

4. 安全工学論文賞

伊藤 悠史 殿、岡 泰資殿、栗山 幸久殿

2018 年度 安全工学論文賞 選考理由

対象論文「心拍変動解析による心肺負荷状態評価指標の提案」

(安全工学、Vol.57, No.1, pp.56-64)

受賞者 伊藤 悠史 (いとう ゆうし) 氏

岡 泰資 (おか やすし) 氏

栗山 幸久 (くりやま ゆきひさ) 氏

選考理由：

消防活動は、身体的負荷が非常に高い活動であるため、活動中の労働安全の確保は非常に重要である。ところが、消防隊員の安全確保は、主として消防隊員の主観的感觉に頼ってきており、自らの経験や使命感から自分自身の状態を楽観的に捉えてしまうと、非常に厳しい状態に陥ることになり、最悪の場合には人命に関わる事態になることが問題となっている。その解決のため、客観的に心肺への負荷状態を評価することによって、休憩や交代、および活動の継続について判断する方策が求められている。

本論文では、消防活動の現場での適用が可能であり、かつ、リアルタイムで非侵襲的に計測ができる心電図に着目して、この情報から心肺への負荷状態を評価する指標を得ようとして、負荷の方法、レベル、タイミングを工夫した一連の実験を行った。その結果、心拍変動の周波数解析を行うことによって得られる呼吸反射指標 (RiR) が、従来からの心肺負荷状態の指標である血中乳酸の蓄積が開始する時点あるいは嫌気性代謝が卓越する時点の付近で、急上昇することを明らかにした。

以上の成果は、特殊な計測機器を使用せずに極度な疲労状態にあるかどうかを客観的に推測することを可能とする。すなわち、防火服や防護服を着用して消防活動を行わなくてはならない消防隊員、あるいは、過酷な環境において高負荷作業を行う労働者に対して、労働安全の確保と災害防止への貢献が期待されることから、安全工学論文賞の受賞にふさわしいと考える。

以上

指標を検討すること、他の AT 指標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) との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 客観的指標

心電図の R 波は、心室から大動脈へ血液を吐出する際に観測される心電位であり、R 波の間隔は心臓の拍動間隔であり、その逆数は瞬時心拍数である。この R 波の間隔、即ち、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係わる情報が含まれており、これらの情報を周波数解析により引き出すことで、身体の状態を評価できると報告されている⁹⁾。

一般的な安静時の心拍変動のパワースペクトル密度 (Power Spectrum Density, 以下 PSD と記す) を **Fig.1** に示す。

PSD は自律神経系の活動に対応した周波数帯域があることが知られており、主に副交感神経の緊張に対応する高周波帯域 (High Frequency, HF: 0.15 ~ 0.40 Hz)、副交感神経および交感神経の緊張に対応する低周波帯域 (Low Frequency, LF: 0.04 ~ 0.15 Hz) があり、それぞれ HF は呼吸を信号源とする周波数成分および、LF は血圧変化を信号源とする周波数成分であるとされている¹⁰⁾。また、LF/HF は交感神経の亢進度に対応し、ストレス指標として用いられる^{11), 12)}。

一般に負荷がかかることで、心拍数が上がることは良く知られているが、呼吸数も徐々に上がり限界近くでは呼吸が乱れ、息が切れる状態となることから身体負荷の指標となる。安静時や低負荷活動時の呼吸反射は HF 周波数帯域に現れると報告されている¹²⁾。しかし、長時間の活動が困難なほどの高負荷活動時では、HF 周波数帯域よりも高い周波数帯域に呼吸反射ピークが現れること、および、高負荷活動が継続する

と **Fig.1 (b)** に示すように、PSD が周波数に依存しない平坦化した波形を示すことが報告されている¹³⁾。そこで HF 周波数帯域よりも高い周波数帯域 (0.4 ~ 1.0 Hz) を VHF と定義し、式 (1) に示したように、VHF 周波数帯域のパワー (P_{VHF}) の 0.04 ~ 1.0 Hz の周波数帯域のトータルパワー (TP) 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 (Reflection Index of Respiratory, RiR) と定義し、瞬時心拍数、血中乳酸値などの生体・生理情報とこの指標の関係に注目した。なお、瞬時心拍数は、身体負荷をよく反映し簡易的に測定可能であるため身体負荷強度を管理するための指標として広く用いられており、また血中乳酸値は、血中乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation, 以下, OBLA) が好気性代謝から嫌気性代謝の卓越を反映するため、広く用いられていることから、これらの指標を取り上げた。

$$RiR = \frac{P_{VHF}}{P_{LF} + P_{HF} + P_{VHF}}$$

$$P_{LF} = \int_{0.04}^{0.15} PSD df, P_{HF} = \int_{0.15}^{0.4} PSD df, P_{VHF} = \int_{0.4}^{1.0} PSD df \quad (1)$$

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) ジー・エム・エス) を用いた¹⁴⁾。解析条件を決定するために 0.04 ~ 1.0 Hz の周波数帯域の PSD データを用いて算出した RiR とセグメント長さ (時間) の関係を検討した。 **Fig.2 (a)** に、座位時の 1, 2, 3, 5, 10, 20 分とセグメント長を変化させた心拍変動の周波数解析結果を示したように、セグメント長さ 3 分間まではセグメントが長くなるほど RiR の変動幅は小さくなり、ある値に収束した。また **Fig.2 (b)** に、ペダル負荷を変化させることで心拍数を一定に保つことができる機能が備わった自

