

博士論文

心拍変動周波数解析に基づく  
消防活動中の心肺負荷評価に関する研究

Studies on Estimation of Cardiorespiratory Load  
Based on Heart Rate Variability Analysis During Firefighting Activity

国立大学法人 横浜国立大学大学院  
環境情報学府

伊藤 悠史  
Yushi Ito

2021年3月



## 目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 消防活動による身体負荷低減に関する研究	3
1.2.1 消防隊員自身の身体能力向上に関する取り組み	3
1.2.2 消防活動による身体的負担を軽減するための消防装備開発と改良	5
1.3 生理情報、生体情報の変化と身体活動中の計測	6
1.3.1 身体負荷による生理情報、生体情報の変化	7
1.3.2 生体モニタリングによる身体負荷状況の把握	12
1.3.3 消防活動中に取得可能な生理情報、生体情報	13
1.4 本研究の目的	18
1.5 本研究の構成及び各章の概要	18
1.6 参考文献	19
第2章 実験方法	26
2.1 緒言	26
2.2 身体負荷条件	26
2.2.1 身体負荷強度	26
2.2.2 身体負荷の時間と種類	27
2.2.3 身体負荷の種類	27
2.3 試験内容	28
2.3.1 心拍一定保持試験 (Test 1)	29
2.3.2 間欠式三段階負荷試験 (Test 2)	29
2.3.3 間欠式多段階漸増負荷試験 (Test 3)	31

2.3.4 連続式多段階漸増負荷試験 (Test 4)	32
2.3.5 間欠式一定負荷試験 (Test 5)	34
2.3.6 連続式一定負荷試験 (Test 6)	36
2.3.7 模擬消防活動試験 (Test 7)	38
2.4 計測項目の設定と計測方法	43
2.4.1 心電情報の取得	44
2.4.2 呼吸代謝情報の取得	46
2.4.3 血中乳酸値の取得	47
2.4.4 動脈血中酸素飽和度の取得	48
2.5 まとめ	49
2.6 参考文献	50
第3章 消防隊員の身体状況把握に用いる心拍情報の検討	53
3.1 緒言	53
3.2 身体負荷に対する心拍数の変化	53
3.3 心拍数による身体状況の把握	55
3.4 心拍のゆらぎと周波数解析	61
3.4.1 周波数解析手法について	61
3.5 心拍変動の周波数解析による身体状況評価	64
3.5.1 身体負荷中の心拍変動周波数解析指標の変化	65
3.6 まとめ	68
3.7 参考文献	69

第4章 呼吸代謝情報に基づく心肺負荷状態評価指標の検討と評価	72
4.1 緒言	72
4.2 呼吸代謝情報から得られる身体状況	72
4.3 心拍変動の周波数スペクトルと呼吸	84
4.3.1 心拍変動と呼吸の相関	84
4.3.2 心肺負荷状態評価指標 <i>RIR</i> の提案	86
4.4 嫌気性代謝の卓越と <i>RIR</i> の関係	87
4.5 <i>RIR</i> による模擬消防活動中の身体状況評価	91
4.6 まとめ	97
4.7 参考文献	99
第5章 心肺負荷状態評価指標に基づく身体負荷評価手法の提案と検証	100
5.1 緒言	100
5.2 客観的情報に基づく消防活動中の身体負荷状況把握	100
5.2.1 消防活動支援手法に用いる客観的な指標	100
5.2.2 消防活動支援手法における身体負荷状況の定義	102
5.3 活動継続注意と活動中断推奨の判定閾値の決定	102
5.3.1 活動継続注意の判定閾値の設定	103
5.3.2 活動中断推奨の判定閾値の設定	106
5.4 活動継続注意と活動中断推奨判定の検証	108
5.5 模擬消防活動での提案枠組みの評価	114
5.6 まとめ	116
5.7 参考文献	117
第6章 総括	119

公表論文 .....	124
謝辞 .....	126

## 略語一覽

ADP	Adenosine diphosphate
AT	Anaerobic threshold
ATP	Adenosine triphosphate
FFT	Fast Fourier transform
HF	High frequency
HR	Heart rate
HR <sub>max</sub>	Maximum heart rate
HRR	Heart rate reserve
HR <sub>rest</sub>	Resting heart rate
HRV	Heart rate variability
LF	Low frequency
LT	Lactate threshold
MEM	Maximum entropy method
METs	Metabolic equivalents
NDIR	Non-dispersive infrared
OBLA	Onset of blood lactate accumulation
PSD	Power spectrum density
Rf	Respiratory frequency
RIR	Reflection index of respiratory
RSA	Respiratory sinus arrhythmia
SpO <sub>2</sub>	Percutaneous oxygen saturation
TV	Tidal volume
VCO <sub>2</sub>	Carbon dioxide evolution
Vd	Dead space volume
VE	Minute ventilation
VHF	Very high frequency
VO <sub>2</sub>	Oxygen uptake
VO <sub>2max</sub>	Maximal oxygen consumption
VT	Ventilatory threshold

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

令和元年度版消防白書によると、2019年度の全国の出火件数は37,683件、おおよそ1日当たり103件、14分ごとに1件の割合で火災が発生したことになる。平成16年の出火件数は60,387件であったが、平成27年には39,111件まで毎年減少し、ここ数年は38,000件前後で横ばい状態となっている[1]。また、全国の消防隊員の火災等に対する出動回数および消防隊員数の推移を図1.1に示す。全国の出動回数に対する消防隊員数の減少は、消防隊員一人当たりの負担増加に繋がり、出動する消防隊員を取り巻く現状は厳しさを増している。

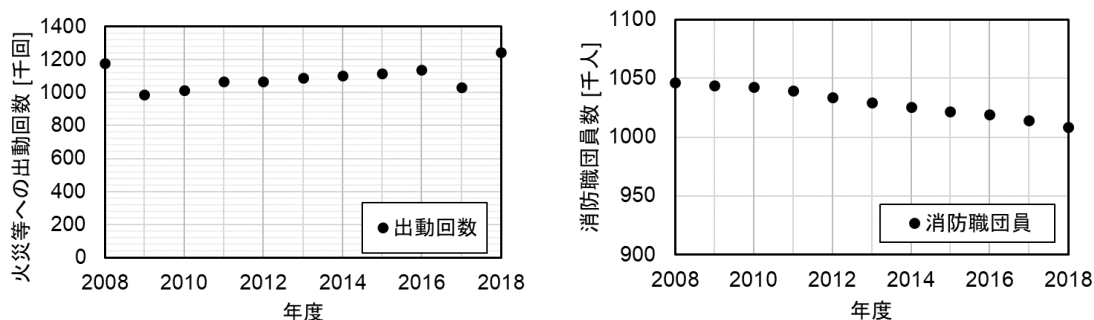


図 1.1 消防職団員の出動回数と人数の変化[2]

消防活動を支援するため、建築物には連結送水管、消防用水、非常コンセント設備、無線通信補助設備、非常用エレベータなどが、床面積や階高に応じて備え付けられている。特に消火・救助活動等に使用することを目的とした非常用エレベータの設置は、高層建築物に限られる。このため、高さ31mを越えない中層建築物および低層建築物での火災においては、消防隊員は発電機、ホースといった資機材および要救助者の搬送作業を20kgに達する装備を着装し、階段で移動をする必要が生じる。このため、心拍数が195~200bpmに達する[3]と報告されているほど消防隊員の活動負荷は依然として高い。例えば、国内で実際に消防活動にあたっている消防隊員の身体負荷に関する非常に貴重なデータとして、橋本[4]は、現場活動中の隊員の心拍数の変化を48例、取得することに成功している。その中でも身体的負担が大きかった例として挙げられている中層建築物の5



階にある店舗での火災対応にあたった隊員の心拍数の経時変化を図 1.2 に示す [4]。図 1.2 の経過時間は、出動指令の時間を起点としている。この事例での消防隊員の出動指令直前の心拍数は 80 bpm 以下であったが、活動開始直後に 180 bpm を超えた。さらに活動終了前の資機材撤収作業時（経過時間 60～80 分）に再び 180 bpm を超えた。橋本らが計測した 48 件の現場活動の平均時間は 35 分 36 秒 [4]、30 分以上に亘って高負荷の消防活動が継続されていた。

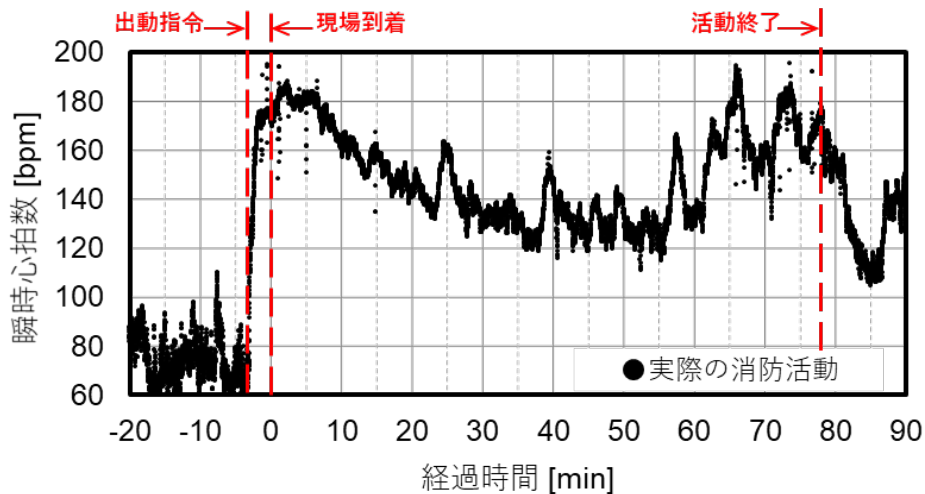


図 1.2 実際の消防活動と筆者らが消防訓練で取得された心拍数[4]  
(\*文献[4]の著者より元データを頂きプロットした)

