

(54) 非拘束脈波計測に基づく 生体疲労に着目した路面平坦性評価

富山和也¹・川村 彰²・岩本惇志³

¹正会員 北見工業大学助教 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 : tomiyama@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)

E-mail : m1452200012@std.kitami-it.ac.jp

道路利用者は、常に路面由来の車両振動に曝露されるにも関わらず、道路交通環境下での生体疲労において、路面性状による影響は解明されていない。そこで、本研究では、非拘束脈波計測に基づき、「受動疲労」と定義した、路面性状に起因する生体疲労の発現メカニズムを明らかにし、受動疲労を考慮した平坦性の評価方法について検討した。その結果、脈波加速度より得られた、心拍変動の周波数領域における低周波(LF)成分と高周波(HF)成分に着目し、それらの比であるLF/HFをモニタリングすることで、時間変化に依存した長期的なメンタルストレスを把握でき、受動疲労の評価につながる事がわかった。また、HF成分は、短期的なストレスと関係し、乗り心地などの快適性評価に有効であることを示した。

Key Words: surface roughness, biological fatigue, pulse wave, heart rate variability, driving simulator

1. はじめに

近年、社会基盤の根幹となる道路・交通環境の整備には、量的な充足が一定水準に達したことを背景に、車両走行時の安全性や快適性など、質的満足度の向上を目的とした対策が求められている。とりわけ、路面の平坦性は、道路利用者意識に直結することから、車両走行時の振動乗り心地に着目した研究がなされている¹⁾。

これまでの道路管理を目的とした路面性状に関する研究は、質的向上要素である快適性および最低限確保されるべき安全性については考慮しているが、初期状況では認知しにくく、潜在的な生体疲労に関する研究はなされていない。一方、交通安全や運行動態に関するヒューマンファクタの視点に基づき、睡眠時間や健康状態など、道路利用者のライフスタイルに影響される生体疲労についての研究は実施されているが^{2,3)}、道路交通環境下における、路面性状の影響については検討されていない。そのため、道路利用者のライフスタイルに依存する生体疲労を「受動疲労」と定義すると、路面性状由来の車両振動に起因する「受動疲労」については、道路管理と利用

者評価の間にギャップが生じており、依然として十分な研究がなされていないものといえる。

そこで、本研究では、受動疲労の発現メカニズムを把握するため、非拘束脈波計測に基づき、路面性状が生体情報に及ぼす影響について、ドライビングシミュレータ(以下、「DS」)を用いた走行試験を実施し検討する。既往研究⁴⁾では、心電図計測による心拍変動解析により、自律神経系活動に関係する生体情報に着目することで、路面に起因する潜在的なメンタルストレスの把握が可能であることを示唆している。しかし、心電図データは、計測の安定性から胸部誘導を用いるため、協力者(被験者)の性別に合わせた実験スタッフが必要であることや、電極ケーブルにより動作が拘束されるなどの課題があった。一方、生体脈波は、簡便かつ非拘束・非侵襲に計測可能であり、測定値の二階微分による脈波加速度を用いることで、心拍変動に関する情報を得ることができる。生体疲労をメンタルストレスの持続時間に依存した蓄積と考えると、非拘束脈波計測は、受動疲労の評価においても有効であるものと考えられる。

2. 心拍変動に基づく路面評価

従来、道路利用者意識を対象とした路面評価研究では、体感試験を実施し、乗車感覚を表すアンケート調査による検討が行なわれていた。しかし、アンケートによる評価では、評価対象前後の路面状況によって利用者の評価尺度が変化することや（係留効果）、数秒にも満たない時間で経験する局所損傷が原因となる過渡振動の評価が課題であった。そこで、本研究では、非拘束脈波計測を導入し、客観的かつ迅速な受動疲労への反応が期待できる、心拍変動に着目した検討を行なう。

