

心拍数変動を用いた路面の 乗り心地評価方法

石田 樹¹・川村 彰²・Alimujiang Yiming³・富山 和也⁴・中辻 隆⁵

¹正会員 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)

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) 北見工業大学非常勤研究員 SVBL (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

⁴学生員 修(工) 北見工業大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

⁵正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒068-8788 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

本研究の目的は、路面の乗り心地評価のための定量的かつ客観的指標の開発である。ドライビングシミュレータを用いて乗り心地の主観評価を行うとともに、平坦路および凹凸路において、ストレスの定量的・客観的評価に有効とされる心拍数変化を計測した。平坦路に比べ凹凸路面走行時の被験者の心拍数は有意に増加した。上下加速度が増加するに従い心拍数の増加量は増加し、心拍数増加量が大きいほど主観による乗り心地評価は悪化する傾向が見られた。被験者ごとの回帰分析により、心拍数増加量により主観評価を説明するモデルを提案すると共に、被験者の振動刺激への感受性を考慮することが重要であることを示した。

Key Words : ride quality, roughness, heart rate, IRI, driving simulator

1. 背景と目的

我が国の高速道路や国道の路面管理において従来用いられてきた方法は、主な路面の損傷形態であるわだち掘れ量、平坦性、ひびわれ率のそれぞれに対して管理上の閾値を設けるか¹⁾、それぞれの損傷の程度から導かれる総合評価指標²⁾によって路面状態を評価し、維持修繕事業箇所の優先順位付けと予算配分を行うものである。ここで用いられる閾値や総合評価指標は、主として道路技術者の経験に基づく技術的観点から路面を評価したものであり、快適性や走行安全性などの道路利用者の評価観点は盛り込まれていないため、道路の快適性を評価する手法の整備が必要であると思われる。

路面凹凸の状態と走行快適性の関係については多くの既往研究³⁾があり、その多くは路面の平坦性と乗り心地の関係を被験者の主観評価により検討したものである。被験者による主観評価は、人の感覚を直接計測することができる点で優れる反面、被験者の動的な振動感受性の差による評価のばらつきによる定量化の困難さ、自己申告であることによる客観性の低さが課題として指摘される。

これまでに筆者らは、乗り心地の定量・客観指標の開発を目的に、従来用いられてきた主観評価に加

え、客観評価指標として生体信号を用いる可能性について基礎的な検討を行っている⁴⁾。この研究では、多数の生体信号の中から指標として用いるものを選択するにあたり、被験者への負担の少なさ、車両動揺環境下における計測の容易さと随時性、ノイズや測定誤差への頑健性などを考慮し、自律神経系の生体信号である心拍数、および手指の精神的発汗(皮膚伝導反応)を用いた。凹凸路面走行時のこれら生体信号の変化を観測したドライビングシミュレータ実験の結果、以下の知見が得られた。

- ・被験者の平均心拍数は平坦路走行時と比較して凹凸路走行時に増加し、その変化率は上下加速度実効値が増加すると共に増加する傾向が観察された。
 - ・被験者の皮膚伝導反応は平坦路走行時と比較して凹凸路走行時に増加したが、その変化率は個人差が非常に大きく、また、変化率と上下加速度実効値との明瞭な関係性は見られなかった。
 - ・心拍数変化率および皮膚伝導反応変化率と主観評価値の間には明瞭な関係性が確認されなかった。
- この実験により、路面の凹凸状態に応じて心拍数の変化が観測されたことから、乗り心地の客観的指標として心拍数を利用できる可能性が示唆されたものと考えられる。

一方、心拍数の変化と乗り心地の主観評価との間

に明瞭な傾向は観察できなかつた。そこで、この実験および解析方法を詳細に再検討すると、以下の課題が明らかとなった。

- ・生体信号は一般に個人差が大きいので、データを相対平均し傾向を見るといった統計解析を行う前にはデータを標準化する必要がある。
- ・データの測定時間が短いため(凹凸路 13~18 秒)、精度が低い可能性がある。

そこで本研究では、既実験データで得られたデータを被験者毎に標準化し、それらの平均値により上下加速度実効値、心拍数変動および乗り心地主観評価の関係について全体的傾向の検証を行った。

