

高速道路単路部の交通流の動的特性

The Dynamic Characteristics of Traffic Flow on Expressway

邢 健¹⁾・大口 敬¹⁾・越 正毅²⁾

By Jian XING, Takashi OGUCHI, Masaki KOSHI

This paper deals with bottleneck phenomena and oscillation waves of congested flow based on a traffic investigation on and upstream of the Hatano Sag, Inbound of Tomei Expressway, 1990.7.29. It is found that the head position of congested flow is moving within a section of about 200m length around the end point of vertical curve, and also that the car-following behaviour in congested flow is quite different from the ever accepted one. The phenomenon of the oscillation waves on Tomei Expressway is also analyzed. It is found that the upper limit on the amplitude of the oscillation waves is about 75km/h, which is much higher than that of intracity expressway and also that the average velocity of the waves is slightly slower than that of intracity expressway.

1. はじめに

事故あるいは故障車などの外的な支障がないにもかかわらず、都市間高速道路のトンネルやサグ（縦断線形の凹部の底部）をボトルネックとするいわゆる自然渋滞が発生している。これらのボトルネックの交通容量は、2車線合計で渋滞発生直前で3,000台/時程度、渋滞時では2,500台/時程度にまで低下し、これまで信じられてきた単路部区間の可能交通容量4,000台/時の6割前後になってしまう¹⁾。このボトルネック現象は、運転者のごく普通の追従運転挙動の集積として交通流の内部で生成されるものである。今後運転者の追従挙動

特性を基礎として、このようなボトルネック現象の発生、安定機構の定量的なモデル化が可能になれば、現存のサグやトンネルの交通容量の増大、将来建設される道路のボトルネック容量の推定、といった実用上の要請に応えることができるのではないかと期待される。

2. 研究の背景と本研究の位置づけ

交通流における巨視的な状態量である、交通量(Q)、密度(K)、速度(V)にはお互いに不連続な自由流と渋滞流という異なる2つの状態がある²⁾。自由流については、Q-V-K関係や車頭時間分布に関する研究などが多く見られるが、そのほとんどは平衡状態に達した場合を扱っており、臨界状態から渋滞流へ遷移する場合のような、動的な変動や過渡現象を扱ったものは少ない。

渋滞流については、Mikaら³⁾は渋滞流の短時間変動を解析し、約4分の周期性があること、粗密波

¹⁾ 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科
(〒106 港区六本木7-22-1)

²⁾ 正会員 工博 東京大学工学部 教授
(〒113 文京区本郷7-3-1)

一方追従理論による微視的な交通流現象についての研究も古くから行われており、これらは巨視的状态量の関係と追従理論との対応関係や安定性に関するものが多いが、その中で越¹⁾は、追従挙動そのものを集積することで自然渋滞現象を再現することを目指して、これまでとは大きく異なった追従挙動モデル(式(1))を提案した。

$$\dot{V}(t) = \frac{\alpha \dot{S}(t-T_1)}{S(t-T_1)^L} + \frac{\beta \{S(t-T_2) - f[V(t-T_2)]\}}{S(t-T_2)^m} - \gamma \sin \theta + \frac{\lambda \{V_{\text{exp}} - V(t-T_3)\}}{S(t-T_3)^n} \quad (1)$$

V : 速度 $\dot{V}$: 加速度
 S : 前車との車間距離 $\dot{S}$: 相対速度
 f : 運転者の目標車間を表す速度の関数
 θ : 縦断勾配差
 T_1, T_2, T_3 : タイムラグ
 $\alpha \beta \gamma \lambda$: 定数

渋滞流における追従モデルは第1項から第3項で表現され、各項は前車との相対速度、実際の車間と目標車間との差、勾配による走行抵抗の増分による項である。また自由流における追従モデルは、第4項目に運転者の希望速度と実速度との差に比例する加速度成分を付け加えたものである。

しかしこの追従モデル式(1)は、サグにおける減速波の上流増幅伝播現象といった何台もの車両挙動を表現しようとする、古典的な追従理論同様容易に追突を惹き起こし、交通流の動的特性を十分に表現するには至っていない。

