

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651185

研究課題名(和文)高負荷活動従事者のリアルタイム疲労状態把握手法の提案

研究課題名(英文)A proposal of real-time fatigue state grasp method of high-load activities workers

研究代表者

岡 泰資(OKA, YASUSHI)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号：10240764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：消防隊員の活動現場はオフィスや生産工場などに比べ過酷であり、かつ消防活動は高負荷活動の一つであることから、このような環境下での活動が、消防隊員の心肺機能あるいは体温上昇にどのような影響を与えるのかを検討するために、8階建訓練棟での消防訓練における消防隊員の活動記録をもとに、立体的な活動を平面的な活動で置き換えた消防活動モデルを作成した。

現役の消防隊員18名(29-42歳)の協力のもと、この消防活動モデルに沿った活動を実施し、RR間隔データの周波数解析で得られるスペクトル波形と揺らぎ指数と体温変化と組み合わせた疲労状態判定ロジックを構築した。

研究成果の概要(英文)：Fire fighters are working under severe conditions. Fatigue may become one of the factors of an unwanted accident and cause insufficient safety management of them. Physical data during fire fighting activity are important to derive objective indices of acute fatigue. To secure fire fighters subjective judgment based on experience are to be replaced with some objective indices of acute fatigue. A standardized training procedure was proposed which well simulates the practical fire fighting training in 8 storied building.

In cooperation with 18 active firefighters, experiments were carried out in accordance with standardized training procedure in a climate room, which is managed temperature and humidity. Based on the data, the logic representing the fatigue state was developed in combining with the body temperature and the fluctuation index obtained by the frequency analysis of RR interval data.

研究分野：火災安全工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：急性疲労 高負荷活動従事者 消防活動 心拍数 外耳温

### 1. 研究開始当初の背景

防火衣を着装しての消火・救助活動を実施する消防隊員、化学防護服を着装しての薬物採取・除去活動従事者、暑熱環境下での建設・港湾現場での作業従事者などは、過酷な環境条件下での高負荷活動を強いられる。防火衣や非エア供給型の防護服は、通常の綿製の作業服に比べて、熱がこもりやすく、透湿性が悪いため、防火衣や防護服の中は、活動に伴う産熱や発汗により高温多湿状態となる。このような状態での活動の継続は、活動従事者の加速度的な体力消耗を招き、疲労蓄積だけでなく、適切な水分補給や休息、あるいは積極的な放熱がなければ、機能低下として現れる集中力の低下、人的ミス、安全管理の欠如あるいは熱中症を招く要因となる。

このようなインシデントの発生を未然に防ぐには、早期の休憩や交代の実施により、従事者の運動能力、判断力の回復を図ることが望まれる。しかし現状では、従事者の活動低下の程度にもとづく現場指揮者の判断や、一定の時間間隔による限定的な休憩（交代）の実施にとどまっている。従事者の疲労状態を科学的な数値で推し量ることができれば、従来の経験にもとづくもと判断に科学的検討からの支援が可能となることから、安全管理の向上に役立つと考えられる。しかしながら、従事者の疲労状態を推し量るために利用できるデータの蓄積は殆どなく、活動に伴う疲労がどのように蓄積されていくのか、この疲労の蓄積状況をどのような物理量で捉えることができるかを判断するための客観的な数値基準も確立されていない。

そこで、消防活動を高負荷活動の代表例と位置づけ、消防活動中の消防隊員の疲労状態の変化を実験的に把握することで、疲労がどのように蓄積されるのかを検討する。

### 2. 研究の目的

暑熱環境下における高負荷活動の代表例として、消防活動が挙げられる。消防隊員は災害発生現場で、ホースの搬送、放水、指令伝達、梯子・照明器具などの各種資機材の搬送、検索・救出活動など、さまざまな活動を行っている。消防隊員の活動現場は、一般執務オフィスや生産工場などのような管理された作業環境ではないため、活動に伴う負荷だけでなく、緊張感・不安感といった心理的負荷も累加されるストレスの強い環境である。

このため、各種活動の効率化、適切な労働安全管理、疲労に起因した集中力低下に伴うヒューマンエラーの撲滅、さらに疲労度に応じたきめ細かい活動指示（負荷の低減、退域指示、休息等）を行うためには、各活動従事者の疲労度のリアルタイムモニタリングが必要となる。

