

I-33 舗装路面の体感乗り心地評価における被験者数の最適化

Optimizing the Numbers of Subjects for Conducting Pavement Ride Quality Ratings

富山和也¹・川村 彰²・石田 樹³・高橋 清⁴・中辻 隆⁵

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Tateki ISHIDA, Kiyoshi TAKAHASHI, and Takashi NAKATSUJI

抄録: 体感により路面乗り心地を評価し、統計的検定に基づき結果を解釈する場合、その信頼性および妥当性は被験者数に大きく依存する。本研究の目的は、路面乗り心地の体感評価試験における被験者数について、検定力分析を用い、統計学的観点から最適化することである。検定力分析に基づく被験者数の算定では、研究対象や目的に応じた効果量の設定が必要である。本研究では、はじめに、ドライビングシミュレータを用いた走行試験を実施し、路面乗り心地評価における効果量を推測した。続いて、効果量の推測結果をもとに、路面補修による乗り心地改善効果を考え、体感評価試験における被験者数を検討したところ、実用上 34 名の被験者が必要であるとの知見を得た。

Abstract: The purpose of this study is to optimize the numbers of subjects (sample size) for conducting pavement ride quality ratings on the basis of statistical power analysis. Power analysis is used to determine an appropriate sample size as a function of a significance level, an effect size (ES) and a statistical power. The process of sample size calculation by power analysis requires the estimation of an ES depending on the object and purpose of each individual study. In this study, we estimated the ES for the pavement ride quality ratings by a driving simulator experiment. According to the estimation result of the ES, the sample size of ride quality ratings is optimized by power analysis based on the expected impact that would be achieved by the pavement maintenance and rehabilitation activities. Practically, experiments of pavement ride quality ratings should be intended to gain the medium effect size or more with a panel size of thirty-four members.

キーワード: 乗り心地, 被験者数, 路面評価, 検定力分析, ドライビングシミュレータ

Keywords: ride quality, numbers of subjects, road surface evaluation, power analysis, driving simulator

1. はじめに

近年、社会資本および人口構造の高齢化が進み、道路整備に対する社会的要求は、量的拡大から、質的向上へと変遷している。そのため、車両を介し、道路と人との接点となる舗装路面の維持管理には、車両走行時の快適性や安全性など、利用者視点を重視した対策が求められている。とりわけ、路面の平たん性は、舗装技術基準の性能規定化に伴い、「乗り心地がよい」など快適な交通を確保するための、必須の指標となっている¹⁾。

乗り心地に基づく平たん性評価では、利用者の乗車感覚を直接測定可能な、体感評価試験（以下、「体感試験」とする）が、有効な手段としてしばしば実施される²⁾⁴⁾。体感試験の主目的は、限られた被験者による体感評価値の一般化であり、換言すれば、標本統計量をもとに、できるだけ正確な母数を推測するという統計的推測の課題と一致する⁵⁾。そのため、統計的推測のうち、とりわけ統計的検定（以下、「検定」とす

る）の適用事例は、例えば既往研究⁴⁾⁶⁾のように、体感乗り心地の評価・解析において数多い。

検定による体感評価値の解析において、有意な結果が得られる確率は、検出力または検定力と呼ばれ、常に被験者数に依存し、被験者数増加に伴い検出力も高まるが、実験コストも増加する⁵⁾⁷⁾。また、極端に多い被験者数は、例えば 2 路面間の乗り心地比較実験において、微小な差までも検出してしまい、その有意性ゆえに結果を過大評価しかねない。そのため、実験計画段階において、最低限必要な被験者数を設定することが重要である。しかしながら、必要被験者数は、分析目的や、用いる統計手法に依存するため、一概に決定することは困難であり⁸⁾⁹⁾、路面乗り心地の体感試験に関しても、被験者数の明確な根拠は不明である¹⁰⁾。

一定の検出力を確保するために必要な被験者数を算出する手続は、検定力分析とよばれ、被験者数は、検出力、帰無仮説からの隔たりの程度である母集団効果量（以下、「効果量」とする）および有意水準の関数となる⁵⁾⁷⁾。ここで、検出力および有意水準は、それぞ

1 : 正会員 博(工) 北見工業大学 研究員

(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地, Tel: 0157-26-9429, E-mail: tomiyaka@mail.kitami-it.ac.jp)

2 : 正会員 博(工) 北見工業大学 教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地, E-mail: kawamuak@mail.kitami-it.ac.jp)

3 : 正会員 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目, t-ishida@ceri.go.jp)

4 : 正会員 工博 北見工業大学 准教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地, E-mail: kiyoshi@mail.kitami-it.ac.jp)

5 : 正会員 博(工) 北海道大学大学院 教授 (〒068-8788 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail: naka@eng.hokudai.ac.jp)

