

(34) 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

Physiological Information for Pavement Health Monitoring based on Surface Ride Quality

富山和也¹・川村 彰²・高橋 清³・石田 樹⁴

Tomiya Kazuya, Kawamura Akira, Takahashi Kiyoshi, and Ishida Tateki

抄録：アンケートによる舗装路面の乗り心地評価は、道路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。本研究では、ドライビングシミュレータを用いた体感評価試験を実施し、代表的な生体信号である心拍変動の連続ウェーブレット変換により、平坦性に起因するメンタルストレスの検出を試みた。その結果、心拍変動の高周波成分 (0.15-0.4Hz) に着目することで、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となることがわかった。また、心拍変動により、客観的かつ高精度に乗り心地を評価することで、舗装健全度モニタリングの精度向上が期待できることを示した。

キーワード：生体情報，乗り心地，舗装健全度モニタリング，路面平坦性

Keywords : physiological information, ride quality, pavement health monitoring, road roughness

1. はじめに

今日、道路整備における量的充足に伴い、舗装路面の維持管理には、車両走行時の安全性や快適性など、利用者の視点を重視し、質的向上を目的とした対策が求められている。とりわけ、平坦性は路面の快適性や安全性に直結するため、道路利用者意識に基づき、その健全度を的確にモニタリングし、必要に応じて維持・修繕等の対策をとる必要がある。

利用者意識に基づく平坦性評価では、車両の振動乗り心地に立脚したものが数多く、人の乗車感覚を直接測定できることから、路面乗り心地の体感評価試験（以下、「体感試験」とする）がしばしば実施される。体感試験の多くは、「乗り心地が良い（悪い）」、「路面水準として許容できる（できない）」など、乗車感覚を表す言葉によるアンケートにより検討される¹⁾。しかし、アンケートによる乗り心地評価は、被験者の動的な振動感受性の差によるばらつきや、自己申告であることによる客観性の低さが、結果を定量化する上での課題となる。

本研究では、主観評価に加え、体感試験の客観性を補足するため、代表的な生体信号である心拍変動を用いた路面の乗り心地評価について検討する。心拍変動とは、心拍の一拍一拍の変動であり、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

活動を表す重要な指標の一つである²⁾。自律神経系は交感神経系及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事が知られている。

ここで、心拍変動の利用において着目すべきは、副交感神経の活動が、車両振動の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、フーリエ変換や自己回帰モデルによるスペクトル解析を用い、自律神経系の活動動態を推定する試みがなされてきた。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（位相）に関する情報が得られないという問題がある。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位置情報と周波数情報を同時に識別可能な利点を有する³⁾。そのため、心拍情報の解析にウェーブレット変換を適応する事例が多数報告されている⁴⁾。そこで、ドライビングシミュレータ（以下、「DS」とする）を用いた体感試験を実施、被験者の心拍数を計測し、時間-周波数の同時識別が可能な連続ウェーブレット変換を心拍変動に適用することにより、路面平坦性に起因する車両振動に対する、道路利用者のメンタルストレスの検出を試みる。

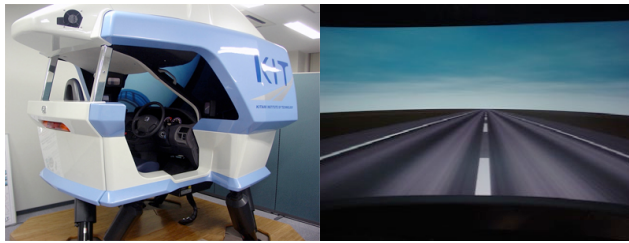
1：正会員 博(工) 北見工業大学 研究員

(〒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)

3：正会員 工博 北見工業大学 教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

4：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)



図－１ KITDS の外観及び再現映像

許容できますか？

はい ☐

いいえ ☐

わからない ☐

5 非常によい

4 よい

3 どちらでもない

2 わるい

1 非常にわるい

0

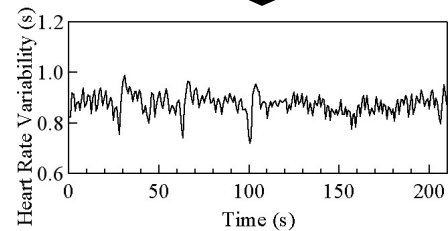
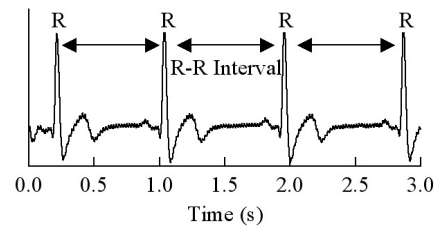
図－２ アンケート評価項目

