

## 試験走路における車両の追従挙動特性\*

## CAR-FOLLOWING CHARACTERISTICS ON THE TEST ROAD

岩崎 征人\*\*・越 正 毅\*\*\*・大 蔵 泉\*\*\*\*

By Masato IWASAKI, Masaki KOSHI and Izumi OKURA

## 1. 目的と実験の概要

交通流のさまざまな現象は、交通流を構成する個々の車両の走行挙動の時間的・空間的な集積として把握されなければならない。それゆえ、交通流中の車両個々の走行挙動を知ることは、さまざまな交通流現象の出現機構を説明するうえで不可欠であるといえる。

ここで述べようとするのは、このような観点に立って企画・実施した、主として渋滞流における車両の追従挙動を解明するための車両追従実験の内容を解析結果の一部についての報告である。

実験は、1979年12月に筑波研究学園都市内の建設省土木研究所の試験走路（1周6.15km）において29台の乗用車を用いて実施した。29台の構成内訳は、1台の先頭車と28台の追従車である。先頭車は、あらかじめ定められた8種類の速度ボタンに従って走行するように指示されており、他の28台は、すべて前車に追従して走行することだけを指示されている。実験の観測は、試験走路路上を走行している車群をヘリコプタに搭載した35mmメモーションカメラ（写真-1）によって撮影した。試験走路の路肩には、解析時の車両位置の算出基準となる標定点を50m間隔に設置した。この標定点には、50cm×200cmの白色粘着テープを使用した。

ヘリコプタの飛行高度は、フィルム画面の大きさなどを勘案して垂直高度で480mとした。しかし、実験時の風向・風速さらには気圧の変動などによって横揺れや高度の変動（=約30m）が生じたこともあり、撮影されたフィルム上の縮尺率や撮影角度は均一なものとなっていない。ヘリコプタは、車群の移動速度とほぼ同一の速度で飛行するように指示されている。このような飛行

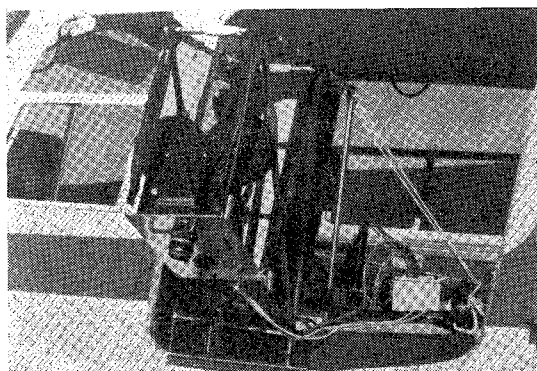


写真-1 観測用カメラの概観

速度とした理由は、カメラの視野内に常時車群全体を捕捉しようとしたためである。なお、フィルムは毎秒2コマの速度で撮影した。

実験で用いた8つの速度ボタンの代表的なものを図-1に例示している。ここで用いた速度ボタンのうち、主として渋滞時での追従挙動解析を目的としたもの（計6ボタン）は、首都高速道路での渋滞時の車両感知情報から作成した1分間速度変動図をもとにして、隘路直近上流での小振幅変動および隘路から十分離れた地点で生じている大振幅の粗密波での走行状態を想定したものである。他の2つのボタンは、自由流での追従挙動に関する情報を得ることを目的として比較的高い速度（50お

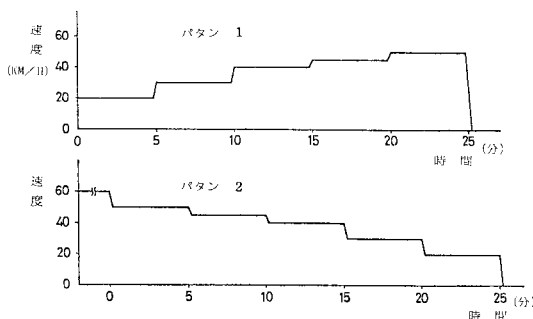


図-1 実験で用いた速度ボタンの例

\* 土木学会第36回年次学術講演会で一部発表済み。

\*\* 正会員 工博 武蔵工業大学講師 土木教室

\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第5部

\*\*\*\* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 土木教室

よび 60 km/h) を設定した。

この実験は、追従挙動に関する全般的な情報（速度、車頭距離、加減速度および反応時間など）が得られるように企画したものであるが、本報告ではすべての情報を消化しきっておらず、ここで述べようとするのは、主として速度と車頭距離とに関するデータの解析結果についての記述である。