次に、凹凸路走行時の心拍変動現象と主観評価の関係を、被験者別に詳細に解析することを目的として、凹凸路走行時の心拍数測定時間を1分間とした追加実験を行い、回帰分析を用いて心拍数増加量による乗り心地主観評価の予測式を得た。また、心拍数増加量に加えて、交感神経活動を表す指標として心拍変動のスペクトル解析を試みた。

2. 既実験データの解析

(1) 実験概要

表-1 に既実験の条件を示す。各実験条件における振動の程度は、ISO2631-1⁵⁾によって重み付けした上下加速度の実効値で表す。これらの条件を写真-1 に示す北見工業大学所有のドライビングシミュレータ(以下「KITDS」という)を用いて模擬した。KITDS は一般的な DS の機能に加え、実路面のプロファイルデータを入力し、この路面上を走行する車両の挙動を再現する機能を有した路面評価型の DS である⁶⁾。被験者の心拍数の変化を計測すると共に、乗り心地を 0(非常に悪い)~5(非常によい)のスケールで主観評価させた。20 名以上の確保を目標に被験者を募集し、健康な成人男女 28 名(男女同数、20-30 代 8 名、40-50 代 11 名、60-70 代 9 名)の協力を得た。

(2) 解析結果と考察

個人差の影響を除くため、心拍数および乗り心地の主観評価値を被験者ごとに標準化(平均=0, 標準偏差=1)してから解析を行った。以降、標準化された主観評価(Panel Rating : PR)および心拍数(Heart Rate :

HR)を、それぞれ ZPR, ZHR と表す。標準化によって得られる得点(Z スコア)は、観測データとその平均値の間にいくつ標準偏差があるかを示し、異なる基準(この場合被験者毎の評価傾向)で計測された値を1つの基準で比較することが可能となる。

凹凸路走行による心拍数の変化は、心拍数の増加量(=凹凸路における ZHR-平坦路における ZHR)として評価した。

図-1 に、標準化された主観評価の全被験者平均値を、周波数重み付き上下加速度実効値ごとに示す。ZPR は上下加速度実効値が増加するにしたがって低下する傾向を示す。

図-2 に標準化された心拍数増加量の全被験者平均値、すなわち凹凸路における ZHR と平坦路における ZHR の差の全被験者平均値を周波数重み付き上下加速度実効値ごとに示す。上下加速度レベルの増加に伴い ZHR 増加量の平均値は増加する傾向にあることがわかる。



写真-1 KITDS 外観

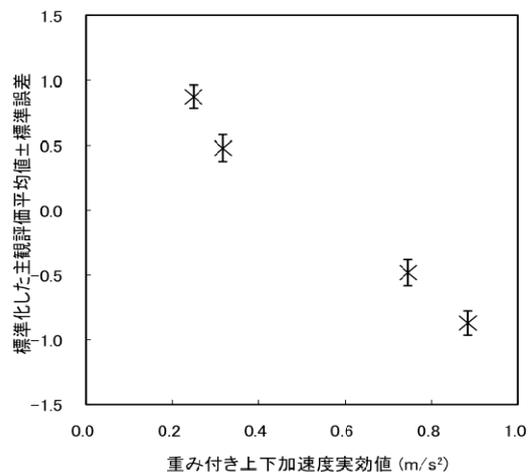


図-1 上下加速度と主観評価

表-1 実験条件

| case | IRI(mm/m) | V(km/h) | 重み付き上下加速度実効値(m/s ²) |
|------|-----------|---------|---------------------------------|
| 平坦 | 0 | 60, 80 | 0.00 |
| 1 | 2 | 60 | 0.25 |
| 2 | 2 | 80 | 0.32 |
| 3 | 5 | 60 | 0.75 |
| 4 | 5 | 80 | 0.88 |

図-3に標準化された心拍数増加量の全被験者平均値と主観評価の関係を示す。ZHR 増加量平均値が増加するに従いZPRは低下する傾向を示す。すなわち、心拍数の増加量が大きい凹凸路面ほど、主観評価による乗り心地は悪化することを示している。

以上の結果をまとめると、全被験者の平均値による全体的傾向として、被験者の心拍数は凹凸路を走行すると平坦路走行時に比べて増加し、その増加量は上下方向の加速度が大きいほど大きくなる傾向にある。また、凹凸路走行時の心拍数増加量が大きいほど、主観評価による乗り心地が悪化する。これらのことから、乗り心地評価指標として心拍数の利用可能性が示唆される。