れ 0.8, 0.05 のように, 統計的に妥当な値が存在する。一方, 効果量は, 研究対象や目的に応じて設定するが, 実験計画段階では未知であるため, 予備調査や既往研究などに基づく推測が必要である¹¹⁾。

上述のように, 被験者数は, 体感試験の妥当性, 信頼性および経済性に影響を及ぼす。本研究の目的は, 路面乗り心地の体感試験における被験者数について, 統計学的観点から最適化することである。

これまでに筆者らは, 路面乗り心地の許容可否を, 体感により判定する場合の被験者数について, 検定力分析に基づく設定方法を示している¹⁰⁾。本研究では, より詳細な路面の体感評価を鑑み, 乗り心地の良し悪しに関する 5 段階尺度を用いて, (1)効果量の推測に資する体感試験を実施し, (2) 検定力分析により, 路面乗り心地の体感評価に要する被験者数について検討する。

なお, 「乗り心地」には, 車内環境や沿道の景観も含めた「広義の乗り心地」も考えられるが, 本研究における「乗り心地」は, 路面損傷に起因する, 「狭義の車両振動乗り心地」を指すものとする¹²⁾。また, 体感試験は, 被験者の安全性ならびに必要とする路面条件を容易に確保し, 効率的かつ経済的に実施するため, ドライビングシミュレータ (以下, 「DS」とする) を用いた。

2. DS による体感試験

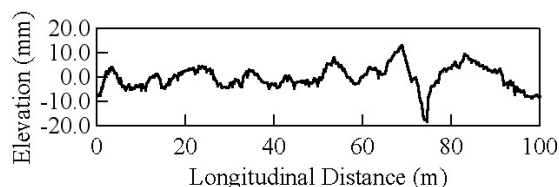
体感試験は, 利用者の乗車感覚を直接測定できるため, 路面乗り心地評価において非常に有効な手段である。しかし, 実道実車試験では, 被験者の安全性や必要とされる路面条件確保の観点から多くの困難を伴う。一方, DS を用いた体感試験は, 実道試験と比較し, a) 安全に実施でき, b) 繰返し特性に優れ, c) 任意の試験条件の設定が可能, d) 管理された試験により効率的なデータの収集が可能, e) 経費や時間の節約など経済的, f) 道路整備実現前の段階での検証が可能など, 数多くの利点を有する¹³⁾。このような背景から, 北見工業大学では, 路面評価型 DS (KITDS: Kitami Institute of Technology Driving Simulator) を開発している (図-1)^{14),15)}。本章では, KITDS の特徴を概説し, 効果量の推測に資する体感試験の概要について述べる。

(1) KITDS

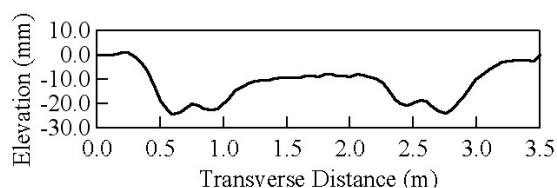
従来, 道路研究における DS の利用は, 道路の視認性や線形設計に関するものが主体であった。一方, KITDS では, 固有機能である「自由走行」および「体験走行」により, 乗員の乗り心地や車両の操縦性・安定性, 燃費や車両耐久性などの走行費用に直結する, 路面のラフネスレベルでのデータが利用可能である。



図-1 KITDS の外観



(a) 縦断プロフィール (平坦性)



(b) 横断プロフィール (わだち掘れ)

図-2 KITDS で再現可能な路面プロフィールの一例

以下に, KITDS の固有機能についての詳細を述べる。

a) 自由走行機能

自由走行機能では, DS 上で, 実路における縦横断プロフィールや摩擦係数などの路面特性データを再現し, CG で作成されたコース上を, ドライバが自由に走行可能である。これまで, DS において, 路面の縦断もしくは横断距離と高さの 2 次元形状で表される「路面プロフィール」データの利用は, 道路線形と関係の深い数十メートルから数百メートルの波長の再現に限られていた。一方, KITDS では, 平坦性やわだち掘れなど, 数センチメートル単位の路面波長の再現が可能である。図-2 に, KITDS で再現可能な, 路面プロフィールデータの一例を示す。

b) 体験走行機能

体験走行機能では, DS 上で, 実車両の並進加速度および回転角度を, 視界画像データと共に再現し, 乗員は, 運転操作を伴わず, 乗車体験が可能である。本機能の特徴として, 運転操作を伴わないため, 体感試験において, 全ての被験者に対し, 同一の振動条件を与えることができる。そのため, 乗り心地データの解析において, 運転操作や走行速度, 走行軌跡の違いな

