

## ドライビング・シミュレータを用いた追従挙動特性の研究 Analyses of Car-following Behavior with Driving Simulator

金子哲也\*, 大口敬\*\*, 飯田克弘\*\*\*, 渡邊亨\*\*\*\*

Tetsuya Kaneko, Takashi Oguchi, Katsushiro Iida, Tohru Watanabe

### 1. はじめに

高速道路単路部では縦断曲線のサグ部やトンネルの入口部が交通容量上のボトルネックとなり、ここを先頭として交通渋滞が発生することが知られている<sup>1)</sup>。こうした現象は個々の運転者の追従挙動特性に起因しているということが検証されてきた<sup>1)~5)</sup>。高速道路サグ部などでは、交通需要が多い場合に追越車線上に平均車頭時間が短い車両が連続して到着し「車群」が形成される。こうした状況下では、わずかな交通流の乱れを発端として、車群の中を減速波が上流へ向けて増幅して伝播することがあり、この現象が交通渋滞の発生原因になる。

これまで実交通流において観測・調査された追従挙動現象の例はそれほど多くなく、ボトルネック現象が実際に発生状況とは異なる状況で収集されたデータも多い。良く知られているように人間は、環境や交通の状況に応じて或いは個人的な特性や気分などの違いに応じて、様々な挙動特性を取り得るものである。従って追従挙動を検証するためには、対象としている現象或いはそれに非常に近い状況を狙って、丹念に大量のデータ収集を積上げることが重要である。本研究では、まずサグ部を対象にドライビング・シミュレータ上で実際の交通流に近い状態を再現する。この状況下で複数の被験者による追従走行実験を実施し、得られたデータに対して基礎的解析を行った結果をまとめるものである。

### 2. 追従挙動の測定方法

実際のサグ部において渋滞発生直前の交通流状況における追従挙動データを得るには、上手くタイミングを狙って走行試験車両を用いた追従走行実験を行うか、上空からVTR撮影を行ってこの映像の画像解析により車両の挙動軌跡を計測する方法がある。こうした現場でのデータを蓄積するためには、多くの労力と時間が必要であると共に、さまざまな運転者属性や車両性能などの要因が複雑に影響し合っているため、渋滞が発生する度にこうした条件の異なるデータしか収集することができない。一方近年の急速な技術の進展により、ドライビング・シミュレータによる現実に近い状況の再現性能が飛躍的に向上し、走行挙動の評価に使える可能性が出てきた。

表-1に上述の追従挙動測定手法の長所短所を整理して示す。ドライビング・シミュレータによる実験では、実走実験や上空観測と比較して実現象の再現性など実験の精度に疑問が残るが、道路条件や交通条件を制御することができ、同一の環境下で何度も繰り返し実験を行えることが大きな長所である。

表-1 追従挙動測定方法の特徴

	データ量	観測の容易さ	データの分布	実験の精度	条件の制御
実験車両	△	○	△	◎	△
上空観測	◎	△	◎	○	○
シミュレータ	○	◎	○	△	◎

実験に用いたドライビング・シミュレータは3次元仮想空間上に高速道路を構築し、被験者に擬似的な走行体験をさせるものであり、実際の車両による走行実験と比較して被験者が感じる速度感はやや不足するものの、速度推移及びアクセル使用量の推移が走行実験と同様の傾向を示すことが報告されており<sup>6)~7)</sup>、一定の再現性能が評価されている。

図-1にこのドライビング・シミュレータのシステム構成を示す。これまででは、本システムは周辺走行車両の存在しない単独の走行環境を再現した実験に

キーワード：交通流, 交通容量

\* 学生員 東京都立大学大学院工学研究科  
〒192-0397 八王子市南大沢 1-1, TEL:0426-77-1111 (内線 4546)  
\*\* 正会員 博士(工学) 東京都立大学大学院工学研究科 助教授  
\*\*\* 正会員 博士(工学) 大阪大学大学院工学研究科 講師  
\*\*\*\* 正会員 M.Sc. 日本道路公団試験研究所交通環境研究部 室長