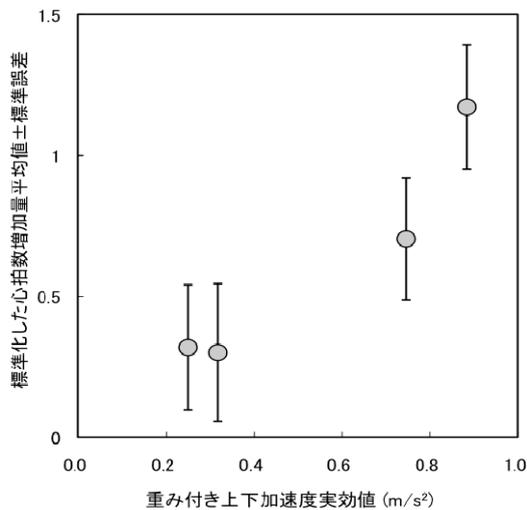


図-2 上下加速度と心拍数増加量

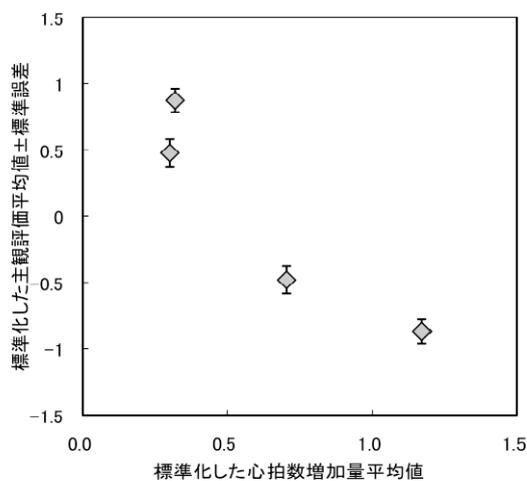


図-3 心拍数増加量と主観評価

3. 実験の方法

(1) 実験条件

心拍電位は、被験者の心臓を挟み込むように左脇腹および右鎖骨下部に電極を装着して計測した。心拍電位は図-4に示すように特徴的な波形を示し、鋭いピークを示すR波の間隔(R-R Interval : RRI)を計測することで心拍数の瞬間的変動を知ることができる。

心拍変動などの生体信号はストレスの定量的・客観的評価に有効とされ⁷⁾、運転疲労等の計測評価に関して多くの調査研究が行われている⁸⁾。

凹凸路面として用いる路面プロファイルには1998年に日本で行われた路面平坦性に関する第2回PIARC国際共通試験⁹⁾の測定データの中から、IRI=2, 3および5mm/mに相当する区間を抽出して使用した。

心拍変動のスペクトル解析を行うには解析ソフトの制約上、データ長が最低30秒以上必要となる。本実験では60秒間のデータを確保することとして、抽出した区間の路面プロファイルを繰り返して評価対象区間の走行時間が60秒間となるように調整した。走行速度は80km/hとした。以上の実験条件、および各条件におけるISO2631-1⁵⁾によって重み付けした車両の上下加速度実効値を表-2に示す。

全ての被験者に同一の実験環境を用意するため、各実験条件における車両挙動をあらかじめ車両挙動解析シミュレーションソフト(CarSim¹⁰⁾で計算し、挙動データをKITDSに入力した。

走行コースは片側1車線、幅員は3.5mの直線で、評価対象とする凹凸区間の前に比較区間としてIRI=0の区間を設けた。画像や配色の程度によっては結果に影響が生じる可能性があるため、舗装表面およびコース周辺の画像は極力単純なものとした。さらに、被験者がシミュレータ外部からの影響を極力受けまいよう、シミュレータの動揺発生用アクチュエータには吸音材を巻き付けて静音化した。

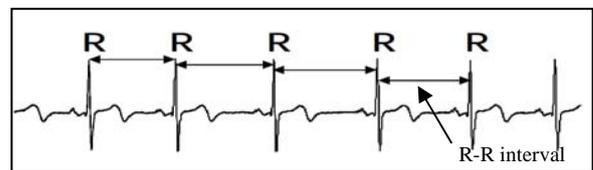


図-4 心拍電位波形の計測例

表-2 実験条件

| case | IRI(mm/m) | V(km/h) | 重み付き上下加速度 実効値(m/s ²) |
|------|-----------|---------|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 80 | 0.32 |
| 2 | 3 | 80 | 0.67 |
| 3 | 5 | 80 | 0.88 |

(2) 実験手順

図-5に実験手順を示す. 20代から40代の健常で, 運転経験豊富な男性3名の被験者を用い, 再現性の検証のため各条件で3回の試行を行った.

