

バーチャルリアリティシミュレーションによる室内実験システム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 —

Development of the Laboratory Test System using Virtual Reality Simulation : Reproducibility at the Entrance of Tunnel on Expressway

飯田 克弘*, 森 康男*, 金 鍾旻**, 池田 武司**, 三木 隆史**

By Katsuhiko IIDA, Yasuo MORI, Jongmin KIM, Takeshi IKEDA and Takashi MIKI

1. はじめに

現在高速道路における交通渋滞の発生箇所のうち、トンネルにおいては、交通集中による渋滞の発生回数が多いが、その原因についてはまだ明らかになっていないため、今後その原因の究明と対策が急務である。

一般的なトンネルでの渋滞発生の原因について、佐野らはトンネル内部の視環境や道路幅の縮小、坑口形状などが運転者に心理的な圧迫感を与え、運転者はトンネル坑口付近でアクセルを緩め、その結果速度低下を起こすと説明している¹⁾。また、越は走行車両の速度低下、いわゆる減速波が次々と後方の車両に伝播するために渋滞が発生するという仮説を提示し、ボトルネックとなるトンネルを隘路現象として紹介した²⁾。

これに対し現状では、渋滞を解消するために、車線を拡幅し交通容量を増加させる方策がとられているが、今後も増加が予想される交通量への対応や、第二東名・名神などの新規路線におけるトンネル建設に備えるためにも、運転者行動に影響を与える要因を抽出し、それらと運転者行動との関係を分析し、トンネル進入部での渋滞現象を解明する必要がある。

現時点での高速道路上における運転者の運転挙動を探る方法としては、実際に高速道路上で実験を行う実走実験と、CG動画やビデオ映像などを用いた室内実験が多く用いられているが、このうち、より正確に運転者行動が調査できるのは実走実験であることはいうまでもない。しかし、実走実験では収集するデータが当日の天候や周辺走行車両、道路線形などに影響を受けやすく、被験者の安全性についても考慮しなければならない点が多いことなどが問題点となっている。

このような問題点を克服するため、最近ではコンピュータの技術的發展に伴ってより現実に近いドライビングシミュレータが開発され、それを用いた室内実験が行われるようになってきている³⁾。本研究ではバーチャルリアリティ(Virtual Reality)技術を応用して、高速

道路の走行および実験が可能なドライビングシミュレータを開発した。

そして、開発したドライビングシミュレータの再現性の精度やそれから得られる運転者行動のデータの信頼性について検討を行う。また同時に、室内実験時の実験方法についても検討を行う。具体的には、まず実際の高速道路上での実走実験によって、トンネル進入部での運転者行動を調査する。そして、そのデータをベースとして、室内実験から得られるデータを統計的に比較する。また、室内実験の前に被験者に与える情報量による実験結果の差についても統計的に比較する。

2. 実走実験の概要⁴⁾

実走実験では、周辺走行車両の影響をできる限り少なくするように、交通量が少ない北陸自動車道の今庄IC～木之本ICにおける全10トンネル坑口付近の区間を実験対象として、運転者の注視点、速度、アクセル・ブレーキの使用量、心拍数、速度低下位置を測定した。

3. 室内実験システムおよび室内実験の概要

室内実験システムは、コンピュータの3次元仮想空間に実験対象の高速道路を構築し、被験者がその仮想空間を走行して人工現実感を体験するものであり、任意の速度や視点位置に対応できることやハンドル操作によって車線変更できることが特徴である。ただし、車線変更については、自由にハンドルを操作できるものでなく、車線に設定されたレール上をトレースし、ハ

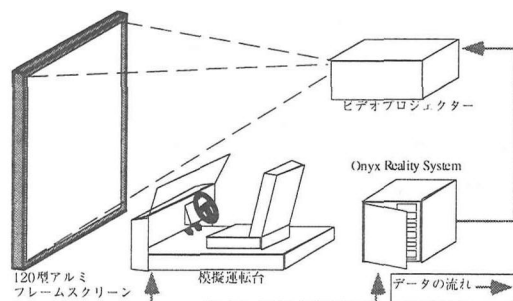


図-1 室内実験システムの構成図

キーワード：交通現象、運転者挙動、仮説検定、高速道路

* 正会員(工博) 大阪大学大学院工学研究科

** 学生会員 大阪大学大学院土木工学専攻

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 TEL06-879-7611)