そこで本研究は、活動従事者の疲労状態をリアルタイムで客観的に推し量る手法の検討、現場指揮者の経験や活動従事者の自己判

断だけでなく、科学的な根拠にもとづいた判定指数の導出と閾値の検討を目指すものである。

### 3. 研究の方法

#### 【平成 24 年度】

横浜市消防訓練センター内の 8 階建て中層建物（訓練棟）を利用した消防訓練を実施した。火元は 4 階で 6 階まで延焼、屋内階段を利用したホース延長後、消防車両から送水・消火するシナリオである。安全区域として確保された 3 階を前線指揮所とし、ここから現場へ指示が発令された。また、建物内の 4~6 階に要救助者が取り残されている想定であった。

消防活動における身体的負荷を探るために、防火衣の着装から活動終了までの一連の消防活動を模擬した訓練活動中の隊員 2 名（28 歳と 47 歳）の RR 間隔（心臓の心室が収縮して血液を心臓から送り出す時間間隔）と外耳温を連続測定した。RR 間隔はアームエレクトロス社製心電計(AC-301A)で、外耳温はテクノサイエンス社製外耳温測定用温度ロガー(DBTL-1)を使用した。

消防訓練時の各隊員の活動状況を把握するために、4 階、5 階、6 階のベランダ、3~4 階、5~6 階の階段踊り場、訓練棟正面および側面（西側）にビデオカメラを設置した。

当日の温度・湿度は、訓練棟の 4 階ベランダに設置した温度・湿度計 (Thermal Environmental Monitor, Quest Technologies, QUESTemp° 36) で測定し、湿球黒球温度(Wet Bulb Globe Temperature) を算出した。

また、現役消防隊員 18 名（29~42 歳）の協力のもと、高温多湿状況を再現した人工気候室内で、上述の 8 階建て訓練棟での消防訓練を屋内で再現できるように開発した消防活動モデルに沿った負荷活動を実施し、各隊員の RR 間隔、外耳温度を連続測定した。さらに、唾液中の  $\alpha$  アミラーゼ濃度、VAS 値および血中乳酸値については、負荷活動前後で測定した。

#### 【平成 25 年度】

現場活動する消防隊員の疲労状態から活動中止のしきい値を検討するために、人工気候室内（温度は 35℃、湿度は 60~70% に設定）で、自転車エルゴメータを用いた 2 段階の負荷活動実験（低負荷（1.5 [kg・m]、最大負荷継続時間 10 分）と高負荷（3.5 [kg・m]、最大負荷継続時間 40 分）休息時間は 5 分間）を、実験の趣旨を十分に説明し同意を得た横浜消防局所属の 18 名の現役隊員（29~42 歳）の協力のもと、防火装備着装状態を実施した。外耳温度、RR 間隔および呼吸代謝（酸素摂取量、二酸化炭素排出量、呼吸数）は、実験開始 20 分前から活動終了 25 分まで連続測定した。唾液中の  $\alpha$  アミラーゼ濃度、VAS 値および血中乳酸値は、負荷活動前後で測定した。

10 分の低負荷活動は、いずれの被験者も完

遂したが、40分の高負荷活動を完遂した被験者はいなかった。高負荷活動における活動中断の判断は、自転車エルゴメータのペダル回転数が一定値(50回転)を維持できない、リアルタイムモニターしていた体温あるいは心拍数が基準値を超えた、という条件との比較から実験実施責任者が行った。

#### 4. 研究成果

8階建て中層建物を利用した消防訓練での消防隊員の活動分析、および消防活動モデルに沿った活動測定結果から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 熱抵抗の高い防火衣を着装した状態での25分間の消防活動では、瞬時心拍数は活動開始から終了まで160~190 bpmの範囲で変動し、外耳温は活動開始から単調に上昇し、約3の上昇を記録した。
- 2) 消防活動に伴う疲労蓄積を測定するために、安定した条件下で再現性よくデータ取得するために、中層建物での消防訓練における消防隊員の立体的な活動を、屋内での平面的活動で置き換えた、消防活動モデルを提案し。
- 3) 提案した消防活動モデルに沿った活動実施時に測定した瞬時心拍数、外耳温の時間変化は、中層建物での消防訓練でのこれら物理量の時間的变化と絶対値の変化と一致することを確認した。

