

(34) ドライビングシミュレータを用いた

生体情報に基づく路面乗り心地評価システムの構築

Development of a Pavement Ride Quality Rating System
Based on Physiological Information by using a Driving Simulator富山和也¹・川村 彰²・石田 樹³・高橋 清⁴・秋田谷勇輝⁵

Kazuya Tomiyama, Akira Kawamura, Tateki Ishida, Kiyoshi Takahashi, and Yuki Akitaya

抄録：路面乗り心地に関する利用者評価の多くは、主観的なアンケートにより収集されるが、個人の振動感受性差による定量化の困難さや、客観性の低さが課題となっている。本研究では、ドライビングシミュレータ（DS）を用い、代表的な生体情報である心拍変動に基づく乗り心地評価システムを構築し、実道およびDS上での体感試験により、その有効性を検証した。その結果、路面に起因する車両振動がメンタルストレスに影響を与える場合、心拍変動の変化率は一定の傾向を示す再現性を有することがわかった。また、心拍変動による乗り心地評価システムは、実道およびDSともに有効であり、利用者意識に基づく高精度かつ客観的な路面モニタリングに寄与するものと期待できる。

キーワード：生体情報、心拍変動、乗り心地、路面評価、ドライビングシミュレータ

Keywords : physiological information, heart rate variability, ride quality, road surface evaluation driving simulator

1. はじめに

老朽化した社会資本が急増する昨今、優先的に補修が必要となる箇所を把握するため、その健全度を的確に評価することは極めて重要である¹⁾。また、利用者との直接の接点となる道路の舗装路面には、車両走行時の安全性や快適性など、利用者意識に基づく評価が必要である。特に、路面の主要な破損要因である平坦性は、走行車両の乗り心地に影響を及ぼすことから、利用者および管理者共通の関心事である²⁾。

利用者意識に基づく路面評価では、対象箇所で行走試験を実施し、直接利用者に意見を求める体感試験が実施される³⁾。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の確保など、多くの困難を伴う。一方、今日のバーチャル・リアリティ技術の進化により、ドライビングシミュレータ（以下、「DS」とする）を用いることで、安全かつ迅速な体感試験の実施が可能である⁴⁾。DSを用いた体感試験は、実道実車試験に比べて、被験者の安全性確保や試験条件の設定が容易なことから、今後もその需要は高まるものと考えられる。

体感試験において利用者評価の多くは、実験協力者（被験者）に直接乗車感覚を問う主観的なアンケート

により収集されるが、個人の振動感受性差に起因する評価のばらつきに伴う定量化の困難さや、自己申告であることによる客観性の低さが課題となっている⁵⁾。

そこで、本研究は、DSおよび生体情報を用いて、客観的かつ高精度に利用者意識に基づく路面モニタリングが可能な、乗り心地評価システムの構築を目的とする。はじめに、DSを用いた仮想道路環境の構築と、路面評価システムについて述べる。続いて、代表的な生体情報であり、比較的容易に測定可能な、心拍変動を用いた路面乗り心地のモニタリング方法を示す。最後に、DSおよび実道路環境下で、同一の評価シナリオによる体感試験を実施し、生体情報に基づく乗り心地評価システムの有効性について検討する。

2. DSを用いた路面評価システム

DSとは、バーチャル・リアリティ技術に基づき、実際に道路上を運転せずに、ドライバーの運転操作に応じた運転環境の変化をリアルタイムに乗員へ提供する装置である。北見工業大学では、路面乗り心地への社会的関心を背景に、路面評価に特化した機能を付加した、路面評価型DS（KITDS: Kitami Institute of Technology Driving Simulator）を開発している。KITDS

1：正会員 博(工) 北見工業大学 研究員 応用研究推進センター

(〒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 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

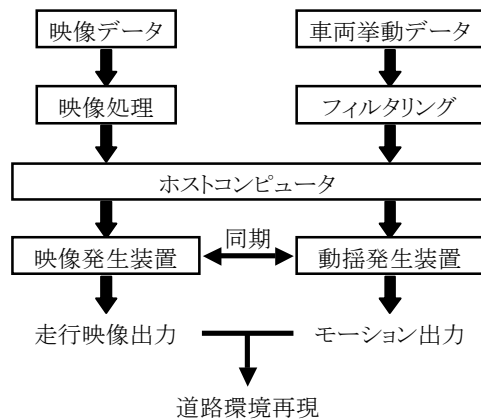
3：正会員 博(工) 北海道開発局苫小牧道路事務所 所長 (〒053-0816 北海道苫小牧市日吉町 2 丁目 1 番 5 号)

