

ドライビングシミュレータの高速道路追従走行の再現性

Reproducibility of car-following behavior on expressways using driving simulator.

大口 敬*・津田 浩輝**・桑原 雅夫***・田中 伸治****

Takashi OGUCHI, Hiroki TSUDA, Masao KUWAHARA and Shinji TANAKA

1. はじめに

わが国の高速道路における交通渋滞原因となる単路部ボトルネック現象は、交通流内部における追従挙動特性に起因するものと考えられている¹⁾。しかし実交通流における追従挙動の計測は必ずしも容易ではなく、ドライビングシミュレータ (DS)^{2)~4)}を活用した室内実験に期待が寄せられている。本研究は、実交通流における実験車^{5)~7)}を用いた追従実験走行により得られたデータを用いて、DSによる追従室内実験手法の実現象再現性について検討する。

まず実験車により交通渋滞の多発する2つの高速道路(東名高速道路下り大和バス停付近、東海北陸自動車道上り郡上八幡IC付近)において、交通渋滞発生のきっかけとなる減速波の影響を受けるような交通渋滞発生直前の交通流状態を狙って実験走行を実施し、追従挙動を実測する。次に、DSシステム上に上記2つの道路空間を三次元CGとして再現し、KAKUMO³⁾機能を用いて実交通流における追従走行時に実測された前方車の時空間軌跡を生成し、その後ろをDSによる模擬追従走行し、追従走行特性の比較にもとづいて、DSによる追従走行再現性を検証する。

2. 実験方法

2.1. 実験車を用いた実交通流における試験走行

実験車には生産技術研究所保有のMAESTROを使用し、自車両の位置、速度、加速度および前方車との車間距離をGPS、ジャイロセンサ、レーザ車間距離計、画像処理などにより1/30秒単位で計測する。分析には、得られた計測値にカルマンスムージングアルゴリズムを適用して、計測誤差の調整、欠測値補間を行ったものを利用する^{5)~7)}。

実験車を用いた実験走行は、東名高速道路下り大和バス停付近(片側3車線区間)と東海北陸自動車道の上り郡上八幡IC付近(片側1車線区間)の2箇所で行った。図1、図2にそれぞれの道路区間の特徴を整理して示す。実験

走行は、渋滞予測情報に基づいて日時を設定し、2005年7月~2007年1月の期間に、東名高速については被験者9人で13日間にのべ29回、東海北陸については被験者5人で9日間にのべ39回の試験走行を行った。被験者には、普段の通常走行のつもりで走行してもらうが、交通渋滞発生直前の交通量が多く交通密度も高い状態であり、東名高速では追越車線を走行するものとし、基本的には前方車へ追従走行をしてもらった。天候・路面状態、計測機器トラブル、臨時的な特殊な交通流状態の走行(たとえば警察車両の並走)などの影響を排除し、また想定したほどの速度低下の影響を受けない場合を除くすると、東名高速では被験者7人の各1回ずつの走行(計7走行)、東海北陸では被験者3人で一人だけ2回の合計4走行の実験走行結果を得ることができ、これを分析対象とした。

