

研究報告

心拍変動による VDT 作業者のストレス・疲労の
定量的検討

高橋圭太**・井上 浩**

A Quantitative Analysis on Stress and Fatigue for VDT Workers Measured
by Heart Rate Variability (HRV)

Keita Takahashi** and Hiroshi Inoue**

Abstract

Recent advances of office automation and information technology cause the increase of the complaint of ocular fatigue, musculoskeletal fatigue and mental fatigue for VDT (visual display terminal) workers. It becomes obvious as problem on industrial safety and health. A quantitative analysis on the stress and fatigue by scientific data is very useful. In this paper, the results of quantitative analysis focused on total working hours with quantitative indexes of HRV (heart rate variability) used on evaluation in autonomic function are discussed. VDT workers group with longer total working hours has different HRV and CV_{rr} (Coefficient of variation of R-R interval) than one of control group. The extent of stress and fatigue may differ with total working hours.

1. はじめに

近年, OA 化および情報化の急速な進展に伴い, 事業所等へのコンピュータの導入が進んでいる. 厚生労働省の調べ⁽¹⁾によると, 約 96%の事業所でコンピュータを導入し, さらに, 約 88%の事業所で社内外のコンピュータとのオンラインネットワーク化が普及しているのが現状である. コンピュータは視覚表示装置 (Visual Display Terminal: VDT) とセットになっていることが多いことから, VDT 機器を使用する作業者の増加と作業時間の増加が相まって, 疲労の自覚症状を訴える作業者が増加してきている. このような VDT 作業による健康影響は, ごく近年の問題ではなく, 約 25 年前から労働衛生上の問題としてある.

VDT 作業による健康影響としては, 視覚系への影響, 筋骨格系への影響, および中枢神経系への影響に分類可能であり, VDT 作業者の約 35%が精神的ストレス・疲労を, さらに約 78%が何らかの身体疲労症状を感じていることがわかっている⁽¹⁾.

これまで VDT 作業に関する研究は多岐にわたって行われており, 一定の成果が収められている. 近年行われている疲労評価の研究としては, 主観的指標の自覚症しらべを用いた因子分析による検討⁽²⁾や, 生理指標として前額部

2009年7月28日受理

**秋田大学工学資源学部電気電子工学科, Department of Electrical and Electric Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University.

および鼻尖部の表面皮膚温度, 心拍数, 前腕の皮膚血流量, 呼吸数を用いた独立成分分析による疲労に関連する信号の抽出⁽³⁾, さらに, 主観評価の VAS (: Visual Analogue Scale) と加速度脈波のカオス解析から算出される指標による慢性疲労症候群患者の疲労定量化の検討等がある⁽⁴⁾.

以上のような背景から, 主観的に感じている“疲労感”という曖昧なものを定量的に示すことは, 医療の見地からも有用であると考えられる. 本研究では, VDT 作業者を対象にして, ストレス・疲労の定量的検討を行った. ストレス・疲労を感じることで, 自律神経機能バランスの乱れをきたすことが考えられることから, ストレス・疲労の指標として自律神経機能の状態を反映する心拍揺らぎから算出される心拍変動指標を用いて検討を行った.

2. 実験方法

2.1 対象

被験者は事業所 A (女性: 10 例, 年齢: 32±3.2 才, 就業年数: 4.1±3.4 年) および事業所 B (男性: 2 例, 女性: 18 例, 年齢: 32±11 才, 就業年数: 1.6±1.2 年) に勤務する VDT 作業員および対照群として男子学生 (男性: 9 例, 21 才) を選出した. 事業所 A はデータ入力端末を使用したデータ入力業務を中心として行っており, また事業所 B はデータ入力業務およびテレオペレータ業務を行っている. VDT 作業員には, 日常通りの業務 (基本は 9:00-18:00 の業務時間) を行ってもらい, 1 週間の中で疲労感がピークになると

考えられる毎週金曜日の 15:00-18:00 の業務時間帯において、20 項目の自覚症状アンケート⁽⁵⁾(視覚系 8 項目, 筋骨格系 6 項目, 精神系 6 項目の構成で該当する項目ならば Yes, 該当しないならば No にチェックしてもらう)および安静座位で約 6 分間の心電図計測を行った。業務の関係上, 事業所 A においては合計 8 週間, 事業所 B においては合計 4 週間の実験期間とし, 計測前の飲食の制限などは行わなかった。対照群(学生)は, 異なる日時において合計 2 回の心電図計測を行った。被験者には実験の安全性等について十分に説明し, 同意書による同意を得た上で進めた。