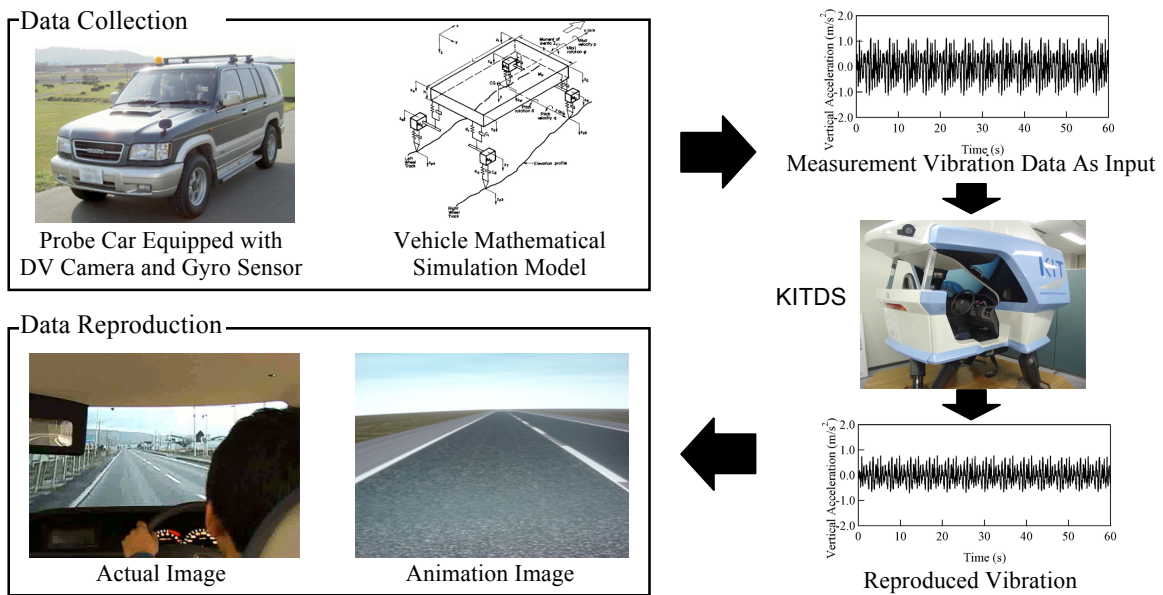


図-3 体験走行機能における再現データの概要

などを排除できる。また、実車両から得られたデータの代わりに、車両の数学モデルによる運動シミュレーションなどから得られた挙動データおよびアニメーション映像を再現することも可能である。体験走行における再現データの概要を図-3示す。なお、本研究では、体感評価において、運転特性など、乗り心地以外の要因を極力排除するため、本機能を用いた。

(2) 体感試験シナリオ

効果量の推測に資する体感試験は、乗り心地評価区間長 300m において、路面平坦性および速度水準の異なる状況を設定し、KITDS の体験走行機能により実施した。なお、体験走行における車両挙動および視界画像データは、CarSim^{®16)}の小型乗用車モデルによるシミュレーション結果を用いた。CarSim[®]とは、ステアリング操作などの運転条件や、路面状況などの環境条件を、ユーザが自由に設定でき、その時の乗用車や小型商用車の挙動をコンピュータ上で再現する、車両運動シミュレーションソフトウェアである。

a) 路面条件

路面条件は、国際ラフネス指数 (IRI: International Roughness Index) が 2,3,4,5,6mm/m の 5 水準とした。体感試験に用いた路面プロファイルデータは、上記の IRI を満たすよう、世界道路協会 (PIARC) によって実施された国際共通試験 (通称「EVEN 試験」)¹⁷⁾結果から、測定延長 100m のデータから選定し、当該データを 3 回繰り返すことで、延長 300m を確保した。体感試験における路面プロファイルを図-4に示す。なお、路面プロファイルデータは、低速プロファイルである Dipstick[®]および水準測量によって測定された

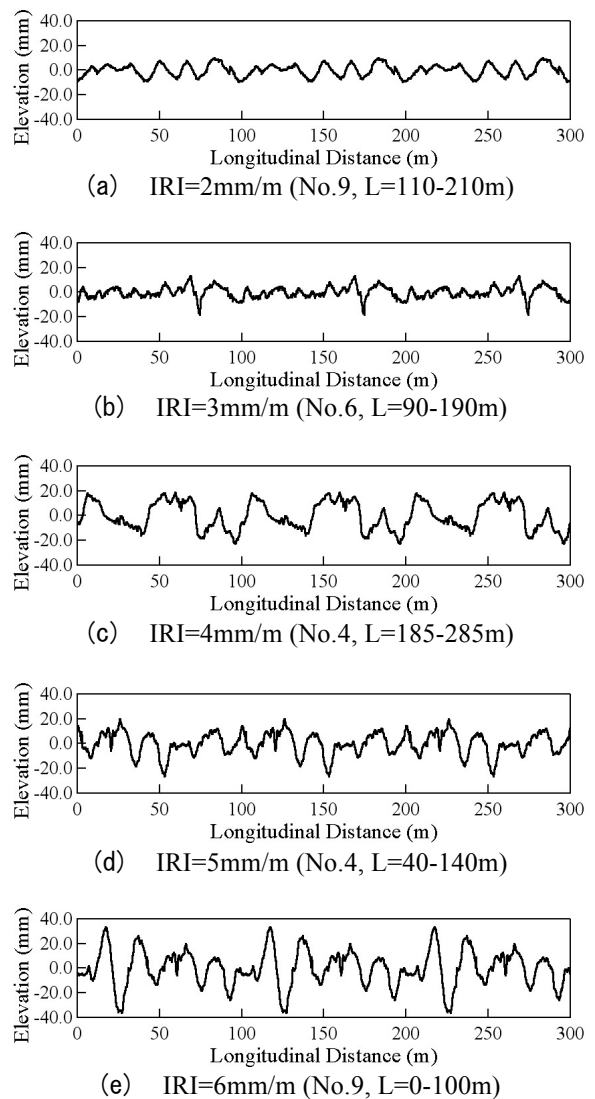


図-4 体感試験における路面プロファイル (()内は EVEN 試験における測定区間)

表-1 体感試験における走行条件および
加速度実効値 (単位:m/s²)

	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h
IRI=2mm/m	0.28	0.34	0.48	0.67
IRI=3mm/m	0.51	0.64	0.84	1.08
IRI=4mm/m	0.53	0.72	0.95	1.15
IRI=5mm/m	0.68	0.86	1.13	
IRI=6mm/m	0.72	0.96		

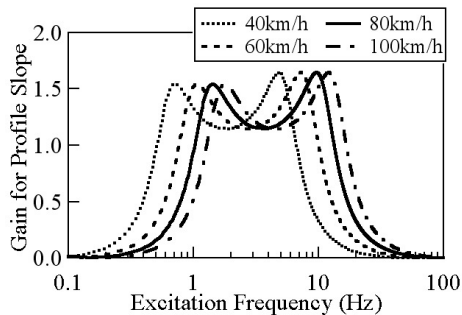


図-5 クォーターカー・フィルタの応答

ものであり、サンプリング間隔が 0.025m となるよう補間処理を施した。また、路面摩擦は、乾燥路面を想定し、摩擦係数 $\mu=0.75$ とした。

ここで、IRI とは、クォーターカーと呼ばれる、2 軸 4 輪乗用車の 1 輪だけを取り出し抽象化された車両モデルが、80km/h で走行した際のサスペンションの動的応答に基づく指標である¹⁸⁾。近年、IRI は、レスポンスタイププロファイラの普及や、乗り心地と関係があることなどから、世界的に標準のラフネス指標として利用されている¹⁹⁾。

b) 走行条件

体感試験における車両走行速度は、乗り心地と関係の深い、バネ上上下下振動加速度 (以下、「上下加速度」とする) 実効値が、国際標準化機構(ISO)の人体振動基準における「非常に不快 (very uncomfortable)」の下限値である 1.25m/s² 以下となるよう^{20),21)}、表-1 に示す 40km/h から 100km/h の間で設定した。なお、表中、上下加速度実効値を合わせて示した。ここで、車両挙動データのサンプリング間隔は 100Hz である。

(3) KITDS の乗り心地再現性

DS のコックピットにおける、上下加速度の再現性は、体感により乗り心地を評価する上で非常に重要となる。本節では、表-1 の走行条件について、上下加速度に着目し、KITDS の乗り心地再現性を検証する。

a) 検討対象とする車両振動特性

DS の振動特性に関するチューニングを行う場合、車両に生じる全ての加速度や角速度パラメータの再現

表-2 KITDS における入出力上下加速度間の
相互相関係数 (無次元)

	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h
IRI=2mm/m	0.82	0.84	0.90	0.96
IRI=3mm/m	0.83	0.89	0.88	0.93
IRI=4mm/m	0.88	0.88	0.90	0.93
IRI=5mm/m	0.91	0.84	0.88	
IRI=6mm/m	0.92	0.84		