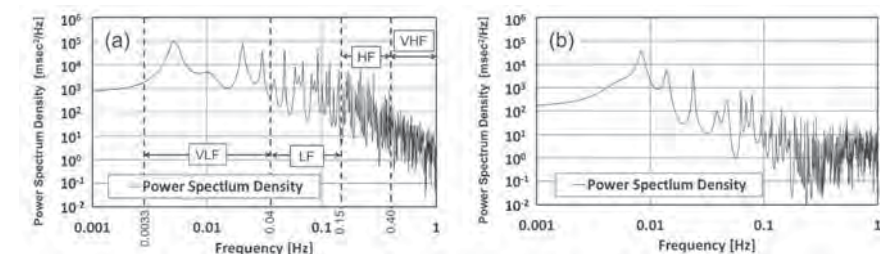


Fig.1 Power spectrum density waveform obtained by frequency analysis of heart rate variability
(a) Typical example of PSD under low intensity load and frequency bands of interest
(b) Typical example of PSD under extremely high intensity load

心拍変動解析による心肺負荷状態評価指標の提案

伊藤 悠史[†]・岡 泰資^{††}・栗山 幸久^{†††}

消防活動は、嫌気性代謝が卓越するほどの負荷のかかった状態で活動を継続する高負荷活動の一つである。このため活動時の隊員の労働安全の確保は非常に重要である。血中乳酸値は侵襲的に、呼吸情報は非侵襲的に計測できる身体状態を評価するための指標であるが現場適用が難しい。本研究では、リアルタイムで非侵襲的に計測できる心電情報に注目し、時間的に負荷のかかり方が異なる3種類の嫌気性代謝が卓越した負荷試験を行った。心拍変動の周波数解析と実測結果を基に、心肺機能への負荷状態を客観的に推測できる呼吸反射指標 (RiR) を提案した。 RiR の時間的な急上昇は、従来の血中乳酸蓄積開始点あるいは呼吸情報から判断される嫌気性代謝が卓越しだす時間と良く一致することが判った。提案指標によりさらなる現場活動の安全化・効率化が期待される。

キーワード：高負荷活動、無酸素性作業閾値、心拍変動解析

1. はじめに

昨今のウェアラブル機器の急速な発展に伴い、建築現場¹⁾あるいは原子力施設²⁾で働く各作業者の安全管理として、リアルタイムでの心拍数計測が実施されている。オフィスあるいは工場の作業者に比べ、消火・救助活動する消防隊員の活動は、身体的負荷が非常に高い活動であること³⁾、および消防隊員は厳しい状況下でも活動を完遂した経験あるいは強い使命感により、自己の体調を実際よりも楽観的に捉える傾向があり、主観的判断だけでは厳しい状況へと自身を追い込んでしまうこと⁴⁾が指摘されている。さらに、暑熱環境下での防火服あるいは防護服を着装しての活動継続は、体温上昇による運動能力の低下⁵⁾、過失の増加⁶⁾、熱ばて・方向感覚喪失・失神・心筋梗塞を導く^{7), 8)}と指摘されている。また、活動継続に伴う負荷増加に伴い心拍数および呼吸数が上昇するだけでなく、限界近くでは呼吸が乱れ、息が切れる状態となる。さらに、酸素供給不足が生じると嫌気性代謝の亢進により、血中乳酸値が安静時レベルを超えての上昇に伴い二酸化炭素排出量ならびに換気量が増加する。

消防活動中の隊員に係わる公務災害の発生頻度およ

び被害程度の低減を図るには、各隊員の疲労状態を的確に把握することが望まれる。通常は、日頃の訓練および活動経験に基づく疲労感覚の変化を主観的に判断しているが、科学的な数値に基づいた指標により、活動中の隊員の身体状態の変化を客観的に捉えられることができれば、経験不足あるいは加齢による体力の低下等で生じる実際の身体状態と自らが感じる疲労感覚との乖離を埋めることが可能になると考えられる。また、好気性代謝から嫌気性代謝が優位な活動へ移行すれば、血中乳酸値、呼吸数および心拍数の増加を伴うだけでなく、嫌気性代謝が優位な活動の継続は心肺機能への負荷を増大させる。そこで、好気性代謝から嫌気性代謝が優位な活動状態へ移行したことを示す嫌気性代謝閾値 (Anaerobic Threshold, 以下 AT と記す) に注目した。この閾値を越えたかどうかを判定できれば、心肺機能への負荷程度を推測できる。これにより、隊員の身体状態に合わせた効率的できめ細かな休憩あるいは交代の指示、および活動継続可否の判断が可能となることから、現場活動の安全化・効率化に役立つと考えられる。

身体状態を評価するための指標として、生体情報である心拍数、体温、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が、本研究では、現場での適用を考え、非侵襲的・簡易的に測定が行え、かつ体温変化よりも応答の速い心電位および呼吸代謝情報に注目した。時間的に負荷のかかり方が異なる3種類の実験結果をもとに、取得した心拍変動の周波数解析から AT を越えたか否かを判断できる