2.2 心電図の計測と解析手法

心電図は, 左手首(+), 右手首(-), 右足首(N)の 3 箇所であークリップ(FUKUDA DENSHI, TE-43)を電極として使用し, 標準肢誘導の第 I 誘導を心電計(NIHON KODEN, WEC-7101)により計測した。心電計の出力波形はリアルタイムで AD 変換(サンプリング周波数 2kHz)を行い PC に記録された(図 1)。記録された心電図(図 2)から心電図 R-R 間隔(R-R interval:RRI)変動(図 3)の解析を行った。次に, RRI 変動を等時間間隔データにするため再サンプリング周波数 2Hz でスプライン補間を行い, 統計解析により以下の 2 指標を算出した。

- ✓ 心拍数(Heart Rate:HR)・・・60s/RRI(256s)の平均値
- ✓ RRI 変動係数(Coefficient of variation of RRI:CVrri)
 - ・・・RRI(256s)の標準偏差/RRI(256s)の平均値

さらに, 周波数スペクトル解析として FFT により RRI 変動のパワースペクトル密度(Power Spectrum Density:PSD)を解析し(図 4), 以下の 3 指標を算出した。

- ✓ 低周波成分(Low Frequency:LF)・・・0.05-0.15Hz のパワースペクトル密度の積分値
- ✓ 高周波成分(High Frequency:HF)・・・0.15-0.45Hz のパワースペクトル密度の積分値
- ✓ LF/HF

一般に, 低周波成分(LF)は, 収縮期血圧の Mayer 波と呼ばれる約 10 秒周期(0.1Hz)の変動がみられ, Mayer 波の刺激は頸動脈洞などの圧受容体を介して心血管中枢に達し, 遠心路(心臓迷走神経系または交感神経系)を介して洞結節を抑制することから, 心臓迷走神経系と心臓血管交感神経系の両活動を反映するとされる⁽⁶⁾。また, 高周波成分(HF)は, 肺圧受容体の呼気時の伸展刺激が心臓血管中枢を介して心臓迷走神経を抑制し, 通常 9 回/分

(0.15Hz)以上の周期の呼吸刺激が心臓迷走神経を介して洞結節に伝わることから, 心臓迷走神経(心臓副交感神経)活動を反映するとされる⁽⁶⁾。さらに, LF/HF は, あくまでも相対的な交感神経機能の指標であり, その増加は必ずしも交感神経機能の亢進を意味せず, 心臓迷走神経活動の低下を反映する場合もあるので注意が必要である⁽⁶⁾。

