

心拍電位による運転者の緊張度評価法の検討

自動車安全部

※波多野 忠

成 波

谷口 哲夫

1. まえがき

近年、予防安全技術の開発が盛んに行われており、車両の運動についてもマン-マシン系や運転者の視点から評価されることが多い。このため、運転者の精神的な負担を正確に評価することが重要な課題となっている。従来から、精神的負担を測定するのに、主観的評価方法を用いてきたが、近年、生体反応による評価が注目されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

今回、生体反応のひとつとして心拍電位のゆらぎに注目し、周波数解析から卓越周波数の減衰比を比較することによる指標を新たに考案した。これについて、模擬信号によるものと、ドライビングシミュレータによる走行実験で得られたデータを用いて解析し、従来からある評価手法と比較検討したので報告する。

2. 心拍ゆらぎによる解析法

図1に、心拍電位の測定例を示す。鋭いピークを示す波がR波である。このR波の間隔「R-R interval;以下、RRI という」を時系列で表したのが図2であり、心拍のゆらぎがあるのがわかる。このデータを周波数解析すると図3のようになる。この図の0.1Hz 付近のピークは血压性変動「Mayer-wave related sinus arrhythmia;以下、MWSA という」を示し交感神経と副交感神経双方の影響を受け、緊張するとMWSAが大きくなる。また、0.3Hz 付近のピークは呼吸性変動「respiratory sinus arrhythmia;以下、RSA という」を示し副交感神経の影響を受け、緊張するとRSAは小さくなるが知られている。また、極低周波域に体温調整にかかわる変動があると言われている⁵⁾⁶⁾。

今回、緊張度を評価する指標として、減衰比を用いた方法を考案した。一般に、1 自由度系の振動で共振点での定常振動の振幅は次式のような

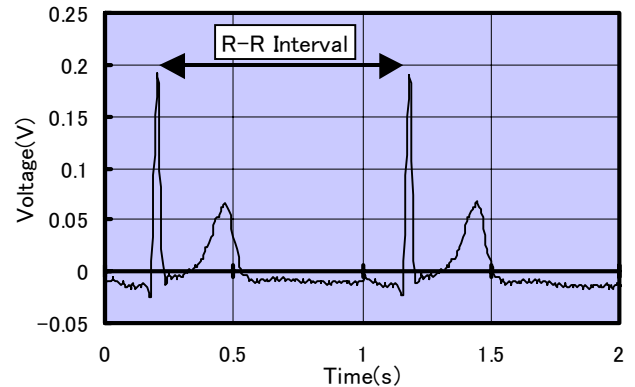


図1 心拍電位の測定例

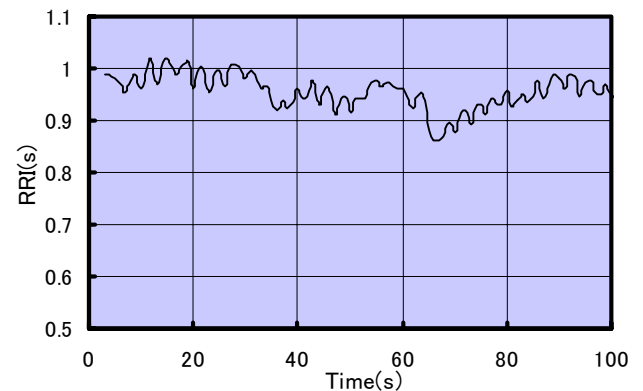


図2 RRI 時系列

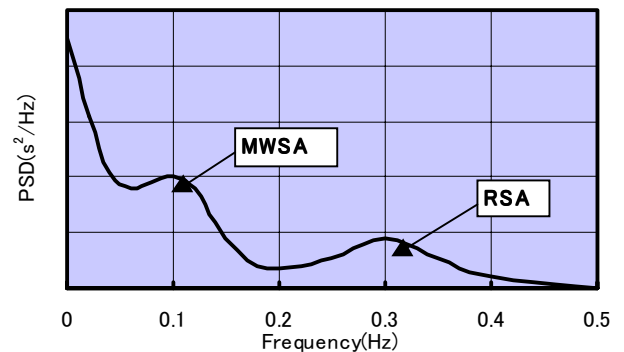


図3 RRI の周波数解析

$$x_{\text{MAX}} = \frac{F_0}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1)$$