こうしてみると、自然渋滞現象の解明のためには、これまでの巨視的または微視的交通流理論では十分扱われていない、交通流の動的特性に関する理論・実現象解析両面からの研究が必要である。そこで本報告では、上空から交通状況が把握できる東名高速道路上り線桑野サグがボトルネックとなる自然渋滞現象を取り上げ、サグで減速波が発生・伝播して臨界状態から渋滞流へ遷移し、渋滞流の先頭がサグ付近に安定するまでの間の、このボトルネック付近における運転者の運転挙動及びその集積としての動的な交通流現象の観測及び解析結果について報告する。

3. 交通流実態調査及びデータ処理

(1) 交通流実態調査

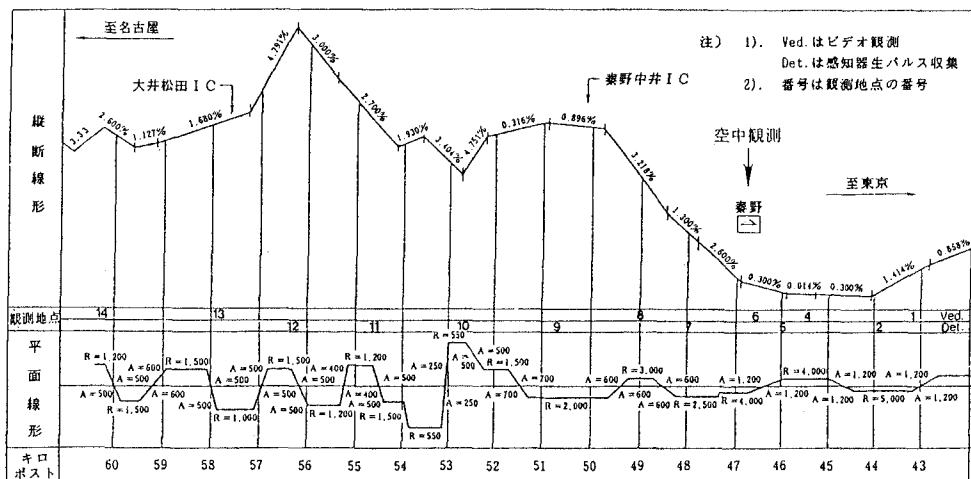


図-1 調査地点の線形

サグにおける自然渋滞現象の解析には、個々の車両の運動を道路延長及び時間軸方向に広がりを持ってかつ連続的に捉える必要があり、これまでではこのような有効な観測手段がなかった。本研究では観測気球に搭載したビデオ画像を用いて車両の運動を解析している。撮影区間を長くとるために2台の8mmビデオを気球に搭載する。また気球の風による揺れに対処するため、地上で画像を常時モニターしながらラジオコントロールでカメラの台座を3軸方向に回転制御するシステムを開発した。

次にボトルネックとなるサグの中から、日本道路公団の渋滞調査と車両感知器データ、及び現地踏査により以下の条件を満たす地点を探索した。

- ①自然渋滞が発生する確率が高い
 - ②前後や当該区間で平面線形の影響が少ない
 - ③観測の都合上、昼間に渋滞が発生する
 - ④気球の係留場所をサグのそばに確保できる
- その結果、東名高速道路秦野サグ(46.7kp)の上り方向で梅雨明けの天候の安定する時期を狙い、1990年7月29日(日曜)に調査を行うこととした。

上空からビデオ撮影を行った区間は、縦断曲線の終端付近約250~300mの区間である。また同時に前後区間の交通状況を知るため、このサグの上下流合わせて23kmの区間にわたり約2km毎に合計14ヶ所で、固定ビデオ撮影と車両感知器生パルスの収集によって交通量と速度を観測した。秦野サグ上り線方向の上流側の縦断勾配は-2.6%、縦断曲線区間を500mはさんで下流側は-0.3%の勾配になっている。図-1に地点観測を行った区間全体の平面・縦断線形及び観測地点を、また図-2に空中観測の概略を模式的に示す。

(2) データ処理

地点観測は6時間行われ、ビデオ画像及び感知器生パルスからは各車両の車頭時間と1分間平均速度が得られる。

空中撮影画像からは、次のようにして各車両の運動諸量を推定する⁵⁾。1/3秒または2/3秒のサンプリング時間毎に、予め実座標の判っている基準点と各車両の位置とを各画面毎にマウスを用いてパーソナルコンピュータに取り込む。次に道路を平面と見なし画面上座標から実座標へ座標変換を行う。さらに2台のカメラから得られた実座標につ