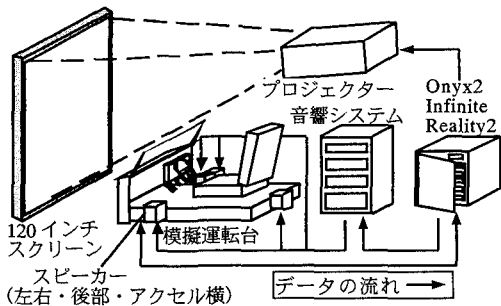


図-1 実験システム構成図

用いられている。本システムでは、周辺走行車両に対し、初期配置(位置, 台数), 走行パターン(速度, 車線, 車間距離, 追越ルールなど), 車種の設定が可能となっている<sup>9)</sup>。本研究ではこの機能を改良し、ドライビング・シミュレータとしての性能を維持したまま周辺走行車両を多数同時に描画し、これらの車両を追従ロジックで制御することで、被験者と周辺走行車両との関係を制御した擬似的な追従走行実験を行う。特にこの実験ではシミュレータの特性を活用し、自分の走行記録を前方車両としてこれに追従走行させるという点が最大の特徴である。実験から得られる複数の被験者の複数回の追従走行記録を収集・分析することで、実現象における運転者属性などの複雑に影響し合う状況を排除した、純粋に同一の追従挙動特性を持つ交通流現象を把握・解析することを目的としている。

### 3. 実験の概要

#### (1) 道路モデル

実験に用いた走行区間は中央自動車道上り方向、中野トンネルの手前区間：64.5kp から 60.7kp の約 5km である。サグの縦断曲線は 62.3kp から 61.5kp 間で-3.2%から+3.7%へ勾配変化している。なおこのサグでは実際に渋滞が頻繁に発生している。

この約 5km のうち最初の 2km 程度を、走行開始時の違和感から慣れるためのプレ走行区間として実際のデータ集計は行わないこととし、その後 62.5kp から 61.0kp の 1,500m 区間を分析対象とした。

#### (2) 追従積み重ね実験

まず被験者には、周辺走行車両の無い状態で、初

期速度 100km/h で対象区間の追越車線上を単独で 3 回走行してもらい、できるだけ自然な走行軌跡となっている 1 つを先頭車データとして採用する。

次に周辺走行車両を主に自車両位置より前方に適当に配置して追従ロジックで制御すると同時に、上述したデータにより先頭車をシミュレータで再現しながら、被験者にその後ろを追従して走行実験を行ってもらう。以降同様に、直前の自分の走行実験結果の走行軌跡で前方車両の挙動を再現し、その後を追従走行実験を積み重ねながら、前方へ配置される車両の数を 1 台ずつ増加させ、各被験者に 16 回の追従走行をしてもらう。走行開始の初期状態では、前方車両を始点(64.5kp)から 2 秒だけ走行後の位置に配置し、追従車両は走行開始点から 2 秒後の前方車両速度と同じ初期速度とした。つまり実験開始時点での相対速度はゼロである。

被験者はすべて学生で 10 名であり、被験者 1 名毎に 16 回計 160 回の追従走行データ、先頭車の単独走行を入れると 170 回分の走行軌跡データを収集した。なお被験者には、追従実験時の前方車両が直前の自分の走行軌跡であることは伝えておらず、実際このことに気がついた被験者は 1 名(被験者 5)だけであった。また被験者へのヒアリングからは、比較的良好な実現象の再現性を確認できた。

### 4. 実験結果

#### (1) 走行軌跡の解析

実験の着目区間における各被験者の 16 回の追従挙動について、図-2～図-4 に例として特徴的な 3 名の走行挙動を被験者別のタイムスペース図に示す。

図-2 の被験者 7 では車間距離(車頭時間)が短く 61.85kp 付近で急減速が発生しており、12～13 回目の追従で減速波が上流に増幅伝播して停止にまで至っている。図-3 の被験者 8 は車間距離に余裕があり、速度変動に対する反応強度も小さく減速波はほとんど発生していない。図-4 の被験者 9 は被験者 7 と同様に車間距離が短い、減速が起っても車間を詰めて上流伝播を未然に防ごうとするような挙動をする傾向があり、減速波は起っているが、明らかに下流に伝播していることがわかる。