## 2. データの処理

撮影されたフィルムは、グラフペンシステムを用いて車両と標定点との座標を読み取った。その結果は紙テープに出力された。フィルム上での車両は、約 1.7mm 程度の大きさ（写真-2）であり、これを人手によって読み取るため、グラフペンの画面接触時には誤差が生ずる。

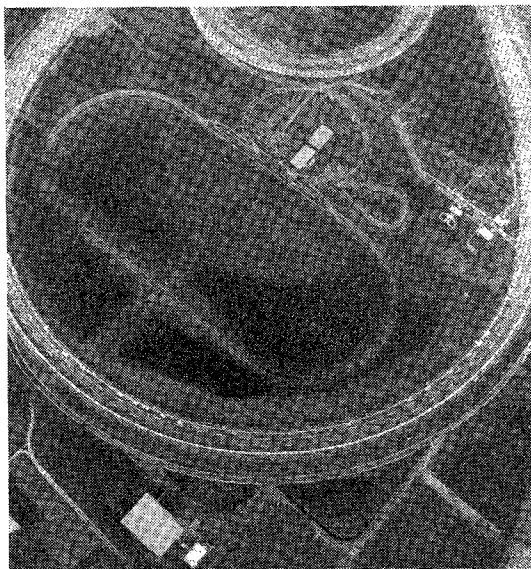


写真-2 解析用フィルムの一例

車両の位置は、標定点間の距離が一定（50m）であることを利用して、連続する2つの標定点を結ぶ直線の式を求め、同時にこの2つの標定点の間に存在する車両の座標からこの直線上に下ろした垂線との交点座標を求め、距離を算出している。この方法によれば、直線区間での距離算出時の誤差はあまり問題とはならないのであるが、曲線部での距離には誤差が含まれてくる。

フィルム読み取り時および距離算出時に生ずる実距離で最大約 1.5m 程度の誤差のため、計算によって得られる各コマ間での車両の程動距離には必然的にばらつきが生じてくる。このため、ここでは1コマごとに15コマ分の移動距離データを用いて、2次曲線による回帰を行い、各コマごとに重み付きの平均値を求めることによ

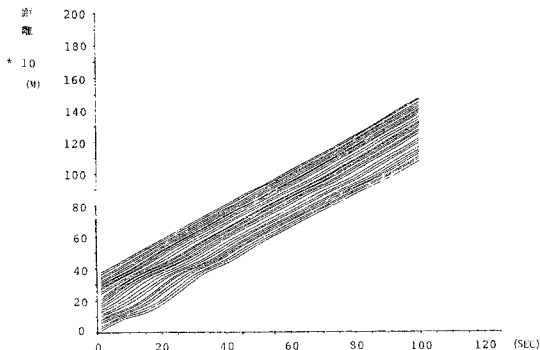


図-2 車群の走行軌跡の一例

て車両軌跡の平滑化を行った。図-2 はこのようにして平滑化した車群の走行軌跡の一例である。

## 3. 試験走路での速度と車頭距離との関係

### (1) 各車両の車頭距離分布

各車両の時間-距離データから、1台ごとに5秒ごとの速度と車頭距離とを求め、速度に対する車頭距離の分布図を作成した（図-3、図-4）。これらの図中における記号は、Aは加速（加速度 $\geq 0.05g$ ）、Dは減速（加速度 $\leq -0.05g$ ）およびその他は定速（加速度 $\pm 0.05g$  以内）の走行状態をそれぞれ意味している。