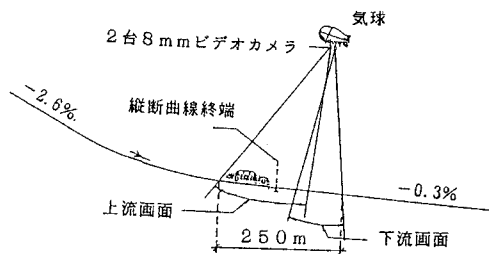


図-2 気球による空中観測
(東名上り秦野サグ)

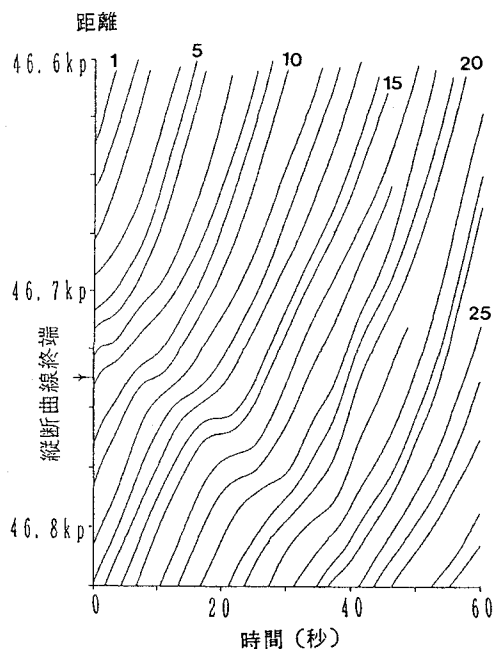


図-3 車両走行軌跡の例
(時間-距離図)

いて各々の車両のマッチングを行う。最後に読取り誤差と座標変換誤差を最小化するため、車線方向と車線に直角な方向の車両の運動を独立に扱ってカルマンフィルターを用いてデータを平滑化し、同時に補間データを得る。こうして1/9秒毎の各車両の位置、速度、加速度の推定値が得られる。図-3は各車両の走行軌跡をTime-space図(時間-距離図)上に示した例である。

4. 単路部の渋滞流の動的特性

(1) 調査日の交通状況

午後2時頃に秦野サグ(46.7kp)より上流約5kmのサグ(52.7kp)付近で一旦速度低下を起こしたが、

その後需要が減った 距離
ため渋滞には至らな 46.6kp
かった。2時過ぎに秦
野サグで一旦減速波
が発生し約40km/hま
で速度が低下するが、
2時21分にサグの数百
m上流の47.4kpで追突
事故が起き、3時頃ま
では事故地点を先頭
として渋滞が発生し
ている。事故処理終
了後は秦野サグを先
頭とする自然渋滞と
なった。この事故の
ため、サグを原因と
する自由流から渋滞
流への遷移現象はほ
とんど観測できなか
った。従って以下では主に渋滞流
についての解析結果を示す。

(2) 渋滞先頭の位置

図-4は空中観測による渋滞時の
各車両の速度をもとに等速度線
(速度コンター)を引いた図であ
り、これから時間-空間上での速
度変動がわかる。また同時に5台每
の車両の走行軌跡も示している。

この図から、渋滞時でも減速波
(Shock Wave; S.W.)が起きて上流へ
伝播していることがわかる。S.W.
の発生地点はほぼ一定であり、縦

断曲線終端から下流約100m以内の区間である。一
つめのS.W.は縦断曲線終端の上流数十mの所で解消
しているが、約3分後に発生している二つめのS.W.
は解消することなく上流へ伝播しているように見
える。但しこれに連続する時刻のデータがないの
で断言はできない。今回の調査では、気球の揺れ
で時々画面が道路から外れてしまい断続的なデー
タしかないが、他の時間帯の解析もあわせると、
縦断曲線終端付近で周期的にS.W.が発生している
ようである。さらにこの図の下流区間約300mの区