全体として、車間距離に余裕があれば運転者は減

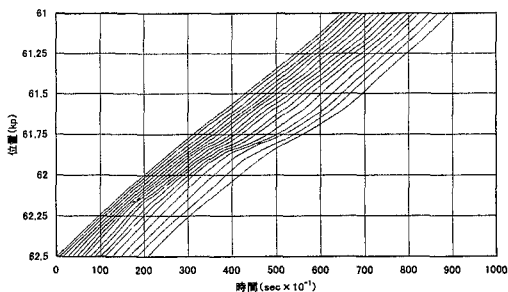


図-2 Time-Space 図 (被験者 7)

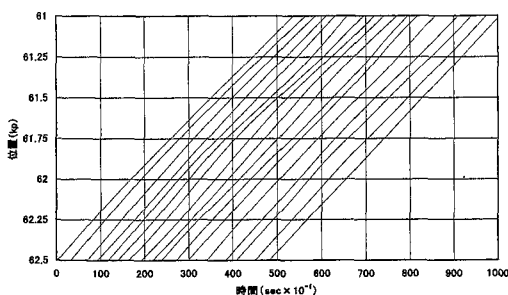


図-3 Time-Space 図 (被験者 8)

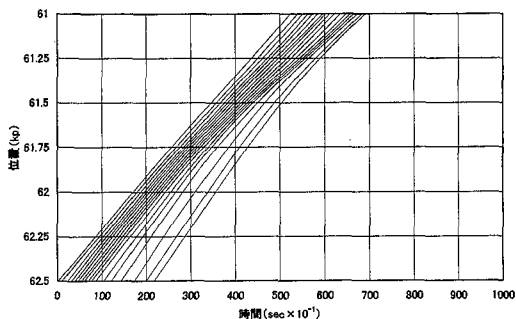


図-4 Time-Space 図 (被験者 9)

速波をうまく緩衝させてこれを吸収させてしまい、逆に車間距離に余裕が少ないと減速波の増幅が生じ易いという傾向があることが確認された。減速波の上流伝播が明確に生じたのは被験者 10 人中 1 人(図-2 の被験者 7 のみ)であり、図-4 のように減速波が下流へ波及するように見えるケース(7 人)が多い。急減速が生じて停止に近い速度低下が生じたのは、2 人(上流伝播 1 名(被験者 7)+下流伝播 1 名(被験者 10))であった。

## (2) 反応遅れ時間

既存の追従モデルの中で最も良く知られている Gazis, Herman らの提案モデル<sup>8)</sup>を次に示す。

$$\ddot{x}(t+T) = \alpha \frac{\{\dot{x}_i(t)\}^M}{\{x_i(t) - x(t)\}^L} (\dot{x}_i(t) - \dot{x}(t))$$

ここに、

$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$  : 時刻  $t$  の追従車両の位置、速度、加速度

$x_i(t), \dot{x}_i(t)$  : 時刻  $t$  における前方車両の位置、速度

$T$  : 反応遅れ時間を表すモデルパラメータ

$\alpha, M, L$  : モデルパラメータ

ここで  $M=L=0$  とすると、上記は線形微分方程式であり、ある遅れ時間を伴って追従車両の加速度は前方車両と追従車両の相対速度に比例する。

上記のモデル構造をふまえ、前方車両と追従車両の相対速度と追従車両の加速度との時系列変動の相互相関分析から運転者の反応遅れ時間(制御のむだ時間)を推定した。対象区間において、各追従走行毎に前方車両に対して追従車両の時系列データを +5 秒 ~ -2 秒まで 0.1 秒ずつずらして相互相関係数を算出し、各被験者毎に 16 回の追従走行における相関係数の平均を求め、これが最大となるずらし時間を「反応遅れ時間」として、その被験者の平均的な運転挙動特性を表す指標とした。推定された反応遅れ時間の値を表-2 に示す。表には各追従走行毎の相関係数の最大値と最大値となるずらし時間も参考のため示す。

