

心電図R-R間隔による二輪車高速運転時の生体負担度評価

Assessment of the Physiological Response due to High-speed Motorcycle Driving using Frequency Component Time-series of Heart Rate Variability

鈴木博順 Hironobu Suzuki
齋藤哲彦 Tetsuhiko Saitou

水野康文 Yasufumi Mizuno
藤森孝文 Takafumi Fujimori

●研究開発センター 基盤技術研究室

要旨

二輪車高速走行によるライダーの生体負担度を心電図から定量的に評価することを目的とし、実験を行った。実験は18名を対象とし、3種類の車速(150, 200, 220km/h)で走行専用コースを10分間走行させ、走行中の心電図を計測した。心電図から求めた拍動間隔(R-R間隔)に対してデジタルフィルタを適用し、複数の心拍変動性パラメータを算出した。結果、走行車速の上昇にしたがってR-R間隔が減少(心拍数が上昇)、R-R間隔のゆらぎ成分(CVRR, CVHF)が減少することがわかった。R-R間隔のゆらぎ成分は、精神的負担によって減少するとされる。また、R-R間隔のトレンド(TR)も車速によって異なることが示された。本解析によって二輪車走行の車速による生体反応の相違を定量的に評価することができた。

1 はじめに

二輪車は移動手段であるとともに、風を切る爽快感や開放感、マシンを操る喜びが得られる乗り物である。二輪車の運転には、道路状況や交通標識、他の車両や歩行者に対する注意などの精神的負荷作業のほかに、風圧に耐えてバランスを保つための身体的負荷作業も発生する。これら精神的、身体的負荷の継続は疲労を発生し、安全な運転の支障となると考えられる。このような背景から疲労に起因する事故を未然に防ぎ、快適なモビリティライフを実現するための基礎研究の一環として、ライダーの生体負担度を評価することが求められる。本研究では、精神的、身体的負荷の増大に影響すると考えられる走行車速と、生体負担度との関係を定量的に評価することを目的とする。

生体負担度の指標として、二輪車高速走行中のライダーの心電図を計測した。心電図において隣り合うR波とR波の間隔(R-R間隔: R-R intervals)、およびR-R間隔の変動(心拍変動)は、多くの研究実績から自律神経機能評価や生体負担度評価指標として用いられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。データ解析は実時間処理、連続測定への発展性を考慮して、フィルタを用いた周波数分析

の適用を検討する。本報告の構成は、3章でフィルタを用いた解析方法の説明と、従来の周波数解析法(fast Fourier transform: FFT)では算出困難な新しいパラメータの提案を行う。4章では二輪車走行中のライダーのR-R間隔時系列データに対してフィルタを用いた解析を適用した結果を考察し、二輪車高速運転による生体反応について述べる。

2 実験方法

二輪車の走行実験を担当する職業運転者18名(男性、37.5±7.1歳)を対象とし、150km/h、200km/h、220km/hの各車速で二輪車運転中の心電図と呼吸曲線の測定を行った。走行は排気量600cm³のスポーツタイプの二輪車を用いて、図1に示す走行実験専用テストコースを周回する。150km/h、200km/h、220km/hの各車速の周回数はそれぞれ5周(27.5km、約11分)、7周(38.5km、約11分)、9周(49.5km、約13分)とし、各車速の走行時間が概略一定となるようにした。走行は車速150km/h、200km/h、220km/hの順に同一日に行い、各走行間には5分の休憩を設定した。実験プロトコルを図2に示す。被験者には走行開

始後、各指定車速まで速やかに加速し、その後は危険のない限り指定車速を保持することを指示した。なお、実験は本実験車両のみの単独走行ではなく、他の実験を目的とした車両との混合走行である。着衣は上下つなぎのライダースーツとブーツとし、フルフェイスタイプのヘルメットを装着した。実験前の喫煙、飲食、薬物等の制限は特に行わなかった。心電図は胸部双極誘導法によって、呼吸曲線は呼吸ピックアップを用いて測定した。測定には多用途テレメータ（サイナクトMT11、NECメディカル製）と携帯型データレコーダ（HDL1000、NECメディカル製）を用いた。