性を確保することは、シミュレーションの特性上難しく、効率的でない。そのため、一般に、実験の目的に合う運動パラメータの再現性に重点が置かれる¹⁴⁾。本研究では、IRI の計算に用いられるクォーターカー・フィルタにおいて、振幅利得の高い周波数帯に着目した。図-5 に走行速度に応じた、時間領域でのクォーターカー・フィルタの応答を示す。図より、クォーターカー・フィルタは、0.8-10Hz の間で利得が高く、この範囲は、人体振動における上下方向の高感度域である 4-8Hz²⁰⁾ および一般的な車両のバネ上共振域である 1-2Hz²²⁾ を含んでおり、乗り心地と関係の深い周波数帯であると言える。そこで、振動再現性の検証は、0.8-10Hz の帯域に属する上下加速度に着目した。

b) 検証結果

検証は、各走行条件下で、デジタル・フィルタにより 0.8-10Hz に帯域制限された上下加速度について、入出力データ間の相互相関係数により行った。相互相関係数は、ある 2 信号間の相関関係を表し、絶対値が完全な相関=1 から無相関=0 の間の値をとる²³⁾。各走行条件における相互相関係数を表-2 に示す。表より、全ての振動条件で、相互相関係数 0.8 以上と相関が高く、KITDS は、乗り心地評価に必要な上下振動の再現性を有することが確認できた。

(4) 被験者および評価尺度

a) 被験者

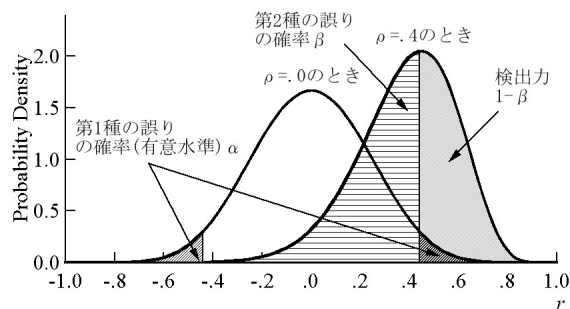
被験者として、試験目的に同意の上、北見市在住の 20 代から 60 代男女 18 名の協力を得た。全ての被験者は、本試験で使用した走行シナリオの未経験者である。走行条件の提示順序は、振動の残留効果を低減するため、各被験者に対し無作為に振り当てた。また、室温や照明等の試験環境は、被験者毎に極力等しくした。被験者は、各走行シナリオを体験後、直ちに、後述の 5 段階尺度により、自身の感覚に基づく乗り心地評価を行った。

b) 評価尺度

体感試験における評価尺度として、「5: 良い」、「4: やや良い」、「3: どちらともいえない」、「2: やや

表－3 検定による判断と誤差⁵⁾

事 実	検定による判断	
	帰無仮説を採択	帰無仮説を棄却
帰無仮説が真	正しい判断 (帰無仮説が真であるときの条件付き確率は $1-\alpha$)	第1種の誤り (帰無仮説が真であるときの条件付き確率は α)
帰無仮説が偽	第2種の誤り (帰無仮説が偽であるときの条件付き確率は β)	正しい判断 (帰無仮説が偽であるときの条件付き確率は検出力 $1-\beta$)



図－6 検出力の考え方 (相関係数 ρ の例)⁵⁾

表－4 路面乗り心地の体感評価における効果量の推測結果

対象路面 IRI (mm/m)	比較路面 IRI (mm/m)	40km/h			60km/h			80km/h			100km/h		
		MPR の差	加速度 差	標本 効果量	MPR の差	加速度 差	標本 効果量	MPR の差	加速度 差	標本 効果量	MPR の差	加速度 差	標本 効果量
2	3	0.00	0.23	0.00	0.61	0.30	0.59	0.72	0.37	0.53	0.78	0.41	0.62
2	4	0.33	0.25	0.29	0.50	0.38	0.54	0.83	0.48	0.72	0.83	0.48	0.90
2	5	0.83	0.40	0.85	1.22	0.53	1.89	1.44	0.65	1.39	-	-	-
2	6	1.00	0.44	0.88	1.39	0.62	1.42	-	-	-	-	-	-
3	4	0.33	0.03	0.34	-0.11	0.08	0.10	0.11	0.11	0.11	0.06	0.07	0.06
3	5	0.83	0.17	0.64	0.61	0.22	0.67	0.72	0.29	0.75	-	-	-
3	6	1.00	0.21	1.03	0.78	0.32	0.89	-	-	-	-	-	-
4	5	0.50	0.15	0.71	0.72	0.15	1.08	0.61	0.18	0.72	-	-	-
4	6	0.67	0.19	0.97	0.89	0.25	1.07	-	-	-	-	-	-
5	6	0.17	0.04	0.17	0.17	0.10	0.27	-	-	-	-	-	-

*「加速度差」は実効値 (m/s^2)

良い」, 「1:悪い」の5段階尺度を用いた。石田ら²⁴⁾は、本尺度を用い、路面の乗り心地・安心感に関する研究を行っており、IRI増加に伴い、乗り心地が低下することを明らかにしている。また、AASHO道路試験²⁾や、乗り心地指向の路面指標であるRN(ライドナンバ)の根拠となった体感試験²⁵⁾においても、同様の評価尺度が用いられている。体感による路面乗り心地の評価・研究において、過去の研究成果を活用する上でも、5段階評価尺度は、今後も利用されていくものと考えられる。