被験者は心拍電位測定用電極を装着した後, KITDSに乗車し,十分にリラックスして心拍電位波形を安定させるために3分間の平坦路走行を行ってから,凹凸路走行を開始した.心拍電位データは,生体信号計測用アンプ(PolymateAP1132,TEAC社製)をPCに接続し,逐次信号をモニタリングしながら収録した.データの解析には生体信号計測解析ソフト(AP-MonitorおよびR-R Interval Analysis,NoruPro Light Systems, Inc.社製)を使用した.心拍数の変化は,凹凸路走行に入る直前1分間のデータと,凹凸路走行時のデータとの比較により算出した.

各実験条件で走行した直後にアンケートを行い,乗り心地を0~5までのスケールで主観評価させた.

(3) 解析方法

心拍数および主観評価を被験者毎に標準化し,上下加速度実効値,心拍数変化および主観評価の関係について解析を行った.心拍数の変化は,前章と同様にZHRの増加量(凹凸路ZHR-平坦路ZHR)で評価した.

本実験では心拍数変化に加え,凹凸路面走行による刺激が被験者の交感神経機能を亢進して心拍数を上昇させると考え,この交感神経機能の指標として心拍変動スペクトルの観察を行った.図-6に示すように心拍変動のスペクトルには低周波領域(0.04~0.15Hz)と高周波領域(0.15~0.40Hz)とに特徴的にピークが認められ,それぞれLF成分, HF成分と呼ばれる¹¹⁾. LF成分は交感神経および副交感神経活動を, HF成分は呼吸中枢と関連した心臓における副交感神経機能を反映することが明らかとなっている¹²⁾. LFに内包されている副交感神経機能を除外するために, LFをHFで除したLF/HF比を血管運動性交感神経の指標として用いた研究事例が報告されている¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾.

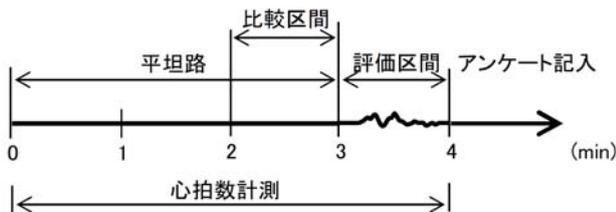


図-5 実験手順

4. 実験の結果

(1) 心拍数

図-7は平坦路および凹凸路走行時の被験者の心拍数をプロットしたものである. 既実験の結果と同様に, 各実験条件において, 被験者の凹凸路走行時の心拍数は平坦路走行時と比較して増加する傾向が確認された. 上下加速度水準毎にt検定を行ったところ, 表-3に示すように, 全ての水準において有意確率が $p < 0.05$ となり, 平坦路および凹凸路走行時の被験者心拍数に統計的に有意な差が見られた.