但し、 F_0 は外力、 x は変位、 ζ は減衰比である。

ここで、 ζ が小さいと変位の振幅は、ほぼ減衰比に反比例することから、MWSA と RSA の振幅の大きさの比を次式のように減衰比係数(Coefficient of Damping Ratio)として定義し、緊張度の指標とした。

$$CDR = \frac{1/\zeta_{MWSA}}{1/\zeta_{RSA}} \quad (2)$$

例えば、緊張度が大きくなると MWSA が大きくなり、かつ、RSA が小さくなると減衰比係数(CDR)は大きくなる。

一方、減衰比については、AR モデルで RRI を同定し、特性方程式の根から減衰比を求めた。また、AR モデルを同定する前処理として、バンドパスフィルタを適用し、体温調整にかかわる変動成分とノイズを除去した。AR 係数の次数は、2つのピークのみ把握することから、4次固定とした。

解析手順を以下に示す。

- ① 心拍電位をサンプリング周波数 100Hz で採取
- ② RRI を抽出
- ③ スプライン補間を行いながら、等時間間隔のサンプリング周波数 1Hz でリサンプリング
- ④ バンドパスフィルタ(通過域 0.05~0.4Hz)を適用
- ⑤ Yule-Walker 法を用いて 4 次の AR モデルで同定
- ⑥ AR 係数から減衰比を計算
- ⑦ 減衰比係数を計算

今回の解析方法の特徴として次のようなことが考えられる。

一般に、FFT を使った周波数領域の計算は、短いデータの解析では窓関数にもよるが、安定性に欠ける。このため今回のように、ピークの周波数での特性を比較するのであれば、短いデータ長でも安定な特性が得られる AR モデルからの方法が有利である。また、RSA は呼吸の周波数に大きく影響されるために、RSA のピークの周波数は一定にはならず、RSA の周波数成分が把握しにくいと言われている。しかし、今回の方法によれば、RSA のピークの周波数が変化しても解析することができるので、MWSA のピークの周波数と重なるか、又は、それ以下にならない限りは把握できると考えられる。なお、今回のような AR モデルからの周波数解析では、入力をホワイトノイズとし、その分散値のみ同定する関係から直接振幅を求めることはできない。このため、減衰比を使用した。

次に、従来からある方法を紹介する。RRI の正規化分散値に注目して、8 拍分の RRI の正規化分散値から 3 拍分のそれを引いた値「以下、RRV8-3 という」は 0.1(1/beat)付近の周波数成分を表し MWSA の大きさを示すと言われ、この RRV8-3 を指標にして緊張度を評価する方法¹⁾がある。また、同様に 9 拍分について移動平均によるバンドパスフィルを適用する方法²⁾「以下、RRV9-3 という」で緊張度の指標としてあるものもある。一方、パワースペクトル密度「以下、PSD という」の積分量を便宜的に周波数域{例えば 0.05~0.2(1/beat); 0.2~5 (1/beat)}を区切り、次式のような計算を行う。

$$LF = \int_{0.05}^{0.2} PSD(f)df \quad (3)$$

$$HF = \int_{0.2}^{0.5} PSD(f)df \quad (4)$$

(3)と(4)式の比を計算し、LF/HF の値を緊張度の指標とした方法³⁾もある。例えば、MWSA が大きく、かつ、RSA が小さいと LF/HF の値が大きくなり緊張度が大きいと判断される。その他、心拍数で見る方法⁴⁾もある。

3. 模擬信号による解析

RRI の模擬信号を用い、AR モデル同定に必要な取り込み時間について検討した。短い取り込み時間で減衰比係数が正確に把握できれば、緊張度の評価指標に有効なものと考えられる。

サンプリング周波数を 1Hz とし、MWSA を模擬するために 0.1Hz の正弦波、RSA を模擬するために 0.3Hz の正弦波及びランダムノイズ(分散:0.05)の 3 つの波形を合成した RRI の模擬信号を作成した。このときに、0.1Hz と 0.3Hz の正弦波の振幅比を変化させた模擬信号を 5 種類作成した。図 4 に、バンドパスフィルタを適用後の模擬信号を示す。

