

日常的に利用可能な疲労計測システムの開発

— フリッカー疲労検査をPCやスマートフォンを使って生活環境で実現 —

岩木 直^{1*}、原田 暢善²

日々の精神的疲労状態のモニタリングは、交通安全や健康管理のための非常に重要な要素である。これまでに疲労状態を評価するさまざまな指標が開発され、人間工学や産業衛生等の研究分野における研究ツールとして用いられてきた。我々は、研究のために用いられてきた精神的疲労のロバストな計測技術を、日常生活における実用的精神的疲労モニタリングのために低コストで提供することを目的とした技術開発を行った。

キーワード: 精神的疲労、ちらつき知覚閾値、フリッカー検査、日常疲労計測、交通安全

Mental fatigue measurement as application software on consumer devices

– Introducing reliable fatigue index to daily life –

Sunao IWAKI^{1*} and Nobuyoshi HARADA²

Monitoring mental fatigue is critical for traffic safety and health care. Various indexes of mental fatigue have been developed and used in the fields of ergonomics and industrial hygiene. One such index is the flicker-perception frequency threshold: the frequency at which the perception of flickering lights disappears for human observers. This index has a long history as a reliable indicator of mental fatigue in the laboratory setting. We have developed low-cost technologies for measuring mental fatigue objectively with widely available consumer devices such as personal computers and smartphones.

Keywords: Mental fatigue, flicker perception threshold, personal mobile device, traffic safety

1 研究の目的と関連する技術的背景

日常生活での精神的疲労の蓄積は、過労による健康状態の悪化を招く健康管理上の問題であるだけでなく、覚醒度の低下に起因する交通事故に直結したり、作業効率の低下の原因となるなど、重大な社会的・経済的問題でもある。特に、過労による居眠りや注意の低下が、トラック等の事業用車両における重大交通事故の主な要因の一つであることが指摘されており^[1]、経済的負担を強いることなく日常的に疲労状態を評価できる技術の実現が求められている。我々は、身の回りにあふれる情報機器を用いて、日常生活中に低コストで簡易に、精神的な疲労度合いを客観的かつ定量的にモニターできる技術を、スピーディーに開発することを目標とした。

一方、これまでに精神的疲労状態の定量的な評価のために、さまざまな指標が開発され、主に研究目的に用いられてきた。それらのうち主なものは下記のように整理できる。

A. 主観的指標

- 自覚的指標：
疲労自覚症状（質問紙やアンケート）^[2]

B. 客観的指標

- 行動学的指標：
対象とする作業に関する作業量や作業中の誤り頻度^[3]
対象とする作業とは無関係の動作や姿勢の変化^[4]
- 生理学的指標：
呼吸、脈拍、発汗^[5]、脳波^[6]など
- 知覚・認知指標
視覚刺激の「ちらつき」知覚閾値^[7]
触覚の空間弁別閾値^[8]
- 生化学的指標：
唾液、尿、血液中の代謝産物、遺伝子発現等^{[9][11]}
これらの客観的な指標に基づく疲労の測定は、いずれも検査者の監督下でそれぞれ専用の機器を用いて計測とデータあるいは試料の解析が行われ、データの解釈も研

1 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6、2 フリッカーヘルスマネジメント(株) 関西研究所 〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31 産総研関西センター内

1. Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan * E-mail: s.iwaki@aist.go.jp, 2. Flicker Health Management Corp. AIST Kansai, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563-8577, Japan

Original manuscript received January 14, 2014, Revisions received June 20, 2014, Accepted August 5, 2014

究活動の一環として行われてきたため、一般の利用者が日常生活中に気軽に使用することは不可能であった。例えば、(i) 行動学的指標の計測のためには、特定の作業に特化した作業量（パフォーマンス）評価課題の実施や、カメラ等による第三者視点での被験者動作の撮影と高度な画像処理が必要、(ii) 呼吸・脈拍等の生理信号を用いるためには、これらの信号を携帯情報端末等で取り扱えるデジタルデータにするためのトランスデューサが必要、(iii) 生化学的指標を用いるためには、生体資料の採取と分析のための専用機器が必要であり、一般利用者の日常生活空間での利用に向けたシステムの実現は難しい。これに対して、知覚・認知指標については、視覚・聴覚・体性感覚等の感覚器に対する刺激の呈示と利用者からの反応の収集さえ可能であれば、我々が日常的にアクセス可能なデバイスを用いて実現できる可能性がある。

2 日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のためのシナリオ

我々は、視覚的に呈示される刺激の「ちらつき」知覚の変化に基づく疲労の定量的評価を、スマートフォン、パソコン、カーナビゲーションシステム等の一般向け電子機器で利用可能にする技術の開発を行うこととした。