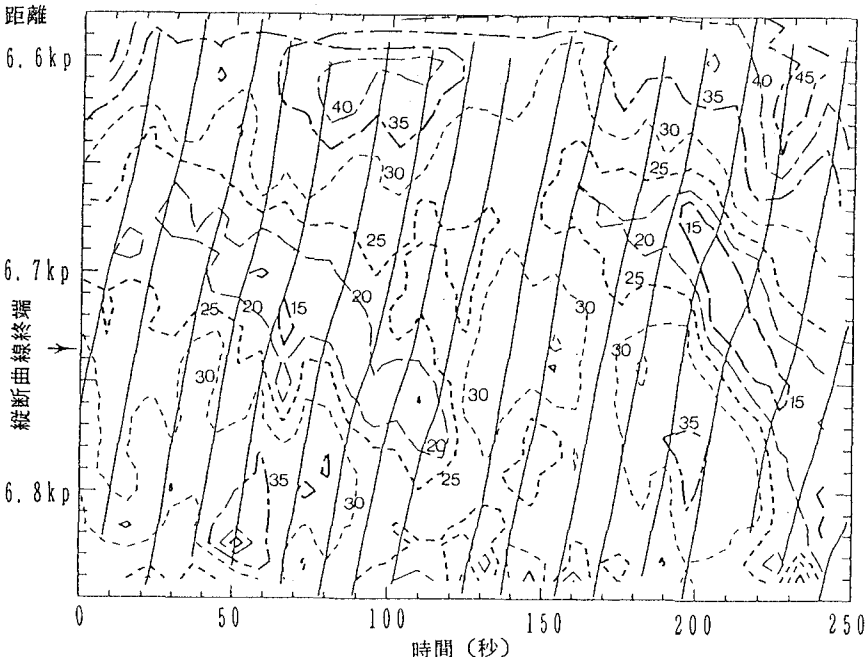


図-4 渋滞時の速度コンターと走行軌跡

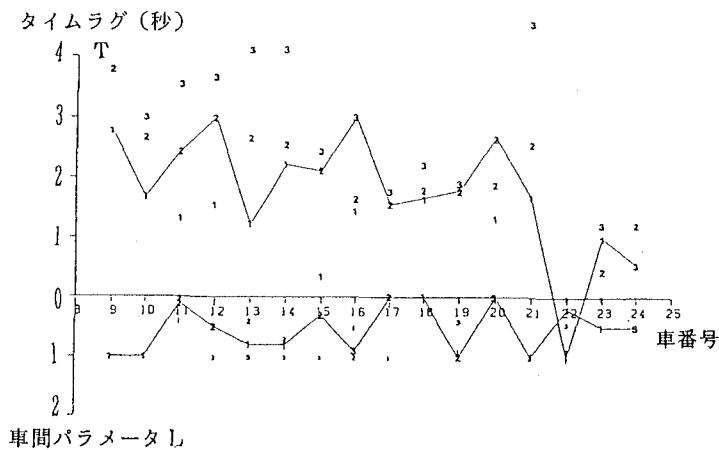


図-5 追従パラメータ推定値

間を解析してみると、ここでは加速発進流になっ
ておりS.W.は発生していない。これらのことから、
これまで渋滞の先頭位置はだいたいサグに固定し
て安定するものと考えられていた¹⁾が、これはあ
る地点に留まるのではなく、縦断曲線終端の上下
流あわせて約200mの区間を移動するものであるこ
とがわかった。

この現象は次のように説明できる。サグの少し
下流で起きたS.W.が上流へ伝播して渋滞の先頭が
上流側へ移動する。上流の先頭位置から加速して

車両がサグに進入して高速になり、サグの下流側の低速発進流に追いつくか加速車両の一部が減速を起こすことで、再び減速波が発生し先頭位置がサグの下流側に移動する。このように周期的な減速波の発生・伝播が生じ、渋滞の先頭がある区間内を前後に移動するものと考えられる。

また、図-4に示されている二つのS.W.は、伝播速度が少し異なっている。これはS.W.の減速度合の違いによるものと考えられる。すなわち、追従挙動特性として減速度合の大きいS.W.が通過する時には運転者のタイムラグが小さくなるため、そのS.W.の伝播速度が大きくなるものと考えられる。