2. DS による体感試験

体感試験を実施するにあたり、実道における試験では、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とまう。一方、DS を用いた体感試験では、安全性の確保や実験条件の容易な設定、同一条件で繰り返し試験が行えるなど多くの利点を有する。筆者らの研究室では人と路面をつなぐインターフェイスとして、路面評価型 DS (KITDS: Kitami Institute of Technology Driving Simulator) を開発している。KITDS は、安全運転教育や景観評価といった従来の機能に加え、実路面プロファイルや実車両の挙動を前方映像とともに再現可能な DS である(図－１)。KITDS により、従来では困難とされていた路面損傷に起因する車両の振動乗り心地の評価を、安全かつ効率的に実施する事が可能となった。そこで、本研究では、KITDS を用いて体感試験を行った。

(1) 実験条件

路面条件は、平坦性の国際標準指標である IRI (International Roughness Index) が 2, 3 及び 5mm/m に相当するプロファイル 3 水準を, PIARC (世界道路協会) の国際共通試験結果⁵⁾から選定した。KITDS への入力となるデータは、選定したプロファイル上を、IRI の標準計算速度と等しい 80km/h で走行した際の車両挙動を、汎用の車両運動シミュレーションソフトウェアである CarSim^{®6)}で計算したものである。KITDS による加振時間は各プロファイル 60 秒間である。また、心拍情報測定時の平常値を測定するため、振動区間前後にそれぞれ 120 秒と 60 秒の無振動区間を設けた。



図－３ 心拍変動の例

(2) 実験協力者(被験者)

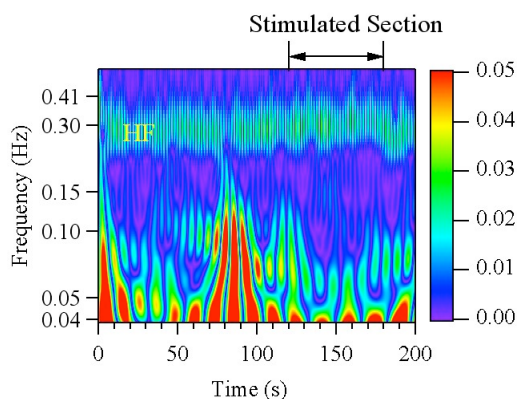
実験協力者(以下、「被験者」として統一)として、試験目的に同意の上、健康な男女 37 名(20 代 16 名, 60 代以上 11 名)の協力を得た。被験者は、後述の心拍数計測用の電極を装着後、KITDS に乗車、心拍数の安定を確認してから各実験条件の走行を行った。また、各振動条件を体験後直ちに、図－２に示す許諾(左)およびラインスケール(右)を用いた乗り心地に関する設問に回答した。

(3) 心拍情報の計測

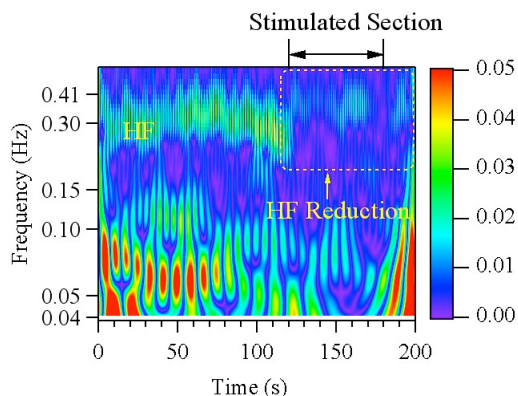
心電図計の進歩により、様々な状況下での、心拍計測が容易となった。計測は、小型の電極により被験者への負担も少なく、振動条件下におけるノイズや測定誤差に対しても頑健である。本研究では、心拍数の計測に TEAC 社製の Polymate II AP216 を用いた。実験時、計測用電極を胸部 2 カ所、アース用電極を右腕 2 カ所に装着し、逐次計測器に接続した PC で信号をモニタリングしながら心拍数の収録を行った。なお、心拍数のサンプリング間隔は 0.001 秒である。