高速に明滅する光刺激の点滅周波数を徐々に減少させると、「ちらつき」が知覚できるようになる周波数（臨界融合周波数、critical fusion frequencyあるいはcritical flicker frequency (CFF)）が存在する（図1）。CFFは疲労の蓄積によって低下することが1941年に報告されて以来^[7]、疲労度の定量的検査指標として広く知られている。CFFは、(i) 活動の継続（すなわち疲労の蓄積）とともに連続的に変化し、(ii) 試行毎の計測値の変動が小さく安定的な計測が可能である等の性質を有することから、労働衛生学・労働生理学や交通心理学の分野では重要な研究ツールとして用いられてきた（フリッカー検査）^{[12][13]}。フリッカー検査は、疲労にともなう大脳皮質を含む中枢神経系の興奮性あるいは緊張度や覚醒度の変動にともなって変化すちらつき知覚閾値を計測していると考えられている。フリッカー値には個人差があるため、計測する本人の健常時のフリッカー値を測定しておき、「計測時のフリッカー値が健常時と比べてどのように変化しているか」に基づいてそのときの疲労状態を判定するのが妥当である。例えば、健常時よりも5%程度フリッカー値が低下していれば要注意とし、10%以上下がっているときは、休憩をとった方がよいといった具合である。これまでのフリッカー検査に関する研究結果によると、フリッカー値が10%以上低下した場合、単純計算課題の成績悪化等、認知・行動学的なパフォー

マンスが著しく低下することが知られている^[14]。

このフリッカー検査をパーソナルコンピューターやスマートフォン等を用いて行う場合の技術的課題として、「いかにして一般向け電子機器のディスプレイを用いてちらつき知覚閾値を計測するか」という点がある。従来のフリッカー検査では、LED等を用いて視覚刺激の点滅周波数を0.1 Hz単位で徐々に変化させ、被験者が点滅光のちらつきを主観的に知覚した閾値を検出していた。一方、携帯電話やパソコンのディスプレイは、垂直同期周波数（リフレッシュレート）が一定の値に固定されているため（典型的な携帯電話ディスプレイでは15あるいは30 Hz；パソコンでは60 Hz程度）、従来のフリッカー検査に必要な0.1 Hz単位での点滅周波数変化を実現できない。このため、点滅する視覚刺激の周波数変化に依存しないちらつき閾値の評価方法を開発する必要がある。

また、従来のフリッカー検査では、点滅周波数を一定の間隔で徐々にかつ連続的に変化させ、被験者は点滅光のちらつきを主観的に知覚したと感じた時点でボタンを押して回答する極限法（method of limits）を用いて、ちらつき知覚に周波数閾値を決定する方法がとられていた。この方法では、繰り返しフリッカー検査を受けることによる慣れの誤差や期待誤差、さらには計測結果に対する被験者の恣意性の影響を排除することが難しい。この問題点は、ラボ内での利用のように、データ取得に際して検査者と被験者が対面し、正確なデータ計測に対する被験者のモチベーションを保つことができる従来の利用法では重大な問題点ではなかった。しかし、日常生活中に検査者なしで自律的にちらつき知覚閾値を計測することを目的とする場合、計測結果に対する被験者の恣意的な操作等のバイアスを回避することは、特に重要な検討課題となる。

我々は、従来ラボ内で用いられてきた信頼性の高い疲労計測方法を日常生活環境で簡便に利用可能にする際に生じるこれらの問題点を解決する技術開発を行い、それらを統合したプロトタイプシステムを構築して、実環境における有用性を検証するための研究を行った。

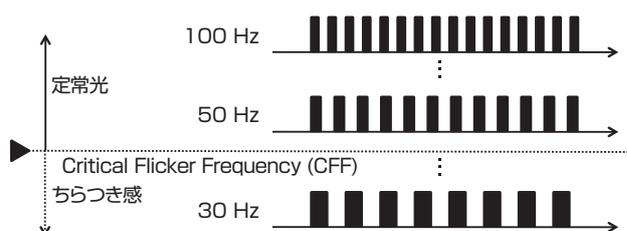


図1 臨界融合周波数（Critical Flicker Frequency (CFF)）

3 日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のために必要な要素技術

上述のように、これまでラボ内で研究目的に利用されてきた「ちらつき」知覚閾値計測による精神的疲労の定量評価技術を日常生活環境で実現するには、まず技術的な課題である、

- (a) 従来専用装置でのみ計測可能であった「ちらつき」知覚閾値の計測を、汎用ディスプレイ装置でも実施できるようにする要素技術の開発

が必須であると同時に、疲労計測技術の利用形態が変化(ラボ内での研究目的の利用→日常環境での利用)するため、新たに発生する問題への対策が課題となる。特に、

- (b) 利用者が自律的に検査を進めることができるようにするためのしくみ、すなわち、これまで検査者の監督下で被験者の主観的な報告に頼っていた「ちらつき」知覚閾値の計測を、利用者単独でも客観的に行えるようにするための要素技術の開発