このように消防活動は、身体的負担が大きい活動である上に、小さな判断ミスが致命的な結果を招く危険性の高い特殊性を有した災害現場での活動である[5]。そのため、高強度の負担が、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、注意力が散漫になるなどの身体の状態変化を引き起こし、直接的、あるいは間接的にアクシデントあるいはインシデントの発生要因になることが懸念される。消防庁は、消防活動の安全性向上への活用を目指し、全国の消防本部からアクシデントおよびインシデント事例を収集し、「消防ヒヤリハットデータベース」として公開している[6]。その中で、注意力、体調に関わる要因である「一つの事象に集中し、他の事象への注意力を欠いた」、「体調不良や疲れにより注意力を欠いた」、「活動内容が自己の能力や技量を超えていた」、「体調が悪かった」の要因に、少なくとも 1 つが該当する事例は、全体の登録件数 3,359 件の 61.3%を占めており、体調管理および注意力維持は、消防隊員の安全確保に欠かせない。

ところが、一方で消防隊員は市民の生命と財産を守るという特別な使命感を持つことから、自身の体調を楽観的に捉える傾向が報告されており、自身を追い

込んで作業を継続、身体負荷が過大となってしまうことが懸念される[7]。そこで、消防活動の安全性向上のために、消防隊員の主観的な体調判断だけではなく、生体情報に基づく活動状態に関する客観的な情報を追加することで、身体状況を総合的に管理することが重要である。

次節では、消防活動中に大きな身体負荷に晒される消防隊員を対象とした既往の研究である消防隊員の身体的能力向上および装備の改良に関する既存研究の概要について述べる。1.3 節では、消防隊員の身体状況を把握するために用いる客観的指標として、活動中の身体状況を反映する生理情報と生体情報についての基本的事項と計測方法の概要と、消防活動中に取得でき、実現性の高い生体情報が心電情報であること、それを用いてより詳細な身体に関わる情報を引き出す手法に関する既知の事項について述べる。1.4 節および 1.5 節では、本研究の目的と本論文の構成および各章の概要を述べる。

## 1.2 消防活動による身体負荷低減に関する研究

本節では、高強度の身体負荷である消防活動の継続による注意力の低下、体調の悪化を軽減する効果が期待される消防隊員の身体能力向上を目指した体力錬成手法、消防装備の改良に関わる既往の研究について述べる。

### 1.2.1 消防隊員自身の身体能力向上に関する取り組み

前述のように消防活動による身体的負担は非常に大きく、消防隊員は身体能力の向上と維持が必要である。このため、消防活動に必要な身体能力あるいはトレーニング手法に関わる数多くの研究が行われてきた[8-17]。

東京消防庁消防技術安全所（旧消防科学研究所）の報告によると、消防活動に大きく影響を与える体力要素として、①体幹の筋持久力、②下半身の筋持久力、③全身持久力の 3 つを挙げ、これらの能力を強化することの重要性を述べている[14]。さらに、体力錬成および消防活動の効率改善を目的としたトレーニングメニューとして、平成 13 年度当時の火災現場に最先到着した中隊 709 隊の記録を調査し、建物構造（耐火造または防火造）により、出現頻度の高い消防作業、使用資機材を用いた消防活動モデルを作成し報告している[8]。この活動メニューを反復する事で、高頻度で必要となる動作を体で覚え、早期救出と早期消火、実際の消防活動時に起きるヒューマンエラーを減らすことが出来ると述べている。この耐火造消火活動訓練メニューにおける健康な消防職員 6 名の所要時間は平均 3 分 19 秒、防火造消火活動訓練メニューでは平均 2 分 28 秒であり、非常に短時間で実施可能な効率化された内容となっている。

消防隊員は日常的に身体錬成を行うが、個人毎の身体特性、あるいは、経験年数、年齢の違いから、身体能力が個人毎に異なる[18]。個人毎に異なる身体能力に対して、イギリスの CFOA (The Chief Fire Officers Association)では、消防隊員に求められる酸素摂取能力に関する定量的な基準を設け、消防隊員の体力錬成と管理、健康管理に関するガイダンスを作成している[19]。その中で、消防活動で必要とされる酸素摂取量は 35.6 mL / kg / min であり、持続的な消防活動を実施するために必要な消防隊員の酸素摂取能力は、これに 20 %の余裕を持った 42.3 mL / kg / min と設定し、消防隊員に要求する身体的能力について表 1.1 のように設定している。

表 1.1 The Chief Fire Officers Association による身体能力の評価基準

分類	基準値 [mL kg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> ]	内容
Green	VO <sub>2max</sub> ≥ 42.3	消防活動の遂行に適している。
Amber	42.3 > VO <sub>2max</sub> > 35.6	消防活動の遂行に適していると思われる。
Red	VO <sub>2max</sub> ≤ 35.6	消防活動の遂行に適していない。

消防隊員の身体能力は基本的に“Green”レベルに達していることが求められており、毎年の検査でそれを証明する必要がある。また“Amber”レベルに分類された隊員は、詳細に精査され、適または不適を判定される。ただし、この“Amber”判定後に適判定となった場合でも適切な計画に基づいたトレーニングと半年後に再検査を行い、不適となった場合には高強度の運動を行う安全性が確認されるまで、消防活動から除外されるべきであるとしている。また“Red”レベルとなった隊員については“Green”レベルに到達するまでトレーニングを継続する必要があるとしている。

以上のような、高い身体能力を獲得することによって消防活動を安全に遂行する方法は、消防活動遂行能力の向上、過負荷による疲弊を遅らせる効果が期待される。しかしながら、消防活動は一定の隊員数を必要とし、長期休暇や休業中の隊員が生じた際、代替りの隊員を補充しなければならないという職務上の特殊性があり[20]、錬成が十分ではなくても消防活動に従事する必要がある場合も想定される。また、イギリスの事例のように、消防活動に従事する隊員の身体能力に基準を設ける方法についても、消防活動による身体負荷の大きさは、現場毎に異なることから、対応できる範囲には限界がある。そこで、これらの消防隊員の身体能力の強化に加えて、実際の消防活動により隊員が晒される負荷の大きさを把握する必要がある。

札幌市消防局消防科学研究所では、生理情報、生体情報を基に消防活動による

身体的負荷を把握するために、消防職員 14 名の協力のもと、最大酸素摂取量の計測、無雪路面歩行、有雪路面歩行、階段上り（10 階）を実施している[21]。その結果、消防用装備を着装した状態での階段上り時の酸素需要量は、最大酸素摂取量を大きく超える活動であること、大きな身体的負荷であることに加え、消防装備の着装により換気効率が低下することから、余裕を持った有酸素能力が必要であると述べている[21]。この研究は、現場の消防隊員に対する生理学的アプローチを行い、休憩あるいは交代の必要性を述べた重要な成果である。しかし、消防活動中に取得した生体情報、生理情報を用いて、個々人の身体負荷状況の把握を行い、休憩あるいは交代の時機を判断するという観点からの研究はない。

### 1.2.2 消防活動による身体的負担を軽減するための消防装備開発と改良

消防活動の身体的負担の軽減のために、繊維強化プラスチックを用いた空気呼吸器の軽量化[22, 23]、新素材繊維を用いた防火衣の軽量化[24]、中高層建築物での火災を対象とした平面昇降ロボットの検討と試作[25, 26]、消防ポンプ車操作の自動化[27]などの様々な角度からの消防装備に関わる研究および支援ロボット開発が行われている。

熱中症対策として、暑熱順化による熱環境への身体の適応促進、防火衣内のポケットへ冷却材を収納した冷却ベストの着用、事前のアイスラリーの飲用等に関する研究が行われている[28]。物部ら[29, 30]は、隊員の頭部への冷却材の装着、あるいはヘルメット内への送風により、外耳道温度上昇抑制、および快適感向上効果が得られることを報告している。また、近年では東京消防庁で新型防火衣が採用され、ヒートストレスの軽減効果を検討している[31]。

さらに巨大地震時の石油コンビナートにおける災害時に対応することを目的とし、消防研究センターでは、自動走行と情報共有による連携技術による消防ロボットシステム開発が行われている。そのイメージを図 1.3、図 1.4 に示す。この消防ロボットシステムは、偵察・監視ロボットが火災の状況を取得し、侵入経路・放水位置の選択肢を提示する。消防隊員が決定した選択肢に従い、システムが放水位置を決定し、その放水位置へ放水砲ロボットを配置できるようホース延長ロボットがホースを延長し、放水砲ロボットから放水し消火活動を行うものである[32]。

このように、新たな素材や技術開発に伴い、装備重量の軽量化および様々な消防活動の自動化が今後も進み、活動負荷が軽減することで、隊員 1 人あたりが作業できる容量が多くなると考えられる。しかしながら、前述のように、消防隊員は特別な使命感[6]をもっていることが報告されており、隊員自身は許容可能な負荷の限界付近まで作業を継続してしまうことが引き続き懸念される。

