

人の疲労評価における AQ フリッカーの有効性の検証¹

Study on Effectiveness of "AQ Flicker" for Human Fatigue Evaluation

川野常夫² 摂南大学理工学部 機械工学科
福井 裕 大阪府立大学工学域 生産技術センター
片桐真子 大阪産業技術研究所 製品信頼性研究部

KAWANO, Tsuneo Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
FUKUI, Yutaka College of Engineering, Osaka Prefecture University
KATAGIRI, Mako Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the performance of a new flicker tester ("AQ Flicker": High Accurate and Quick Flicker Tester) through the field-test for truck drivers and office workers. The AQ Flicker has been developed to eliminate subject's arbitrariness and deceptiveness using multiple LEDs which are flickered by program control. In the field the fatigue of the participants before and after work has been evaluated using the AQ Flicker. Furthermore, subjective fatigue feelings, reaction time, body sway, salivary alpha-amylase activity, and heartrate R-R interval have been measured. In the result the flicker values of AQ Flicker were well correlated with mental fatigue and muscle fatigue surmised from the psychological, physical, and physiological measures described above.

キーワード: 人の疲労, 測定器の有効性, AQ フリッカー, フィールドテスト, トラックドライバー

Keywords : human fatigue, availability of new tester, AQ Flicker, field-test, truck driver

1. はじめに

点滅光の点滅非点滅の閾値を測定するフリッカー検査は、中枢神経系の疲労の検出や精

¹【原稿受付】2017年8月2日, 【掲載決定】2017年9月15日

²【主著者連絡先】川野 常夫 摂南大学, 教授 e-mail: kawano@mec.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学理工学部 機械工学科

神疲労，身体疲労の判定などに利用されてきており，人間工学や生理学の分野では定番の検査法となっている⁽¹⁾⁽⁴⁾。代表的な検査器では，赤色 LED を 60Hz の点滅から周波数を徐々に下げていき「ちらつき」を判別できるようになったときの周波数のことをフリッカー値と言う（下降系列のちらつき閾）。一般に人は疲労すると，フリッカー値が下がる。この値は人によって，また年齢によって異なるため，絶対値で疲労を評価することはできないが，仕事の前後などの相対値で疲労を評価することができる。フリッカー検査の方法は簡便ではあるが，1 回の測定に時間がかかること，「ちらつき」の判別に迷いが生じる場合があること，さらに，気まぐれに判別する恣意性の問題，故意に嘘の申告をする虚偽性の問題を含んでいる。

このような問題に対して，複数の LED とその点滅周波数をプログラムで制御することにより，恣意性，虚偽性を排除して，より正確に，より迅速にフリッカー値を測定するためのフリッカー検査装置「AQ フリッカー」(High Accurate and Quick Flicker Tester)が開発された（特願 2015-019826）⁽⁵⁾。しかしながら，その実用性あるいは有効性を確認できる実測データは示されていない。

本研究では，AQ フリッカーを用いて，フィールドテストを行い，その実用性および有効性の実証を目的とした。フィールドテストでは，運輸業のトラックドライバーと事務職員を対象として，AQ フリッカーによる検査，自覚症しらべおよび反応時間，身体動揺，唾液アミラーゼ活性によるストレス，心拍による R-R 間隔などを測定した。

2. AQ フリッカー

図 1 に本研究で使用した AQ フリッカー検査装置を示す。三脚で支えられた左の四角のケースが AQ フリッカーの本体であり，正面には 8 個の LED が一列に並び，ケースの中にはマイコンと LED 制御ボードが収納されている。右のノート PC にインストールされた検査プログラムによって，より正確なフリッカー値が求められる。ディスプレイには検査手順や回答するボタン番号などが表示される。

検査の際には，AQ フリッカーとノート PC を机などの上に置き，被検者から LED が正面に見えるよう AQ フリッカー本体の向きを調整する。ノート PC の検査プログラムを実行すると，検査が開始される。8 個の LED は，基本的に左の方は点滅周波数が低く，右の方は点滅周波数が高く設定されている。被検者は，8 個の LED の中からちらつきを判別できる最右端の LED を見つけ，その番号を回答する。もし，すべての LED がちらついて見える場合は，シフト機能を用いて，より高い点滅周波数の LED が 8 個の中に並ぶよう