ここに示した図-3、図-4からも明らかのように、各車両の速度に対する車頭距離は、速度が高くなるほど車頭距離のばらつきが大きくなることが認められるが全体としては連続的である。一方、実際の道路上での追従車の速度と車頭距離との関係<sup>1)</sup>は、ほぼ 45 km/h を境界として自由流領域と渋滞流領域とは別個の曲線関係となっており、この速度付近での車頭距離は渋滞流における方が自由流におけるよりも長くなり、不連続と食い違い

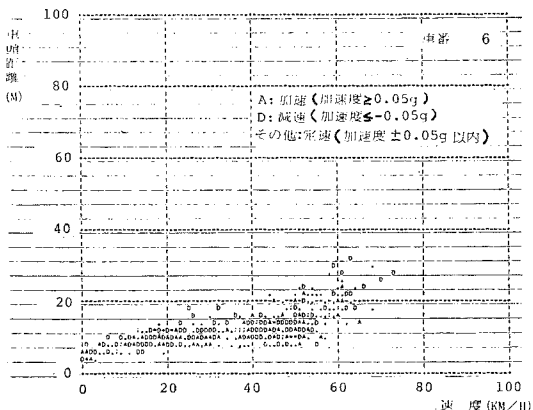


図-3 ある1台の車の速度と車頭距離との関係 (車番 6)

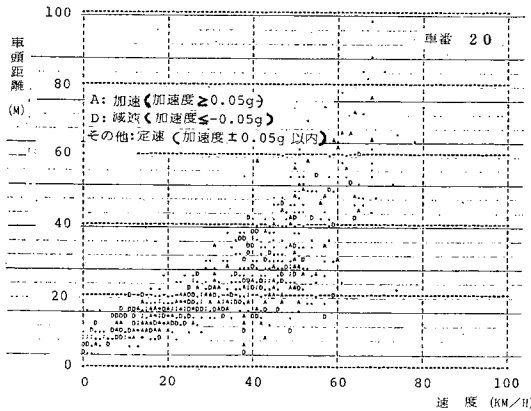


図-4 ある1台の車の速度と車頭距離との関係 (車番 20)

とが存在していた。

速度に対する車頭距離の増大の仕方は、図-3のように増大の仕方の小さい車両がいる反面、図-4のように大きい車両のいることが知られ、運転車によって速度に対する追従車頭距離に差異のあることが明らかである。これは、追従走行時の潜在的な危険に対処する各運転者の追従車頭距離に差異があるためかも知れない。

図-3と図-4およびその他の車両について作成した速度-車頭距離図で示されている加減速別の車頭距離(AおよびD)は、各車両によってもまた各速度によってもばらついており、これらの図からだけでは、Newell<sup>2)</sup>や桑田<sup>3)</sup>が指摘しているような加減速状態での追従車頭距離の有意な差の存在については明らかなことはいえない。

(2) 平均追従車頭距離の特性

図-5は、すべての速度パターンから得られた全車両の時間-距離データから、5秒ごとの速度とそのときの車頭距離とを求め、速度の階級別(2km/h刻み、ただし停止時-速度零一は分離集計)に車頭距離の分布を作成し、各速度に対する平均追従車頭距離をプロットしたものである。なお、ここにおいても、車頭距離は加速度  $\pm 0.05g$

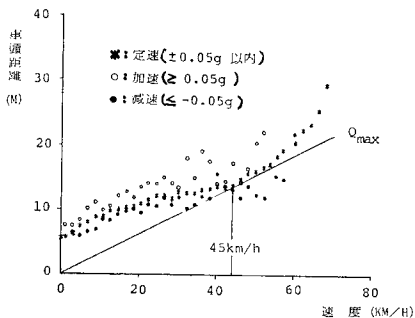


図-5 速度と平均追従車頭距離との関係

を境界として定速と加減速との3つの走行状態に別別して集計している。

定速走行時の平均追従車頭距離(図中\*印)は、ほぼ45km/hを境界として、この速度以下では上に凸の、この速度以上では下に凸の曲線関係にあることが知られる。また、この曲線は、図中にも示したように、ほぼ45km/hの点で最大交通量線( $Q_{max}$ )に接するものであることがわかる。

