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

富山和也¹・川村 彰²・高橋 清³・石田 樹⁴

¹正会員 北見工業大学研究員 SVBL (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: tomiyaka@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 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)

E-mail: kawamuak@mail.kitami-it.ac.jp

³正会員 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)

E-mail: kiyoshi@mail.kitami-it.ac.jp

⁴正会員 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)

E-mail: ishida-t22ae@hkd.mlit.go.jp

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車両振動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が向上することを示した。

Key Words : 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。従来、体感試験の多くは、「乗り心地が良い（悪い）」や「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ことが一般的である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。

本研究の目的は、アンケートによる主観評価に加え、体感試験の客観性を補足するため、代表的な生体情報である心拍変動を用いた、路面の乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリング手法の開発である。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」²⁾を指すものとする。乗り心地は、舗装技術基準における必須の性能指標の一つである、平坦性に要求される路面の重要な機能である³⁾。

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⁴⁾。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。

ここで、心拍変動の利用において着目すべきは、副交感神経系の活動が、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⁹⁾。そのため、近年、ウェーブレット変換を用いた、心拍変動の時間-周波数解析が注目を集めている⁹⁾。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¹⁰⁾。

そこで、本研究では、体感試験により、道路利用者の心拍変動を計測し、心拍変動のウェーブレット変換を用いた乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリングについて検討する。なお、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

DSを用いた体感試験は、実路での走行試験に比べ、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。そこで、筆者らの研究室では、安全かつ効率的に路面損傷に関する体感試験を実施するため、路面評価型DS（KITDS: Kitami Institute of Technology Driving Simulator）を開発し、乗り心地と関連した車両振動の高い再現性を確認している¹¹⁾。KITDSの外観を図-1に示す。本章では、KITDSの特徴を概説し、体感試験の概要について述べる。

(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比較長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。KITDSは、路面プロファイルに起因する車両振動を、予め実路走行試験や車両運動シミュレーションにより計測し、その際の前方向視画像データとともに再現する固有機能を有する^{12,13)}。KITDSにおける車両振動データ再現の概要を図-2に示す。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、

図-1 KITDSの外観

図-2 KITDSにおける車両振動データ再現の概要

図-3 体感試験における路面プロファイル

体感評価において、運転特性など、乗り心地以外の要因を排除するため、本機能を用いた。

(2) 実験条件

体感試験における路面条件は、車両振動に基づく乗り心地と対応し、平坦性の国際標準指標であるIRI (International Roughness Index)が2, 3および5mm/mの3水準とし、それらに相当するプロファイルをPIARC (世界道路協会) の国際共通試験 (通称「EVEN試験」) 結果¹⁴⁾から選定した。試験に用いたプロファイルを図-3に示す。なお、路面プロファイルデータは、「True Profile」とよば

図-4 KITDSにおける上下振動加速度の再現

表-1 体感試験における振動条件

振動条件	路面条件 (IRI: mm/m)	上下加速度 実効値(m/s ²)
1	2	0.48
2	3	0.84
3	5	1.13

写真-1 心拍数計測装置 Polymate II AP216 (TEAC)

れる、手押し式の路面形状測定装置であるDipstick[®]プロファイラおよび水準測量によって測定されたものであり、サンプリング間隔は0.025mである。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。

KITDSへの入力となる車両振動および前方視界画像データは、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[®] 15)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。走行条件は、路面プロファイル上で、IRIの標準計算速度と等しい80km/hの直線走行とした。KITDSによる加振時間は各プロファイル60秒間である。KITDS上での車両挙動のうち、乗り心地と関係の深い上下振動加速度について、入力振動および再現振動を図-4に示す。図より、パルス成分において入出力間に

図-5 アンケート評価項目

相違が見られるが、既往研究¹¹⁾において、筆者らは、路面の維持管理上対処すべき、乗り心地と関連した車両振動の再現性として問題ないことを確認している。また、表-1に、路面条件およびその時の振動区間における上下加速度実効値を示す。振動区間前後には、心拍変動の平常値を測定するため、それぞれ120秒と60秒の無振動区間を設けた。なお、道路景観など平坦性以外の条件は、各走行パターンで一定とし、振動の提示順序に起因する係留効果を低減するため、被験者毎に、路面条件をランダムに割り当てた。

(3) 心拍情報の計測

心電図計の進歩により、さまざまな状況下での、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、振動条件下での測定も可能である。本研究では、心拍数の計測に、写真-1に示すTEAC社製のPolymate II AP216を用いた。体感試験では、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。