ンドル切れ角が閾値をこえたタイミングで自動的に車線変更を行う仕様となっている。システムの装置は図-1のとおりである。模擬運転台からはアクセル・ブレーキの使用量やハンドルの切れ角などの操作情報をホストコンピュータに入力できるようになっている。

室内実験では、実走実験を行った北陸自動車道のうち、図-2に示す区間を3次元空間モデルとして構築した。トンネル進入部についての現状とCG映像の比較を図-3に示す。ここで、分析区間を区間1～4と定義しているが、それぞれは図-3の各トンネル手前500mから坑口までの区間を示す。

さらに、表-1に示すように、被験者を室内実験では実走実験の経験および事前に与える実走実験の映像情報により、3つのグループに分けて構成した。

データの収集は、アイマークレコーダから視点移動を、心拍計からは心拍数を、それぞれ1/30秒ごとに記録した。一方、シミュレータからは距離、速度、アクセル・ブレーキ使用量をフレーム(1/15秒以上)ごとに記録し、これらのデータをトンネル坑口手前500mから坑口までの区間での走行時間によって同期させた。図-4に、速度・アクセル使用量・心拍数の推移の例を示す。

4. 室内実験と実走実験で得られたデータの比較分析

(1)分析方法

分析では、再現性を検討するために、速度(km/h)、アクセル使用量(%), 心拍数(拍/分)、注視点のデータについて分析するとともに、トンネル進入部の交通環境評価の適用をねらいとして、以下のようなトンネル進入時の速度低下に関する運転者行動についても分析する。

- ・速度低下位置(m): 坑口に最も近い速度低下発生位置の坑口からの距離
- ・速度低下時のアクセル使用量低下割合(%): 低下前後のアクセル使用量の差/低下前のアクセル使用量
- ・速度低下時の心拍数増加割合(%): 増加前後の心拍数の差/増加前の心拍数
- ・速度低下時の注視対象物の注視率: 各項目を注視した被験者数のグループ全体の人数に対する割合

(a)シミュレータの実験区間の再現性

まず、速度、アクセル使用量、心拍数について、トンネル坑口手前500m区間内の各1m地点での値を使用し、区間1～4それぞれについて、被験者ごとに平均値を求め、実走実験と室内実験との比較を行った。具体的にはまず、 χ^2 検定で分布形状の適合度を検定した。検定は分布が正規分布、あるいは対数正規分布に従う

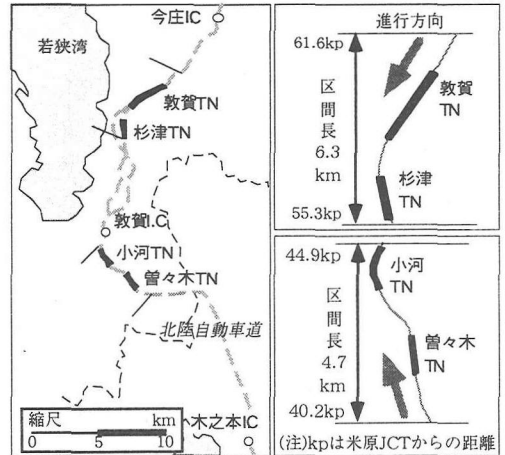


図-2 実験対象区間

区間No	使用TN	坑口形状(現状)	坑口形状(CG)
1	菅々木		
2	小河		
3	叡賀		
4	杉津		

図-3 分析対象区間と坑口形状

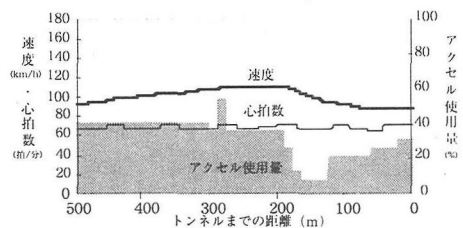


図-4 速度・アクセル使用量・心拍数の推移の例

表-1 グループ別被験者の属性

属性	グループ1	グループ2	グループ3
被験者数	19名	16名	15名
実走実験の経験	○	×	×
実験対象区間のビデオ映像の提示	○	○	×
室内実験に関する説明	○	○	○