図 1 AQ フリッカー（疲労検査装置）

に左方へシフトする。逆にすべてのLEDがちらついて見えない場合は、より低い点滅周波数のLEDが8個の中に並ぶように右方へシフトする。被検者は以上の操作を3回繰り返す。このとき、被検者にとってちらつきを判定できる最右端のLEDの場所は、毎回ランダムに異なるようになっている。2回目と3回目では、ちらつきの判別の後に、AQフリッカーの特徴である恣意性、虚偽性の判定が行われ、NGと判定されると、最初からやり直しとなる。3回の検査の判定がよければ、ノートPCの画面にフリッカー値が表示され、検査が終了する。

以上の検査では、3回の繰り返しが必要であるが、ちらつきの判別を「正確に」、「正直に」回答すれば、検査は短時間（30秒程度）に終了する。もし、不正確な回答や虚偽の回答があると、やり直しとなり、所要時間は長くなる。

3. フィールドテスト

3-1 疲労測定の概要

AQフリッカーの実用性ならびに有効性を確認するため、実際に勤務するトラックドライバーと事務系従事者を対象として、疲労評価実験を行った。被検者は15名、内トラックドライバー9名（ 54.1 ± 7.4 歳）、事務系従事者6名（ 38.0 ± 19.2 歳）、いずれも男性とした。トラックドライバー9名のトラック運転経験は、 20.3 ± 14.4 年であった。トラックドライバーの仕事は、2～10トン車のトラックの運転と荷積み荷下ろしで、深夜3時前後に配車センターを出発し、12時前後に戻る者（深夜、昼グループ）4名、朝8時前後に配車センターを出発し、15時前後に戻る者（朝、夕グループ）5名であった。事務系職員は約8時間の日勤とした。疲労の測定は、それぞれの仕事前と仕事後に行った。測定項目は、AQフリッカーによる検査、自覚症しらべ、反応時間、身体動揺、唾液アミラーゼ活性によるストレス、心拍によるR-R間隔などとした。

なお、本研究は摂南大学・医療研究倫理審査委員会の承認（承認番号 2016-010）を受けたのち、被検者からインフォームドコンセントを得て実施した。

3-2 疲労の定義

「疲労」は、生理学、心理学、産業保健、人間工学、経営工学、安全工学、臨床医学など多様な領域で扱われ、その概念も領域によって相違があると言われている⁽⁶⁾。ISO 6385⁽⁷⁾では、作業疲労を、「過度の作業負担から生じる精神的または肉体的な減退の現れで、それは局所的なものもあれば全身的なものもある。また、病的なものではなく、休憩によって完全に回復できるものである。」と定義している。また、ISO 10075では、ISO 6385でほとんど取り上げられなかった精神的作業疲労に関して定義している。精神疲労は、英語の *mental fatigue* を和訳したもので、「先行する精神的負担の強さ、持続期間及び時間的パターンに依存する、精神的及び身体的機能の効率の一時的な減退。精神疲労の回復は、活動の変化よりもむしろ休養などの回復作用によって達成される。」とされている⁽⁸⁾。

ここで、精神的負担とは、外界から受容器を通して入手される情報の処理活動である認知活動 (*cognitive activity*) であり、認知能力の減退が精神疲労である⁽⁹⁾。また、作業疲労は、エネルギー源の違いから、「肉体的作業疲労 (*physical work fatigue*)」、「精神的作業疲労

(mental work fatigue)」，「感情的作業疲労 (emotional work fatigue)」の3つに分けられる⁹⁾。

トラックドライバーの仕事には、トラック運転作業や荷積み荷下し作業といった筋肉活動による肉体的疲労のほか、視覚や聴覚による状況判断を伴うトラック運転による精神的疲労、さらには、逐次変化する道路環境に対して生じる怒りや不安などによる感情的疲労の3つの疲労が潜在するものと考えられる。

3-3 疲労測定項目

AQフリッカーが疲労を適確に評価するものであるかどうかを実証するため、従来の疲労測定法によるものと同時に評価を行い、それぞれの相関関係を検討する。従来の疲労測定法として、以下の8とおりの測定項目を取り上げる。図2には、被検者の属性調査を含めて、9とおりの測定項目および測定機器を示している。図3には、主な測定風景を示す。

以下に8とおりの疲労項目について測定方法を記す。

(1) 身体疲労部位調査¹⁰⁾ (日本産業疲労研究会選定)

