

(31) 生体情報に基づく精神的負荷の 時間依存性を考慮した路面平坦性評価

富山和也¹・川村 彰²・Riccardo Rossi³・Massimiliano Gastaldi⁴・Claudio Mulatti⁵

¹正会員 博士(工) 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

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

²正会員 博士(工) 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

³Non-member, Ph.D., Dept. of Civil, Architectural and Environmental Eng., University of Padova
(Via Marzolo, 9 35131 Padova, Italy)

⁴Non-member, Ph.D., Dept. of Civil, Architectural and Environmental Eng., University of Padova
(Via Marzolo, 9 35131 Padova, Italy)

⁵Non-member, Ph.D., Dept. of Developmental Psychology, University of Padova
(Via Marzolo, 8 35131 Padova, Italy)

既存の路面管理手法は、適当な延長で抽出された区間内で顕在化する、利用者への静的な影響の評価を意図しており、時間とともに変化する潜在的な精神疲労への影響は不明であった。本研究の目的は、生体情報を活用し、「受動疲労」と定義した路面由来の精神疲労に影響を及ぼす、精神的負荷の時間依存性を明らかにすることである。そこで、ドライビングシミュレータによる走行試験を実施し、路面状況と精神的負荷の関係について検証した結果、受動疲労の評価には、心拍変動の周波数領域における低周波・高周波成分比(LF/HF)が有効な指標となることを明らかにした。また、走行開始からの経過時間と国際ラフネス指数(IRI)がLF/HFに及ぼす影響をモデル化することで、時間依存性を考慮した路面評価が可能となることを示した。

Key Words : surface roughness, mental fatigue, mental stress, heart rate variability, driving simulator

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。また、舗装の技術基準が、仕様規定から性能規定へと移行したことや¹⁾、限られた建設投資予算で質の高い社会基盤整備が求められていることから、路面評価手法の合理化は喫緊の研究課題となっている。

しかし、既存の路面管理手法は、適当な延長で抽出された区間内で顕在化する、利用者への静的な影響の評価を意図しており、時間とともに変化する潜在的な精神疲労への影響は不明なため、道路の管理実態と利用者評価の間に乖離が生じている。これまでにも、精神疲労が、

道路・交通環境下での運転行動と関係した運転者の集中力および注意力に及ぼす影響については検討されているが^{2,4)}、これらの研究対象は、睡眠時間などの生活習慣や健康状態といった、運転者のライフスタイルに依存した精神疲労が主であった。

ここで、精神疲労とは、外部刺激による精神的負荷によって引き起こされる、強さおよび持続期間や時間パターンに依存した精神的負担の蓄積として定義される⁵⁾。精神的負荷を評価する指標としては、自律神経系の活動を表す心拍変動の有効性が確認されており⁶⁾、土木情報学分野においても、心拍変動計測による、精神的負荷を考慮した路面由来の車両振動乗り心地評価の可能性が示されている⁷⁾。また、既往研究⁸⁾では、路面由来の車両振動に対する精神疲労を、ライフスタイルに起因する能動的な疲労と対比した「受動疲労」と定義し、路面評価に受動疲労が及ぼす影響を心拍変動解析により明らかにしている。

以上より、合理的な路面評価には、時間とともに変化する潜在的な精神疲労を考慮し、受動疲労を精神的負荷の蓄積と捉え、その時間依存性を解明することが必要不可欠である。そこで、本研究は、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、心拍変動計測による生体情報を活用することで、受動疲労に影響を及ぼす精神的負荷の時間依存性について検証する。

2. 心拍変動の計測および評価方法

(1) 心拍変動の概要

心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激による精神的負荷によって揺らぎが生じ、時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎを時間の関数として表したものであり、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。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: 0.15-0.4Hz）と低周波成分（LF: 0.04-0.15）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を反映することが知られている⁶⁾。ここで、交感神経系は精神的負荷により活性化し、副交感神経系は、精神的負荷により不活性化する性質がある。

