

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

石田 樹¹・川村 彰²・Alimujiang Yiming³・富山 和也⁴

¹正会員 独)土木研究所寒地土木研究所 (〒082-8602 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 工学部土木開発工学科 (〒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)

被験者による舗装路面の乗り心地評価の客観性を高めるため、生体信号による客観的評価の可能性について基礎的な研究を行った。実際の路面から取得した縦断凹凸プロファイルをドライビングシミュレータで再現走行実験を行った。主観的路面評価方法であるアンケートによって乗り心地を5段階評価すると共に、評価対象とした路面区間を走行したときの生体信号(心拍数および皮膚伝導反応)の変化量を計測した。凹凸路面を走行すると平坦路に比べ被験者の心拍数は増加し、路面の平坦性の低下および走行速度の増加によって上下加速度R.M.S.値が増加すると心拍数の変化率は増加する傾向が見られた。凹凸路走行により皮膚伝導反応値は増加したが、その変化率は分散が大きく、平坦性及び走行速度との明瞭な関係は見られなかった。

Key Words : roughness, heart rate, skin conductance response, IRI

1. 背景と目的

道路は最も基礎的な社会資本のひとつとして我々の日常生活に密着している。道路の構成要素のうち、路面は道路利用者(車)と道路の接点であり、その状態が車の走行挙動に大きく影響する要因である。従って、道路管理者にとって路面をどのような状態に維持管理するのかは、非常に大きな課題である。他方、道路利用者が道路に求めるサービスの内容も時代と共に変化している。戦後、高度経済成長を背景として積極的な公共投資が行われ、砂利道をアスファルトで舗装し、新たな路線建設が進められた時代には量的充足が第一に求められた。量的にある程度の水準まで道路整備が完了した現在、道路に求められるサービスは量的充足から道路走行時の快適さや安全性といった質的充足に移行しつつあるものと思われる。道路管理者には、このような利用者のニーズに即した性能を、限りある道路事業財源の下で、効率的に提供することが求められている。

我が国の高速道路や国道で従来用いられてきた路面の評価および維持管理の手法は、主な路面の損傷形態であるわだちぼれ量、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。

路面の快適性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、アンケート調査に付随する評価のばらつきや客観性の低さから、定量評価が困難であることが指摘される。そこで本研究では、定量・客観指標として生体信号の変化を用いることを検討する。路面の凹凸に起因する車両振動が乗員にストレスを与え生体信号に変化を及ぼすとの仮定の基に、走行実験により生体信号を計測し、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た。

図-1に示すように、ストレスは各種のストレス刺激(ストレッサ)に対する生体防御反応のことであり、生体システムの維持を司る自律神経系、内分泌系、免疫系へ影響を及ぼし、総合的に生体調節系として働いている。生体は体内外の環境からストレス刺激を受け、絶えずその状態

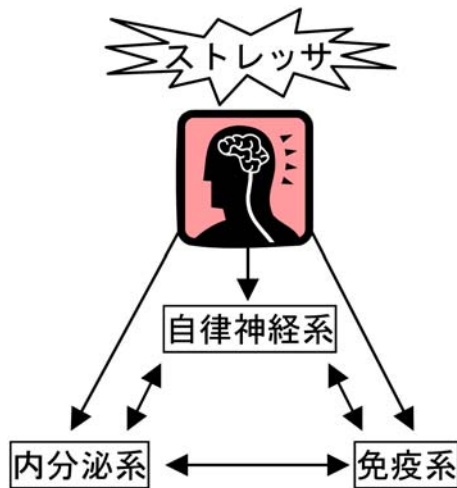


図-1 ストレス反応

表-1 自律神経の働き

副交感神経優位	生体信号	交感神経優位
減少	心拍数	増加
低下	血圧	上昇
減少	発汗	増加
収縮	瞳孔	散大

を変化させており、この状態の時間変化を計測したものが生体信号である。電気工学の発展によりこの変化を電氣的に精密に計測することが可能となった。生体信号はストレスの定量・客観評価に有効とされ⁴⁾、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⁵⁾⁶⁾⁷⁾。これらの研究では脳波の他、自律神経系の影響を受けている血圧、心拍、発汗、呼吸、体温、眼球運動などがストレス指標として利用されている。他方、内分泌系の指標として血液、唾液などの生体液に含まれるバイオマーカーを指標とした研究も行われている⁸⁾。表-1に自律神経系による主な生体信号の変化を示す。心拍数も皮膚伝導反応も交感神経と副交感神経の支配を受けており、緊張や驚きなどのストレスを受けると交感神経支配が優位となり、心拍数は増加し、また、精神的発汗が促進されるため皮膚の伝導度(電気抵抗の逆数)が増加する。

本研究では、指標として生体信号を選択するにあたり非侵襲性、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。