3. 路面の体感試験における被験者数の最適化

検定における検出力とは、表－3および図－6のように、帰無仮説が正しくないときに、それを正しく棄却できる確率であり、常に被験者数に依存する⁵⁾。そのため、検定により、体感試験結果の妥当性および信頼性を保証する場合は、検出したい差、即ち効果量を定め、その差が存在するときにそのことを高い確率で検出できるように、被験者数を事前に設定する必要がある¹¹⁾。本章では、上述の体感試験結果から効果量を推測し、路面乗り心地の体感試験における被験者数について、検定力分析により最適化を試みる。

(1) 検定対象および条件

路面評価の主要な問題として、平坦性やわだち掘れ水準の差によって、体感評価値がどの程度異なるかが問われる。これにより、例えば、路面補修による乗り心地改善効果の事前確認や、補修優先順位の決定について、道路利用者の視点を交え、効率的に行うことが可能となる。そこで、本研究では、2路面間の主観評価平均値(MPR: Mean Panel Rating)の差を対象に効果量を推測し、2路面間の体感乗り心地を比較する際に要する被験者数について検討する。検定手法としては、対応のある2群平均値差の検定法である、対応のあるt検定となる²⁶⁾。また、路面維持管理の実状を考えた場合、同一評価区間内において、異なる速度水準による評価を行うことは少ないと考えられる。そのため、効果量の推測および被験者数の算定は、速度水準別に検討した。

(2) 効果量の推測

ある2路面A, Bにおける母集団MPRを μ_A, μ_B 、母集団標準偏差を σ_A, σ_B 、2路面間の母集団における体感評価値の相関係数を r とすると、対応のあるt検定における効果量 d は、次式により求められる⁷⁾。

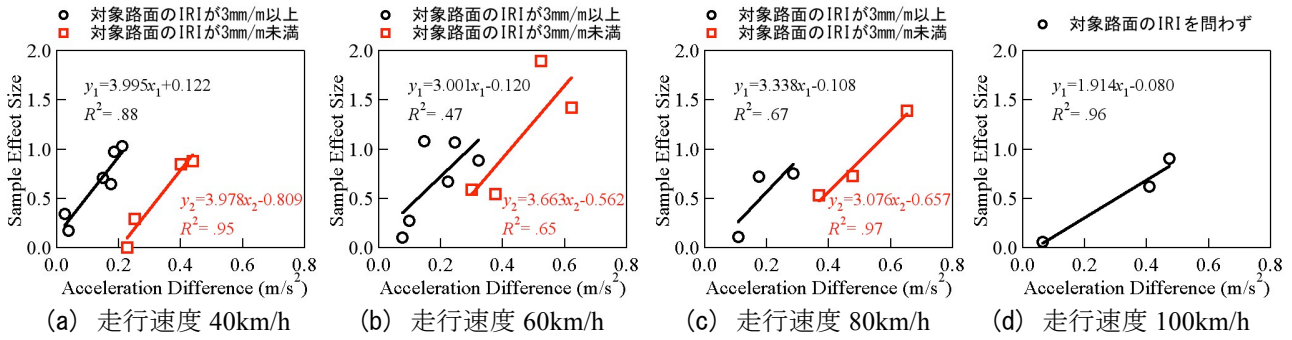


図-7 加速度実効値の差と標本効果量の関係

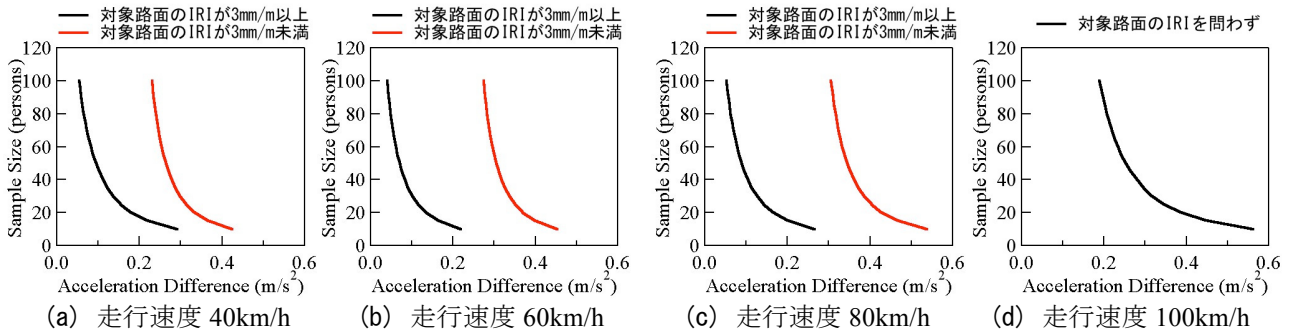


図-8 加速度実効値の差と被験者数の関係

$$d = \frac{|\mu_A - \mu_B|}{\sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 - 2r\sigma_A\sigma_B}} \quad (1)$$