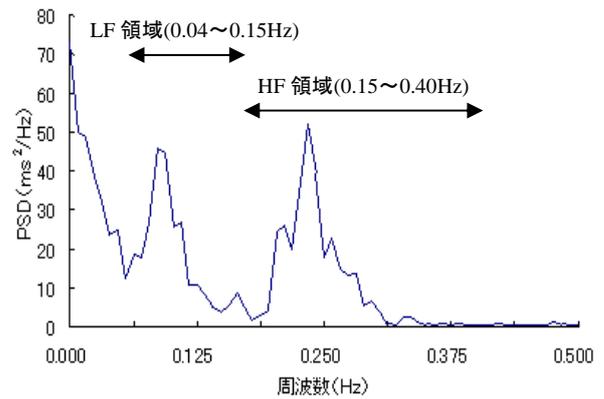


図-6 心拍変動スペクトルの例

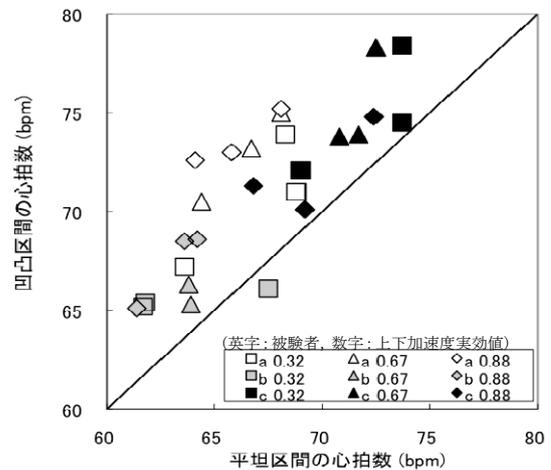


図-7 平坦路および凹凸路の心拍数

表-3 t検定結果

| 重み付き上下加速度 実効値(m/s^2) | 心拍数 p 値 | LF/HF p 値 |
|-----------------------------|--------------|----------------|
| 0.32 | 0.004 | 0.343 |
| 0.67 | 0.000 | 0.344 |
| 0.88 | 0.000 | 0.284 |

(2) LF/HF

図-8は平坦路と凹凸路での被験者のLF/HFをプロットしたものである。各被験者ともにLF/HFはばらつきが大きく、平坦路と凹凸路でLF/HFに有意な差は見られなかった。

(3) 再現性

本実験では、再現性の検証を行うため同様の実験条件で各3回の試行を行った。図-9~11は、被験者A~Cについて、心拍数増加量、ZLF/HF増加量、および主観評価の1試行目の値を1としたときの、2試行および3試行目の値を示したものである。

心拍数増加量は被験者によって若干差はあるものの、比較的良好な再現性を示した。これに対しZLF/HF増加量は再現性が悪く、被験者間の差も大きかった。また、主観評価は非常によい再現性を示した。これは、今回の被験者が過去にシミュレータを用いた振動乗り心地の主観評価実験を経験しており、質問紙による評価に慣れていたためと思われる。

(4) 上下加速度と主観評価および心拍数増加量

再現性が良好であった心拍数増加量と主観評価について、3試行全てのデータを相加平均して振動加速度レベルとの関係を検証した。

図-12は、被験者ごとに標準化した乗り心地主観評価の全被験者平均を上下加速度実効値ごとにプロットしたものである。既実験結果と同様に、乗り心地の主観評価は上下加速度レベルが増加すると共に低下する。

図-13は、被験者ごとに標準化した心拍数増加量の全被験者平均値を上下加速度実効値ごとにプロットしたものである。心拍数増加量も既実験結果と同様に、上下加速度レベルの増加に伴い増加する傾向を示した。

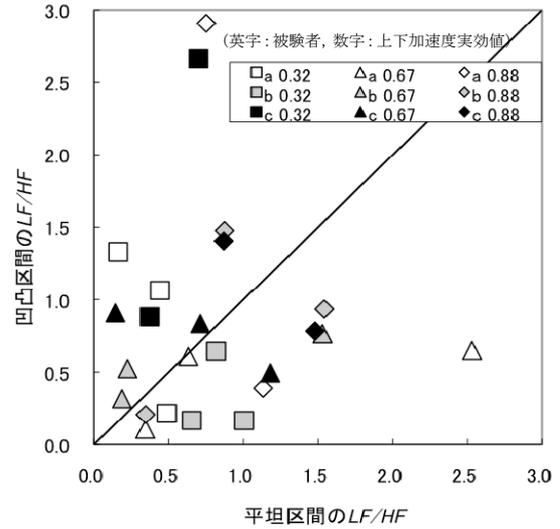


図-8 平坦路および凹凸路のLF/HF

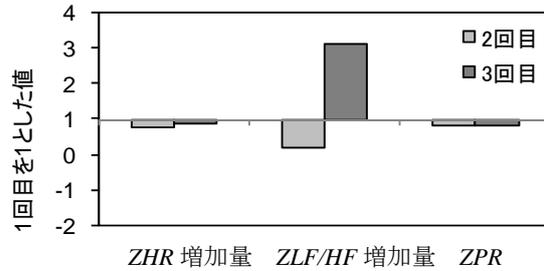


図-9 再現性(被験者 A)