表-2 より、被験者 8 を除いて平均相関係数の最大値は 0.7 を超えており、相対速度と追従車両の加速度には、ある遅れ時間を伴った相関があると言える。相関係数が高くない被験者 8 は、図-3 に示した走行軌跡からは車間距離を長めにとることが分かるが、前方車両との相対速度に対する相関係数が高くないことから、他の被験者より相対的に「ふまじめに」追従している、あるいはあまり追従状態であるとは言えない挙動ではないかと考えられる。

一方、減速波が明確に発生している被験者 7 は、推定反応遅れ時間が 0.8 秒であり、他者と比較しても明らかに短い値となっている。被験者 7 は、前方車両との車間距離を短く詰めて、前方車両の挙動に対してこまめに反応する特徴を持っており、このような特性で追従走行する場合に減速波が生じて増幅伝播し易いものと考えられる。

被験者 7 と 8 を除くその他の被験者の反応遅れ時間の推定値は 1.5 ~ 2.0 秒程度となり、これが平均的

表-2 反応遅れ時間の推定結果

被験者 番号	16回 平均	追従回数																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	相関	0.74	0.50	0.69	0.90	0.80	0.82	0.86	0.76	0.74	0.88	0.85	0.85	0.82	0.56	0.73	0.80	0.78
	遅れ	2.1	2.3	2.8	1.9	1.7	2.5	2.2	1.8	2.5	2.9	1.6	1.6	1.4	2.2	2.6	1.8	3.5
2	相関	0.81	0.76	0.80	0.90	0.91	0.86	0.96	0.72	0.80	0.82	0.95	0.79	0.82	0.74	0.80	0.72	0.86
	遅れ	2.1	4.3	2.4	2.1	2.1	2.3	1.9	1.7	2.7	2.5	1.7	2.5	1.2	2.0	1.9	2.7	2.3
3	相関	0.84	0.88	0.86	0.84	0.86	0.90	0.88	0.92	0.77	0.86	0.83	0.91	0.91	0.87	0.92	0.80	0.67
	遅れ	1.6	2.5	1.8	1.8	1.6	1.4	1.2	1.7	2.3	1.5	1.2	1.7	1.6	2.1	1.4	1.9	1.3
4	相関	0.81	0.82	0.88	0.81	0.90	0.87	0.81	0.87	0.83	0.85	0.89	0.90	0.86	0.79	0.79	0.74	0.59
	遅れ	1.5	3.1	1.9	1.8	1.5	1.1	1.3	1.5	1.6	1.6	1.7	1.2	1.3	2.1	1.4	1.3	1.9
5	相関	0.73	0.79	0.85	0.75	0.80	0.84	0.81	0.86	0.73	0.82	0.78	0.54	0.82	0.73	0.63	0.75	0.27
	遅れ	1.6	1.6	1.4	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.6	1.8	1.3	1.3	1.8	2.0	2.0	1.4	2.5
6	相関	0.71	0.40	0.86	0.74	0.61	0.82	0.78	0.81	0.83	0.80	0.67	0.74	0.67	0.76	0.76	0.80	0.79
	遅れ	1.8	5.0	2.7	0.7	1.4	1.7	1.2	1.9	1.5	1.3	1.3	1.7	1.9	1.4	3.0	1.8	3.8
7	相関	0.72	0.72	0.74	0.78	0.83	0.89	0.78	0.82	0.84	0.87	0.73	0.80	0.64	0.68	0.64	0.70	0.71
	遅れ	0.8	1.4	1.2	1.4	1.3	1.1	1.2	1.0	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.7	1.1	1.6
8	相関	0.55	0.32	0.59	0.73	0.13	0.82	0.79	0.87	0.76	0.86	0.59	0.25	0.92	0.69	0.45	0.41	0.34
	遅れ	3.3	2.1	2.5	2.6	5.0	5.0	3.8	2.9	2.3	3.4	5.0	2.3	3.8	2.7	4.4	2.4	4.3
9	相関	0.74	0.84	0.83	0.81	0.78	0.85	0.85	0.59	0.59	0.74	0.83	0.78	0.69	0.78	0.74	0.60	0.84
	遅れ	1.4	1.9	2.1	1.8	1.5	1.1	1.1	0.8	1.2	1.0	1.6	1.0	0.9	3.2	2.4	1.0	1.8
10	相関	0.78	0.77	0.81	0.86	0.80	0.89	0.67	0.76	0.85	0.78	0.82	0.81	0.86	0.85	0.86	0.82	0.61
	遅れ	1.7	2.5	2.1	2.0	1.6	1.7	2.1	1.9	2.0	1.2	1.5	2.2	1.8	1.6	1.4	1.1	1.0

