

生体脈波計測による路面性状由来の運転時疲労評価

Evaluation of Physiological Fatigue on Driving due to Road Surface Characteristics based on Pulse Wave Measurement

北見工業大学工学部 ○ 正 員 富山和也 (Kazuya Tomiyama)
北見工業大学工学部 正 員 川村 彰 (Akira Kawamura)
北見工業大学大学院 学生員 岩本惇志 (Atsushi Iwamoto)

1. はじめに

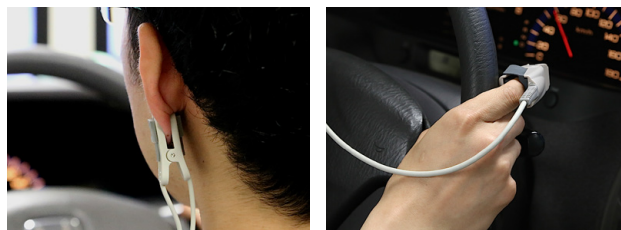
人口構造および社会基盤施設の高齢化が深刻化する昨今、道路・交通環境の整備には、利用者の視点を取り入れた質的満足度の高い対策が求められている。特に、道路利用者評価に直結する路面の状態は、豊かなモビリティ社会をつくるために欠かせない、道路・交通環境の重要な評価指標である。

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、生体疲労に関する既存研究^{1,2)}は、交通安全や運転行動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の影響を対象としたものが多い。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「能動疲労」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、生体脈波計測に基づき、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、受動疲労の発現メカニズムおよび評価方法について検討する。既往研究³⁾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、脈波は、耳朶や指尖に付けたセンサにより、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、心電図と同様に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、非拘束な脈波計測は、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. 心拍変動を利用した路面評価

従来のアンケートによる路面評価は、一定区間を走行した平均的な乗り心地を想定しているため、瞬間的な局在損傷や事前の期待と経験により、利用者評価が歪められる可能性がある。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。



(a) 耳朶センサ (b) 指尖センサ

図-1 脈波計測センサ

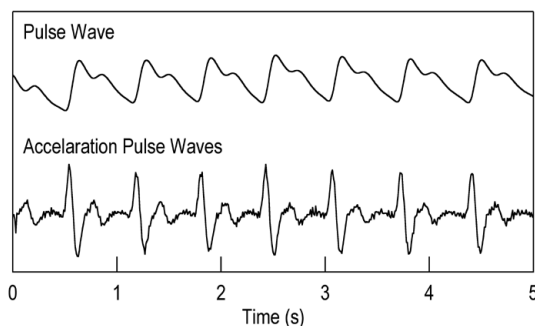


図-2 脈波および脈波加速度の例

(1) 心拍変動の概要

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：0.04-0.15Hz）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、耳朶に比べ、安定した脈波計測が可能であった指尖プローブにより脈波計測を行った。

脈波計測による心拍変動は、脈波測定値の二階微分による脈波加速度を用いることで、心電図と同様に心拍変動に関する情報を得ることができる。脈波および脈波加速度の例を図-2に示す。心拍変動は、心電図のR-R間隔に相当する、ピーク間隔（a-a間隔）を計測したものである。図-3に心拍変動の測定例を示す。

