

ドライビングシミュレータを用いた室内実験システムによる運転者行動分析
— 実験データの再現性検討と高速道路トンネル坑口の評価 —
Analysis of Driver's Behavior Using the Driving Simulator:
Estimation of Reproducibility of Data and Tunnel Entrance Design 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は交通集中により発生する場合が多い。ここで、交通集中による渋滞を発生場所別に分けてみると、料金所やインターチェンジ、ジャンクションなどにおいては交通容量自体が低いことが主な原因であると考えられる。しかし、トンネルやサグにおいては、車線数の減少や交通量の増加がない場合でも渋滞が発生している。特にトンネルは交通集中による渋滞発生箇所にも占める割合が高い場所である¹⁾が、その原因についてはまだ明らかにされていない。

トンネルでの渋滞発生原因について、佐野らはトンネル内部の視環境や道路幅の縮小、坑口形状などによる心理的な圧迫感から、運転者はトンネル坑口付近でアクセルを緩めて、その結果速度低下を起こすと説明している²⁾。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の入口を隘路現象として紹介した³⁾。

このようなトンネルの諸要因と運転者の行動について分析した研究として、米川らはトンネル内装板などの視環境の改善が速度低下の解消に効果があることを報告している⁴⁾が、既往例は少ない。また、中園らはトンネル坑口形状の設計に対する留意点を把握するため、アンケート調査によって坑口形状が与えるイメージを形状に対する印象および好感度の視点から分析を行っている⁵⁾が、運転行動との関係までは言及されていない。

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行動を調査する方法としては、実際に高速道路上で実験を行う実験(以下、実走実験と略記)と、CG動画やビデオ映像などを用いた実験(以下、室内実験と略記)が多く用

いられているが、このうち、より正確に行動を調査することができるのは実走実験である。しかし、実走実験で収集するデータは実験当日の天候や周辺走行車両などの影響を受けやすく、実際の高速道路上でこのような実験条件を統一することは非常に難しい。さらに注視点調査のためアイマークレコーダという実験装置を装着する場合、行動が制約されるため、被験者の安全性についても考慮しなければならない。

このような実走実験が持っている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走行中の周辺道路状況が再現できるドライビングシミュレータが開発されている。そして、それを用いた室内実験が行われるようになりつつある⁶⁾。本研究では高速道路の擬似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。このようなドライビングシミュレータを用いた室内実験では、被験者の安全性の確保や、天候・周辺走行車両などの実験条件を任意に設定してデータの収集を行うことが可能であるが、必ずしも実走実験と同様のデータを収集できるわけではないため、室内実験から得られた運転者行動のデータの再現性について検討が必要である。

本研究では、室内実験システムから得られる運転者行動データの再現性について検討を行う。それと同時に、実験方法の検討も行う。具体的には、まず実際の高速道路上における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。このデータをベースとして、室内実験から得られるデータと統計的に比較する。次に、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ことで実験方法について検討する。

以上の検討を行った上で、トンネル坑口形状と運転者行動との関係を分析する。具体的には、トンネル坑口を変更したトンネル進入部の代替案を複数作成し、調査した運転者行動を相対的に比較する。

2. 実走実験の概要⁶⁾

実走実験では、トンネル進入部における速度低下の原因として、トンネル坑口形状に着目し、トンネル坑口形状と運転者行動との関係を分析することを目的として、運転者行動を調査した。

実験対象区間は、運転者行動に影響を与える周辺走

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 博士(工) 大阪大学大学院工学研究科
** 正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科
*** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 TEL06-6879-7611)

行車両が比較的少なく、また様々な形状のトンネル坑口が存在する区間を条件として、北陸自動車道の今庄IC～木之本ICの間、10トンネルを選定した。また、ここで見られる坑口形状は、ウィング型、アーチウィング型、竹割型、逆ベルマウス型、換気塔型である。

運転者の行動に関する測定項目は、速度、アクセル・ブレーキの使用量、心拍数および注視点である。そして、これらのデータをもとに、トンネル進入部における速度低下に関する運転者行動として、アクセル使用量の減少割合、速度低下位置、心拍数の上昇割合および注視対象物を坑口形状別に算出し比較を行った。

3. 室内実験システム

室内実験システムは、バーチャルリアリティ技術に基づき設計されており、ワークステーションに3次元仮想空間として実験対象道路区間を構築し、被験者がその仮想空間を擬似的に走行して人工現実感を体験するものである。任意の速度・視点位置に対応できることや立体視機能を持つこと、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、実験ではアイマークレコーダと立体視用の眼鏡が同時に使用できないため、立体視は行っていない。また、車線変更については自由にハンドルを操作して行うものでなく、車線に設定されたレール上をトレースし、ハンドル切れ角が閾値を越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。