なドライバーの反応遅れ時間であると考えられる。こうした一般的な傾向をもつ追従挙動においては、明確な減速波の上流増幅伝播は確認できなかった。従って本実験における一般的な挙動特性を持つ車両が、交通流中に一様に存在する場合には、単路部の自然渋滞は発生しない可能性も考えられる。

既存の研究によれば、追従挙動モデルの反応遅れ時間の推定結果は凡そ1秒程度、あるいは1~2秒程度とされており、本稿による1.5~2.0秒程度という一般的な推定値はこれとほぼ一致している。

### 5. まとめ

本研究では、ドライビング・シミュレータを用いて、追従挙動の実験を行うことができることを確認し、積み重ね追従実験による追従挙動のデータを収集した。追従挙動特性の基礎的な解析結果から次の事が分かった。

- ・個人により16回の追従走行の結果形成された交通流特性はかなり異なる
- ・車間距離を短めに取るドライバーは減速を強いられ、長めでは影響が生じにくい
- ・前方車両との相対速度と追従車両加速度の相互相関分析による反応遅れ時間を推定すると、個人差が定量的に現れ、遅れ時間が短いドライバー(被験者7)では、最も顕著にサグ部での減速波を上流へ増幅伝播が生じる特徴が見られる
- ・被験者7, 8を除いた他の被験者の場合は、本実験では明確な減速波の上流への増幅伝播は見ら

れず、推定された反応遅れ時間は1.5~2.0秒程度で、通常考えられているものとはほぼ同程度である。減速波の上流増幅伝播という不安定現象は、反応遅れ時間が短く、前方車両の挙動に正確に反応する場合に発生しやすいものと考えられる

以上の結果は、いずれも簡単な解析結果から示唆されたことであり、引き続き詳細な追従挙動特性の解析を進めると同時に、被験者のサンプルも増やし、今後は、これらの追従挙動特性を一般的に説明できるような追従挙動モデル構造の検討やパラメータ推定を行いたいと考えている。

### 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
- 2)大庭孝之，越正毅，赤羽弘和：追従挙動における反応遅れに関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，No.42IV，pp.58-59，1987
- 3)越正毅，安井一彦，小林弘一：高速道路サグにおける車両の走行挙動に関する研究，交通工学研究発表会論文報告集，No17，pp.81-84，1997
- 4)小谷益男，岩崎征人，児島正之，古市朋輝：高速道路のサグ部における運転者の認知特性に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集，No.21(2)，pp.913-916，1998
- 5)小谷益男，古市朋輝，児島正之，岩崎征人：サグ部における運転者の速度制御に関する基礎的考察，土木計画学研究・講演集，No.22，pp.971-974，1999
- 6)飯田克弘，森康男，金鍾爻，池田武司，三木隆志：パースペクティブシミュレーションによる室内実験の構築とその再現性検討—高速道路トンネル進入部への適用—，土木計画学研究・講演集，No.21(1)，pp.507-510，1998
- 7)飯田克弘，三木隆志，森康男，大口敬，松本晃一：実走実験とドライビングシミュレータを用いた室内実験によるサグ部の運転挙動分析，土木計画学研究・講演集，No.22(2)，pp.967-970，1999
- 8)Gazis,D.C., Herman,R. and Rothery,R.W. : Non-linear Follow-the Leader Models of Traffic Flow, *Oper.Res.*, Vol.9, pp.545-567, 1961