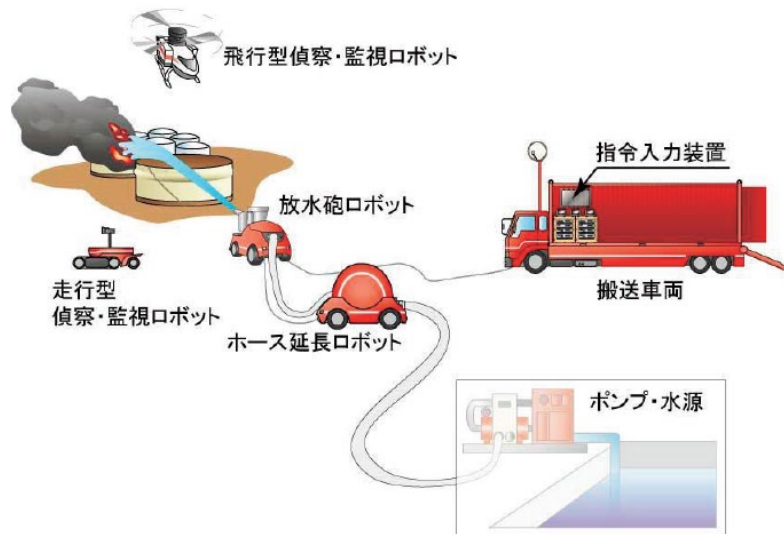


図 1.3 消防ロボットシステム全体イメージ (文献 32 より引用)



図 1.4 消防ロボットシステム試作品の様子 (文献 32 より引用)

### 1.3 生理情報、生体情報の変化と身体活動中の計測

本節では、消防隊員の身体負荷状況を把握するための情報として、身体負荷により変化する生理情報、生体情報に関する事項とその計測に関する基本的事項について整理する。さらに、消防活動中の計測に関して実現性が高い生体から得られる情報を検討し、既知の基本的事項について述べる。

### 1.3.1 身体負荷による生理情報、生体情報の変化

生体は恒常性を保つために常時変化し、身体負荷に伴う応答として、代謝系、循環器系、呼吸器系といった各臓器機能に重要な変化が見られ、スポーツなどの高強度の身体負荷を対象とする分野で活用されている。

そこで、本項ではそれらの変化に関しての一般的事項、身体負荷強度の定量化に用いる代謝当量、および高強度の身体負荷を継続する身体能力である心肺持久力の評価についての基本的事項を述べる。

#### (a) 身体負荷に対する代謝系の応答

身体活動のエネルギーは、アデノシン三リン酸 (ATP) がアデノシン二リン酸 (ADP) とリン酸へ分解する時に生じるが、生体内の ATP 貯蔵量は少ないため、身体活動を継続するには、常に再合成を継続する必要がある。再合成には、嫌気性代謝と好氣的代謝の 2 つの機構があり、嫌気性代謝はリン酸化合物の分解、および嫌氣的解糖に伴うエネルギーを利用するもので、エネルギー源の枯渇あるいは乳酸の蓄積が ATP 再合成を抑制するため、継続した活動が実施できない。そのため、長距離持久走のように持続的な活動を行う場合には、好気性代謝機構を利用する必要があり、一般に、好気性代謝が優位な活動は、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循環機能が追隨している等の特徴がある[33]。

このように生体には好気性と嫌気性の異なる代謝経路が存在し、身体負荷強度に応じて支配的となる代謝経路が随時選択され、これらの代謝が複合的に行われることで得たエネルギーにより身体活動が実施される。そのため、運動強度の増加に伴って好気性代謝が支配的な状態から嫌気性代謝が支配的な状態へ遷移し、その変換点は、嫌気性代謝閾値(Anaerobic Threshold, AT)と呼ばれる。嫌気性代謝により生成する血中乳酸値の増加から推定した AT は、乳酸性作業閾値(Lactate Threshold, LT)と呼ばれる[34]。ただし、LT の計測は採血を頻繁に行う必要があり、被計測者への負担が大きいことから、血中乳酸蓄積開始点(Onset of blood lactate accumulation, OBLA)として 4 mmol/L という閾値が設定され、一般的に用いられることも多い[35-37]。このように、AT 以上の運動強度では、血中に乳酸が増加するが、血液の pH は重炭酸イオンによる緩衝作用により一定に保たれる。その緩衝作用により、呼気中の二酸化炭素濃度が増加し、酸素摂取量に対する二酸化炭素排出量の比率が増加する。この呼吸代謝情報から推定した AT を換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold, VT)という[38-40]。さらに身体負荷が増加すると、緩衝作用が追い付かず、血液の pH が低下、呼吸換気量が増加する。

AT 以上の身体負荷強度では、交感神経の過度の緊張、心拍数あるいは収縮期

血圧（心臓が収縮した時の血圧）が増加傾向を示し、心血管に与える影響は大きいとされ[41]、一般的な臨床分野で用いられる運動処方では、AT 以下の身体負荷強度にとどめることが多い。消防活動は嫌気性代謝の亢進した活動であり[18]、アメリカでは消防隊員の死因で心疾患が大きな割合を占めている[42]ことが報告されていることを鑑みると、嫌気性代謝が支配的な状態の継続時間を減少させることが望ましい。

#### (b) 身体負荷に対する循環器系の応答

エネルギー代謝で用いられる酸素を細胞へ持続的に供給する酸素運搬機能の中でも大きな役割を担うのは、血流とそれを起こす心臓である。酸素運搬機能の他にも、糖あるいは脂肪酸のようなエネルギー源、アドレナリンなどのホルモン、身体負荷により発生した炭酸ガス、乳酸、熱などの運搬という身体負荷の継続に対して重要な役割を担っている[43]。

単位時間あたりに心臓が拍出する血液量である心拍出量は、運動時には酸素需要の高まりと、代謝により発生した二酸化炭素の排出のため増加する。このため、安静時には 5 L/min 程度である心拍出量は、高強度の負荷中には 25~30 L/min に達する[44]。心拍出量は、単位時間当たりの拍動回数である心拍数 (Heart Rate, HR) と一回当たり拍出量(Stroke volume, SV)の積で表されるが、高負荷時には安静時の 2.5~3.5 倍まで増加する心拍数に対し、一回当たり拍出量は 1.5 倍程度までしか上昇せず、心拍出量は主に心拍数によって調整される[45]。

安静時には副交感神経により、心拍数は抑制されているが、交感神経が亢進することで増加する。まず、運動をする前に多少の緊張状態となるため活動開始前であっても心拍数は増加する。これを準備期（または第1相）という。運動を開始すると、筋肉の活動が交感神経を更に亢進させ、心拍数が上昇する。そのため、運動開始後 10~15 秒すると心拍数は安静時の 2 倍以上になることもある。これを、初期相（または第2相）という。身体負荷強度がある程度小さい場合には、循環器系は数分で定常状態となる。これを、適応相（または第3相）という。ただし、負荷強度が大きい場合、酸素摂取量がほぼ一定であっても、筋でのエネルギー代謝時に酸素を必要としない嫌気性代謝が亢進し、体温上昇が起こる。このときに熱を放散するため、交感神経によって皮膚付近での血管が拡張され、さらなる皮膚付近への血流量の増加が起こる。そのため、心拍数はさらに増加し、筋肉と皮膚での血液需要を満たすように機能する。ただし、この時、心拍の1回あたり拍出量、および血圧は下降する。この状態をドリフト期（または第4相）という。さらに負荷強度が大きくなり運動による身体負荷が最大に達した時の酸素摂取量を最大酸素摂取量といい、運動の継続が困難な状況となる。自律神経の

失調、ホルモン分泌量の低下によって、血圧が低下していく。これらをオールアウト期（または第5相）という[46]。消防活動中に第5相に至ることを防ぎ、第4相を検知して未然に防ぐことが望まれる。

### (c) 身体負荷に対する呼吸器系の応答

呼吸は、酸素を空気中から取り入れ、二酸化炭素を体外へ排出する役割を持つ。空気中の酸素は吸気とともに肺に入り、肺胞において血液中に取り込まれ、血液循環によって全身に運搬された後に、各細胞に取り込まれる。また、運動により発生した二酸化炭素は各細胞から血液循環によって肺へと運搬され、外気へと排出される。厳密には、外気と血液のガス交換を外呼吸、血液と細胞とのガス交換を内呼吸というが、呼吸と単にいう場合は一般的に外呼吸を指す[47]。

外呼吸において、一回当たりの呼気量と吸気量はほぼ等しく、単位時間あたりの呼気量または吸気量を換気量（Minute Ventilation, VE）といい、通常1分あたりの体積で表され、一般的な成人の安静時で5～8 L/min、激しい運動時には、150 L/minにも達する。また、換気量は、呼吸数（Respiratory Frequency, Rf）と一回当たり換気量（Tidal Volume, TV）との積で表される。呼吸数は成人の安静時で12～20 bpm（Breath per Minute）であるが、激しい運動時には60 bpm前後に達する変化を起こす。また、一回当たり換気量も安静時で0.5 L程度であるが、激しい運動時には2.5 Lに達する[45]。さらに、呼気ガスを分析することで、呼吸を通じて生体内に取り込む酸素量である酸素摂取量（Oxygen Uptake,  $VO_2$ ）、体外へ排出する二酸化炭素量である二酸化炭素排出量（Carbon Dioxide Evolution,  $VCO_2$ ）を計測することができ、通常1分あたり且つ体重当たりの体積を用いる。一般的な成人の安静時は、酸素摂取量は3.5 mL/kg/min前後であるが、運動時には好気性代謝の亢進に伴い、10～30倍に達する。