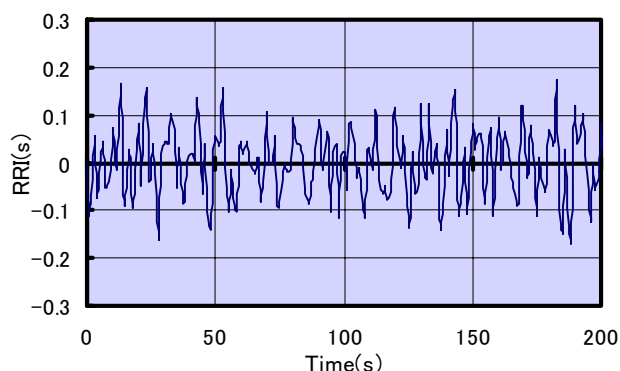


図 4 RRI 模擬信号(振幅比=1)

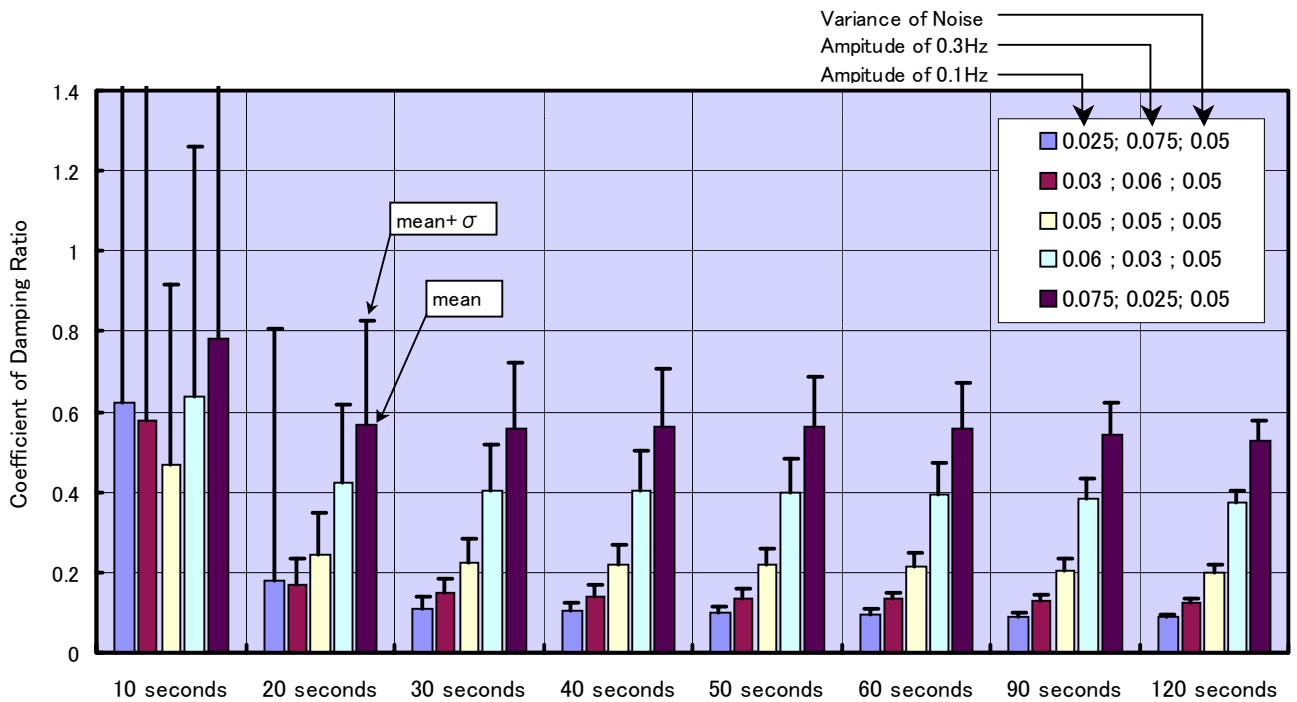


図 5 減衰比係数の取り込み時間の影響

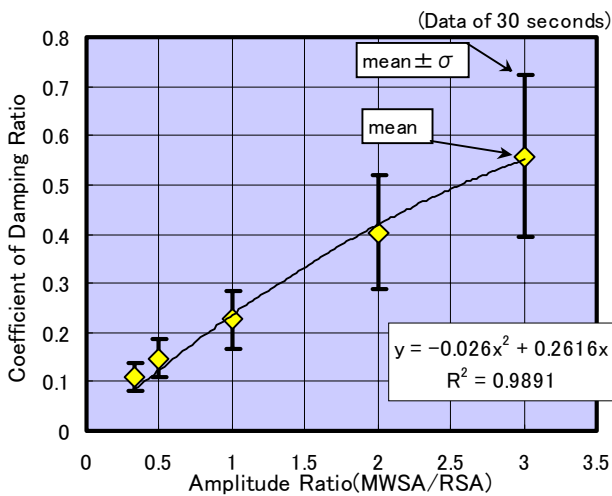


図 6 減衰比係数と振幅比の比較

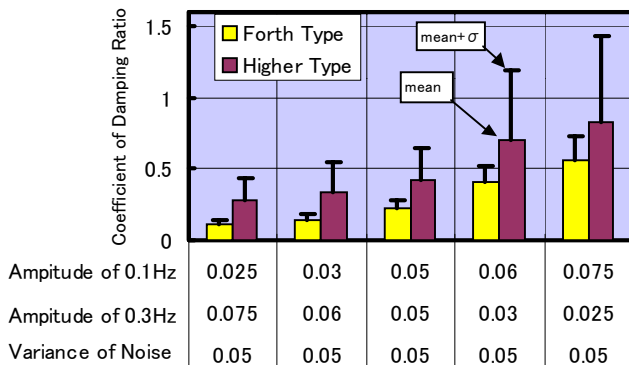


図 7 AR 係数の次数の比較

これらの模擬信号について、初期取り込み時間を 1 秒ごとずらしながら、10 秒間隔から 120 秒間隔ま

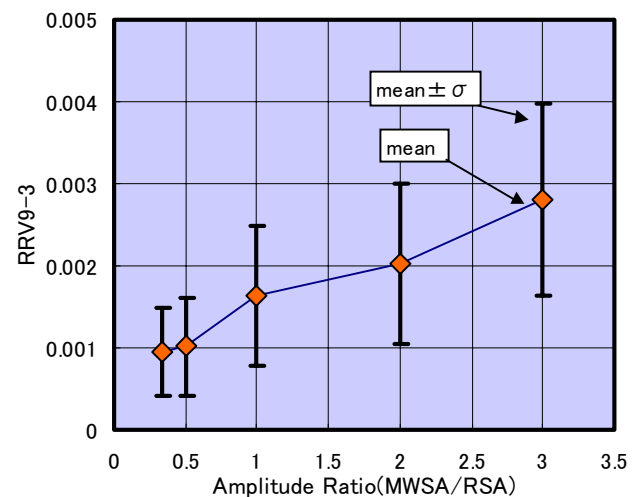


図 8 RRV9-3 と振幅比の比較

で取り込み時間を変えて解析した。図 5 に、300 秒の模擬信号を用いて解析した結果を、減衰比係数の平均値と平均値 + 標準偏差で示す。項目ごとの 5 本の棒グラフの中央は、0.1Hz と 0.3Hz の正弦波の振幅比 (MWSA/RSA) が 1 の場合である。図 5 を見ると、取り込み時間が 30～120 秒間隔までは、減衰比係数は振幅比に比例しているのがわかる。

次に、取り込み時間が 30 秒間の場合について、減衰比係数の平均値と振幅比の関係を図 6 に示す。相関がかなり高く、また、分散分析を実施した結果、平均値間に差があることが有意水準 1% で認められた。また、図 7 に、AR 係数を 4 次固定とした場合と、

4～10 次までとした場合の比較を示す。但し、4～10 次の場合は赤池の FPE で次数を決定し、0.2Hz を境に減衰比の最小値をそれぞれ抽出し、減衰比係数を計算した。図を見ると高次の AR 係数で同定した方が 4 次固定より、ばらつきが大きいことを示している。

