

大きな速度変化を受ける追従車両の走行挙動特性

CHARACTERISTICS OF DRIVER RESPONSES TO LARGE DISTURBANCES

岩崎 征人*・ラム, テニー N.**

By Masato IWASAKI and Tenny N. LAM

This paper deals with characteristics of driver responses in large disturbances. 10-vehicle platoons are employed in the car-following experiment which was held on the test track. The characteristics of driver responses are used for the propagating time of speed disturbances, the relationships between speed and headway of followers, and the followers' trajectories on the speed-platoon length plane. Some characteristics including dynamic behaviors of followers are clearly recognized by using the relationships between follower's speed and platoon length. The results of this study can be applicable for basic informations making a model of car-following behaviors at the bottlenecks on the inter-city freeways.

1. はじめに

本論文は、追従車群を形成している車両が、先頭車両の起こした大きな速度変化を受けた場合の追従挙動の基礎的な特性を記述しようとするものである。ここで述べようとする追従車両の走行挙動は、a) 速度変化の車群内における伝播時間、b) 追従車両の速度と追従車頭距離との関係、および c) 速度変化を受けた追従車両の走行挙動の速度-追従車頭距離平面上での時間的推移、の3つによって表現されるものである。

近年、都市間高速道路において、トンネル部や縦断曲線の底部（サグ部）が道路交通容量上の隘路となることがわかってきた^{1),2)}。これは、日曜・祭日や行楽シーズン中の休日などに、しばしばこれらの道路区間で重度の渋滞が発生することによって知られてきたものである。このような渋滞は、都市内高速道路上での料金所などを先頭として発生する渋滞とはやや性質を異にしているようであり、トンネル部やサグ部を走行する車両の走行挙動そのものに依存しているといえる。このような

道路区間での交通現象あるいは車両の走行挙動は、在来の知識からだけでは説明できそうにない。

本研究の最終的な目標は、このような道路区間を含んだ実際の道路上での車両の走行挙動を定量的なモデルによって記述することであり、本論文は、そのために必要な車両の追従挙動についての基礎的な情報を得ることを目的としたものである。

本論文で利用したデータは、General Motorsの試験走路（Milford, Michigan）で実施された追従実験によって得られたものであり、この実験は著者のうちの1人（Tenny N. LAM）が参加している。岩崎はCalifornia大学（Davis）滞在時にこのデータを利用する機会を得、共著者の好意によって本論文を取りまとめたものである。

2. 実験の概要とデータの取り扱い

ここで利用したデータは、上述のように、G.Mの試験走路で実施された追従実験の結果である（実験の詳細については参考文献3）を参照されたい）。

実験には、2種類の乗用車20台（10台のChevrolet Impala = 大型車 = Standard car : 5740 cc と10台のChevrolet Vega = 小型車 = Small car : 2300 cc）が用いられた。これら20台の車両は、組合せによって計4種の10台ずつの車群に編成された。すなわち、

* 正会員 工博 武蔵工業大学講師 土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

** Dr. Eng. Professor Dept. of Civil Engineering, University of California, Davis California, 95616

- a) 全車 Impala の 10 台車群
- b) 全車 Vega の 10 台車群
- c) Vega と Impala の交互混成の 10 台車群
 - i) Impala 先頭
 - ii) Vega 先頭

である。なお、c) の交互混成車群による実験は、a), b) に比べ回数が少なかったため、本論文のデータとしては利用しなかった。

実験では、先頭車両の運転者はあらかじめ定められた 18 種（加速パターン 9 種と減速パターン 9 種）の実験パターン（Table 1）に従って走行するように指示されていた。このパターンは、先頭車両の運転者だけが既知であって、後続の運転者は前車に追従して走行することだけを指示されていた。初速度 40 mile/h (64 km/h) までの実験は直線コース (2.5 mile ≒ 4 km) で、40 mile/h 以上の実験は周回路 (4.5 mile ≒ 7.2 km) で実施された。実験は、各パターンごとに最低 5 回繰り返して行われ、先頭車両と最後尾車両 (10 番目) について、速度と累加走行距離とが時刻とともに磁気テープに集録された。

本実験は、上述の 2 台の車両の走行挙動について、多くの情報を得られるように計画されたものであるが、本論文では、Fig. 1 に略記した各車両が速度を変化させた時刻 (t_1 , t_2 , t_3 および t_4) における先頭車両と最後尾車両の速度と車群長とを用いている。 t_1 から t_4 の時刻の意味は、下記のようなものである。

- t_1 : 先頭車両の変速開始時刻
- t_2 : 先頭車両の変速終了時刻
- t_3 : 最後尾車両の変速開始時刻
- t_4 : 最後尾車両の変速終了時刻

これらの時刻から、

- $t_3 - t_1$: 速度変化の車群内の伝播時間

Table 1 Speed Patterns.