身体を17の部位に分け、それぞれの部位で、痛みやだるさを4段階評価する。合計得点が高いほど疲労していると判定する。これは肉体的疲労を評価するものである。

(2) 自覚症しらべ¹¹⁾ (日本産業衛生学会産業疲労研究会作成)

身体各部の疲労症状(25問)について、主観的に5段階評価を行う。合計得点が高いほど疲労していると判定する。また、25問の疲労症状は、I ねむけ感、II 不安定感、III 不快感、IV だるさ感、V ぼやけ感の5問ずつの5群に分けられており、群別に合計点を求めることにより自覚症状の中でもどの症状が高いのかを分析することができる。

被検者の 属性	身体疲労 部位	自覚症 しらべ	視力 (視力計)	ストレス (唾液アマラーゼ)
フリッカー値 (AQフリッカー)	反応時間(手, 足) (反応時間測定器)	身体動揺 (重心動揺計)	R-R 間隔 (心拍計)	

図2 疲労測定項目と測定機器



(a)測定器類 (b)AQフリッカー (c)反応時間(足) (d)重心動揺

図3 疲労測定機器と測定風景

- (3) 視力測定 (コンパクト視力計 CA-1000, トーメーコーポレーション製)
後述のフリッカー検査に影響がないかを確認するため, 両目による静止視力を測定する。
- (4) ストレス測定⁽¹²⁾ (唾液アミラーゼモニター CM-2.1, ニプロ株式会社製)
専用チップを舌下にはさんだ状態で, 30 秒間安静にして採取した唾液をモニターにセットし, 唾液アミラーゼ活性値を求める。ストレスが高くなると唾液アミラーゼの濃度が高くなることがわかっている。唾液アミラーゼ活性値は精神的疲労と感情的疲労の指標と考えられる。
- (5) フリッカー検査 (AQフリッカー⁽⁵⁾)
先に述べた AQフリッカーの検査プログラムに従って, 練習の後, ただ1つのフリッカー値[Hz]を求める。この値は小さいほど疲労していると判定する。
- (6) 反応時間測定⁽¹³⁾ (反応時間測定器, 竹井機器工業製)
発光装置の赤色ランプが光ると, 手(指)または足でスイッチを押すと, 反応時間が1,000分の1秒単位で測定できる。手の反応時間と足の反応時間のそれぞれを測定する。反応のプロセスは刺激の知覚, 判断や反応選択, 反応の運動実行の3段階に分けられる。それらは精神的疲労や肉体的疲労に影響されるものと考えられる。したがって反応時間の値は大きいほど疲労していると判定する。
- (7) 身体動揺測定⁽¹⁴⁾ (重心動揺計, アニマ製)
閉眼状態および両足裸足で直立し, 重心移動軌跡を30秒間求める。疲労評価は, 重心動揺面積[cm²]と重心動揺総軌跡長[cm]で行う。人は動かずに静止位を保っていても, 微細にみれば絶えず前後左右に揺れているが, 直立姿勢を保つため筋の絶間ざる緊張弛緩が繰り返されている。作業に伴う疲労によって筋神経系の調節機能が減弱し, 動揺が大きくなる。したがって, 重心動揺面積と重心動揺総軌跡長はいずれも大きいほうが筋疲労が大きいことを示す。
- (8) 心拍計による R-R 間隔測定⁽¹⁵⁾ (心周期計測用携帯型アンプ, ニホンサンテック製)
心電の測定時間は1人につき1分間とし, R-R 間隔をレコーダーに記録する。評価にあたっては, 自律神経解析プログラム (MaP1060, ニホンサンテック製)を用いて交感神経指標(cardiac sympathetic index; CSI)と副交感神経指標 (cardiac vagal index; CVI) を求める。R-R 間隔の低周波成分 LF(low frequency)は, 交感神経活動 (暗算負荷などの精神的ストレスなど) によって増加, 高周波成分 HF(high frequency)は, 呼吸などの副交感神経活動によって増加するといわれているが, CSI と CVI の方がよりよい指標となると言われている。

4. 疲労測定結果

15名の被検者について仕事終了後の疲労の程度を数値化するため, 各指標値の仕事前後の差, すなわち(仕事後の値 - 仕事前の値)を求めた。しかし, 指標によっては, 人によって桁数が異なるなど, ばらつきが大きいものがあったため, 仕事前後の差の分散が仕事前の値の分散より大きくなる指標については, 仕事前後の比, すなわち(仕事後の値/仕事前の値)を求めることとした。結果的に, 身体動揺, CSI, CVIについては, 前後の比を求め,

身体動揺、CSI の比が1より大きいと「疲労」の傾向があり、1より小さいと「回復」の傾向があると判断した。CVI の場合は1より大きいと「回復」の傾向があり、1より小さいと「疲労」の傾向があると判断した。それ以外の指標は前後の差を求めた。

このようにして求めた 15 名の疲労データ（前後の変化値）について、AQ フリッカーの仕事前後の変化値と他の疲労データとの相関分析を行った。ここで、相関分析の手順を次に示す。

- (1) 相関係数を求める。
- (2) 相関がない（母相関係数 $\rho=0$ ）という帰無仮説を検定し、相関係数が有意であるかどうか、2つの変数間に相関があるかどうかを検定する。
- (3) 相関係数が有意であれば、その絶対値の大きさから相関の強さを評価する。相関の強さの評価基準は、表1に示すギルフォードの基準(Guildford rule of thumb⁽¹⁶⁾)を用いる。

以下に、AQ フリッカー値との間で傾向が認められたものを示す。

図4に自覚症しらべの結果とAQフリッカー値の関係を示す。横軸はフリッカー値を、縦軸は自覚症しらべの合計点を示しており、いずれも仕事前後の差をプロットしている。フリッカー値が正の値は、仕事後の方が高くなったことを示しており、すなわち、疲労が回復し元気な状態に移行したことを示している。逆にフリッカー値の負の値は、仕事後に低くなり、疲労の状態に移行したことを示している。縦軸の自覚症しらべでは、正の値は仕事後に高くなり、疲労の状態に移行したことを、また、負の値は仕事後に低くなり、元気な状態に移行したことを示している。

AQフリッカー値と自覚症しらべのそれぞれの変化の値の相関係数は、 $r = -0.51(p < 0.05)$ となり、これは有意な相関係数であり、両者には中程度の負の相関があることがわかる。すなわち、自覚症しらべにおいて疲労に移行した被検者は、AQフリッカー値においても疲労に移行する関係があることがわかる。

図5は自覚症しらべ全体の合計点と「ねむけ感」の群だけの合計点の関係をプロットした

表1 相関の強さの評価基準 (r: 相関係数)

$ r < 0.2$	相関がない
$0.2 \leq r < 0.4$	弱い相関がある
$0.4 \leq r < 0.7$	中程度の相関がある
$0.7 \leq r < 0.9$	強い相関がある
$0.9 \leq r $	非常に強い相関がある

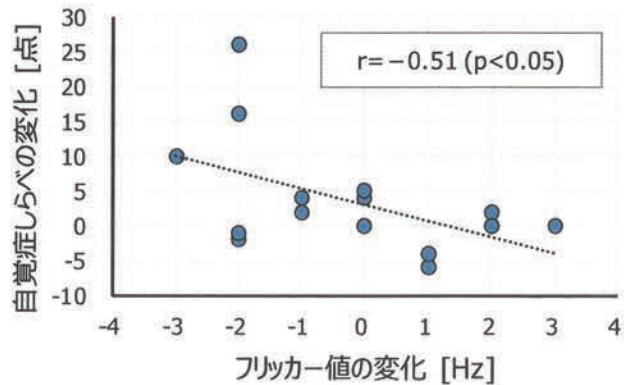


図4 AQフリッカーによるフリッカー値と自覚症しらべ

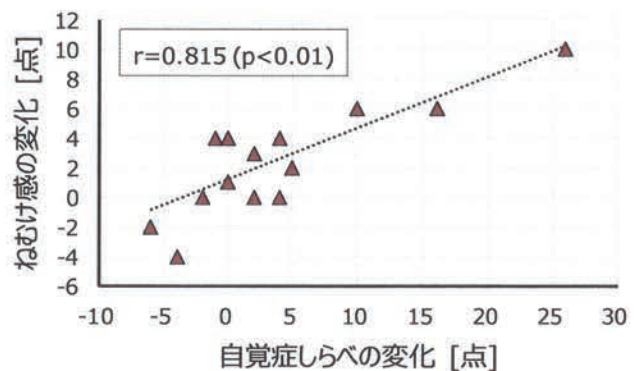


図5 自覚症しらべとねむけ感

ものである。両者には有意で強い正の相関($r=0.815, p<0.01$)があり、本研究における測定では、疲労の自覚のほとんどが、「ねむけ感」であることがわかる。なお、「ねむけ感」とAQフリッカーとの相関係数は、 $r=-0.43$ で、中程度の負の相関があり、検定では相関のある傾向が認められた($p<0.1$)。