(3) 車両の追従挙動

サグなどの自然渋滞における渋滞時交通容量は、渋滞先頭からの発進加速流率で決まるので、この時の追従挙動が、渋滞時交通容量の低下現象を惹き起こしているものと考えられる。ここで簡単のため、追従モデル式(1)の第1項のモデルパラメータ、タイムラグ T_1 と車間のべき乗 L についてのみ考えることにする(追従挙動の大部分は第1項の相対速度項で説明できる⁶⁾)。ただし、実際の追従挙動は直前の車両のみならず、何台か前の車両に追従している場合も考えられる。そこで、式(2)のような追従モデルを考えることにした。

$$\dot{V}(t) = \frac{\alpha \dot{S}_i(t-T)}{S_1(t-T)^L} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{S}_i$: 前方 i 番目の車との相対速度
 $\dot{V}$: 追従車の加速度 ($i = 1, 2, 3$)
 S_1 : 直前の車両($i=1$)との車間距離
 T : タイムラグ
 α, L : パラメータ

この解析は丁度S.W.が通過している図-3に示された車両について行った。追従パラメータ T と L の推定方法は以下のものである。ある i に対して T と L を0から1まで0.1刻みで変化させ、 $\dot{S}_i/(S_1)^L$ と $\dot{V}$ の相互相関を調べ、最も相関の高くなるパラメータ T と L を推定値とする。図-5はこの方法により推定された T と L を示したものであり、横軸は車両の順番、縦軸は上方が T 、下方が L の推定値を意味している。図中の数字のプロットは前方 i 番目の車両に対して推定されたパラメータであり、実線はそのうち最も相関が高いパラメータを結んだものである。こ

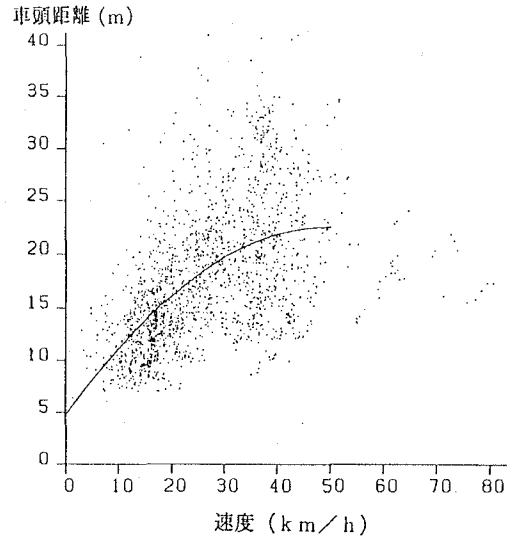


図-6 空中観測による速度-車頭距離関係

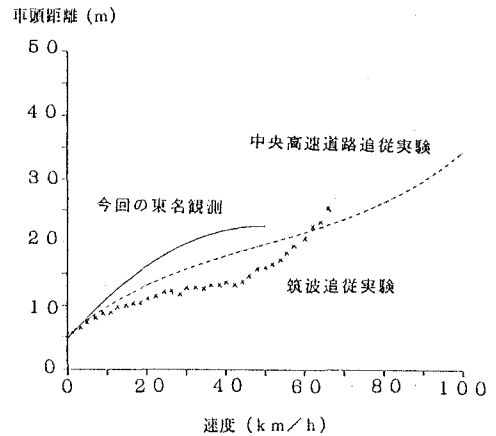


図-7 追従実験と実交通流における速度-車頭距離関係

の図から次のようなことがわかる。

- ①直前の車両よりも2台前の車両の方が相関が高くなる場合も少なくない
- ②車群の後方の車両ほどタイムラグが小さくなる傾向がある
- ③車間のべき乗 L の取り得る範囲は概ね1.0以下である

ここで22番目の車両のタイムラグが負になっているが、これはその直前の車両が途中車線変更したためこの車両が加速したことの影響と考えられる。よく調べると、この車両は実は4台前の車両(18番目の車両)と最も相関が高くなっていた。

