

博士論文の概要

(2014年 3月 28日 提出)

論文題目 蓄積疲労の兆候を検出する簡便なシステムの開発と現場での
運用を通じた実用性の検証

指導教員 大須賀 美恵子



大学院 工学研究科
博士後期課程 生体医工学 専攻

申請者氏名 山田 晋平



大阪工業大学大学院

労働において、疲労は作業効率の低下とメンタルヘルスの悪化などの一因となる。また近年、過重労働と過労死が社会的に問題となっている。平成 18 年度に改正された労働安全衛生法（第六十六条の八）では過重労働の対策として、事業者「時間外労働が月 100 時間を超え、疲労の蓄積が認められ、申出を行った者」に対して医師による面接指導を実施することを義務付けている。しかしこの基準は生理的機能や作業能力の観点が含まれていない上、本人の申し出によるため、対応が必要な労働者を見逃す恐れが高いと考えられる。そこで本研究では、過重労働に因って健康を損なう可能性がある労働者を漏れなく抽出することができるスクリーニングシステムの開発を目的とする。

この目的を達成するためには、疲労を客観的かつ定量的に評価する必要がある。しかし現状では疲労の評価方法は確立されていない。確立していない理由としては、一言に疲労と言ってもその現れ方には個人差が大きく、単一指標での評価や一律の閾値を用いた評価が適さないことが挙げられる。例えば疲労感は日常的に体感できる疲労の発現の 1 つであり、痛みや発熱などと同様に生命と健康の維持に不可欠な反応であるが、個人差が大きく画一的な評価は適さない。またやりがいや達成感によってマスクされる場合がある点も疲労の評価において問題となる。作業能力の低下も疲労の特徴的な反応であるが、努力によって維持が可能である点や疲労以外の要因（疾病、怪我、低いモチベーション）によっても低下する点を考慮する必要がある。また作業能力の評価には、作業精度、出来高、正答率などの作業成績を用いることになるが個人の資質によるところが大きく、個人差を無視した一律の基準での評価は適さない。同様の観点から負荷や負担の大きさ（例：時間外労働時間の長さ）から疲労を見積もる手法は、個人の能力の違いを考慮した上で用いなければ、疲労を過小、もしくは過大に評価することに繋がる。生理的機能は様々な生理指標によって客観的かつ定量的に捉えられるが疲労に対して特異的に変化する指標は確認されていない。疲労に伴い変化する指標はいくつか報告されているが、疲労に限らず運動、飲食、環境（室温、気圧など）、疾病、そして緊張や不安といった情動によっても変化する。また疲労に伴う変化が確認されている指標においても、個人ごとに安静時の値が異なるため、一律の閾値を用いて疲労を判定するのは困難である。

このように、疲労感、作業能力、負荷・負担、生理的機能のいずれも疲労に伴って変化するが、疲労の評価に用いるには一長一短がある。実験室実験のような統制が行える条件であれば単一の指標で評価できる可能性も考えられるが、労働者のスクリーニングに用いる場合にはこれらを組み合わせ総合的に評価する必要があると考えられる。また個人差が大きいため、画一的な閾値をもって疲労を評価するのは困難である。そこで開発するスクリーニングシステムでは、疲労感、作業能力、負荷・負担、生理的機能の 4 つの要因をそれぞれ測定し、疲労を判定する閾値は個人差を考慮して個人ごとに設定することとした。個人差を考慮した閾値の設定には、個人ごとの平均値と標準偏差を用いる。日常的に測定を繰り返し、平均値を普段の状態を反映した値として、標準偏差をその状態における変動の幅とし、この範囲から逸脱した場合を蓄積疲労の兆候とすることとした。また誤検出を防ぐため、単一の指標が閾値を超えた場合ではなく、複数の指標

が閾値を超えた場合を兆候として判定することとした。以上の手法によって疲労の蓄積の兆候を捉えるためには、先に挙げた4つの要因（疲労感、作業能力、負荷・負担、生理的機能）を反映する測定指標の選定、労働の現場で日常的に測定が行える計測システムの開発、検出漏れや誤検出を防ぐ閾値の設定方法について検討する必要がある。なお、検討においては実験および調査の実施場所に合わせて、産業医科大学もしくは大阪工業大学の倫理委員会の承認を受けた上で行った。

最初に実験的検討が行いやすい急性の疲労について検討を行った。健康な男子大学生15名を対象とした計100分間(20分間×5セット)の暗算作業を負荷とした実験において、主観指標では、日本語版POMS (Profiles of Mood States) と Visual Analogue Scale (VAS)で作業前後で有意差が認められた。作業成績では Advanced Trail Making Test (ATMT) と呼ばれる視覚探索課題の探索時間が作業後に取った20分間の休息によって短縮した。生理指標では作業前後において心拍変動指標 ($\ln(\text{Total Power})$, $\ln(\text{LF})$, $\text{CV}_{\text{R-R}}$) の増加が認められた。心拍数 (HR) は作業前に比べて、休息後に低下を示した。鼻尖部皮膚組織血流量 (Tissue Blood Flow: TBF) は作業後に低下し、休息後に回復しなかった。またこのように休息を経た後においても作業前の状態に回復していない指標が POMS と VAS といった主観指標にも認められ、慢性疲労の評価指標として検討する余地があると考えられた。

次に疲労の蓄積を評価できる指標の探索のため、男性8名 (18.4 ± 0.5 歳)、女性6名 (18.5 ± 0.8 歳) を対象に、通常の講義が行われている期間 (2009年6月15日から7月9日: 以下、通常期) と疲労の蓄積が見込まれる定期試験を含む期間 (2009年8月31日から9月30日: 以下、繁忙期) に週2回、それぞれの期間で8回ずつの測定を行った。指標の探索の前に、試験期間が疲労の蓄積を起こすのに十分な負荷・負担となっているかについて検討したところ、睡眠時間が通常期と繁忙期で有意な変化を示さなかったことと、試験とレポートの回数やその主観的負担が実験参加者で大きく異なっていることから、実験参加者によっては試験期間に必ずしも疲労の蓄積が発生していない可能性が考えられた。しかし、このような条件にも関わらず、主観指標では自覚症しらのだるさ感と蓄積的疲労兆候インデックスの一般的疲労感に通常期に比べ繁忙期で増加が認められた。生理指標では通常期に比べ繁忙期で心拍変動指標の HF は減少を、HR は増加を示した。また閉眼時の前後方向の重心動揺は有意に増加した。これらの指標は蓄積疲労の評価指標となり得ると考えられる。また、視覚探索課題の反応時間においては習熟の影響がみられたため、繁忙期における作業成績の低下は認められなかったが、一部の実験参加者で繁忙期において睡眠時間の短縮に伴う反応時間の延長がみられた。このことから、十分に習熟させた上で用いれば、疲労の蓄積を評価できる可能性がある。

ここまでの検討で疲労の蓄積を捉えられる可能性のある指標が確認されたが、実験室で30分以上の時間をかけて測定を行っており、労働現場で過重労働対策の一環として日常的に実施するのは非常に難しい。そこで労働の現場での利用を想定して、最終的には専門家の補助がなくても簡単に測定できるシステムを目指して計測システムの開発を行った。開発したシステムは、洗面台

に設置した。家庭や職場で洗面所を利用する際の測定を想定した。洗面台の鏡にはハーフミラーを設置して小型液晶プロジェクターを用いて疲労感を評価するための質問項目の表示や計測手順の説明や各種生理指標の計測方法の呈示を行った。質問項目への回答には机などを必要とせず空中で使用できるポインティングデバイスを用いた。また前夜の就寝時刻と計測当日の起床時刻を尋ねる画面もハーフミラーに呈示してポインティングデバイスにて回答させた。またこのハーフミラーに呈示した画面は洗面所の横に設置した液晶タッチモニタにも表示し、数値探索作業ではこちらを使用した。重心動揺は、洗面台の前の床に置いた Wii ボード（任天堂）に乗るだけで測定できるようにした。心電図は、導電性テープ（DF7007CFR-25,日本ジッパーチュービング）を Wii ボードの両足の足底（参加者には素足で Wii ボードに乗ってもらう）が接する位置に 2 箇所とポインティングデバイスの掌が当たる位置に貼り付けて導出することで胸部に電極を貼らずに測定が行えるようにした。脈波は反射型の光電センサ（ニホンサンテック）をマジックテープに組み込むことで、容易に指に巻きつけられるようにして測定した。心電図からは心拍変動指標を算出し、心電図と脈波から脈波伝達時間の算出も行った。また呼吸ピックアップ（TR-751T, 日本光電）を腹部にベルトで巻きつけさせて呼吸周期の測定を行った。この計測システムにて男性 3 名、女性 1 名の大学生 4 年生を対象として 2011 年 1 月 10 日から 3 月 11 日にかけて測定を行った。この測定期間は、前半に卒業論文の提出日や卒業研究の発表会といったイベントが集中している忙しい時期と発表会後の余裕のある時期を含む期間を設定した。開発した計測システムは、全対象者において、測定を試みたすべての機会に測定を単独で行うことができ、繁忙期においても継続的に測定が実施されていることから受容性は十分にあったと考えられる。

また疲労感、作業能力、負荷・負担、生理的機能の 4 つの要因を反映する測定指標として、疲労感、数値探索課題の探索時間、余暇と睡眠の時間、心拍数、脈波伝達時間、重心動揺、心拍変動性指標を選定した。これらの指標について、それぞれ平均値と標準偏差より閾値を定めて、本研究で提案する複数の指標においてこの閾値を超えた場合を蓄積疲労の兆候とするスクリーニング手法の検討を行った。その結果、検出された日は、蓄積疲労の原因となり得るイベント日と対応していた。この手法は、従来用いられてきた単一指標による絶対値での評価では検出できない疲労の兆候を捉えられる可能性を示していると考えられる。しかし生理指標の測定の専門家ではないが授業や研究を通して若干ではあるが生理測定の経験を有していた学生の受容性と、一般企業の従業員の受容性は異なる可能性が高い。企業で実施するためにはシステムの改良による手順の簡略化と測定時間の短縮とともに、測定の意義やメリットについての説明を通して測定への動機付けの強化が必要になると考えられる。

以上の検討を踏まえ、企業で無理なく運用できる水準まで測定に伴う時間と手間の軽減を図った計測システムの開発を行った。ただし、先の学生を対象とした実験において蓄積疲労の兆候が検出できる可能性が示されたので計測項目はほぼ同等とした。改良型の計測システムは、タブレットパソコンを中心に構成した。また、すべての測定機器の電源をタブレットパソコンの内蔵バッテリーとモバイルバッテリーから取る仕様にした。これらの改良により可搬性を高めると共に、

心電図などに交流電源のノイズが乗ることを防ぎ、システムの設置場所が限られると考えられる企業での測定を容易にした。また電極として導電性テープを、絶縁体として実験参加者が履いている靴下（もしくはストッキング）を用いて、人体と電極間に静電容量結合を形成し、これを介して心電図の計測を行った。呼吸についてはこれまでの検討で呼吸のタイミングを指示することで周期をコントロールできることが確認されたので、計測を行わずタブレットパソコンの画面に呼吸のタイミングを指示を表示するに留めた。この他にも質問項目の絞り込みや生理指標の計測状態の自動判定などを行うことで、生理指標の計測の経験がない者でも単独で簡単に計測できる計測システムとなったと考えられた。この計測システムを実際に企業にて長期間に亘って運用することで計測システムの受容性を確認すると共に、個人ごとの標準偏差で規格化した変化量を用いた蓄積疲労の兆候検出の妥当性について検証を行った。この検証のための調査は、勤務時間に関するデータの提供と測定への理解と協力が得られた福岡県内にある材料や環境の調査および解析を業務とする企業で実施した。対象はこの企業の同一事業所に勤務する成人 20 名である。計測システムの運用期間は 2013 年 7 月 22 日（月）から同年 8 月 30 日（金）までの 6 週間とし、対象者にはこの期間中に週 2 日以上頻度で延べ 15 日以上測定するように指示した。20 名中 19 名が、指示を満たす頻度と回数で測定を行っていた。また、指標によってはデータに欠損が見られたが疲労の蓄積を検討するに足るデータを継続的に得ることができた。本計測システムは改良により企業に導入できるだけの受容性を有し、現場の理解と測定への動機づけによって継続的な運用が行えることが示された。ただし、R-R 間隔と重心動揺については、計測システムに不備がありデータの欠損が生じたため検出手法の検討を含めた計測システムの改良の必要性が認められた。蓄積疲労の検出については、現行の基準には該当しない疲労が蓄積している状態を検出できる可能性が示されたが、今回の対象者は超過勤務時間が少ないため、現行の基準の該当者を漏れなく検出できるかについての検討は行えなかった。また産業医による面接が必要ない対象者を検出してしまふ誤検出についても検討を行った。誤検出は対応が必要な状態の見落としとトレードオフの関係にあり、産業保健スタッフの対応できる範囲に合わせて調節できることが望ましい。本研究で検討している個人ごとに複数の指標について平均値と標準偏差を基に設定した閾値を用いて評価する手法に、超過勤務時間と睡眠時間の絶対値での評価を組み合わせることによって、誤検出と見落としの量をコントロールできる可能性が示された。本システムの実用性の検証には、現行の面接指導の対象者の要件を満たす労働者がいる職場での検討が必要と考えられる。しかし、実際に企業において 6 週間の運用が行えたことと、現行の基準では見落とされる疲労が蓄積している状態の検出が行えていたことから、本システムは実用に足るだけの受容性を有しており、個人ごとに規格化した変化量を用いた蓄積疲労の兆候の検出手法は閾値の設定に検討の余地が残るが運用実績の蓄積に伴い検出精度の向上が期待できると考えられた。