図6に唾液アミラーゼの結果とAQフリッカー値の関係を示す。ここでは4名の被検者について仕事前後のいずれかにおいて測定不能であったため、それらを欠損値として扱った。唾液アミラーゼ活性値とAQフリッカー値の間には有意な中程度の負の相関があること($r=-0.544, p<0.05$)が示された。前述したとおり唾液アミラーゼ活性値の高い値はストレスが高いことを示しており、ストレスの高い方へ移行する被検者は、AQフリッカー値においても疲労に移行する傾向があることがわかる。

図7に、足の反応時間の結果とAQフリッカー値の関係を示す。両者の相関係数は、 $r=-0.576(p<0.05)$ となり、有意な中程度の負の相関があることがわかる。反応時間(足)が大きい方へ移行する被検者は、AQフリッカー値が疲労に移行する関係があることがわかる。前述したとおり、精神疲労や肉体疲労により反応時間は大きくなり、その変化に正しく反応する形でAQフリッカー値も低くなっている。なお、手の反応時間とAQフリッカー値の関係は、反応時間が長くなるとAQフリッカー値が減少する中程度の相関($r=-0.427, p=0.108$)は見られたが、有意な相関は認められなかった。

図8に、身体動揺の結果とAQフリッカー値の関係を示す。図は総軌跡長の指標の場合を

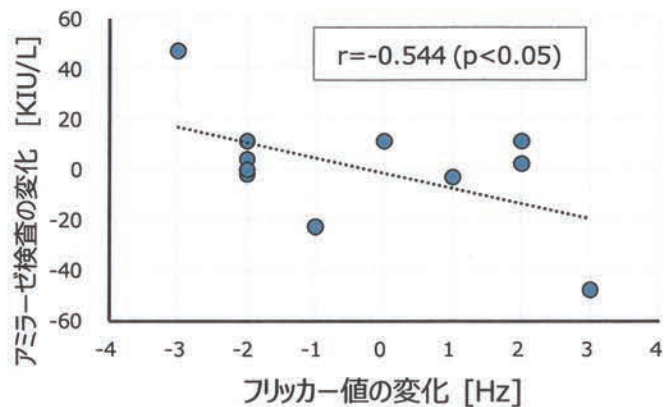


図6 AQフリッカーによるフリッカー値とストレス

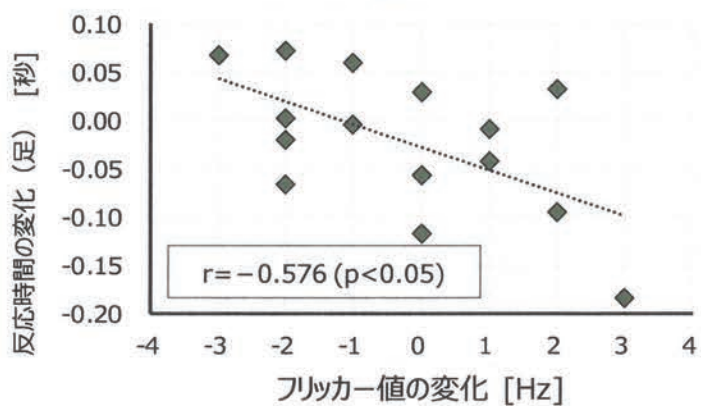


図7 AQフリッカーによるフリッカー値と反応時間

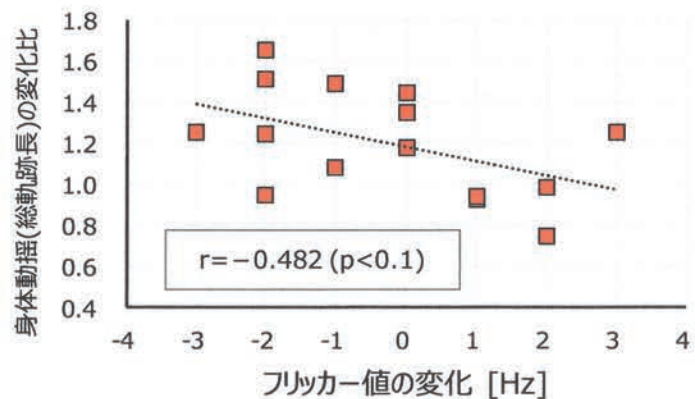


図8 AQフリッカーによるフリッカー値と身体動揺