なお、脈波計測は、株式会社TAOS研究所製のBACS Advanceを用いた。

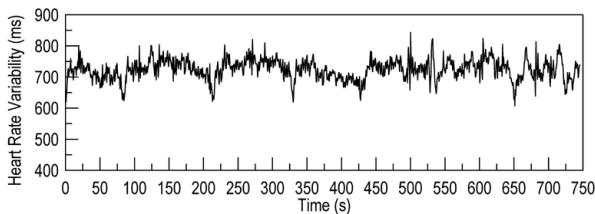


図-3 心拍変動の例

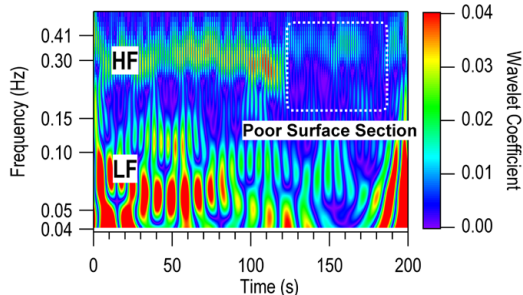


図-4 心拍変動の連続ウェーブレット変換例

(3) 心拍変動による路面評価

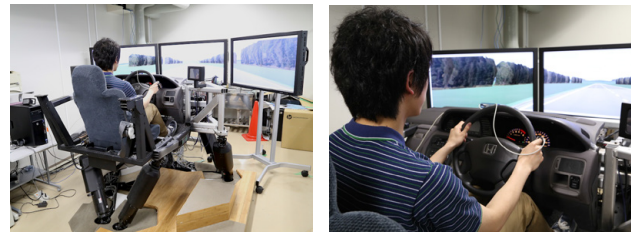
既往研究³⁾では、心電図計測による心拍変動の連続ウェーブレット変換により、周波数領域におけるHF成分に着目することで、走行路面に起因する潜在的なストレスの把握が可能であることを明らかにしている。図-4に、心拍変動の連続ウェーブレット変換例を示す。図中、スカログラムは、心拍変動の振幅に対応したウェーブレット係数の絶対値を表し、周波数は対数表示とした。ここで、120から180秒が平坦性低下区間であるが、区間中HF成分の減衰が確認できる。これは、外部刺激に起因するメンタルストレスにより、呼吸系の副交感神経成分が不活性化したためと考えられる。

一方、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成分とHF成分の比(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成分とLF/HFに着目し、受動疲労発現に関係するストレスの把握を試みる。

3. 路面評価型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。従来、DS研究における路面データの利用は、道路線形と関係の深い数十メートル単位の長波長成分に限られていた。一方、北見工業大学所有の路面評価型DSは、乗員の乗り心地や車両の操縦性・安定性に影響する、数センチメートル単位の路面波長まで再現することが可能である。

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極力排除し、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による走行試験の概要を図-5に示す。



(a) 路面評価型DSの外観 (b) 走行試験状況

図-5 路面評価型DSを用いた走行試験の概要

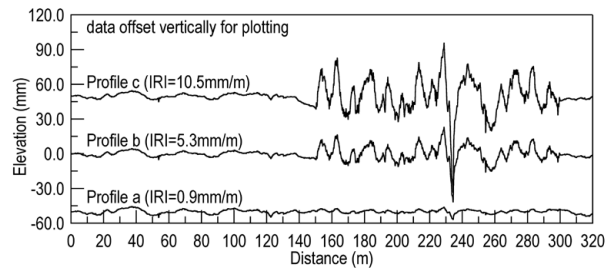


図-6 走行試験に用いた路面プロファイル

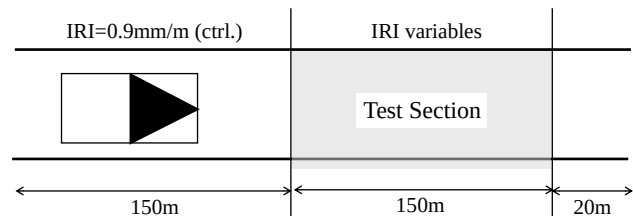


図-7 試験シナリオの概要

(1) 試験日程および被験者

走行試験は、2014年6月24日から同年7月3日の間に、健康な20代の学生9名（男性9名、平均年齢21.3歳）の協力を得て実施した。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。

(3) 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とした。試験コースの路面プロファイルを図-6に示す。IRIに基づく平坦性水準は、路面(a)が「高速道路」、路面(b)が「供用後の舗装」、路面(c)が「損傷を受けた舗装」相当⁵⁾である。各路面プロファイルは、図-7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、試行回数は5回とした。被験者は、計135回の評価区間を走行し、試験時間は1人当たり約1時間である。なお、コントロール区間のIRIは0.9mm/mであり、路面(a)と同様の路面プロファイルを設定した。