疲労度判定のしきい値を検討するために実施した実験から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 負荷活動前の血中乳酸値は2人を除き、4 mmol/LのOBLA(Onset of Blood Lactate Accumulation, 乳酸性作業閾値)以下の数値であった。高負荷活動中断直後の各隊員の血中乳酸値は、いずれも活動前の値よりも大きく上昇し4~15 mmol/Lを示した
- 2) RR間隔データをMemCalc/winを用いた周波数解析により得られたパワースペクトル密度(Power Spectral Density, PSD)の周波数に対するスペクトル波形が、負荷量に依存して変化することを確認した。これから、スペクトル波形を監視することで、心肺機能への負荷状態を推測することが可能であることが分かった。しかし、現場での利用を想定した場合、PSD波形の形状変化を表す数値で心肺機能への状態を推測できることが望ましい。そこで対数パワーが対数周波数に反比例するといういわゆる $1/f$ ゆらぎの性質を利用して、 $PSD \propto 1/f^\beta$ と近似したときの $\beta$ 値の変化に注目した。なお、 $\beta$ の値は、サンプリング時間の2倍の逆数~0.4 HzのPSDに累乗近似した傾きとして算出した。低負荷活動中(心拍数は100 bpmから120 bpmへと上昇)の $\beta$ 値は1.0から1.5へと僅かな増加が確認できた。一方、

高負荷活動開始直後の心拍数は100 bpmから140 bpmへと急激な上昇が生じ、この心拍数の変化に引きずられるように $\beta$ 値も2.5程度まで上昇し、最高値に到達した。この値は、既に報告されている値よりも大きな値である。PSD波形に呼吸反射の影響が及ばない低負荷活動下では、負荷量の変化に追従して $\beta$ 値も変化することから、この $\beta$ 値を追跡することで、心肺への負荷状態を判定できることを示した。

- 3) しかし、 $\beta$ 値は高負荷活動中断間際まで単調に増加する訳ではなく、 $\beta$ 値の減少が確認できた。この $\beta$ 値の減少は、0.1 Hz以上の高周波領域でのPSD波形が周波数に対する依存性を見せず、ほぼ一定のパワーを維持する(平坦化)特徴的な形状に変化した。この平坦化の原因の一つが呼吸反射の影響を受けているためと考えられる
- 4) 呼吸反射の影響が現れる高負荷状況下では、トータルパワーに対する呼吸反射が現れる周波数領域のパワーの比が、負荷程度と相関があることを示した。
- 5) 活動中断後5分後のPSD波形には0.1 Hz以上の周波数領域での平坦化が少し解消されているが、高負荷開始直前のPSD形状とは異なることから心肺機能が十分に回復したとはいえない。活動中断後15分後のPSD波形においても0.1 Hz以上の周波数領域での平坦化現象が残っていることが確認できる。このようにPSD波形の形状を監視することで心肺機能への負荷状態を推測することができると考えられる。
- 6) これら一連の取得結果をもとに、体温(外耳温度)およびRR間隔データを周波数解析することで得られる $\beta$ 値を判定指標とした、疲労状態判定ロジックを提案した。なお、今回提案した手法は、負荷がかかった状態でも有酸素運動が行えている状態が対象となっているため、無酸素運動となるような高負荷活動下では、別の判定指標の導入が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

- 1) Kuriyama, Y., Oka, Y., Ito, Y., and Enari, M., "Proposals of standardized training procedure and indices indicating fire-fighters' fatigue", Proceedings of 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering (Interflam 2013), pp.681-686, 2013.6. 査読有
- 2) 岡 泰資: 消防隊員の疲労状態を検討するための消防訓練モデルの提案, 日本火

災学会誌「火災」, vol.63, No.3, pp.45-50,  
2013年6月. 査読無

- 3) 岡 泰資, 大場淳一, 池田盛雄, 藤馬千  
典, 栗山幸久: 消防活動時における消防  
隊員の疲労状態の把握を目的とした消  
防活動モデルの提案, 日本火災学会論文  
集, Vol.63, No.1, pp.9-16, 2013.4. 査読有

〔学会発表〕(計 2件)

1. 伊藤悠史, 岩見 周, 岡 泰資, 栗山幸  
久, 角津光憲, 二本木純一, 大場淳一,  
池田盛雄: 高負荷活動従事者の疲労状態  
推定手法について, 平成26年度日本火災  
学会研究発表会, 2014.6.
2. 伊藤悠史, 岡 泰資, 栗山幸久, 角津  
光憲, 二本木純一, 池田盛雄, 大場淳  
一: 高負荷活動従事者の疲労状態推定手  
法について, 第46回安全工学研究発表会,  
pp.83-86, 2013.11

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡 泰資・OKA YASUSHI

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号: 10240764

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし