

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282093

研究課題名(和文) 高負荷活動従事者の生体情報を活用した疲労度判定システムの構築

研究課題名(英文) Proposal of objective index to improve occupational safety based on heart rate fluctuation

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) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：高負荷活動従事者自身の主観的な判断に、疲労蓄積状態を示す科学的かつ客観的な情報に基づく判断を付加できれば、労務災害発生の未然防止に役立つと考えられる。

本研究では、高負荷活動従事者として消防隊員に注目した。活動中の隊員から非侵襲的に取得出来る心電位データを周波数解析することで得られる新規指標をもとに、換気性作業閾値を越えるか否かの判断から活動継続注意を、さらに嫌気性代謝が優位な過負荷活動状態を検出すれば活動継続中止を警告するなど、効率的できめ細やかな交代あるいは休憩を含めた長期的な消防活動の展開を可能にする手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Physical monitoring of fatigue is useful for getting a better occupational safety management though improving the efficiency of activities, preventing incidents and accidents during activities, and reducing human errors due to losing concentration.

We proposed an index for anaerobic status that can be acquired noninvasively based on a frequency analysis of electrocardiographic information. This index has good correlation with physiological index and other physical indices such as instantaneous heart rate and anaerobic metabolism threshold. We determined the alert threshold for "continuation of activity" and "stop of activity". It was confirmed that the continuation of activity in the region deviating from the aerobic activity threshold can be used to estimate the degree of load on cardiopulmonary function due to disordered respiration. Deviation from the aerobic activity region also can be used as a boundary to convey a warning to workers about activity continuation at the site.

研究分野：火災安全工学

キーワード：疲労 消防活動 RR間隔 周波数解析 換気性作業閾値

1. 研究開始当初の背景

建設・港湾現場の作業着、化学防護服を着用して薬物採取・除去活動を行う作業着、防火衣を着用して消火・救助活動する消防隊員などは、オフィスあるいは一般の工場の作業着に比べ、負荷強度の高い活動を強いられる。このため、作業員の安全確保の観点から、建設現場ではファン付き作業服の導入、心拍数計測に基づく作業員の体調を考慮した安全管理が試行されている。原子力施設においても、化学防護服の着用起因する暑熱負担をリアルタイムかつ遠隔でモニタリング可能な装置の開発と評価が実施されている。

作業員の労働安全を確保する観点から、作業環境の温度・湿度にも十分に配慮する必要がある。適切な水分補給および休息あるいは積極的な放熱がなされなければ、暑熱環境下での活動の継続は熱中症を招く要因となる。例えば、防火服あるいは防護服を着用しての活動の継続は、体温上昇による運動能力の低下、過失の増加、熱ばて・方向感覚喪失・失神・心筋梗塞を導くと指摘されている。このため活動する隊員の温度管理の重要性が指摘されている。消防隊員は、厳しい状況下での活動完遂の経験および強い使命感により、自己の体調を実際よりも楽観的にとらえる傾向があり、自身の主観的な判断だけでは、体力的にも精神的にも、より厳しい状況へと追い込んでしまうことが指摘されている。さらに緊急連絡に伴う消防隊員の出勤は、ウォーミングアップなしの激しい運動であり、短時間での災害状況の把握、活動方針決定に伴う交換神経の亢進は、活動初期の大きな負担要因となること、消防隊員の疲労蓄積による、身体的・精神的作業能力の質的・量的な低下、刺激に対する反応の遅延、思考力の低下、注意力が散漫になるなどの諸症状の発生は、個人の判断ミスによる重大な事態を招く可能性がある。

2. 研究の目的

高負荷活動従事者自身の主観的な判断に、疲労蓄積状態を表す科学的かつ客観的な情報に基づく判断が付加できれば、労務災害発生の未然防止に役立つと考えられる。活動従事者の身体状態を評価するための指標には、生体情報である心拍数、体温および呼吸数など、生理情報である血中乳酸値、酸素摂取量および動脈血中酸素飽和度などがある。