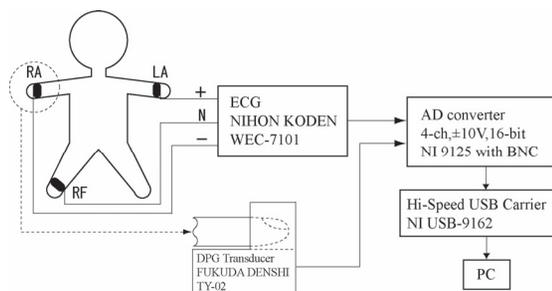


図 1 心電図計測系

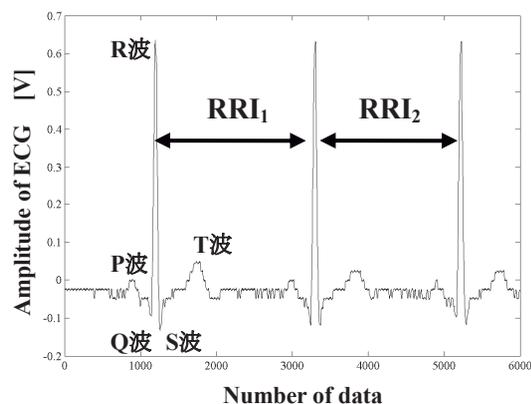


図 2 心電図の典型例

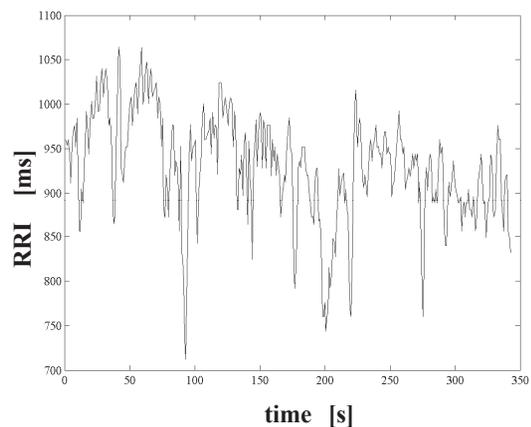


図 3 RRI 変動の典型例

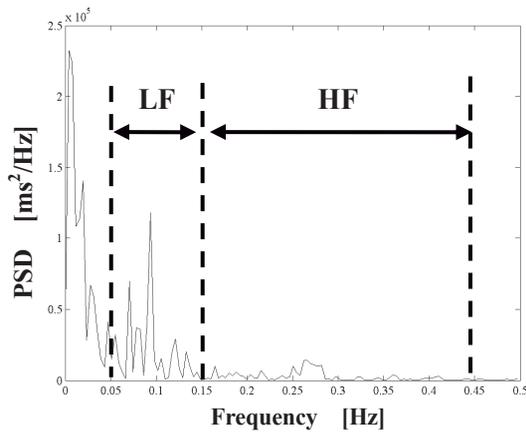


図4 RRI変動パワースペクトル密度の典型例

2.3 非線形解析手法⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾

非線形解析の指標の1つとして最大リアプノフ指数があり、音声解析や経済時系列モデルなどに用いられている。生体の制御系の特性は本来非線形であるという考え方から、脳波、胃電図、脈波変動、RRI変動などの生体信号への適用が試みられている。これらの報告より最大リアプノフ指数が小さいと精神的にリラックスした状態を示し、大きいと適応力、緊張および集中力のレベルが高い状態を示すと言われている⁽⁷⁾。以下に解析手法について説明する。

リアプノフ指数とはアトラクター上の2点の距離が時間経過に伴い平均でどの程度離れるかを表す量であり、軌道不安定性(初期値に対する鋭敏な依存性)を定量化するための指標である。これらのうち最大のものを最大リアプノフ指数と呼び、時系列データがカオスである場合、正の値をとるとされ、さらにこの値が大きいほど、波形が不規則で、軌道が複雑であるとされる。

今回は、RRI変動のデータ長の制約などを考慮して、少数データ(300点～)でも解析可能およびノイズに対して頑強であるといった特徴をもつRosensteinの方法を用いて解析を行った。

最初にRRI変動の時系列データを用いてアトラクターを構成する。再構成次元 dt は、心拍揺らぎを規定している変数の数が6個以下であるという知見⁽⁸⁾より5次元に設定した。アトラクター上のある時間 t_i の点 $y(t_i)$ に対して、最近傍の点 $y(t_j)$ をとり、この2点の時間変化を追跡しながら $dt = 2.5s$ 間隔(時系列データの再サンプリング間隔(0.5s)に再構成次元5を乗じたもの)の距離の比 $\Delta_i(t_i, dt)$ を式(1)のように計算する。

$$\Delta_i(t_i, dt) = \frac{|y(t_j + dt) - y(t_i + dt)|}{|y(t_j) - y(t_i)|} \quad (1)$$

ここで、 $|y(t_j) - y(t_i)|$: 点 $y(t_i)$ -点 $y(t_j)$ 間の距離を表す。

この距離比を $i = 1, 2, \dots, N$ (N :RRI変動のデータ数)について計算し式(2)のように平均をとることで、式(3)のように最大リアプノフ指数: λ が計算される。ここで、 τ :遅れ時間であり、遅れ時間の設定値は $\tau = 5s$ (再サンプリング間隔(0.5s)に10を乗じたもの)として計算を行った。

$$\langle \log \Delta(t, dt) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \Delta_i(t_i, dt) \quad (2)$$

$$\lambda(dt, \tau) = \frac{1}{\tau} \langle \log \Delta(t, dt) \rangle \quad (3)$$