2. 実験方法

(1) ドライビングシミュレータ

実際の道路上で車両運動評価および被験者による主観評価を行うには、実験を行うに適した路面箇所の確保、



写真-1 路面評価型ドライビングシミュレータ

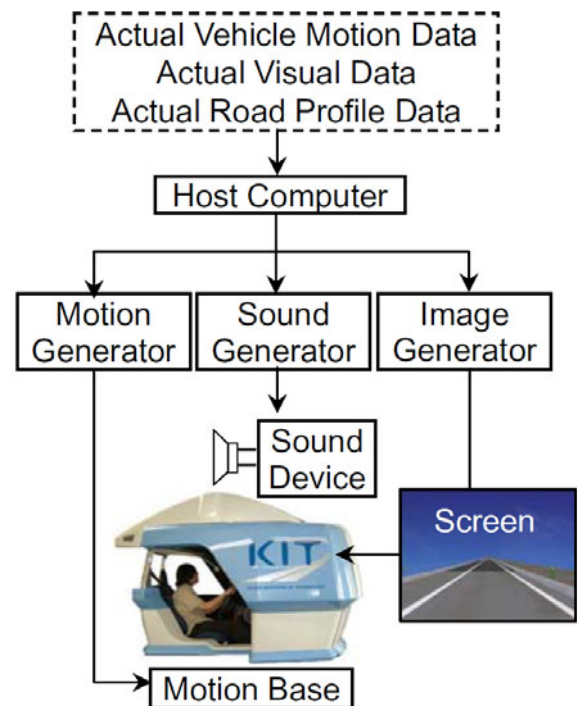


図-2 シミュレータのシステム

多くの被験者に対する実験条件の同一性と安全の確保等といった多くの困難さが伴う。これに対し、ドライビングシミュレータ(以下 DS)による実験は、実車を用いる走行試験に比べ次のメリットをもつ。a)試験を安全に実施できること、b)同じ条件で繰り返し試験できること、c)経済性に優れること、d)任意の試験条件を容易に設定できること。これらの特性を生かし、これまで DS は安全運転教育や車両の開発、道路線形設計等の分野で活用されてきた。本研究では、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⁹⁾(以下「KITDS」という)を用いて走行実験を行った。KITDS は一般的な DS の機能に加え、実路面の路面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。KITDS は 6 軸のシリンダによって支持された乗用車運転席を模擬したコックピットをもち、各シリンダが伸縮することで 6 自由度の運動を発生させ

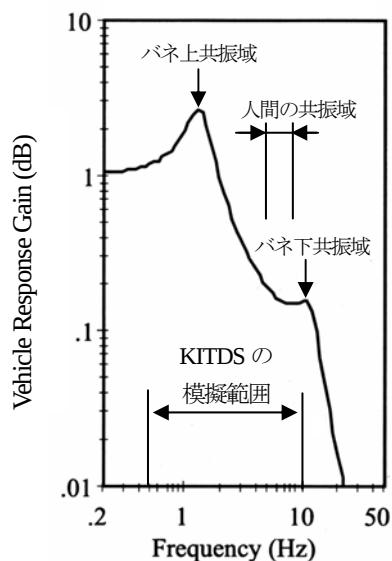


図-3 車両応答ゲインと KITDS 振動模擬範囲

る。稼動範囲は前後、左右、上下に $\pm 100\text{mm}$ 、最大 0.5G の加速度を再現可能である。また、これらのシリンダは最大 10Hz までの振動再現に対応可能な仕様となっている。コックピット前方には広視野のスクリーンが装備され、車両挙動に連動した画像を提供することができる。また、データロギング機能を持ち、走行速度、上下左右及び前後加速度、ロール、ピッチ、ヨーといった車両挙動情報、および操舵角、アクセル開度などの運転操作情報を取得することができる。このような機能を有する DS は、現在のところ国内外を通じて他に開発事例はないと思われる。

自動車は質量とバネが複雑に組み合わせられたシステムである。車両の各部分にはそれぞれが持つ質量、バネ定数、減衰係数によって決まる固有振動数を有し、路面凹凸によって車両に発生する振動が固有振動数と一致すると共振現象によって振幅が増大する。乗り心地に影響する実際の自動車で発生する振動は以下のように分類される¹⁰⁾。
ピッチング・バウンシング：大きなうねりや凹凸を通過した際のバネ上の連続的な $1\sim 2\text{Hz}$ 程度の振動、ブルブル振動：連続的凹凸路面を走行するときなどに車体全体が $2\sim 15\text{Hz}$ 程度で微振動を繰り返す現象、ハーシュネス：荒れた路面からの刺激が減衰されずに伝わる $15\sim 30\text{Hz}$ 程度のゴツゴツとした振動。また、人体は上下方向の振動に対し $4\sim 8\text{Hz}$ が高感度域とされる¹¹⁾。