示している。両者の相関係数は、 $r = -0.482(p < 0.1)$ となり、中程度の負の相関がある傾向が示された。すなわち、身体動揺が高くなる被検者はAQフリッカー値が低くなる傾向が示された。前述したように身体動揺は筋疲労に影響を受けると考えられ、AQフリッカー値は傾向として筋疲労と負の相関関係にある、すなわち、筋疲労が高くなるとAQフリッカー値が低くなる傾向が示された。なお、身体動揺の面積の指標では、筋疲労が高くなるとAQフリッカー値が減少する傾向($r = -0.368, p = 0.14$)は見られたが、有意な相関は認められなかった。

測定項目(8)の心拍計によるR-R間隔測定は、トラックドライバー5名について実施し、仕事前と仕事後の合計10

回の測定データについてまとめた。図9に交感神経指標(CSI)と副交感神経指標(CVI)の関係を示す。両者には有意な相関は認められない($r = -0.41, p = 0.16$)が、傾向として中程度の負の相関があり、精神的ストレスが反映される交換神経指標と呼吸によるリラックス時の副交感神経指標の両者は相反事象である傾向が認められる。

図10には、AQフリッカー値と副交感神経指標(CVI)の関係を示す。相関係数が $r = 0.66(p < 0.05)$ であることから、有意な中程度の正の相関があり、フリッカー値が高いほど、副交感神経指標(CVI)が高くなる、すなわち精神的ストレスがない状態に移行することがわかる。本研究のフリッカー値は精神的ストレスを評価する指標として機能することが、この結果からも裏付けられる。

図4から図10の結果は、一般に人が疲労するとフリッカー値が低くなるという特性とよく一致した。このことからAQフリッカーは疲労測定において有効であり実用的であると考えられ、本研究の目的は達せられた。なお、疲労測定全般について、本研究で対象としたトラックドライバー9名と事務職員6名の職種による有意な差は認められなかった。本研究で扱ったトラックドライバーの仕事が近距離配送であり、数百キロの距離を運転するようハードな仕事ではなかったこと、深夜出発、昼帰着のドライバーによっては、サーカディアンリズムにより、ねむけや視覚反応時間などが逆に回復している人もいたことなどが原因