4. 脈波計測に基づく運転者の受動疲労解析

(1) 心拍変動解析の概要

上述の通り、心拍変動は、周波数領域において自律神経系の活動を反映するため、その解析は、周波数領域で

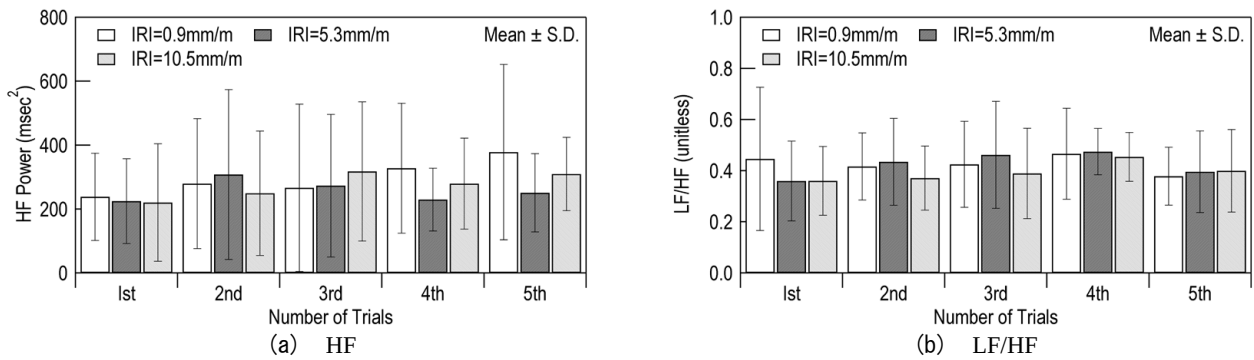


図-8 試行回数およびIRIと心拍変動指標の関係

表-1 HF成分に関する分散分析表

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Ratio	Prob. >F
Subject	3319666.3	8	414958.3	39.99	0.0496 *
Num. of Trials	102008.9	4	25502.2	2.46	0.1654
IRI	37954.8	2	18977.4	1.83	0.2373
Num. of Trials * IRI	110182.0	8	13772.8	2.33	
Error	1162185.8	112	10376.7		
Total	4731997.8	134			

Index: HF (*p<0.05)

表-2 LF/HFに関する分散分析表

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Ratio	Prob. >F
Subject	1.63877	8	0.20485	14.75	
Num. of Trials	0.10558	4	0.02640	1.90	0.1153
IRI	0.02896	2	0.01448	1.04	0.3560
Num. of Trials * IRI	0.06259	8	0.00782	0.56	0.8059
Error	1.55552	112	0.01389		
Total	3.39143	134			

Index: LF/HF

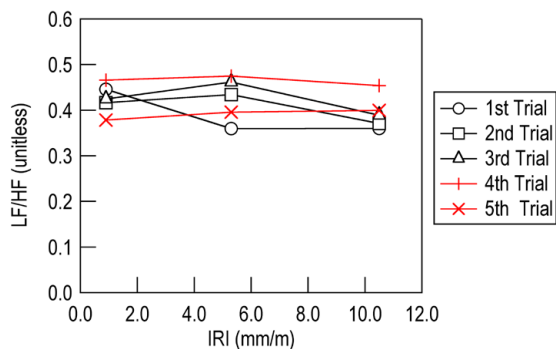


図-9 試行回数ごとのLF/HFとIRIの関係

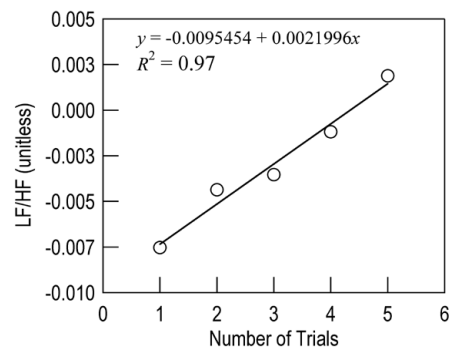


図-10 LF/HFとIRIの直線回帰から得られた回帰係数と試行回数の関係

行なう必要がある。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成分および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各心拍変動指標を、路面条件ごとに平均したデータを用いた。

(2) 試行回数とIRIが心拍変動指標に及ぼす影響

試行回数およびIRIが、各心拍変動指標に及ぼす影響を調べるため、有意水準5%で対応のある二元配置分散分析を行なった。また、分散分析において、主効果が有意となった場合には、事後にチューキーのHSD法により多重比較検定を行なった。なお、統計解析には、MathWorks社のMATLAB Statistical Toolbox Ver 9.0 (R2014a)⁶⁾を用いた。図-8に、試行回数およびIRIに対する各心拍変動指標の計測結果を示す。ここで、HF成分は、値が小さくなる程、

LF/HFは値が大きくなる程ストレス状態となる。表-1および表-2に各心拍変動指標に関する分散分析表を、以下に、分散分析より得られた知見を示す。

a) HF成分

HF成分では、交互作用はみられず試行回数の主効果のみが有意となった。試行回数について、多重比較検定を行なったところ、試行を重ねるにつれHF成分は増加し、1試行目と5試行目の差が有意となった。これは、試行回数の増加に従い、被験者のストレスが弱まったことを表している。既往研究⁷⁾では、試行を重ねるにつれ、被験者は車両振動に順応し、HF成分におけるストレスの影響がみられなくなる場合があることを示唆している。本研究で得られた知見は、それと矛盾していない。また、図-8(a)より、IRI値が高い方が、HF成分が小さく、ストレスが強くなる傾向がみられた。

b) LF/HF

LF/HFでは、交互作用と主要因のいずれにも有意差はみられなかった。ここで、交互作用は有意とならなかったが、図-8(b)より、試行の初期段階においては、IRIの増加に反比例してLF/HFが減少する傾向が窺える。図-9に、LF/HFにおけるIRIと試行回数の関係を示す。図より、LF/HFは、1から4試行目ではIRIの増加に反比例して減少する傾向にあるが、5試行目ではIRIに比例して増加する結果となった。そこで、試行回数ごとにIRIとLF/HFを直線回帰し、得られた回帰係数と試行回数の関係について検討した。図-10に試行回数と回帰係数の関係を示す。図より、試行回数と回帰係数の間に強い正の相関がみられ、5試行目には、回帰係数が正の値となっている。これは、試行回数の増加に従い、交感神経系が活性化し、路面に対するストレスが増加したものと見える。

(3) 心拍変動による受動疲労解析結果

前節までに、DSによる走行試験を行ない、試行回数およびIRIが、非拘束脈波計測から得られた心拍変動指標のHF成分とLF/HFに及ぼす影響について検討してきた。以上の結果をもとに、受動疲労評価の観点から、各心拍変動指標についてまとめると以下ようになる。

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となるが、走行体験を重ねるにつれ、次第に車両振動へ順応し、HF成分は高くなり、ストレスが弱くなる。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いえる。

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状態となる。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いえる。

以上より、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、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・非侵襲に把握できるものと考えられる。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いえる。

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、心拍変動に基づく受動疲労を考慮した路面の平坦性評価について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) HFは、試行を重ねるにつれ、有意に増加することから、被験者は、一時的にストレス状態となるものの、次第に車両振動へ順応し、ストレスが弱まる。また、IRI値が高い方が、HFが小さく、ストレスが強くなる傾向にある。
- (2) LF/HFは、試行回数およびIRIとの関係に統計的な有意差はみられないが、試行を重ねるに従い、LF/HFも増加し、被験者は、路面性状を原因とした車両振動により、ストレス状態となる。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いえる。

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・非侵襲に把握できるものと期待できる。一方、HF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といえる。

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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) The MathWorks, Inc.: *Statistical Toolbox User's Guide R2014a*, 2014.
- 7) 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.