なお、速度制御は基本的にアクセル・ブレーキの操作によって行われるが、空気や路面抵抗による速度減少についても考慮した。また、実験車以外の周辺走行車両については初期配置(位置、台数)、走行パターン(速度、車線、車間距離、追い越しなど)、車種(トラック、セダンなど)の設定が可能である。さらに、走行音も車内で録音したテープを用いて流している。ここで、速度や周辺状況に応じた音響の生成もアーキテクチャ上可能であるが、現状ではワークステーションの性能を考慮して再現していない。

システムの装置は図-1の通り、ワークステーション、模擬運転台、ビデオプロジェクター、120型アルミフレームスクリーンで構成されている。室内実験システム

は、以下の流れの繰り返しによって、インタラクティブな操作が可能となっている。

まず、ワークステーションで生成された運転者視点からのCG映像が、プロジェクターに映し出される。運転者はこの映像を見ながら模擬運転台のアクセル・ブレーキ・ハンドルを操作する。この時、ワークステーションにはアクセル使用量の増加量が加速度、ブレーキ使用量の増加量が減速度として1%単位で、またハンドルの切れ角が左右とも1°単位で入力される。ワークステーション内ではこの運転者の操作情報をもとに、次の運転者視点からのCG映像の生成を制御し、その映像を再びプロジェクターに映し出す。同時に運転台の速度計には、ワークステーションで計算された走行速度が表示される。

4. 室内実験の概要

(1)実験区間の構築

室内実験では、まず収集される運転者行動データの再現性検討を行うため、実走実験区間のうち、以下に示す区間をCGモデルとして構築した(図-2参照)。

- ・下り曾々木トンネル～小河トンネルの区間
- ・上り敦賀トンネル～杉津トンネルの区間

モデル構築には、北陸自動車道の設計図や地形図、区間走行ビデオ映像、現地写真などを用いた。

さらに、トンネル坑口形状が運転者行動に及ぼす影響を把握するために、現状には存在しない坑口もCGモデルとして作成している(図-3参照)。これは上り敦賀トンネルの進入部で切り替え表示できるように構築している。なおこれを以下では代替案と呼ぶ。ここで、分析区間を区間1～9と定義しているが、それぞれ各トンネル坑口手前500mの地点から坑口までの区間を表すものとする。

また室内実験では、実走実験との違和感を減らすために、周辺走行車両を実走実験と同じ状況・分布で走

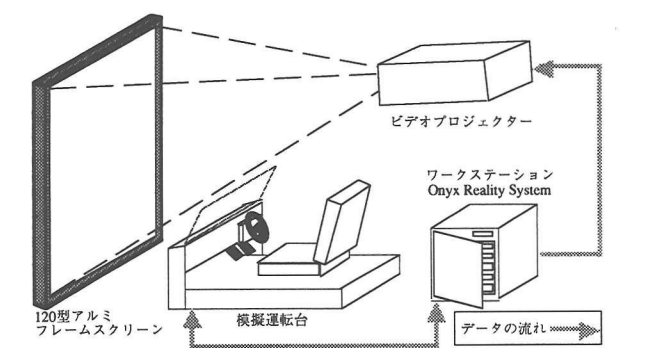


図-1 室内実験システムの構成図

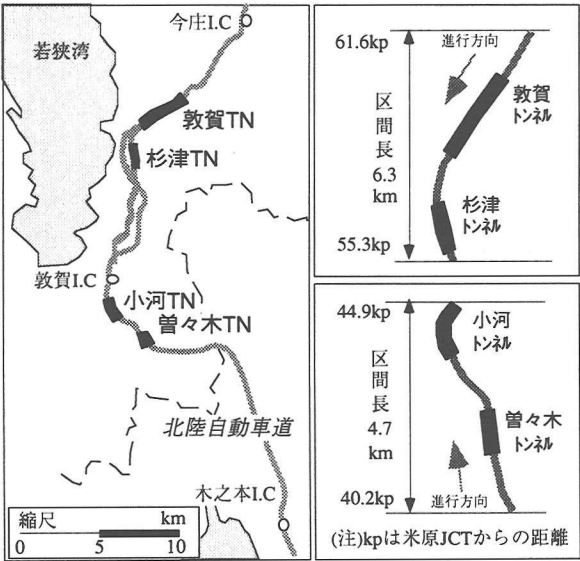


図-2 実験対象区間

行させることとした。さらに走行中の臨場感を高めるために、北陸自動車道の曾々木トンネル手前の区間を約100 km/hで走行した時の車内音を録音し、それを実験中に再生した。