DS はある特定領域における車両挙動の再現を目的としたものであり、実際の挙動を完全に再現するものではない。筆者らは、実際の車両挙動と KITDS が再現した車両挙動を比較した結果、図-3 に示す乗り心地への影響が最も大きいとされる $0.5\sim 10\text{Hz}$ の範囲で、実車とほぼ同様の上下加速度が再現できることを確認した¹²⁾。このことから KITDS は本研究に適した性能を有するといえる。

表-2 被験者属性

No.	性別	年代	運転頻度	年走行距離	運転歴
1	F	30	ほぼ毎日	20,000	10
2	F	50	ほぼ毎日	600	30
3	F	40	ほぼ毎日	10,000	25
4	F	50	ほぼ毎日	780	30
5	M	40	ほぼ毎日	6,000	27
6	F	20	ほぼ毎日	7,000	3
7	F	20	年に数回	50	5
8	M	60	週に数回	3,000	45
9	M	50	ほぼ毎日	10,000	24
10	M	20	ほぼ毎日	3,000	2
11	M	50	ほぼ毎日	8,000	36
12	M	60	ほぼ毎日	10,000	45
13	F	30	ほぼ毎日	10,000	15
14	F	40	しない	0	0
15	F	60	ほぼ毎日	3,000	8
16	F	60	ほぼ毎日	10,000	16
17	F	60	ほぼ毎日	20,000	37
18	M	50	ほぼ毎日	30,000	30
19	M	20	ほぼ毎日	25,000	6
20	M	40	ほぼ毎日	7,000	4
21	M	30	ほぼ毎日	15,000	20
22	M	60	ほぼ毎日	6,500	36
23	M	50	ほぼ毎日	20,000	36
24	F	30	ほぼ毎日	5,000	12
25	F	70	しない	0	10
26	F	60	ほぼ毎日	10,000	40
27	M	40	週に数回	10,000	15
28	M	60	月に数回	1,000	40

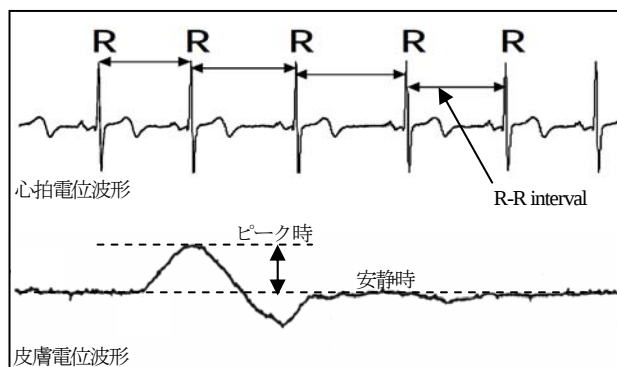


図-4 生体信号の波形計測例

(2) 被験者

表-2 に示す健康な成人男女 28 名を用いた。属性項目として性別の他に年代、年間運転距離、運転歴を考慮した。

(3) 心拍数 (Heart Rate)

心拍電位は図-4 に示すように特徴的な波形を示す。鋭いピークを示す R 波の間隔(R-R Interval)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。図-5 のように、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心拍電位を計測した。

(4) 皮膚伝導反応 (Skin Conductance Response)

皮膚電位は図-4 のように安静時とピーク時の差を測定した。写真-2 のように、被験者左手の人差し指と中指の第 2 節腹部に電極を装着し通電法により計測した。シミュレータの動揺による電極のずれを防ぐため、電極を装着した左手は掌を上にした状態でシミュレータのセンタ

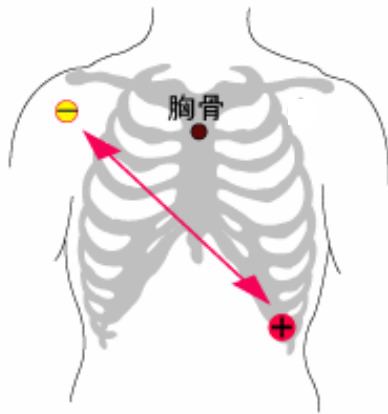


図-5 心拍電位計測用電極の貼り付け位置



写真-2 皮膚伝導反応計測用電極の貼り付け位置

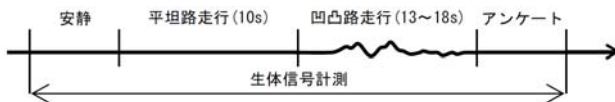


図-6 実験手順

ーコンソール部に載せ、動かさないように指示した。心拍電位および皮膚伝導反応は、生体信号計測用アンプ (PolymateAP1132, TEAC 社製) および皮膚電気活動測定ユニット (AP-U030, 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。データ計測および解析には生体信号計測解析ソフトを使用した (AP-Monitor および R-R Interval Analysis, NoruPro Light Systems, Inc)。