図-5に示された定速走行時の平均追従車頭距離の曲線には、実交通流で見られたような食い違いや不連続性は明瞭になっていない。したがって、この曲線上においては、実交通流におけるように食い違いと不連続の生じた速度(ほぼ45km/h)を境界として自由流と渋滞流とに区別することはできそうにない。

平均追従車頭距離は、全体としては加速時の方が減速時よりも長くなっていることが認められる。局所的にみると、ほぼ40~50km/hの領域では、減速時の車頭距離の方が加速時のものより長くなっていたり、あるいは加減速時ともに定速時のものより短くなっているなど、他の速度領域での関係とやや異なった振舞いをみせているが、データの少ないこともあり、これが必然性のある有意な現象であるかどうかは断定できない。

図-6と図-7とは、図-5に示した速度と平均追従

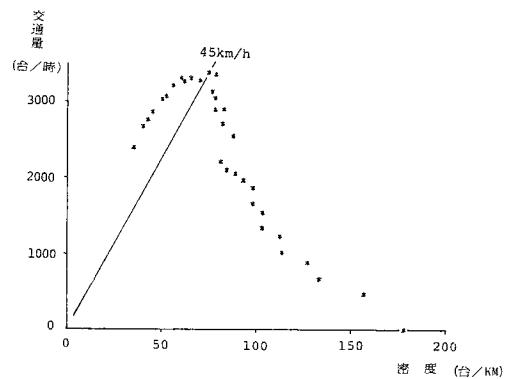


図-6 交通量-密度相関(図-5より作成)

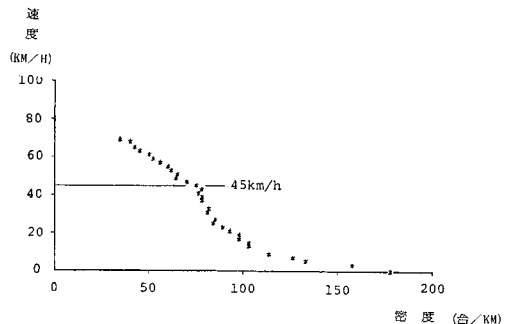


図-7 密度-速度相関(図-5より作成)

車頭距離との関係のうち定速走行時のものを交通量-密度および密度-速度平面上に巨視的状態量の関係に置き換えたものである。これらの図では、密度は平均追従車頭距離の逆数を、また交通量は密度と速度との積を求め、これらを km および時間の単位で表示している。

図-6 の交通量-密度相関では、密度約 75 台/km で最大交通量が出現している。図-6 では、この密度以下の領域では上に凸の、この密度以上の領域では下に凸の関係にあることが知られる。また、密度 75 台/km 付近では、密度の増大に伴って急激な交通量の減少がみられる。このような交通量の急激な減少傾向からみて、交通量-密度曲線上での不連続性の存在が推測できるが、断定はできそうにない。

図-7 の密度-速度相関図においても、やはり 75 台/km 付近で速度の急激な変化が生じており、曲線の不連続性を示唆しているようであるが、やはり断定はできそうにない。

いずれにしても、図-6 および図-7 に示されている巨視量の相関では、速度約 45 km/h、密度約 75 台/km 付近で曲線が急激に変化していることは間違いのない事実である。

#### 4. 筑波実験と実流での実験とにおける追従挙動の考察

図-8 は、実験（以下筑波実験とよぶ）から得られた定速走行での速度と平均追従車頭距離との関係に、首都高速道路での実験（以下実流での実験とよぶ）で得られたすべての車両（19 台）の定速走行時（±0.1g 以内）のデータを重ねたものである。なお、実流での実験では車間距離が求められているのでそのままでは比較できない。このため、ここに示したデータは車間距離に筑波実験で用いた全車両の平均車長（4.2m）を加え車頭距離に変換している。

