

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

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)

従来、舗装路面の機能評価は、車両走行時の快適性および安全性に立脚したものが主であり、潜在的な精神疲労に及ぼす影響は不明であった。そこで、本研究では、ドライビングシミュレータを用いた走行試験を実施し、生体脈波計測に基づく心拍変動解析により、「受動疲労」と定義した、路面性状由来の精神疲労を考慮した平坦性評価について検討した。その結果、心拍変動の高周波成分 (HF) および低周波・高周波成分比 (LF/HF) に着目し、国際ラフネス指数 (IRI) との関係モデル化することで、車両走行時の時間変化に依存した、受動疲労に基づく平坦性評価が可能であることを示した。また、幹線道路における、受動疲労を考慮した IRI の許容水準について検討したところ、5.2mm/m が目安となることがわかった。

Key Words : surface roughness, mental 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・交通環境の量的整備が一定水準に達したことを背景に、道路と利用者の接点となる路面の管理には、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。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に伴い¹⁾、路面に要求される機能に対する適切な性能評価手法が求められている。

従来、舗装路面に要求される機能の評価は、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立脚したものが主であり、初期状況では認知しにくく、潜在的な要因である精神疲労に関する検討はなされていない。一方、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に影響される生体疲労についての研究はなされているが²⁾、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「能動疲労」とすると、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。

精神疲労とは、外部刺激による精神的負荷 (メンタルストレス) 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⁴⁾。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いる⁵⁾。また、既往研究⁶⁾では、心電図計測による心拍変動解析により、路面由来の車両振動に起因する潜在的な精神的負荷の把握が可能であることを明らかにしている。そのため、精神疲労が精神的負荷に起因するものと考えると、心拍変動解析により、精神的負荷をモニタリングすることで、受動疲労の評価が可能であるものと考えられる。



(a) 指尖センサ (b) 耳葉センサ

図-1 生体脈波の計測方法

なお、「負荷」と「ストレス」という用語については、文脈に応じて適宜使い分け、本研究では、同義として扱うものとする。

一方、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、実験協力者（以下、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。しかし、今日の生体情報計測技術の発達により、耳葉や指尖に付けたクリップ型のセンサにより、生体脈波を計測し、簡便かつ非拘束・非侵襲に、心電図と同様の情報を得ることが可能となっている。

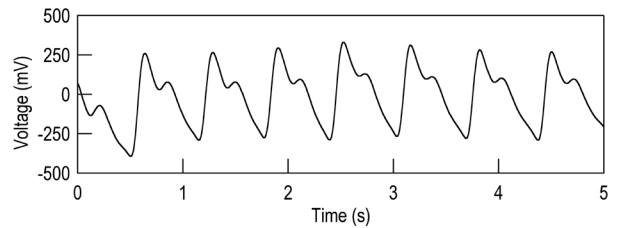
そこで、本研究では、生体脈波計測に基づく心拍変動解析により、代表的な舗装の性能である平坦性の、受動疲労を考慮した評価について検討する。なお、本研究では、被験者の安全性ならびに必要な路面条件を容易に確保し、効率的かつ経済的に実施するため、北見工業大学が所有する路面評価型ドライビングシミュレータ（以下、「DS」）を用い走行試験を実施した⁷⁾。

2. 心拍変動解析による路面評価

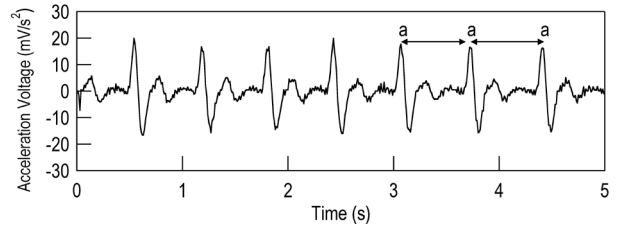
従来、道路利用者意識を対象とした路面評価研究では、体感試験を実施し、乗車感覚を表すアンケート調査による検討が行なわれていた。しかし、アンケートによる評価では、評価対象前後の路面状況によって利用者の評価尺度が変化すること（係留効果）が課題であった。一方、心拍変動は、脳波や生化学検査、血液検査などと異なり、非拘束かつ非侵襲に精神的負荷と関連した定量的な情報を得ることが可能である。そこで、本研究では、非拘束脈波計測による、客観的かつ合理的な受動疲労評価について、心拍変動に着目した検討を行なう。

