

心拍変動バイオフィードバックシステムのための 評価指標の基礎的検討

日大生産工(院) ○榎本 隆士 日大生産工 柳澤 一機

1. 緒言

コンピュータなどの情報機器を用いた作業 (Visual Display Terminals作業: 以降VDT作業) は必要不可欠な業務となっている。しかし、VDT作業は労働者の心身に負担をもたらすことが知られており、目の疲れや肩こりなどの身体的な疲労やコンピュータ機器の使用にともなう精神的なストレスを感じていることが報告されている。

そのため、VDT作業時の精神的なストレスを低減させることが必要であるが、VDT作業を行う労働者は時間内に決められた作業量を終わらせる必要があり、ストレスの低減だけでなくパフォーマンスを向上させる必要がある。

ストレスとパフォーマンスの関係性はFig.1に示すヤーキーズ・ドットソンの法則に従うとされている。ヤーキーズ・ドットソンの法則とは、適切なストレス状態ではパフォーマンスが向上し、眠気や疲れを感じている低ストレス状態や興奮や緊張を感じている高ストレス状態ではパフォーマンスが低下することを示した法則である¹⁾。そのため、パフォーマンスの高い状態を維持するためには、低ストレス状態や高ストレス状態を避け、適切なストレス状態を維持する必要がある。しかし、作業中のストレス状態を常に認識しコントロールすることは難しい。そのため、自身のストレス状態を認識させる手法が必要である。

自身のストレス状態を認識させる手法としてバイオフィードバック (BioFeedBack: 以降BFB) がある。BFBとは、通常知覚できない生理活動を工学的手段で検出し、その情報を知覚できるように提示することで、訓練を通じてその生理活動の随意制御を可能とする技法である²⁾。BFBで計測する生理活動として、心拍変動は無線のウェアラブル装置で簡便に計測でき、体動の影響を受けにくい生体情報として注目されている。心拍変動から自身のストレス状態をフィードバックし、自身のストレス状態を認識することでパフォーマンスが高い状態を維持できる可能性がある。しかし、パフォーマンスが高い状態である適切なストレス状態に

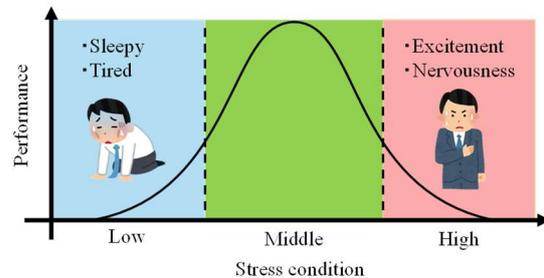


Fig.1 Yerkes-Dotson's law

関してはストレス状態を評価する指標によって異なり、明確な定義はない。

そこで本研究では、心拍変動BFBシステムに適したストレス評価指標の検討を行う。周波数領域指標としてLF/HF、時間領域指標としてRMSSD、ローレンツプロットの面積の分布からヒストグラムを作成し、適切なストレス状態の範囲の調査を行う。その後、精神的ストレスとしてストループ・逆ストループ課題を行い、適切なストレス状態の範囲にストレス指標の値が収まっているときにパフォーマンスが向上しているか検証実験を行う。

2. 心拍変動によるストレス評価指標

心拍変動からストレス状態を評価する方法として、心拍間隔 (R-R Interval: 以降RRI) に注目する。RRIとは、心電図におけるR波から次のR波までの時間間隔である。自律神経活動はこのRRIから評価でき、一般的に高ストレス状態のときは交感神経活動が優位になり、低ストレス (安静) 状態のときは副交感神経活動が優位になるとされている。

RRIから算出されるストレス評価指標として周波数領域指標と時間領域指標がある。周波数領域指標とは、異なる時間間隔で計測されているRRIのデータを等時間間隔でリサンプリングし、高速フーリエ変換や連続ウェーブレット変換などの周波数領域解析を行い得られる指標である³⁾。時間領域指標とは、RRIの揺らぎをその振幅の大きさに着目して標準偏差などの統計指標を使用して表す時間領域解析を行い得られる指標である³⁾。

Basic study of evaluation index for heart rate variability
biofeedback system

Takashi ENOMOTO and Kazuki YANAGISAWA

2.1 周波数領域指標

周波数領域指標として、LF/HFが挙げられる。LF/HFはRRIを周波数解析して得られる、低周波領域（0.04Hz～0.15Hz）パワー値（Low Frequency：以降LF）と高周波領域（0.15Hz～0.40Hz）パワー値（High Frequency：以降HF）の比率によって評価する分析方法であり、交感神経活動を表す指標である⁴⁾。高ストレス状態の場合、交感神経活動と副交感神経活動の両方を表す指標であるLF成分が増加しHF成分が減少するため、LF/HF値は大きくなる。低ストレス状態の場合、LF成分、HF成分の両方が増加するため、LF/HF値は小さくなる。