同様に、RRV9-3 について、計算した結果を図 8 に示す。減衰比係数と同様な傾向を示したが、振幅比が小さい場合には平均値の差が認められなかった。

以上のことから、減衰比係数で評価する場合には、取り込み時間が 30 秒以上なら緊張度の評価が行える可能性があることがわかった。

4. ドライビングシミュレータによる走行実験

ドライビングシミュレータを使用して走行実験を行い毎回走行後、運転に対する精神的負担量を 5 段階評価で主観評価してもらい、前述の緊張度の指標と比較検討した。

高速道路の料金所からサービスエリアまで、1 回の実験に約 4～6 分間の模擬走行を行った。走行実験の前後に約 3 分間の安静時間(閉眼)を設けた。被験者は成人男性 3 人であり、自動車の運転は、ほぼ毎日行っている。また、このうち一人はドライビングシミュレータにかなり慣れている。

走行タスクは、通常走行と危険走行の 2 種類設定した。通常走行では、高速道路の二車線のうち左車線を速度 100km/h 前後で走行する。但し、追い抜き等のために右車線を走行してもよいが、すぐに左車線に戻るように指示した。危険走行では、現実にはありえない走行かもしれないが、路側帯をアクセル全開で走行することを指示した。このため、車両左側が壁に接触した場合に、スピン・停止することがある。始めに通常走行を数回行い、次に、危険走行を数回行った。図 9 に、操舵角と操舵トルクの頻度分布について、通常走行と危険走行の比較を示す。通常走行と危険走行では、頻度分布に大きな違いはないが、通常走行の方が中心付近の頻度が多い。

図 10 に、通常走行の RRI の時系列とバンドパスフィルタ(通過域 0.05～0.4Hz)適用後の RRI の時系列を示す。次に、取り込み時間を 30 秒間とし、模擬信号の解析と同様に図 10 の RRI について、初期取り込み時間を 1 秒ごとずらしながら 4 次の AR モデルで同定後、PSD を計算した。この結果を図 11 に示す。図中での走行時間は、200 秒から 480 秒の間であり、

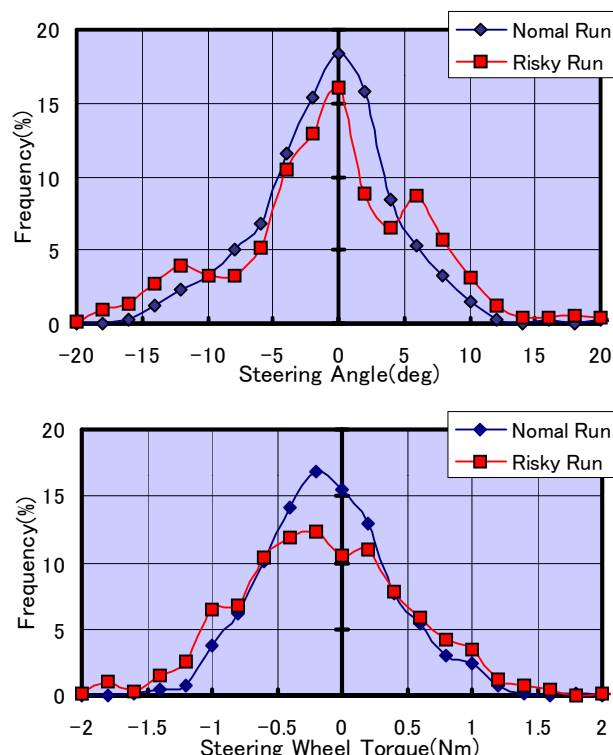


図 9 操舵角と操舵トルクの頻度分布

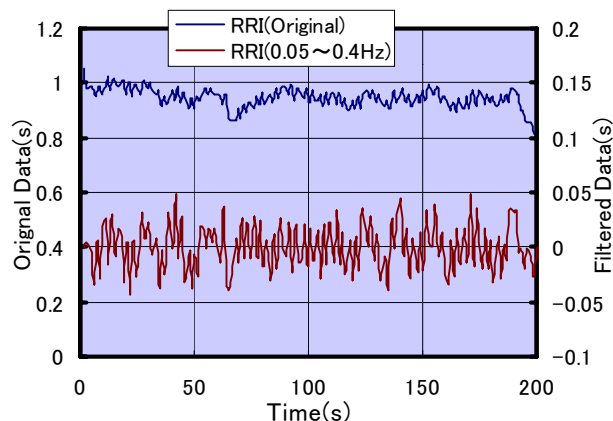


図 10 通常走行時の RRI 時系列

その前後が安静時間である。図中の時間軸は初期取り込み時間を示す。MWSA と考えられる 0.1Hz 付近のピークと RSA と考えられる 0.3Hz 付近のピークが明瞭に表れている。前後の安静時を比較すると走行後の安静時の方が 0.3Hz 付近のピークが大きく表れ、かつ、安定している。なお、今回の実験方法では、安静時間が 3 分程度では安定したデータが得られにくかった。また、400 秒付近に 0.1Hz 付近のピークが大きく表れている。これは、道路工事区間でレーンチェンジが強制され、これから行動を起こそうとする時に、レーンチェンジ先の右車線でトラックが後方から迫ってくる状況であり、これが MWSA を大き

