

路面乗り心地の体感評価における 被験者数の設定方法および試験プロトコルの開発

Development of Panel Size Design Method and Test Protocol for Conducting a Pavement Subjective Ride Quality Rating

北見工業大学工学部 ○正会員 富山和也 (Kazuya Tomiyama)
北見工業大学工学部 正会員 川村 彰 (Akira Kawamura)
(独)寒地土木研究所 正会員 石田 樹 (Tateki Ishida)

1. はじめに

路面乗り心地の評価において、体感試験は、利用者の乗車感覚を直接測定可能なことから、非常に有効な手段である¹⁾。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、これは、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²⁾。そのため、体感による路面乗り心地の評価・解析においても、とりわけ統計的仮説検定(以下、「検定」とする)の適用事例は数多い³⁾⁴⁾。

検定において、誤った仮説を正しく棄却できる確率、即ち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する。他の試験条件が等しい場合、被験者数の増加は、検出力を高め、体感試験結果の信頼性と精度をより高いものとする。しかし、極端に多い被験者数は、全ての仮説を棄却してしまい、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、その有意性ゆえに結果を過大評価しかねない。一方、極端に少ない被験者数では、体感試験における検定仮説に対し、信頼性の高い結論を下すことが困難となる。そのため、試験計画段階において、試験目的に応じた必要最低限の被験者数を設定することが必要かつ重要である⁵⁾。

ASTM (American Society for Testing and Materials)は、路面乗り心地の体感試験プロトコルを規格化しており、主観評価平均値の標準誤差に基づく被験者数の設定方法を示している。この規格によれば、乗り心地評価誤差を許容範囲内に収めるためには、目安として36名以上の被験者数が必要としている⁶⁾。しかし、この場合、体感評価の信頼性と精度は、当該試験が終了するまで不明である。また、評価結果の標準誤差が許容範囲外となった場合、その試験結果は用いないものとしているため、体感試験にかかる時間と費用を無駄にしかねない。

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評価における被験者数の設定方法ならびに効果的・効率的かつ経済的な体感試験のプロトコルを開発することである。

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²⁾⁵⁾。ここで、検出力および有意水準は、それぞれ0.8, 0.05



図-1 KITDS の外観

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、試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⁷⁾。そこで、本研究では、(1) ドライビングシミュレータ(以下、「DS」とする)を用いた体感試験から効果量を推測し、(2) 検定力分析に基づく被験者数の設定方法を示すとともに、(3) 検出力および効果量を考慮した体感試験プロトコルの開発を行う。

2. DS による路面乗り心地の体感試験

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。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)。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。

2.1 KITDS の特徴

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り、路面プロファイルデータの利用は、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、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し、数センチメートル単位の路面波長を有する、ラフネスレベルでのデータが再現可能である。また、KITDS固有の機能として、路面プロファイルに起因する車両振動を、予め実路

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	-	-

走行試験や車両運動シミュレーションにより計測し、その際の前方視界画像データとともに再現することが可能である。本機能では、車両振動を直接再現するため、運転操作を伴わず、乗り心地データの解析において、運転操作や走行速度、走行軌跡の違いなどを排除できる。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。

2.2 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[®]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、汎用の車両運動シミュレーションソフトウェアである。

(1) 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」)⁹⁾結果から、測定延長 100m のデータを選定し、当該データを 3 回繰り返すことで、延長 300m を確保した。なお、路面プロファイルデータは、低速プロファイラである Dipstick[®]および水準測量によって測定されたものであり、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。

(2) 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) の人体振動評価基準における「非常に不快 (very uncomfortable)」の下限値である 1.25m/s² 以下となるよう^{10),11)}、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。

2.3 被験者および評価尺度

(1) 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、本試験で利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の体感評価を行った。

(2) 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: やや悪い」, 「1: 悪い」の 5 段階尺度を用いた。石田ら¹²⁾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。