また、LF/HFは解析区間が180秒以下だと値のばらつきが激しい指標⁵⁾であるため、小川らの研究⁶⁾で使用されたように $\log(\text{LF}/\text{HF})$ を指標とする方法も提案されている。

2.2 時間領域指標

2.2.1 RMSSD

Root Mean Square of Successive Differences（以降：RMSSD）は連続した2つのRRIの差の二乗平均平方根によって定義される時間領域の分析方法であり、副交感神経活動を表す指標である⁷⁾。RMSSDは以下の式（1）によって表される。

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} + \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - x_{i+1})^2} \quad (1)$$

ここで、 N はRRIの数、 x_i は i 番目のRRI、 x_{i+1} は $i+1$ 番目のRRIを表している。高ストレス状態の場合、RMSSD値は小さくなり、低ストレス状態の場合、RMSSD値は大きくなる。

2.2.2 ローレンツプロットも面積による評価

RRIの変動をローレンツプロット（Lorentz Plot：以降LP）の面積を用いて評価する時間領域の分析方法であり、副交感神経活動の指標である⁸⁾。横軸に n 番目のRRI、縦軸に $n+1$ 番目のRRIをグラフ上にプロットし、楕円に近似した面積 S の大きさによってストレス評価を行う。LPの面積の概念図をFig.2に示す。すべての点を $y=x$ 軸と $y=-x$ 軸に投影する。投影後、 $y=x$ 軸において原点からの距離の標準偏差を σ_x 、 $y=-x$ において原点からの距離の標準偏差を σ_{-x} とする。長軸 σ_x 、短軸 σ_{-x} とする面積 S は式(2)で求めることができる。

$$S = \pi \times \sigma_x \times \sigma_{-x} \quad (2)$$

面積 S が小さい場合、RRIのばらつきが小さく、プロットした点は左下に集中するため、交感神経活動が優位であり高ストレス状態である。面積 S が大きい場合、RRIのばらつきが大

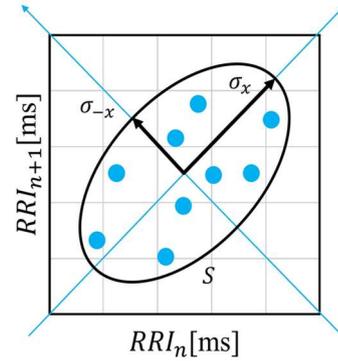


Fig.2 Conceptual diagram of LP area

きく、プロットした点は広範囲に置かれるため、副交感神経活動が優位であり低ストレス状態である。

3. 評価方法

3.1 BFBに適した指標として求められる条件

心拍変動BFBに適したストレス評価指標の条件として、正規分布に注目した。指標が正規分布に従う場合、データは平均値を中心とした左右対称に分布し、平均値付近に多くのデータが集まり、極端に高い値や低い値は少なくなる。指標が正規分布から外れる場合、裾の広い分布や平均値と中央値が離れていることがあるため、例えば、指標の最大値と最小値が広がり、指標の微弱な変化の識別ができず、ストレス状態の評価が難しくなる。

3.1.1 ヒストグラムの作成

本研究では、実験参加者の全員の各ストレス評価指標の分布からヒストグラムを作成し、その分布から平均値や中央値、尖度（Kurtosis）、歪度（Skewness）を算出し、各指標が正規分布に従うか検討した。

尖度は、分布の鋭さの程度を表す統計値であり、データが中心の位置に集中している程度を表す指標である⁹⁾。尖度の値が負の場合、分布の形は正規分布より平たく、0の場合、分布の形は正規分布に従い、正の場合、グラフの形は正規分布より尖っていることを表す。歪度は、分布の歪みの程度を表す統計値であり、データの分布の左右対称性を表す指標である⁹⁾。歪度の値が負の場合、分布の形は右に偏っており、0の場合、分布の形は左右対称であり、正の場合、分布の形は左に偏っていることを表す。

3.1.2 適切なストレス状態の範囲

各ストレス評価指標の平均値と標準偏差から適切なストレス状態の範囲を算出した。適切なストレス状態の範囲より小さな値を低スト

レス状態, 大きな値を高ストレス状態と定義した。

3.2 解析データ

本研究では, 心拍変動BFBに適したストレス評価指標の検討のために, インフォームドコンセントを得た健常な20代の男女16名を実験参加者とし, 日本大学生産工学部の倫理委員会(承認番号:S2023-003, バイオフィードバックを用いた学習支援パートナーロボットの効果検証)の承認を得て行った, 葦川らの実験のRRIデータ¹⁰⁾を用いた。60分間の自由な作業(試験勉強や論文作成など)を行わせ, その間のRRIを計測し, 解析を行った。