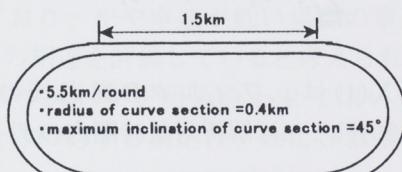


図1 A profile of test course

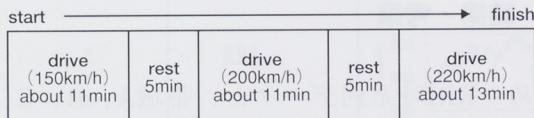


図2 A protocol of experiment

3 解析方法

3.1 R-R間隔時系列データの作成

測定された心電図を500Hzでサンプリングし、R波の位置を検出、隣り合うR波とR波の間隔からR-R間隔時系列データを作成した。作成されたR-R間隔時系列データは時間軸に対して不等間隔なデータである。そこでスプライン補間を施し、1Hzでリサンプリングすることにより等時間間隔のR-R間隔時系列データを作成した。R-R間隔の変動は呼吸周期の影響を受けるため、今回は同時に計測した呼吸周期が0.5Hz以下であることを確認し、1Hzでリサンプリングを行なった。以下の解析では、各指定車速に達してから6分間のR-R間隔時系列データを対象とした。

3.2 フィルタ

解析で用いるフィルタは、データ解析ソフト

DADisp（アストロデザイン（株））を用いて設計したバタワースIIRデジタルフィルタである。通過帯域リップルは3dB、阻止帯域減衰量は40dBであり、各フィルタの通過帯域エッジ周波数は次節（3.3）に示す。デジタルフィルタを通過させることによる位相のシフトを考慮し、再度逆フィルタを通過させることとする。

3.3 抽出帯域

R-R間隔時系列データから各種解析に適合する周波数帯域を抽出するため、図3に示す4つの帯域を抽出するフィルタを設定した。

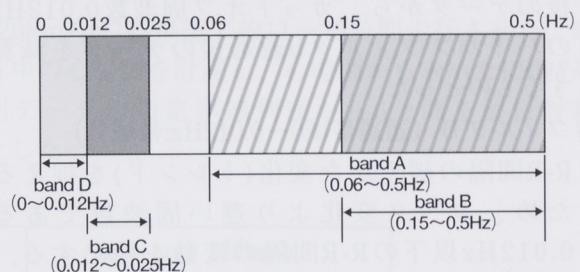


図3 Four bands of RRI time series (bandA~D)

(1) フィルタA（通過帯域0.06~0.5Hz:帯域A）

R-R間隔の変動は心臓の自律神経機能を反映するもので、その分散はストレスが加わると減少する⁽⁶⁾。変動統計量の算出にはデータの定常性が求められるが、二輪車運転時のR-R間隔の定常性は必ずしも保証されていない⁽⁷⁾。そこで、非定常成分を除去するためカットオフ周波数0.06Hzのハイパスフィルタ、フィルタAを設定した。

(2) フィルタB（通過帯域0.15~0.5Hz:帯域B）

R-R間隔変動のパワースペクトル密度関数における0.15Hz以上の高周波変動成分(high-frequency component: HF成分)は、呼吸性変動成分とも呼ばれ副交感神経の活動を表わす指標⁽⁸⁾とされている。そこでこの成分に対応する周波数成分を抽出するため、カットオフ周波数0.15Hzのハイパスフィルタ、フィルタBを設定した。

(3) フィルタC（通過帯域0.012~0.025Hz:帯域C）

フィルタCは、走行コースの変化によるR-R間隔の変動の抽出を目的とする。実験に用いたコースは、1.5 kmのストレート部分と

1.25kmのカーブ部分とが規則的に続く。150km/h, 200km/h, 220km/hそれぞれの車速で走行することは、各々60秒間隔、49.5秒間隔、45秒間隔でストレート部分とカーブ部分とが繰り返されることになる。したがって、周波数で表わせば、それぞれ0.015Hz, 0.020Hz, 0.022Hzで走行コースが変化することになる。そこで、コース変化に対応するR-R間隔の変動を抽出するため、3車速でのストレート部分とカーブ部分の繰り返し周波数を含む0.012~0.025Hzの周波数成分を抽出した。フィルタCの適用方法は、カットオフ周波数0.025Hzのハイパスフィルタa通過後のデータから、カットオフ周波数0.012Hzのハイパスフィルタb通過後のデータを減算するものとした。

(4) フィルタD (通過帯域0~0.012Hz:帯域D)

R-R間隔の緩やかな変化(トレンド)を捉えるため、コース変化より遅い周波数である0.012Hz以下のR-R間隔の変動を抽出する。R-R間隔時系列データから、ハイパスフィルタb(カットオフ周波数0.012Hz)通過後のデータを減算することにより算出する。これをフィルタDとする。

3.4 生体負担度評価パラメータ

生体負担度を評価するパラメータとして以下のパラメータを設定した。

(1) RRM (mean R-R intervals)

R-R間隔時系列データの平均値。ストレッサーによって値が減少する。

(2) CVRR (coefficient of variance of R-R intervals)

フィルタAを通過したデータの標準偏差をRRMで除した値。作業への集中や緊張、精神的負担が加わると減少する。

(3) CVHF (coefficient of variance of high-frequency component)

フィルタBを通過したデータの標準偏差をRRMで除した値。副交感神経の活動に関係し、通常のパワースペクトル解析で求められるHF成分に対応すると考えられる。

(4) CVCC (coefficient of variance of course change)

フィルタCを通過したデータの標準偏差をRRMで除した値。走行コースの変化に対する生体の反応を捉えることを目的とする。R-R

間隔がコース変化に対応して変化した場合、値が大きくなる。

(5) TR(trend)

フィルタD通過後の時系列データの隣り合う値の差分を算出し、これを加算した値をTR(trend)とする((1)式)。本実験では指定車速に達してから2分間の値を加算した値とする。TRは、その符号がトレンドの方向を表わし、絶対値がトレンドの大きさを示す。R-R間隔が増加傾向の場合は正、減少傾向の場合は負となる。

$$TR = \sum_{t=1}^n \{X(t) - X(t-1)\} \quad (1)$$

ここでX(t)は、フィルタD通過後の時系列データを示し、nは解析対象時間内のデータ数である。

4 結果・考察

求めたRRI時系列データと、帯域A, B, C, Dを通過した時系列データの一例(同一被験者の150km/hおよび220km/h走行時データ)を図4に示す。

図4より車速が上昇(150→220km/h)すると、RRI時系列データは減少、A, B, C各帯域通過データは振幅が減少していることが示された。また、帯域D通過データは150km/h走行時においては増加傾向にあるが、220km/hにおいては減少傾向であった。定量的に評価するとRRI時系列データから求めたRRMは26%減少、A, B, C各帯域通過データの標準偏差は各々44%, 38%, 53%の減少であった。

18名の被験者から求められたRRM, CVRR, CVHF, CVCC、およびTRの各パラメータにおいて、走行車速間で差があるか否かを検討するためにはpaired t-testで平均値の検定を行った。各パラメータの箱ひげ図を図5に示す。箱の上端が分布の75%タイル、下端が25%タイルを示す。箱の中の横線は中央値を、また箱から上下に伸びる線(ひげ)は外れ値ではない最大値と最小値を示す。RRMとCVRRは3つの各車速間にそれぞれ有意

心電図R-R間隔による二輪車高速運転時の生体負担度評価

差が認められた ($p<0.05$)。RRMは上昇し、CVRRが減少したことから、車速の上昇によって生体への負担が大きくなつたことが定量的に示された。CVHFは150km/hと200km/hに有意差が認められなかつた($p=0.08$)が、150km/hと220km/h、200km/hと220kmの間には有意差が認められた($p<0.05$)。CVHFは副交感神経の活動度を反映する指標であるが、220km/hになると副交感神経の活動度が抑制されることがわかつた。CVCCは、各車速間に有意差は認められなかつた($p>0.14$)。TRは 150km/hと200km/h、150km/hと220km/hに有意差が認められた($p<0.01$)。即ち、CVHFでは捉えられなかつた150km/hと200km/hの差を評価しており、やや車速が低い場合の車速による生体反応の相違を評価していると考えられる。

提案パラメータを組み合わせて用いることにより、走行に対する適応性、および緊張の程度が

150km/hと200km/h、220km/hでは異なることを定量的に示す可能性が得られた。

5 おわりに

実時間処理に供することが可能なディジタルフィルタを用いて時間領域で複数の周波数成分時系列に分類し、各々から時間領域の簡便なパラメータを抽出する方法を用い、高速走行中のライダーの生体反応評価を試みた。実験は二輪車の走行実験を担当する職業運転者18名を対象として5.5km/周のコースを150km/h、200km/h、220km/hの各車速で約11~13分間走行させた。走行中の心電図を計測し、心電図から求めたRRI時系列データの指定車速到達から6分間を解析対象とした。

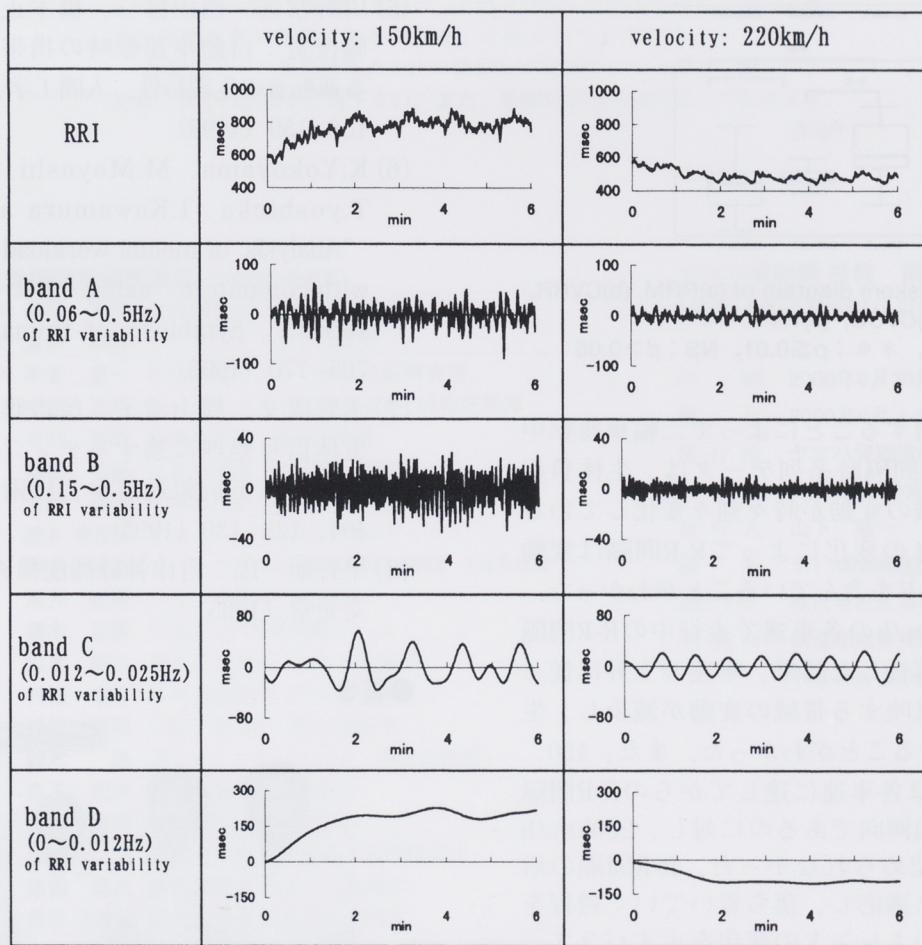


図4 Example of changes in RRI and four bands of RRI variability, 0.06~0.5Hz, 0.15~0.5Hz, 0.012~0.025Hz, 0~0.012Hz

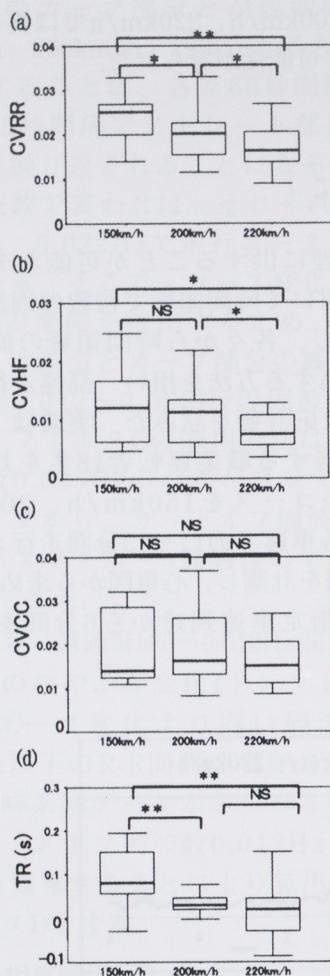


図5 Box and whiskers diagram of (a)RRM, (b)CVRR, (c)CVHF, (d)CVCC, (e)TR
* : $p \leq 0.05$, ** : $p \leq 0.01$, NS : $p > 0.05$

フィルタを適用することによって二輪車運転中のライダーのR-R間隔時系列データは、生体負担度を反映する帯域の変動が時々刻々変化していること、走行コースの変化によってR-R間隔は変動すること、トレンドを含んでいることがわかった。150, 200, 220km/hの各車速で走行中のR-R間隔時系列データを解析した結果、車速の上昇に従って生体負担度を反映する帯域の変動が減少し、生体負担度が増加することがわかった。また、150, 200km/h走行時は各車速に達してからのR-R間隔のトレンドが増加傾向であるのに対し、220km/h走行時は変化が認められなかった。R-R間隔の増加は生体が走行に適応し、落ち着いていく過程を表しており、このトレンドの変化を示すパラメータTRは生体の走行に対する適応力、慣れを定量的に表わすパラメータであると考えられる。今回

提案したパラメータTRを用いることによって長時間運転の単調感に起因する眠気によるR-R間隔の増加などを捉えられる可能性がある。本解析によって二輪車走行の車速による生体反応の相違を定量的に評価することができた。

■参考文献

- (1) 水野康文：二輪車運転時の生体負担の評価に関する研究、博士論文（1999）
- (2) 早野順一郎、山田眞己、藤浪隆夫、横山清子、渡辺興作、高田和之：心拍変動と自律神経機能、生物物理、28 (4), 32-36 (1988)
- (3) 吉川信嘉、小松隆、森寺邦三郎：心電図R-R間隔による自律神経検査法について：自律神経24 (1), 21 - 27 (1987)
- (4) 内谷努、町田信夫、伊藤彰亮：自動車運転時の生体負担に関する考察、人間工学、第35巻特別号2, 244 - 245 (1999)
- (5) 川野常夫、西田修三、橋本正治、東義隆、森脇俊道：自動車運転時の携帯電話使用における運転者の生理特性、人間工学、第34巻特別号、158 - 159 (1998)
- (6) K.Yokoyama, M.Moyoshi, Y.Watanabe, T.yoshioka, I.Kawamura and K.Takata : "Analysis of mental workload during the work with computers using R-R intervals time series", Symbiosis of Human and Artifact, 765 - 770 (1995)
- (7) 水野康文、横山清子、茂吉雅典、高田和之：生体信号処理に適するディジタルフィルタの比較、電子情報通信学会技術研究報告、95, 404, 123 - 130 (1995)
- (8) 早野順一郎：自律神経機能検査第2版、57-64、文光堂（1995）

●著者