(2)被験者の構成

被験者は20代前半の男性で合計50名である。実験時、被験者を実走実験の経験および事前に与える実験対象区間のビデオ映像の提示の有無によって、3つのグループに分けて構成した(表-1参照)。ここで、被験者の運転歴および運転頻度が実験結果に影響を与えることが考えられるため、運転回数(運転歴×運転頻度)を算出し、これについて片寄りが生じないようにグループ分けを行った。

(3)データの集計

実験時、被験者にアイマークレコーダと心拍計を着用させ、注視点と心拍数(拍/分)を、それぞれ1/30秒ごとに記録した。さらに、ワークステーションでは走行開始からの経過時間(秒)、トンネル坑口までの距離(m)、速度(km/h)、アクセルおよびブレーキ使用量(%)をフレーム(1枚のCG画像の更新時間：平均1/15秒)ごとに記

録した。ここで、アクセル・ブレーキ使用量はそれぞれ、ペダルを全く踏まない状態を0、踏み切っている状態を100としてペダルを踏んだ割合をパーセントで記録した。

分析にあたっては、各データを1/30秒単位で同期させ、データの整合性を図った。具体的には図-4に示すように、ビデオ映像に記録されたトンネル坑口位置におけるカウンターNo.を、ワークステーションに記録されている坑口位置のカウンターNo.とし、これを基準にワークステーション内の全データにカウンターNo.を割り振った。この際に、足りないデータについてはその時点の速度をもとに、線形補間を行うことで求めた。次に、このカウンターNo.に基づいて、各データを並べ、ワークステーションに記録されているトンネル坑口までの距離をもとに1mごとのカウンターNo.を算出し、全データを距離軸にそって1mごとに整理した。図-5には変換後の速度・アクセル使用量・心拍数の推移を統合した例を示す。

5. 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

ここでは、室内実験で得られる運転者行動データの再現性を検討するために、実走実験と室内実験ともに参加した19名の被験者(グループ1)を対象として、両実験における速度(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。さらに、以下のように定義される指標を用いて、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。

・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×100

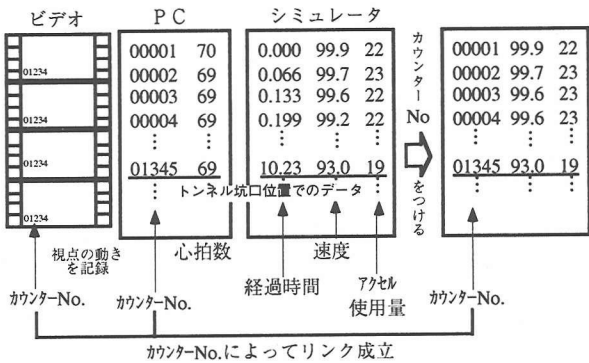


図-4 データ同期の方法

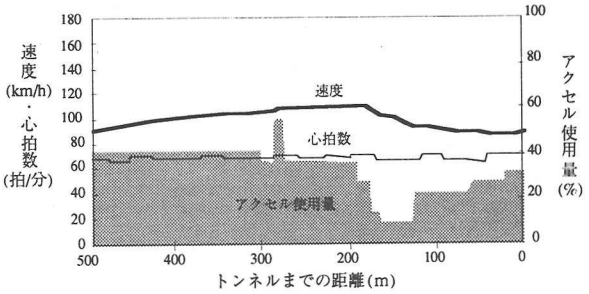


図-5 速度・アクセル使用量・心拍数の推移

図-3 トンネル坑口形状

表-1 被験者グループの属性

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	○	○	×
室内実験に関する口頭説明	○	○	○

- ・速度低下位置(m)：アクセル使用量低下割合が10%を越えた速度低下位置のうち、坑口に最も近い地点の坑口からの距離
- ・速度低下時の心拍数上昇割合(%)：速度低下前後の心拍数の差／速度低下前の心拍数×100
- ・速度低下地点の注視点の注視率：各注視対象物を注視した被験者数／グループ全体の人数×100

(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、心拍数のトンネル坑口手前500m区間における平均値について比較した。1m地点における各被験者の測定値について、被験者ごとに各データの分析区間における平均値を算出し、次の

表-2 グループ1の実走と室内の実験結果

実走	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	98.16	111.85	99.16	99.16
	8.54	8.88	4.47	6.40
アクセル使用量	35.17	23.57	46.44	27.08
	11.01	5.20	8.41	5.55
心拍数	78.48	78.52	80.10	80.91
	15.59	16.39	12.12	12.19

室内	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	107.70	111.21	114.95	115.34
	16.70	14.58	13.80	19.12
アクセル使用量	36.66	38.03	40.42	40.33
	5.25	5.58	8.08	8.59
心拍数	67.03	64.30	64.37	64.11
	9.80	6.37	6.39	5.97