(1) 心拍変動の概要

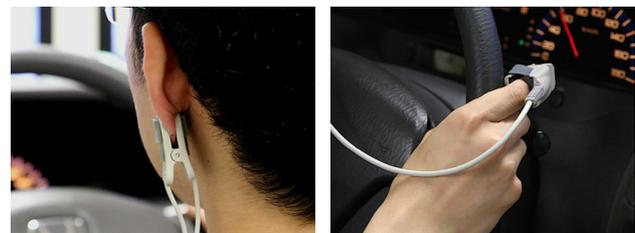
心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激によるストレスなどによって、時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎであり、呼吸や体温、ストレスなどによって変化する、自律神経系の活動を表す重要な生体情報の一つである⁵⁾。自律神経系は交感神経系および副交感神経系の異なる活動動態を持ち、心拍変動に影響を及ぼす。とりわけ、心拍変動を周波数領域でみた場合、高周波成分（HF成分：0.15-0.4Hz）と低周波成分（LF成分：0.04-0.15）にピークを持ち、HF成分が副交感神経系の、LF成分が副交感神経系と交感神経系の活動を反映することが知られている。

(2) 心拍変動の計測方法

脈波は、**図-1**に示す指尖もしくは耳朶センサによる計測が、非拘束かつ簡便なため有望である。本研究では、はじめに、ステアリングの操作性を考慮し、耳朶による計測を実施したが、路面平坦性に起因する車両振動によりノイズが混入し、事後処理が必要となった。一方、指尖計測では、耳朶に比べ、安定した脈波計測が可能であった。また、後述の通り、設定したDS試験シナリオが直線走行であるため、本研究では、以降、指尖計測により脈波情報を得ることとした。なお、脈波計測は、株式会社TAOS研究所製のBACS Advanceを用いた。

(3) 心拍変動による路面評価

既往研究⁴⁾では、心電図計測による心拍変動の連続ウェーブレット変換により、周波数領域におけるHF成分に着目することで、走行路面に起因する潜在的なストレスの把握が可能であることを明らかにしている。**図-2**に、心拍変動の連続ウェーブレット変換例を示す。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、



(a) 耳朶センサ (b) 指尖センサ
図-1 脈波計測センサ

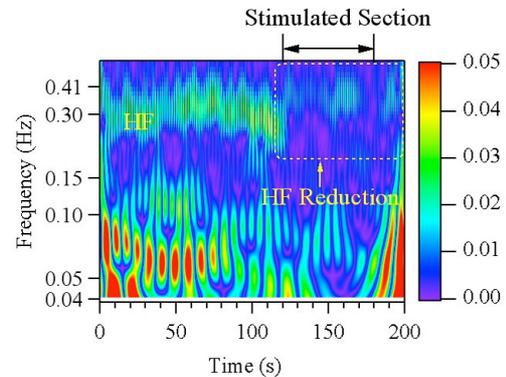


図-2 心拍変動の連続ウェーブレット変換例⁴⁾

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。これは、外部刺激に起因するメンタルストレスにより、呼吸系の副交感神経成分の不活性化によるものと考えられる。

また、LF成分は、ストレスに対する緩やかな適応に関連するといわれており、ストレス状況下では著しく増大することが知られている。ここで、LF成分は交感神経および副交感神経系両者の活動を反映することから、LFとHFの比（LF/HF）をとり、血管運動性の交感神経系活性化に関連したストレス指標として提案されている。そこで、本研究では、HFとLF/HFに着目し、受動疲労発現に関するストレスの把握を試みる。

3. DSを用いた走行試験による受動疲労解析

(1) DSを用いた走行試験の概要

DSを用いた走行試験は、実路試験に比べ、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。そこで本研究では、路面平坦性に起因する車両振動以外のストレス要因を排除し、試験条件を単純化するため、路面性状に関する実データの利用および再現が可能な、路面評価型DSを用いて走行試験を実施した。路面評価型DSの外観および走行試験状況を**図-3**に示す。走行試験は、健常な20代男性3名の協力を得