2.2. DSを用いた室内実験

2.2.1. 三次元仮想道路空間の作成

図1の東名高速は中央分離帯構造の往復6車線、図2は分離帯構造の無い往復2車線の道路であり、図1、図2に

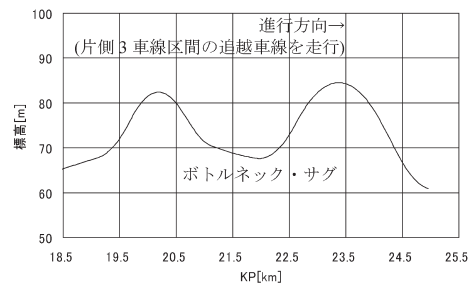


図1 東名高速・下り大和バス停付近の縦断線形図

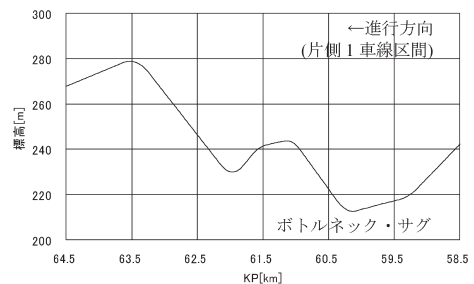


図2 東海北陸・上り郡上八幡IC付近の縦断線形図

*首都大学東京大学院都市環境科学研究科

**首都高速道路株式会社

***東京大学生産技術研究所 先進モビリティ連携研究センター

****東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

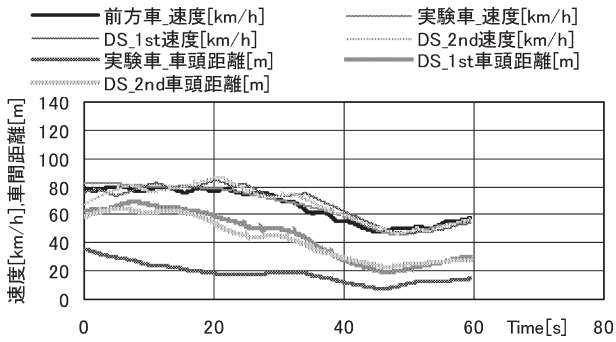


図3 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.1)

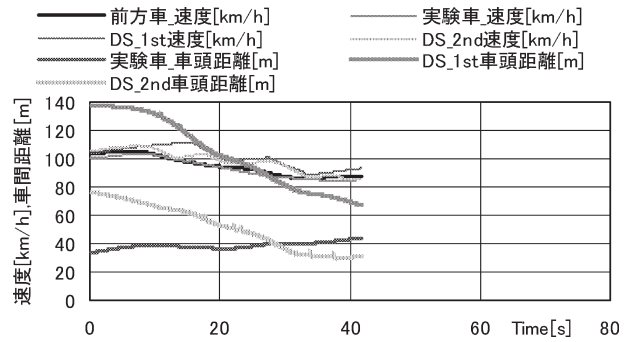


図4 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.2)

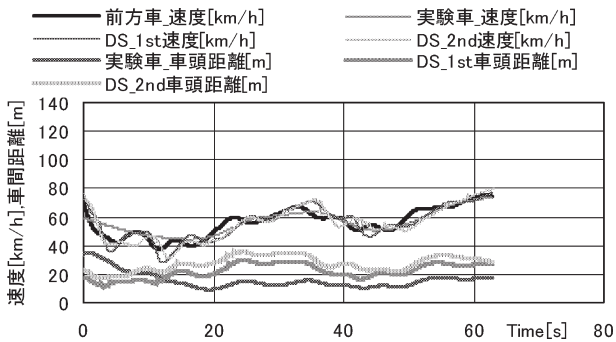


図5 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.3)

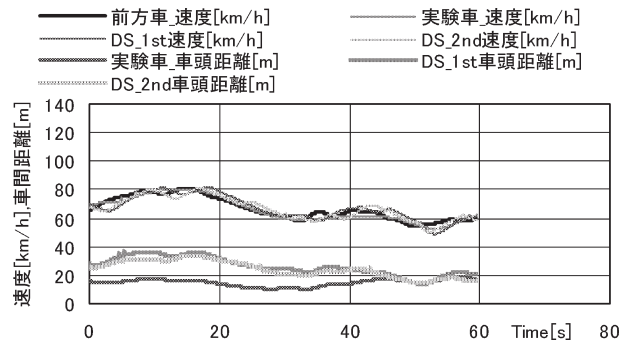


図6 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.4)

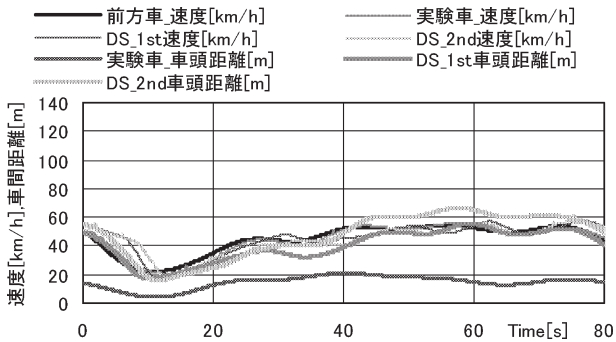


図7 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.5)