(5) 実験手順

図-6 に実験手順を示す。まず被験者に電極を装着した後、ドライビングシミュレータに乗車してから数分間安静にし、PC のモニターで被験者の心拍電位波形と皮膚伝導反応が安定したのを確認してから走行実験を開始した。

路面プロファイルデータは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 (EVEN: PIARC Second International Experiment to Compare and Harmonize Methods for the Assessment of Longitudinal and

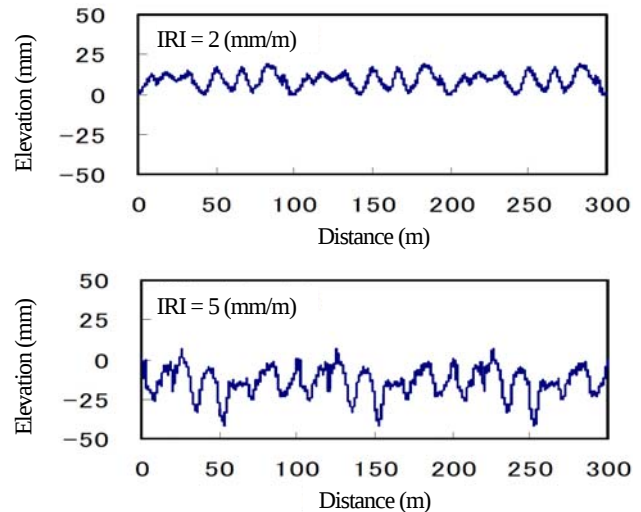


図-7 評価に用いた路面プロファイル

表-3 実験条件

case	IRI(mm/m)	V(km/h)	上下加速度 R.M.S.※(m/s ²)
1	2	60	0.34
2	2	80	0.48
3	5	60	0.86
4	5	80	1.13

※R.M.S. : Root Mean Square

Transverse Evenness of Pavements)¹³⁾ の測定データの中から、IRI=2 および 5mm/m に相当する区間を抽出して使用した。これらの区間の延長はそれぞれ 100m で、高速度では主観評価のための十分な判断時間が確保できない可能性があるため、図-7 に示すように抽出した 100m の路面プロファイルを3回繰り返した 300m を一つの評価対象区間とした。表-3 に実験条件を示す。走行速度は 60 および 80km/h とし、平坦性と速度の組合せで実験条件は4条件とした。各条件における上下加速度の実効値(R.M.S.)は同表に示すとおりである。これらの実験条件における車両挙動は車両挙動解析シミュレーションソフト (CarSim¹⁴⁾) で計算しシミュレータに入力した。主観評価の偏りを避けるため、実験条件順序は上下加速度 R.M.S.値が徐々に増加する順序ではなく被験者毎にランダムとした。走行コースは片側1車線、幅員は 3.5m の直線で、評価対象区間の前に比較区間として完全な平坦路を設けた。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シンプルなものとした。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ないよう、コックピットへの乗降口は暗幕で覆い、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。心拍数変化率は、平坦路走行時の平均値を 1 として凹凸路走行時の変化率を算出した。また、皮膚伝導反応変化率は、平坦路走行時の値を1とし凹凸路走行時のピーク値から変化率を算出した。各条件で走行した直後にアンケート調査を行い、乗り心