	速度 (mph)				速度 (mph)		
	初速	終速	速度変化		初速	終速	速度変化
加速	10 (16)	20 (32)	10 (16)	減速	20	10	10
	10 (16)	30 (48)	20 (32)		30	10	20
	20 (32)	30 (48)	10		30	20	10
	20 (32)	40 (64)	20		40	20	20
	30 (48)	40 (64)	10		40	30	10
	40 (64)	50 (80)	10		50	40	10
	40 (64)	60 (97)	20		60	40	20
	50 (80)	60 (97)	10		60	50	10
	60 (97)	70 (113)	10		70	60	10

() km/h

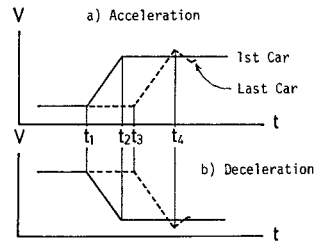


Fig. 1 Conceptual Sketch of the Time of Speed Change.

を定義した。

なお、以下の章および図中で用いる「加速」(Acc.) または「減速」(Dec.) なる用語は、それぞれ“加速を伴う走行パターン”、“減速を伴う走行パターン”を意味しているため、各車両が実際に加速（あるいは減速）を行っている状態を意味しているものではない。

先行車両の速度変化によって生じた乱れの車群内での伝播時間を精度よく計測することは必ずしも容易ではない。ここでは、速度変化の伝播時間として、追従車両が先頭車両による速度変化を認めてこの変化に反応するまでの時間と定義した。このような伝播時間の定義は、実流でしばしば出現する小さな速度変化の伝播時間を計測するには必ずしも適切ではないかもしれない。しかし、本論文で対象としたような大きな速度変化だけを考えた場合には、上述のような定義によって伝播時間を計測しても実用上問題は無いといえる。

3. 速度変化の車群内の伝播時間

先頭車両の起こした速度変化の伝播時間は、道路および交通条件によって変化する。Herman らは、速度変化の車群内の伝播時間は、車群長と正の相関関係をもっているといっている⁴⁾。その上で、この伝播時間は、同一の車群長に対しても、加速時の方が減速時よりも大きくなるといっている。この報文⁴⁾で用いられた伝播時間は、本論文で定義したと同様、先頭車両の速度変化の時間から、後続車両の速度変化が現われるまでの時間としている。

速度変化の伝播時間が車群長、言い換えれば密度や速度によってどのように変化するか知ることは、時間とともに変化する巨視的な交通流状態と関連させて追従車両の挙動を把握するうえで重要である。なぜならば、密度-速度 (K-V) 相関は、単一のモデル式で表現できない⁷⁾ のであるから、実際の道路上の交通流状態下での追従挙動を表現するためには、以下に示す速度変化の伝播時間を車群長との関係において知ることも、また一つの重要な事柄となる。

Fig. 2 と Fig. 3 とは、「加速」の伝播時間と時刻 t_1 での車群長との関係を車種別に示したものである。これら

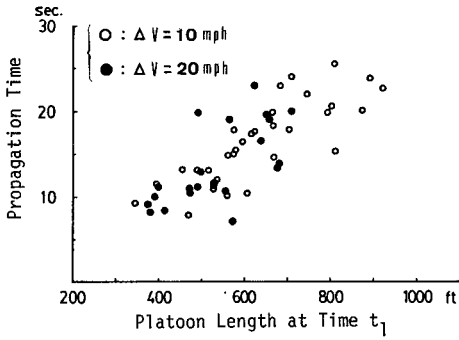


Fig. 2 Platoon Length-Propagation Time (Standard Car, Acceleration).