負荷がかかることで心拍数だけでなく呼吸数も徐々に上昇し、活動限界近くでは呼吸の乱れ、息が切れる状態となる。この呼吸の乱れも身体負荷の指標となる。そこで、リアルタイムでかつ非侵襲的に取得できる心電位データから得られる情報に着目した。心臓の拍動間隔の変化には心肺系の負荷および自律神経系の活動に関わる情報が含まれており、これらの情報を引き出すことで身体の状態を評価できるためである。また、無酸素運動域での活動の継続は短時間に限られる

ため無酸素性作業閾値 (Anaerobic Threshold 以下 AT と記す) に着目し、心電位データを周波数解析することで AT を越えるか否かの判断が行える指標を提案し、さらに AT 指標の一つである換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold 以下 VT と記す) および血中乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation, 以下 OBLA と記す) と提案指標の関係を検討した。本研究では、高負荷活動従事者として消防隊員に注目し、好気性代謝の活動から嫌氣的代謝が優位な活動状態へ移行したことを判断し活動継続注意を示すことで長期的な消防活動の展開を可能にする、さらに、嫌気性代謝が優位な過負荷活動状態の継続を判断し活動継続中止を警告することで、効率的できめ細やかな交代あるいは休憩の指示を可能とする、新規指標の提案とその閾値を評価した。

3. 研究の方法

負荷強度が時間的に変化する活動状況下において、乳酸値などの生理指標、心拍数や呼吸数などの生体指標および心拍変動の周波数解析から求められる客観的指標がどのような変化を示すのかを検討するために、以下の4種類の実験を実施した。

1. 修正 20m シャトルラン実験 (Test 1)
2. 間欠的多段階漸増負荷実験 (Test 2)
3. 間欠式一定負荷実験 (Test 3)
4. 消防模擬訓練 (Test 4)

なお各実験は、横浜国立大学の倫理委員会の承認を得た後、協力者に対して本研究の趣旨を十分に説明し、書面にて同意を得、安全管理者を専任し実施した。以下に各実験概要を示す。

3.1 修正 20 m シャトルラン実験 (Test 1)

Test 1 は、時間的に負荷強度が連続的に増加する実験であり、提案する客観的指標と呼吸代謝情報 (酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気量、呼吸数など) から求められる VT との関係を検討するために実施した。20 m シャトルランは、時間経過とともに連続的に負荷強度が上昇する往復持久走であるが、20 m シャトルランの開始前に 5 分間歩行 (3 分間の低速歩行 + 2 分間の高速歩行) することで、低負荷から高負荷までの一連の呼吸代謝情報を取得した。なお VT における酸素摂取量は V-slope 法に従い、取得した全データを用いて二直線近似し、その交点からを決定した。

協力者は横浜市消防局に勤務する男性職員 17 名 (21 ~ 53 歳) および Lancashire Fire and Rescue Service に勤務する 5 名 (37 ~ 50 歳) である。測定項目は、鼓膜近傍温度、心電位、血中乳酸値、呼吸代謝情報である。実験手順は以下の通りで、血中乳酸値以外は、測定器装着直後から実験終了まで連続測定することで、常時、生体情報をモニタリングした。

1. 所属の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメット (靴は通常の運動靴) およびすべての測

- 定器を装着
2. 座位状態で血中乳酸値を測定後、座位状態で5分間安静
 3. 5分間歩行(通常歩行で3分間+速足歩行で2分間)
 4. 歩行終了直後、音源に合わせてシャトルランを開始
 5. シャトルラン中断後直ちに防火ヘルメット、皮手袋および呼吸代謝測定用マスクを外し、血中乳酸値を測定
 6. クールダウンのため約5分間歩行
 7. クールダウン終了後、座位状態で20分間、5分ごとに血中乳酸値を計測しすべての測定を終了