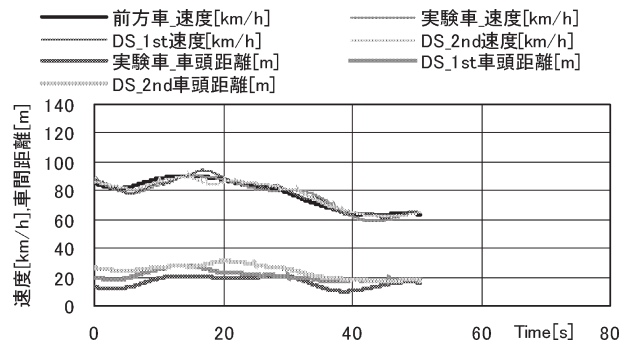


図8 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.6)

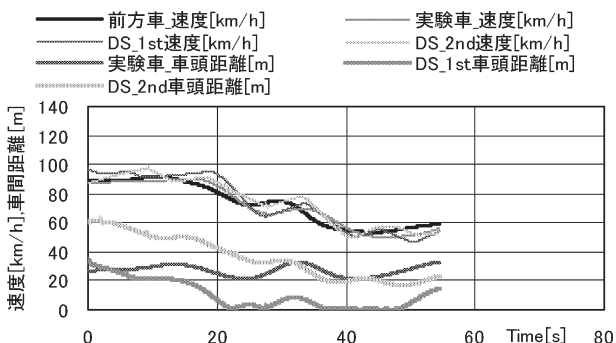


図9 速度・車頭距離変動図 (東名高速・被験者 No.7)

示す縦断線形、および平面線形情報に基づいて、道路設計図面作成用 CAD ソフトにより仮想的三次元道路幾何構造を作成する。これを三次元 CG 空間作成ソフトでポリゴン

構造のモデル化と適切なテクスチャの貼付を行い、DS 走行用の仮想道路空間とする。また走行路面の高さ情報も含めた道路面ポリゴン構造を DS の車両制御に用いることができるように加工する。さらに次節で述べる KAKUMO を用いて道路上を周辺車両が走行できるように、KAKUMO 用の道路ネットワーク構造も別途作成する必要がある。

2.2.2. 周辺交通条件の設定

DS と接続して車両を発生・走行させることのできるミクロ交通シミュレータ KAKUMO³⁾を用いて、前後左右の周辺空間に車両を走行させることにより、実交通流に近い周辺車密度、交通量状態を再現する。また、実験走行より得られた東名高速 7 走行、東海北陸 4 走行時の前方車の走行軌跡は、そのまま時系列で再現する。

研究 速 報

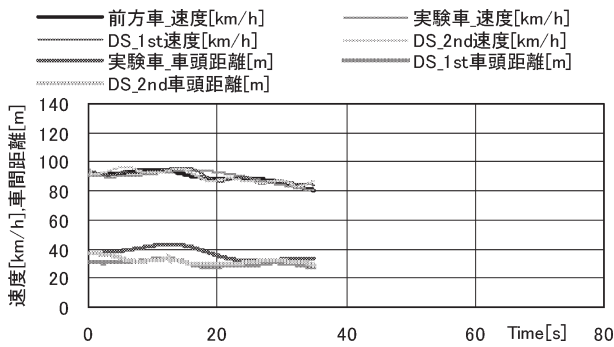


図 10 速度・車頭距離変動図 (東海北陸・被験者 No.2)