(4) 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、被験者数の最適化に関する既往研究に基づき¹⁶⁻¹⁸⁾、健康な男女37名(20代16名、60代以上11名)の協力を得た。また、被験者には、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。被験者は、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-5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。本スケールは、AASHO道路試験¹⁹⁾や、乗り心地指向の路面指標であるRide Number (RN)の根拠となった体感試験²⁰⁾において用いられたものを、日本語化したものである。

図-6 心拍変動の算出方法

3. 心拍変動による健全度モニタリング

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、図-6に示すように、R-R間隔と呼ばれる心拍の一拍一拍の間隔を時系列で表したものである⁴⁾。本研究では、体感試験より得られた心拍情報から、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間隔に補間処理を施した。こうして得られた心拍変動データにウェーブレット変換を適用し、メンタルストレスと関係のある副交感神経系の活動を把握することで、心拍変動を用いた乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリングを検討する。

(1) 心拍変動のウェーブレット変換

ウェーブレット変換には、離散変換と連続変換とがあるが、とりわけ後者は、スカログラム (Scalogram) と呼ばれる一種の等高線表示により、周波数情報と位置情報を視覚的に理解することができる¹⁰⁾。そこで、本研究では、心拍変動の連続ウェーブレット変換による、乗り心地モニタリングについて検討する。

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²¹⁾、次式で定義されるMorletを用いた。

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

(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-7 心拍変動の連続ウェーブレット変換結果例

なお、連続ウェーブレット変換にはWaveMetrics社のIGOR Pro 6.0²²⁾を用いた。

(2) 心拍変動による乗り心地評価

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前述した。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⁴⁾。そこで、本研究では、心拍変動による乗り心地評価において、ウェーブレット変換における時間-周波数領域でのHF成分に着目する。

図-7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。また、120から180秒が平坦性に起因する振動区間である。図-7(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-7(b)の例では、振動区間中、HF成分の減衰が確認できる。図-7(b)のように、HF成分の減衰が確認できる場合は、アンケート評価結果ならず、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が把握可能であるとわかった。

図-8 HFRとラインスケール評価の相関

図-9 各路面水準におけるHFRの累積分布関数

(3) 乗り心地評価指標の開発

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前述した。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60秒の、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: Root Mean Square）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。

$$HFR = \frac{S_{rms,v}}{S_{rms,s}} \quad (3)$$

なお、時間-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。

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M S^2(x_i, y_j)} \quad (4)$$

式(3)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、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ているといえる。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、図-8にHFRとラインスケール評価値の相関関係を示す。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。このことから、主観評価は、車両振動と関係したメンタルストレスを必ずしも反映せず、自己申告による乗り心地評価の限界が窺える。一方、

表-2 心拍変動による体感試験結果の分類

心拍変動応答	主観評価	Class	指標
基準値以上	許容できる	I	パネル評価
	許容できない	II	心拍変動
	わからない	III	心拍変動
基準値未満	許容できる	III	心拍変動
	許容できない	I	パネル評価
	わからない	III	心拍変動

図-9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HF成分の減衰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成分の減衰割合が大きくなることわかる。例えば、HFRが0.88において、IRIが2mm/mから5mm/mに上昇した場合、累積分布関数は0.67から0.85となり、HFが減衰する被験者の割合が2割近く増加する。以上より、自己申告では良好な評価を下している場合でも、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、客観的に被験者の乗り心地感覚を把握することが可能である。ただし、HFRの評価基準は、今後、体感評価データを蓄積し、評価対象路線の走行速度等の道路利用実態に即した値を設定する必要がある。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評価精度向上

利用者の路面水準の許諾は、補修の必要性の判断と直結するため、路面管理の実務上、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、HF成分の応答と主観による許容度評価の関係について、次のClass IからClass IIIの3通りに分類した。

- Class I** : HFRが評価基準値以上であり、自己申告では「許容できる」、もしくはHFRが評価基準値未満であり、自己申告では「許容できない」場合であり、HF成分の応答と自己申告が一致する。この場合、乗り心地評価は、心拍変動と自己申告のいずれを用いても可能である。
- Class II** : HFRは評価基準値以上であるが、自己申告では「許容できない」場合であり、HF成分の応答と自己申告は一致しない。この場合、乗り心地評価は、安全側として自己申告を用いて行う。
- Class III** : HF成分が評価基準値未満であるにもかかわらず、自己申告では「許容できる」場合であり、HF成分の応答と自己申告は一致しない。また、自己申告が「わからない」となる場合も含む。この場