図-8 のほぼ 45 km/h 以下の領域では、実流のデータ

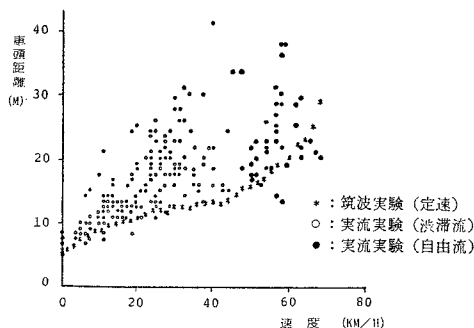


図-8 筑波実験と実流とにおける速度と車頭距離との関係 (定速状態)

のほとんどは筑波実験の結果の上方に分布しており、全車追従状態で得られた筑波実験の結果は、実流での追従走行の下限を示していると考えられる。実流での実験結果が、このような分布をしている理由は以下のように考えることができる。

この点は、実流での車両は、一旦渋滞した交通状態に入ると筑波実験でのような短い車頭距離での追従走行をする車両が少なくなるためであると考えられる。その理由としては、筑波実験の結果が強制された追従走行であるのに対し、実流での渋滞流中の運転者、特に日常しばしば首都高速道路を利用している運転者は、もし前車が加速走行を始めてもいずれは再び低速走行ないしは停止を余儀なくされるということを経験的に知っていたり、さらには意図的に車頭距離を長くする運転者が存在するなどの点が考えられよう。

一方、図-8 のほぼ 45 km/h 以上の領域では、実流での結果は、必ずしも筑波実験の結果を下限としているのではなくむしろこの曲線のまわりに分布しているとみることができる。実流での自由流は、先頭車と追従車との混在した流れであることはすでに知られている。それゆえ、図-8 の自由流のデータにも先頭車と追従車とが混在していると考えの方が自然である。すなわち、筑波実験結果の下方およびその周辺に出現しているデータは主として自由流での追従車のものであり、上方に出現しているデータは、先頭車の車頭距離であると考えられるのである。図-8 の 40~50 km/h の領域での実流での実験から得られたデータの数は、他の領域に比べ少なくなっていることが知られる。この点については、実流での実験結果から以下のように説明することができる。

図-9 は、実流での実験から得られたある 1 台の車の 4 秒ごとの速度と車間距離との関係を示したものである。自由流から渋滞流への遷移 (図中矢印) がほぼ 50 km/h から 40 km/h の領域で生じていることがわかる。また、渋滞時のみを走行していた別の 1 台の関係 (図-10) からは、ほぼ 40 km/h 以上の速度での走行は出現し

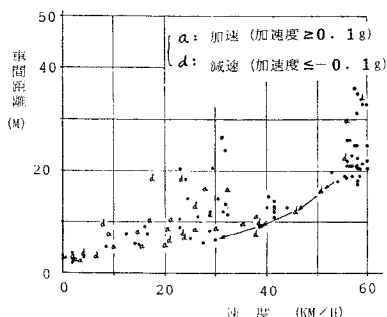
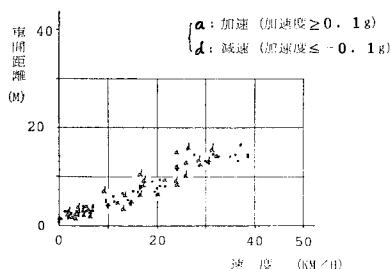


図-9 実流で得られたある 1 台の車の速度と車間距離との関係

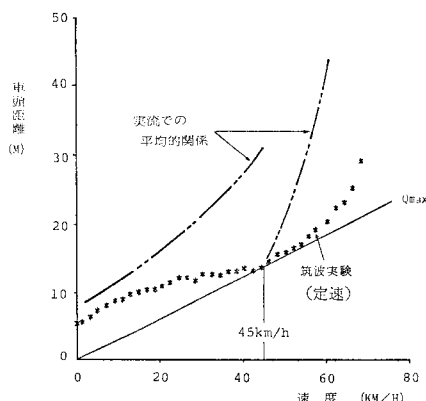


図一10 実流で得られたある1台の車の速度と車間距離との関係

ていなかったことがわかる。

このように、実流においては、ほぼ40~50 km/hの領域では定速での追従があまり出現しなかったか、あるいは出現しても過渡的な状態のため長い時間は継続しないと考えることができる。