活動限界に近い結果を取得するために、規定時間内に20mを走りきれない状態が連続2回続いた後も、シャトルランを継続し、協力者本人からの自己申告あるいは安全管理者が中断を決定した。

3.2 間欠的多段階漸増負荷実験 (Test 2)

Test 2は、段階的に負荷強度を増加させる自転車エルゴメータを用いた実験で、各負荷段階の間に休憩を設け、休憩時に測定した血中乳酸値と提案する客観的指標の関係を検討するために実施した。

協力者は20歳から63歳までの一般男性10名とした。服装は通常の運動服であり、測定項目は、心電位、呼吸代謝情報、血中乳酸値および動脈血中酸素飽和度である。心電位、呼吸代謝情報および血中酸素飽和度は、実験開始5分前から実験終了後まで連続的に、血中乳酸値は、最初の負荷前の安静時に1回、その後は各負荷の開始直後と終了直前の各1回の測定を実験終了まで繰り返した。

負荷6分、休憩2分を1サイクルとして、各協力者の運動能力に合わせて負荷を20Wずつ5~7段階漸増させた。協力者の運動能力に応じた負荷を課すために2種類の自転車エルゴメータ(エアロバイク Ai-e およびエアロバイク 75XLIII (ともに株式会社コナミスポーツライフ社))を使用した。負荷活動中の協力者の生体情報をリアルタイムでモニタリングすることで、安全管理者が実験継続不可と判断した場合、あるいは協力者の自己申告があった場合には、測定途中であっても実験を中断し、直ちに血中乳酸値を測定するとともに呼吸代謝計測用のマスクを取り外した。

3.3 間欠式一定負荷実験 (Test 3)

Test 3は、Test 1またはTest 2のように協力者が限界を感じるまで時間的に徐々に負荷強度を増加させる実験ではなく、6分間の一定負荷と2分間の休憩を一つのサイクルとして協力者が限界を感じるまで繰り返すインターバル負荷実験であり、提案する客観的指標と瞬時心拍数および血中乳酸値の時間的変動との関係を検討するために実施した。

協力者は20歳から63歳までの一般男性9

名とした。服装は通常の運動服であり、負荷器具は自転車エルゴメータ(エアロバイク 75XL3 (株式会社コナミスポーツ&ライフ))を使用した。測定項目は、心電位、呼吸代謝情報、血中乳酸値および動脈血中酸素飽和度である。Test 2と同様に、心電位、呼吸代謝情報および血中酸素飽和度は、実験開始5分前から実験終了後まで連続的に、血中乳酸値は、最初の負荷を課す前の安静時に1回、その後は各負荷の開始直後と終了直前の各1回の測定を実験終了まで繰り返した。負荷活動中の協力者の生体情報をリアルタイムでモニタリングすることで安全管理者が実験継続不可と判断した場合、あるいは協力者の自己申告があった場合に実験を中断した。

3.4 消防模擬訓練 (Test 4)

Test 4は、8階建ての中層建物で実施した立体的(3次元的)な動きを伴う消防訓練における隊員の連続25分の消火・救助活動状況を撮影したビデオ映像をもとに、気温30湿度70%に設定した人工気候室内での26分の平面的(2次元的)な連続活動に置き換えた消防活動モデルに沿った活動であり、Test 1~3までに取得した結果をもとに、構築した活動継続注意判定手法の妥当性の検証および活動中止警告の閾値を決定するために実施した。

上述の4種類の負荷実験においては、同一の測定機器を使用した。心電位は心拍センサ(DL-310, (有)エスアンドエムイー)を用いて測定し、データ取得間隔は2msecとした。酸素摂取量、二酸化炭素排出量等の呼吸代謝データは、呼吸代謝測定装置(VO 2000, (有)エスアンドエムイー)を用いて3呼吸毎の連続測定を行った。血中乳酸値は指先から少量の血液を採取して簡易血中乳酸測定器(Lactate Pro, アークレイ株式会社)を用いて測定した。動脈血酸素飽和度はパルスオキシメータ(WEC-7201: 日本光電工業株式会社、および、PULSOX-300i: コニカミノルタ)を用いて1sec毎に連続測定した。鼓膜近傍温度は深部体温センサ(DL-242, (有)エスアンドエムイー)を用いて、1sec毎に測定した。心拍センサ、深部体温センサおよび呼吸代謝測定装置からの出力は、データロガー(DL-2000, (有)エスアンドエムイー)を介して、PCに保存した。