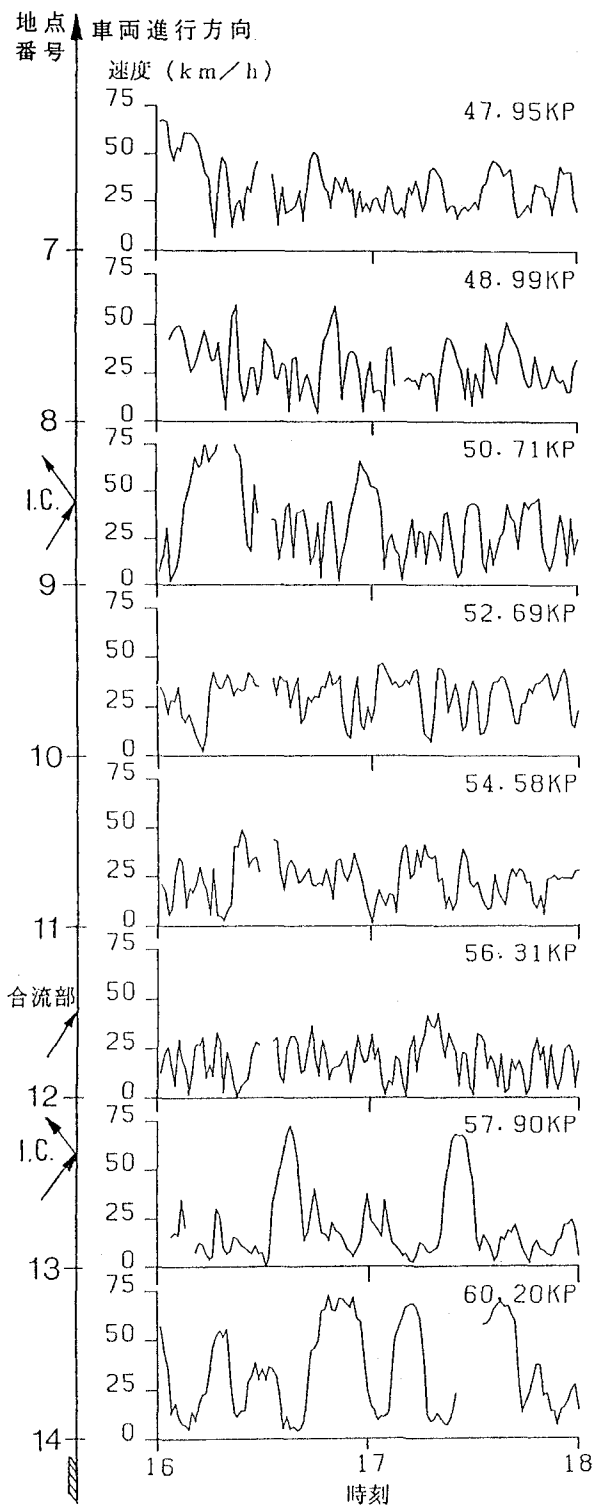


図-8 ボトルネック上流8地点における1分間平均速度の時間変動

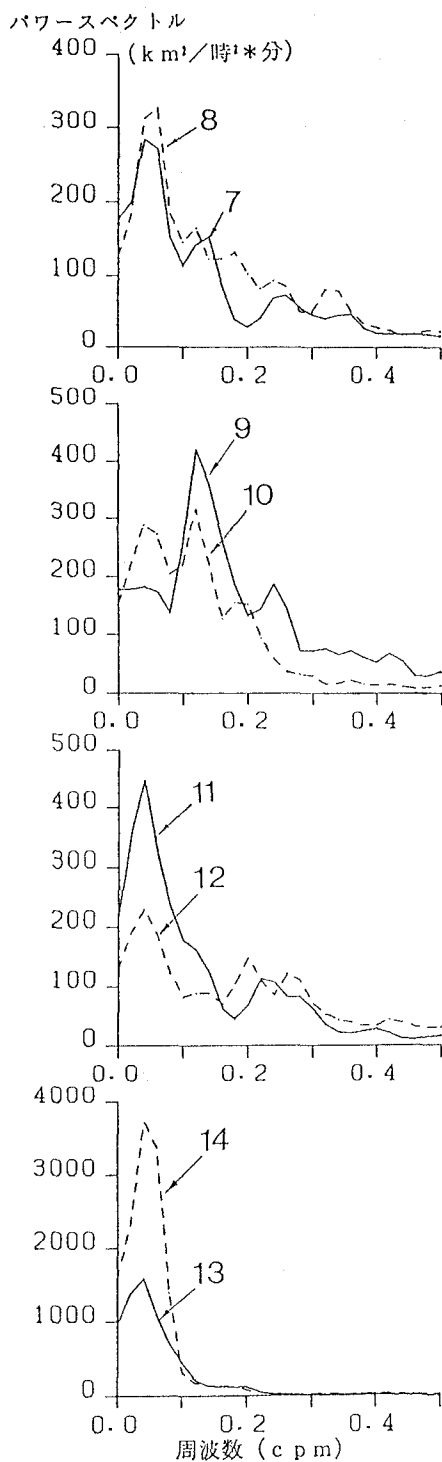


図-9 ボトルネック上流8地点における1分間平均速度のパワースペクトル

図-6は、観測された車両の定速走行状態（ $| \text{加減速度} | \leq 0.05g$ ）における速度－車頭距離の関係（ $S-V$ 図）をまとめてプロットし、回帰曲線により平均的な関係を示したものである。ある速度に対する車間距離はかなりばらついており、ドライバーによる車間距離の取り方が異なることを意味していよう。図-7は、建設省土木研究所試験走行路における29台の試験車を用いた追従実験⁷⁾、中央高速道路における2台の試験車の追従実験⁸⁾及び今回の東名高速道路秦野サグでの実際の交通流観測における $S-V$ 関係をまとめたものである。渋滞流域ではいずれの $S-V$ 関係も上に凸な関係がみられる。また今回の東名観測における車間距離は二つの追従実験の場合より長くなっており、これがサグでの渋滞時の交通容量低下を惹き起していると考えられることができる。

(4) 渋滞流の粗密波現象

