についての



図一20 自由流と渋滞流での速度と車頭距離との関係をモデル化した概略図

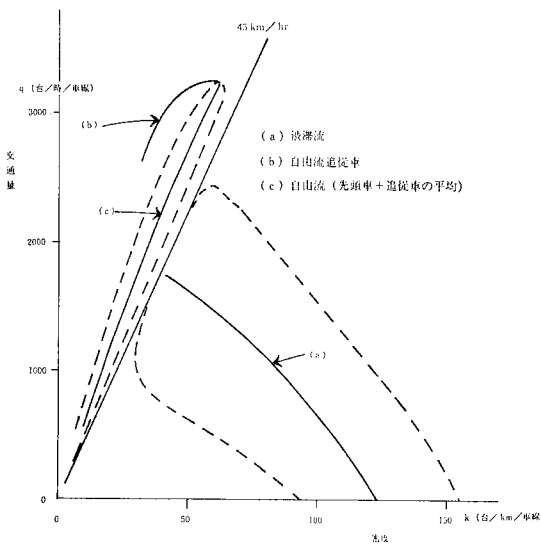


図-21 交通量-密度相関の概略図(図-20 から作成)

2領域モデル('Two-regime model')も、自由流領域('Free flow regime')については、巨視量の相関が実現象と合致するように式(1)のパラメーター(l, m および α_0)を定めただけであって、これらのパラメーターが真の追従挙動そのものを表わしているわけではない。

図-20は、以上のような事柄を踏まえて、図-17, 18 および 図-19の結果を用いて、自由流と渋滞流における速度と車頭距離との関係をモデル化したものの概略図である。図-20において、曲線(a)は渋滞流、曲線(b)は自由流のそれぞれ追従車の速度と車頭距離との関係を示すものであり、曲線(c)は自由流での先頭車と追従車との混在した平均的な関係を示すものである。図-21は、図-20で示した微視量の関係を、交通量-密度平面上で巨視量の関係として表現したものの概略図である。なお、図-20および図-21の横および縦軸の数値は一応の目安として記入したものである。

図-21に示されるように、速度-車頭距離の関係を巨視量の関係に置き直してみても、実測から得られた交通量-密度相関によく合致したものとなっている。このことから、自由流と渋滞流とでは、追従走行挙動が異なったものであり、したがって、微視的な現象の集積としての巨視量の関係においても、自由流と渋滞流とは互いに不連続となるということはここで確かめられたといつてよい。

7. まとめと今後の問題点

本稿では、首都高速道路路上での渋滞した区間における交通流について、いくつかの特徴的な現象の解析結果を

述べてきた。渋滞した流れでの特徴的な現象は以下のような事柄である。

(1) 渋滞時の流れを含む交通量と密度との相関は、上に凸の1つの曲線とはやや異なっており、自由流と渋滞流との2つの別個の流れに分けられることが確認できた。

(2) 追従走行車両の速度と車間距離との関係においても、渋滞流は自由流とは異なっており、自由流と渋滞流とは連続的でないといえる。

(3) 渋滞した流れにおいては、従来からいわれていたように、粗密波現象が発生する。粗密波は上流へ伝播する性質を有しており、伝播速度はおおむね一定(18~20 km/h)であり、この値は従来の結果ともほぼ同様である。粗密波は渋滞した区間内において均一ではなく、上流ほど粗部と密部との差は明瞭で著しく、隘路近傍ではあまり明瞭でない。さらに、上流部での粗密波には、並行する車線間での同期現象が認められる。

(4) 渋滞流での粗波の上限速度と自由流での下限速度との境界はおおよそ40~45 km/h程度である。

今後の課題としては以下のような事柄が挙げられる。

粗密波現象については、隘路直近上流での小振幅の変動が、上流にゆくほど車線間同期現象を有する大振幅の粗密波に成長する過程、および粗部での速度変動の上限の存在の意味などが解明されなければならない。

速度と車間距離との関係については、自由流と渋滞流との間の不連続性の理由、およびこの不連続な2つの状態の間の遷移過程などが未解明である。さらに、粗密波の発生と伝播の機構を車両の追従挙動から説明する論理が今後の重要な課題として残されている。

本研究で使用した資料の多くを提供していただいた首都高速道路公団の関係各位、著者らが参画していた交通工学研究会の関係委員会の委員諸兄に対し厚く謝意を表する次第である。また、この一連の研究の過程において、国際交通安全学会の研究助成金と文部省科学研究費補助金とを得たことを付し、同じく謝意を表する。