身体負荷強度が上昇すると体内ではエネルギー代謝量が増加し、生体内の酸素需要量および二酸化炭素生成量が増加する。そのため、身体負荷がAT以下の軽強度負荷時には、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気量は、身体負荷強度に対して直線的に増加する。また、換気量は身体負荷開始1～2呼吸後には速やかに増加を開始し、負荷に対して素早い応答を示すことが知られている[48]。この時、血液のpHおよびガス分圧は安静時と変わらない。ここで、負荷が増加してATに達すると、血液中の乳酸増加によるpHの低下、あるいは筋からの $K^+$ の放出が、頸動脈体（血液内のガス分圧、その他、物質を受容して、呼吸を調節する生体の器官）を刺激することで、換気量が急激に上昇し始め、血液のpHと二酸化炭素分圧が低下、酸素分圧が上昇する[43]。ここで、換気量の中でも、気道などを満たし、肺胞でのガス交換に寄与しない死腔量（Dead Space Volume,  $V_d$ ）の



割合を死腔換気率というが、身体負荷強度が増加する際には、この死腔換気率を低く抑えるため、初期は一回換気量の増大から始まり、次第に呼吸数を増大させていくように換気量を調節する[49]。

呼吸代謝情報の変化から、高強度の身体負荷時に見られる嫌気性代謝の高まる AT を検出し、活動中の代謝系の情報を得ることが出来る。

#### (d) 身体活動による身体的負担とその強度の定量化

本研究では身体活動中の隊員を対象とするため、身体的負担に関する用語とその指標について述べる。骨格筋の収縮によって生じる体の動きを、一般的に「身体活動 (Physical Activity)」と呼ぶ[50, 51]。本研究においては、協力者が実施した身体活動により生じる身体 (主に心肺機能を対象とする) へかかる負荷を、「身体負荷」あるいは単に「負荷」と記述し、その強度を「身体負荷強度」あるいは「負荷強度」と記載する。

例えば、トレッドミルを用いた試験では、走行速度、路面傾斜角度によって、自転車エルゴメータを用いた試験では、ペダルの重さや回転数によって、さらに携帯装備の重量など、身体負荷の設定条件に依存して身体負荷強度は変化することになる。ここで、身体負荷強度は、エネルギー産生に消費される酸素量、あるいは生体内で酸素を運搬する血流量に反映される。そのため、生体計測から得られる心電情報や呼吸代謝情報などを直接・間接的に計測し、これらの変化を追跡することで身体が置かれている状況を推定することができる。

運動強度を活動時の好気性エネルギー代謝量を基に評価する方法として、代謝当量 (Metabolic Equivalents, METs) が一般的に用いられる。これは安静時の酸素摂取量を 1.0 METs とし、ある運動強度下で体内のエネルギー代謝の亢進により増加した酸素摂取量が、安静時の何倍にあたるかで運動強度を評価する方法である。正確な計測は酸素摂取量を取得するために呼気分析を行う必要があるが、一般的な身体活動については推定値 (以下、推定 METs と記載) を算出するための推定式が考案されている[50]。アメリカスポーツ医学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) と疾病対策センター (Centers for Disease Control and Prevention, CDCP) の報告によると、3.0 METs 未満を軽度の身体活動、3.0 ~ 6.0 METs を中程度の身体活動、6.0 METs を超えると激しい身体活動としている[50]。日本では国立健康・栄養研究所から、健康増進に向けた利用を目的として、日常あるいは職業別に様々な状況での推定 METs の日本語版を公開している[52, 53]。例として、一部の代表的な職業、競技での活動種類とその推定 METs 値の抜粋を表 1.2 に示す。

表 1.2 職業およびスポーツにおける活動の主な推定 METs (抜粋)[53]

職業		スポーツ	推定 METs
エンジニア シェフ	調理する	ダーツ ビリヤード	2.0
清掃員 按摩師	ごみの収集 立位	ボウリング アーチェリー (狩猟以外)	4.0
炭鉱作業	シャベルで掘る	フェンシング スケートボード (競技)	6.0
林業 引っ越し	斧による伐採、速い 重たいものを運ぶ	テニス (シングルス) ビーチバレーボール	8.0
消防士	ホースを運ぶ (防火服一式装備)		9.0
		サッカー (試合) アイスホッケー (試合)	10.0
潜水士	ダイビング 米海軍特殊部隊	ボクシング (リング上)	12.0

その中に「消防士」という項目があり、4種類の活動と METs が記載されている。具体的には、「通常の活動」が 8.0 METs、「自動車事故現場での救出活動」が 6.8 METs、「防火服一式を装着しての消火訓練」が 8.0 METs、「消防活動一式を装備しての、ホース搬送、上階への機材搬送、壁を壊すなどの活動」が 9.0 METs とされている。アメリカスポーツ医学会の基準に当てはめると、消防士の活動は全てシーンが「激しい身体運動」に分類され、負荷強度の高い活動であることが判る。

#### (e) 心肺持久力の評価に用いる指標

心肺持久力は、長時間の中程度から高強度の活動能力と関係しており[54]、消防活動において重要な体力要素として挙げられている[55]。心肺持久力の評価には、最大酸素摂取量(Maximal Oxygen Consumption,  $VO_{2max}$ )が基準として用いられる。最大酸素摂取量は、漸増負荷試験中の酸素摂取量を連続計測し、その時に酸素摂取量の増加が見られなくなった時の値であり、その時の心拍数を最大心拍数(Maximum Heart Rate,  $HR_{max}$ )という。

最大酸素摂取量の測定法には、直接法と間接法とがある。直接法は上述のように漸増負荷試験を実施し、その時の最大値を直接計測するものである。最大酸素摂取量は個人毎の体力レベル、あるいはトレーニングにより変化する[56]ことから、直接法を用いることが望ましいが、被測定者を最大運動まで追い込む必要があり、専門家の立ち合い、専門的な設備がある病院や研究所などで行う必要があ

ることから実施ハードルが高い。そのため、間接法と呼ばれる最大運動以下の負荷強度で取得した酸素摂取量と心拍数の関係から最大心拍数を推定する方法[57]が一般的に用いられている。例えば、自転車エルゴメータを使用したものとして、YMCA プロトコル[58]は代表的なものであり、1段階あたり少なくとも3分間の運動を2~4段階連続して実施、各段階での心拍数の応答値に対する酸素摂取量の応答値をプロットし、年齢から推定した最大心拍数へ外挿することで求めることができる。また、トレッドミルを使ったものとして、チェスタートレッドミルテスト(The Chester Treadmill Test)があり、6.2 km/hの走行速度で2分ごとに0%から3%ずつ勾配が増加する12分間の身体負荷試験である[59]。しかしながら、これらの間接法は直接法に対する誤差が大きいという報告もある[60]。

高強度の身体負荷を対象とする本研究では、これらの計測は生理情報、生体情報の最大値を設定することが出来るため、非常に有用であると考えられるが、実施ハードルが高く、消防隊員一人一人に実施するとなると実現性が低いのが実情である。

### 1.3.2 生体モニタリングによる身体負荷状況の把握

前項で述べたように、生体計測を実施することで、生理情報、生体情報の変化に反映される様々な身体情報を把握することができる。本研究では、生体の状態を反映する客観的情報の中で、心拍数、体温、呼吸数のように体外から間接的に計測されるものを生体情報、生体内の体液や呼気ガスを直接サンプリングして計測したものを生理情報と呼び区別する。一般的に生体医工学の分野で生体計測に関して要求される事項として以下の2点が挙げられる[61]。

- ① 生命活動に関連する物理量、化学量は生体の調節機能が働くため、一定の値に保たれ、変動範囲が狭いことから、高い分解能と精度を要求される
- ② 生体は体外から与えられる外乱に反応するため、計測のための操作が生理的状态を乱さないことが必要とされる。

近年では機能性材料およびウェアラブルなスマートデバイス[62-65]の普及により、生体計測はますます身近になっている。

例えば、心電計測は胸部に配置した電極から心筋の活動に関する情報が簡易に得られ、日常様々な自由行動時の心電図を連続して長時間記録することができるホルター心電計が、一般的に知られている。近年では電極に導電性繊維などを用いてTシャツに組み込み、装着に違和感を極力少なくしたものが開発されている[62, 63]。被計測者への負担が非常に小さく、適用出来る活動も多岐に亘り、体表面に電極を接触させることで簡易に計測可能であることから、計測中の違和感が非常に小さく、例えば在宅療養中の心疾患患者の就寝中に心電計測を

実施し、発症の兆候を検出するシステム開発[66]、自動車運転中のドライバーの心電計測を実施し、眠気の検知に役立てる研究[67]も行われている。

呼吸情報の計測は、基本的にマスクの装着を必要とし、被計測者への違和感、負担を伴うため、心電計測に比べて日常的な計測事例は多くない。しかし、呼吸数に関しては、腹部に巻き付けたベルト状のセンサから腹部の動きを検出する方法[68]等がある。また、睡眠中の動画処理を行い、呼吸数を検出することで、効果的な睡眠に役立てる研究開発[69]がなされている。ただし、酸素摂取量、二酸化炭素排出量の計測はガス分析装置が必須となるなど、自由行動時の制限が大きく、専門的な領域での限定された条件での計測が行われる事例が主である。

血中乳酸値の計測は、基本的に微量でも採血が必要であり、日常的な連続計測事例はほとんどない。基本的に運動時の身体負荷強度の増加による嫌気性代謝の亢進に係る情報を得る目的で効率的なトレーニングのための負荷設定など専門的領域で計測が実施されている。

このように、高強度の身体負荷を対象とした生理情報、生体情報は様々なものがあり、対象とする活動に応じて選択する必要がある。そこで、次項では、消防活動を対象とした場合に計測可能な生理情報、生体情報の計測上の制約と計測が可能な生体情報について述べる。