4：正会員 工博 北見工業大学 教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

5：学生員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)



図－１ KITDS の外観



図－２ KITDS による路面評価システム

の外観を図－１に示す。本研究では、路面評価型 DS である KITDS を用いた、路面評価システムについて概説する。

（１）KITDS の概要

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利用可能である。また、仮想道路環境の構築において、KITDS は、従来のコンピュータ・グラフィックス (CG) による方法に加え、汎用のビデオカメラで収集された実映像データを、同時に測定した車両挙動と同期し再現する機能を有する。本機能では、走行映像および車両挙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。図－２に KITDS による路面評価システムの概要を示す。

（２）走行データの収集

DS での体感試験に資する走行データは、実車両もしくは車両の数学モデルから得ることができる。実車

両を用いた場合、フロントウィンドウに設置した汎用のビデオカメラにより前方映像を記録し、車両の重心位置付近に設置した加速度センサもしくはジャイロセンサにより、車両の 6 分力特性を測定する。計測機器は、汎用性があり設置車両を選ばないため、道路パトロール車などを利用したデータ収集も可能である。また、実車両挙動および実映像データを用いるため、より実環境に近い状態での試験環境が構築できる。一方、車両の数学モデルを用いた場合、CarSim^{®6)}に代表される運動シミュレーションソフトを用いることで、室内において効率的に車両 6 分力および前方映像のアニメーションデータを得ることができる。

（３）振動加速度に着目した DS の乗り心地再現性

路面の乗り心地を把握する上で、車両バネ上上下下加速度（以下、「上下加速度」とする）は、利用者にとって最も体感しやすく、利用者評価と深い関係にあることが知られている⁷⁾。そのため、乗り心地の体感試験を実施する上では、DS コックピット上での振動再現性が非常に重要となる。KITDS の乗り心地再現性は、既往研究において⁸⁾、路面管理上重要な振動再現に優れていることが確認されている。

3. 生体情報に基づく路面乗り心地モニタリング

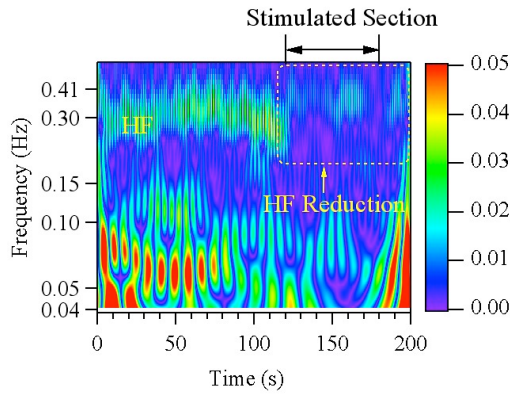
アンケートによる路面乗り心地評価は、利用者の乗車感覚を直接測定できる反面、自己申告であることによる客観性の低さが、評価結果を定量化する上での課題となっている。一方、生体情報として心拍数に着目し、心拍変動を連続ウェーブレット変換することで、従来では困難であった、平坦性に起因する潜在的メンタルストレスの把握が可能である⁹⁾。本章では、心拍変動による路面乗り心地のモニタリングおよび評価手法について概説する。

（１）心拍変動の概要

心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激によるストレスなどによって、時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎであり、呼吸や体温、メンタルストレスなどによって変化する、自律神経系の活動を表す重要な生体情報の一つである¹⁰⁾。自律神経系は交感神経系および副交感神経系の異なる活動動態を持ち、心拍変動に影響を及ぼす。とりわけ、心拍変動の高周波成分 (HF 成分: 0.15-0.4Hz) が副交感神経系の、低周波成分 (LF 成分: 0.04-0.15) が副交感神経系と交感神経系の活動を反映することが知られている。

（２）心拍変動のウェーブレット変換

心拍変動において着目すべきは、副交感神経系の活



図－3 心拍変動の連続ウェーブレット変換結果⁹⁾
(カラスケールはウェーブレット係数の絶対値)