参考文献

- 1) Mika, H.S., J.B. Kreer and L.S. Yuan: Dual mode behaviour of freeway traffic, Highw. Res. Rec., No. 279, pp. 1~13, 1969.
- 2) Hillegas, B.D., D.G. Houghton and P.J. Athol: Investigation of flow-density discontinuity and dual-mode traffic behaviour, Transp. Res. Rec., No. 495, pp. 53~63, 1974.
- 3) 片倉正彦: 道路交通流に関する基礎的研究, 東京大学学位論文, 1967.12.
- 4) 片倉・鍋島・岩崎・浦田: 交通流の小時間変動について, 土木学会第25回年次学術講演会講演概要集, IV-49, 1970.
- 5) Lam, T. and R.W. Rothery: The spectral analysis of speed fluctuations on a freeway, Transp. Sci., Vol. 4, No. 3, pp. 293~310, 1970.
- 6) 岩崎征人: 高密度領域における密度変動について, 交通

- 工学, Vol. 12, 増刊号, pp. 25~29, 1977.
- 7) 交通工学研究会：首都高速道路の将来管制システムに関する研究, pp. 76~120, 1977.3.
 - 8) 交通工学研究会：新管制手法実用化のための研究, pp. 80~129, 1976.3.
 - 9) Edie, L.C. : Car-following and steady-state theory of noncongested traffic, *Oper. Res.*, Vol. 9, No. 1, pp. 66~76, 1961.
 - 10) Transportation Research Board : Special Report, No. 165, pp. 49~70, 1975.
 - 11) Gazis, D.C., R. Herman and R.W. Rothery : Nonlinear-follow-the leader models of traffic flow, *Oper. Res.*, Vol. 9, No. 4, pp. 545~567, 1961.
 - 12) May, A.D. Jr. and H.E.M. Keller : Noninteger car-following models, *Highw. Res. Rec.*, No. 199, pp. 19~32, 1967.
 - 13) May, A.D. Jr. and H.E.M. Keller : Evaluation of single- and two-regime traffic flow models, *Proc. 4th International Symp. on the Theory of Traffic Flow, Karlsruhe*, 1968.
 - 14) Ceder, A. and A.D. May Jr. : Further evaluation of single- and two-regime traffic flow models, *Transp. Res. Rec.*, No. 567, pp. 1~15, 1976.
 - 15) Ceder, A. : A deterministic traffic flow model for the two-regime approach, *Transp. Res. Rec.*, No. 567, pp. 16~30, 1976.
 - 16) Newell, G.F. : Theories of instability in dense highway traffic, *Jour. of Oper. Res. Soc. of Japan*, Vol. 5, pp. 9~54, 1963.
 - 17) 桑田起義：高密度交通流における追従特性に関する研究, 東京大学修士論文, 1976.2.
 - 18) 交通工学研究会：首都高速道路における円滑化と安全対策に関する研究, pp. 78~101, 1978.3.
 - 19) 首都高速道路公団： $q-k$ 曲線選定のための交通現象調査報告書（相関図集）, 1977.1.
 - 20) 首都高速道路公団：航空写真による高密度交通流解析作業, 1977.3.
 - 21) Edie, L.C. and E. Baverez : Generation and propagation of stop-start traffic flow, *Proc. of 3rd International Symp. of Theory of Traffic Flow, American Elsevier*, pp. 26~37, 1967.
 - 22) 西宮良一：高密度交通流の現象解析, 東京大学修士論文, 1978.2.
 - 23) 岩崎・大蔵・西宮：高密度交通流の現象論考察, 土木学会関東支部 第5回 年次研究発表会講演概要集, IV-15, 1978.1.
 - 24) 西宮良一：高密度交通流の現象解析, 土木学会第33回 年次学術講演会講演概要集, IV-184, 1978.9.
 - 25) Edie, L.C. and R.S. Foote : Effect of shock wave on tunnel traffic flow, *Proc. Highway Res. Board*, 39, pp. 492~505, 1960.
 - 26) Edie, L.C. and R.S. Foote : Experiments on single-lane flow in tunnels, *Theory of Traffic Flow*, pp. 175~192, Elsevier, 1961.
 - 27) (財)首都高速道路協会：第二次交通管制システムのパラメータ設定に関する調査研究, 1972.12.
 - 28) (財)首都高速道路協会：交通管制用システムの性能実験報告書, 1970.3.

(1979.10.11・受付)