### 1.3.3 消防活動中に取得可能な生理情報、生体情報

ここで、本研究で対象とする消防活動の状況を考慮すると、計測可能な生体から得られる情報には次のような条件が必要と考えられる。下記の条件を念頭に置き、消防活動中に得られる生理情報と生体情報について検討する。

- ① 消防活動は緊急性が高く、出動の際にセンサを取り付けることはできないことから、予め測定装置を装着して待機できること。
- ② 消防活動は現場の状況に応じた様々な動作が要求されるため、装着したセンサによって隊員の動作を制限せず違和感も少なく計測可能なこと。
- ③ 消防活動中は多数の装備を装着していることから、小型で軽量の計測装置により計測できること。

循環器に関わる情報の中で、血圧はオシロメトリック法[70]と呼ばれるカフを用いて圧迫と弛緩を交互に行う計測方法が一般的であるが、血流を一時的に停止させる必要があるため、計測には違和感が伴い被計測者の自由な動作を一時的に阻害する。他にも圧力センサを用いたトノメトリ法が開発され、一拍毎の血圧変化を計測することが可能になっているものの、皮膚にセンサを押圧して圧力計測するため、しっかりとセンサを固定しておく必要がある[71]。その他にも様々な計測方法が提案されているものの、基本的には日常生活での健康管理[72]

が目的であり、消防活動へ適用できるものは実用化されていない。

一方、心電情報は実際に多数の勤務中の消防隊員にホルター心電計を装着し、そのうち数名の消防隊員の活動中の心電情報の取得に成功している橋本ら[4]の実績があることから、実現性は高いと考えられる。

その他の生体から得られる情報について、呼吸器に関わる情報は、基本的にマスクの装着、ガス分析装置が必要である。また、筋電図は局所的な情報であり、激しい動作を含む消防活動中に四肢に電極を貼り付けることは難しく、全身を対象とする場合、無数の電極が必要となる。さらに動脈血中酸素飽和度は、パルスオキシメーターを用いて非侵襲的に計測する場合、身体末端にプローブを密着して固定する必要がある、消防活動の妨げとなる可能性がある。血中乳酸値は、身体負荷強度の増加による嫌気性代謝の亢進に係る情報を得ることができるが、基本的に微量でも採血が必要であり、消防活動中の計測は困難であるなど、それぞれ実施ハードルが高い。

このように、身体状況を把握するために被計測者への負担も少ない様々な計測方法が検討されているが、消防活動中の計測器、センサ装着は非常にハードルが高い。ただし、心電情報に関しては、実際に計測例があるため、データの取得が可能であると考えられる。

#### (a) 消防活動中の活用が期待される心電情報に関する基本的事項

本研究では、最も消防活動中の計測が現実的な生体情報として、心電計測に着目する。前述のように心臓の役割は、拍動から血流を起こし、全身に酸素あるいは栄養を供給し、老廃物および、二酸化炭素等を細胞から体外へ輸送することである。全身をめぐる血流は、体内の恒常性を保つための様々な機能を担っているため、表 1.3 に示すように、心拍数は様々な外的要因や環境の変化を反映して変化する。

表 1.3 心拍数変化の要因[45]

要因	心拍数増加	心拍数減少	備考
体温	高体温	低体温	
血液 pH	酸性 (O <sub>2</sub> 欠乏、CO <sub>2</sub> 増加)	塩基性	化学受容器 (頸動脈小体・大動脈小体等)
動脈血圧	下降	上昇	圧受容器(大動脈洞)
静脈血圧	上昇	下降	
ホルモン及び薬物	アドレナリン、サイロキシン	アセチルコリン	
神経刺激	交感神経刺激	迷走神経刺激	
精神状態	興奮・怒り	悲しみ・不安	
運動	運動中	安静、睡眠中	
感覚刺激	激痛、寒い	冷覚、温覚	

心臓が 10~20 秒の停止で死に至るほど、心臓の拍動は、生命活動にとって重要であり、24 時間 365 日休みなく定期的な律動をしている。その定期的律動は、洞結節と呼ばれるペースメーカー機能を持った大きさ約 1 mm の塊に支えられ、電気的なインパルスを定期的に発生させている。その発生した細胞の電氣的興奮が、心臓全体へ伝播することで心臓が拍動する[45]。

その伝播経路の説明のために、心臓の刺激伝導系各部の名称を図 1.5 に示す。洞結節で発生した電氣的興奮が伝播し、隣接した心房が収縮する。さらに、房室結節 → ヒス束 → 右脚・左脚 → プルキンエ線維と順に電氣的興奮は伝播し、心室が収縮することで全身へ血液を圧送する。心筋細胞は、隣接した細胞へと直ちに興奮を伝える機能を有しているが、房室結節は、他に比べて興奮の伝導速度が遅いため、心房の収縮後に時間遅れをもって心室が収縮する。この時間遅れにより左心室に血液を蓄えてから大動脈へ送り出すことができ、全身への血液の圧送を効率化している[45]。

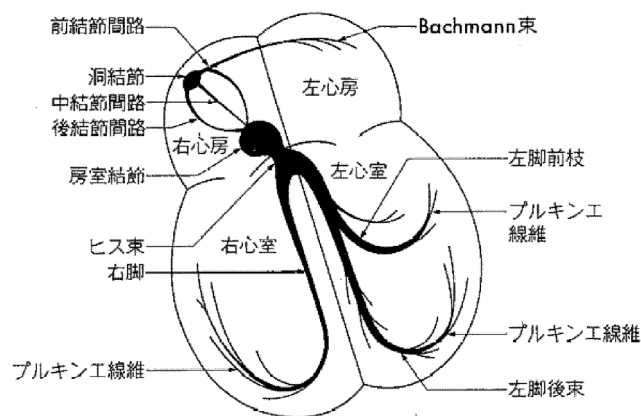


図 1.5 心臓の刺激伝導系各部 (文献 45 より引用)

これらの心臓の刺激伝導系に関する情報を記録したのが心電図であり、健康な人の心電図では、図 1.6 に示すような P, Q, R, S, T と呼ばれる 5 つのピークが見られる。それぞれの電位的ピークは、表 1.4 に示す活動に相当する。その中で一般的に最も大きい電位ピークが R 波である。心拍数は、単位時間当たりの心臓の拍動数であるが、R 波は心室が収縮し全身に血液を送り出す瞬間に対応しているため、R 波の単位時間の波数から心拍数を求めることができる。

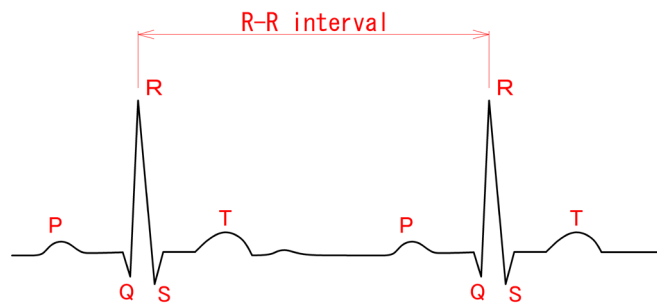


図 1.6 心電図概要[73]

表 1.4 心電波形と対応する心筋の活動

波形	対応する活動
P	心房筋の興奮
Q	心室筋の興奮
R	
S	
T	心室筋の興奮からの消退

橋本ら[4]が実際の消防活動の計測に成功した情報はこの RR 間隔であることから、本研究では RR 間隔が消防活動中に計測可能な生体情報であると考え、身体負荷状況の把握に用いる検討を実施する。そこで、次に RR 間隔から得られる心拍数に加えて、詳細な情報が得られる心拍変動について基本的事項を述べる。

(b) 心電情報から得られる心拍変動周波数解析に関わる情報

一般的に、外的要因が作用しない安静時の心拍数は、一定の時間間隔を維持して規則的に推移する。しかし、詳細に観測すると、1 拍ごとに標準偏差 100 msec 程度の大きさで揺らいている[74]。1 拍単位でみられるこの変動は、心拍変動 (Heart Rate Variability, HRV) と呼ばれ、古くからその存在が知られており、HRV を詳しく解析することで、生体に関する情報を非侵襲的に評価可能である[75-77]。

厳密には、HRV には時間スケールが非常に長周期のものも含まれる。例えば、地球の自転に影響される 24 時間周期の心拍変動 (サーカディアンリズム)、1 年間の気候、および人間の行動による変化がある。しかし、これらの長周期変動は、通常の消防活動時間に比べて非常に長いため、本研究では短周期変動のみを考慮する。

HRV に関する臨床的な研究として代表的なものは、心疾患によって心臓が重篤な状況となる兆候を心拍変動によって捉えることが出来るという Hon と Lee[78]による報告、心拍変動のスペクトル分析を行い特徴的な 3 つの変動成分

があることを指摘した Sayers[79]の報告がある。スペクトルの変動成分の意味づけを行ったのは Akselrod ら[77]であり、彼らは犬を用いて、約 0.3 Hz の呼吸性変動、約 0.1 Hz の血圧調整系の変動、および 0.05 Hz 以下の体温調節による変動の生理学的因子に起因し、生体内部の周期的な振動はフィードバック制御回路により発生することを報告した。生体内部の制御信号の伝達には、自律神経に関わり、副交感神経を介する制御を行う場合には反応速度が速く、周波数が高くなり、交感神経系は副交感神経系と比較して反応速度が遅いため周波数は低くなる。体液性の因子を介したものは、さらに周波数がより低くなるという特徴があり、心拍変動は、これらの詳細な身体に関する情報が含まれる。