2017年5月15日 原稿受付, 2017年10月27日 受理
[†] 能美防災 (株): 〒163-0455 東京都新宿区西新宿2-1-1 新宿三井ビルディング 55F
^{††} 横浜国立大学 大学院環境情報研究院: 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7
^{†††} 東京大学 人工工学研究センター: 〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

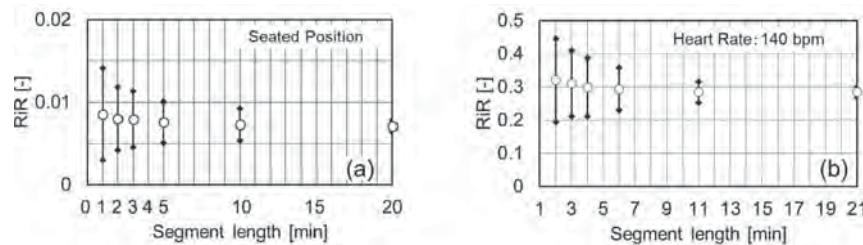


Fig.2 Variation of β with segment length. (a) seated position; (b) keeping heart rate at 140 bpm

転車エルゴメータを用いて、心拍数を 140 bpm に保持した活動時のセグメント長さと RIR の関係を示したように、負荷時の RIR もセグメント長さ 3 分間まではセグメントが長くなるほど RIR の変動幅は小さくなり、ある値に収束した。本研究で対象とする消防活動は、時々刻々変化するところから、活動内容の変化と前述した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採用した。

3. 実験方法

負荷のかかり方が時間的に変化する状況において、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提案す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 3 種類の実験を実施した。

1. 修正 20 m シャトルラン実験 (Test 1)
2. 間欠式多段階漸増負荷実験 (Test 2)
3. 間欠式一定負荷実験 (Test 3)

Test 1 は、時間的に負荷が連続して増加する実験であり、提案する客観的指標と換気性作業閾値との関係を検討するために実施した。Test 2 は、段階的に負荷を増加させる実験で、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。Test 3 は、実際の消防活動に近い高負荷と無負荷を繰り返す状況を再現した負荷実験で、提案する客観的指標の有用性を検討するために実施した。

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及び被験者本人からの申し出または安全管理者の判断により実験を中止することを十分に説明し、書面に同意を得、安全管理者を専任し実施した。

修正 20 m シャトルラン実験 (Test 1)

換気性作業閾値を精度良く求めるために、20 m シャトルランを開始する前に一定時間 (5 分間) 歩行をす

ることで、低負荷から高負荷にわたる一連の呼吸代謝情報を取得した。なお 20 m シャトルランは、20 m の区間を往復して走り、折り返しの時間間隔が約一分ごとに短くなる往復持久走である。漸増的に負荷が上昇することから最大運動まで追い込みやすいとされている¹⁵⁾。

協力者は横浜市消防局に勤務する男性職員 17 名 (21 ~ 53 歳, JP firefighter) および Lancashire Fire and Rescue Service 5 名 (37 ~ 50 歳, UK firefighter) で、服装は各所属の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメットに通常の運動靴とし、11 月 16 日 ~ 12 月 1 日の AM9:00 ~ PM3:00 に横浜市消防訓練センターおよび 10 月 12 日 ~ 16 日に Lancashire Fire & Rescue Service, International Training Centre に行った。骨格、筋力および心肺能力が異なることが予想されたため英国人と日本人とを比較した。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。準備として所属の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメットおよびすべての測定器を装着した後以下の手順で実施した。

1. 座位状態で血中乳酸値を測定後、座位状態を 5 分間継続
 2. 5 分間歩行 (通常歩行で 3 分間 + 速足歩行で 2 分間)
 3. 歩行終了直後、音源に合わせてシャトルランを開始
 4. 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
 5. クールダウンのため約 5 分間歩行
 6. 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 20 m 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。

間欠的多段階負荷漸増実験 (Test 2)

間欠多段階負荷試験は Fig.3 に示したように課せられる負荷を間欠的に漸増させた試験で、自転車エルゴメータを用いて実施した。

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、室温を 26℃ に設定した。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。

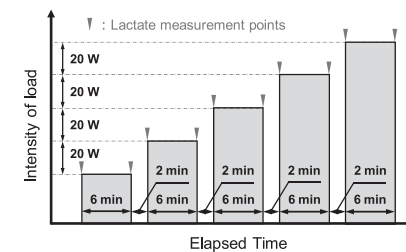


Fig.3 Variation of load intensity with time in multi-step incremental load test

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た負荷を 20 W 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、(株) コナミスポーツ & ライフ社製エアロバイク 75XL III (負荷範囲 0 ~ 400 W) および (株) コナミスポーツ & ライフ社製エアロバイク ai-ex (負荷範囲 15 ~ 200 W) を使用した。各被験者にかけた負荷範囲を Fig.4 に示す。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後の各 1 回の測定を実験終了まで繰り返