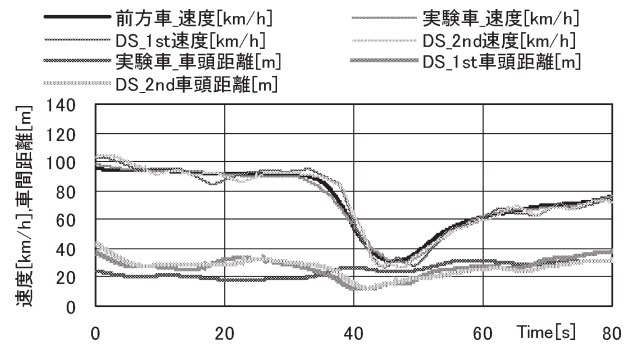


図 11 速度・車頭距離変動図 (東海北陸・被験者 No.3)

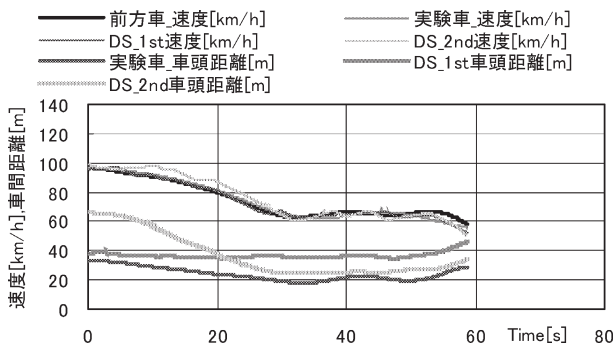


図 12 速度・車頭距離変動図 (東海北陸・被験者 No.8-1)

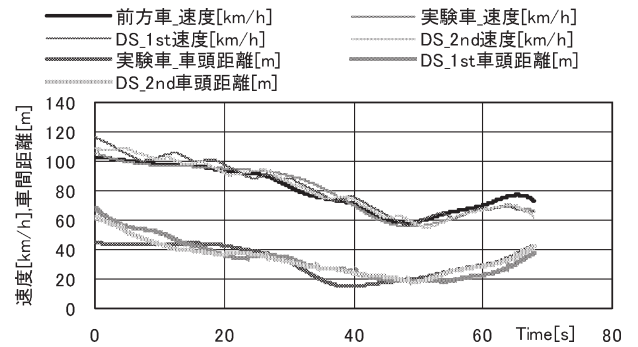


図 13 速度・車頭距離変動図 (東海北陸・被験者 No.8-2)

2.2.3. 室内実験の実施

実交通流における実験走行の被験者、東名高速 7 人、東海北陸 3 人 (うち 2 人が同一被験者) に、実験走行と同じ前方車条件の元で DS 室内実験の被験者になってもらう。ただし実交通流と同一条件であることを被験者に意識させないように、他の被験者の走行条件についても走行し、一被験者に対して、東名高速の DS 実験では 7 回を 2 セット、東海北陸では 4 回を 2 セットの DS 実験を行う。実験走行区間は、東名高速では 19kp ~ 24kp、東海北陸では 64.0kp ~ 59.0kp のそれぞれ約 5km 区間である。

室内実験は、いずれも高速道路上 (東名高速では追越車線上) に停止した状態で実験を開始する。最初に追従対象の前方車が自車両をすり抜けていくことを確認してから、その車両の後を追うように実験を開始する。また、前方車を追い越さないこと、車線変更をしないことを条件とする。ここで前方車は実験開始時に停止している自車両と 100km/h ほどの速度差が生じるため、追従走行状態となるまでに一定の距離を要することから、走行開始から最初の 2km 程度を予備走行区間として解析対象からは除外する。

3. 実験結果

東名高速については下りの対象サグ付近 21.7kp ~ 22.8kp (1,100m) の走行を抽出し、実交通流における実験走行と DS 室内実験を比較する。図 3 ~ 9 は、被験者 7 人 (7 回) の速度・車頭距離の時間変動について、実験走行、

DS 室内実験 1 回目と 2 回目を示したものである。東海北陸については上りの対象サグ付近 60.3kp ~ 59.0kp (1,300m) の走行を抽出し、実験走行と室内実験を比較する。図 10 ~ 13 は、被験者 3 人・4 回の速度・車頭距離の時間変動を示したものである。