そこで、RR 間隔の時系列データに対して周波数解析することで、周波数帯毎にパワースペクトル密度(Power Spectrum Density, PSD)を算出、特定の周波数帯域のパワー値を比較することで、これらの自律神経の影響を分離して評価することができる。主に副交感神経の活動は呼吸を信号源とする高周波帯域(High Frequency, HF: 0.15~0.40 Hz)、副交感神経および交感神経の活動は血圧変化を信号源とする低周波帯域(Low Frequency, LF: 0.04~0.15 Hz)に対応し(図 1.7 に対応する周波数帯を示す)、交感神経の亢進度はそれぞれの周波数帯のパワー比である LF/HF とすることで求められ、ストレス指標として広く用いられる[80, 81]。

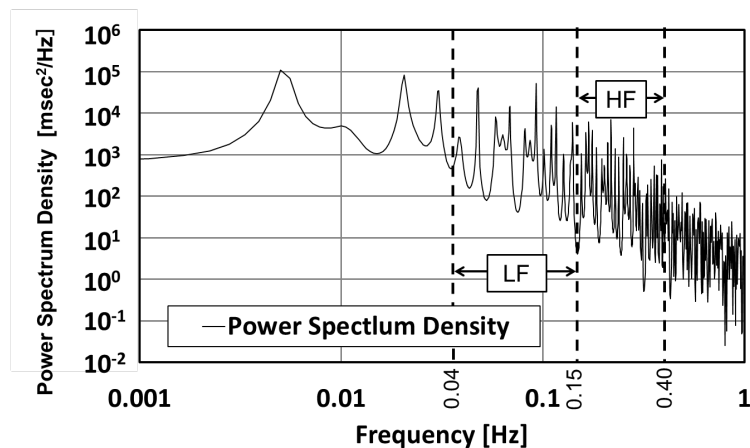


図 1.7 代表的な安静時の周波数スペクトル密度分布とそれぞれの周波数帯

これらの指標に関する既往の研究は数多く存在するが[75, 76, 82~84]、臨床分野での安静・低負荷時を対象としたものが主となっており、前述のように自律神経の亢進度の評価、あるいは心筋梗塞後の予後の死亡率との関連[85]などの報告がなされているものの、特に消防活動のような高強度の身体負荷を対象とした身体状況の評価、指標に関する検討は十分行われていないのが現状である。



## 1.4 本研究の目的

消防活動は、延焼防止、人命検索、避難誘導など重要な役割を担うが、消防隊員の身体へ大きな負担をかけている。危険と隣り合わせの火災現場で課される過大な身体的負担の継続は、隊員の体調不良、注意力低下に繋がり、ヒューマンエラーおよびそれに伴う公務災害の発生要因となることが懸念される。このような問題に対して、消防活動に必要な身体能力を身に着けるための効率的な訓練方法の改善、あるいは消防装備の軽量化、機械的操作の自動化などにより身体的負担の軽減に関わる研究が行われている[22-27]。このような対策が行われる一方、消防隊員は特別な使命感から自身の体調を楽観的に評価する傾向があり[6]、主観的判断のみでは自身を限界まで追い込んで活動を継続することが懸念される。そのため、自身の身体状況に対する主観的な体調判断と実際の身体状態との隔たり埋めるために、客観的評価が必要であるが、消防活動中の身体的負担を客観的に評価する観点からの研究はない。

身体的な負担状況は、生体内のエネルギー代謝に係わる生理情報あるいは生体情報から客観的に入手でき、その中で被計測者の動作を妨げずに計測が可能であり、活動中の連続計測が実施しやすい心拍数を活用した身体状況の評価が一般的に行われている。

一方で呼吸に関する情報からは、生体内のエネルギー代謝に関して好気性代謝が優位であるか否かという重要な情報を得ることが出来、健康スポーツ等の専門分野では、詳細な身体状況の評価に活用されている。ただし、その計測にはマスクやガス分析装置を必要とするため、多数の装備を装着しての緊急性が高い活動に従事する消防隊員への適用は困難である。実際の消防活動中での計測事例[4]がある生体情報は、心電情報である RR 間隔、そこから得られる心拍数のみである。

そこで、本研究では、消防隊員が培ってきた経験に基づく主観的情報に加え、心電情報の計測に基づく客観的な身体負荷に関する情報を提供することで、効率的な休憩あるいは交代を促し、疲労の蓄積による判断力低下を軽減し、公務災害の未然防止、および安定した消防活動の継続に資する判断手法の提案とその評価を目的とする。

## 1.5 本論文の構成及び各章の概要

第 1 章では、消防隊員の活動は身体負荷が非常に高いことを示し、公務災害発生誘因になっていることを示す。また、この高い身体負荷への対策として、これまで行われて来た消防隊員個々の身体能力向上を目指した体力錬成手法、

消防隊員の負荷を軽減する消防装備の軽量化、消防活動支援ロボットに関する既往の研究をまとめる。次に、新たな視点からの取組みとして、消防隊員が培ってきた経験に基づく主観的情報に加え、消防活動中に得られる生体情報に基づく客観的な身体負荷に関する情報を提供することの必要性を述べる。

第2章は、本研究で実施した身体負荷試験、および、生理、生体情報の計測について述べる。身体負荷試験は、安全を確保することはもちろんだが、消防活動に準じた負荷の強度および継続時間となるように試験を設定することが重要である。同時に、身体負荷時の生理、生体情報をどのように計測するかも重要であり、これらを満足する一連の身体負荷試験法を計画する。

第3章では、全身の酸素供給および二酸化炭素排出に重要な血流を司る心臓の活動に関する情報に着目して、身体負荷状況の把握を検討する。心臓の活動状況は心拍数として把握されるが、個人ごとに心機能が異なるため、安静時心拍数からの上昇量、最大心拍数までの余裕などを考慮して身体負荷強度との対応を検討する。

第4章では、心肺機能のうち肺の換気機能に着目して、身体負荷状況の把握を検討する。換気量、呼吸数、酸素摂取量、二酸化炭素排出量などの呼吸代謝情報は、生体内のエネルギー代謝の変化を反映して変化する。低負荷での好気性代謝の卓越した状態から負荷上昇により嫌気性代謝が卓越した状態への変化は、呼吸代謝情報により明確に捉えることができる。本研究では心拍変動に呼吸変動が重畳する現象に着目し、呼吸代謝情報を心拍変動から評価することを検討し、それにより身体負荷状況を評価することを検討する。

第5章では、ここまで身体負荷状況を評価する心拍情報および呼吸代謝情報について検討したが、ここでは消防活動中でも計測できる心電位から得られる心拍指標および呼吸代謝指標の2つの指標を用いて、身体負荷レベルを区分して評価することを検討する。生体内のエネルギー代謝に関わる好気性代謝卓越から嫌気性代謝卓越への変化点、乳酸蓄積開始点を境として3区分する枠組みを検討する。この変化点の指標の閾値を、負荷漸増加試験で決定し、負荷が変動する消防模擬活動で提案した枠組みの妥当性を検証する。

第6章では、本研究の総括と今後の展望について述べる。

## 1.6 参考文献

- [1] 総務省消防庁, 消防白書 (令和元年版), 第1章 災害の現況と課題,  
<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/47787.html>
- [2] 総務省消防庁, 消防白書(令和元年版), 第2章 消防防災の組織と活動,

<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/47787.html>

- [3] Barnard R. J., Duncan H.W., Heart rate and ECG responses of fire fighters, *J Occup Med.*, vol.17(4), pp.247-250, 1975.
- [4] 橋本好弘, 消防隊員の勤務環境と心身負荷に関する研究, 北海道大学博士学位論文, pp.61-67, 2009.
- [5] 山田羊一, 山口勝也, 深作与明, 落合博志, 飯田稔, ヒューマン・ファクターから見た消防活動と受傷危険に関する研究, *消防科学研究所報*, vol.40, pp89-98, 2003.
- [6] 消防ヒヤリハットデータベース,  
<http://open.fdma.go.jp/hiyarihatto/Supplementary>, 2016.10.
- [7] 小笠原儀彦, 新藤貴久, 佐藤健司, 玄海嗣生, 熊野裕二, 暑熱環境下での主観的評価と客観的指標の関係について, *消防技術安全所報*, vol.51, pp.55-62, 2014.
- [8] 深作友昭, 三野正浩, 落合博志, 下畑行盛, 飯田稔, 消防活動モデルを用いた効率的な体力トレーニングに関する検証的研究, *東京消防庁消防科学研究所報*, vol.41. 2004.
- [9] 赤野史典, 青木千恵, 佐藤健司, 玄海嗣生, 各種防護衣を着用した消防活動時の隊員の生理学的負荷に関する検証, *東京消防庁消防科学安全研究所報*, vol.52, 2015
- [10] 原山金三, 野尻忠弘, 丸山勝幸, 石川高満, 消防活動と休憩時間に関する研究, *消防科学研究所報*, vol.22, 1985.
- [11] 山田羊一, 小原朗敬, 山田勝也, 飯田稔, 消防活動に適した体力トレーニングの検証的研究, *消防科学研究所報*, vol.38, 2001.
- [12] 伊藤昌夫, 正木豊, 小原朗敬, 消防活動の身体的負担に関する研究, *消防技術安全所報*, vol.35, 1998.
- [13] 北岡開造, 正木豊, 丸山勝幸, 消防活動時の労働負担に関する調査結果について, *消防科学研究所報*, vol.25, 1988.
- [14] 伊藤昌夫, 正木豊, 小原朗敬, 消防活動の体力管理に関する研究 (消防活動に適した体力のあり方), *消防科学研究所報*, vol.36, 1999.
- [15] 三野正浩, 吉田圭祐, 日高一誠, 下畑行盛, 火災室内の探索救助活動時における消防隊員の生理的・心理的变化に係る検証, *消防技術安全所報*, vol.45, 2008.
- [16] 三野正浩, 高井啓安, 日高一誠, 下畑行盛, 宮尾雄三, 消防職員用ウォーミングアップ及びクーリングダウンに係る検証, *消防技術安全所報*, vol.46, 2009.