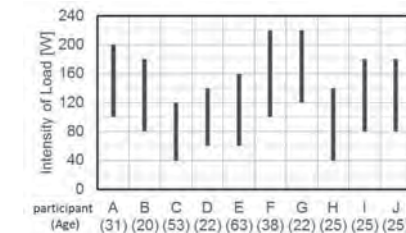


Fig.4 Imposed load intensity of each participant in multi-step incremental load test

した (Fig.3 中の▽が血中乳酸値の測定時間に対応する)。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計測用のマスクを取り外した。

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を増加させる負荷実験ではなく、6 分間の一定強度負荷と 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る。

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、室温を 26℃ に設定し、負荷器具は自転車エルゴメータ (エアロバイク 75XL III, (株) 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後の各 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。

上述の 3 つ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 2 msec 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)) 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)、および、PULSOX-300i: コニカミノルタ) を用いて 1 秒毎に連続測定した。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、1 秒毎に測定した。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. 結果と考察

修正 20 m シャトルラン実験 (Test 1)

Fig.5 に代表例としてある被験者の二酸化炭素排出量 (VCO_2) と酸素摂取量 (VO_2) の関係を示す。運動強度が低い領域では有酸素運動 (好気性代謝のみ) となり、課せられる負荷の上昇に対して酸素摂取量、二酸化炭素排出量および換気量とともに線形に増加する。しかし、ある負荷強度を超えると嫌気性代謝が卓越することで血中乳酸が増加する。血液の pH を制御するため、血液中の HCO_3^- による緩衝作用が働くことにより CO_2 が呼気中に増加する。このため、酸素摂取量の増加に比べて二酸化炭素排出量および換気量の増加が顕著となる。このポイントが換気性作業閾値 (VT) であり、V-Slope 法¹⁶⁾に従い取得した全データを用いて二直線近似し、二直線の交点から VT における酸素摂取量を決定した。

RR 間隔、呼吸代謝情報ともに取得できた協力者 12 名の VT における酸素摂取量を Fig.6 (a) に示す。年

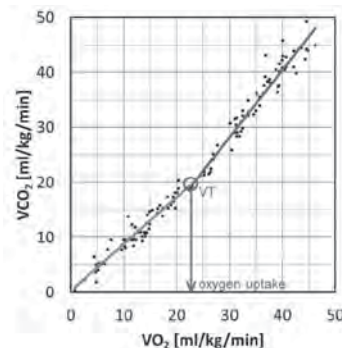


Fig.5 Definition of oxygen uptake at VT based on respiratory metabolism data in modified 20 m shuttle run test

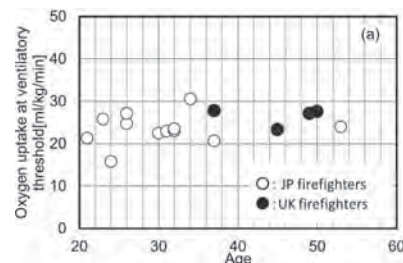


Fig.6 Ventilatory threshold of each participant obtained with data in modified 20 m shuttle run test (a) Age (JP and UK firefighters) (b) Elapsed time from shuttle run start (JP firefighters)

齢、国籍によらず各協力者の VT における酸素摂取量は 20 ~ 30 ml/kg/min (平均値: 24.3 ml/kg/min) となった。ある大学の運動部に所属する男子大学生の VT 時の VO_2 の平均値は 22.8 ml/kg/min という報告がある¹⁷⁾。本研究での測定結果もこの値にほぼ一致することから十分な測定精度であったと考えられる。

また、修正 20 m シャトルランにおいて、シャトルラン開始時点から VT に達するまでの時間を Fig.6 (b) に示す。これによると VT に達する時間は、ほとんどの協力者でシャトルラン開始から 135 秒 ~ 140 秒程度であった。またシャトルラン全体の時間は 7 分 34 秒から 13 分 21 秒までの範囲であった。

Fig.7 にシャトルラン開始からの RiR の経時変化を示す。シャトルラン開始直後は殆どの被験者の RiR の値は 0.2 以下であったが、負荷増大とともに徐々に数値が上昇した。その後あるレベルを越えるとすべての被験者の RiR はステップ状に急上昇し、その後も活動中断まで徐々に上昇した。

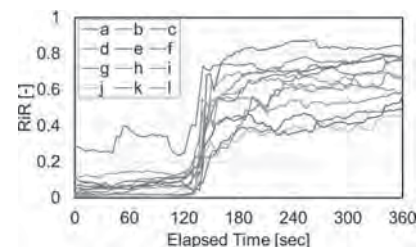


Fig.7 Change of RiR from 20m shuttle run start (JP firefighters)

そこで、各協力者が VT に到達した時間を基準に RiR の変化をプロットし直した結果が Fig.8 である。この図において時間軸の 0 は VT に到達した時間を意味する。その結果、いずれの協力者も VT に達した時

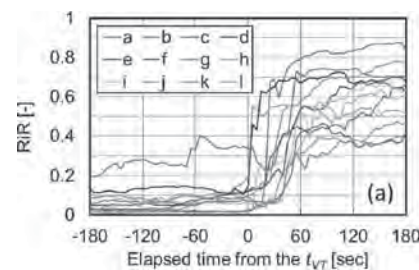
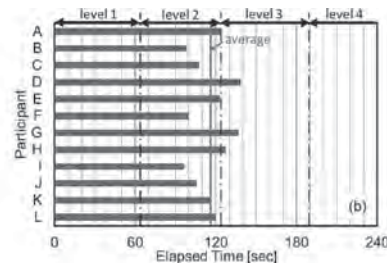