(1) 心拍変動の概要⁵⁾

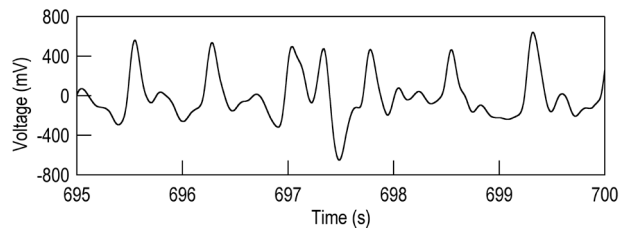
心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激による精神的負荷によって、揺らぎが生じ時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎを時間の関数として表したものであり、呼吸や体温、ストレスなどによって変化する自律神経系の活動を表す重要な生体情報の一つであ



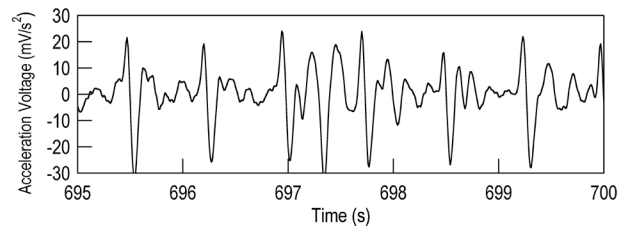
(a) 脈波計測データ（指尖計測）



(b) 脈波計測データから得られた脈波加速度（指尖計測）



(c) 脈波計測データ（耳葉計測、ノイズ混入時）



(d) 脈波計測データから得られた脈波加速度
（耳葉計測、ノイズ混入時）

図-2 脈波および脈波加速度データの例

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⁵⁾。ここで、交感神経系はストレス状況下で活性化し、副交感神経系は安静状態、即ちストレスのない状況下で活性化する性質がある。

(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葉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、耳葉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（図-2）、事後処理が必要となった。一方、指尖計測では、耳葉に比べ、安定した脈波計測が可

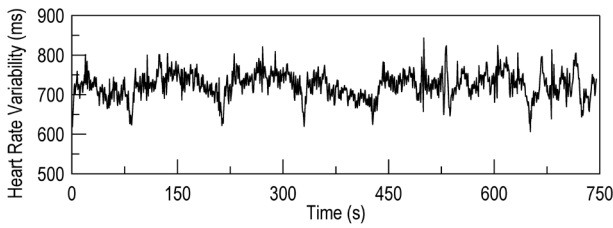


図-3 脈波加速度から得られた心拍変動の例

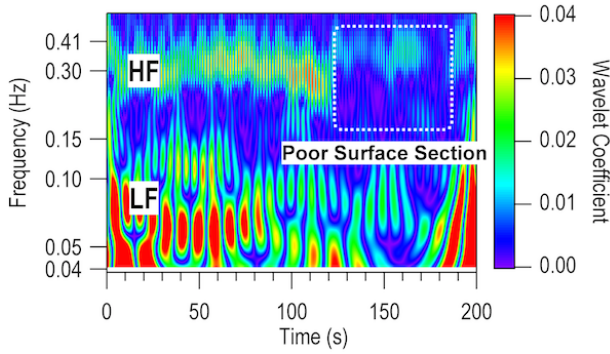


図-4 心拍変動の連続ウェーブレット変換結果



図-5 路面評価型DSによる走行試験状況

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、指尖計測により脈波情報を得ることとした。

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。図-2に脈波および脈波加速度データの一例を示す。心拍変動は、脈波加速度データのピーク間隔(図-2(b)におけるa-a間隔)を計測したものである。図-3に心拍変動の例を示す。

