

情報機器操作における心理的ストレス低減のための生体負担の客観的評価法

Objective assessment of mental workload for reducing psychological stress in operation of information processing machines

代表研究者	東京大学医学部助教授 Assoc. Prof., Faculty of Medicine, Univ. of Tokyo Akira WATANABE	渡 辺 瞭
協同研究者	東京大学医学部助手 Instructor, Faculty of Medicine, Univ. of Tokyo Kenji IKEDA	池 田 研 二
	杏林大学保健学部教授 Prof., Kyorin Univ. School of Health Sciences Osamu OKAI	岡 井 治
	東海大学開発工学部講師 Assit. Prof., Tokai Univ. School of High-Technology for Human Welfare Kiyoyuki YAMAZAKI	山 崎 清 之

This paper explores the methods for objective assessment of mental workload during operation of information processing equipment including VDT's. Quantitative estimation of mental workload was attempted using physiological responses associated with the autonomic nervous system activities, *i. e.* changes in heart and respiration rates and pupillary dynamics. First, electrocardiographic and respiratory signals during Kraepelin's test were measured at three work speeds. The product of heart and respiration rates was found to be well correlated with the degree of workload. Secondly, the dynamics of pupillary light reflex were measured during the dark-adaptation period using an infra-red television pupillometer and the same dynamics were analyzed before and after VDT work. It was found that the velocity of miosis was significantly delayed by visual fatigue caused by VDT work.

研究目的

現代の事務作業においては、VDTなどの情報機器を使用した作業の割合はますます高くなりつつある。VDT作業における作業負担と、それに由来する健康問題は、現在、社会的に最も注目されている問題の一つである。一般に、人間に外部より作業負荷を与えた場合、生体の内的反応として生理的負担、あるいは作業負担を生じる。また、この作業負担の結果として生じる生体の状態変化

が作業疲労である。一方、物理的環境（温度など）、社会的環境、精神的緊張、疾病など、生体内の条件に対する生体の生理的、心理的反応はストレスと呼ばれ、上述の作業負担や作業疲労に関連の深い概念である。

作業上の問題点を改善して健康問題に対処していくためには、まず作業負担や作業疲労を定量的に評価する必要がある。作業負担が大きいと、関連する主要器官ばかりでなく、自律神経系におけ

る交感神経系の緊張が生じる。また結果としてもたらされる急性疲労においても、関連する器官、および自律神経活動の不調和を含む全身の疲労感が相伴って生じる。

VDT 作業負担として、視覚的負担、筋的負担、心的負担が挙げられるが、作業負担の評価の立場から見ると、特に、視覚系の反応と全身的な自律神経反応が重要と考えられる。本研究は、自律神経機能に関係する心拍・呼吸反応を用いた作業負担の総合的評価指標、ならびに、瞳孔反応を用いた視覚疲労推定のための生理的指標を見いだすことを目的とする。

研究経過と成果

1. 心拍・呼吸反応による作業負担の評価

1.1 はじめに

作業負担や作業疲労の評価には種々の心身反応が用いられる。これらには、覚醒レベル（脳波などで測定）、緊張度（心拍、呼吸などで測定）、情動反応（皮膚電気反射などで測定）、疲労（フリッカー値などで測定）などが挙げられる。覚醒レベルは眠気の評価に関連するので、ここでは除く。作業上の問題点に早く対処するためには、作業疲労よりは作業負担を評価する方がよいといわれているので、緊張度と情動反応が対象となる。この中で後者は、微分的反応特性を示すので、ここでは心拍・呼吸反応による緊張度評価を取り上げる。もう一つの緊張度の指標である心拍数変動については、呼吸要因の影響が大きく、その機序は複雑であるため、別の機会に検討する予定である。

心拍数に関しては、緊張度が大きいと交感神経系の緊張が生じ、心拍数は増加する。一方、呼吸反応に関しては、緊張状態で呼吸数は増加し、1回換気量は減少するが、毎分換気量はほとんど変化しない（呼吸抑制（大島））。従来、これらに関する研究は多いが、心拍・呼吸反応から緊張度を十分な信頼性を以って推定するまでに至っていない。本研究は、作業負担に対するこの両者の反応を測定し、このデータに基づいて評価に有効な指標を見いだすことを試みたものである。