ことを帰無仮説とし、データ区間の分割数5、有意水準5%または1%のもとで行った。次にF検定で等分散性を検定した。検定は実走実験と室内実験の結果の母分散が等しいことを帰無仮説とし、有意水準5%または1%のもとで行った。さらに、等分散性が成り立つものはt検定で、成り立たないものはウェルチ検定で母平均の差を検定した。検定は、実走実験と室内実験結果の母平均が等しいことを帰無仮説とし、有意水準5%または1%のもとで行った(表-2に母平均差の検定結果のみ示す)。

それと同時に、前述した各被験者の500m区間分のデータについて、1m地点ごとに平均値を求めた上で、実走実験と室内実験とのデータの推移について相関係数を求めた。さらに、求めた相関係数について母相関係数の信頼性を検定した。検定は実走実験と室内実験のデータの推移は母集団に相関関係がないことを帰無仮説とし、有意水準5%か1%のもので行った(表-3参照)。

さらに、注視点についても比較を行った。ここでは区間1~4のそれぞれについて、表-4に示す20の項目に定義された対象物に関する注視率(各項目を注視した時間の全体に対する割合)を求め、実走実験と室内実験との間で相関係数を求めた(表-5参照)。

(b)トンネル進入時の速度低下に関する運転者行動

ここでは速度低下位置、速度低下時のアクセル使用量低下割合、速度低下時の心拍数増加割合のデータを区間1~4それぞれについて、各被験者ごとに求めた上、実走実験と室内実験とで比較を行った。具体的には、分布形状の適合度検定、等分散性の検定、母平均の差の検定を前述の方法と同様に行った(表-6に母平均差の検定結果のみを示す)。また、速度低下位置における各注視対象物の注視率について、実走実験と室内実験とで相関係数を求めた。ただし、データが各被験者に1つずつと少ないため、対象物を表-4のように6の項目にまとめて分類し、分析を行っている(表-7参照)。

(2)実験結果の考察

(a)速度について

区間1、2では帰無仮説が棄却されず、有意差が認めない。しかし、区間3、4では有意差が認められ、室内実験結果が15.7~19.8(km/h)高かった(表-2参照)。また、速度推移に関する相関係数は高くなり、室内実験で実走実験と同様の速度推移の傾向を示すことが分かった(表-3参照)。以上のことは、実験終了後のアンケートでも指摘されたが、室内実験で被験者が感じる速度感がやや不足していることが原因と考えられる。一般的に運転者は運転に必要な情報の9割以上を視覚から収集するものの、聴覚、触覚によっても情報を収集するため、今後、より現実感ある道路周辺風景、速度に

表-2 500m区間の平均データの母平均差の検定

走行速度	区間1	区間2	区間3	区間4	実走-室内	区間1	区間2	区間3	区間4
実走	98.16	111.85	98.25	99.16	検計方法	検定	検定	検定	検定
	8.54	8.88	5.88	6.40	有意水準	1%	5%	1%	1%
室内	107.70	111.21	118.01	114.87	検定値	2.25	2.03	2.55	2.55
	16.70	14.58	15.97	19.12	検定統計量	-2.20	0.15	-5.06	-5.64

アクセル使用量	区間1	区間2	区間3	区間4	実走-室内	区間1	区間2	区間3	区間4
実走	32.13	22.35	46.43	27.08	検計方法	検定	検定	検定	検定
	7.20	7.32	8.78	5.55	有意水準	1%	1%	1%	1%
室内	36.66	38.03	40.42	40.32	検定値	2.35	2.73	2.34	2.72
	5.25	5.58	8.08	8.59	検定統計量	-2.14	-7.02	2.17	-5.64

心拍数	区間1	区間2	区間3	区間4	実走-室内	区間1	区間2	区間3	区間4
実走	78.48	77.34	80.10	80.91	検計方法	検定	検定	検定	検定
	15.59	15.44	12.12	12.19	有意水準	1%	1%	1%	1%
室内	67.03	64.34	64.38	64.12	検定値	2.72	2.55	2.72	2.55
	9.80	6.37	6.55	5.66	検定統計量	2.65	3.15	4.98	5.45