が必要である。

3.1 汎用ディスプレイを用いたちらつき知覚閾値計測のための技術—CCFS: Contrast- Controlled Flicker Stimuli—

まず我々は、ちらつき知覚における点滅周波数と、点滅する光刺激のON/OFF間の輝度の差(以下、コントラスト)の間の等価性^{[15][16]}に着目して、汎用ディスプレイ機器におけるCFF計測を可能にする技術を開発した。

点滅光の点滅周波数と、点滅時のON/OFF間コントラストに対して、ちらつきが知覚できる閾値(Flicker Perception Threshold: FPT)は、一般に図2の模式図に示すような関係がある^([15][16]をもとに編集)。被験者がちらつき

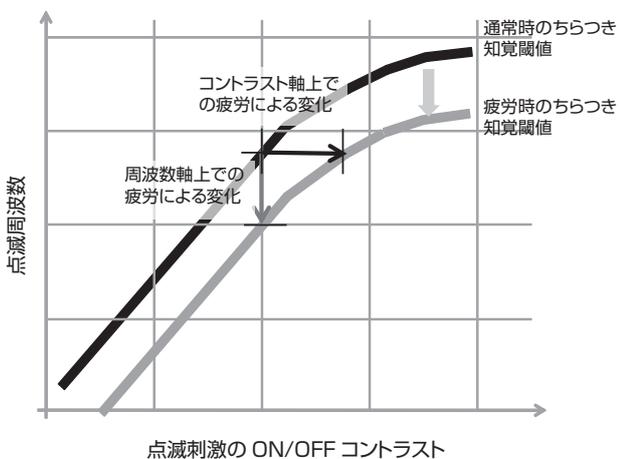


図2 ちらつき知覚における点滅周波数とON/OFFコントラストとの関係

を感じるフリッカー値は、周波数と明るさに影響を受け、健常時に黒線のような計測値となるとすると、疲労時はグレー線で示すように変化する。すなわち、同じコントラストの下では周波数の低下にともなってちらつきが知覚しやすくなり、同じ点滅周波数の下ではコントラストの増加に伴ってちらつきが知覚しやすくなる。これまでのフリッカー検査で計測されてきたのは、同一のコントラストの下で点滅周波数を変化させたときの、被験者がちらつきを知覚した周波数(CFF)のみである。これに対して、疲労にともなうちらつき知覚の変化は、同一の点滅周波数の下でのコントラスト閾値を用いても特徴づけることができる。この性質を利用することで、表示周波数が固定された画像呈示装置であっても、疲労によるちらつき知覚の変化を計測することが可能である。

我々は、従来のフリッカー検査のように点滅周波数を変化させるのではなく、明滅する視覚刺激の高輝度(ON)時と低輝度(OFF)時のコントラストを変化させることで、従来のフリッカー検査と同等の精度をもつ疲労計測が可能な方式(コントラスト変化によるフリッカー刺激: Contrast-Controlled Flicker Stimuli (CCFS))^[17]を考案した。図3は、14時30分から翌日の8時30分まで、パソコンを用いた資料作成等の作業を行っている間の精神的疲労の蓄積の様子を、(i)我々が開発したコントラスト変化によるフリッカー刺激(CCFS)を実装したディスプレイの垂直同期周波数30Hzの携帯電話、および(ii)CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数60Hzのパソコン、および(iii)従来のフリッカー検査専用機を用いて計測した結果を示している(12名の被験者の平均値。エラーバーは標準偏差)。いずれの方法でも、終夜の精神的負荷により

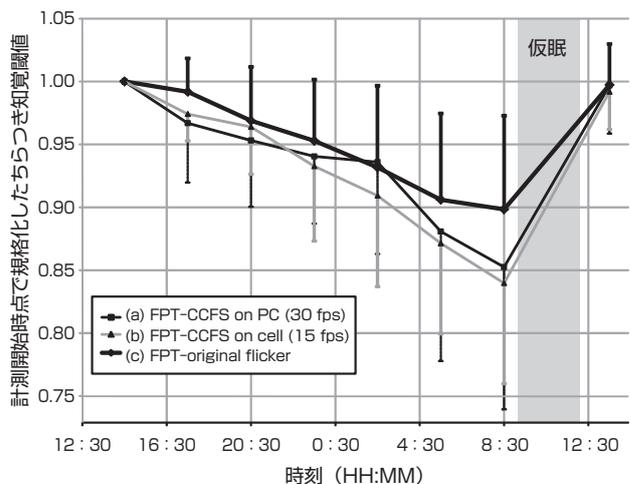


図3 終夜疲労負荷下での疲労計測結果^[17]
携帯電話(細グレー線)・パソコン(細黒線)に実装したコントラスト変化フリッカー刺激(CCFS)アプリケーションと、従来のフリッカー検査専用機(太線)。

疲労が蓄積していく様子と、仮眠により疲労が回復する様子が、従来のフリッカー検査と同様に適切に計測されている。また、CCFS方式フリッカー検査で得られる結果は、従来の専用機による検査結果と高い相関を持つことも明らかになった(図4)。