図-8はボトルネック上流約13kmの区間8ヶ所（地点No. 7～14）における1分間平均速度の時間変動を示している。この図には、速度の変動に粗部（速度の高い部分）と密部（速度の低い部分）が交互に現れており、これは粗密波の伝播を意味している。また粗密波の振幅は上流へ伝播するにつれて増幅することも減衰することもあり、56.31kp（登坂車線の合流部）では整流されているが、再び新たな粗密波が上流へ伝播していることがわかる。

図-9は、1分間平均速度の時間変動を定常過程とみなしてパワースペクトル解析を行った結果である。図中の数字は地点No.を表す。これから、ほとんどの地点で約25分の周期性（周波数0.04cpm[回/分]）があることがわかり、これは粗密波の周期である。また、約4分の周期性（周波数0.25cpm）も見受けられ、これは交通流が本来持つ変動周期を意味しているものと考えられる。地点9と10では約8分の周期成分（周波数0.125cpm）が卓越しているが、地点9はインターチェンジの直上流地点、地点10はサグ及び急カーブ中の地点であり、これらの道路条件が交通流変動の周期成分に影響を与えていることが推測される。また特に地点13, 14でピークパワーが高く、このことからこの地点で粗密波が大きく発達していることがわかる。

図-10はボトルネック上流約13kmの地点（No. 14）

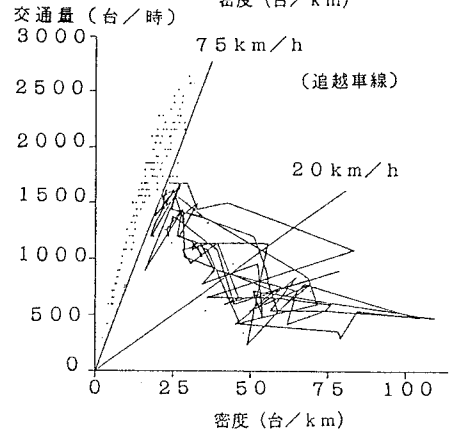
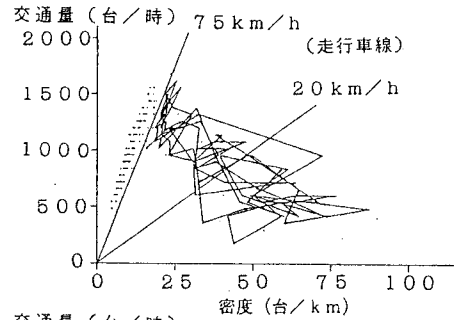