ここで、 $\langle \log \Delta(t, dt) \rangle$:距離比の平均を表す。

3. 結果

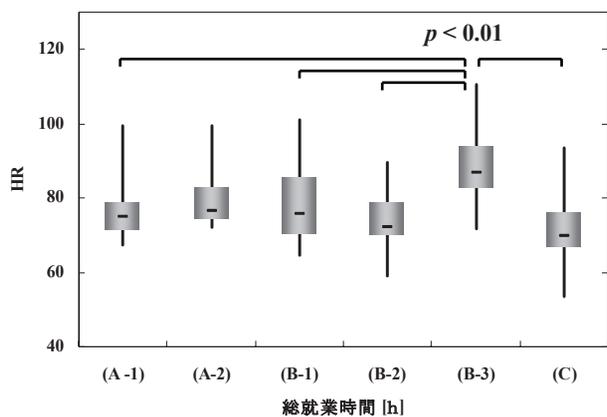
3.1 VDT作業者群と対照群のRRI変動の各指数の比較

VDT作業者の総就業時間(1年の就業日数(週5日×52週間=260日)に1日当りの就業時間(8時間に統一)を乗じたもの)の増加による自覚症状の変化およびストレス・疲労指標の変化を検討するため以下のように群分けを行った。事業所Aについては総就業時間が1000時間以下:1例, 4000~8000時間:5例, 18000時間以上:2例の分類になり、他の群との事例数を合わせる理由から事例数が最も多い4000~8000時間群を採用し、(A-1)を総就業時間4000~8000時間群(5例, $n = 20$, 前半4週間のデータ)、(A-2)を総就業時間4000~8000時間群((A-1)と同様、後半4週間のデータ)とした。事業所Bについては事業所Aの分類と同様の考え方で、(B-1)を総就業時間0~2000時間群(7例, $n = 28$)、(B-2)を2000~4000時間群(7例, $n = 28$)、(B-3)を4000~8000時間群(6例, $n = 24$)とした。一方、対照群(学生)のデータは(C)群(9例, $n = 18$)とした(表1)。

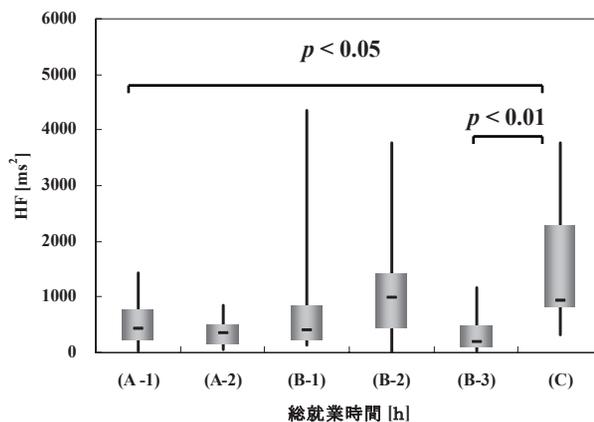
また、各群のデータについて平均値±3標準偏差の範囲外のデータを外れ値として除外して解析を行った。

表1 群分けによる総就業時間と年齢の平均値±標準偏差

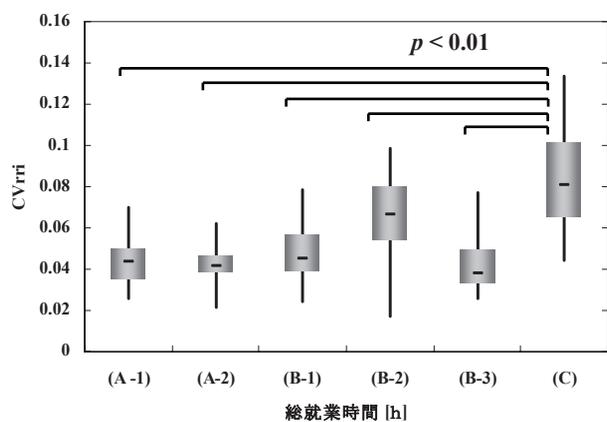
群	(A-1)	(A-2)	(B-1)	(B-2)	(B-3)	(C)
総就業時間[h]	5200 ±1470	5200 ±1470	823 ±501	2377 ±478	6327 ±1569	-
年齢	34±2.1	34±2.1	36±13	27±12	32±7.6	21