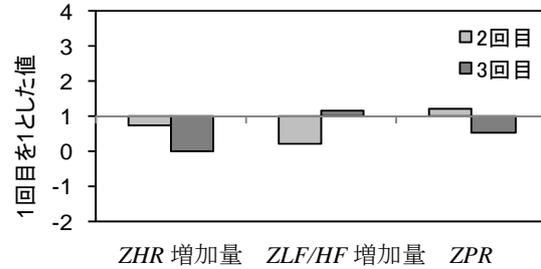


図-10 再現性(被験者 B)

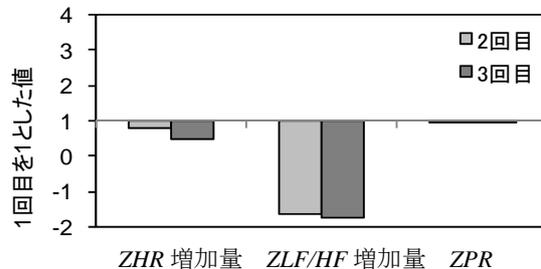


図-11 再現性(被験者 C)

(5) 回帰分析

心拍数および主観評価の全データを用い、主観評価を被説明変数、心拍数増加量を説明変数として被験者それぞれについて直線回帰分析を行った。図-15～17は、直線回帰モデルによる主観評価の予測値と実際に観測された主観評価の関係を被験者ごとに示したものである。

被験者 A は $R^2=0.875$ 、被験者 B は $R^2=0.680$ と高い寄与率を示し、回帰モデルの当てはまりは良好であった。これに対し被験者 C では $R^2=0.278$ と低い寄与率を示した。

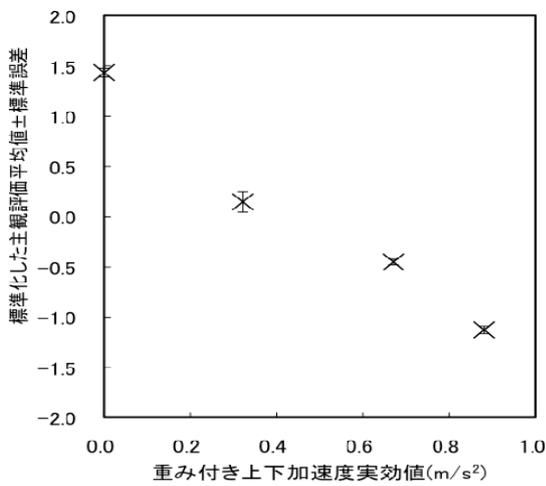


図-12 上下加速度と主観評価

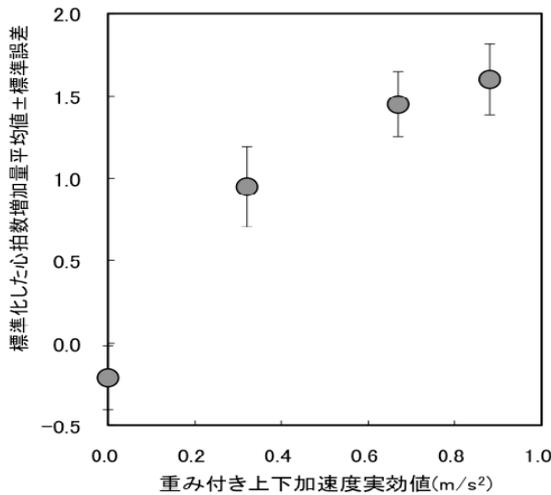


図-13 上下加速度と心拍数増加量

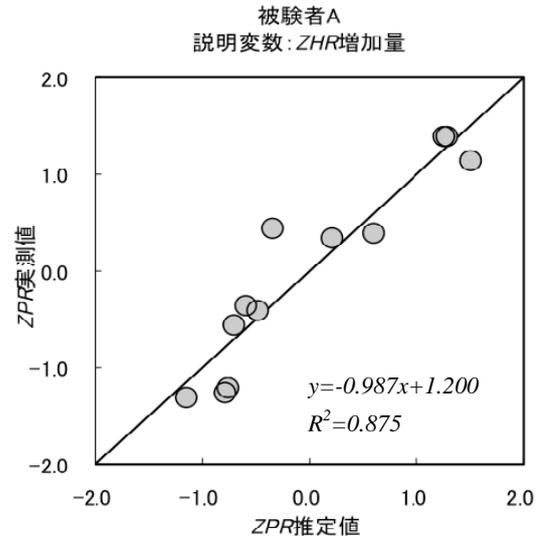


図-15 回帰モデルの当てはまり(被験者 A)