※上段は平均値、下段は標準偏差を示す ※帰無仮説が棄却されなかった検定には網掛け

表-3 500m区間の推移の相関係数

実走と室内との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
速度の推移	0.45*	0.87*	0.66*	0.88*
アクセル使用量の推移	0.59*	0.02*	0.22*	0.18*
心拍数の推移	0.41*	-0.46*	-0.18*	0.31*

注)帰無仮説が棄却された検定には網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-4 注視対象物

分類	注視対象物	分類	注視対象物	分類	注視対象物
視線誘導	右レーンマーク 中央レーンマーク 左レーンマーク 右ガードレール 左ガードレール	トンネル部	坑口右側 坑口上側 坑口左側 トンネル看板 トンネル暗部	周辺車両	左前方車両 左直横車両
路面部	前方路面(右車線) 前方路面(左車線)	暗部・路面境	換気塔	周辺風景	前方風景 右風景 左風景
		その他	運転台		

表-5 500m区間の注視対象別の相関係数

実走と室内との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
注視点	0.51*	0.62*	0.9*	0.76*
3要素を除いた注視点	0.92*	0.94*	0.93*	0.89*

注) 除いた3要素は左前方車両、右車線の前方路面、右レーンマークである
注)帰無仮説が棄却された検定には網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-6 速度低下時における平均差の検定

実走と室内との検定	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下位置	**	**	**	**
アクセル使用量低下割合	**	**	*	**
心拍数増加割合	**	**	*	**

注)帰無仮説が棄却されなかった検定には網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-7 速度低下時の注視対象物

実走と室内との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
注視点	0.22*	0.37*	0.83*	0.78*
周辺車両を除いた注視点	0.75*	0.41*		

注)帰無仮説が棄却された検定には網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

応じた音響機能の追加や、振動・ゆれを表現するべきであると考えられる。

(b)アクセル使用量について

区間1、3では有意差が認められないが、区間2、4では有意差が認められ、室内実験結果が13.2~15.7 (%)高かった(表-2参照)。またアクセル使用量推移に関する相関係数は区間1以外で低くなった(表-3参照)。このことは、本シミュレータが車の加速力に対する縦断勾配の影響を考慮していなかったことや、運転時の感覚などが原因と考えられる。

(c)心拍数について

まず、分析に当たっては、室内実験の被験者のうち心拍数の変動に異常値がみられる被験者がみられるため、分析では異常値を除いた被験者のみを分析対象とした。実走実験と室内実験(グループ1)との比較を行う

表-8 500m区間の平均データの母平均差の検定

G 1とG 2との検定	区間1	区間2	区間3	区間4
区間平均速度	**	**	*	*
区間平均77使用量	**	**	**	**
区間平均心拍数	**	*	*	*

(注)実走とグループ2との区間平均心拍数の検定

実走とG 2との検定	**	**	* <th>*</th>	*
------------	----	----	--------------	---

表-13 500m区間の平均データの母平均差の検定

G 2とG 3との検定	区間1	区間2	区間3	区間4
区間平均速度	**	**	*	*
区間平均77使用量	**	**	**	**
区間平均心拍数	**	**	*	*

(注)実走とグループ3との区間平均心拍数の検定

実走とG 3との検定	**	* <th>*<th>*</th></th>	* <th>*</th>	*
------------	----	------------------------	--------------	---

表-9 500m区間の推移の相関係数

G 1とG 2との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
速度の推移	0.76*	-0.56*	0.9*	-0.67*
77使用量の推移	0.57*	0.05*	0.07*	-0.03*
心拍数の推移	0.25*	0.01*	0.13*	0.23*

表-14 500m区間の推移の相関係数

G 2とG 3との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
速度の推移	0.5*	-0.14*	0.47*	0.94*
77使用量の推移	0.28*	-0.19*	0.69*	0.65*
心拍数の推移	0.20*	0.06*	-0.13*	0.76*

表-10 500m区間の対象別注視率の相関係数

G 1とG 2との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
注視点	0.96*	0.98*	0.94*	0.93*