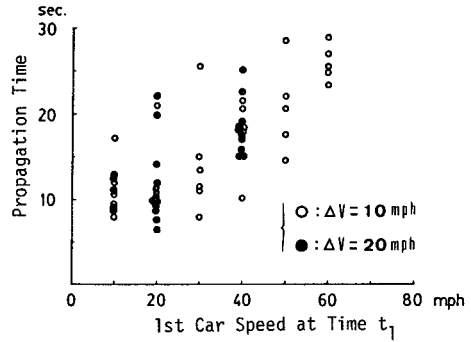


Fig. 5 Speed-Propagation Time (Small Car, Acceleration).

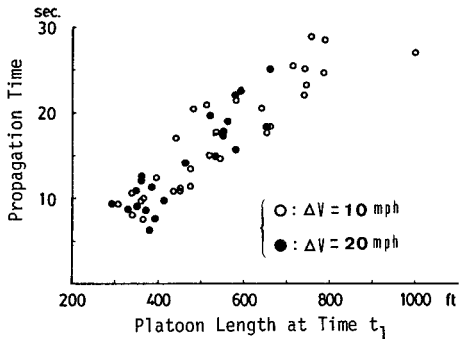


Fig. 3 Platoon Length-Propagation Time (Small Car, Acceleration).

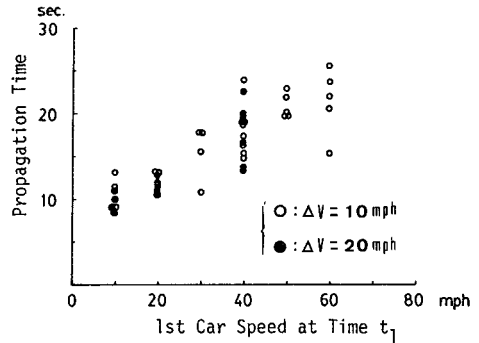


Fig. 6 Speed-Propagation Time (Standard Car, Acceleration).

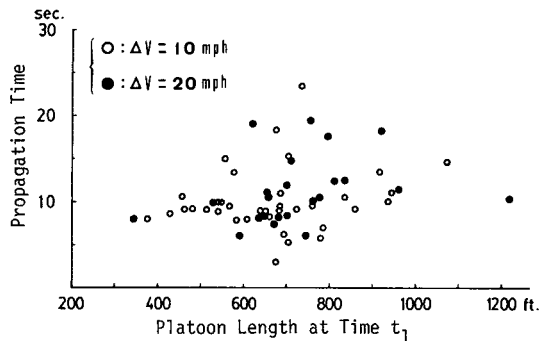


Fig. 4 Platoon Length-Propagation Time (Small Car, Deceleration).

の図によれば、「加速」での速度変化の伝播時間は、車群長と正の相関関係をもっていることがわかる。車種による伝播時間の差異については、小型車の方が、同一車群長であっても、やや大きくなる傾向が認められる。

Fig. 4 は、「減速」での場合について伝播時間と t_1 での車群長との関係を小型車について示したものである。大型車の場合については、車群長が全体としてやや大き

くなる傾向は認められるものの、伝播時間については Fig. 4 と同様なデータの散布状態を示している。

「減速」での伝播時間は、ここに示されているように、「加速」の場合とはやや異なっており、車群長との間にはほとんど相関関係を認められない。

Fig. 2 から Fig. 4 までに示したように、速度変化の量 (10 mph と 20 mph) の差によって伝播時間に差があるとは認められそうにない。なお、Fig. 2 と 3 の速度差が 20 mph (●印) のデータの多くが、比較的短い車群長の方に片寄っているのは、「加速」の場合の 20 mph の速度差のパタンの最大速度が 40 mph と他のパタンよりも低くなっているために、結果として車群長が短い部分にしか出現しなかったものと考えられる。

Fig. 5 と Fig. 6 とは、「加速」の場合の伝播時間と先頭車両の t_1 での速度との関係を示したものである。これらの図でも明らかなように、「加速」の場合の伝播時間は、車群長との関係同様、正の相関関係をもっていることがわかる。Fig. 7 は、「減速」の場合の伝播時間を t_1 での先頭車の速度との関係について、小型車の例を示したものである。これらの図においても速度変化量の差の伝播時間への影響はほとんど認められそうにない。

Fig. 2 から Fig. 7 までに示したように、先頭車両の速

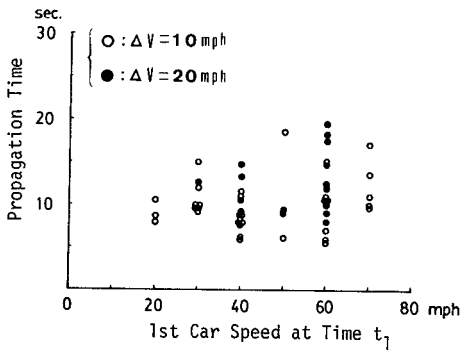


Fig. 7 Speed-Propagation Time (Small Car, Deceleration).