ここで、母集団における各値は未知であるため、それぞれ標本から求めた値を用いて計算し、効果量の推測値とする。これ以降、効果量の推測値は、母集団における効果量と区別するため、「標本効果量」と称する。標本効果量の算定結果を、速度別に、MPR 差および上下加速度実効値の差（以下、「加速度差」とする）と合わせ、表-4に示す。表中、便宜上一方の路面を「対象路面」、他方を「比較路面」とした。

ここで、本研究における体感試験は、被験者数算定に資する効果量推測を目的としているため、試験に用いた路面プロファイル自体の評価は考えないものとする。また、表-4における各2路面の比較は、それぞれ独立の事象として扱うため、検定の多重性は考慮しない^{27),28)}。

表-4より、対象路面のIRIが3mm/m以上の場合、対象路面のIRIが3mm/m未満の場合と比べ、加速度差が同様の値であっても、標本効果量が大きい傾向にある。例えば、走行速度40km/hにおいて、[対象路面IRI, 比較路面IRI]が[2, 4]の比較では、加速度差0.25m/s²に対し、標本効果量0.29であるが、[3, 6]の比較では、加速度差0.21m/s²に対し、標本効果量1.03となる。そこで、被験者数の算定に資する標本効果量は、対象路面のIRI別に加速度差を基準とし、図-7に示す回帰式から算出した。なお、走行速度100km/hの場合は、条

件が限られていることから、全ての比較条件を同一に扱った。

(3) 被験者数の算定

検定力分析により被験者数を算定する場合、検出力表や統計ソフトウェアの利用が考えられるが、検定力分析に特化したソフトウェアであるG*Power²⁹⁾を用いると効率的である。本研究では、G*Powerを用い、図-7の回帰式から得られた標本効果量をもとに、路面乗り心地の体感試験に要する被験者数を算定した。被験者数の算定結果を図-8に示す。ここで、対応のあるt検定における効果量の目安として、Cohen⁷⁾の基準「小:0.2」、「中:0.5」、「大:0.8」を用いると、必要な被験者数は、表-5のように、それぞれ199, 34, 15名となる。

以上より、路面乗り心地を体感により評価する場合、効果量から路面補修による乗り心地改善効果を考え、表-5に示す加速度差以上を対象とした体感試験の実施が効率的である。換言すれば、効果量の要求に対し、表-5に示す加速度差以上の低減が見込めない場合、所要の乗り心地改善効果は得られない。ここで、効果量が「小:0.2」の場合は、200名近くの被験者を要するが、路面補修や補修優先順位の決定といった実務面において、微小な路面乗り心地の差異を問題にすることは少ないものと考えられる。一方、路面の補修効果を確認するように、路面乗り心地の著しい改善が想定できる場合、効果量を「大:0.8」として、15名程

表－5 体感試験に必要な被験者数

走行速度 (km/h)	上下加速度実効値の差 (m/s ²)					
	対象路面の IRI が 3mm/m 以上	対象路面の IRI が 3mm/m 未満	対象路面の IRI が 3mm/m 以上	対象路面の IRI が 3mm/m 未満	対象路面の IRI が 3mm/m 以上	対象路面の IRI が 3mm/m 未満
40	0.02	0.25	0.09	0.33	0.17	0.40
60	0.03	0.21	0.13	0.29	0.23	0.37
80	0.03	0.28	0.12	0.38	0.21	0.47
100	0.03		0.12		0.21	
効果量の基準	小：0.2		中：0.5		大：0.8	
被験者数	199 名		34 名		15 名	

度の被験者でも高い試験精度を確保できる。しかし、体感試験実施上の主たる関心は、事前に把握が困難な乗り心地の差異を、利用者の立場から評価することにある。そこで、路面維持管理における実用上は、効果量「中：0.5」以上の乗り心地改善効果を想定し、被験者を 34 名とすべきである。

体感試験における被験者数は、試験結果の妥当性と信頼性ならびに試験コストとトレードオフの関係にあるが、表－5 を用いることで、事前に路面補修による乗り心地改善効果を設定し、統計的観点から最適化することが可能である。ただし、人を測定対象とする体感試験の特性上、被験者属性や試験条件により、必要被験者数は変化するものと考えられる。そのため、可能な限り予備試験を実施し、本研究で示した方法により、試験目的に応じた被験者数を設定すべきである。

4. まとめ

体感により路面乗り心地を評価し、検定に基づき結果を解釈する場合、その信頼性および妥当性は被験者数に大きく依存する。本研究では、路面プロファイルに起因する車両振動条件を効果量の観点から評価し、従来理論的根拠が不明であった体感試験における被験者数について、統計的観点から最適化する方法を示した。