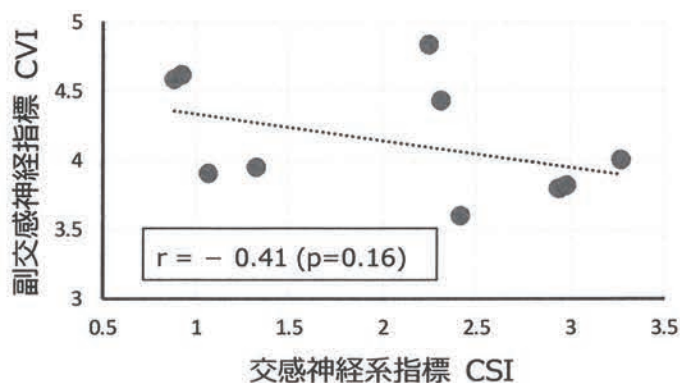


図9 交感神経指標と副交感神経指標

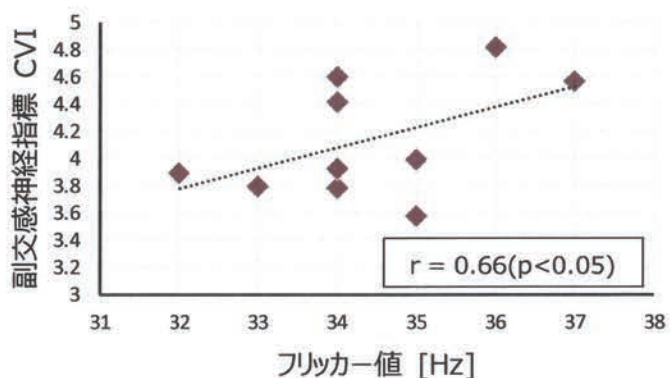


図10 AQフリッカー値と副交感神経指標

であると考えられる。このような職種の違い、勤務時間帯の違いなどによる影響を明らかにするためには、それぞれの被検者の数を増やして検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、従来のフリッカー検査器に潜在する恣意性や虚偽性を排除し、疲労を高精度に、しかも迅速に測定できるように開発された「AQフリッカー」のフィールドテストを行った。その結果、AQフリッカーによる測定値は従来のいくつかの疲労評価法による測定値と相関することが認められた。したがって、AQフリッカーによって人の肉体的疲労や精神的疲労を評価できることが示唆された。今後、トラック業界をはじめ、バス、タクシー業界、また、病院や介護施設などの徹夜勤務を伴う労働者の労務管理の現場において、フィールドテストを実施し、労働者の過労をより早く発見するしくみを構築することが課題である。

謝辞

本研究は、JST、研究成果展開事業、マッチングプランナープログラム「探索試験」平成27年度第1回（課題番号：MP27115663190）の研究助成により実施した。

参考文献

- (1) 橋本邦衛, 「Flicker 値の生理学的意味と測定上の諸問題, -Flicker Test の理論と実際-」, 産業医学, 5-9 (1963), pp.563-578.
- (2) 齋藤友幸, 内山尚志, 福本一郎, 「労働時精神疲労の低減を目指した最適光環境条件の基礎研究」, 電子情報通信学会技術研究報告, 101-332(2001), pp.59-64.
- (3) 西川雅弥, 西原直枝, 田辺新一, 「中程度の高温環境下の長時間作業が作業効率と疲労に与える影響に関する被験者実験」, 日本建築学会環境系論文集, 74-638(2009), pp.525-530.
- (4) 高橋慶多, 杜下淳次, 田代洋行, 中村泰彦, 「医用液晶ディスプレイを用いた X 線画像観察による眼の疲労度の客観的な評価」, 日本放射線技術学会雑誌, 66-11(2010), pp.1416-1422.
- (5) 福井 裕, 川野常夫, 「被検者の恣意性や虚偽性を排除する多点 LED 式フリッカー検査装置の開発」, モバイル学会誌, 6-2(2016), pp.51-58.
- (6) 山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子, 「精神疲労を評価する指標の探索」, 人間工学, 48-6(2012), pp.295-303.
- (7) ISO 6385:2004(E), “Second edition, Ergonomic principles in the design of work systems”, 2004-02-01.
- (8) 青木和夫, 「精神的作業負荷に関する人間工学の原則(ISO 10075)」に関する国際活動と諸問題, 人間工学, 29, Supplement(1993), pp.54-57.
- (9) Frone, M.R., Tidwell, M-C.O., “The Meaning and Measurement of Work Fatigue: Development and Evaluation of the Three-Dimensional Work Fatigue Inventory (3D-WFI)”, *Journal of Occupational Health Psychology*, 20-3(2015), pp.273-288.
- (10) 小林謙二, 田村恭, 「高所における建設作業に従事する作業者の疲労に関する調査: 特殊な環境における建築物の施工に関する人間工学的検討 第一報」, 日本建築学会計画

系論文集 60-476 (1995), pp.145-153.

- (11) 城 憲秀, 「新版「自覚症しらべ」の提案と改訂作業経過」, 労働の科学, 57(2002), pp.299-304.
- (12) 中野敦行, 山口昌樹, 「唾液アミラーゼによるストレスの評価」, バイオフィードバック研究 38-1 (2011), pp.3-9.
- (13) 長塚 康弘, 事故傾性, 「疲労および単調感と反応時間 (反応時間と人間工学<特集>)」, 人間工学, 21-2(1985), pp.71-79.
- (14) 山本高司, 「直立時動揺と疲労」, 体力科学, 28(1979), pp.18-24.
- (15) 田所克俊, 鈴木佳輔, 「音楽の歌唱や聴取の繰り返しパターンが脳機能の活性に与える影響」, ライフサポート, 26-3(2014), pp.89-99.
- (16) Kameli, S., and Baki, R.B., "The impact of vocabulary knowledge level on EFL reading comprehension.", *International Journal of Applied Linguistics and English Literature*, 2-1 (2013), pp.85-89.