表-15 500m区間の対象別注視率の相関係数

G 2とG 3との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
注視点	0.89*	0.95*	0.87*	0.85*

表-11 速度低下時における平均差の検定

G 1とG 2の検定	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下位置	**	**	**	**
77使用量低下割合	**	**	**	**
心拍数増加割合	**	**	**	**

表-16 速度低下時における平均差の検定

G 2とG 3の検定	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下位置	**	**	**	**
77使用量低下割合	**	**	**	**
心拍数増加割合	**	**	**	**

表-12 速度低下時の注視対象物

G 1とG 2との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
注視点	0.58*	0.94*	0.69*	0.94*

表-17 速度低下時の注視対象物

G 2とG 3との相関	区間1	区間2	区間3	区間4
相関係数	0.03*	0.96*	0.84*	0.45*

と、区間1を除いた区間で有意差が認められ、グループ1の方が11.5～16.8(拍/分)低かった。ここで、グループ1と2の比較を行うとグループ1の方が6.2～8.5(拍/分)低く、また、実走とグループ2、3を比較したところ、有意差は認められなかった(表-8,13参照)。つまり、グループ1のみ、心拍数の平均値が低い。これは1度被験者になった経験があり、実験に慣れていたのであると考えられる。このように運転者の生理反応データを扱う際には今後より綿密な検討が必要である。また、心拍数の推移については区間1、4で相関関係が認められた。(d)注視点について

区間3、4については高い相関が認められ、また左前方車両、前方路面、右レーンマークの3要素を除くと区間1、2にでも相関係数が高くなった(表-5参照)。今回のシステムではハンドル操作は車線変更時のみで必要とされるため、周辺走行車両や進む方向の目安となる右レーンマークの注視率に差が生じたと考えられる。

(d)トンネル進入時の速度低下に関する運転者行動

速度低下位置、速度低下時のアクセル使用量の低下割合、心拍数増加割合について、有意差が認められなかった。また、注視点については、区間3、4で高い相関が認められた。さらに、周辺走行車両を除いた場合、区間1、2についても相関係数が高くなった。しかし、サンプルの数が少ないため、母相関係数の検定では信頼性が認められなかった。

5. 実験前に与える情報による結果の差の検討

(1)分析方法

ここでは、グループ1とグループ2、またグループ2とグループ3の比較により、実験前に被験者に与える情報によって生じる実験結果の差を分析し、実験方法について考察する。比較項目、方法は4.(1)と同様である(表-8～表-17参照)。

(2)実験結果の考察

各グループ間で比較を行った結果、4.の検定と同様な帰無仮説は棄却されず、有意差が認められなかった。

6. おわりに

本研究では、室内実験と実走実験から得られる運転者行動の比較検討によって、速度、アクセル使用量、注視点、トンネル進入時の速度低下についてドライビングシミュレータの再現性がある程度確認することができた。今後得られるデータの信頼性を向上させるためには、室内実験システムにおいて、速度に応じた音響機能の追加や、振動・ゆれの表現を行う、任意の操舵を可能にする等の改良を加えるとともに、再現性が確認できなかった区間について、その原因を分析することが必要である。

また現在、各グループの等質性を確かめるとともに、実走実験の結果と各グループの結果について分析を進めており、これらの結果から室内実験の方法について検討することを今後の課題とする。

【謝辞】本研究を進めるにあたり多大なる協力をいただいた日本道路公団試験研究所ならびに株式会社オーデックス、株式会社東洋情報システムに感謝の意を表します。

参考文献

- (1)佐野信夫・嘉指登志也・米川英雄・富高久智:トンネル部における走行円滑性に関する一考察、高速道路と自動車、第38巻、第3号、1995年3月
- (2)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、1986年7月
- (3)中村亮、池原圭一、日置洋平、桑原陽介:道路走行シミュレータの開発と運用について、第14回交通工学研究発表会論文集、pp169-172、1994年11月
- (4)飯田克弘・森康男・三木隆史・三井大生:トンネル進入時におけるドライバーの挙動および反応の分析、土木計画学研究・講演集No.20(2)、pp.295-298、1997年11月