(a) 路面評価型DSの外観 (b) 走行試験状況

図-3 路面評価型DSを用いた走行試験

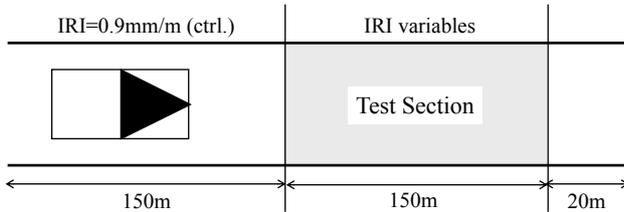


図-4 試験シナリオの概要

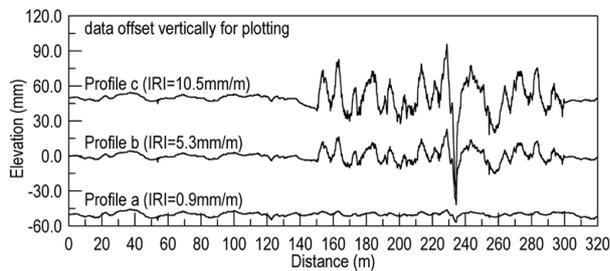


図-5 試験プロファイル

て実施した。被験者は、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受けた後、路面評価型DSに乗車し、脈波センサを装着、脈波の安定を確認してから試験走行を行った。

(2) 試験シナリオ

走行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 (a)0.9, (b)5.3 および(c)10.5mm/mの3水準、評価延長150mとた。各路面プロファイルは、図-4に示す通り、前後にコントロール区間を設けて配置し、1試行あたり各路面水準をランダムに9回体験するよう試験コースを設計した。試験コースの路面プロファイルを図-5に示す。なお、コントロール区間のIRIは0.9mm/mであり、路面(a)と同様である。

(3) 脈波による心拍変動解析の概要

脈波計測に基づく心拍変動データは、脈波の二階微分より得られた脈波加速度から、心電図のR-R間隔に相当する、a-a波間隔を求めることで得た。心拍変動の一例を図-6に示す。ここで、上述の通り、心拍変動の解析は、周波数領域で行なう必要がある。

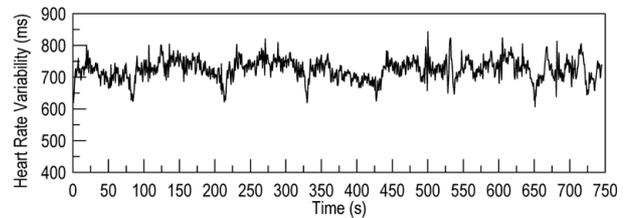
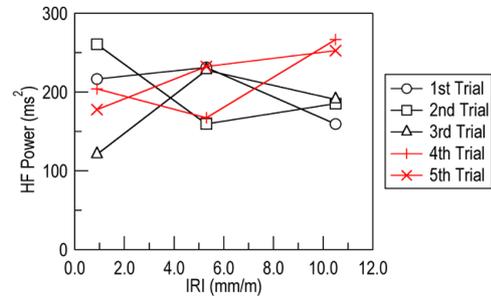
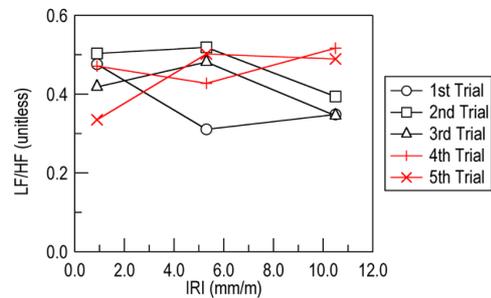


図-6 心拍変動の例



(a) HF成分



(b) LF/HF

図-7 IRIと心拍変動指標の関係

そこで、はじめに、パワースペクトル密度を、解析時間10秒とし、1秒毎にスライドさせながら計算した。続いて、得られたパワースペクトル密度を、区間0.04-0.15Hz (LF成分) および0.15-0.4Hz (HF成分) でそれぞれ積分し、LFおよびHF成分のパワーを計算した。なお、本研究では、試行回数の増加による影響に着目し、評価対象路面上で、各被験者の1回の試行から得られた心拍変動指標を、路面条件ごとに平均したデータを用いる。

(4) 心拍変動の解析結果

試行回毎のIRIと各心拍変動指標の関係を図-7に示す。図-7(a)より、HF成分は、試行1~2回目の初期段階において、副交感神経系が不活性化し、IRIの増加に伴い反比例して減少する結果となった。しかし、試行を重ねるにつれ、IRIの増加に比例し、HF成分も増加する傾向がみられた。これは、被験者が、ストレス状態から解放されたものといえる。既往研究⁹⁾では、試行を重ねるにつれ、路面水準によらずHF成分が一定の値に収束することを示唆しているが、本研究で得られた知見は、それと矛盾していない。一方、図-7(b)より、LF/HFも、試行初期