4. 研究成果

負荷強度および時間的負荷のかかり方、活動強度をさまざまに変化させた4種類の負荷実験を通して得られた結果を基に以下の事項が明らかとなった。

1. 負荷がかかることで、心拍数が増えることは良く知られているが、呼吸数も徐々に上がる。安静時や低負荷活動時の呼吸反射は、心拍変動の周波数解析で求められるパワースペクトル密度(PSD)のHF周波数帯域

(High Frequency, 0.15 ~ 0.40 Hz)に現れると報告されている。しかし長時間の活動が困難なほどの過負荷活動が続くと、呼吸が乱れ、息が切れる状態となるが、この呼吸反射の影響が、PSDのVHF周波数帯域(Very High Frequency, 0.40 ~ 1.0 Hz)に現れることが分かった。そこで、式(1)に示したように、VHF周波数帯域のパワーの0.04 ~ 1.0 Hzの周波数帯域のトータルパワーに対する比を呼吸の乱れによる心肺機能への負荷程度を示す客観的指標(呼吸反射指標: Reflection Index of Respiratory, RiR)として定義した。

$$RiR = P_{VHF} / TP \quad (1)$$

$$TP = \int_{0.04}^{0.15} P_{LF} df + \int_{0.15}^{0.4} P_{HF} df + \int_{0.4}^{1.0} P_{VHF} df$$

出勤直後の緊張により心拍数が上昇した状態であっても、提案する RiR は、心肺機能に負荷がかかっていなければ、非常に小さな値を示すことから、的確に心肺機能への負荷状態を表す指標であることを確認した。この指標の変化から、安定した呼吸状態なのか、息が上がった状態なのかを推定できることから、提案指標は活動現場で非侵襲的に測定でき、高負荷作業や消防隊員などへの適用が期待できる。なお心拍(RR間隔)変動の周波数解析には、低周波領域まで精度良く解析できる最大エントロピー法に基づくMemCalc/Win(株式会社ジー・エム・エス)を用いた。本研究で対象とする消防活動は、時々刻々変化することから、活動内容の変化と解析データの精度を加味して3分間のデータを1つのセグメントとして解析を行った。

2. 無酸素性作業閾値(Anaerobic Threshold)を越えると、その後の活動継続可能時間が大幅に短くなるため、ATの検出は作業者の安全確保に重要である。血中乳酸蓄積開始点(Onset of Blood Lactate Accumulation)や換気性作業閾値(Ventilatory Threshold)は無酸素性作業閾値と良い対応があり、広く用いられてきたが、これらと同様に、新規提案指標 RiR の変化から、無酸素性作業閾値を評価できることが分かった。
3. 時間経過とともに負荷強度が漸増する修正20mシャトルラン実験から取得した呼吸代謝情報をもとに各協力者のVTを算出し、このVT呈示時間前後の RiR の時間変化に注目した。その結果、日本の消防隊員、英国の消防隊員の区別なく、いずれもVTが現れた時間から60秒以内に RiR の値が0.1未満から0.4以上へと急激な上昇が確認できた。 RiR の最大値は1である。この急激な RiR の変化はVTを越えた状態に対応することから、 RiR の時間的追跡により、呼吸代謝測定を実施しなくともVTを超える負荷がかかった状態での活動となっているか否かを判断できることが分