3. 心拍変動による路面の乗り心地評価

心拍数の周期は一定でなく、時間とともに変化する。心拍変動とは、図－３に示すように、心拍の一拍一拍の間隔(R-R 間隔)を時系列で表したものである²⁾。はじめに、心電図から R 波と呼ばれる特徴的なピークを抽出し、R-R 間隔を求め、続いて、一定間隔でサンプリングされた心拍変動データとするため、サンプリング間隔が 0.1 秒となるよう R-R 間隔の補間処理を行った。こうして得られた心拍変動データに、連続ウェーブレット変換を適用し、副交感神経系の活動の把握を試みた。



(a) 副交感神経系（高周波成分）に反応無し



(b) 副交感神経系（高周波成分）に反応あり

図－４ 心拍変動の連続ウェーブレット変換結果

(1) 心拍変動データの連続ウェーブレット変換

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(1)式で与えられる³⁾.

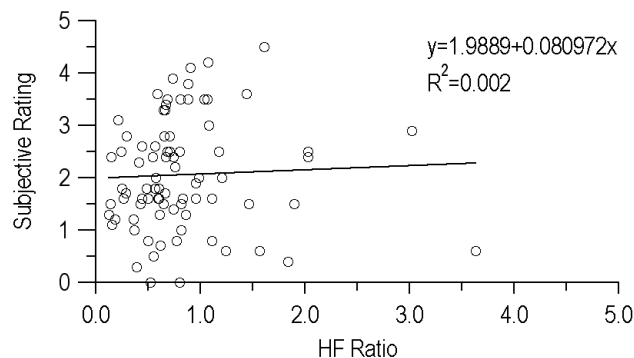
$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (1)$$

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 Morlet を用いた.

(2) 心拍変動による健全度モニタリング

心拍変動は周波数領域において, HF (0.15-0.4Hz) と LF (0.04-0.15Hz) の帯域にピークを持ち, HF は副交感神経系の, LF は副交感神経系と交感神経系の活動に関与することを上述した. 特に, 人が外部から振動などの刺激によりストレス負荷を受けると, HF 成分が減衰することが知られている²⁾. そこで, 本研究では, 乗り心地に関連した心拍変動の指標として, HF 成分に着目した.

図－４に心拍変動の連続ウェーブレット変換結果の一例を示す. 図中, スカログラムは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. また, 120 から 180 秒が平坦性に起因する振動区間である. 図－４(a)の例では, 振動区間中, HF 成分に変化は見られない. 一方, 図－４(b)の例では, 振動区間中, HF 成分の減衰が確認できる. 図－４(b)のように, HF



図－５ HFR とラインスケール評価の相関

成分の減衰が確認できる場合は, 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に対し潜在的にメンタルストレスを受けているといえる. 以上より, 心拍変動の連続ウェーブレット変換により, 平坦性に起因する被験者の潜在的ストレスの把握が可能である.

(3) 乗り心地評価指標としての心拍変動

心拍変動の連続ウェーブレット変換により, 平坦性に起因する被験者の潜在的なメンタルストレスが把握できることを上述した. そこで, メンタルストレスの指標として, 振動区間 60 秒と振動前の 60 秒間の, 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) の比を HF 比 (HFR: HF Ratio) として定量化する. 振動区間および振動前のウェーブレット係数の RMS を $S_{rms,v}$, $S_{rms,s}$ とすると, HFR は次式により求められる.

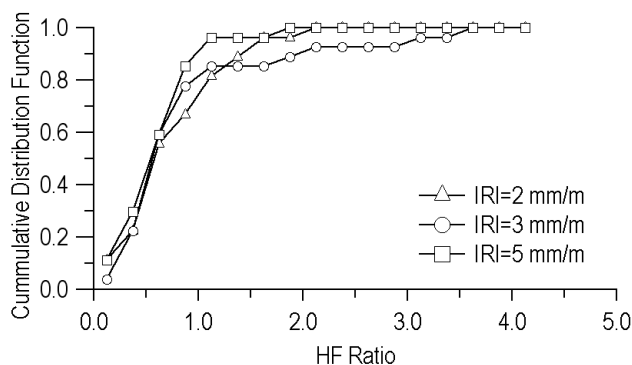
$$HFR = \frac{S_{rms,v}}{S_{rms,s}} \quad (2)$$

なお, 時間一周波数領域における, $N \times M$ 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.

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

(2)式より, HFR が 1.0 未満であれば, 振動区間において, 副交感神経系 (HF 成分) の減衰が認められ, 被験者はメンタルストレスを受けていることになる.