これらの図より、東名高速の被験者 3, 4, 6, 東海北陸の被験者 2, 8-2 については、速度変動、車頭距離変動ともにその変動特性をよく再現できていることがわかる。一方、東名高速の被験者 1, 2, 5, 7, 東海北陸の被験者 3, 8-1 については、速度変動についてはほぼ再現できているが、車頭距離については変動特性は良く似ているものの絶対値がかなり異なるため少し再現性が悪い。全体に車頭距離は、実交通流の実験走行より DS 室内実験の方が長くなる傾向があり、DS 室内実験では、半数程度の被験者において、実交通流における実験走行よりも車頭距離の絶対値が少し大きくなる傾向があることが確認された。

4. 追従挙動特性の再現性評価

表 1 に、実交通流における実験走行と DS 室内実験における代表的指標の計算結果を示す。ここで平均車頭距離は、対象走行区間における 1/30 秒毎の車頭距離の平均値である。また反応遅れ時間は、前方車速度と自車速度との相互相関を 1/30 秒ごとに時間をずらしながら取って、相関係数が最大になるずらし時間として算定したものである。平均車頭時間は、対象区間走行中の車頭時間の平均値であり、

表 1 実交通流における実験走行と DS 室内実験の比較

被験者No	東名高速				実験走行	被験者No	東海北陸			
	平均車頭距離[m]	反応遅れ時間[s]	平均車頭時間[s]	交通流率[台/hr]			平均車頭距離[m]	反応遅れ時間[s]	平均車頭時間[s]	交通流率[台/hr]
1	18.1	1.3	0.93	3853	実験走行	2	37.1	5.0	1.48	2435
	45.4	4.8	2.30	1568	DS_1st					
	43.3	2.8	2.22	1624	DS_2nd					
2	38.8	2.1	1.50	2407	実験走行	3	30.2	3.3	1.20	2988
	103.6	5.0	3.65	985	DS_1st					
	51.9	2.2	1.86	1940	DS_2nd					
3	15.9	1.8	1.02	3536	実験走行	8-1	24.0	1.1	1.16	3092
	22.2	1.4	1.46	2464	DS_1st					
	27.5	1.6	1.82	1982	DS_2nd					
4	14.7	1.6	0.81	4471	実験走行	8-2	36.7	0.1	1.84	1953
	26.3	2.7	1.40	2575	DS_1st					
	24.4	2.0	1.29	2788	DS_2nd					
5	14.4	1.2	1.15	3129	実験走行	8-2	36.7	1.6	1.68	2142
	39.6	3.8	3.17	1135	DS_1st					
	46.5	4.6	3.64	988	DS_2nd					
6	16.6	2.5	0.77	4688	実験走行	8-2	32.0	2.1	1.41	2560
	20.9	2.0	0.96	3738	DS_1st					
	24.1	1.8	1.09	3295	DS_2nd					
7	27.1	3.1	1.40	2579	実験走行	8-2	33.5	1.7	1.42	2536
	10.3	3.3	0.44	8099	DS_1st					
	35.9	2.0	1.65	2182	DS_2nd					

交通流率はこの平均車頭時間の逆数として求められる。

表より、全体の傾向として図 3～13 の時間変動図の傾向として見られたことが、平均車頭距離、平均車頭時間、交通流率の各指標にも現れていることが確認できる。すなわち、全体に実験走行よりも DS 実験の方が平均車間距離は長く、平均車頭時間は長く、その結果交通流率は低くなる傾向がある。換算された交通流率でみると、DS 室内実験の方が実験走行の 1/3、1/4 となるような被験者も存在している。しかし一方で、両者にはほとんど差の無い被験者も存在する。また被験者 2、7 については、DS 実験の 1 回目と 2 回目でかなり異なる指標値が算出されている例もあるが、それ以外の事例では、1 回目と 2 回目ではほぼ同程度の値となり安定した結果が得られている。反応遅れ時間については、実験走行と DS 室内実験との相互に特に異なる傾向は見られない。東名高速・被験者 1、2、4、5 は、実験走行時に比べて DS 室内実験時の反応遅れ時間が大きくなっているが、東名高速・被験者 3、6 と東海北陸・被験者 2、8-2 では逆に DS 室内実験の方が小さくなっている。