図-10 ボトルネック上流約13km地点(60.2KP)における1分間交通量－密度関係

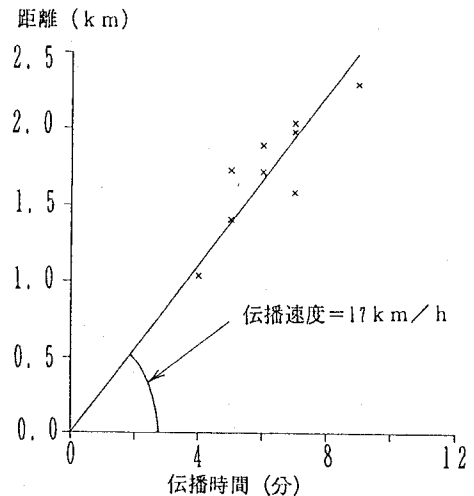


図-11 粗密波伝播時間と距離の関係

における渋滞時の1分間交通量(Q)と密度(K)の関係を時系列に結んだものである。この図によると、渋滞時の粗密波の粗部の速度(Q/K)の上限は、両車線共約75km/hになっており、だいたい自由流と渋滞流の臨界速度になっている。この速度は首都高速道路における粗部の上限速度45km/h²⁾より大

きい。さらに渋滞流中の粗部と密部の境界はあまり明瞭ではないが約20km/h程度であると思われる。

図-11は、地点7～14について隣合う2地点間の1分間平均速度の相互相関が最大となるタイムラグ（粗密波の伝播時間に対応する）と2地点間の距離との関係を示したものである。原点を通る回帰直線の傾きから粗密波の平均伝播速度が約17km/hであることがわかる。また各地点における車線間の相互相関分析を行うと車線間の同期現象が見いだされた。

5. まとめと今後の課題

本報告で得られた結果は以下の通りである。

(1) サグにおける渋滞の先頭位置について

渋滞中にサグの縦断曲線終端付近で約3分の周期で減速波が発生し、上流へ伝播したり途中ですぐに解消したりする。渋滞の先頭位置は、縦断曲線終端付近約200mの区間内を移動している。

(2) 渋滞流中の車両追従挙動について

直前の車両ではなく2台以上前の車両に反応して追従している場合も見受けられる。タイムラグは車群の後方ほど小さくなる傾向がある。車間のべき乗パラメータは概ね1.0以下の範囲である。

(3) 渋滞流中の粗密波現象について

粗密波の振幅は上流へ伝播するにつれて増幅することも減衰することもあり、ある地点で整流されても再び新たに発生して上流へ伝播することもある。粗密波の粗部には臨界速度にほぼ等しい上限速度がある。車線間には同期現象が見られる。粗密波の平均伝播速度は約17km/hである。粗密波には約25分の周期が見られる。

今後の課題としては、ここで得られた知見をもとに、追従モデルの発展によるサグにおけるボトルネック現象の動的特性の再現、またボトルネック付近での約3分の低周期減速波と上流の渋滞流中の約25分の長周期粗密波との関係の解明と粗密

波現象の追従モデルによる再現、などが挙げられる。また今回の観測調査では、渋滞発生のかきとなる自由流から渋滞流への遷移現象が事故のために捉えられなかったため、本年再び観測を行いその解析を進めているところである。

6. 謝辞

最後になりましたが、本研究を進めるにあたり、日本道路公団試験所、東京第一管理局、横浜管理事務所、松田工事事務所の各方面の方々及び㈱オリエンタルコンサルタンツ、㈱サンシャイン工業、八千代エンジニアリング㈱の皆様に深甚なる御尽力をいただきました。また秦野市の須藤氏の御好意でその土地を気球の地上基地として使わせていただきました。以上の方々に謝意を表します。

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, No. 371/IV-5, pp. 1-7, 1986. 7.
- 2) 越他：渋滞時の交通流現象に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 306, pp. 59-70, 1981. 2.
- 3) Mika, H.S. 他：Dual Mode Behavior of Freeway Traffic, H.R.R., No. 279, pp. 1-13, 1969.
- 4) 岩崎他：車両感知器データを用いた都市間高速道路の交通流特性解析, 土木計画研究・論文集, No. 8, pp. 153-160, 1990. 11.
- 5) 中村他：高速道路織り込み区間での交通流観測と運転挙動解析, 土木計画研究・講演集, NO. 12, pp. 61-67, 1989. 12.
- 6) 大庭他：渋滞流における追従挙動モデルの検証, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 1988. 10.
- 7) 岩崎征人：車両の追従挙動と巨視的交通現象に関する研究, 東京大学学位論文, 1981. 9.
- 8) Xing, J. : A Study on Car-following Behaviour, 東京大学修士論文, 1989. 9.