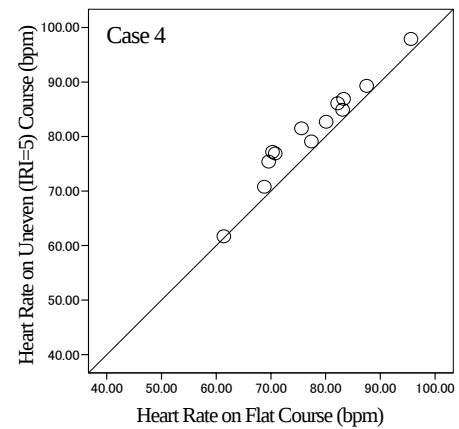
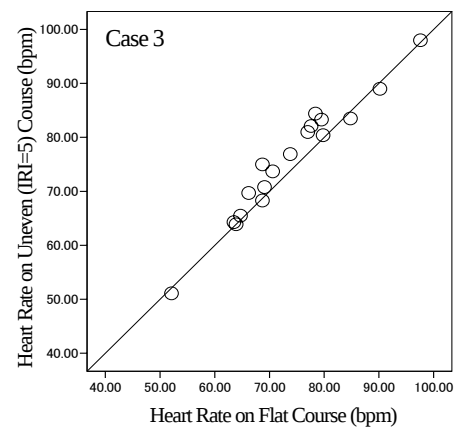
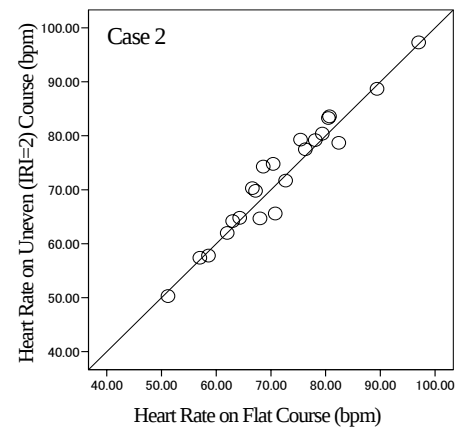
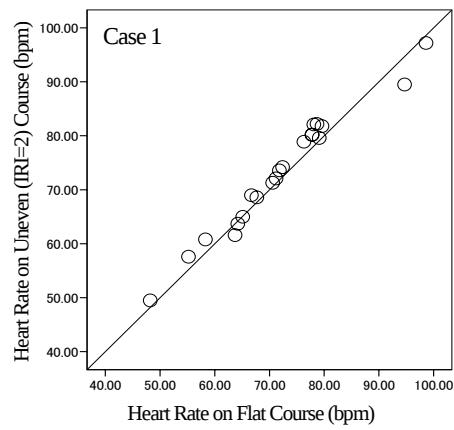


図-8 平坦路および凹凸路での心拍数

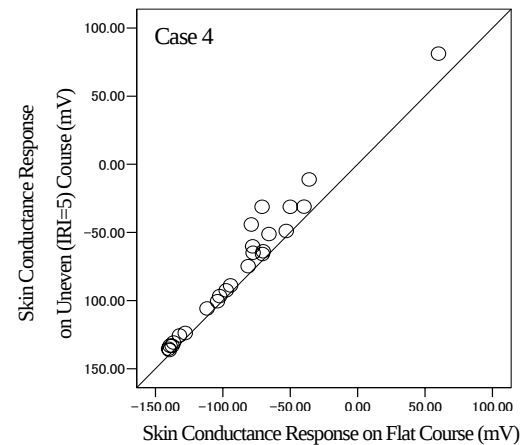
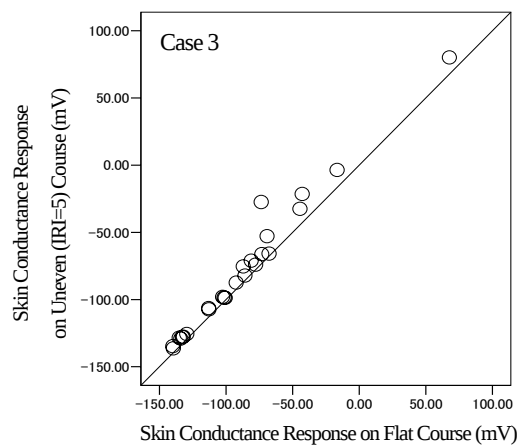
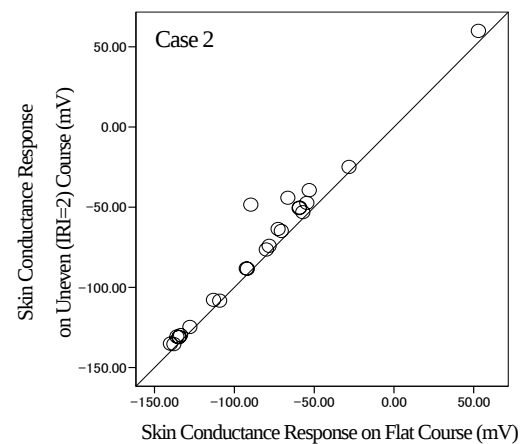
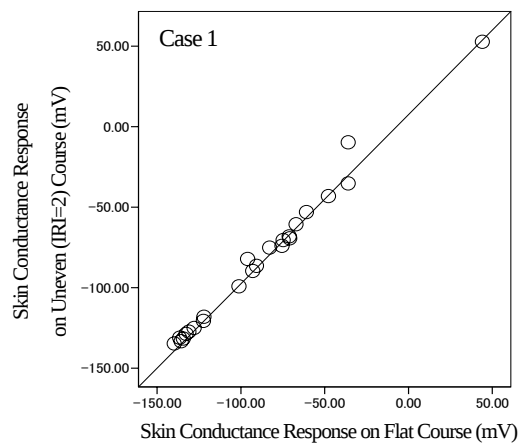


図-9 平坦路および凹凸路での皮膚伝導反応

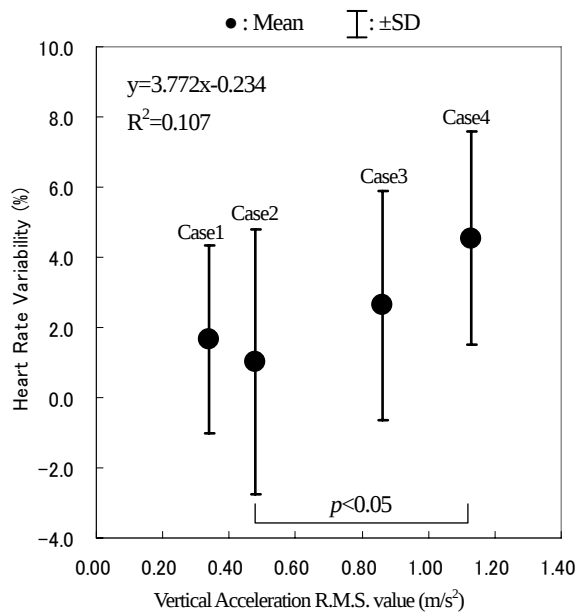


図-10 上下加速度 R. M. S. 値と心拍数変化率

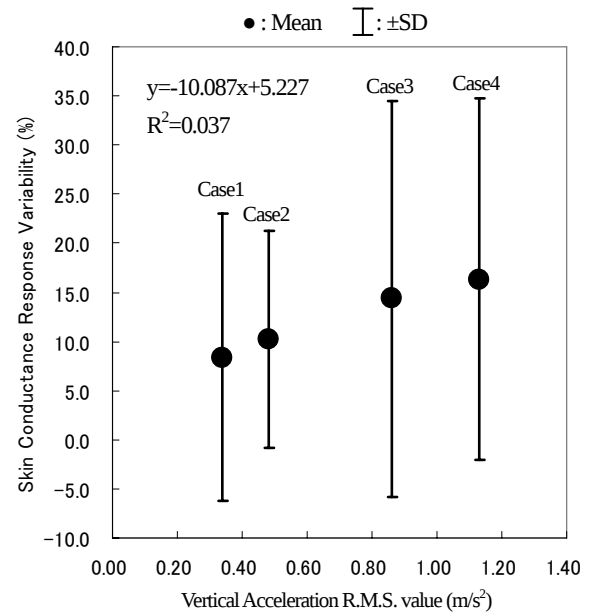


図-11 上下加速度 R. M. S. 値と皮膚伝導反応変化率

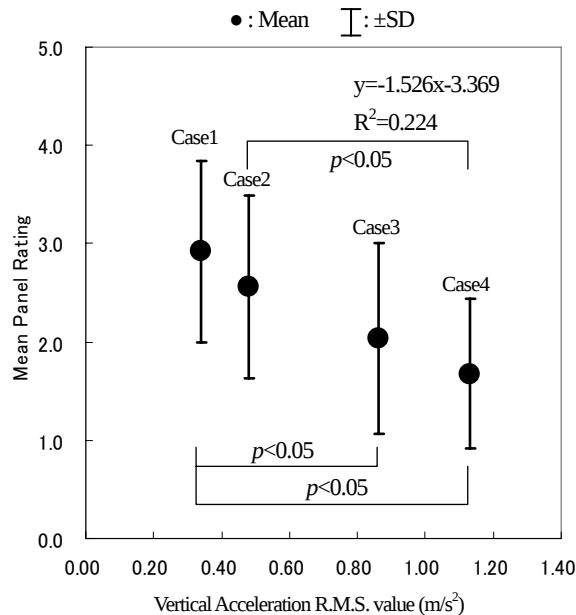


図-12 上下加速度 R. M. S. 値とパネル評価値

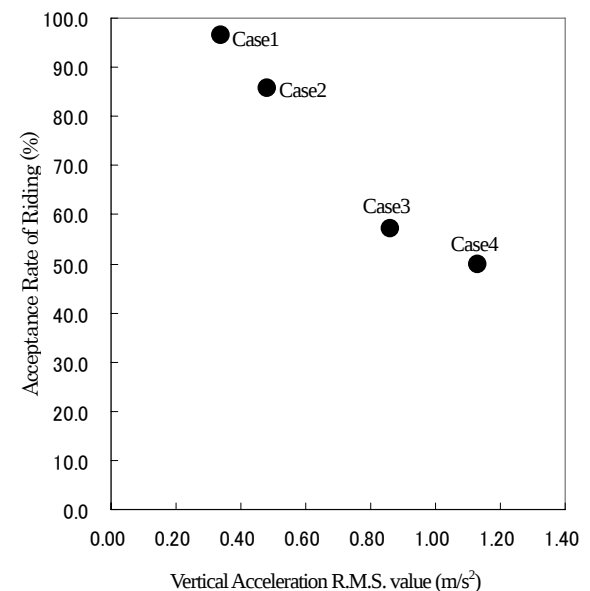


図-13 上下加速度 R. M. S. 値と乗り心地許容回答率

地を“非常によい”から“非常に悪い”までの5段階で評価させ、その乗り心地が許容できるか否かも回答してもらった。

3. 結果

(1) 心拍数

図-8は表-2に示す被験者の平坦路と凹凸路での平均心拍数をプロットしたものである。各実験条件において、被験者の平坦路走行時と凹凸路走行時の平均心拍数を比較すると心拍数は増加する傾向を示し、また実験条件が厳しい(上下加速度 R.M.S.値が大きい)程、心拍数の増加量

が多いことが観察された。平均値のt検定を行ったところ、実験条件2を除いて有意確率 $p<0.05$ となり、平坦路と凹凸路での平均心拍数に有意差が見られた。

(2) 皮膚伝導反応