Fig.8 Change of RiR with elapsed time on the basis of tVT (a) JP firefighters, (b) UK firefighters

間から 1 分以内に RiR の急激な上昇が起きていたことが分かった。

さらに Fig.8 (b) に示すように、英国 Lancashire Fire and Rescue Service 所属の消防隊員に同様の実験を実施したが、4 名とも Fig.8 (a) と同様に RiR の値は VT に達した時間から 1 分以内に急激な上昇がみられた。

これより、各協力者の心肺機能の能力あるいは横浜市消防局所属という特定の条件に依存することなく、呼吸情報の取得なしに RiR 値の時間的変化を追跡することで、好気性代謝が優位な活動状態なのか嫌気性代謝が優位な活動状態なのかを判断できることが示唆される。

間欠的多段階負荷漸増実験 (Test 2)

Test 1 では血中乳酸値は実験の前後しか測定できない。そこで、負荷に伴う血中乳酸値の変化と RiR の関係を詳しく検討するために、各負荷活動の前後で血中乳酸値を計測するために間欠的多段階負荷漸増実験 (Test 2) を実施した。

Fig.9 に負荷強度と平均心拍数の最大値の関係を示す。平均心拍数の最大値は各 6 分間の負荷活動中の最大値であり、平均心拍数は RiR の算出条件と同じ 3 分間の平均とした。また Load = 0 W にプロットした

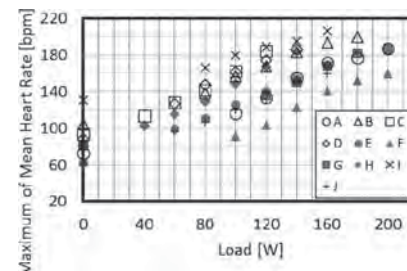
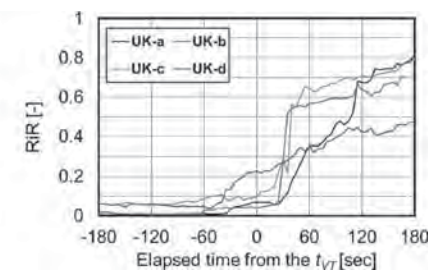


Fig.9 Relationship between imposed load and maximum of mean heart rate



値は、実験開始前の 5 分間の座位時の心拍数を意味する。いずれの協力者も各負荷での平均心拍数の最大値は、負荷強度の増加とともに概ね直線的に上昇した。しかし負荷強度が同じであっても平均心拍数の最大値には個人差が大きく、例えば負荷強度 100 W では 92 bpm ~ 180 bpm の範囲の値となった。本実験は協力者自身の自己判断により実験を終了する場合もあったが、いずれの協力者も最終負荷段階での平均心拍数の最大値が 160 ~ 207 bpm に到達していたことから、各協力者の限界近くまで追い込んだ実験となっていたことが分かる。

Fig.10 に負荷強度と血中乳酸値の関係を示す。Fig.10 内に破線で示したのは OBLA で、経験的に 4 mmol/L とされ、それ以上の負荷強度を無酸素運動、それ以下を有酸素運動として評価されることがある^{18), 19)}。

Test 1 と同様に Load = 0 W にプロットした血中乳酸値は、実験開始前の座位時の測定結果である。各協力者の血中乳酸値は負荷強度の上昇とともに、初期値である 1.2 ~ 3.0 mmol/L から最終負荷終了直後の 6.8 ~ 19.3 mmol/L まで上昇した。このことから全ての協力者が無酸素性作業閾値以上の負荷強度まで実験を

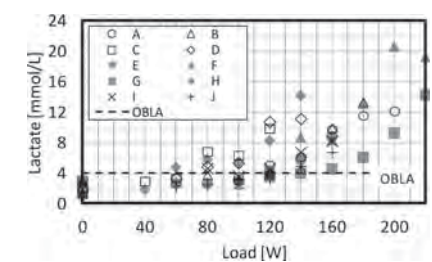


Fig.10 Relationship between imposed load and lactate

継続したことが推察できる。また OBLA に到達する負荷には個人差があり、血中乳酸値が 4 mmol/L 以上となった負荷強度は 60 W ～ 160 W と協力者で大きく異なった。

また酸素摂取量に対する血中乳酸値の関係を Fig.11 に示す。

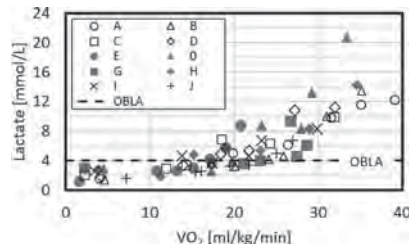


Fig.11 Relationship between lactate and oxygen uptake

OBLA を超えるときの酸素摂取量は 15 ～ 25 ml/kg/min (平均値: 20.7 ml/kg/min) であった。血中乳酸値を VO_2 に対してプロットすることにより、個人差の影響が小さくなり、ばらつきが小さくなった。