実験参加者のRRI計測には, Polar社製の心拍センサPolar H10を使用し, 実験参加者の胸部にPolar H10を取り付けRRIの計測を行った。各指標の解析区間は60秒とし, 計測したRRIから各指標の値を算出した。

4. 解析結果

実験参加者16名中, 計測不良が起こった5名を除いた11名の結果を対象にRRIの解析を行った。

4.1 各ストレス評価指標のヒストグラム

実験参加者11名のRRIから各ストレス評価指標を算出し, それらの分布からヒストグラムを作成した。例として, Fig.3にLF/HFのヒストグラム, Fig.4にRMSSDのヒストグラムを示す。Fig.3のLF/HFのヒストグラムは左に偏っており, 正規分布から外れていることがわかる。

Fig.4のRMSSDのヒストグラムはほぼ左右対称であり正規分布に従っていることがわかる。

表1は算出した各ストレス評価指標の尖度と歪度をまとめた表である。周波数領域指標はLF/HFの平均値と中央値が離れており, 尖度と歪度は0から離れた値である。 $\log(\text{LF}/\text{HF})$ の平均値が0.631, 中央値が0.616でほぼ一致しており, 尖度と歪度が0に近い値である。また, 時間領域指標ではRMSSDの平均値は34.3, 中央値は34.6でほぼ一致しており, 尖度と歪度が0に近い値である。

先行研究として, Davidらは健常な成人21,438人を対象に短時間の心拍変動を調査した¹¹⁾。その結果, $\log(\text{LF}/\text{HF})$ の平均値は0.69, 中央値は0.58, RMSSDの平均値は42, 中央値は42であり, 本研究の結果と一致した(RMSSDの平均値と中央値に関しては本研究の結果と若干の差異が見られたが, 本研究では20代前半に限定していたため, 対象者の年齢層の違いが影響を与えた可能性がある)。また, RMSSDは解析区間1分間と5分間の間に相関があること,

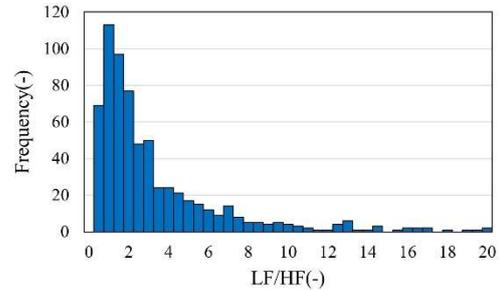


Fig.3 Histogram of LF/HF

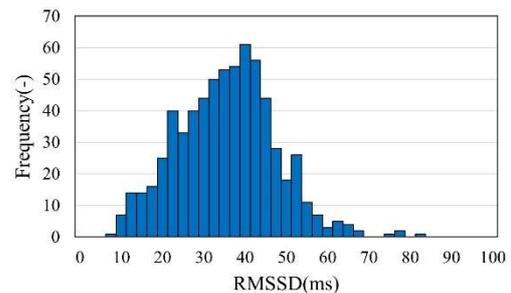


Fig.4 Histogram of RMSSD

Table1 Basic statistics for each indicator

	Kurtosis	Skewness
LF/HF	9.96	2.80
$\log(\text{LF}/\text{HF})$	-0.0780	-0.0255
RMSSD	0.328	0.247
LP	1.82	0.992

LF及びHFについては相関がないことが報告されている¹²⁾。BFBはリアルタイムで解析を行い, その結果をフィードバックするため, 解析区間は短いほうが望ましい。そのため, RMSSDが心拍変動BFBに適したストレス評価指標と考えられる。

4.2 適切なストレス状態の範囲の算出

正規分布に従っていたRMSSDの適切なストレス状態の範囲を平均値 ± 1 標準偏差とし, その外側をそれぞれ低ストレス状態, 高ストレス状態とした。その結果, RMSSDの平均値は34.3, 標準偏差は11.9であったため, $(22.4 \leq \text{RMSSD} \leq 46.2)$ が適切なストレス状態の範囲, $(46.2 < \text{RMSSD})$ が低ストレス状態, $(\text{RMSSD} < 22.4)$ が高ストレス状態と定義した。