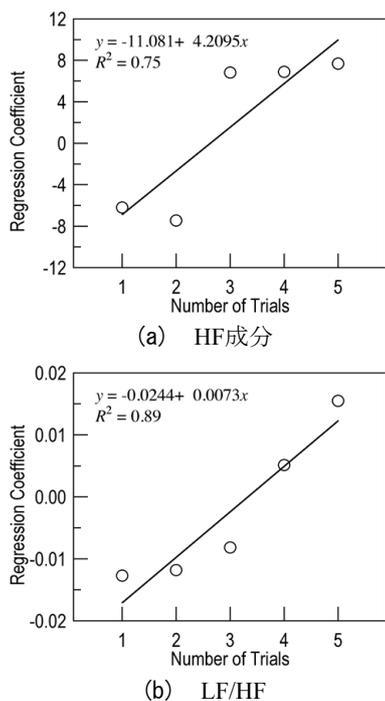


図-8 IRIと心拍変動指標の直線回帰から得られた回帰係数と試行回数との関係

段階では、IRIの増加と反比例し、試行を重ねた場合、比例する結果となった。これは、試行回数の増加に伴い、交感神経系が活性化し、路面性状に対するストレスが増加したものと見える。

そこで、試行回数ごとにIRIと各心拍変動指標を直線回帰し、得られた回帰係数と試行回数について検討した。図-8に試行回数と各心拍変動指標から得られた回帰係数の関係を示す。図より、いずれの心拍変動指標も、試行回数と回帰係数の間に正の相関がみられた。ここで、HF成分は、ストレス状態からリラックス状態へ、LF/HFはストレス状態へ変化したことを考えると、それぞれの指標から得られる情報は、以下のようにまとめられる。

a) HF成分

被験者は、路面性状を原因とし、一時的にストレス状態に陥るが、走行体験を重ねるにつれ、次第に車両振動へ順応し、ストレス状態から解放される。すなわち、HF成分から得られる情報は、路面に対する短期的なストレスと関わりがあるものと見える。

b) LF/HF

被験者は、走行体験を重ねるにつれ、路面性状を原因とした車両振動により、ストレスが蓄積される。すなわち、LF/HFから得られる情報は、時間変化に依存した長期的なストレスと関係し、受動疲労の発現と関わりがあるものと見える。

以上より、脈波計測に基づき心拍変動のLF/HFをモニタリングすることで、路面性状由来の疲労である受動疲労の状態を非拘束・非侵襲に把握すること

ができるもといえる。一方、HF成分は、走行初期段階での路面性状に対するストレスを検知できることから、乗り心地などの快適性評価に有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究は、非拘束脈波計測に基づき、「受動疲労」と定義した、路面性状に起因する生体疲労の発現メカニズムを明らかにし、受動疲労を考慮した平坦性評価について検討した。その結果、心拍変動の周波数領域における低周波（LF）成分と高周波（HF）成分に着目し、それらの比であるLF/HFをモニタリングすることで、時間変化に依存する長期的なストレスの把握が可能であり、受動疲労の評価につながるということがわかった。また、HF成分は、短期的なストレスと関係し、乗り心地などの快適性評価に有効であることを示した。

謝辞：本研究はJSPS科研費25870026の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Sayers, M.W. and Karamihas, S.M.: Estimation of Rideability by Analyzing Longitudinal Road Profile, *Transportation Research Record*, No. 1536, pp.135-149, 1994.
- 2) Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C., and Bioulac, B.: Fatigue, sleep restriction and driving performance, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 37, No. 3, pp. 473-478, 2005.
- 3) Ting, P.H., Hwang, J.R., Doong, J.L., and Jeng, M.C.; Driver fatigue and highway driving: A simulator study, *Physiology & Behavior*, Vol.94, No.3, pp.448-453, 2008.
- 4) 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, 2011.
- 5) 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.
- 6) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹, 秋田谷勇輝: ドライビングシミュレータおよび生体情報を用いた路面乗り心地評価システムの構築, 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol.68, No.2, pp.I_135-I_141, 2012.