表-3 自己申告評価と心拍変動に基づく評価の分類結果

被験者	振動条件 1 (IRI=2 mm/m)			振動条件 2 (IRI=3 mm/m)			振動条件 3 (IRI=5 mm/m)		
	評価*	HFR	Class	評価*	HFR	Class	評価*	HFR	Class
1	1	0.25	III	1	0.43	III	-1	0.18	I
2	-1	0.61	I	-1	0.48	I	-1	0.57	I
3	1	0.59	III	0	0.83	III	-1	0.60	I
4	0	0.74	III	0	2.03	III	-1	1.17	II
5	1	0.67	III	1	0.68	III	1	0.50	III
6	1	0.66	III	1	0.57	III	-1	0.60	I
7	1	2.03	I	-1	3.63	II	-1	0.44	I
8	1	0.90	III	1	0.71	III	1	0.88	III
9	1	1.03	I	1	1.06	I	1	0.88	III
10	0	0.64	III	0	0.67	III	-1	1.24	II
11	1	0.66	III	-1	0.61	I	1	1.11	I
12	-1	1.11	II	1	0.76	III	-1	1.84	II
13	1	0.68	III	1	1.07	I	1	0.81	III
14	0	1.21	III	-1	0.86	I	-1	0.52	I
15	1	0.41	III	1	0.57	III	-1	0.15	I
16	1	1.08	I	-1	1.90	II	-1	0.81	I
17	1	0.15	III	-1	0.13	I	-1	0.50	I
18	-1	1.46	II	1	0.98	III	-1	0.77	I
19	-1	0.95	I	-1	0.55	I	-1	0.14	I
20	1	0.25	III	1	0.66	III	1	0.37	III
21	1	1.44	I	1	0.29	III	1	0.62	III
22	1	0.44	III	1	0.55	III	1	0.95	III
23	1	1.61	I	1	0.74	III	0	0.70	III
24	-1	0.82	I	-1	0.39	I	-1	0.80	I
25	1	0.21	III	1	0.29	III	-1	0.36	I
26	1	0.65	III	1	3.02	I	-1	0.74	I
27	0	1.57	III	1	0.80	III	1	0.27	III

*評価 1: 許容できる, 0: わからない, -1: 許容できない

合、被験者は、潜在的にメンタルストレスを受けていると考えられるため、心拍変動の応答に基づき、乗り心地を評価する必要がある。

表-2は、以上の分類をまとめたものである。表中、「指標」とは、当該Classにおいて、利用可能な乗り心地評価指標を表す。なお、HFRの評価基準値については、前述の通り、多くの体感データを蓄積し、道路利用実態に即した値を設定する必要がある。表-3に、各振動条件における各被験者の自己申告評価、HFR、およびHF成分の減衰を確認するため、HFRの基準を1.0とした時の、

表-2に基づく評価の分類を示す。表-3より、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、心拍変動と自己申告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事に注意を要する。着目すべきは、全体の半数以上がClass IIIに分類されている点である。また、DSによる体感試験での走行シナリオにおいて、道路景観など平坦性に起因する車両振動以外の要素が等しいことを鑑みると、被験者に及ぼす影響は振動要因のみであり、自己申告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、潜在的にメンタルストレスを受けており自己申告による評価が困難と分類されたClass IIIについて、以下の基準により補正する。

- 自己申告が「許容できる」もしくは「わからない」となった場合でも、HFRが評価基準値未満となれば、評価を「許容できない」に置換する。

- b) 自己申告が「わからない」であり、HF成分の減衰が認められない場合、評価を「許容できる」に置換する。

例として、HFRの評価基準値を、0.5、0.8および1.0とした時の許容度の補正結果を図-10に示す。ここで、HFRの評価基準が0.5未満（ $HFR < 0.5$ ）の場合、振動区間におけるHF成分の減衰を安静時の50%まで許容し、0.8未満（ $HFR < 0.8$ ）では20%、1.0未満（ $HFR < 1.0$ ）では全く許容しないように、値が1.0に近づくほど、評価は厳しくなる。また、図-10には、各路面条件において、ライアン法による多重比較²⁹⁾により、5%水準で有意となる組み合わせを示した。図より、 $HFR < 0.5$ の場合、どの路面条件においても自己申告評価と有意な差は見られなかった。一方、最も厳しい基準である $HFR < 1.0$ の場合には、全ての路面条件で、自己申告評価との差が有意となり、路面許容度30%以下となった。とりわけ、 $IRI = 5\text{mm/m}$ では、許容できる割合が10%以下となった。また、 $IRI = 2$ および 3mm/m の場合では、許容度が40%以上低下しており、多くの被験者が、少なからず潜在的なメンタルストレスを受けていることがわかる。 $HFR < 0.8$ では、 $IRI = 2$ および 3mm/m において、自己申告評価との差が有意となった。また、 $IRI = 3\text{mm/m}$ では、 $HFR < 1.0$ と $HFR < 0.8$ において、 $HFR < 0.5$ との差が有意となった。これは、平坦性に起因する車両振動によって、強いメンタルストレスを受ける被験者とそうでない被験者とで、ばらつきが生じていることを示している。このことから、道路利用者の乗り心地に関する許容度の閾値が、 $IRI = 3\text{mm/m}$ 付近にあるものと示唆される。ただし、この結果は、車両の速度などの走行条件に影響されることに注意を要する。

以上より、自己申告による主観評価に加え、心拍変動の応答を考慮することで、被験者の受けるメンタルストレスの度合いを定量的に評価可能であり、乗り心地に基づく舗装健全度モニタリングの精度が向上することがわかった。

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を用いた、乗り心地に基づく舗装路面の健全度モニタリングについて検討した。本研究のまとめを以下に示す。

- ・ 心拍変動において、メンタルストレスと関連するHF成分の指標としてHFRを提案し、客観的に平坦性に起因する車両振動乗り心地の評価が可能であることを示した。また、IRIが増加するに従い、HFRが小さくなる、即ちメンタルストレスを受ける割合が大きくなることが確認できた。
 - ・ 心拍変動におけるHF成分の応答に基づき、被験者の自己申告評価をClass IからClass IIIの3つのクラスに分類した。Class IIIに分類された場合、無意識のうちにストレスを受けていると考えられるため、心拍変動の応答に基づき、乗り心地を評価する必要があることを示した。また、全体の半数以上がClass IIIに分類されたことから、自己申告による乗り心地評価の限界が示唆された。
 - ・ Class IIIに分類されたパネル評価値を、HFRに基づき補正することで、体感評価の精度が向上することを確認した。特に、HFRの基準を厳しくした場合、路面水準によっては、その許容度が、自己申告での評価に比べ40%以上低下すること、およびメンタルストレスの度合いにばらつきが生じることがわかった。
- 以上より、従来では困難であった、路面乗り心地に対する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モニタリング精度の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、体感評価データを蓄積し、評価対象路線の走行速度等の道路利用実態に即した管理基準値の設定が今後の課題である。

参考文献

- 1) ASTM: Standard Guide for Conducting Subjective Pavement Ride Quality Ratings, ASTM No.E1927-98, 1998.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1985.
- 6) 大谷和則, 木滝徹, 斉藤義明: 時間周波数解析による周期運動時心拍変動の自律神経系成分の抽出, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J81-D-II, No.2, pp.429-436, 1998.
- 7) Ishikawa Y., and Mochimaru F.: Wavelet Theory-Based Analysis of High-Frequency, High-Resolution Electrocardiograms: A New Concept for Clinical Uses, *Progress in Biomedical Research*, Vol.7, No.3, pp.179-184, 2002.
- 8) Mochimaru F., Fujimoto Y., and Ishikawa Y.: Detecting the Fetal Electrocardiogram by Wavelet Theory-Based

- Methods, *Progress in Biomedical Research*, Vol.7, No.3, pp.185-193, 2002.
- 9) 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.
- 10) Mallat, S. A.: *Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Mechanical Simulation Corporation: *CarSim Reference Manual*, 2006.
- 16) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹: 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ールの開発, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 67号, E-02 (CD-ROM), 2011.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) WaveMetrics, Inc.: *IGOR Pro Manual*, 2007.
- 23) 永田靖, 吉田道弘: 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社, 2007.

(2011.10.21 受付)

PHYSIOLOGICAL INFORMATION FOR PAVEMENT HEALTH MONITORING BASED ON SURFACE RIDE QUALITY

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Kiyoshi TAKAHASHI
and Tateki ISHIDA

Pavement ride quality testing has traditionally been based on subjective questionnaire ratings. The questionnaire survey has ability to directly measure the sense of road users' ride quality. However, it is difficult to quantify the evaluation results based on the questionnaire due to its lack of objectivity. This study examines pavement health monitoring method using physiological information such as heart rate variability (HRV) for detecting mental stress of road users toward pavement ride quality. First, a results of a driving simulator experiment shows that potential mental stress caused by road roughness can be observed in high-frequency oscillations in 0.15-0.4Hz of HRV processed by continuous wavelet transform. Then, the high-frequency oscillations of HRV is summarized as an index related to the mental stress that makes objective ride quality evaluation possible. Finally, this study indicates that the index contributes to improve the accuracy of pavement health monitoring based on surface ride quality.