動が、車両振動などの外部刺激に起因するメンタルストレスにより不活化され、HF成分が減衰することにある。そのため、HF成分は、フーリエ変換や自己回帰モデルによるスペクトル解析により評価され、自律神経系の活動動態を表す指標として用いられてきた。しかし、従来のスペクトル解析では、信号の定常状態が前提であり、また、時間に関する情報の取得が困難であるという問題がある。一方、ウェーブレット変換は、解析波形の定常性を仮定する必要がなく、解析対象に局在する波の時間情報と周波数情報を同時に識別可能な利点を有する¹¹⁾。

時間 u 、スケール s における信号 $f(t)$ の連続ウェーブレット変換は式(1)で与えられる。

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (1)$$

ここで、 $*$ は共役複素数を表す。また、本研究では、マザーウェーブレット $\psi(t)$ として、臨床医学における心拍変動の解析でしばしば用いられ¹²⁾、次式で定義される Morlet を用いた。

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (2)$$

図－3 に、心拍変動の連続ウェーブレット変換結果例を示す。図中、スカログラムは、心拍変動の振幅と対応したウェーブレット係数の絶対値を表し、周波数は対数表示とした。ここで、120 から 180 秒が平坦性低下区間であるが、区間中 HF 成分の減衰が確認できる。このように、心拍変動の連続ウェーブレット変換により HF 成分の減衰を確認することで、アンケート評価結果によらず、平坦性に起因する車両振動乗り心地と関連したメンタルストレスのモニタリングおよび評価が可能である⁹⁾。

4. 実道路環境再現による評価システムの検証

前章までに、DS を用いた路面評価システムおよび、

心拍変動による路面乗り心地のモニタリング方法について述べた。本章では、実道および仮想環境下で体感試験を実施し、DS を用いた心拍変動に基づく乗り心地評価システムの有効性について検討する。

(1) 体感試験条件

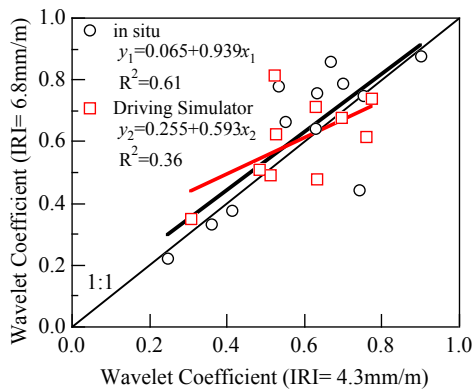
実道における体感試験は、平坦性水準の異なる 2 路面（路面 A, B とする）が連続した一般道路において、排気量 2000cc の乗用車を使用して行なった。各路面の走行延長は 500m であり、当該区間の制限速度 40km/h において、試行回数を 3 回とした。平坦性水準は、路面 A が国際ラフネス指数 (IRI: International Roughness Index) 4.3mm/m と「表面の損傷、供用後の舗装」¹³⁾ 相当であり、路面 B の IRI が 6.8mm/m と「大半に小さなくぼみ、損傷を受けた舗装」¹³⁾ 相当である。また、走行時に生じる加速度は、ISO2631-1 (1997)¹⁴⁾ の人体振動評価基準に基づき周波数重み付けした実効値で、路面 A が 0.20m/s^2 と「不快でない」¹⁵⁾ レベルであり、路面 B では 0.44m/s^2 と「少し不快」¹⁵⁾ なレベルである。なお、周波数重み付けしない場合の加速度実効値は、路面 A, B でそれぞれ 0.38 および 0.81m/s^2 である。また、2 章 (2) に基づき走行データを収集し、KITDS 上において、実道と同等の道路環境を再現し、体感試験を行なった。

(2) 実験協力者（被験者）

既往研究¹⁶⁾より、IRI が 3mm/m 以上の 2 路面間で、走行速度 40km/h における周波数重み付けしない加速度実効値差が 0.43m/s^2 の場合、統計的に乗り心地の差は大きく、体感試験に要する実験協力者（以下、「被験者」として統一）は 10 名以下で十分である。そこで、本研究では、被験者として、健常な 20 代男女各 2 名、計 4 名の協力を得た。なお、体感試験は、被験者に試験目的および条件に関し十分なインフォームドコンセントを行った後に実施した。被験者は、心拍数計測用の電極を装着後、実車では助手席に、DS では運転操作を行なわない助手席状態とし、心拍数の安定を確認してから各試験条件の走行を行った。