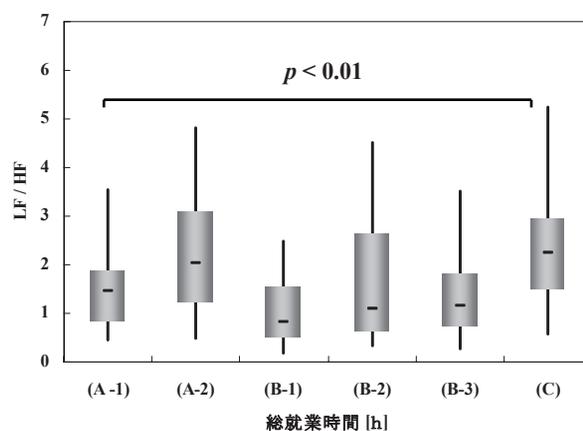
5(a) HR



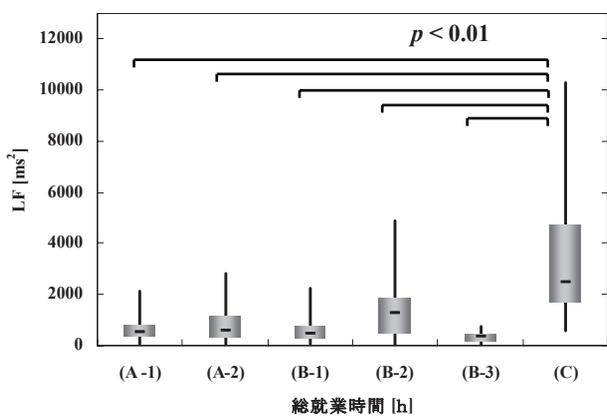
5(d) HF



5(b) CVrri



5(e) LF/HF



5(c) LF

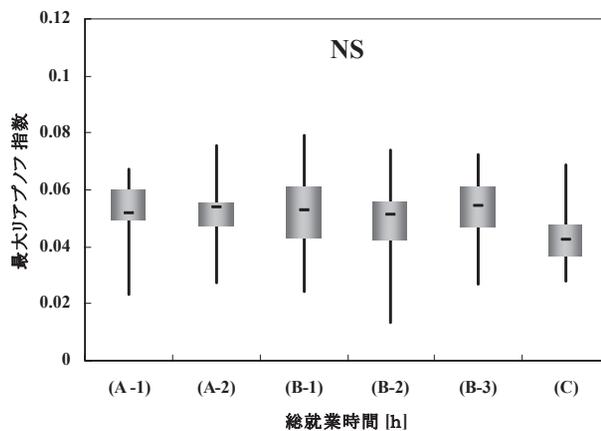
5(f) 最大リアプノフ指数 λ

図5 VDT 作業者と対照群の RRI 変動の各指標と最大リアプノフ指数の比較

図5はVDT作業者群と対照群のRRI変動の各指数および最大リアプノフ指数を箱ひげ図として表した結果である。箱ひげ図は箱内の太線が中央値(median),箱の底辺が25%タイル値,箱の上辺が75%タイル値を表す。箱から伸びる上下の線分はそれぞれ最大値と最小値を表す⁽¹⁵⁾。

HRはVDT作業者の(B-3)群と対照群との間で有意差($p < 0.01$)が認められ(Scheffe's F-test, 以下同様の手法),さらに(A-1)群,(B-1)群,(B-2)群の各群と(B-3)群との間で有意差($p < 0.01$)が認められた(5(a))。

CVrriはVDT作業者の各群と対照群との間で有意差($p < 0.01$)が認められ,さらに(A-1)群,(B-3)群の各群と(B-2)群との間で有意差($p < 0.01$)が認められた(5(b))。

LFは,VDT作業者の各群と対照群との間で有意差($p < 0.01$)が認められた(5(c))。

HFはVDT作業者の(A-1)群,(B-3)群と対照群との間で有意差($p < 0.05$, $p < 0.01$)が認められた(5(d))。

LF/HFはVDT作業者の(B-1)群と対照群との間で有意差($p < 0.01$)が認められ,さらに(A-2)群と(B-1)群との間で有意差($p < 0.05$)が認められた(5(e))。

最大リアプノフ指数はVDT作業者の各群と対照群との間で有意差が認められなかった(5(f))。

3.2 自覚症状アンケートとRRI変動の各指数との関連性の検討

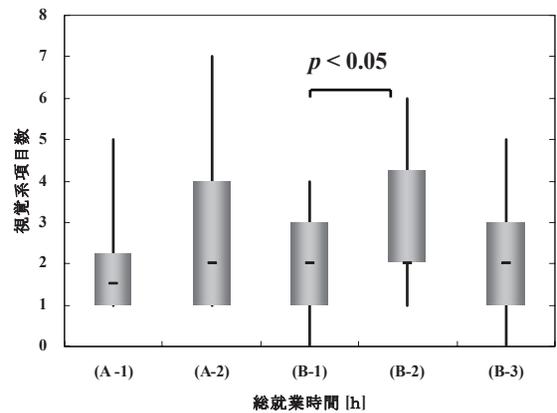
表2はVDT作業者群の自覚症状アンケートとRRI変動の各指標との相関係数の一例(A-1群の結果)である。