(2) 計測方法

心拍変動は、近年、生体センシング技術の発達により、簡便かつ非拘束・非侵襲での計測が可能となっている。本研究では、指尖センサによる脈波計測値を用いて、心拍変動データを得た。脈波計測では、脈波測定値の二階微分により、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。なお、本研究では、株式会社TAOS研究所製のBACS Advanceを用いて脈波計測を行った。

(3) 解析及び評価手法

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。そのため、心拍変動から必要な情報を得るためには、周波数解析が有効である。そこで、はじめに、心拍変動のパワースペクトル密度（PSD）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PSDを、区間0.04-0.15Hz（LF）および0.15-0.4Hz（HF）でそれぞれ積分し、LFおよびHFのパワーを計算した。

ここで、HFは、呼吸系の副交感神経成分を表し、精神的負荷により減少する。一方、LF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



図-1 路面評価型 DS による試験状況

比（LF/HF）をとることで、血管運動性の交感神経系成分を表し、精神的負荷により増加する⁶⁾。また、既往研究⁸⁾において、HFは短期的な、LF/HFは長期的な精神的負荷と関係することが示唆されている。そこで、本研究においても、HFおよびLF/HFを心拍変動指標の候補として用いた。

3. DS による走行試験

(1) 路面評価型 DS の概要

DSを用いた走行試験は、実道試験に比べ、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。本研究では、路面平坦性に起因する車両振動以外の負荷要因を排除し、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、北見工業大学所有の路面評価型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。また、路面評価型DSによる仮想環境下での心拍変動計測については、実道試験と同様の傾向が得られることを確認している⁹⁾。路面評価型DSによる走行試験状況を図-1に示す。

(2) 試験参加者（被験者）

走行試験には、健康な男女48名の協力を得た。うち、3名は、脈波計測エラーによる欠測のため、以降の解析では、45名（男性23名、平均年齢21.6歳）のデータを用いた。本試験は、北見工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を受け、全ての被験者から自由意志による試験参加への同意を得た上で実施した。

(3) 試験シナリオ

走行試験における路面条件は、一般道路の新設や高速道路、供用中および供用後の破損が生じた状態を想定し、IRI（国際ラフネス指数）が(a) 0.9、(b) 5.3 および(c) 10.5mm/mの3水準とした。走行条件は、運転操作によ

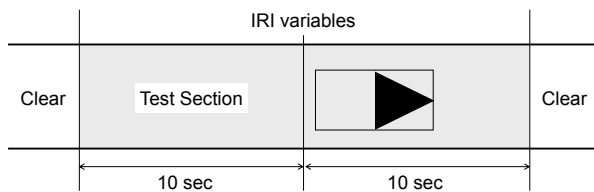


図-2 走行シナリオの概要

る精神的負荷の影響を排除するため助手席状態とし、1試行あたり、各被験者に対しランダムに与えられた各路面水準について、走行速度 60km/h で解析対象の 10 秒間を含めた 20 秒間を体験するよう設定した。試行回数は、各路面条件が 14 回の計 42 回であり、試験時間は走行シナリオの切り替えを含め、1 人当たり約 1 時間である。また、心拍変動の解析は、試験開始からの経過時間を、シナリオの切り替えを除き 600 秒毎に整理し行った。走行シナリオの概要を図-2 に示す。

4. 心拍変動指標を用いた路面評価結果

(1) 平坦性が精神的負荷に及ぼす影響

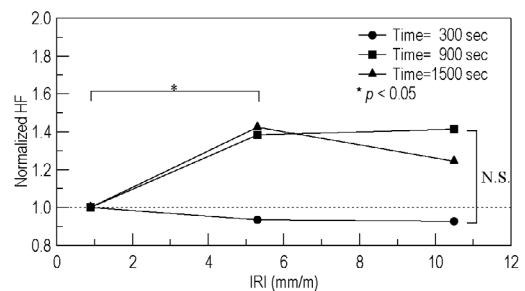
平坦性が精神的負荷に及ぼす影響を確認するため、個人差を考慮し、各被験者で同一路面条件の試行から得られた心拍変動指標の平均値を求め、評価時間（600 秒）別に IRI=0.9mm/m を基準路面とし、IRI と心拍変動指標の関係性を求めた。