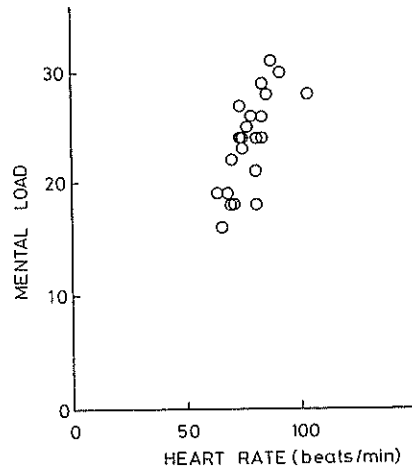


図1. 心拍数 (HR) と作業負荷量との間の相関散布図

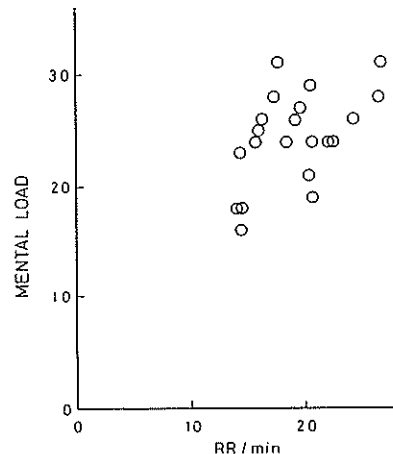


図2. 呼吸数 (RR) と作業負荷量との間の相関散布図

1.2 方法

作業負荷として、被験者にクレペリン・テスト（1桁数の連続加算テスト）を紙上で速度規制なしに、低速度、中速度、高速度の三つの速度で、30秒間実施させた。この時間内の計算回数作業負荷量とした。同時に心電図（第2誘導）および鼻孔装着のサーミスタによる呼吸波形をペン書き記録器で記録し、これから心拍数および呼吸数を求めた。被験者数は7名である。

1.3 結果と考察

心拍数 (HR) および呼吸数 (RR) と作業負荷量との関係を相関散布図に表したものを図 1, 図 2 に示す。両者とも作業負荷量と共に増加の傾向を示し, 表 1 からわかるように, その相関係数は 0.9 以上ではあるが, まだ十分に高いとはいえない。これに対して, 心拍数と呼吸数との積 (HR・RR) は, 図 3 の相関散布図からもわかるように高い相関関係を示し, その相関係数は 0.98 にも達している。

これは, 心臓制御系と呼吸制御系という 2 系統における緊張度に関する信号が互いに補足し合っており, 上述の指標 (HR・RR 積) の S/N が改善され, 評価の信頼性が高まったものと推定される。

2. 瞳孔反応による視覚疲労の評価

2.1 はじめに

VDT 作業による視覚疲労を定量的に評価するために, 質問票, 視力, フリッカー値 (CFF 値), 眼球運動, 調節力, 瞳孔径, 瞬目数, 眼圧, 涙液分泌などの評価指標が従来から用いられてきた。

表 1. 心拍数, 呼吸数および HR・RR 積と作業負荷量との間の相関係数

	RR	HR	HR・RR
相関係数	0.92	0.95	0.98

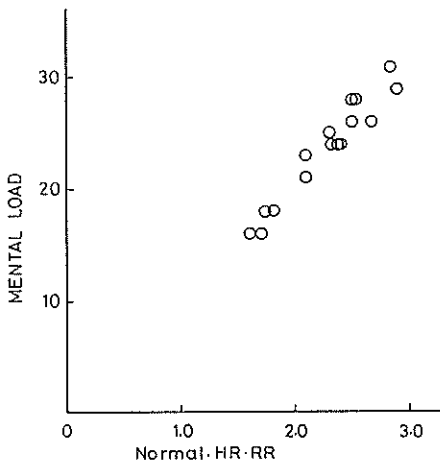


図 3. HR・RR 積 (正規化値) と作業負荷量との間の相関散布図

しかしこの方法も視覚系の疲労現象を十分に解析できていない。

一方, 瞳孔反応は従来, 計測装置からくる制約と反応系に内在する非線形性のため, 瞳孔の静的状態, すなわち瞳孔径 (もしくは面積) の研究に限定されていた。しかし電子瞳孔計の改良, および工学的解析手法の導入により瞳孔径以外にも生理的瞳孔動揺や対光反応が測定対象として取り上げられるようになった。

瞳孔径から視覚疲労を評価しようとする場合, 反応が網膜の順応状態によって変動するため, 測定前の暗順応期間が不可避であり, 過渡的に変化していく疲労現象を解析することが困難である。また瞳孔動揺は, 呼吸や心拍との相関はないものの, 睡眠や覚醒レベルの影響を受けやすく, 疲労との分離がむずかしいため適当な評価指標とはいえない。

これに対して対光反応は, 自律神経系の種々の経路の障害を判定するために用いられてきたため, 入力から出力に至る経路が比較的よく同定されている。網膜の順応状態や覚醒レベルの影響も受けにくく, 注意の持続といった心理的負担を被験者に課すこともない。また短時間で簡便な無侵襲計測が可能なることから, 生体の過渡現象を解析するには都合がよい。視覚疲労との関係については, これまで十分な検討はなされていないが, 対光反応の動特性のなかには, 視環境に左右されずに疲労を解析できる動特性が存在する可能性が推測される。

そこで本研究では, 第一に, 網膜の順応状態によって変化せず, 測定時に暗順応期間が不要である瞳孔対光反応の動特性について検討した。第二に, VDT 作業を负荷し, 先の動特性が視覚疲労の指標となり得るか否かを, CFF 値との比較により検討した。

2.2 方法

2.2.1 実験 I

装置: 瞳孔反応の測定には瞳孔撮影ユニット (ナック (株)EMR-600 オプション) を用いた。刺激提示には白色電球を用い, 閉ループ下で 100 lx (眼球表面上) の光刺激を点滅させた。凝視点とし

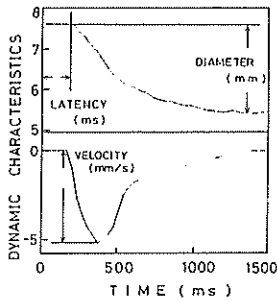


図4. 検討対象とした瞳孔対光反応の動特性

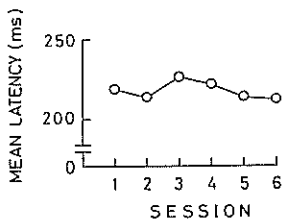


図5. 網膜の暗順応における対光反応の潜時

て、被験者の眼前3mの位置にLEDを設置した。測定は全て暗室内で実施した。

手続き：提示時間5秒，提示間隔5秒の光刺激を，方形波状に6回点滅させた。この手続きを1セッションとし，5分ごとに1セッションずつ6回の試行を3日間にわたり，毎回同じ時間帯に実施した。被験者数は実験I, IIとも2名である。

2.2.2 実験II

装置：実験Iと同じ装置を使用した。

手続き：作業負荷として，CRT上で桁数の連続加算を60分間実施させ，作業前後で試行を1セッションずつ実施した。同様に作業前後で，ポータブルフリッカー装置（OG技研CE-IS）を用いてCFF値を測定した。測定は3日間，毎回同じ時間帯に実施した。

2.3 結果

2.3.1 実験I

本研究で検討対象とした瞳孔反応の動特性を図4に示す。データの整理に際しては，初期瞳孔径の影響を除去するため，各セッションの第一試行はすべて除外し，残りの5試行を用いた。また刺激提示の直前直後で眼瞼反射や近見反応が生じた場合，その試行はデータから除外した。

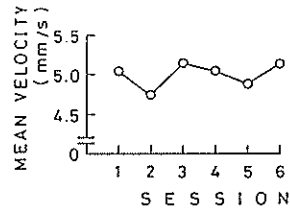


図6. 網膜の暗順応における対光反応の縮瞳速度

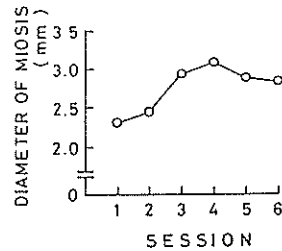


図7. 網膜の暗順応における対光反応の反応量

セッションごとの平均反応潜時を図5に，セッションごとの平均縮瞳速度を図6に，そしてセッションごとの平均反応量を図7に示す。潜時および縮瞳速度では，いずれのセッション間にも，平均値に有意差は認められなかった。特に潜時の分散は極めて小さかった。反応量では，第1セッションと第6セッションとの間で平均値の差を検討すると，統計的に有意であった($p < 0.05$)。