片側 3 車線区間の追越車線で渋滞発生前の最大交通流率は 1 車線当たり 1,500～1,800[台/時]、片側 1 車線区間では 1,200[台/時] 程度であることが知られている。これは、片側 3 車線区間の交通渋滞発生直前の追越車線では、前後だけでなく隣接車線にも多数の車両が走行しており、割り込みを嫌って前方との間を詰めて走る傾向があるのに対し、片側 1 車線区間では、追越機会が無く単純に前方車に追従走行しているだけであるためと考えられる。したがって追従走行特性においても、東名高速より東海北陸の方が、相対的に車頭時間が長い(交通流率が低い)走行状態にあるものと考えられる。表 1 より、同一被験者 2、3 で 2 つの高速道路区間における走行挙動を比較すると、実験走行においては東海北陸の方が、相対的に車頭時間が長い(交通流率が低い)傾向が見られるが、DS 室内実験では必ずしもこうした傾向は見られない。また東名高速 7 回平均、東海北陸 4 回平均で比較した場合も傾向は見られない。し

たがって「車頭時間(交通流率)」の再現性を考えた場合、高速道路追従走行に関する DS 走行実験には、まだ改善の余地が残されているものと考えられる。

5. おわりに

DS による高速道路追従走行実験時の実現象再現性について、実験走行と DS 室内実験を行って実証分析を行った結果、速度変動にはかなり良い再現性が認められたが、車間距離については、変動特性はある程度再現されるが、走行実験より DS 室内実験の方が絶対値が全体に大きくなる傾向が見られた。また追従挙動特性を表す反応遅れ時間、平均車頭時間にも再現性に課題が見られた。これらは、追従走行という比較的近距离に視認・意識すべき物体が存在する状況下における DS 室内実験には、まだ改良の余地があることを意味するものと考えられる。

本研究は、先進モビリティ連携研究センター(ITS センター)および国際・産学共同研究センターの研究プロジェクト「サステイナブル ITS」の一環として行われたものである。試験走行の実施とデータ処理にあたっては、千葉工業大学赤羽弘和教授、同大学院博士課程小宮粹史君の協力を得た。また DS 実験用の 3 次元 CG 空間の作成にあたっては、国際・産学共同研究センター白石智良研究員(現・(株)アイ・トランスポート・ラボ)に協力頂いた。さらに DS 実験の実施にあたっては、第 3 部須田研究室の支援・協力を頂いた。関係各位に謝意を表す。

(2007 年 3 月 15 日受理)

参 考 文 献

- 1) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和: 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp.65-71, 1993.
- 2) K. IKEUCHI, M. KUWAHARA, Y. SUDA, et al.: Mixed reality traffic experiment space under interactive traffic environment for ITS research. World Congress on ITS, 2004 Proceedings.
- 3) T. SHIRAIISHI, H. HANABUSA, M. KUWAHARA, E. CHUNG, S. TANAKA, et al.: Development of a microscopic traffic simulation model for interactive traffic environment. World Congress on ITS, 2004 Proceedings.
- 4) Y. SUDA, M. ONUKI, T. HIRASAWA, H. ISHIKAWA, M. KANO, et al.: Development of driver model using driving simulator with interactive traffic environment. World Congress on ITS, 2004 Proceedings.
- 5) T. OGUCHI, H. AKAHANE, I. NISHIKAWA and M. KUWAHARA: Development of an experimental vehicle for evaluating highway traffic composed of automotives with and without adaptive cruise control systems. 30th FISITA 2004 World Automotive Congress, CD-ROM, 2004.
- 6) 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: GPS 測位に基づく自動車および周辺車両走行挙動観測システムの開発, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.24, pp.21-24, 2004.
- 7) 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: 時空間連続観測車両による周辺車両の走行挙動計測, 第 4 回 ITS シンポジウム 2005, pp.449-454, 2005.