図6はVDT作業者群の自覚症状アンケート(視覚系8項目,筋骨格系6項目,精神系6項目)の結果である。対照群の自覚症状アンケートは行わなかった。

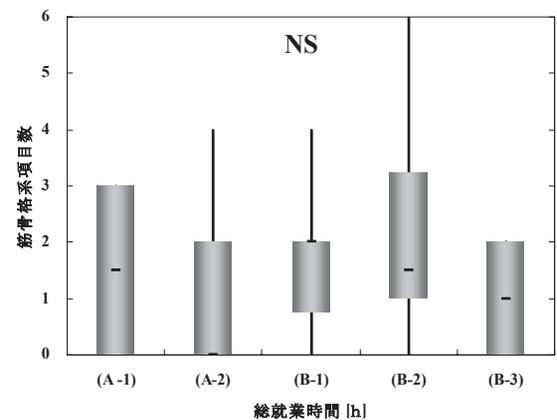
視覚系の8項目については(B-1)群と(B-2)群との間で有意差($p < 0.05$)が認められた。また,筋骨格系の6項目については有意差が認められなかった。さらに,精神系の6項目については(A-1)群,(B-2)群の各群と(B-1)群との間で有意差($p < 0.05$)が認められた。

表2 自覚症状アンケートとRRI変動の各指標との相関係数の一例(A-1群の結果)

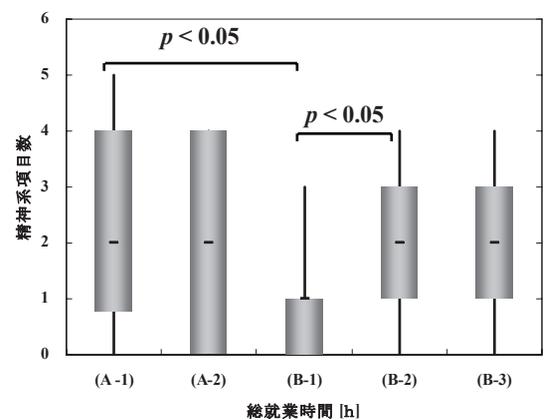
	HR	CVrri	LF	HF	LF/HF	リアプノフ指数
視覚系	0.26	-0.03	0.00	-0.11	0.19	-0.25
筋骨格系	-0.80	0.01	0.00	0.32	-0.47	0.50
精神系	0.07	0.19	-0.20	0.08	-0.08	-0.11



6(a) 視覚系項目



6(b) 筋骨格系項目



6(c) 精神系項目

図6 VDT作業者群の自覚症状アンケートの比較

4. 考察

VDT 作業群(B-3)群は HR が対照群, (B-1)群および(B-2)群よりも有意に上昇していることから, 総就業時間の増加により HR が上昇することが示唆される. HR は交感神経機能を反映するとされるので, 総就業時間の増加によって自覚症状に表れない部分での疲労の蓄積をきたし, (身体的, 精神的な緊張状態になることで)日常的に交感神経系が刺激されることによる HR の上昇という機序が考えられる. また, 副交感神経機能を反映するとされる CV_{rmi}⁽¹⁶⁾ および HF は, VDT 作業群が対照群よりも有意に低下していることから, VDT 作業群の副交感神経機能低下が示唆される. この傾向は, 総就業時間が長い群((A-1)群, (B-3)群)において顕著であり, (B-1)群も同様の傾向を示しているが, 一方, (B-2)群は対照群と同様の傾向を示している. これは, (B-1)が総就業時間 2000 時間以下の群であり, 業務への適応の段階(不慣れな状態)であることが影響していると考えられる. また, (B-2)群は総就業時間 2000-4000 時間の群であり, 業務への適応がある程度達成されている(慣れている状態)ため交感神経系の緊張が弛んでいると考えられる. さらに, (B-3)群のように総就業時間が長時間になると慢性的な疲労の蓄積等により交感神経系の緊張が強まりやすいことが示唆される.

最大リアプノフ指数について有意差が認められなかったが VDT 作業群の値が対照群よりも大きい傾向がみられることから, VDT 作業群は適応力, 緊張および集中力のレベルが高い状態であることが示唆される.