度変化の車群内の伝播時間は、「加速」と「減速」とではやや異なっている。「加速」での伝播時間は、先頭車両の速度（あるいは車群長）が大きくなるほど大きくなる。これに対し、「減速」の場合の伝播時間には、そのような性質を示す特徴は認められそうにない。

「減速」の場合の伝播時間については、Hermanら⁴⁾の結果とやや異なっており、車群長および先頭車の速度とともに、明らかな相関関係が認められなかった。

4. 速度と平均追従車頭距離との関係

追従車両の走行挙動を知るうえで、速度と追従車頭距離との関係を明らかにすることは、一つの重要な要件である。

Newell⁵⁾、桑田⁶⁾および越ら⁷⁾は、実測や実験から得たデータを解析し、考察を加えている。それによれば、両者の間には、同一の速度でも加速をしているときの方が、減速をしているときよりも長い追従車頭距離をとる性質があるといっている。

本章で示す図および記述する内容は、上述した在来の研究が、相連続する2台の車両の関係についての場合を対象にしているのとは異なり、先頭車両と10番目車両との関係であることに留意して欲しい。ことに時刻 t_4 での車両は、後出の Fig. 9 から明らかなように、不安定な追従状態にあることが知られる。この時点での追従車両の速度は、「加速」の場合には、先頭車両の速度よりも高くなっている。同時に、車頭距離は縮少しつつあり、追従車両は、「加速」の場合には、追突を回避するために減速を行う

必要性に直面している。一方、「減速」の場合には追突というような危険はないが、先頭車両よりは低い速度となっており、かつ車頭距離は伸びつつあることもあって加速を行うのである。このような追従車両の挙動は、交通流を巨視的にとらえた場合には、減速波（あるいは加速波）の出現として把握できる。それゆえ、この時点での追従車両の速度と平均追従車頭距離との関係を知ることが、加（減）速波の性質を知るうえで重要である。ここでは、2. に述べたようなデータ採取方法からくる制約もあり、平均追従車頭距離と最後尾車両の速度との関係を表示したが、先頭車両と2台目、3台目、……車両との関係において上記状態量を表現する方が望ましいことはいうまでもない。なぜなら、追従走行中の車群で発生した乱れが後続各車両によって増幅されて後方に伝播してゆく過程を把握できるならば、渋滞流中の粗密波の発生と伝播の機構を説明するうえで有用な情報を与えると考えられるからである。