- [17]北岡開造, 桜井高清, 正木豊, 石川高満, 高温・高湿度環境下で活動する消防隊員の水分補給に関する研究結果について, 消防科学研究所報, vol.28, 1991.
- [18]張替久雄, 森田吉保, 消防隊員の年代別活動能力に関する調査, 消防科学研究所報, vol.22, pp.92-100, 1985.
- [19] “Managing Physical Fitness”, The Chief Fire Officers Association,  
<http://www.cfoa.org.uk/firefit>
- [20]総務省消防庁, 消防白書(令和元年版), p195,  
<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/47787.html>
- [21]中住斉, 高橋渉, 菅原法之, 吉永直樹, 消防活動における無酸素能力について, 札幌市消防局消防科学研究所報, vol.15, 札幌市消防局消防科学研究所, pp.17-41, 2008.
- [22]国本由人, 辻英機, 富永勝彦, 空気呼吸器の軽量化及び長時間化について, 消防科学研究所報, vol.19, pp.82-86, 1982.
- [23]鳥居四郎, 野尻忠弘, 飯田稔, 石川高満, 軽量ボンベ及び鋼製ボンベ使用時の隊員の生理変化について, 消防科学研究所報, vol.25, pp.129-132, 1988.
- [24]安居院克巳, 鈴木照雄, 鎌形健司, 吉村延雄, 防火衣着用時の快適性の向上に関する研究, 消防科学研究所報, vol.42, pp.25-32, 2005.
- [25]岸田順次, 加藤和利, 吉田義実, 壁面昇降ロボットの開発について(第4報)-実用機の改良-, 消防科学研究所報, vol.31, pp.63-69, 1994.
- [26]相川行雄, 加藤和利, 加藤俊之, 吉田義実, 壁面昇降ロボットの開発について(第3報)-実用機-, 消防科学研究所報, vol.30, pp.71-80, 1993.
- [27]岸田順次, 矢ヶ崎孝, 米田雅一, ポンプ車の遠隔自動制御装置の開発について, 消防科学研究所報, vol.33, pp.97-107, 1996.
- [28]町田広重, 伊藤昌夫, 正木 豊, 山田羊一, 小原 朗敬, 消防活動における熱中症予防対策の研究, 東京消防庁消防科学研究所報, 消防科学研究所報, vol.37, pp.110-120, 2000.
- [29]物部博文, 村山雅己, 生野晴美, 中橋美智子, 頭部冷却による消防員装具のヒートストレス改善, 日本生理人類学会誌, vol.7(3), pp.9-13, 2002.
- [30]物部博文, 村山雅己, 生野晴美, 運動に伴う人体の蓄熱管理に関する研究-消防服着用時の体温上昇の予測と水冷による体温制御の可能性-, 横浜国立大学教育人間科学部紀要 14, 2012.
- [31]鈴木峻, 清水祐二, 清水鉄也, 新型防火衣のヒートストレス等の検証, 消防技術安全所報, vol.57, pp.60-70, 2020.

- [32]総務省消防庁, 平成 30 年度消防白書, pp.51-56, <https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/47787.html>
- [33]長田尚彦, 村山正博, 運動処方, 総合リハ, vol.23(3), pp.217-222, 1995.
- [34]Beaver, W.L. et al, Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation, *J. Appl. Physiol.*, vol.59, pp.1936-1940, 1985.
- [35]Heck, H. et al., Justification of the 4 mmol · l<sup>-1</sup> lactate threshold, *Int. J. Sports Med.*, vol.6, pp.117-130, 1985.
- [36]Hollmann, W., Historical remarks on the development of the aerobic-anaerobic threshold up to 1966, *Int. J. Sports Med.*, vol.6, pp.109-116, 1985
- [37]Yoshida, T., Relationship of lactate threshold and onset of blood lactate accumulation as determinants of endurance ability in untrained females, *Ann. Physiol. Anthropol.*, vol.5, pp.205-209, 1986.
- [38]Wasserman, K., McIlroy, M.B., Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise, *Am. J. Cardiol.*, vol.14, pp.844-852, 1964.
- [39]Wasserman, K. et al, Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise., *J. Appl. Physiol.*, vol.35, pp.236-243, 1973.
- [40]William L, Karlman Wasserman, Brian J Whipp, A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, *J. Appl. Physiol.*, 60-6, pp.2020-2027, 1986.
- [41]吉田敬義, 運動の指標としての AT, LT, OBLA の持つ意味, *体力科学*, vol.42, pp.406-414, 1993.
- [42]Rita F. Fahy, Jay T. Petrillo and Joseph L. Molis, *Firefighter Fatalities in the US – 2019, NFPA RESERCH*, 2020.
- [43]谷口興一編, 心肺運動負荷テスト-呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方-, 株式会社南江堂, pp.26-28, 1993.
- [44]目崎 登, スポーツ医学入門, 株式会社文光堂, pp.15, 2009
- [45]宮村実晴, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)出版部, pp.76, 2012.
- [46]宮村実晴, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, pp.80-83, 2012.
- [47]目崎登, スポーツ医学入門, 株式会社文光堂, pp.241-242, 2012.
- [48]好田敬義, 福場良之, 運動時の呼吸調節, *Ann. Physiol. Anthropol.*, vol.11(5), pp.479-493, 1992.
- [49]藤澤宏幸, 運動時の呼吸循環応答, *理学療法の歩み*, vol.26(1), pp.29-36, 2015.
- [50]日本体力医学会体力科学編集委員会, 運動処方の指針-運動負荷試験と運動プログラム-(原書第 8 版), 株式会社南江堂, pp.2-3, 2011.

- [51] Caspersen C.J., Powell K.E., Christenson G.M., Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research, *Public Health Reports.*, vol.100(2), pp.126-131, 1985.
- [52] Ainsworth B.E., Haskell W.L., Herrmann S.D., Meckes N., Bassett D.R., Jr Tudor - Locke C., Greer J.L., Vezina J., Whitt-Glover M.C., Leon A.S., 2011 Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol.43(8), p.1575-1581, 2011.
- [53] 国立健康・栄養研究所のホームページ, 改訂版「身体活動のメッツ(METs)表」, URL: <http://www.nibiohn.go.jp/eiken/programs/2011mets.pdf>, (参照:2020年5月22日).
- [54] 日本体力医学会体力科学編集委員会, 運動処方指針-運動負荷試験と運動プログラム-(原書第8版), 株式会社南江堂, pp.70-71, 2011.
- [55] 伊藤昌夫, 正木豊, 小原朗敬, 消防活動の体力管理に関する研究(消防活動に適した体力のあり方), *消防科学研究所報*, vol.36, 1999.
- [56] 山地啓司, 横山泰行, 持久性トレーニング(強度, 時間, 頻度, 期間)の最大酸素摂取量への影響, *体育学研究*, vol.32(3), pp.167-179, 1987.
- [57] Maritz JS, Morrison JF, Peter J, A practical method of estimating an individual's maximal oxygen uptake, *Ergonomics*, vol.4, pp.97-122, 1961.
- [58] Golding L.A., editor, *YMCA Fitness Testing and Assessment Manual*, Champaign (IL), Human Kinetics, 1989.
- [59] Stevenson, R., Wilsher, P., Sykes, PK., *Fitness for Fire & Rescue: Standards, Protocols and Policy*. FireFit Steering Group, 2009.
- [60] Cunningham D.A. and Hill J.S., Effect of training on cardiovascular response to exercise in women, *J. Appl. Physiol.*, vol.39, pp.891-895, 1975.
- [61] 小立鉦彦, MEの基礎知識と安全管理(改訂第4版), 南江堂, pp.93, 2008.
- [62] 手島哲彦, 塚田信吾, 中島寛, 特集 バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線 生体信号計測に向けた導電性複合材料, *NTT技術ジャーナル*, vol.28(6), p.36-39, 2016.
- [63] 河西奈保子, 小笠原隆行, 中島寛, 塚田信吾, 着るだけで生体情報計測を可能とする機能性素材 hitoe の開発及び実用化, *通信ソサイエティマガジン*, vol.41, p.17-23, 2017.
- [64] Yoji Yamato, Makoto Nakayama, Akihiro Chiba, Tomoki Masuda, Tokutaro Yoshida, Field Trial of Driver Management Application with Wearable Vital Sensor, *デジタルプラクティス*, vol.10(3), p.588-602, 2019.