自覚症状と RRI 変動の各指標との相関係数については全体的に相関が低いいため, 疲労指標の意味付けを行うためには実験方法の再検討が必要であると考えられる.

5. おわりに

VDT 作業群のストレス・疲労について, 自律神経系の機能評価の観点から定量的検討を行った. VDT 作業群と対照群の安静時の心電図記録から RRI 変動を解析し, その統計解析, 周波数解析および非線形解析によりストレス・疲労の指標として 6 指標を算出した. 総就業時間によって群分けされた VDT 作業群と対照群について, RRI 変動の各指標の比較を行ったところ, 総就業時間 2000 時間以下および 4000 時間以上の VDT 作業群で相対的に交感神経系の亢進が示唆され, 総就業時間によりストレス・疲労の程度が異なることが考えられる. 今後は, VDT 作業群と対照群との背景影響(年齢, 性差等)を揃えること, 自覚症状と評価指標の相関関係から指標の意味付けを行うこと, ストレス・疲労と自律神経系活動との機序解明のための実験を行うこと等が必要である.

謝辞

本研究の被験者として協力していただいた方々に感謝すると共に, 実験全般およびデータの議論等に協力していただいた(株)e ウインテックの方々にも心より感謝する. また, 本研究の一部は平成 19 年度科学研究費補助金奨励研究(研究課題番号:19918023, 題目:心拍変動および血圧変動解析による身体疲労の定量的検討)の支援によって行われた.

参考文献

- (1) 厚生労働省:平成 15 年技術革新と労働に関する実態調査結果の概況, URL:<http://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/saigai/zen/03/index.html>.
- (2) 山口(晴), 山口(有), 笠井:VDT 文書入力作業の作業時間による心理負担測定のための評価尺度の開発, 日本教育工学会論文誌, **28**(4), p-p. 295-302, 2004.
- (3) 八谷, 大貝, 岡崎, 藤崎, 内田, 織田, 和田, 森:VDT 作業における疲労評価のための生体情報収集, 電学論 C, **128**(1), pp. 45-54, 2008.
- (4) 山口, 笹部, 倉恒, 西沢, 渡辺:加速度脈波を用いた疲労評価, 治療, **90**(3), pp. 537-547, 2008.
- (5) 厚生労働省:新しい「VDT 作業における労働衛生管理のためのガイドライン」の策定について, URL:<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2002/04/h0405-4.html>.
- (6) 浅井宏祐:自律神経機能検査(第 4 版)「心電図 R-R 間隔変動:スペクトル解析」, 文光堂, pp. 164-165, 2007.
- (7) 藤田, 小倉, 落合, 安田, 土居, 村田, 亀井, 上野, 金子:指尖容積脈波情報を用いた長時間着座疲労の簡易評価法の開発, 人間工学, **40**(5), pp. 254-263, 2004.
- (8) 浅井宏祐:自律神経機能検査(第 4 版)「心電図 R-R 間隔変動:非線形解析(カオス・フラクタル解析)」, 文光堂, p. 178, 2007.
- (9) 松浦, 横山, 高田, 嶋田:最大リアプノフ指数を用いた胃電図解析, 信学技報 MBE2008-12, pp. 57-62, 2008.
- (10) 宝神, 白石, 古瀬:音声解析からみたリアプノフ指数計算手法の比較, 信学技報 CAS2003-3, pp. 13-18, 2003.
- (11) M. T. Rosenstein, J. J. Collius, C. J. De Luca: A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets, *Physica D*, **65**, pp. 117-134, 1993.
- (12) 池口, 山田, 小室:カオス時系列の基礎と応用, 産業図書, pp. 156-185, 2000.
- (13) 嶋, 北島:非線形時系列解析手法を用いた脈波からの疲労度抽出, 信学技報 NLP2008-30, pp. 57-60, 2008.

- (14) Gari D. Clifford, Francisco Azuaje, Patrick E. Mcsharry: Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis, ARTECH HOUSE.
- (15) 吉田, 横山, 上原, 倉田, 高田: 二次元自己回帰を用いた心拍・血圧時系列解析, 電学論 C, **123**(5), p. 903, 2003.
- (16) 嶽石, 村田: 環境疫学における小児の神経生理機能の評価法, 医学のあゆみ, **212**(4), pp. 243-246, 2005.