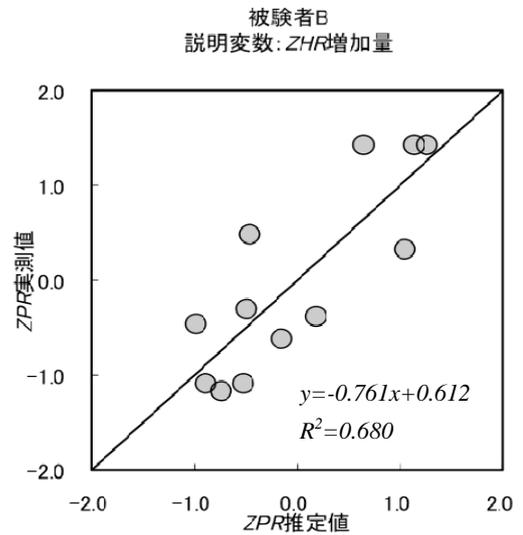


図-16 回帰モデルの当てはまり(被験者 B)

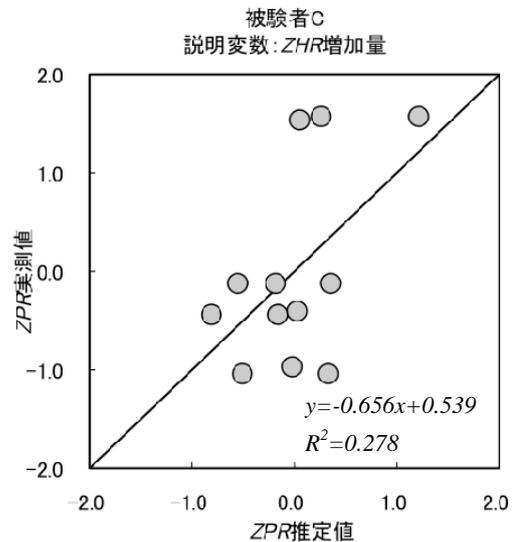


図-17 回帰モデルの当てはまり(被験者 C)

5. 考察

追加実験の結果、既実験結果と同様に被験者の心拍数は凹凸路を走行すると平坦路走行時に比べて増加し、その増加量は上下方向の加速度レベルが大きいくほど大きくなる傾向にあることが確認された。また、凹凸路面走行時の心拍数増加現象には、ある程度高い再現性があることが確認された。これらのことから、客観的な乗り心地評価指標として心拍数変化を利用できる可能性が改めて示唆された。

多くの既往研究で交感神経機能の指標として用いられている心拍変動の LF/HF については、本実験では平坦路と凹凸路で統計的に有意な差は見られず、再現性の検証においてもばらつきが非常に大きい結果となった。要因の一つとして、 HF 成分は呼吸数の影響を大きく受けるため、メトロノームによる呼吸数の統制など、より厳格な実験条件を設定する必要があるものと思われる。

被験者ごとに直線回帰モデルにより主観評価の予測を行った結果、2名の被験者においてモデルの良好な当てはまりがみられ、心拍数増加量により主観評価を説明する可能性が示唆された。他方、モデルの当てはまりが悪い被験者もいることが確認された。これは、体内外の環境から受けるストレス刺激に対する生体反応の傾向が個人ごとに異なるためと推察される。従って、生体信号を用いた乗り心地評価モデルの構築を行うには、無作為に多くの被験者によるデータを集めるだけでは不十分であり、それぞれの被験者の振動刺激への生理的感受性の違いを考慮に入れることが必要である。例えば、生理的感受性の高低によってグループ分けした上でモデルを作成することなどが考えられる。