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

(3) 心拍変動解析による路面評価

既往研究⁶⁾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は、既

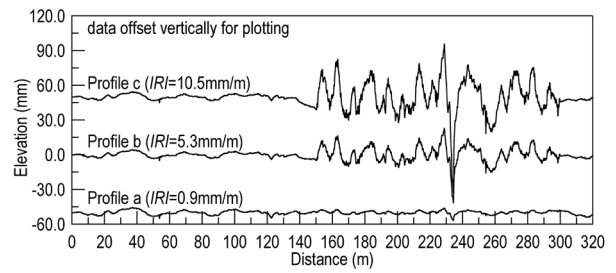


図-6 走行試験に用いた路面プロファイル

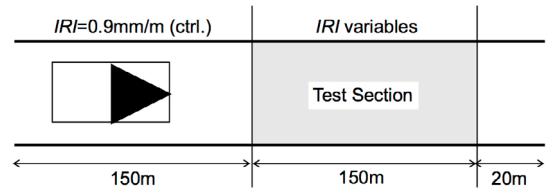


図-7 走行試験シナリオの概要

往研究⁶⁾より得られた心拍変動の連続ウェーブレット変換例であるが、120から180秒の路面平坦性低下区間において、HFの減衰が確認できる。これは、外部刺激に起因する精神的負荷により、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は、ストレスに対する緩やかな適応に関連し、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⁹⁾。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による走行試験の概要

(1) 路面評価型DS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。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、路面評価型DSを用いて走行試験を実施した。従来の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、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を用いた、仮想環境下での走行試験の再現性については、既往研究⁷⁾において確認済みである。路面評価型DSによる走行試験状況を図-5に示す。

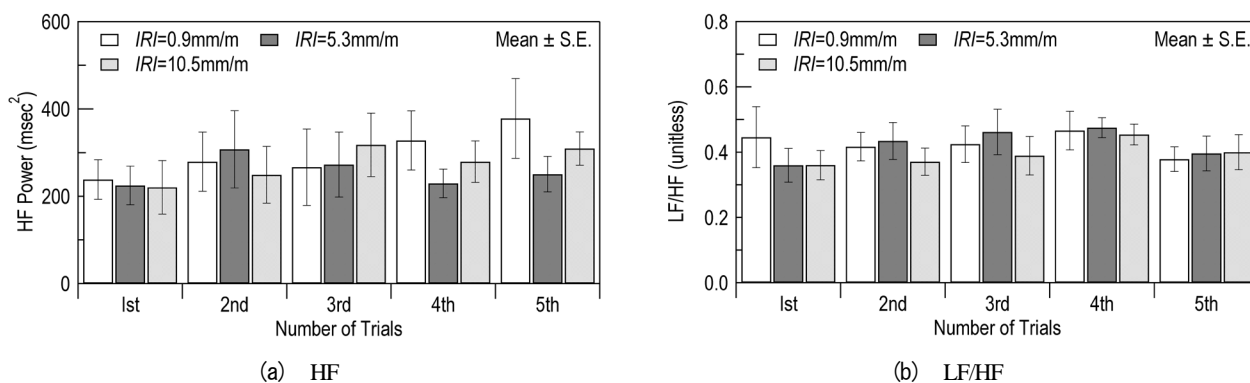


図-8 試行回数およびIRIと心拍変動指標の関係

表-1 HF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	
Num. of Trials	102008.9	4	25502.2	2.46	0.0496 **
IRI	37954.8	2	18977.4	1.83	0.1654
Num. of Trials * IRI	110182.0	8	13772.8	2.33	0.2373
Error	1162185.8	112	10376.7		
	4731997.8	134			** $p < 0.05$

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		
	3.39143	134			

(2) 試験参加者（被験者）

走行試験には、健康な20代の学生13名の協力を得た。うち、4名は、脈波計測エラーにより欠測が生じたため、以降の解析では、残り9名（男性9名、平均年齢21.3歳）のデータを用いた。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、DSに乗り、脈波センサを装着後、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、一般道の新設、供用中および供用後に破損が生じた状況を想定し、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。ここで、試験コースの路面プロファイルを図-6に示す。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、カウンターバランスを考慮し、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、幹線道路を想定し、走行速度60km/hを目安に、計135回の試験区間を走行した。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)と同様のプロファイルを設定した。また、試験シナリオは、沿道環境や試験そのものに対するストレスを抑制するため、路面状況以外の条件が一定となるよう配慮した。