これらの結果は、(i) CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数 30 Hzの携帯電話(細グレー線)、および(ii) CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数 60 Hzのパソコン(細黒線)を用いた計測により、(iii) 従来のフリッカー検査専用機を用いた計測結果(太黒線)と同様に、終夜の精神的作業負荷による疲労蓄積の経時的変化の評価が可能であることを示している。

3.2 検査者なしで自律的にちらつき閾値計測を行うための技術

従来のフリッカー検査では、点滅周波数を一定の間隔で徐々にかつ連続的に変化させ、被験者は点滅光のちらつきを主観的に知覚したと感じた時点でボタン押しにより回答する極限法(method of limits)が採用されており、計測

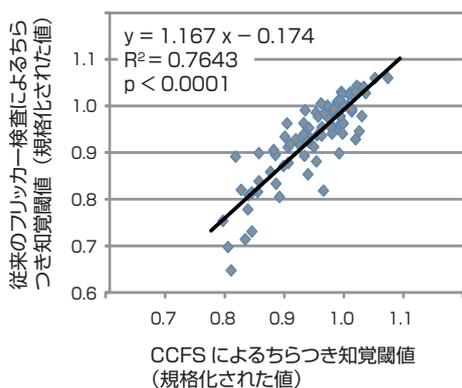


図4 コントラスト変化フリッカー刺激(CCFS)と従来の周波数変化フリッカー刺激で計測したフリッカー知覚閾値の相関^[17]

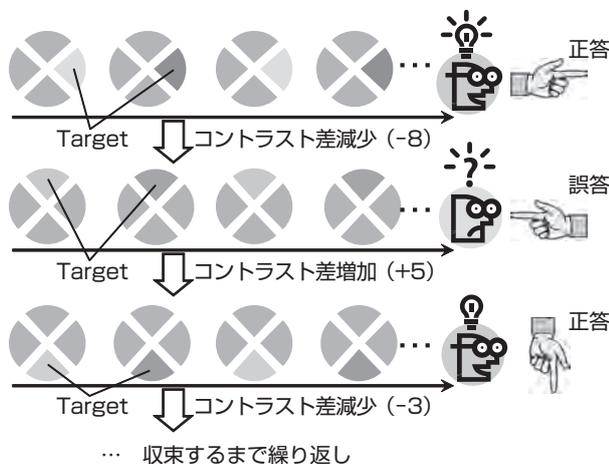


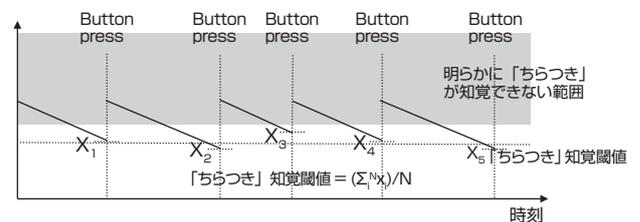
図5 強制選択・上下法によるちらつき知覚閾値の決定方法の模式図

結果に対する被験者の恣意性など様々なバイアスの影響を排除することが難しい。この問題点は、データ取得に際して検査者と被験者が対面して検査を行う従来の利用法では重大な問題点ではなかったが、日常生活中に検査者なしで自律的にちらつき知覚閾値を計測することを目的とする場合、解決すべき特に重要な課題となる。

これに対して我々は、検査結果に対する被験者の恣意性を排除するとともに、刺激の変化速度や変化方向を被験者の応答により適応的に調整することのできる、強制選択・上下法(Forced-choice up/down method: FCUD法)^[17]を導入し、検査者なしでも適切にちらつき知覚閾値(FPT)を計測できる検査アルゴリズム(FCUD-FPT)を採用することにした。具体的には、図5の模式図に示すように、呈示される複数の刺激の中から、ちらついて見える一つのターゲット刺激を強制的に選択させ、正答すれば次試行ではより難易度の高い(よりON/OFF間コントラストが低い、すなわち、ちらつきが見えにくい)ターゲット刺激を呈示、誤答であれば次試行でより難易度の低い(よりON/OFF間コントラストの高い、すなわち、ちらつきが見えやすい)ターゲット刺激を呈示する。これを、ON/OFF間コントラストが収束するまで繰り返すことによりちらつき知覚閾値を決定する。

この方法を用いることにより、被験者の応答にかかわらず一定間隔で刺激を変化させる極限法とは異なり、ちらつき知覚閾値付近で高密度な計測を行うことで計測結果の精度を向上させることができるとともに、ちらつきが知覚できる可能性が低い領域ではコントラスト変化を大きくする(図6)ことにより検査の短時間化に寄与する。

(a) 従来のフリッカー検査(極限法)



(b) この研究で提案するちらつき閾値検査(強制選択・上下法)