かった。

4. 多段階間欠負荷実験から、段階的な負荷強度の上昇にともない、各段階での瞬時心拍数の最高到達値および休息時の瞬時心拍数の回復値も徐々に上昇した。VTを越える負荷がかかると RiR は0.6以上へと上昇し、その後も負荷強度が大きくなるにつれて、 RiR 値も0.8に達するようになった。さらに負荷強度の増加とともに、酸素摂取量も段階的に上昇した。血中乳酸値もVTを越える負荷がかかると、血中乳酸蓄積開始点を越え、急激な上昇が認められた。いずれの段階においても血中酸素濃度は負荷活動を継続することで徐々に低下したが休憩時に回復する傾向が認められた。しかし、負荷強度が大きくなるにつれて活動中の血中酸素濃度の低下と休憩時の回復量の低下が認められた。また、周波数解析により得られるPSD波形も、負荷強度が大きくなることで高周波側(0.1 ~ 1.0 Hz)の平坦化が顕著になること、およびPSD波形に現れる呼吸反射ピークも、負荷上昇とともに高周波側に移動することが確認された。
5. VTに達することのない負荷強度では、主に有酸素性機構によりエネルギーが供給され、長時間の活動が可能であることから、活動継続にともなう疲労蓄積も低い。ところがVTを越える負荷強度では、嫌気性呼吸代謝を伴う活動となることから、活動従事者の心拍機能へ負荷がかかり始めるだけでなく血中乳酸値の蓄積も始まる。そこで、活動継続に対する注意喚起を各従事者に伝達する閾値を決定するために、修正20mシャトルランおよび多段階漸増負荷実験という活動負荷のかかり方が異なる測定結果を活用した。具体的にはVT呈示時間直前の安静時心拍数からの上昇値(ΔHR)が100[bpm]未満、 RiR の上昇値が0.3[-]未満であったことを確認した。これらの閾値は、長時間の活動が可能である有酸素活動領域からの逸脱条件として活用可能であることから、現場で活動している隊員へ、現在の活動状態が好気性代謝の活動状態から嫌気性代謝を伴う活動へと移行したことを活動継続注意として伝達することで、隊員自身が自らの生理状態を把握できる。なお、安静時心拍数と活動中の心拍数の差を採用したのは個人差を排除するためである。
6. 時間的に負荷が漸増する測定結果をもとに決定した有酸素活動領域からの逸脱条件が、一定の負荷活動と休憩を繰り返すインターバル負荷実験および中層建物火災での消防活動を模擬した時間変動負荷実験への活動継続注意指標の適用可能性を検討した。なお、消防模擬活動は全行程が13工程であることから各工程の負荷程度に従って5つに分類し、 RiR と ΔHR の時間変化に注目した。インターバル負荷実験、消防模擬実験ともに負荷がかかることで、

まず ΔHR が上昇し、遅れて RiR の数値も大きくなり、負荷の低下とともに ΔHR および RiR ともに低下する。このため、活動中の隊員の ΔHR と RiR の軌跡は、時間経過とともに $\Delta HR - RiR$ 平面では反時計回りの軌跡を描いた。インターバル実験では、VT を越える負荷強度を設定したことから、活動中には有酸素活動領域から逸脱するが、休憩時には有酸素活動領域へもどる軌跡を描いたことから、 RiR および ΔHR ともに、負荷強度の時間的変化に敏感に追従することを確認した。さらに、負荷強度が時間的に変動する消防模擬活動においても、余裕を持って活動を完遂した軌跡と、余裕無くようやく完遂した軌跡に、明らかな形状の違いが認められたことから判定制度の良さを確認した。これより、時間的に負荷が漸増する測定結果をもとに決定した有酸素活動領域からの逸脱条件が、時間的に負荷強度が変化する活動に対しても適用できることを確認した。