(3) 心拍変動による乗り心地評価結果の比較

心拍変動の連続ウェーブレット変換により、平坦性に起因する乗り心地と関連したメンタルストレスが把握できることを前述した。本節では、比較的平坦な路面 A と、平坦性が低下した路面 B での走行時のメンタルストレスについて、実道および DS 上での体感試験結果に基づき比較することで、心拍変動に基づく乗り心地評価システムの有効性について検討する。ここで、メンタルストレスの指標は、HF 領域における、ウェーブレット係数の二乗平均平方根 (RMS: Root Mean



図－４ 心拍変動の比較結果

Square) とする⁹⁾。時間－周波数領域における、の二次元平面上での信号 $S(x,y)$ のRMSは次式により与えられる。

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M S^2(x_i, y_j)} \quad (3)$$

なお、心拍変動は、予め平均値が 0、標準偏差が 1 となるよう正規化した。

図－４に実道および DS での仮想環境下における、2 路面に対するメンタルストレスの比較結果を示す。図中、心拍変動が欠測したパターンは除外している。

図－４より、2 路面間においてメンタルストレスに大きな違いは見られず、実道および DS 試験で、同様のばらつきとなった。一方、回帰直線においては、高い決定係数が得られなかった。原因として、個人差によるものがあげられ、メンタルストレスへの影響がない被験者では、2 路面間において HF 成分の変動がみられず、ばらつきが大きい結果となった。一方、メンタルストレスに影響を受ける被験者では、試行回数ごとに、心拍変動 RMS の絶対値は異なるものの、HF 成分の減少傾向が同様となり、ばらつきの小さい結果となった。なお、これらの傾向は、実道および DS 試験ともに確認された。以上より、被験者が平坦性に起因する車両振動によりメンタルストレスを受ける場合、HF 成分は、一定の減少傾向を示し、再現性を有することがわかった。また、実道と DS 試験で比較したところ、同様の結果となった。よって、代表的な生体情報である心拍変動を用いた乗り心地評価システムは、実道および DS を用いた仮想道路環境下のいずれにおいても有効であり、利用者意識に基づく高精度かつ客観的な路面モニタリングに寄与するものと期待できる。

5. まとめ

本研究では、DS を用いて生体情報に基づく路面乗り心地評価システムを構築し、実道および DS による

仮想道路環境下での体感試験により、その有効性を検証した。その結果、被験者が、平坦性に起因する車両振動によりメンタルストレスに影響を受ける場合、試行回数ごとに心拍変動 RMS の絶対値は異なるものの、HF 成分の減少傾向には再現性があることが確認できた。また、心拍変動を用いた乗り心地評価システムは、実道および DS を用いた仮想道路環境下のいずれにおいても有効であることことを示した。以上より、本研究は、従来手法では困難であった、利用者意識に基づく高精度かつ客観的な路面モニタリングに寄与するものと期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点化計画，<http://www.mlit.go.jp/common/000038075.pdf>, 2009.
- 2) 秋本 隆，鈴木康一，井上良和：ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発，舗装，Vol.36, No.8, pp.3-7, 2001.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Mechanical Simulation Corporation: CarSim Reference Manual, 2006.
- 7) 三浦登，福田水穂：自動車設計と解析シミュレーション，培風館，1990.
- 8) 富山和也，川村 彰，城本政一：路面評価型ドライビングシミュレータの乗り心地再現性について，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.65, V-051, CD-ROM, 2010.
- 9) 富山和也，川村 彰，高橋 清，石田 樹：生体情報を利用した路面乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリング，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，Vol.67, No.2, pp.I_125-I_132, 2012.
- 10) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, European Heart Journal, Vol. 17, No. 3, pp. 354-381, 1996.
- 11) Mallat, S. A.: Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999.
- 12) 石川康広：臨床医学のためのウェーブレット解析，医学出版，2000.
- 13) 土木学会 舗装工学委員会 路面性状小委員会：舗装工学ライブラリー1 路面のプロファイリング入門 -安全で快適な路面をめざして-，丸善，2003.
- 14) ISO: Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: general requirements, ISO2631-1, 1997.
- 15) 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.
- 16) 富山和也，川村 彰，石田 樹，高橋 清，中辻 隆：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，土木情報利用技術論文集，Vol.19, pp.285-292, 2010.