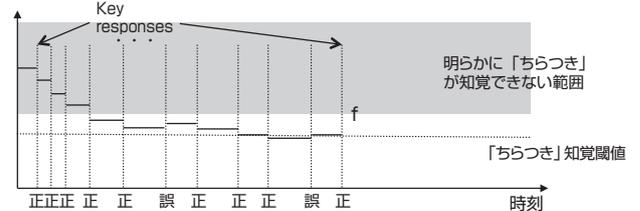


図6 従来方法と提案方法における、ちらつき知覚閾値の決定方法の違い

4 日常疲労計測のための技術の統合

我々は、3.1 節および 3.2 節に記述した二つの要素技術の日常疲労計測における有効性を実証するために、オンラインでデータを管理するためのデータベースを組み合わせたプロトタイプシステムを作成した (図 7)。すなわち、

- (i) CCFS (3.1 節) を用いて、スマートフォンあるいは PC での「ちらつき」を正確に制御する視覚刺激の発生を可能にし、
- (ii) FCUD-FPT (3.2 節) を用いて、「ちらつき」知覚閾値決定における被験者の恣意性を排除して、検査者と対面していなくても適切な疲労計測の遂行を可能にした。さらに
- (iii) ネットワーク上に構築した日常疲労計測データベースを立ち上げ、スマートフォンあるいは PC のネットワーク機能を用いて、端末側にインストールした疲労計測アプリケーション・ソフトウェアから計測データを随時登録・参照できるシステム (図 7) を作成した。

このプロトタイプシステムの一部である端末側機能は、Windows PC 向けのソフトウェアと、Android™ および iOS™ 向けのアプリとして実現されており、実環境でのデータ取得に用いられている。

実際に顧客として想定される運輸会社での始業・終業点呼とともに疲労計測を行う運用試験と聞き取り調査を実施したところ、検査にかかる時間を 1 分未満に短縮することが運用上非常に重要な要素であることが明らかになった。このため、上記の要素技術 FCUD-FPT の収束パラメータの見直しを行うことでこの目標を達成した。本手法をパソコンに実装したプロトタイプシステムでは、従来のフリッカー検査と比較して、計測に要する時間を 40 秒程度に短縮することができた (図 8)。

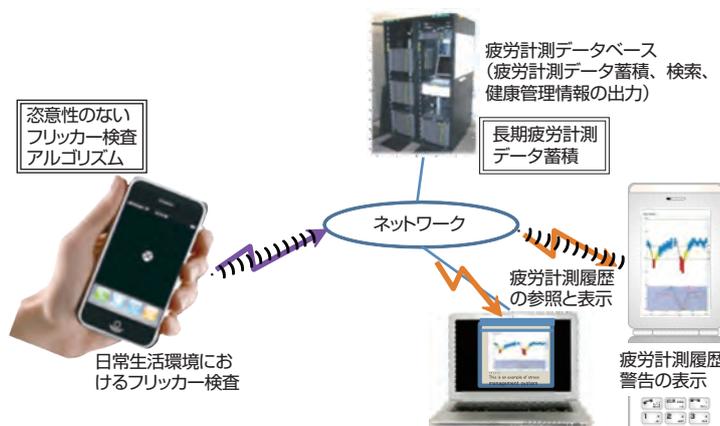


図 7 日常生活環境に利用可能な精神的疲労計測・管理システムのプロトタイプ

5 実現したアウトカムの効果と新たな研究課題

上記の研究開発で我々は、従来ラボ内に設置された専用装置を使って研究用途に用いられてきた、疲労にともなう「ちらつき」知覚の変化に基づく精神的疲労の客観的評価を、日常生活中に簡便に実施することを可能にし、プロトタイプシステムを用いた検証実験で、従来のフリッカー検査との互換性を確認した。現在、このプロトタイプシステムの実環境での有用性を確認するための運用試験を、中規模の運送会社の営業所 2 か所 (首都圏と中国地方) と、大手建設会社の研究開発部門で実施中である。また、上記の技術は産総研技術移転ベンチャー企業フリッカーヘルスマネジメント (FHM) (株)^[18]にて事業化され、これまでに情報家電メーカー、自動車メーカー、大学研究室等で主に研究開発のために使われ始めている。現在のところ、従来のフリッカー検査で調べられてきた、連続的な疲労負荷状況における疲労状態の推移を、専用の計測装置を準備することなく低コストで評価する用途に用いられている。FHM では、「ちらつき」知覚閾値計測を用いた日常環境での疲労評価技術の一般への普及を図るため、機能と操作を簡略化したスマートフォン向けアプリを無償で配布している^{[19][20]}。

元来フリッカー検査は研究機関における学術目的の疲労計測方法としての長い歴史をもち、数時間～数十時間程度の時間スパンにおける疲労状態の推移を評価するために利用されてきた。我々が開発した技術は、研究用途では多くの実績をもつ疲労計測方法を、ありふれた機器を用いて簡易かつ低コストで実施することを可能にする。これにより、従来からのラボで行われてきたような短期間の疲労状態の変化を、日常生活中にいつでも簡単にモニターすることが可能になるだけでなく、疲労度合いの日々の変化を長期間

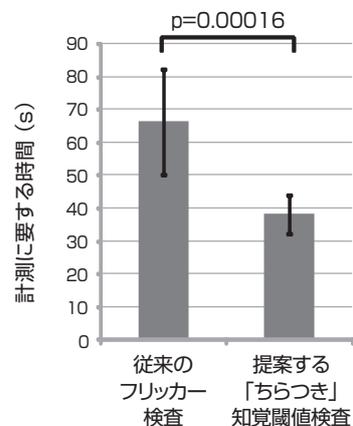


図 8 従来のフリッカー検査で用いられる極限法による「ちらつき」知覚閾値計測方法と、われわれが提案する FC-UD 法による「ちらつき」知覚閾値計測における、検査に要する時間の比較。^[17]

にわたって継続的に計測することができるようになるとともに、大規模な被験者群に対する疲労計測試験も現実的になる。このような疲労の簡易かつ定量的な評価技術は前例がない。日々継続的に計測する疲労計測データからどのような情報が抽出できるのか不明な点が多いが、精神的疲労状態の時間的推移をもとにした個人レベルにおける健康管理・疾病のスクリーニング、学習・生活環境の改善から、企業における業務の効率化やリソース配分の最適化等に至る、社会のさまざまな場面で有用性をもつ可能性がある。我々は、まず、実生活環境中で長期間継続的に疲労計測を行うことの意義を明らかにするためのデータ取得を始めている。図9に、民間企業研究開発部門に勤務する技術者が、夏季休暇期間を含む5週間毎日およそ同時刻に、我々が開発したAndroidスマートフォン向けアプリを用いて「ちらつき」知覚閾値を継続的に計測した例を示す。未だ予備的な段階であるが、日々の計測値の推移が出勤・休日パターンと関連していることを示唆する結果が得られつつある。

6 まとめと今後の展開

我々は、従来研究室内で学術的な用途に用いられてきた、「ちらつき」知覚閾値の計測に基づく精神的疲労のロバストな評価技術(フリッカー検査)を、日常生活における実用的な精神的疲労モニタリングのために低コストで提供することを目的とした技術開発を行った。この結果、スマートフォンやパソコン等の日常生活環境に遍在する情報処理デバイスにソフトウェアをインストールするだけで、フリッカー検査の実施を可能にするプロトタイプシステムの開発に成功した。

残された技術的課題として、「ちらつき」知覚閾値の周囲の光環境や視距離への依存性が挙げられる。計測に用いるデバイスに内蔵されたカメラ機能を用いて、周囲光環境条件や視距離に基づく計測結果の補正を行うなど、基本的

なアイデアは提出されているが(特許第4406705号)、実データに基づく検証には至っていない。現状では、利用者によってできるだけ常に同じ条件で計測を行うよう教示しているが、より広範な普及に向けて、周囲環境の変化に対してもロバストな疲労計測の実現が必要である。

計測される「ちらつき」知覚閾値は利用者の年齢、視力、用いる情報呈示機器のディスプレイ性能に大きな影響を受ける。実験室内で行う被験者実験では、実験開始時あるいは疲労負荷前の計測値を基準(基準値)に被験者ごとのばらつきを規格化することができるが、日常生活での計測では基準値が正確に得られない場合が想定される。我々は、日常生活での利用中に得られる計測データから基準値を設定するアルゴリズムの開発を進めている。

また、精神的疲労状態の多面的な理解と、疲労関連疾患のスクリーニング等への応用に向けて、血液や唾液等のサンプルから得られる各種バイオマーカーの変化等の生化学的指標と、「ちらつき」知覚閾値の変化に基づく計測結果との間の関連を明らかにする必要がある。我々は、産総研健康工学研究部門と共同で、終夜勤務中の被験者のフリッカー検査と同時に血液と唾液を採取し、両者の間の相関関係を検証する実験を行い、血液中の酸化ストレスマーカーとフリッカー検査結果との間に有意な相関があることを示す結果^[21]を得ている。引き続き、さまざまな環境における各種疲労マーカーや疾病マーカーとの関連を明らかにするためのデータの取得を行う。

日常生活場面で長期的に疲労の定量評価が可能な技術はこれまで実現されていなかったため、数か月・数年単位の日常疲労評価データの推移から、どのような情報が抽出できるのか明らかでない。本疲労計測技術と時系列データ処理技術等を組み合わせた健康維持・管理システムや、勤労者の疲労度合いの適切な管理を通じた業務効率化のしくみ等への応用に向けた検討は残された課題である

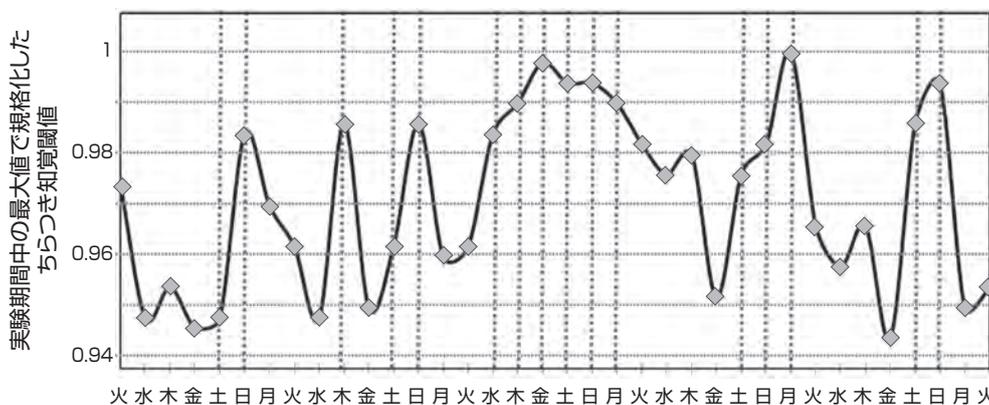


図9 オフィスワーカー(民間企業研究開発部門勤務)に対する5週間の継続的な計測によって得られた、ちらつき知覚閾値の推移と出勤・休日パターンとの関係を示す予備実験データ。破線は休日を示している。

もに、この技術の適用範囲を拡大する上でも重要であるため、産総研を中心に産総研技術移転ベンチャー企業をはじめとする産業界との密接な連携のもと、広範な環境におけるデータの継続的な取得と解析技術の開発を進める。

謝辞

この研究の一部は、(財)三井住友海上福祉財団研究助成(2011年度)および(財)スズキ財団科学技術研究助成(2011～2012年度)の助成と産総研ベンチャー開発センタースタートアップ開発戦略タスクフォース(2008～2009年度)の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] 自動車運送事業に係る交通事故要因分析報告書(平成19年度), 国土交通省自動車交通局自動車運送事業に係る交通事故要因分析検討会(2008).
- [2] 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 (5), 299-304 (2002).
- [3] M. Kuroda, T. Ishizaki, T. Maruyama, Y. Takatsuka and T. Kuboki: Effect of dried-bonito broth on mental fatigue and mental task performance in subjects with a high fatigue score, *Physiol. Behav.*, 92 (5), 957-962 (2007).
- [4] K. Saito: Measurement of fatigue in industries, *Indust. Health*, 37, 134-142 (1999).
- [5] L. R. Hartley, P. K. Arnold, G. Smythe and J. Hansen: Indicators of fatigue in truck drivers, *Appl. Ergonomics*, 25 (3), 143-156, (1994).
- [6] Y. Kaseda, C. Jiang, K. Kurokawa, Y. Mimori and S. Nakamura: Objective evaluation of fatigue by event-related potentials, *J. Neurol. Sci.*, 158 (1), 96-100 (1998).
- [7] E. Simonson and N. Enzer: Measurement of fusion frequency of flicker as a test of fatigue of the central nervous system, *J. Indust. Hyg. Toxicol.*, 23, 83-89 (1941).
- [8] R.W. Porter: New test for finger-tip sensation, *Br. Med. J.*, 2 (5519), 927-928 (1966).
- [9] S. Kitano, Y. Yoshida, K. Kawano, N. Hibi and E. Niki: Oxidative status of human low density lipoprotein isolated by anion-exchange high-performance liquid chromatography - Assessment by total hydroxyoctadecadienoic acid, 7-hydroxycholesterol, and 8-iso- prostaglandin F (2alpha), *Analytica Chimica Acta*, 585 (1), 86-93 (2007).
- [10] M. Maes, I. Mihaylova, M. Kubera, M. Uytterhoeven, N. Vrydags and E. Bosmans: Coenzyme Q10 deficiency in myalgic encephalomyelitis/chronic fatigue syndrome (ME/CFS) is related to fatigue, autonomic and neurocognitive symptoms and is another risk factor explaining the early mortality in ME/CFS due to cardiovascular disorder, *Neuro Endocrinol. Lett.*, 30 (4), 470-476 (2009).
- [11] K. Miwa and M. Fujita: Fluctuation of serum vitamin E (alpha-tocopherol) concentrations during exacerbation and remission phases in patients with chronic fatigue syndrome, *Heart and Vessels*, 25 (4), 319-323 (2010).
- [12] W. Karwowski (ed.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, 2nd Edition, CRC Press, (2006).
- [13] 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), 563-578 (1963).
- [14] 橋本邦衛: 精神疲労の検査, *人間工学*, 17 (3), 107-113 (1981).