3 被験者数の設定方法と体感試験プロトコルの開発

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、検定力分析による設定方法を示すとともに、検出力および効果量を考慮した体感試験プロトコルの開発を行う。

3.1 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、効果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) 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²⁾。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。

3.2 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⁵⁾。

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

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

表-2 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	-	-	-	-	-	-

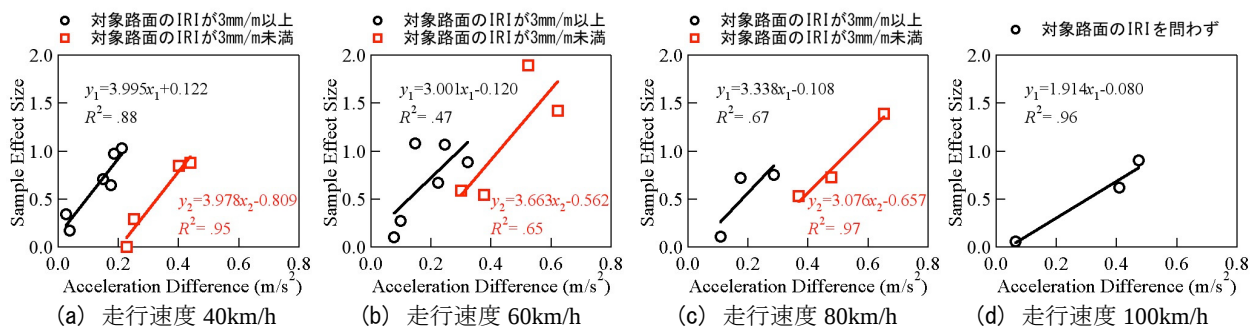
* 「加速度差」は実効値 (m/s^2)

図-2 加速度実効値の差と標本効果量の関係

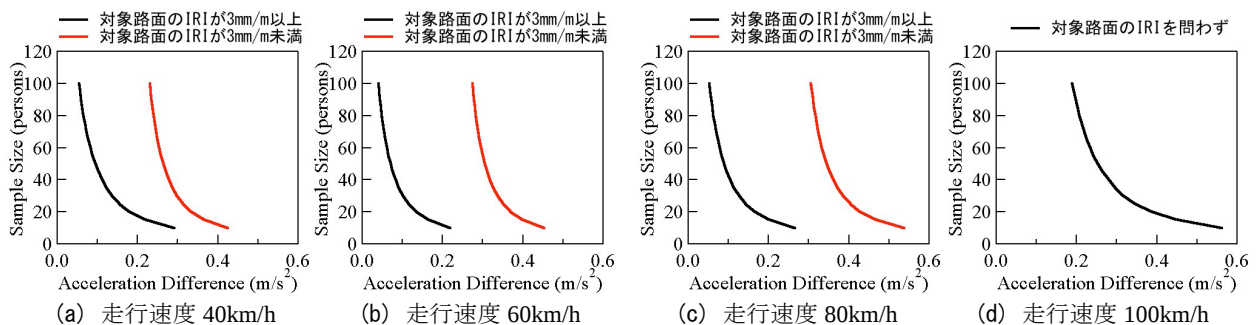


図-3 検定力分析に基づく被験者数の算定結果

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-2 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。

表-2 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/s^2 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/s^2 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-2 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。

3.3 被験者数の設定方法

路面乗り心地の体感試験に要する被験者数は、検定力分析に特化したソフトウェアである G*Power¹³⁾を用い、図-2 の回帰式から得られた標本効果量をもとに算定した。被験者数の算定結果を図-3 に示す。図を用いることで、路面水準および走行速度水準ごとに、乗り心地改善効果に基づく所要被験者数の算定が可能となる。ここで、対応のある t 検定における Cohen⁵⁾の効果量基準：「小: 0.2」, 「中: 0.5」, 「大: 0.8」を用いると、必要被験者数の目安は、路面および走行条件によらず、それぞれの効果量に対応し 199, 34, 15 名となる。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 名程度の被験者でも高い試験精度を確保できる。また、予め、乗り心地の差異を把握することが困難な場合には、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、次節で示すプロトコールに基づき体感試験を実施し、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。