4. 心拍変動を用いた受動疲労解析

本章では、DSによる走行試験から得られた脈波計測結果について、心拍変動指標であるHFとLF/HFに着目し、受動疲労を考慮した平坦性評価について検討する。

(1) 心拍変動の解析方法

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ため、その解析は、周波数領域で行なう必要がある。そこで、はじめに、心拍変動の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) 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。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

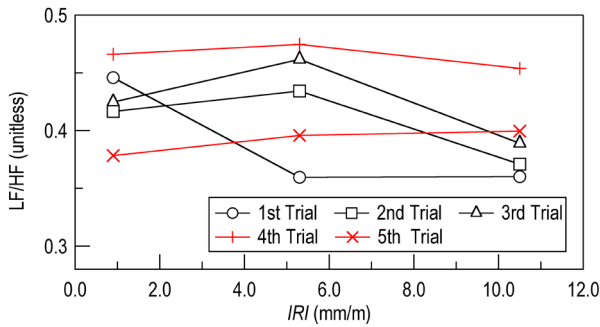


図-9 試行回数ごとの IRI と LF/HF の関係

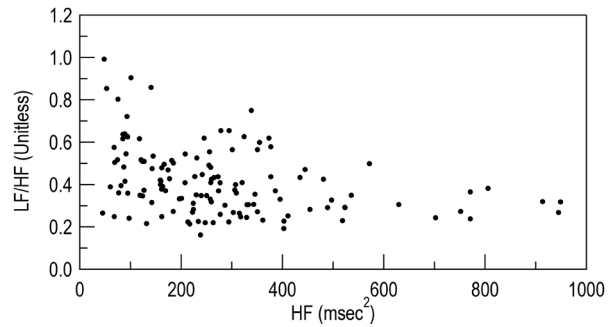


図-11 全ての試行条件における HF と LF/HF の関係

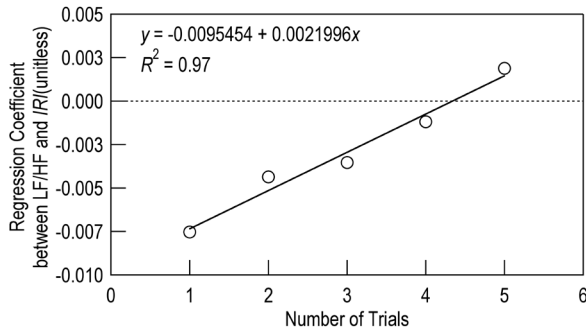


図-10 試行回数と LF/HF と IRI の直線回帰から得られた回帰係数の関係

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ることとした。

(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% に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、事後にテューキーの 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)⁸⁾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 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、以下に得られた知見を示す。

a) HF

表-1 より、HF 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 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、被験者に対する精神的負荷が弱くな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 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、それと整合的であ

る。

b) LF/HF

表-2 より、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、交互作用は有意ではなかったが、図-8 (b) より、試行の初期段階では、IRI の増加に反比例して LF/HF が減少し、各 IRI において 4 試行目までは増加の傾向が窺える。図-9 は、LF/HF について IRI と試行回数の関係を示したものである。ここで、LF/HF の値が、コントロール区間、即ち IRI=0.9mm/m に対し、相対的にどのように変化したかを考えると、図より、LF/HF は、1 から 4 試行目で IRI が 0.9mm/m から 10.5mm/m へと増加するに従い、反比例し減少する傾向にある。一方、5 試行目において LF/HF は、IRI に比例して増加する結果となった。また、LF/HF の値は、4 試行目まで増加し 5 試行目で減少することが確認できる。これは、試行の繰返しに伴い、分母の HF が増加したためと考えられる。そこで、試行回数と LF/HF の増減状況を確認するため、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を求めたところ、図-10 に示す結果が得られた。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。即ち、5 試行目からは、緩やかに変動する交感神経系が支配的となり、路面に起因する精神的負荷である受動疲労が発現したものと見える。