Fig. 8 は、Fig. 1 に示した4つの時刻 ($t_1 \sim t_4$) での最後尾車の速度と平均追従車頭距離（車群長/9）との関

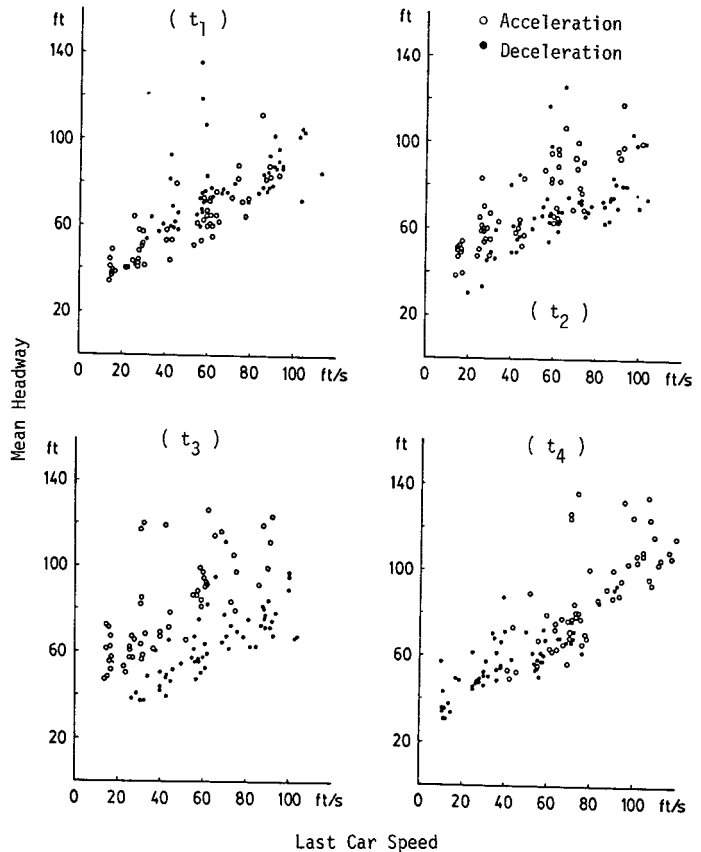


Fig. 8 Relationships Between Speed and Mean Headway at Time t_1 , t_2 , t_3 and t_4 .

係を、小型車の場合について示したものである。○印は「加速」を、●印は「減速」をそれぞれ表わしている。各時刻 ($t_1 \sim t_4$) での速度と平均追従車頭距離との関係は、ほぼ在来の結果と同様、速度が大きくなるほど、平均追従車頭距離がばらつく傾向を示している。

これらの図では、 t_3 を除いて、「加速」と「減速」とを明瞭に区別できそうにない。 t_3 では、同一の速度でも「加速」の方が「減速」よりも大きな追従車頭距離をとる傾向のあることがわかる。このような一般的傾向は、大型車の場合についても同様に認められている。

在来の研究^{6),7)}では、追従車両の加速度の大きさによってデータを分類している。その結果から、追従車頭距離は、加速時の方が減速時のものより大きくなるという。しかし、このような分類方法では、追従車両が加速あるいは減速していたという事実を判断することはできても、追従車両がどのような走行環境下で加減速していたのかという、先行車両との相対的な関係を、知ることはできそうにない。

Fig. 8 に示した結果は、この点を補完し得るものである。加速時と減速時とで追従車頭距離に差異が現われるのは時刻 t_3 、すなわち、先頭車両がすでに加(減)速を行っている(あるいは終了している)時刻で、かつ追従車両がまだ速度変化を感知していないか、あるいは変速を開始していない時刻であることが明瞭になった。

t_1 では、先頭車両もまだ変速を開始していないこともあって、「加速」、「減速」ともにはほぼすべての速度領域にわたって両者のデータが混在しており、この時点での追従挙動を、「加速」と「減速」とに区別できそうにない。時刻 t_4 では、先頭車両、最後尾車両ともに変速を終了している。しかしながら、Fig. 8 の t_4 での最後尾車両の速度は、Fig. 9 に示されているように、指示された最終速度よりも「加速」では大きく、「減速」では小さくなり、その結果他の時刻 (t_1, t_2, t_3) での速度分布に比べより広い速度領域に分布する傾向が認められる。時刻 t_2 では、先頭車両はすでに変速を行っているが、最後尾車はまだ変速を開始していない。このため、図でもわかるように、平均追従車頭距離は、同一の速度に対しても「加速」と「減速」とではやや差異が認められるが、 t_3 ほどには明瞭になっていない。このような多少の差異の存在についても、ここに示したデータが先頭車両と最後尾車両との関係であることに留意すべきであろう。すなわち、相連続した2台の車両の関係では、 t_2 の時刻には追従車もまた変速を開始している(本実験の場合、 $t_2 - t_1$ は最低でも4~5秒を要しているから)とみなせるから、「加速」と「減速」との平均追従車頭距離は、ここに示されている差よりも小さなものとなり、その関係はほぼ t_1 あるいは t_4 の時刻のものと同様になること

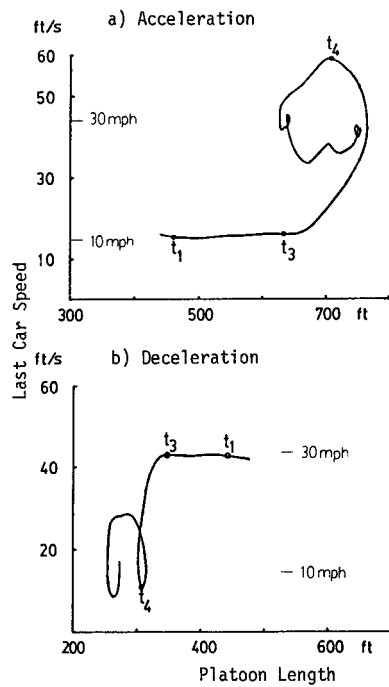


Fig. 9 A Typical Trajectory of A Last Car on the Platoon Length-Speed Plane.