注)上段は平均値、下段は標準偏差

表-3 500m区間の平均データの母平均の差の検定

速度	区間1	区間2	区間3	区間4
検討方法	ウェルチ	t検定	ウェルチ	ウェルチ
有意水準	5%	5%	1%	1%
自由度	27	33	20	22
検定統計量	-2.20	0.15	-4.43	-3.40
t (α/2)	2.34	2.35	3.15	3.12

アクセル使用量	区間1	区間2	区間3	区間4
検討方法	t検定	t検定	t検定	t検定
有意水準	1%	1%	1%	1%
自由度	25	32	33	36
検定統計量	-0.51	-7.83	2.16	-5.65
t (α/2)	2.38	3.01	2.35	2.99

心拍数	区間1	区間2	区間3	区間4
検討方法	t検定	ウェルチ	t検定	ウェルチ
有意水準	1%	1%	1%	1%
自由度	36	20	34	27
検定統計量	2.71	3.22	4.79	5.30
t (α/2)	2.34	3.15	3.00	3.06

注)帰無仮説が棄却されなかった項目に網掛け、*:有意水準5%、*:有意水準1%

表-4 500m区間の推移の相関係数

実走と室内	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	0.45**	0.87**	0.71**	0.87**
アクセル使用量	0.77**	0.02*	0.49**	0.18**
心拍数	0.28**	-0.35*	-0.04*	0.32**

注)帰無仮説が棄却された項目に網掛け、*:有意水準5%、*:有意水準1%

表-5 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
視認誘導	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	坑口右側 坑口上部 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 右前方車両
路面	前方路面(右車線) 前方路面(左車線)		路面との境界面 換気塔	周辺風景	前方風景 右風景 左風景
				その他	運転台

表-6 500m区間の注視点の相関

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**	0.90**	0.76**
3要素を除いた注視点	0.91**	0.94**	0.92**	0.87**

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項目に網掛け、*:有意水準5%、*:有意水準1%

ように実走実験と室内実験との比較を行った。表-2にグループ1の実走と室内の実験結果を示す。まず、対応する区間ごとに分布形状を求め、 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。次に、等分散性が成り立つ場合にはt検定で、成り立たない場合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-3は母平均の差の検定結果である。

次に、実走実験と室内実験とで区間内のデータ推移について比較した。ここで、推移とは変化の傾向、すなわち変動の地点と変動幅を表すものである。具体的には、前述した各被験者の測定値について、1m地点ごとに実走および室内実験における平均値を求め、実走と室内との間での相関係数を求めた。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。検定は両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-4に相関係数と検定結果を示す。

さらに、注視点について比較を行った。ここでは区間1～4のそれぞれにおいて、表-5に示す20項目からなる対象物に関する注視率(全対象物の注視時間に対する各対象物の注視時間の割合)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-6参照)。

ここで、母平均の差の検定では帰無仮説が棄却されなかった項目について網掛けをし、母相関係数の検定では帰無仮説が棄却された項目について網掛けをしている。

(b)トンネル進入時の挙動を示す指標の比較

ここでは、トンネル進入時の速度低下位置、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について比較をすることで再現性を検討した。区間1～4それぞれにおいて、各データの平均値を求め、実走実験と室内実験との比較を行った。表-7にトンネル進入時におけるグループ1の実走と室内の実験結果を示す。まず、前項と同様に、対応する区間で分布形状を求め、 χ^2 検定で分布形状の適合度検定を行った。次にF検定で等分散性の検定を行い、等分散性が成り立つ場合はt検定で、成り立たない場合はウェルチ検定を母平均の差の検定を行った。表-8に母平均の差の検定結果のみを示す。また、速度低下時の注視点の注視率について、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-5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-9参照)。

(2)実験結果の考察

(a)速度について

区間1, 2においては平均速度の比較分析結果から帰無仮説が棄却されず、有意差が認められない。ただし、区間3, 4においては有意差が認められ、室内実験の結果が15.8～16.2(km/h)高くなった(表-3参照)。平均速度について、一部の区間で有意な差があったのは、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。しかし速度推移に関する相関係数は全ての区間で高い値を示し、室内実験と実走実験とでは同様の速度推移の傾向を示すことが分かった(表-4参照)。

(b)アクセル使用量について

アクセルの平均使用量の比較については、区間1, 3における分析では帰無仮説が棄却されず、有意差が認められなかったが、区間2, 4では有意差が認められ、室内実験の結果がそれぞれ14.46, 13.25(%)高くなった(表-3参照)。ここで、本シミュレータでは車の加速力に対する縦断勾配の影響を考慮していないため、下り勾配である区間2と4については、実走ではアクセル使用量が少なくても速度を継続することができるのに対し、室内実験ではアクセル使用量をより大きくしないと速度を維持することができない。そこで室内実験ではアクセル使用量が高くなったと考えられる。さらに、アクセル使用量の推移については区間2を除いた区間で相関関係が認められた(表-4参照)。