(3) 受動疲労評価における心拍変動指標

試行回数および IRI が、HF と LF/HF に及ぼす影響について検討した結果をもとに、精神疲労の観点から、各心拍変動指標の適用性についてまとめると以下のようになる。

a) HF

平坦性を原因とし、一時的に値は増加するが、走行を重ねるにつれ増加傾向となる。即ち、HF は、被験者の路面に対する短期的なストレスを反映しているものといえる。

b) LF/HF

走行の繰返しに伴う、平坦性を原因とした車両振動の

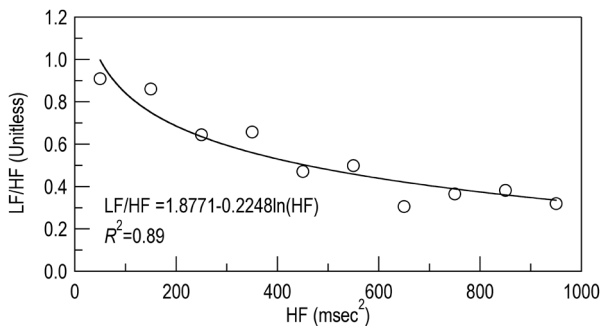


図-12 HFに対するLF/HFの上限

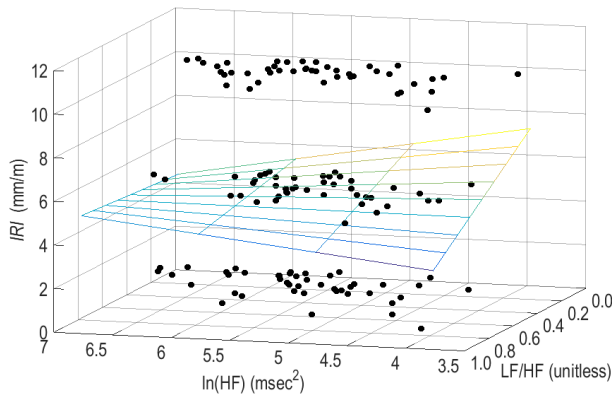


図-13 HFおよびLF/HFとIRIの関係

累積により、値は増加傾向となる。即ち、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を反映しているものといえる。

以上より、精神疲労をストレスの持続時間に依存した蓄積と考え、LF/HFは、平坦性に由来した受動疲労の有効な指標になるものといえる。一方、HF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への適用が期待できる。

ここで、LF/HFは、HFの持続時間に応じた増加の影響を受けることから、受動疲労の把握には、LF/HFとHFの交互作用が生じるものと考えられる。そこで、次節において、LF/HFおよびHFとIRIの関係をモデル化し、受動疲労を考慮した平坦性評価について検討する。

(4) 受動疲労を考慮した平坦性評価

前節では、脈波データを用いた心拍変動解析により、平坦性に起因するストレスは、短期的にはHFに反映されるが、長期的にはLF/HFで支配的となることがわかった。そのため、受動疲労の把握を目的とした場合、HFおよびLF/HF双方の状態を考慮する必要があるものと考えられる。そこで、本節では、HFとLF/HFの関係を明らかにし、心拍変動指標とIRIの関係をモデル化することで、受動疲労を考慮した平坦性評価を試みる。

図-11に、全ての試行条件における、HFとLF/HFの

関係を示す。図より、HFの値が高い場合、LF/HFの値は低く、共にストレスが低い状態を反映している。一方、HFが低くなるにつれて、LF/HFのばらつきは大きくなるが、値の上限はHFの減少に反比例し高くなることが窺える。図-12に、HFを100msec²に区切り95パーセンタイル値を求めた結果を示す。図より、LF/HFの上限は、対数近似できることがわかる。ここで、図-9に示す通り、LF/HFは、持続時間による分母HFの増加に伴い値が減少し、図-12におけるLF/HFの値と受動疲労の発現状況は必ずしも一致しない。そこで、HFとLF/HFの交互作用を考慮し、IRIとの関係についてモデル化を行った。図-13に、HFおよびLF/HFとIRIの関係を示す。結果、図中メッシュ平面で示した、次式のモデルが得られた。

$$IRI = 13.3215 - 1.2490 \ln(HF) - 12.5772 LF/HF + 1.9186 \ln(HF) * LF/HF \quad (1)$$