ここで, 乗り心地に関して, 生体信号による客観評価と, 自己申告による主観評価の関係を調べるため, HFR とラインスケール評価値の相関関係を図－５に示す. 図より, HFR と主観評価値に明確な相関関係は得られなかった. 一方, 図－６に示す, 各路面水準における HFR の累積分布関数より, IRI=3 および 5mm/m の路面においては, 8 割以上の被験者で HFR の減少が確認できるのに対し, IRI=2mm/m では, その割合が 8 割に満たないことがわかる. また, IRI が増加するに従い, HF 成分の減少する割合が大きくなることがわかる. 以上より, ラインスケールでは良好な評価を下



図－6 各路面水準における HFR の累積分布関数

表－1 心拍変動による体感試験結果の分類

心拍変動	主観評価	Class	指 標
反応なし HFR ≥ 1.0	許容できる	I	パネル評価 心拍変動
	許容できない	II	パネル評価
	わからない	III	心拍変動
反応あり HFR < 1.0	許容できる	III	心拍変動
	許容できない	I	パネル評価 心拍変動
	わからない	III	心拍変動

している場合でも、潜在的にメンタルストレスを受けている場合があり、HFR を用いることで、客観的に乗り心地に対するメンタルストレスを把握することが可能であるといえる。ただし、HFR の評価基準はなく、路面管理に資する閾値の設定が今後の課題である。なお、HFR を従属変数、性別、年齢（20 代および 60 代以上）および IRI を独立変数とし、分散分析により 5% 水準で二次の交互作用まで検定した結果、全ての効果で有意な結果は得られなかった。

（４）心拍変動による路面許容度の補正

路面管理の実務上、利用者の乗り心地の許諾は重要な評価項目である。そこで、乗り心地に対する被験者の許容度を把握するため、心拍変動の反応と主観による許容度評価の関係について、表－1 に示すように、Class I から Class III の 3 通りに分類した。表中、「指標」とは、当該 Class において、利用可能な評価指標である。以上の条件に基づき、体感試験結果を分類したところ、全体の 39.5% が統計的 95% 信頼区間（以下、「信頼区間」とする）29.6-50% の範囲で Class I に分類され、8.6%（信頼区間：4.2-16.8%）および 51.9%（信頼区間：41-62%）がそれぞれ Class II、Class III に分類される。ここで、Class III に分類された場合、心拍変動と主観評価で不整合が生じており、被験者は潜在的にメンタルストレスを受けているといえる。また、全体の半数以上が Class III に分類されており、主観評価による乗り心地評価の限界が窺える。そこで、体感試験精度の向上を目的に、Class III に分類された主観評価

を以下の基準により補正する。

- 主観評価が「許容できる」もしくは「わからない」となった場合でも、HFR が 1.0 未満となれば、評価を「許容できない」に置換する。
- 主観評価が「わからない」であり、HFR が 1.0 以上の場合、評価を「許容できる」に置換する。

上記の基準により主観評価結果を補正したところ、IRI=2, 3 および 5mm/m における、路面の許容率が、それぞれ、40.7, 44.4 および 29.6% 低下した。

以上より、自己申告による主観評価に加え、心拍変動の反応を考慮することで、乗り心地に基づく舗装健全度のモニタリング精度向上への寄与が期待できることがわかった。

4. まとめ

アンケートによる乗り心地評価は、被験者の乗り心地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課題となっていた。本研究では、路面の体感評価において、従来の自己申告によるアンケートに加え、代表的な生体信号である心拍変動による HFR を提案し、客観的かつ高精度に乗り心地の把握が可能であることを示した。特に、従来では困難であった、潜在的メンタルストレスの検出が可能となり、心拍変動を考慮することで、乗り心地に基づく舗装健全度のモニタリング精度向上が期待できることがわかった。一方、心拍変動の HFR を用いた路面評価において、管理基準値の設定が今後の課題である。

参考文献

- ASTM: Standard Guide for Conducting Subjective Pavement Ride Quality Ratings, ASTM No.E1927-98, 1998.
- 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.
- Mallat, S. A.: Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999.
- Kuklin, S.G., Dzizinskii, A.A., Titov, Y.M., and Temnikov, A.A.: Continuous Wavelet Analysis: A New Method for Studying Nonstationary Oscillations in the Cardiac Rhythm, Human Physiology, Vol.32, No.1, pp.116-121, 2006.
- 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.
- Mechanical Simulation Corporation: CarSim Reference Manual, 2006.