- [15] S. Hecht and C.D. Verrijp: The influence of intensity, color and retinal location on the fusion frequency of intermittent illumination, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 19 (5), 522-535 (1933).
- [16] S. Hecht and C.D. Verrijp: Intermittent stimulation by light: IV. A theoretical interpretation of the quantitative data of flicker, *J. General Physiol.*, 17 (2), 269-282 (1933).
- [17] S. Iwaki and N. Harada: Mental fatigue measurement based on the changes in flicker perception threshold using consumer mobile devices, *Adv. Biomed. Eng.*, 2, 137-142 (2013).
- [18] <http://www.fhm.co.jp/>
- [19] <https://play.google.com/store/apps/details?id=fhm.lite.application>
- [20] <https://itunes.apple.com/jp/app/fhm-lite/id630387485?mt=8>
- [21] M. Shichiri, N. Harada, N. Ishida, L.K. Komaba, S. Iwaki, Y. Hagihara, E. Niki and Y. Yoshida: Oxidative stress is involved in fatigue induced by overnight deskwork as assessed by increase in plasma tocopherylhydroquinone and hydroxycholesterol, *Biol. Psychol.*, 94 (3), 527-533 (2013).

執筆者略歴

岩木 直 (いわき すなお)

1998年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、電子技術総合研究所入所。現在、産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門認知行動システム研究グループ長。2013年より筑波大学大学院人間総合科学研究科連携大学院教授。脳活動の非侵襲かつ高精度な解析技術の開発とその主観的な知覚・認知の客観的評価に向けた応用、および日常生活における生理・心理指標計測技術の研究開発に従事。この論文では、日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のための恣意性のないちらつき知覚閾値の計測アルゴリズム開発、計測の高速化技術の開発と論文執筆を担当した。



原田 暢善 (はらだ のぶよし)

1996年、北海道大学大学院環境科学研究科博士課程修了。博士(環境科学)。JST特別研究員(生命工学工業技術研究所)、CREST研究員、NEDO研究員を経て、2004年より産業技術総合研究所特別研究員。2010年、産総研技術移転ベンチャー企業フリッカーヘルスマネジメント(株)代表取締役。1/fゆらぎを用いた、環境中の情報要因の生体(脳機能)に対する影響の研究と、この研究成果の知財化と技術普及のための事業化に従事。この論文では、日常的に利用可能な簡易疲労計測システムの検証実験と、事業化に向けた実装および実労働環境における実測データの取得を担当した。



査読者との議論

全体について (赤松 幹之: 産業技術総合研究所)

これまで実験的な疲労計測に用いられてきたフリッカー疲労検査を、日常生活の中でユーザー自身が使えるようにするための技術開発とその実用化について述べられており、研究で使われていたものを社会に広く使われる技術開発シナリオになっていてシンセシオロジーの論文にふさわしいものになっています。

議論1 技術的ブレイクスルーポイントについて

コメント (赤松 幹之)

周波数ではなく、コントラストを用いるという技術的なブレイクス

ルーポイントの一つが書かれていますが、もう少し明確にこの点を主張されるとこの技術の特徴が明確になると思います。「これに対して、上述の性質を利用することで、表示周波数が固定された装置であっても、コントラストを変化させることで疲労によるちらつきの知覚の変化を計測することが可能である。」といった文を入れることで、これがブレイクスルーのポイントであることが強調されると思います。

回答（岩木 直）

いただいたコメントをもとに、3.1 節第 2 段落の最後に、ちらつき知覚のコントラスト閾値を用いることによるブレイクスルーのポイントを簡潔に説明する 2 文を加えました。

議論2 これまでの疲労の測定について

コメント（坂上 勝彦：産業技術総合研究所環境安全本部）

第 1 章第 3 段落には、客観的な指標に基づく疲労の測定が一般の利用者が日常生活中に気軽に使用することは不可能であることが記述されていますが、この論文の主題である知覚・認知指標について触れられていません。次章以降で詳述されるとは言え、この段落でも他の客観的指標と同じ扱いとして触れておくべきと考えます。簡潔な要点のみでよいと思いますので、加筆をお願いします。

回答（岩木 直）

ご指摘の通りですので、第 1 章に知覚・認知指標についても記述を加えました。

議論3 本方法を用いたフリッカー疲労検査の指標について

質問（赤松 幹之）

図 9 の縦軸が他の図と異なっています。周波数によるフリッカー疲労検査においては疲労の指標値は確立されていますが、コントラストを用いた場合の指標として、何を使うのが定まっていらないのでしょうか。

回答（岩木 直）

図 9 に示す日常生活中における継続利用予備実験データでは、さまざまなパラメータがコントロールされた実験室内での実験と異なり、「基準値」（個人差の大きなデータを規格化するための基点となるデータ。通常、疲労負荷前の計測値を標準値とする）を明示的に設定する方法が確立されていません。今回は実験期間中に計測された最も大きい値を「基準値」とすることとし、他の図と同じようになるようグラフの縦軸を修正しました。

また、日常生活中に継続的に計測された疲労データからの「基準値」設定方法は、実用化に向けた非常に重要なポイントだと思われ、現在産総研技術移転ベンチャー企業とともに取り組んでいる研究開発対象でもあります。これに関して、第 6 章第 3 段落を追加しました。