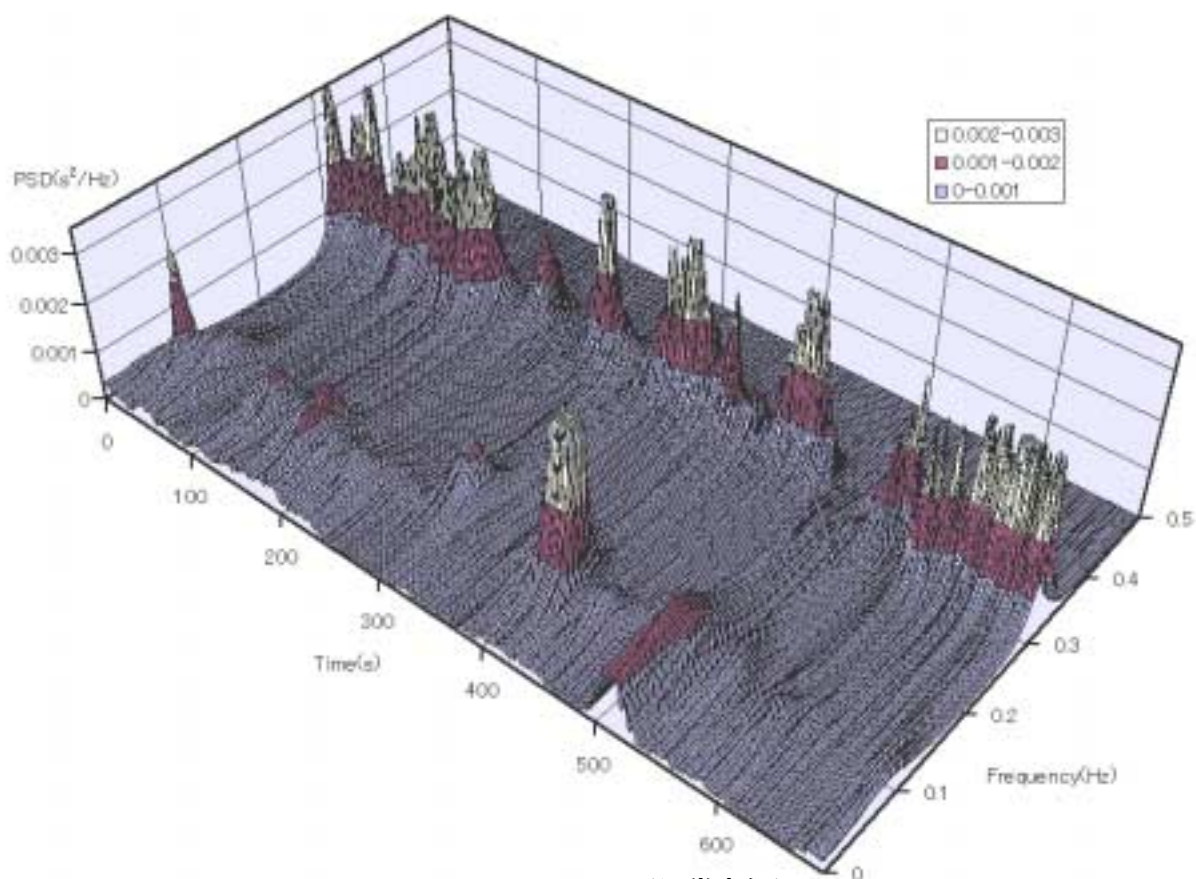


図 11 RRI の PSD(通常走行)