図一11は、筑波実験の定速走行と図一8のデータおよび実流での他の観測データを加えた実流での平均的な速度と車頭距離との関係を示したものである。この図からも明らかのように、実流の渋滞流では平均的にみ



図一11 速度と車頭距離との平均的關係

て、筑波実験に比べてより長い車頭距離で追従していることが知られる。また、自由流でも同様に筑波実験より長い車頭距離となっている。しかし、先にも述べたように、実流での自由流は全車追従ではないから、自由流の追従車両が必ずしも筑波実験より長い車頭距離で追従しているとは限らない。

## 5. まとめと今後の課題

解析の結果、試験走路での追従挙動および実流での追従挙動に関し、以下に示すいくつかの事柄を確認することができた。

### (1) 筑波実験の結果について

(i) 速度に対する車頭距離は、速度の増大に伴って

ばらつきも増大する。速度に対する車頭距離の増大の仕方の大きい車両もいる一方で、増大の仕方の小さな車両もあり、追従時の車頭距離が車両間で大きく異なっていることが明らかになった。

(ii) 定速走行時の速度と平均追従車頭距離との関係は、ほぼ45 km/hを境界として以下の領域では上に凸の、それ以上の領域では下に凸の曲線になることが知られた。この曲線は、ほぼ45 km/hの点で最大交通量線と接している。しかし、ここで得られた曲線は、実際の道路上での関係でみられたような不連続性や食い違いは明瞭になっていない。したがって今回の追従実験で得られた速度-平均追従車頭距離曲線上で自由流と渋滞流とに区別することはできそうにない。

(iii) 実験から得られた定速走行時の速度-平均追従車頭距離曲線を交通量-密度-速度相関に置き換えた曲線は、密度75台/km付近で交通量、速度ともに急激な変化を示していることが明らかになった。

### (2) 筑波実験と実流での追従挙動の比較

(i) 実流での渋滞流における車頭距離は、同じ速度での筑波実験における車頭距離より長い。

(ii) 自由流でも、平均的にみると実流での車両は、筑波実験より長い車頭距離で走行しているが、実流での自由流は全車追従の流れではないから、追従車両についてみるならば、必ずしも自由流の追従車両が筑波実験より長い車頭距離で追従しているとは限らない。

(iii) 実流においては、自由流と渋滞流との境界速度(ほぼ45 km/h)付近での追従状態の出現頻度はきわめて低い。このことは、おそらくこの付近での定常的な追従走行が出現しないか、あるいは出現したとしても長い時間継続しないものと推測できる。

本報告は、あくまでも追従実験結果の一部であり、現在細部についての解析作業を進めている段階である。

今後検討すべき事項としては、

(i) 実流での速度と車頭距離との関係でみられる不連続性と食い違いの存在と本実験結果得られた試験走路上の追従挙動との間隙を埋めるための説明論理を構成すること。

(ii) (i)の結果から導き出される論理を踏まえて、実流での渋滞時に生成する粗密波の発生と伝播の機構を説明する論理モデルを構成すること。

(iii) 本実験の結果を用いて、走行状態別の運転者の反応遅れと反応遅れが原因となって生成する小さな加減速波の生成と伝播の機構を明らかにすること。

などが挙げられる。

おわりにあたって、本実験を実施した試験走路の借用と実験の実施にあたって多大なご協力をお寄せいただいた建設省土木研究所道路部の方々ならびに観測のための

ヘリコプタを快くお貸し下さった本田技研工業の関係各位と操縦士、航空機関士の方々さらには実験とデータ整理を積極的に遂行していただいた東京大学学生山本荘輔氏（現・建設省）をはじめとする各位に対し深謝の意を表するものである。

また、本実験は昭和54・55年度文部省科学研究費補助金を得て実施したものであることを付記し謝意を表するものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 越・岩崎・大蔵・西宮： 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.
- 2) Newell, G. F.: Theories of Instability in Dense Highway Traffic, Jour. Oper. Soc. of Japan, Vol. 5, pp. 9～54. 1963.
- 3) 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.

(1982.6.8・受付)