が推測できるのである。

いずれの時刻の場合についても、最後尾車両の速度と平均追従車頭距離との関係は、連続的であり、わが国の都市内高速道路上の実流での実験や実測の結果⁷⁾でみられたような不連続な部分や食い違いは存在しておらず、参考文献9)で示されている試験走路での追従実験結果とほぼ同様な傾向にあることがわかる。ただ、2.で述べたように、本実験が直線と周回路の2つの異なった線形をもつ試験走路で行われたものであるのに対し、わが国での実験⁹⁾は周回路だけで行われているので、ここに示された結果を直接文献9)の結果と比較することはできそうにない。

直線路と周回路での追従実験における運転者の挙動の差違を目的とした解析は、現在までのところほとんど見当たらない。本報文でもそのような目的の解析は行っていない。しかし、定性的には、直線路での追従車両の運転者がたかだか2~3台前までの車両の挙動しか視野内にとらえられないときの追従挙動と、より多くの先行車両を視野内に把握できると思われる周回路の曲線部での追従挙動との間には、差違があると考えることにはそう無理がないであろう。

5. 速度変化を受けた追従車両の走行挙動の時間的推移

4. までは、追従車両の走行挙動について、主として静的な特性について述べてきた。実験の走行挙動では、追従車両の速度と追従車頭距離は時々刻々変化しており、速度変化を感知した時点と挙動終了の時点とは異なった速度や追従車頭距離をとっているはずである。このような追従挙動の時間的な変化の様子は、Fig. 8 に示されているような静的な関係からだけでは知られそうにない。

Fig. 9 は、実験から得られた1台の小型車の走行挙動（「加速」：10 mile/h (16 km/h)→30 mile/h (48 km/h)、「減速」：30 mile/h→10 mile/h)の時間的推移を速度-車群長平面上に表わしたものである。図中に示した t_1 、 t_3 および t_4 は、それぞれ Fig. 1 で定めた時刻に対応している。

追従車両の速度と追従車頭距離（車群長は、個々の車両の追従車頭距離の累積値とみなせるので、以下追従車頭距離と呼称する）の時間的推移は、「加速」、「減速」とともに反時計回りの軌跡を描いている。このような軌跡の特徴は、いずれの車種、実験パターンについても同様である。 t_4 での追従車両の速度は、先頭車両の速度に比べて、「加速」では大きく、「減速」では小さくなっており、追従車両の速度変化に対する過剰な速度応答 (Overshooting) 現象が認められる。このような過剰な速度応答は、指定速度によって変化しており、低速度の場合の振幅は小さく、高速度になるほど大きくなる傾向がある。

Fig. 9 でみられる追従車両の過剰な速度応答現象は、わが国で行った29台の乗用車を用いた追従実験の結果¹⁰⁾から考えて、先頭車両から数えた追従車両の位置に依存していることが推測できる。ただ、「加速」の場合の速度増幅を考えた場合、たとえ非常に大きな追従車群内の後方の車両であっても、その車両の速度振幅が限りなく大きくなるとは考えられない。それは、実際の道路上での渋滞した交通流で生ずる粗密波現象では、速度変動に上限値が存在している⁷⁾ことから考えられることである。なぜ速度変動にこのような上限値が存在するかについては、渋滞時の交通流に対しては、追従挙動特性を用いて一つの仮説を導き出している¹¹⁾が、まだ定量化するまでに至っていない。

Fig. 10 は、すべての実験パターン (Table 1) の結果のうち小型車について、 t_1 、 t_3 および t_4 の各時刻の速度と車群長のパターン別の平均値を、a) 「加速」、b) 「減速」別に示したものである。図では、追従車両のパターンごとの平均的な追従挙動が、矢印を付したような軌跡をたどって指示された速度に到達していったことを表わして

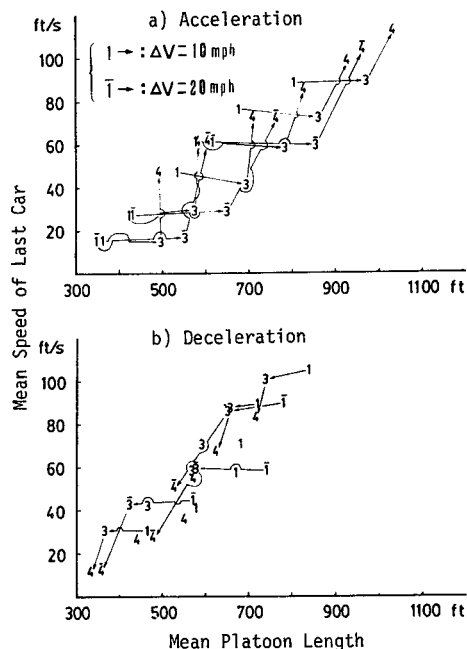


Fig. 10 Mean Platoon Length-Mean Speed of Last Car of Each Speed Pattern.