図-9は表-2に示す被験者の平坦路と凹凸路での皮膚電動反応をプロットしたものである。平坦路走行時と凹凸路走行時の皮膚伝導反応を比較すると、各実験条件において増加する傾向を示し、また実験条件が厳しい(上下加速度 R.M.S.値が大きい)程、皮膚伝導反応の増加量が多いことが観察された。平均値のt検定を行ったところ全ての実験条件において有意差が確認された。

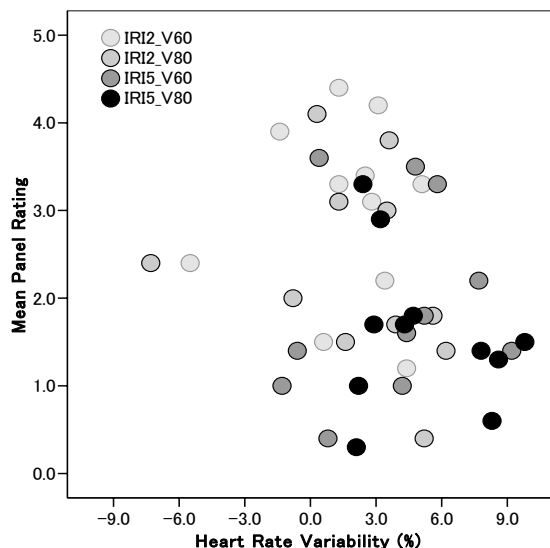


図-14 心拍数変化率とパネル評価

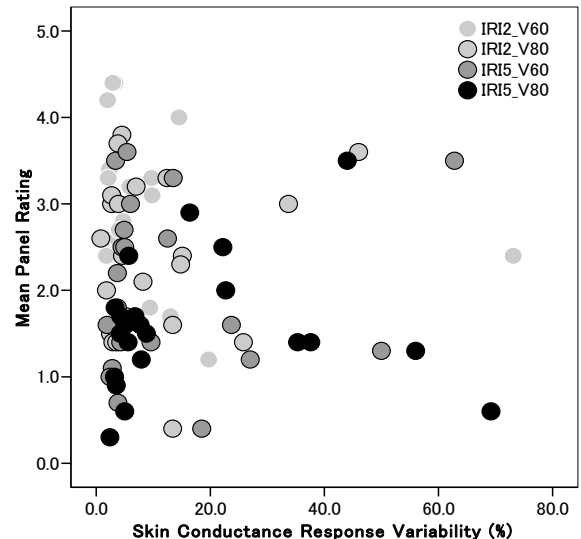


図-15 皮膚伝導反応変化率とパネル評価

(3) 心拍数変化率

分散分析の結果、被験者属性により心拍数変化率に有意差は見られなかったため、全サンプルを1グループとして解析した。図-10に示すように、心拍数変化率は上下加速度 R.M.S.値が増加するとともに増加する傾向を示した。分散分析を行ったところ、実験条件2および4の間で $p<0.05$ となり有意差が確認されたが、その他の組合せでは有意差は見られなかった。上下加速度 R.M.S.値を独立変数、心拍数変化率を従属変数として直線回帰したところ、傾き 3.772 で増加傾向を示したが R^2 は 0.107 と小さく顕著な傾向とはいえなかった。

(4) 皮膚伝導反応変化率

分散分析の結果、被験者属性により皮膚伝導反応変化率に有意差は見られなかったため、全サンプルを1グループとして解析した。図-11に示すように、皮膚伝導反応変化率は分散が大きく、実験条件間で変化率に有意差は見られず、また上下加速度 R.M.S.値との回帰分析でも R^2 は 0.037 となり、明瞭な関係は観察されなかった。