5. 適切なストレス状態の範囲の検証実験

次に, RMSSDの値が適切なストレス状態の範囲である $(22.4 \leq \text{RMSSD} \leq 46.2)$ に収まっている

るときにパフォーマンスが向上し、低ストレス状態である($46.2 < \text{RMSSD}$)と高ストレス状態である($\text{RMSSD} < 22.4$)のときにパフォーマンスが低下するか検証実験を行った。健常な20代の男性12名を対象にストループ・逆ストループ課題を行い、正答率と反応時間からパフォーマンスの変化を判断した。

ストループ課題とは、色名を表す文字とその文字の色が異なる状態で表示された際に、文字の色を解答する課題であり、逆ストループ課題は文字の意味を解答する課題である。

本研究では、使用したストループ・逆ストループ課題は「あか、あお、きいろ、みどり」の4色を使用し、文字はひらがな表示した。課題の難易度を各ストレス状態でのストループ・逆ストループ課題の問題数を変更することで調整し、適切なストレス状態、低ストレス状態、高ストレス状態の3種類に設定した。また、実験の順序効果による影響を排除するために、取り組む難易度の順番はランダムに実施した。

実験手順として、最初に3分間の安静状態を設定し、その後5分間のストループ・逆ストループ課題を実施し、最後に再び3分間の安静状態を設定した。この手順を各ストレス状態において実施した。

検証実験の結果については、口頭発表時に説明する予定である。

6. 結言

本研究では、心拍変動BFBシステムに適したストレス評価指標の検討のために、LF/HF RMSSD、ローレンツプロットの面積の分布からヒストグラムを作成し、適切なストレス状態の範囲の調査を行った。健常な20代の男女11名を実験参加者とし、60分間の自由な作業を行わせ、その間のRRIを計測したデータを解析した。解析結果から、周波数領域指標ではlog(LF/HF)、時間領域指標ではRMSSDが尖度と歪度が0に近く、正規分布に従っていた。RMSSDは解析区間1分間と5分間の間に相関があること、LF及びHFについては相関がないことが報告されているため、RMSSDが心拍変動BFBに適したストレス評価指標と考えられる。また、平均値 ± 1 標準偏差を適切なストレス状態の範囲としたとき、($22.4 \leq \text{RMSSD} \leq 46.2$)がRMSSDの適切なストレス状態の範囲と定義した。

RMSSDの値が適切なストレス状態の範囲に収まっているときにパフォーマンスが向上するか健常な20代の男性12名を対象にストループ・逆ストループ課題を行い、正答率と反応時間からパフォーマンスの変化を評価した。

参考文献

- 1) Robert M. Yerkes et al, The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation, *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, Vol.18, No.5, (1908), pp.459-482.
- 2) 福長 他, NIRSを用いたニューロフィードバックシステムの開発, *杏林医学会誌*, Vol.42, No.1, (2011), pp.2-11.
- 3) 小野, 非侵襲生体信号の処理と解析-III-心電図の計測, 処理と解析, システム/制御/情報, Vol.62, No.6, (2018), pp.228-233
- 4) 高田 他, 心拍変動周波数解析のLF成分・HF成分と心拍変動係数の意義—加速度脈波測定システムによる自律神経機能評価—, *総合健診*, Vol.32, No.6, (2005), pp.504-512.
- 5) 森 他, 心拍変動による精神ストレスの短時間解析に関する研究, 年次大会講演論文集, Vol.7, (2008), pp.205-206.
- 6) 小川 他, 定期的運動習慣の有無が間欠的無酸素性運動後回復期の心臓自律神経系活動に及ぼす影響, *理学療法学*, Vol.37, No.5, (2010), pp.349-355.
- 7) 前田, 心拍情報に基づくリラクゼーションサウンド生成手法, 第31回ファジィシステムシンポジウム, WA3-2, (2015), pp.29-34.
- 8) 寺澤 他, ローレンツプロットを用いた映像酔い時の心拍変動解析, *情報処理学会研究報告*, (2015).
- 9) 大澤, わかる&使える統計学用語, 株式会社アーク出版, (2016).
- 10) 葦川 他, バイオフィードバックを用いた学習支援ロボットOvotの開発—認知課題成績の比較—, *日本大学生産工学部第56回学術講演会講演概要*, Vol.56, (2023), pp.102-105.
- 11) Nunan D et al, A Quantitative Systematic Review of Normal Values for Short-Term Heart Rate Variability in Healthy Adults, *Pacing Clin Electrophysiology*, Vol.33, No.11, (2010), pp.1407-1417.
- 12) U. Nussinovitch, et al, Reliability of Ultra-Short ECG Indices for Heart Rate Variability, *Ann Noninvasive Electrocardiol*, Vol.16, No.2, (2011), pp. 117-122.