図-3 に IRI と心拍変動指標の関係性を示す。図より、HF は、試行初期段階においては、IRI の増加に対し反比例するが、長期的には比例傾向となっており、IRI=0.9mm/m と IRI=5.3mm/m の間で 5%水準の有意差が生じた。これは、HF が短期的な精神的負荷を反映した結果といえ、既往研究成果⁸⁾とも整合している。一方、LF/HF は、IRI の増加に比例するが、試行初期段階での増加量は 10%以下と小さく、時間の経過とともに増加量が大きくなる傾向にあり、IRI=0.9mm/m と IRI=10.5mm/m および IRI=5.3mm/m と IRI=10.5mm/m の間で 5%水準の有意差が認められた。LF は、精神的負荷に対する緩やかな適応に関連し、負荷のかかった状況下では著しく増大することが知られており¹⁰⁾、その結果、時間経過に伴い、LF/HF が増加したものといえる。以上より、心拍変動指標は、平坦性に起因する精神的負荷を反映し、特に LF/HF は精神的負荷の時間変化に対応するものといえる。

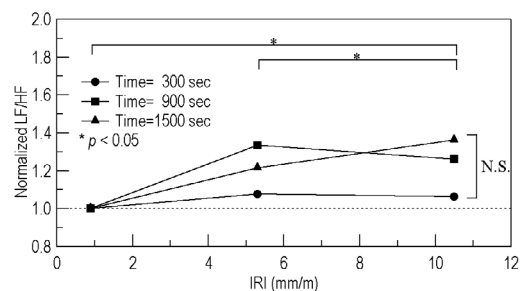
(2) 時間経過が精神的負荷に及ぼす影響

受動疲労の原因となる、精神的負荷の時間変化を確認するため、IRI 別に走行開始時を基準とし、時間経過と心拍変動指標の関係を求めた。

図-4 に経過時間と心拍変動指標の関係を示す。図より、



(a) HF



(b) LF/HF

図-3 IRI の増加に伴う心拍変動指標の変化

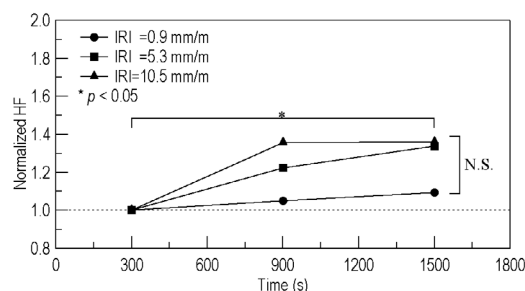
両指標とも、時間経過に比例し増加することが確認でき、HF では、評価時間 300 秒と 1500 秒の間で 5%水準の有意差が認められ、LF/HF では、評価時間 900 秒と 1500 秒の間で 5%水準の、300 秒と 1500 秒の間では 1%水準の有意差が生じた。特に、LF/HF は、IRI が高い状況下で著しく増加することが確認できる。一方、IRI が低い場合には、LF/HF の時間経過に伴う増加が緩やかとなっている。これは、短期的な精神的負荷を反映する HF が時間とともに増加し、相対的に LF/HF の値が小さくなるためであると考えられる⁸⁾。以上より、LF/HF は、時間依存性を考慮した路面評価に対し有効な心拍変動指標であるといえる。