(5) パネル評価

分散分析の結果、被験者属性によりパネル評価値に有意差は見られなかったため全サンプルを1グループとして解析した。図-12に示すように、パネル評価値は上下加速度 R.M.S.値が増加するとともに低下する傾向を示した。分散分析を行ったところ、実験条件1と3、1と4、2と4の間で $p<0.05$ となり有意差が確認されたが、その他の組合せでは有意差は見られなかった。上下加速度 R.M.S.値を独立変数、パネル評価値を従属変数として直線回帰したところ、傾き -1.526、 R^2 は 0.224 で減少傾向を示した。

図-13に上下加速度 R.M.S.値と被験者が体験した実験条件における乗り心地を「許容する」と回答した率の関係を示す。乗り心地の許容率は上下加速度 R.M.S.値が増加

するほど低下し、実験条件1(上下加速度 R.M.S.値=0.34 (m/s^2))ではほぼ 100%であった許容率が、実験条件4(上下加速度 R.M.S.値=1.13 (m/s^2))では 50%となった。

パネル評価の結果と生体信号変化の関係を図-14、15に示す。心拍数変化率および皮膚伝導反応変化率とパネル評価値の間には明瞭な関係は見られなかった。また、許容するとした群と許容しないとした群の間で心拍数変化率および皮膚伝導反応変化率に差は見られなかった。なお、Mean Panel Rating はパネル評価の各尺度値間距離を等しいと仮定して算出した。一般に評定尺度法ではこの仮定が成り立つ保証がない場合が多く、統計処理を行うには系列カテゴリー法などにより距離尺度に変換することが必要であるが、ここでは大まかな傾向を把握することを目的に順序尺度のまま分析を行った。

4. 考察

本実験では、ドライビングシミュレータの使用により、生体信号の変化に影響するその他の要因(運転操作、視覚情報、環境音など)をほぼ取り除くことができ、路面凹凸に起因する車両振動による生体信号の変化を計測、評価できたものと考えられる。

平坦路に比べ凹凸路では心拍数が増加し、上下加速度 R.M.S.値が増加すると心拍数の変化率も増加する傾向が観察された。比較的短時間の計測時間にも関わらず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が利用できる可能性が示唆されたものと考えられる。心拍電位は生体信号の中で最も計測が容易であると言われ、さらに、心拍数は周波数情報であるためノイズやデータの較正に気をつかう必要が低いことから、走行中の車内のような動揺環境でも扱いやすい生体信号であるといえる。

他方、皮膚伝導反応でも凹凸路での増加が観察されたものの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 R.M.S.値との明瞭な関係性は見られなかった。皮膚伝導反応は皮膚上の非常に微少な電気活動を計測するものであるため、センサと皮膚の相対的位置関係変化によって値が変動しやすく、動的環境下での計測には十分な配慮が必要である。

今回の結果からは、被験者属性の違いにより生体信号変化に統計的な差異は見られなかった。これは、特に皮膚伝導反応において顕著であったが、属性による差異よりも個人差が大きかったことによるものと考えている。また、生体信号の変化率とパネル評価値の間には明瞭な関係性が確認されなかった。しかし、路面の平坦性が変化することによって生体信号が変化することが確認できたことにより、主観評価では現れてこないストレスを評価できる可能性があるものと考えている。主観指標と客観指標を用いた包括的な乗り心地評価モデルの構築を今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究により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 R.M.S.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 R.M.S.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パネル評価値の間には明瞭な関係性が確認されなかった。

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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 出口満生，若杉純一，池上達也，難波晋治，山口昌樹：ドライビングシミュレータを用いた運転ストレスの試験方法，電気学会論文誌E，Vol.126，No.8，pp.438-444，2006.
- 9) Ishida, T., Shirakawa, T., Kawamura, A., Tako, J. : Using the KIT driving simulator to evaluate road surface roughness, Proceedings of annual meeting of TRB, 2007.
- 10) The Society of Automotive Engineers of Japan : Automotive Engineering Handbook vol.1, Seiko-sha, p349 (in Japanese), 2004.
- 11) ISO2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) <http://www.carsim.com/products/carsim/>.

A BASIC STUDY ON RIDE COMFORT EVALUATION BASED ON BIOSIGNALS

Tateki ISHIDA, Akira KAWAMURA, Alimujiang YIMING and Kazuya TOMIYAMA

In this research, biosignals, heart rate and skin conductance response, were discussed as indices for the evaluation of ride comfort. A driving simulator that reproduces the behavior of vehicles traveling on uneven road surfaces was used for subjective evaluation of the road profile. At the same time, the fluctuations in the heart rate and skin conductance response were 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 variability of heart rate increased. Moreover, it was also confirmed that the test subject's skin conductance response increased when driving on the uneven roads, but there was no significant relations between the vertical acceleration R.M.S. value and variability of skin conductance response.