(c)心拍数について

まず、分析に当たっては、心拍数が0(拍/分)もしくは180(拍/分)を越える場合および最高心拍数が最低心拍数の2倍を越える場合を異常値⁷⁾として、それを除いた被験者のみを分析対象とした。グループ1について実走実

験と室内実験の結果の比較を行うと、区間1を除いた区間における分析結果では有意差が認められ、室内実験の方が11.5～16.8(拍/分)低かった。ちなみに、グループ1の室内実験とグループ2との比較を行うとグループ1の室内実験の方が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-11参照)。つまり、グループ1の室内実験のみ、心拍数の平均値が低かった。これはすでに実験を経験しているため、慣れが発生したことが原因の1つであると考えられる。また、心拍数の推移については区間1, 4における分析で相関関係が認められた。

(d)注視点について

区間3, 4においては高い相関が認められた。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においても相関係数が高くなった(表-6参照)。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。

(e)トンネル進入時の挙動を示す指標について

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における分析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における分析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こともあり、母相関係数の検定では帰無仮説が棄却されなかった。

以上の(a)～(e)の結果から、本システムで得られる運転者行動データのうち、速度・アクセル使用量の平均値については母平均の差が認められた。これは、被験者が感じる速度感の不足や車両に作用する縦断勾配による重力加速度の影響を考慮しなかったことが原因と考えられ、今後インタラクティブな音響や縦断勾配による重力加速度の計算方法などシステムの機能向上が必要であると考えられる。一方、速度推移について再現性が示され、このことから、運転者行動の地点間での相対的な差を把握することが可能であると考えられる。また注視率、トンネル進入時の挙動を示すデータに再現性が示された。ここで運転者はほとんどの行動判断を視覚情報に基づいて行うことを考えれば、トンネル坑口形状の評価においても運転者行動を相対比較することができると考えられる。

表-7 速度低下時の実験結果

実走	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下件数	17	11	12	11
速度低下位置	196.3	216.7	251.3	185.3
	117.2	120.8	115.8	83.9
アクセル使用量低下割合	31.2	41.1	47.2	46.0
	13.6	31.7	40.1	34.8
心拍数上昇割合	3.0	5.2	2.6	4.0
	4.5	4.8	2.7	4.3

室内	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下件数	14	12	10	12
速度低下位置	140.5	146.0	142.6	116.4
	114.1	71.1	111.0	86.0
アクセル使用量低下割合	47.3	48.3	50.3	54.5
	29.1	39.2	35.6	41.7
心拍数上昇割合	4.4	2.6	3.5	3.0
	3.6	3.5	4.1	2.9

注)上段は平均値、下段は標準偏差を示す

表-8 速度低下時の挙動を示す指標の母平均の差の検定

実走と室内	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	**	**	**	**
心拍数上昇割合	**	**	**	**

注)帰無仮説が棄却されなかった項目に網掛け、**:有意水準5%、*:有意水準1%

表-9 速度低下時の注視点の相関

実走と室内	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*	0.85*	0.79*

注)**:有意水準5%、*:有意水準1%

6. 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、室内実験のみを行った被験者の実験結果が実走実験の結果を再現しているかを検討するため、実走実験の結果とグループ2の結果、また実走実験の結

果とグループ3の結果の比較を行う。比較項目、方法は5.(1)と同様である(表-10～表-15参照)。

さらに、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するため、グループ1の室内実験

の結果とグループ2の結果、またグループ2の結果とグループ3の結果の比較により、実験方法について考察する。比較項目、方法は5.(1)と同様である(表-16～表-19参照)。

表-10 グループ2とグループ3の実験結果

グループ2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度(km/h)	102.28	104.96	109.13	102.95
	8.73	10.83	11.36	8.19
アクセル使用量(%)	34.46	35.57	38.97	35.65
	3.46	3.61	8.50	8.30
心拍数(拍/分)	71.75	71.42	70.59	72.63
	8.05	7.05	6.06	6.72
グループ3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度(km/h)	107.26	108.70	113.26	107.24
	15.65	14.21	14.29	14.59
アクセル使用量(%)	37.60	37.02	40.00	37.16
	6.93	6.82	12.44	10.27
心拍数(拍/分)	72.02	71.14	69.63	70.98
	11.07	9.90	10.08	10.07

注)上段は平均値、下段は標準偏差

表-11 500m区間の平均データの母平均差の検定

実走とグループ2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	**	**	*	**
アクセル使用量	**	*	**	*
心拍数	**	**	**	**
実走とグループ3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	**	*	*	**
アクセル使用量	**	*	*	*
心拍数	**	**	**	**