6. 結論

本研究により以下の知見が得られた。

- ・被験者の心拍数は凹凸路を走行すると平坦路走行時に比べて増加し、その増加量は上下方向の加速度が大きいくほど大きくなる傾向にある。
- ・心拍数の増加量が大きいくほど、主観評価による乗り心地は悪化した。
- ・本実験結果からは、平坦路と凹凸路で被験者の心拍変動スペクトルの LF/HF に有意な差は見られなかった。
- ・同一試験条件で3回の試行を行った結果、心拍数増加量および主観評価は比較的良好な再現性を示した。他方 LF/HF 増加量は再現性が悪い結果となった。

- ・被験者ごとの回帰分析により、心拍数増加量により主観評価による乗り心地を説明するモデルを提案した。ただし、生体信号を用いた乗り心地評価モデルの一般化には、個々の被験者の振動刺激への感受性を考慮することが必要である。

以上、凹凸路走行時の被験者の心拍数変化観察から得られた知見を述べた。凹凸路において心拍数が増加することから、主観評価を生体信号という客観指標によって裏打ちできる可能性が示されたものと考えられる。

主観評価と生体信号はどちらも人間というシステムに外部から刺激が加わったときの反応であり、これらに関連づけ、相互に利用して合理的判断を行う方法を確立することを今後の方向としたい。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路維持修繕要綱,丸善,p68,1982.
- 2) 建設省道路局国道第一課,建設省土木研究所:舗装の維持修繕の計画に関する調査研究,第33回建設省技術研究会報告(昭和54年度),1979.
- 3) Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas, : The Little Book of Profiling, - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, The University of Michigan, 1998.
- 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, pp.197-204, 2007.
- 5) ISO2631-1,Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1997.
- 6) Kawamura, A., Maeda, C., Shirakawa, T., Ishida, T., Nakatsuji, T., Himeno, K. : Applicability of a Driving Simulator as a New Tool for the Pavement Surface Evaluation, Proceedings of the SIIV, 2004
- 7) 財団法人機械システム振興協会:ストレス計測技術の安全対策への適用可能性に関する調査研究報告書-要旨-, 2004.
- 8) 例えば, 上田誠, 近藤光男, 松本博次, 早川晴雄, 田中隆現: 追従走行実験における心理的・生理的反応に基づく運転疲労の定量化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.4, 2005.
- 9) Kawamura, A., Takahashi, M., Inoue, T. : Basic Analysis of Measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 10) <http://www.carsim.com/products/carsim/>.
- 11) Yamamoto, Y., Hughson, R.L., Peterson, J.C. : Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability special analysis, Journal of Applied Physiology,

- Vol.71, pp.1136-1142, 1991
- 12) Akselrod, S., Gordon, S., Ubel, F.A., Shannon, D.C., Berger, A.C., Cohen, R.J. : Power spectrum analysis of heart rate fluctuation - a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, *Science*, 10, pp.220-222, 1981
 - 13) 波多野忠, 成波, 谷口哲夫 : 心拍電位による運転者の緊張度評価法の検討, 独)交通安全環境研究所研究発表会, 2002.
 - 14) 土川奏, 古山昌浩, 岩倉成志 : 心拍間隔指標を用いた長距離運転時のストレス計測実験－AHS の需要予測にむけて－, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, pp.849-850, 2002.
 - 15) 小林宏光, 本明子 : 室内空間の奥行きが心拍変動周波数成分に与える影響, *Ishikawa Journal of Nursing*, Vol.3(1), 2005

PAVEMENT RIDE QUALITY EVALUATION BASED ON HEART RATE VARIABILITY

Tateki ISHIDA, Akira KAWAMURA, Alimujiang YIMING, Kazuya TOMIYAMA
and Takashi NAKATSUJI

This paper deals with a development of a new, quantitative and objective index of ride quality of pavements. A driving simulator that reproduces the behavior of vehicles traveling on uneven road surfaces was used for subjective evaluation of ride quality. At the same time, the variation of heart rate was measured. From the results, it was found that the test subject's heart rate increased when driving on the uneven roads, and as the vertical acceleration R.M.S. value increased, the variation of heart rate increased. It was also confirmed that as the variation of heart rate increased, the subjective evaluation of ride quality decreased. Linear regression analyses shows that the subjective evaluation could be described with the variation of heart rate as an explaining variable. The differences of each subjects' sensibility to vibrations should be considered to develop a generalized model.