3.4 試験プロトコールの開発

路面乗り心地の体感試験実施プロトコールは、(1) 評価対象路面選定、(2) 試験計画立案、(3) 被験者募集、(4) 評価走行、(5) 体感評価に分けられる⁶⁾。その後、得られた体感評価データは、統計的に解析され、その結果に基づき、舗装マネジメント実施の有無が判断される。統計解析として検定を用いる場合、有意な結果が得られれば、マネジメントを実施し、有意な結果が得られなければ評価結果は保留される。しかし、検定結果は被験者数に依存するため、極端に多いもしくは少ない被験者数では、信頼性・妥当性の高い結論を得ることは難しい。そこで、本研究では、検定力分析に基づき、2 路面間での乗り心地差異の程度である効果量を考慮し、乗り心地に有意な差があった場合、それを高い確率で検出するように被験者数を設定する方法を示した。以上の結果に基づき、検出力および効果量を考慮して開発した路面乗り心地の体感試験プロトコールを図-4 に示す。従来、統計解析において有意な結果が得られなかった場合、「差があるとはいえない」として、積極的な帰無仮説の採択は行わなかった。一方、本プロトコールでは、検出力を考慮することで、積極的な帰無仮説の採択が可能となる。また、効果量を求めるため、極端に多くの被験者により、微小な差を検出した場合に生じる、結果の過大評価を避けることができる。

4. まとめ

本研究は、従来、理論的根拠の不明であった路面乗り心地の体感試験における被験者数について、検定力分析に基づく合理的な設定方法を示すとともに、検出力および効果量を考慮した試験プロトコールを開発した。その結果、(1) 路面水準および走行速度水準ごとに、乗り心地改善効果を想定した必要被験者数の設定、ならびに(2) 体感評価を統計的に解釈する際の、積極的な帰無仮説の採択および被験者数に起因する結果の過大解釈の回避が可能となった。

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に影響を及ぼすとともに、試験コストとトレードオフの関係にあるが、本研究成果を用いることで、効果的・効率的かつ試験回数を最小化することで経済的な路面乗り心地の体感評価が期待できる。

参考文献

1) Janoff, M.S., Nick, J.B., Davit, B.S., and Hayhoe, G.F.: Pavement Roughness and Rideability, National

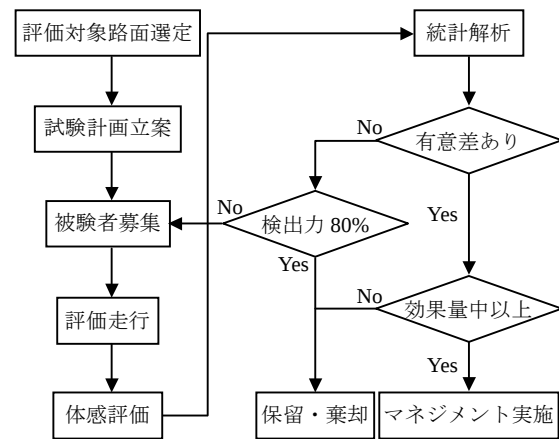


図-4 路面乗り心地の体感試験プロトコール

- Cooperative Highway Research Program Report 275, 1985.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Lawrence Erlbaum Assoc Inc, 1988.
- 6) American Society for Testing and Materials (ASTM): Standard Guide for Conducting Subjective Pavement Ride Quality Ratings, Annual Books of ASTM Standards, No.E1927-98 (Reapproved 2003), 2003.
- 7) 吉田寿夫：心理学研究法の新しいかたち, 誠信書房, 2006.
- 8) Mechanical Simulation Corporation: CarSim Reference Manual, 2006.
- 9) 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.
- 10) ISO: Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: general requirements, ISO2631-1, 1997.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.