いる。図中の数値、1は t_1 、3は t_3 、および4は t_4 の時刻であることをそれぞれ示し、上部に (一) を付したものは速度の変化量が 20 mile/h (32 km/h)、それ以外は 10 mile/h (16 km/h) であったことを意味している。

これによれば、 t_1 → t_3 間では速度はほとんど変化しておらず、ただ追従車頭距離だけが伸び（あるいは縮んで）しているだけである。しかし、 t_3 → t_4 間では、追従車両の変速に伴って速度が急激に変化している。また、追従車両の速度と追従車頭距離との関係は、Fig. 8と同様、 t_1 と t_4 とはほぼ同一の傾向線上にあることが知られる。

6. 結 び

本論文は、米国 G. M の試験走路での追従実験結果を利用して、大きな速度変化を受けた追従車両の走行挙動特性を記述したものである。結果を要約すると以下のようになる。

(1) 先頭車両の加速時の速度変化の車群内の伝播時間は、先頭車両の初速度および車群長と正の相関関係をもっていることが明らかになった。しかし、減速時の伝播時間は、加速時の場合とはやや異なっており、速度、車群長とほとんど相関関係が認められなかった。

(2) 速度変化の伝播時間は、速度変化量の差 (10 mph, 20 mph) によって差違があるとはいえそうになく、車群長および速度に依存していると考えてよさそうである。

(3) 加速時の伝播速度の大きさと車群長（あるいは速度）との関係は、車種によってやや差違が認められ、同一の車群長（あるいは速度）でも Small Car の方が Standard Car よりも伝播時間がやや大きくなる傾向が認められる。

(4) 追従車両の速度と平均追従車頭距離との関係は過去の事例と同様、連続的な関係で表わされることがわかった。同一の速度でも、「加速」と「減速」とで平均追従車頭距離に差が生じるのは、先頭車両が変速をしつつあるか、あるいは変速を終了しているかの場合で、かつ追従車両がまだ速度変化を感知していない時刻 (t_3) であることがわかった。他の時点 (t_1 , t_2 および t_4) での両者の関係は、「加(減)速」によって区別することが難しいといえる。

(5) 追従車両の速度-追従車頭距離平面上での走行挙動は「加速」、「減速」ともに反時計回りの軌跡を描くことが判明した。

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団東京第一管理局八王子支局：中央自動車道(上り)小仏トンネル自然渋滞に関する実態調査報告, 1981-3.
- 2) 村重至康：高速道路隘路部における車両走行挙動に関す

- る研究, 東京大学工学部卒業論文, 1983-3.
- 3) Herman, R., Lam, T.N. and Rothery, R. : An Experiment on Car Size Effects in Traffic, Traffic Engineering and Control, pp.90~99, 1973-6.
- 4) Herman, R. and Rothery, R. : Propagation of Disturbances in Vehicular Platoons, Proc. 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow, pp.14~25, 1965.
- 5) Newell, G.F. : Theories of Instabilities in Dense Highway Traffic, Jour. of Operations Research Society of Japan, Vol.5, pp.9~54, 1963.
- 6) 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, 1976-3.
- 7) 越・岩崎・大蔵・西宮：渋滞時の交通現場に関する研究, 土木学会論文報告集, No.306, pp.59~70, 1981-2.
- 8) 岩崎征人・越 正毅：試験走路における車両の追従挙動, 第36回土木学会年次学術講演会概要集, IV-80, 1981-9.
- 9) 岩崎・越・大蔵：試験走路における車両の追従挙動特性, 土木学会論文報告集, No.336, pp.193~198, 1983-8.
- 10) 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, pp.111~124, 1981-9.
- 11) 岩崎・越・大蔵：粗密波の生成と伝播の機構に関する説明論理, 第14回日本道路会議論文集, pp.649~650, 1981-9.

(1984.6.13・受付)