7. 消防模擬活動を実施した 19 名の測定結果を、 $\Delta HR - RiR$ 積分値平面にプロットし、消防模擬活動を余裕で完遂した隊員 16 名の軌跡と、余裕無くようやく完遂した隊員 3 名の軌跡の比較から、余裕無く完遂した隊員の軌跡は、 $\Delta HR > 100$ [bpm] 以上、 RiR 積分値 > 75 [s] 以上の領域へ到達したことが確認できた。そこでこの領域への到達の有無により、活動継続中止の判定基準と設定した。この軌跡の違いが生じた要因が、過大負荷状態で隊員の活動継続のためと考えれば、このような状態での活動継続は、身体的・精神的作業能力の低下、刺激に対する反応の遅延、思考力の低下などの諸症状の発生を招く可能性がある。そこで、早期の休憩あるいは交代するための、活動継続中止の閾値に採用した。
8. 活動継続中止の指示を受けた後、現場で活動中の隊員は安全な場所へ移動する必要がある。この移動時間が確保できなければ、活動継続中止の閾値としては意味が無い。そこでこの時間がどの程度なのかを検討するために、自転車エルゴメータのペダル負荷を $3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 、回転数 50 rpm の条件で、リアルタイムの生体情報を基に安全管理者が実験継続不能と判断、あるいは実施者の自己申告まで、ペダルをこぎ続けた実験結果を基に、活動継続中止の閾値を越えてから実験終了までの時間を読み取った。その結果、活動継続中止の閾値を越えてから 14 名中 13 名が 4 分以上、継続した活動が可能であった。これより、消防活動現場から安全な場所へ帰還できる余力を残した状態で、活動中止の指示を隊員に伝達できる閾値であることを確認した。

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 4 件)

- 1) Ito, Y., Oka, Y., and Kuriyama, Y., "Evaluation of Fire-fighter's Cardiorespiratory State Based on Frequency Analysis of Heart Rate", Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Science (TICEAS), 146-157, 21-23 February, Singapore, 2017. 査読有
- 2) Kuriyama, Y., Oka, Y., Ito, Y., and Enari, M., "Evaluation of Fire Fighters' Acute Fatigue based on On-line Physical Measurement", Proceedings of the 6th international Symposium on Human Behaviour in Fire 2015, Downing College, Cambridge, UK, 28th - 30th September, pp.635-640, 2015. 査読有
- 3) 岡 泰資, 伊藤悠史, 栗山幸久: 心拍変動の周波数解析に基づく消防隊員の疲労状態推定手法に関する基礎研究, 日本火災学会論文集, Vol.65, No.2, pp.11-17, 2015.08. 査読有
- 4) 岡 泰資: 消防隊員の疲労安全性向上のために一暑熱環境下での高負荷活動実験結果をもとに、よこはま都市消防、公益社団法人横浜市防火防災協会, No.28, pp.2-7, 2015 年 10 月. 査読無

〔学会発表〕(計 3 件)

- 1) 沢口義人, 岡 泰資, 栗山幸久: 消防活動における疲労度推定のための生体信号測定装置の開発, 2017年電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集2, p.429, 2017.03
- 2) 小川真司, 岡 泰資, 栗山幸久, 沢口義人, 伊藤悠史: 高負荷活動従事者への心肺負荷推定手法と評価について, 第49回安全工学研究発表会, pp.7-10, 2016.12.1
- 3) 伊藤悠史, 岡 泰資, 岩見 周, 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, pp.86-87, 2014.6.

〔図書〕(計 1 件)

- 1) 岡 泰資: 消防隊員の疲労安全性向上のために一暑熱環境下での高負荷活動実験結果をもとに、よこはま都市消防、公益社団法人横浜市防火防災協会, No.28, pp.2-7, 2015 年 10 月

〔産業財産権〕

出願状況 (計 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 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

栗山幸久・KURIYAMA Yukihisa
東京大学・人工物工学研究センター・教授
研究者番号：10373648

沢口義人・SAWAGUCHI Yoshihito
木更津工業高等専門学校・電子制御工学科・
准教授
研究者番号：50455119

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()