くしている可能性がある。

次に、図 10 の通常走行のデータを用いて、減衰比係数と LF/HF を計算した。ここでの LF/HF の計算では、ビート単位ではなく時間単位で計算した。減衰比係数の計算と同様に、30 秒間のデータに AR モデルを適用し、この AR モデルから PSD を算出したが、ここでは、AR モデルの次数を 4~10 次までとし赤池の FPE を用いて次数を決定した。また、周波数領域は、LF は 0.05~0.2Hz、HF は 0.2~0.4Hz として固定した。計算した結果を図 12 に示す。

減衰比係数と LF/HF を比較すると、ほぼ同様な傾向を示すが、それぞれ感度の違いがあり、定量的には一致していない。また、減衰比係数について、図 11 の PSD では顕著に現れない 300 秒前後に大きな値を示しているが、これは速度の遅いバスを追い越す区間の時間帯である。また、走行する前後(190 秒と 530 秒付近)と本線流入時(230 秒付近)にかけて大きな値を示している。

図 13 に、減衰比係数と RRI の比較を示す。運転者の心拍上昇と緊張度には相関があると言われ⁴⁾、このことから、RRI が小さいほど緊張度が増すと考えられる。図を見ると、減衰比係数と RRI は、負の相

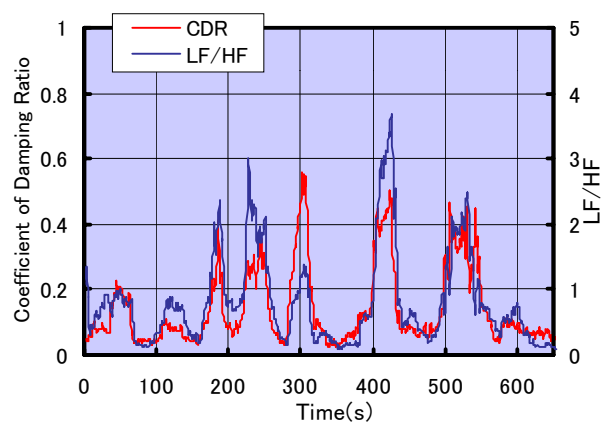


図 12 減衰比係数と LF/HF の比較(通常走行)

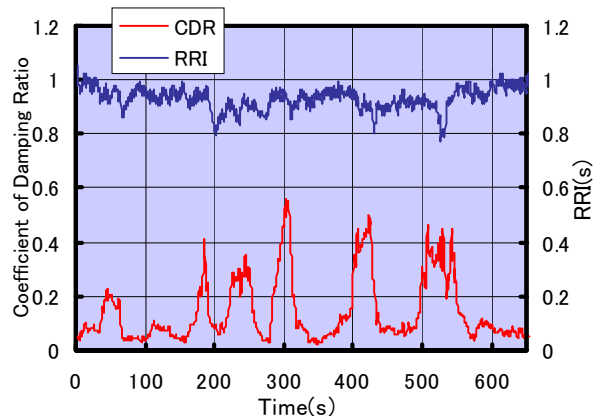


図 13 減衰比係数と RRI の比較(通常走行)

関を示している。また、減衰比係数の大きな値には、RRI と比べ時間的な幅がある。

次に、走行時の減衰比係数(走行前後の大きな値も含める)の平均値と主観評価を比較したのが、図 14 である。主観評価では、通常走行 1 回目を 0 点とした。被験者によって、ばらつき方などかなりの違いがあることがわかる。さらに、危険走行の評価結果についてみると、主観評価では 1~2 回目間で明確な差異が認められないのに対して、減衰比係数では、3 人とも 1 回目をもっとも高い値を示しており、2 回目ではそれより低下している。これらのことから、生体反応から解析した減衰比係数によれば、主観評価では現れてこない緊張度や負担を評価できる可能性があることがわかる。また、全体として減衰比係数と主観評価は正の相関があるが、それほど強くない。

5. まとめ

心拍ゆらぎを周波数解析する方法において、新たに緊張度の評価指標として、減衰比係数を考案した。これについて、模擬信号とドライビングシミュレータを用いた走行実験で得られたデータより検討を行った結果、以下のようなことがわかった。

サンプリング周波数 1Hz の RRI データにバンドパスフィルタを適用後、4 次の AR モデルで同定することにより、30 秒以上の取り込み時間があれば、0.1Hz の MWSA と 0.3Hz の RSA の振幅比を把握することができる。また、この減衰比係数を用いると、緊張度の評価を時系列的に把握することが可能となった。しかし、緊張度の主観評価との関連については、正の相関があるものの大きくはなく、被験者によっては、ばらつきがあることがわかった。

今後は、減衰比係数と主観評価との関連と解析方法の中で取り込み時間の短縮法について検討したい。

参考文献

- 1) 渥美; 心拍計測によるドライバの意識状態評価, 自技会学術講演会前刷集 946
- 2) 景山ほか; 心拍変動モデルを用いた心負担の推定に関する研究, 機械学会第 6 回交通・物流部門大会講演論文集 {No.97-12}
- 3) 野口ほか; 実運転時に HRV 解析手法の検討, 自技会学術講演会前刷集 966

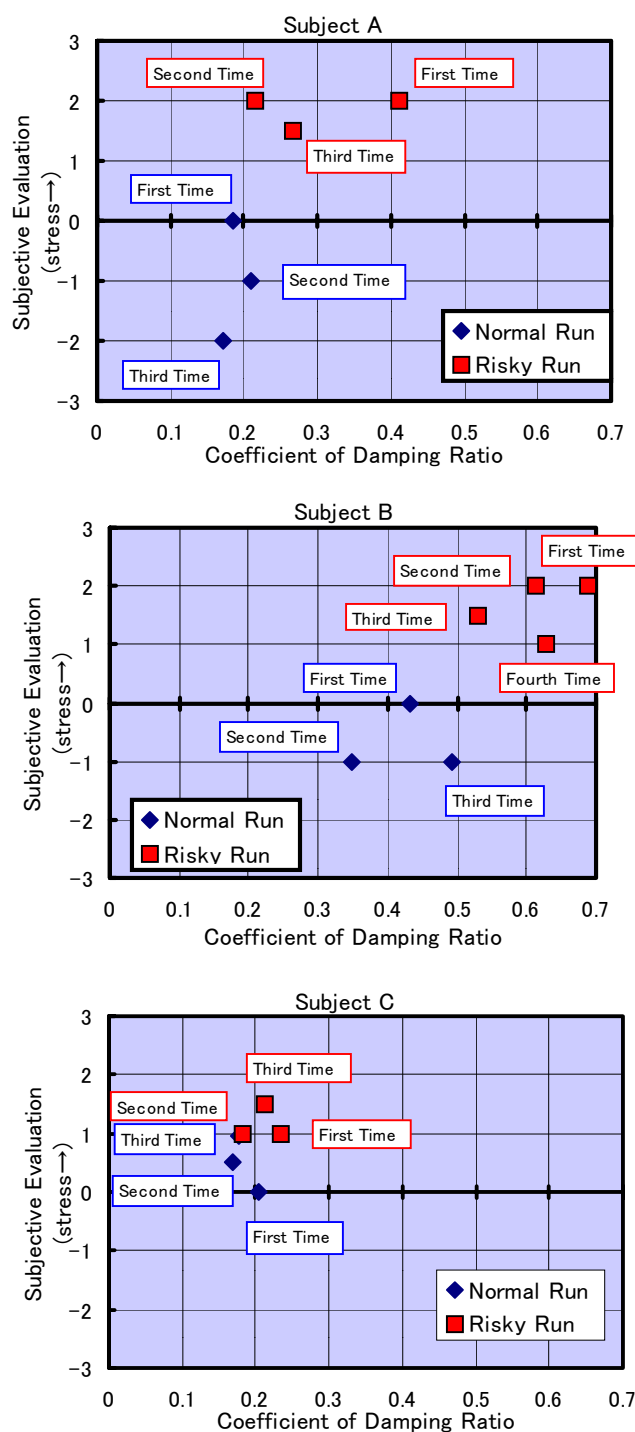


図 14 減衰比係数と主観評価の比較

- 4) 住田ほか; 車線変更時の運転者の緊張度解析, 自技会学術講演会前刷集 975
- 5) ドライバ評価手法検討専門委員会; ドライバ評価手法の現状と将来, 自技会シンポジウム (No.05-01)
- 6) 森田; 車-ドライバ間のヒューマンインタフェースに関する研究動向, 自技会シンポジウム (No.01-00)