図-13より、HFによる短期的なストレス評価とIRIが対応するのは、LF/HFの値が小さく長期的なストレスが生じていない場合である。一方、LF/HFによる長期的なストレス評価がIRIと対応するのは、HFの値が大きく短期的なストレスの影響が現れていない場合である。この結果は、前節までの考察と整合しており、心拍変動解析により受動疲労を考慮した平坦性評価が可能であることを示唆している。

ここで、図-10より、4試行目以降で受動疲労が発現することを考慮し、当該試行におけるLF/HFの平均値(LF/HF=0.4648)と、それを図-12の回帰式に代入し得られた値(HF=532.1523)を、式(1)に代入すると、IRIは5.2mm/mとなり、受動疲労の観点から、幹線道路におけるIRIの許容水準の目安になるものといえる。これは、既往研究⁹⁾における平坦性調査結果において、一般国道および主要地方道におけるIRIが、概ね5mm/m以下であったことを勘案しても、平坦性水準として妥当な値であると考えられる。

5. おわりに

本研究は、脈波計測による心拍変動解析に基づき、「受動疲労」と定義した、路面性状に起因する精神疲労を考慮した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) 心拍変動の高周波成分(HF)は、平坦性を原因とし、一時的に値は増加するが、走行を重ねるにつれ増加傾向となる。即ち、HFは、被験者の路面に対する短期的なストレスを反映しているものといえる。そのため、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

価への適用が期待できる。

- (2) 心拍変動の低周波成分と高周波成分の比 (LF/HF) は、走行の繰返しに伴う、平坦性を原因とした車両振動の累積により、値は増加傾向となる。即ち、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を反映しているものといえる。一方、LF/HF は、HF の持続時間に応じた増加の影響を受けるため、受動疲労の把握には、LF/HF と HF の相互作用を考慮する必要がある。
- (3) HF に対する LF/HF の上限値は、対数近似することができ、HF の減少に反比例し高くなることがわかった。この結果に基づき、HF および LF/HF と IRI の関係をモデル化することで、心拍変動解析による受動疲労を考慮した平坦性評価が可能であることを示した。
- (4) 上記モデルを用いて、幹線道路における、受動疲労を考慮した IRI の許容水準について検討したところ、5.2mm/m が目安となることを示した。これは、一般国道および主要地方道における平坦性実態を勘案しても、妥当な値であると考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (若手研究 (B) 15K20843) の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

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) 山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 人間工学, Vol.48, No. 6, pp.295-303, 2012.
- 5) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability: Standards of measurement, physio-logical interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 354-381, 1996.
- 6) 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.L125-L132, 2011.
- 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.L135-L141, 2012.
- 8) The MathWorks, Inc.: Statistical Toolbox User's Guide R2014a, 2014.
- 9) 藤田 旬, 富山和也, Nueraihemaitijiang ABLIZ, 川村 彰: 簡易平坦性測定および GIS に基づく市街地道路の路面モニタリング, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.69, No.2, pp.L90-L97, 2013.

EVALUATION OF SURFACE UNEVENNESS CONSIDERING MENTAL FATIGUE BASED ON HEART RATE VARIABILITY ANALYSIS

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Riccardo ROSSI,
Massimiliano GASTALDI, and Claudio MULATTI

Functional evaluation of road surfaces has traditionally been based on the safety and comfort of traveling vehicles. However, the influence of road surface condition to unconscious mental fatigue while driving is also significant for drivers. This study examines a new evaluation method of surface unevenness based on heart rate variability analysis in terms of “passive fatigue” that is defined as mental fatigue caused by road surface condition. For this purpose we conduct a driving experiment by use of a sophisticated driving simulator to diagnose the passive fatigue induced by repeated traveling over specific surface conditions. The frequency analysis of heart rate variability signals measured by pulse waves is employed to monitor the behavior of high frequency (HF) and low frequency (LF) components of the signals, which reflects mental stress of humans. According to the result a multiple regression model of the *International Roughness Index (IRI)* on the HF and LF/HF contributes to evaluate surface unevenness considering the passive fatigue. This study also suggests an IRI value of 5.2mm/m as an acceptable level for highways in respect of the passive fatigue.