以上，実験Iの結果から，反応量は網膜の順応状態に応じて変化し，潜時と速度とは変化しない特性値であることが明らかになった。そこで次の実験では潜時と速度のみを取り上げ，これらが視覚疲労の指標となり得るか否かを検討した。

2.3.2 実験II

作業前(PRE)と作業後(POST)での瞳孔対光反応波形を図8に，また作業前後の平均速度と平均CFF値とを図9に示す。潜時は作業前後でほとんど変化せず，平均値，分散ともに有意差は認められなかった。次に，縮瞳速度を作業前後で比較したところ，統計的に有意であった($p < 0.01$)。またCFF値は，PREを基準値としてPOSTには7.54%の低下が見られた。

以上の結果から，対光反応の縮瞳速度が視覚疲労の指標となり得ることが示唆された。

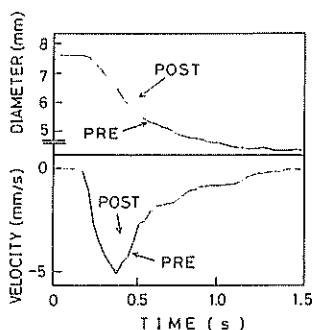


図 8. VDT 作業前後の対光反応波形

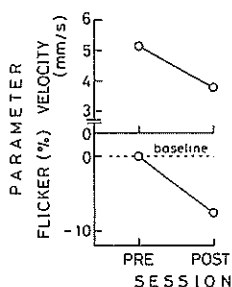


図 9. VDT 作業前後の縮瞳速度と CFF 値

2.4 考察

瞳孔は括約筋と散大筋とにより制御され、それぞれは自律神経系の二重相反支配を受けている。したがって対光反応は、主として括約筋の興奮、補助的には散大筋の弛緩という 2 つの筋系の動作の総和と考えることができる。

ところがそれぞれの筋では、受動的な力学特性や神経入力時の反応速度が異なる。そのため、神経系をも含めた筋系の反応出現時間に差が生じる。例えば、反射性散瞳反応を詳細に解析すると、二峰性の波形が基本になっており、まず副交感神経系由来の括約筋反応が、続いて交感神経系由来の散大筋反応が生起する。

本実験の結果、縮瞳速度に遅延傾向が認められた。その原因として、交感神経系の機能昂進、副

交感神経系の機能低下、あるいは両者、いずれかが考えられる。遅延の出現時間から考察すると、視覚疲労による縮瞳速度遅延は、副交感神経系の機能低下による散大筋反応の失調と考えられるが、この点に関してはさらに検討が必要である。今後の課題と発展

以上、VDT 作業中の緊張度や疲労を、自律神経系と視覚機能の両面から評価する指標を見だし、基礎実験により有効性を確認した。今後の課題としては、まず基礎面では次の項目についての検討が必要と考えられる。

- (1) 緊張度評価指標として HR・RR 積が有効である理由
- (2) 心拍数変動を用いた緊張度評価法との関連性
- (3) 縮瞳維持能力、縮瞳後の動揺、散瞳速度などの動特性
- (4) 瞳孔だけでなく、調節、輻輳など他の近見動作に関連のある反応系との相互作用特性

また応用面については、簡便な実用化装置の開発も今後の課題である。

謝 辞 最後に、本研究のうち、瞳孔反応に関する研究を担当された東京大学大学院医学系研究科学生・星野 聖氏に感謝の意を表したい。

発表論文

- 1) 岡井 治, 渡辺 暁: 呼吸時相と心拍数の関係を利用した生体負担の評価, 人間工学, 27 (特別号, 日本人間工学会第 32 回大会講演集), 270~271 (1991).
- 2) 星野 聖, 渡辺 暁, 斎藤正男: 瞳孔反応の解析による視覚疲労の定量的評価, 日本 ME 学会専門別研究会「生体環境の時系列情報解析研究会」研究報告集, 2 (6), 80~83 (1991).
- 3) 星野 聖, 渡辺 暁, 斎藤正男: 瞳孔反応の解析による視覚疲労の定量的評価, 人間工学, 27 (特別号, 日本人間工学会第 32 回大会講演集), 246~247 (1991).