次に提案指標 RiR と血中乳酸値の関係を検討するために、各負荷を課した時間帯での RiR の最大値とその負荷活動終了時の血中乳酸値をプロットした結果を Fig.12 に示す。

上述したように、血中乳酸値が OBLA を越える負荷強度は個人差が大きかったが、Fig.12 に示したように、酸素摂取量と同様に血中乳酸値を RiR に対してプロットすることにより個人差の影響が小さくなり、協力者によらず RiR が 0.6 を越える負荷強度になると血中乳酸値も OBLA (図中の破線) を越えることが分かる。

血中乳酸値の計測には採血が必要であり、協力者への負担が大きだけでなく、消防活動中のリアルタイム計測は困難である。また酸素摂取量は非侵襲的に

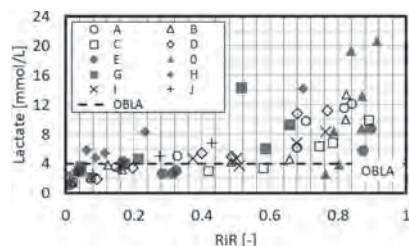


Fig.12 Relationship between lactate and RiR

測定可能であるが、マスクやガス分析器を装着する必要がある、血中乳酸値ほどではないが協力者の負担が大ききと考えられる。しかし、協力者への負担を少なく測定可能な RiR でも酸素摂取量と同様に嫌気性代謝が優位になっていることが判断できることが示唆された。一般に AT レベル以下の運動は、①長時間持続することが可能、②乳酸の持続的上昇がない、③運動強度増加に対して血液循環機能が追隨している等の特徴がある²⁰⁾。そのため RiR の変化を追跡することで心肺機能への負荷度を把握できる。

間欠式一定負荷実験 (Test 3)

Test 1 および Test 2 はいずれも時間経過とともに負荷強度が漸増する条件下での測定結果を基に呼吸代謝情報および血中乳酸値と RiR の関係を調べた。Test 3 では実際の消防活動のように間欠的に高強度負荷が課せられる状況下で RiR がどのような応答を示すかを検討した。

一例として、Test 2 の協力者 D の瞬時心拍数と RiR の経時変化を Fig.13 (a) に、また瞬時心拍数と血中乳酸値の経時変化を Fig.13 (b) にそれぞれ示す。この実験では協力者 D は 160 W 一定の負荷で自転車エルゴメータを漕いだ。3 段階終了ところで継続不能との自己申告があり、実験を終了した。

Fig.13 (a) に示すように、瞬時心拍数は負荷開始とほとんど同時に上昇した。またその到達値は 176, 186, 189 bpm (最大値) であり、負荷を繰り返すごとに徐々に高くなった。休憩中の瞬時心拍数は、第一負荷後は 141 bpm、第二負荷後は 147 bpm (最小値) まで減少したが、僅かに増加した。第二負荷後の休憩時の心拍数は Test 1 での 80 W の負荷での心拍数 148 bpm に相当し、2 分間の休憩中に安静時の瞬時心拍数まで戻ることにはなかった。

一方 RiR は、いずれの負荷段階においても瞬時心拍数上昇後、数分遅れて上昇した。 RiR の到達値は 0.786, 0.899, 0.914 (最大値) と、こちらも負荷を繰り返すごとに徐々に大きくなった。また 2 分の休憩中に RiR はそれぞれ 0.074, 0.065 と 0.1 以下まで急激に減少した。これは Test 1 における負荷開始前の値 0.091 と同等の値であることから、 RiR により心肺機能へ負荷の有無を敏感に表すことが読み取れる。

Fig.13 (b) に示すように、血中乳酸値は実験開始前の安静時に 1.1 mmol/L であったが各負荷終了時に 9.8, 15.2, 13.9 mmol/L と OBLA を遙かに超えた値を示した。また血中乳酸値は 2 分間の休憩で大きな変化が見られなかった。

これから、瞬時心拍数や血中乳酸値は休憩中に安静時の数値まで大きく低下することがなかったが、 RiR

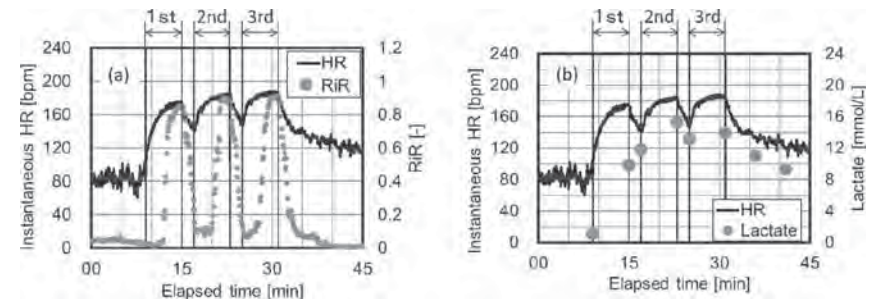


Fig.13 Change for the time of instantaneous heart rate (HR), RiR , and lactate during constant load interval tests
(a) Instantaneous heart rate (HR) and RiR (b) Instantaneous heart rate (HR) and lactate