(3) 平坦性評価における時間依存性の検証

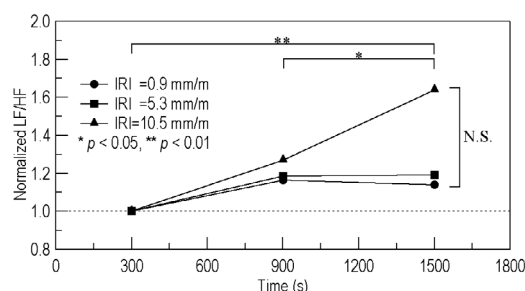
前節の結果から、精神的負荷が、IRI および経過時間の影響を受けることは明らかである。そこで、路面評価の観点から、走行開始時を基準とした時間変化（ T ）と IRI について、LF/HF との関係をモデル化したところ、次式が得られ、図-5 に示す結果となった。

$$LF/HF = 1.036327 + 2.26 \times 10^{-5} T - 0.01838 IRI + 4.43 \times 10^{-5} T * IRI \quad (1)$$

図-5 より、IRI が増加するにつれ、LF/HF の時間経過に伴う増加割合が著しく大きくなることが確認できる。例えば、供用中の高速道路における IRI の全国平均 1.7mm/m¹¹⁾を 2 時間走行した場合、基準化された LF/HF は、1.71 となるが、補修基準値の 3.5mm/m となった場合には、1.2 時間と 6 割の走行時間で LF/HF が同様のレベ



(a) HF



(b) LF/HF

図-4 時間経過に伴う心拍変動指標の変化

ルに達することがわかる。以上より、平坦性評価には、IRI 水準毎に、潜在的な精神的負荷の時間依存性に基づく、受動疲労を考慮した対策が必要であるといえる。本研究成果は、今後、交通特性と合わせて検討することで、道路ネットワークにおける合理的な平坦性の維持修繕計画の策定に貢献するものと期待できる。

5. おわりに

本研究では、心拍変動計測による生体情報を活用し、「受動疲労」と定義した路面由来の精神疲労に影響を及ぼす、精神的負荷の時間依存性について検証したものである。その結果、LF/HF を心拍変動指標とし、走行開始からの経過時間および IRI が LF/HF に及ぼす影響をモデル化することで、時間依存性を考慮した路面評価が可能となることを示した。本研究成果は、交通特性と合わせ検討することで、道路ネットワークにおける合理的な平坦性の維持修繕計画策定に寄与し、その結果、移動時の疲労や交通事故低減効果が期待できる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（若手研究（B）15K20843 および基盤研究（B）26289167）の助成を受け実施したものである。また、走行試験結果の解析には、北見工業大学工学部社会環境工学科卒業生の堀越琴絵氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

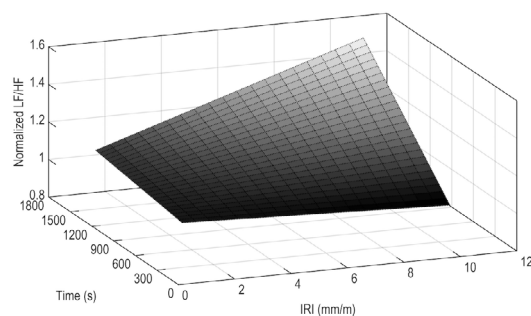


図-5 平坦性評価における精神的負荷の時間依存性

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装の性能評価法 - 必須および主要な性能評価指標編，丸善，2006。
- 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) Noy, Y.I., Horrey, W.J., Popkin, S.M., Howarth, H.D., and Courtney, T.K.: Future directions in fatigue and safety research, *Accident Analysis and Prevention*, 43(2) pp.495-497, 2011.
- 5) 山田晋平，三宅晋司，大須賀美恵子：精神疲労を評価する指標の探索，人間工学，Vol.48，No. 6，pp.295-303，2012。
- 6) 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.
- 7) 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。
- 8) 富山和也，川村 彰，Rossi, R., Gastaldi, M., Mulatti, C.：心拍変動解析に基づく精神疲労を考慮した路面平坦性評価，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，Vol.71，No.3，pp.I_1-I_8，2015。
- 9) 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。
- 10) 八谷百合子：生体疲労信号解析および疲労度推定手法に関する研究，博士論文，早稲田大学，2011。
- 11) 江口利幸，富山和也：建設工事の出来形基準における IRI の適用性，舗装，Vol.51，No.6，pp.9-16，2016。