本研究の成果として、体感に基づく路面乗り心地評価では、「小・中・大」の効果量基準のうち、「中」以上の効果を想定するのが実用的であり、その場合、34 名の被験者を要することがわかった。一方、路面補修による乗り心地改善度評価のように、事前に大きな効果量が想定される場合には、15 名程度の被験者でも高い試験精度を確保できることを示した。また、体感試験に要する被験者数を算定することで、実験コストの低減も期待できる。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科研費(19360226)基盤研究(B)の助成を受け進められたものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装の性能評価法 -必須および主要な性能指標の評価法編-, 丸善, 2006.
- 2) Janoff, M.S., Nick, J.B., Davit, B.S., and Hayhoe, G.F.: Pavement Roughness and Rideability, *National Cooperative Highway Research Program Report 275*, 1985.
- 3) Chou, C.P., and Wu, C.L.: Evaluation of Panel Characteristics and User-Based Pavement Serviceability, *Transportation Research Record*, No.1592, pp.98-106, 1997.
- 4) Chafizadeh, K., and Mannering, F.: Statistical Modeling of User Perceptions of Infrastructure Condition: Application to the Case of Highway Roughness, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.132, No.2, pp.133-140, 2006.
- 5) 南風原朝和：心理統計学の基礎- 統合的理解のために、有斐閣, 2002.
- 6) 石田 樹, 川村 彰, Alimujiang Yiming, 富山和也：生体信号による舗装路面の乗り心地評価に関する基礎的研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 12 巻, pp.197-204, 2007.
- 7) Cohen, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, Lawrence Erlbaum Assoc Inc, 1988.
- 8) 芝 祐順, 南風原朝和：行動科学における統計解析法, 東京大学出版会, 1990.
- 9) 永田 靖：サンプルサイズの決め方, 朝倉書店, 2003.
- 10) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹, 高橋 清：路面の体感評価試験における被験者数について, 土木学会舗装工学論文集, 第 13 巻, pp.9-15, 2008.
- 11) 吉田寿夫：心理学研究法の新しいかたち, 誠信書房, 2006.
- 12) 鈴木浩明：快適さを測る—その心理・行動・生理的影響の評価, 日本出版サービス, 1999.
- 13) 川村彰：ドライビングシミュレータを用いた道路研究の可能性, 道路建設, No. 687, pp.62-63, 2005.
- 14) Kawamura, A., Maeda, C., Shirakawa, T., Ishida, T., Nakatsuji, T., and Himeno, K: Applicability of a Driving Simulator as a New Tool for the Pavement Surface Evaluation, *Proceedings of the SIIV2004 International Congress*, CD-ROM. 2004.
- 15) Kawamura, A., Shirakawa, T., and Maeda, T.: KIT Driving Simulator for Road Surface Evaluation, *Proceedings of the 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics*

- (SURF2004), CD-ROM, 2004.
- 16) Mechanical Simulation Corporation: *CarSim Reference Manual*, 2006.
 - 17) Kawamura, A., Takahashi, M. and Inoue, T.: Basic Analysis of Measurement Data from Japan in EVEN Project, *Transportation Research Record*, No.1764, pp.232-242, 2001.
 - 18) Sayers, M.W.: On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile, *Transportation Research Record*, No.1501, pp.1-12, 1995.
 - 19) 笠原篤, 加藤昌太郎: 国際ラフネス指数, 舗装, Vol.26, No.7, 1991.
 - 20) ISO: *Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: general requirements*, ISO2631-1, 1997.
 - 21) JIS: 全身振動 - 第 2 部: 測定方法及び評価に関する基本的要求, JIS B 7760-2, 2004.
 - 22) カヤバ工業出版株式会社編: 自動車のサスペンション, 山海堂, 2005.
 - 23) 足立修一: MATLAB によるデジタル信号とシステム, 東京電機大学出版局, 2002.
 - 24) 石田樹, 岳本秀人, 川村彰, 白川龍生: ドライビングシミュレータによる舗装路面の乗り心地・安心感評価, 舗装工学論文集, 第 9 巻, pp.49-56, 2004.
 - 25) Spangler, E.B., and Kelly, W.J.; Development and Evaluation of the Ride Number Concept, *Vehicle-Road Interaction, ASTM STP 1225*, B. T. Kulakowski, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.135-149 1994.
 - 26) 森 敏昭, 吉田寿夫: 心理学のためのデータ解析テクニカルブック, 北大路書房, 1990.
 - 27) 広津千尋: 医学・薬学データの統計解析, 東京大学出版界, 2004.
 - 28) 永田靖, 吉田道弘: 統計的多重比較法の基礎, サイエンス社, 2007.
 - 29) Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G. and Buchner, A.: G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences, *Behavior Research Methods*, Vol.39, No.2, pp.175-191, 2007.

(2010. 5. 28 受付)