はほぼ安静時の数値までに低下した。このように RiR は負荷強度に敏感に応答する指標であることが分かった。そのため消防活動における負荷の増減に応じて好気性代謝状態から嫌気性代謝状態へあるいは逆方向への状態変化を逐次判断できると考えられる。

5. 結 論

消火・救助活動は、負荷が高い事に加え、消防隊員はこれまでの経験や使命感から自身の状態を客観的に判断し厳しい状況に追い込んでしまう事が指摘されている。このため消防隊員の主観的判断に加えて客観的に疲労度を評価することで消防隊員の公務の安全を確保することは重要である。消防活動は高負荷活動であるため、嫌気性代謝が優位となる状態での活動継続が懸念される。そこで嫌気性代謝が優位となる状態へ必ず移行する 3 種類の高負荷実験、20 m シャトルラン実験 (Test 1)、間欠式多段階漸増負荷実験 (Test 2)、間欠式一定負荷実験 (Test 3) を行い、以下の事項が明らかとなった。

1. 好気性代謝から嫌気性代謝が優位となる活動への移行を非侵襲的に、かつリアルタイムで検出できる方法を検討し、心電図の R 波の間隔の周波数解析から求められる 0.04 ～ 1.0 Hz のパワーに対して高負荷活動時に呼吸反射が現れる 0.4 ～ 1.0 Hz のパワーの比を呼吸反射指標 (Reflection Index of Respiratory, RiR) として提案した。
2. RiR の時間変化の追跡から、好気性代謝から嫌気性代謝が優位となる活動へ移行したことを判定できるだけでなく、 RiR 数値の変化から心肺機能への負荷程度も推測できることが分かった。さらに、 RiR の値がステップ状に大きく変化する時間と、血中乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation) あるいは換気性作業閾値

(Ventilatory Threshold) を超える時間に、良い相関があることを確認した。

3. 主として隊員の主観的感覚に頼ってきた安全確保のありかたに、 RiR から得られる上記の客観的情報を付加することで、今まで以上に各隊員の活動状態を安全管理者が把握できる。このような体制の構築は、消防活動中の隊員に係わる公務災害の発生頻度および被害程度の低減に役立つことが期待される。

参 考 文 献

- 1) 木村 駿, 「着るセンサー」で作業員の熱中症を予防, 日経コンストラクション, 615, pp.15 (2015)
- 2) 高橋直樹, 李 珠英, 若林 齊, 橋原 裕, 原子力施設における防護服着用作業員のためのリアルタイム暑熱負担遠隔モニタリング装置の開発とその運用, 保健物理, 46-2, pp.140-147 (2011)
- 3) 岡 泰資, 大場淳一, 池田盛雄, 藤間千典, 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, 63 (1), pp.9-16 (2013)
- 4) 小笠原儀彦, 新藤貴久, 佐藤健二, 暑熱条件下での主観的評価と客観的指標の関係性について, 消防技術安全所報, 51, pp.55-62 (2014)
- 5) 近藤徳彦, 非温熱性要因が運動時の熱放散反応に及ぼす影響, 日生気誌, 42, pp.39-53 (2005)
- 6) 庄司卓郎, 江川義之, 興水ヒカル, 環境温度の違いが作業パフォーマンスに及ぼす影響, 産業安全研究所特別研究報告, 28, pp.49-61 (2003)
- 7) Selkirk, G.A. and McLellan, T.M., Physical work limits for Toronto firefighters in warm environments, J. Occup. Environ. Hyg, 1-4, pp.199-212 (2004)
- 8) Bridget F Kay, Maureen M Lund, Paul N Taylor, Nancie H Herbold, Assessment of Firefighters' Cardiovascular Disease-related Knowledge and Behaviors, J Am Diet Assoc, 101-7, pp.807-809 (2001)
- 9) 大坂元久, 心拍のゆらぎと自律神経, 日医大医会誌, 62-1, pp.71-75 (1995)
- 10) Solange Akseleod, David Gordon, F Andrew Ubel, Daniel

- C. Shannon, A. Clifford Barger, Richard J. Cohen, Power Spectrum Analysis of Heart Rate Fluctuation: A Quantitative Probe of Beat-To-Beat Cardiovascular Control, Science, 213-4504, pp. 220-222 (1981)
- 11) Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology, Heart rate variability Standards of measurement physiological interpretation, and clinical use, Eur Heart J, 17, pp.354-3881 (1996)
- 12) 林 博史編, 心拍変動の臨床応用—生理学的意義, 病態評価, 予後予測, pp.32, 医学書院 (1999)
- 13) Kuriyama Y, Oka, Y, Ito, Y, Enari, M, Evaluation of Fire Fighters' Acute Fatigue Based on On-Line Physical Measurement, Proceedings of the 6th International Symposium on Human behavior in fire 2015, pp.635-640 (2015)
- 14) 常盤野和男, 大友詔雄, 田中幸雄, 最大エントロピー法による時系列解析 第2版 MemCalc の理論と実際, 北海道大学出版会 (2008)
- 15) 国立スポーツ科学センター, http://www.jpnssport.go.jp/jiss/Portals/0/column/fcmanual/16_20mshuttlerun.pdf
- 16) William L Beaver, Karlman Wasserman, Brian J Whipp, A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, J. Appl. Physiol, 60-6, pp.2020-2027 (1986)
- 17) 大谷和寿, 齋藤重徳, 島根大学男子運動選手の換気性作業閾値と最高酸素摂取量, 島根大学教育学部紀要, 28, pp.43-49 (1994)
- 18) Kindermann W, Simon G, Keul J, The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training, Eur J Appl Physiol, 42-1, pp.25-34 (1979)
- 19) 大橋二郎, 兵頭圭介, 長浜尚史, 磯川正教, サッカー選手の試合中における移動スピードと Anaerobic Threshold, 体力科学, 37-6, pp.656 (1988)
- 20) 長田尚彦, 村山正博, 運動処方, 総合リハ, 23-3, pp.217-222 (1995)