注)帰無仮説が棄却されなかった項目に網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-12 500m区間の推移と注視点の相関係数

実走とグループ2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	0.07*	-0.62*	0.67**	-0.59*
アクセル使用量	0.71**	-0.36*	0.61**	0.44**
心拍数	-0.13*	0.04*	0.12**	0.39**
注視点	0.89**	0.90**	0.88**	0.78**
実走とグループ3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	-0.58*	0.38**	0.42**	-0.33*
アクセル使用量	0.56**	0.52**	0.91**	0.62**
心拍数	0.32**	-0.09*	0.12**	0.49**
注視点	0.93**	0.91**	0.70**	0.85**

注)帰無仮説が棄却された項目について網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-13 速度低下時における実験結果

グループ2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下件数	18	12	12	11
速度低下位置	123.2	169.2	158.3	135.0
	79.7	138.0	107.6	85.4
アクセル使用量低下割合	49.4	25.8	48.7	49.2
	29.0	25.5	37.1	36.8
心拍数上昇割合	4.0	1.5	2.4	3.0
	3.2	2.9	2.8	2.9
グループ3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度低下件数	17	11	12	11
速度低下位置	137.5	209.2	196.7	174.5
	109.7	120.0	109.7	93.4
アクセル使用量低下割合	40.9	34.9	41.1	40.9
	27.1	27.4	30.8	33.5
心拍数上昇割合	2.8	6.1	5.4	2.4
	2.8	5.7	4.8	2.9

注)上段は平均値、下段は標準偏差

表-14 速度低下時の挙動を示す指標の母平均の差の検定

実走とグループ2	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	**	**	**	**
心拍数上昇割合	**	**	**	**
実走とグループ3	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	**	**	**	**
心拍数上昇割合	**	**	**	**

注)帰無仮説が棄却されなかった項目に網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-15 速度低下時の注視対象物

実走とグループ2	区間1	区間2	区間3	区間4
周辺車両を除いた注視点	0.05*	0.50*	0.82*	0.82*
実走とグループ3	区間1	区間2	区間3	区間4
周辺車両を除いた注視点	0.83*	0.53*	0.92*	0.02*

注)**：有意水準5%、*：有意水準1%

(2)実験結果の考察

実走実験とグループ2、また実走実験とグループ3の間で比較を行った結果、速度・アクセル使用量の母平均の差の検定では、一部の区間で有意な差が認められた。有意な差が認められたのは、表-3における結果と同様の区間であるため、5(2)の考察で示した通り、被験者が感じる速度感が不足していることや車両に作用する縦断勾配による重力加速度の影響を考慮しなかったことがその原因と考えられる。しかし、心拍数の母平均の差の検定では、全ての区間で有意な差が認められなかった(表-11参照)。次に、速度・アクセル使用量の推移について、グループ1での再現性結果(表-4)と比べて、無相関の検定が棄却された区間が少なかった。これはグループ2・3の個人属性分布とグループ1の個人属性分布との違いが原因の一つと考えられる。一方、グループ2の被験者は事前に実走実験区間のビデオ映像を提示しているにも関わらず、グループ2の方がグループ3のより、無相関の検定が棄却された区間が少なかった。すなわち情報量より、被験者の個人属性による影響の方が大きいと推察できる。ここで、グループ2と3

表-16 500m区間の平均データの母平均差の検定

グループ1と2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	**	**	**	**
アクセル使用量	**	**	**	**
心拍数	**	**	**	*
グループ2と3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	**	**	**	**
アクセル使用量	**	**	**	**
心拍数	**	**	**	**

注)帰無仮説が棄却されなかった項目について網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-17 500m区間の推移の相関係数

グループ1と2	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	0.76**	-0.56*	0.85**	-0.62*
アクセル使用量	0.57**	0.05*	0.24**	-0.02*
心拍数	0.11*	0.01*	0.13**	0.23**
注視点	0.96**	0.98**	0.97**	0.94**
グループ2と3	区間1	区間2	区間3	区間4
速度	0.50**	-0.14*	0.91**	0.94**
アクセル使用量	0.28**	-0.19*	0.69**	0.65**
心拍数	0.09*	0.05*	-0.13*	0.76**
注視点	0.89**	0.95**	0.88**	0.85**

注)帰無仮説が棄却された項目について網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-18 速度低下時の挙動を示す指標の母平均差の検定

グループ1と2	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	**	**	**	**
心拍数上昇割合	**	**	**	**
グループ2と3	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	**	**	**	**
心拍数上昇割合	**	**	**	**

注)帰無仮説が棄却されなかった項目について網掛け、**：有意水準5%、*：有意水準1%

表-19 速度低下時の注視対象物

グループ1と2	区間1	区間2	区間3	区間4
周辺車両を除いた注視点	0.58*	0.97*	0.69*	0.94*
グループ2と3	区間1	区間2	区間3	区間4
周辺車両を除いた注視点	0.03*	0.99*	0.84*	0.45*

注)**：有意水準5%、*：有意水準1%

を構成する際、個人属性として運転歴および運転頻度の分布がグループ間で偏らないよう留意していますので、今後はこれ以外の個人属性と運転者行動との関連性について分析を行う必要があることが課題として挙げられる(表-12参照)。ただし、注視率と速度低下の挙動を表すデータは全区間で再現性が認められた(表-12、14参照)。

一方、グループ1と2、グループ2と3の間で比較を行った結果、平均心拍数と速度・アクセル使用量、心拍数の推移の結果を除くと、すべての項目で有意差が認められなかった。このことから、室内実験前に被験者に与える情報(実走区間での経験および実験対象区間のビデオ映像)によって、室内実験で得られる結果には差があるとはいえないことが分かった。

7. トンネル坑口形状と運転者行動との関係

5.から本実験システムはトンネル進入時の速度低下に関する運転者行動の調査方法として有効であると考えられる。

ここでは、トンネル坑口形状が異なる走行区間ごとの運転者行動の結果を相対的に比較し、トンネル坑口形状と運転者行動との関係を分析する。6.より実験結果について、実走実験と室内実験間で統計的な有意差が認められてないため、以下での分析では室内実験の全被験者のデータを分析対象とする。表-20と図-6には、各代替案に対する運転者行動の調査結果を示す。

表-20 トンネル坑口デザインの比較

坑口形状	ウイング型	関越トンネル型	グラデーション付緑色面壁型	新日本坂トンネル型	グラデーション付ウイング型
速度低下発生件数	31	27	27	31	29
速度低下位置	132.65	177.44	175.04	171.23	136.93
	102.58	102.67	102.78	105.78	113.20
アクセル使用量低下割合	60.15	42.90	58.21	54.70	49.42
	38.32	33.03	36.84	32.71	34.24
心拍数上昇割合	2.87	1.77	3.14	2.01	3.48
	3.26	3.35	3.15	2.57	3.32

※上段は平均値、下段は標準偏差を示す

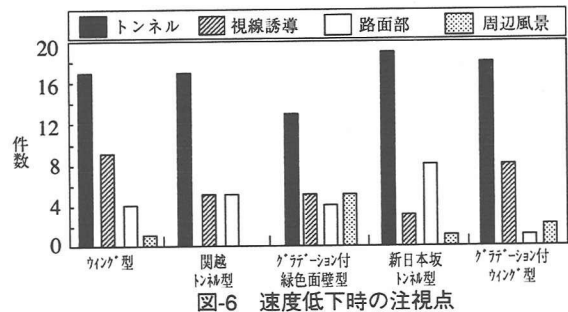


図-6 速度低下時の注視点

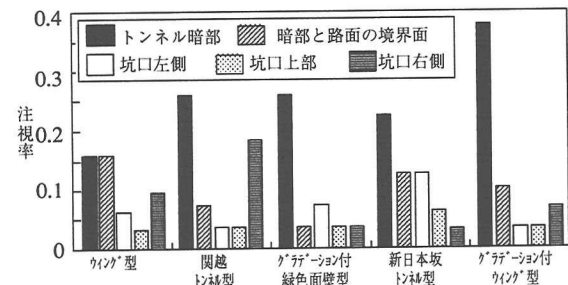


図-7 トンネルの各部の注視率

まず、従来型のウイング型と比較すると、関越トンネル型、グラデーション付緑色面壁型、およびグラデーション付ウイング型では速度低下発生件数が約10%減少した。また、ウイング型と比べて、すべてのトンネル坑口では、アクセル使用量低下割合の数値が、17.25(関越トンネル型)~1.90(グラデーション付き緑色面壁型)小さくなっている。これらの指標からは、新しく提案した坑口形状の改善の効果を伺うことができる。

これは、坑口による圧迫感の減少が原因の1つと考えられるため、注視点および心拍数のデータから考察を行った。図-7には速度低下時の注視点のうち、トンネル坑口各部の注視率を示す。

まず、グラデーション付緑色面壁型とグラデーション付ウイング型では、速度低下時のトンネル暗部の注視率はウイング型に比べて高く、トンネル坑口各部の注視率は低い。また分析区間のその他の対象物の注視率はウイング型と差がない。

さらに、関越トンネル型では、心拍数の上昇割合が対象中最も低くなっている。また、速度低下時のトンネル暗部と坑口右側の注視率はウイング型に比べて高いが、その他の対象物の注視率は低い。

新日本坂トンネル型に関しても、心拍数の上昇割合がウイング型に比べて低い。また、速度低下時のトンネル暗部の注視率は高い。

つまり、新しく提案した坑口形状では、ウイング型に比べてトンネル暗部の注視率が増加することによって、周辺視が減少し、進行方向への注意が集中している。このことから圧迫感すなわち不安が減少していると推察できる。

8. おわりに

本研究では、トンネル進入部における運転者行動を調査するため、高速道路の擬似走行体験や運転行動データが収集可能なドライビングシミュレータを開発した。そして、これを用いた室内実験で得られる運転者行動データを実走実験で得られたデータと比較することで室内実験システムの信頼性を評価すると同時に、坑口の評価に適用した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) トンネル坑口手前500m区間における速度、アクセル使用量の平均値は、多くの区間で有意差が認められなかったが、差が生じた区間もあった。これについては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や本システムが縦断勾配の影響を考慮していなかったことが原因と考えられる。
- 2) 各データ推移の比較では、速度推移に強い相関が認められたが、アクセル・心拍数については相関が弱い場合も見られた。これについては相関係数を算出する際に、平均移動を用いたり、相互相関係数を用

いるなどデータ処理上の工夫を行う必要があると考えられる。

- 3) 注視点について両実験の間に強い相関関係が認められ、室内実験で実走実験時の状況を再現できることがわかった。
- 4) 速度低下時の挙動を示す全ての指標について、室内実験と実走実験での結果に有意な差がないことがわかった。2)および3)と合わせて考えると、トンネル坑口評価にあたって、実験結果を用いて相対比較することが可能であると考えられる。
- 5) 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を比較することで実験方法について検討を行った結果、区間4における心拍数および各項目の相関係数以外では有意差が生じなかった。このことから、本システムでは被験者に実際の区間を事前に走行させることはあえてする必要はないと考えられる。
- 6) 実走実験に参加していない被験者による室内実験の結果と実走実験との比較結果より、被験者の個人属性が分析結果に影響を与えていることが分かった。本研究でも運転歴と運転頻度の属性は考慮しているため、今後これ以外の個人属性と運転者行動との関連性を分析する必要がある。
- 7) トンネル坑口形状と運転者行動との関係について分析を行った結果、従来型の坑口と比較して新しく提案した坑口形状の効果を確認するとともに、特にグレーションポイントが有効であるという知見を得た。

今後は、室内実験で得られるデータの再現性を向上させるために、本文中で示したような実験システムの機能向上を図るとともに、被験者の個人属性と運転者行動との関連性分析を行う必要がある。また運転者行動変化とトンネル坑口形状との関係を表現する指標の改良を行う。

【謝辞】

本研究は日本道路公団試験研究所からの委託研究であり、研究を進めるにあたり、実験区間データの入手等に協力をいただいた同研究所、ならびに、実験区間のCGモデル作成等に多大なる協力をいただいた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) 米川英雄・永井淳一・山本敦義・山内靖彦: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
- 4) 中園真人・鈴木昌次・古川浩平・中川浩二:トンネル坑口デザインの評価構造に関する実験的研究、土木学会論文集、No.474、IV-20、1993年9月
- 5) 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ー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
- 6) 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
- 7) 人間工学ハンドブック編集委員会:人間工学ハンドブック、金原出版、1974年

ドライビングシミュレータを用いた室内実験システムによる運転者行動分析 — 実験データの再現性検討と高速道路トンネル坑口の評価 —

飯田 克弘、森 康男、金 鍾旻、池田 武司、三木 隆史

本研究ではトンネル進入部における運転者の運転行動を調査するため、バーチャルリアリティ技術を応用して、高速道路の擬似走行体験や運転行動データの収集が可能なドライビングシミュレータを開発した。そしてドライビングシミュレータを用いた室内実験で得られる運転者行動データの再現性および実験方法について検討した。その結果、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、その再現性をある程度確認することができた。さらに、トンネル坑口を変更したトンネル進入部の代替案を作成し、トンネル坑口形状と運転者行動との関係を分析した。

Analysis of Driver's Behavior Using the Driving Simulator: Estimation of Reproducibility of Data and Tunnel Entrance on Expressway

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

We tried to find how and what factors of the tunnel entrance are affecting the drivers' behavior. We developed the driving simulator using the technology of virtual reality. It can have an experience on expressway indirectly and collect the data of drivers' behavior. This study investigates the reproducibility of the reliance on drivers' behavior from the driving simulator and the method of experiment using it. Concretely, we have confirmed the reproducibility of data such as speed, the usage of accelerator, the point of vision, and slow-down at the entrance of tunnel. We analysis the reliance the design of tunnel entrance on drivers' behavior by the alternative of tunnel entrance.