謝 辞

本研究は, 科学研究費助成事業 (基盤研究 (B), 26282093) の支援のもと実施しました。本実験を実施するにあたり, 横浜市消防局および Lancashire Fire Rescue and Service の隊員の方々, 横浜国立大学大学院環境情報学府の小川真司氏, 真下大志氏, 木更津工業高等専門学校の沢口義人氏の協力を得ました。この場をお借りし深謝いたします。

Proposal of Objective Index to Evaluate Cardiorespiratory State Based on Heart Rate Fluctuation Analysis

by Yushi Ito [†], Yasushi Oka ^{††} and Yukihsa Kuriyama ^{†††}

Fire-fighting activity is one of the high imposed load activity. Fire-fighting activities are performed in dangerous situation and firefighters suffered mentally and physically burdensome load. To avoid overexertion of firefighters, it is desirable to grasp the physical condition of firefighters in real time. Authors proposed an objective index obtained by frequency analysis of heart rate variability and investigated the relationship with other physiological information such as respiratory metabolism and blood lactate.

Three kinds of tests were conducted. First, the modified maximal multi-stage 20 meters shuttle run test was conducted to check the relationship with the Ventilatory Threshold (VT) . Second, the multi-steps incremental load test was performed by using bicycle ergometer to examine the relationship between the Onset of Blood Lactate Accumulation (OBLA) and the objective index. And third is the constant load interval test, which was conducted to become clear the sensitivity of proposed objective index to the imposed variation.

The results of the tests revealed the following points: (1) We proposed new index, *RiR* obtained by frequency analysis of heart rate variability, which was measured non-invasively in the activity site, the breathing condition of the activist can be estimated, (2) the anaerobic threshold can be evaluated from the change of the proposed objective index, (3) monitoring the value of the new indices inform us whether firefighters are overloaded or not and it becomes possible to make firefighting safety.

Key words : Fire-fighting, physical fatigue, Anaerobic threshold, Heart rate variability

- [†] Nohmi Bosai Ltd, 2-1-1, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-0455, Japan
- ^{††} Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, 79-7, Tokiwadai, Hodogaya-ku Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501, Japan
- ^{†††} Research into Artifacts, Center for Engineering, The University of Tokyo 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8568, Japan

論文賞 伊藤悠史、岡泰資、栗山幸久殿

伊藤悠史（いとう・ゆうし）

平成2年生（29歳）

学歴：

2012年3月 横浜国立大学物質工学科卒業

2014年3月 横浜国立大学 大学院環境情報学府 環境リスクマネジメント専攻
セイフティマネジメントコース 博士課程前期修了

経歴：

2014年4月 能美防災株式会社（現在に至る）

学位：修士（工学）（横浜国立大学 2014年）

専門分野：火災安全工学

所属学会：安全工学会、日本火災学会



岡泰資（おか・やすし）

昭和38年生（56歳）

学歴：

1987年3月 東京理科大学 大学院理学研究科 化学専攻修士課程修了

1991年9月 東京理科大学 大学院理工学研究科
建築学専攻博士課程単位取得退学

経歴：

1991年10月 横浜国立大学 工学部物質工学科助手

2003年4月 横浜国立大学 大学院工学研究院助教授

2006年4月 横浜国立大学 大学院環境情報研究院准教授（現在に至る）

学位：博士（工学）（東京理科大学 1994年）

専門分野：火災安全工学

所属学会：安全工学会、日本火災学会、日本燃焼学会



栗山幸久（くりやま・ゆきひさ）

昭和28年生（66歳）

学歴：

1975年3月 東京大学 工学部精密機械工学科卒業

1977年3月 東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学修士過程修了

経歴：

1977年4月 新日本製鐵入社 第二研究所→名古屋製鉄所→鉄鋼研究所 部長

2011年3月 新日本製鐵退社

2011年4月 横浜国立大学 安心・安全の科学研究センター特任教授

2013年3月 横浜国立大学 安心・安全の科学研究センター退任

2013年4月 横浜国立大学 客員教授（現在に至る）

2013年9月 東京大学 人工物工学研究センター教授

2018年3月 東京大学退任

2018年4月 東京大学特任研究員（現在に至る）

学位：博士（工学）（東京大学 2001年）

専門分野：システム工学、構造解析

所属学会：機械学会、塑性加工学会