- [65]作田 光浩, 石丸 園子, 樋口 雄一, “スマートセンシングウェア” を実現するフィルム状導電性素材, 精密工学会誌, vol.82(8), p.710-712, 2016.
- [66]武内良典, 劉載勳, 今井正治, 心疾患発症を検出するための就寝時心電計測システムの提案, 情報処理学会研究報告, 2016-ARC-219, No.37, pp.1-6, 2016.
- [67]長澤 潤, 秋月 拓磨, 神尾 郁好, 高橋 弘毅, 大前 佑斗, 章 忠, 生理・身体情報を用いたドライバ状態検出手法の検討, 第 60 回自動制御連合講演会, SuI1-1, 2017.
- [68]解良武士, 大武聖, 藍原章子, 奥山文男, 浅岡祐之, 猪股高志: ワイヤー式変位計を用いた呼吸運動測定器の校正方法の選択について, 理学療法- 臨床・研究・教育, vol.20(1), pp.77-82, 2013.
- [69]中曾爽香, 三田彰, 仮眠環境コントロールシステムのための小型ロボットを用いた呼吸数測定システムの開発, 日本建築学会技術報告集, vol.22(50), pp.365-368, 2016.
- [70]Kubota H, “History of blood pressure”, The Japanese journal of medical instrumentation, vol.80(6), pp.615-621, 2010
- [71]加藤雄樹, 濱口剛, 連続血圧計測を実現するセンサ技術, OMRON TECHNICS, vol.50(1), 2018.
- [72]柳元伸太郎, 今井靖, 酒造正樹, ロペズギョーム, 亀山裕美, 飯島勝矢, 秋下雅弘, 大内尉義, 矢作直樹, 山田一郎, ウェアラブルな血圧モニタリングシステムの医療現場での応用, IT ヘルスケア, vol.5(1), pp.65-68, 2010.
- [73]山下 武志, 心筋細胞の電気生理学 - イオンチャンネルから、心電図、不整脈へー, 株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル, p.39, 2002.
- [74]清野健, 山本義春, 心拍ゆらぎと健康, 科学, vol.75(12), pp.1417-1421, 2005.
- [75]Pagani M., Lombardi F., Guzzetti S., Romoldi O., Furlan R., Pizzinelli P, Sandrone G., Malfatto G., Dell'Orto S., and Piccaluga E., Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympathy-vagal interaction in man and conscious dog. *Circulation Research*, vol.59(2), pp.178-193, 1986.
- [76]Pomeranz B., Macaulay R.J., Caudill M.A., Kutz I., Adam D., Gordon D., Kilborn K.M., Barger A.C., Shannon D.C., Cohen R.J., and Benson H., Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol.248(1), pp.H151-H153, 1985.
- [77]Akselrod S., Gordon D., Ubel F.A., Shannon D.C., Berger A.C., Cohen R.J., Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, *Science*, vol.213(4504), pp.213-220, 1981.

- [78] Hon E.H., Lee S.T., Electronic evaluations of the fetal heart rate patterns preceding fetal death, further observations, *American Journal of Obstetrics & Gynecology*, vol.87(6), pp.814–26, 1965.
- [79] Sayers B.Mc.A., Analysis of heart rate variability, *Ergonomics*, vol.16(1), pp.17-32, 1973
- [80] Malik M., Bigger J.T., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J., Heart rate variability Standards of measurement physiological interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, vol.17(3), pp.354-381, 1996.
- [81] 林博史, 心拍変動の臨床応用－生理学的意義、病態評価、予後予測, 医学書院, p.32, 1999.
- [82] Hayano J., Sakakibara Y., Yamada M., et al, During variations in vagal and sympathetic cardiac control, *Am Physiol Heart Circ Physiol*, vol.258 pp.H642-646, 1990.
- [83] Lipsitz L.A., Ryan S.M., Perkaer J.S. et al, Hemodynamic and autonomic nervous system responses to mixed meal ingestion in healthy young and old subjects and dysautonomic patients with postprandial hypotension, *Circulation*, vol.87, pp.391-400, 1993.
- [84] Saul J.P., Arai Y., Barger R. et al, Assessment of autonomic regulation in congestive heart failure by spectral analysis, *Am J Cardiol*, vol.61, pp.1292-1299, 1988.
- [85] Kleiger R.E., Miller J.P., Bigger J.T., Moss A.J., Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction *Am J Cardiol*, vol.59(4), pp.256-262, 1987.



## 第2章 実験方法

### 2.1 緒言

本研究では、身体負荷試験を実施し、酸素摂取量・血中乳酸値等の生理情報、心拍数や呼吸数等の生体情報を計測した。

これらの実施にあたり、横浜国立大学臨床研究倫理審査会の承認を得た後、研究協力者に本研究の趣旨を十分に説明し、書面にて同意を得た。また、研究協力者に対し、実験を自らの判断で中断してかまわないこと、安全管理者が試験継続不可と判断した場合に、直ちに試験を中断することを伝えた。

本章では、試験方法に焦点を絞り、それぞれの試験の身体負荷条件について考慮した事項を 2.2 節、それぞれの身体負荷試験の実施方法を 2.3 節、生理情報、生体情報の計測方法を 2.4 節に記載する。次に、身体負荷試験を設定するにあたり考慮した試験条件について述べる。

### 2.2 身体負荷条件

健康の維持・増進のために日常の運動習慣を与える「運動処方」の分野[1-3]では、身体負荷を設定する際に必要な要素として、FITT (Frequency (頻度)、Intensity (強度)、Time (時間)、Type (種類)) が挙げられている。本研究では、身体負荷の「強度」、「時間」および「種類」の3要素を、各試験目的にあわせて設定する必要がある。そこで、本節では、実施した試験の身体負荷内容、特に身体負荷強度および負荷時間と種類について、それぞれの身体負荷試験の目的を達成するために考慮した事項について述べる。

#### 2.2.1 身体負荷強度

第1章で述べたように、運動強度の指標は、ある身体負荷強度における酸素摂取量が安静時酸素摂取量の何倍にあたるかを示す代謝当量が一般的に用いられている。トレッドミルなどの標準的な負荷器具については、アメリカスポーツ医学会 (The American College of Sports Medicine, ACSM) のガイドライン[4, 5]で、代謝当量の推定式が公表されている。この関係式を活用して得られる推定代謝当量をもとに実施する負荷内容を事前に設定することが出来る。本研究で実施した身体負荷試験は、第1章で述べた国立健康・栄養研究所で公開されている様々な身体活動での代謝当量[6, 7]の項目中で、「消防士」に該当する9 METsを目安として身体負荷強度を設定した。

### 2.2.2 身体負荷の継続時間

身体負荷に対する心拍数や呼吸代謝情報の応答は、個人の体力による時間遅れが存在する[8, 9]。そのため、身体負荷の継続時間は応答時間を考慮した時間を設定しなければ、その身体負荷に対応した生体に関する情報を得ることはできない。その必要な時間は、身体負荷強度の大きさ、対象とする生理情報、生体情報にも依存するが、本研究で用いる重要な生理情報である酸素摂取量は、一般的に一定の身体負荷強度の有酸素運動を実施すると2~3分以内に定常状態に達する[10-13]と報告されていることから、それ以上の長さの負荷継続時間が必要と考えた。また、詳細は第3章で述べるが、本研究では生体情報の一つとして取得した心電位から特定した心拍変動の周波数解析に必要な時間間隔として3分間のデータ長を必要としたことから、最低の負荷継続時間を6分間とした。

### 2.2.3 身体負荷の種類

自転車エルゴメータは、下記のような特徴があることを考慮し[14]、特に複数の身体負荷に対する血中乳酸値の計測を実施したい場合、疲労困憊による転倒が懸念される場合に実施した。

- (1) 実験協力者にとって能動的な負荷であり、協力者の意思により中断が行いやすく、消防隊員のように日々体力錬成を行っていない一般人が疲弊した場合にも転倒の危険性が少ない。
- (2) 省スペースで、且つ重量物を使用しないため、転倒の危険性が無く不慣れた素人でも安全に身体負荷活動を実施できる。
- (3) 基本的に下肢を中心とした身体負荷活動であり、上部がある程度固定されていることから、様々な生理情報や生体情報を安定して計測しやすい。

次にトレッドミルは、下記のような特徴があることを考慮し、特に身体負荷に対する呼吸に関する情報に関する検討を実施したい場合に実施した[14]。

- (1) トレッドミルでの運動は通常の歩行運動を基本としているため、慣れによる実験結果への影響が自転車エルゴメータより少ない。
- (2) トレッドミルでの運動は全身運動であるため、足の疲労や全身疲労が発生する前に、より高い酸素摂取量を取得できることから、呼吸代謝情報と運動身体負荷強度、心拍数の関係を検討するのに適している。

また、往復持久走は、下記のような特徴があることを考慮し、特に活動限界に至るまでの呼吸代謝情報を取得したい場合に実施した。

- (1) 漸増的に負荷を上昇させるため最大運動付近まで追い込みやすい[15]。
- (2) 全身運動であり最大運動付近の呼吸代謝情報の取得に適している。
- (3) 協力者の体力に依存せず比較的安全に、統一した手続きで身体能力の限

界付近まで追い込むことが可能である。

(4) トレッドミルと異なり、身体負荷は協力者が能動的に行うことになることから安全に活動を停止することが容易である。

(5) 現在では一般的であり、試験方法に慣れている協力者が多い。

以上のような事項を考慮し、本試験で実施した Tests 1, 3, 5, 6 では自転車エルゴメータを、Test 2 ではトレッドミルを、Test 4 では往復持久走を選定した。設定した試験条件を 2.3 節に示す。

## 2.3 試験内容

本研究では、消防隊員の身体負荷状況評価のため、7種類の身体負荷試験を実施した。まず、心電情報から得られる指標が、身体負荷を継続して課された状態でどのような変化を示すかを検討するために、心拍一定負荷試験 Test 1、間欠式三段階負荷試験 Test 2 を、身体負荷強度の変化に対して、生理情報、および生体情報がどのような変化を示すかを検討するために、間欠式漸増負荷試験 Test 3、連続式漸増負荷試験 Test 4 を実施した。

表 2.1 実施した身体負荷試験

試験名	漸増/一定	連続/間欠	負荷段階	負荷方法
Test 1 心拍数一定保持試験	一定	連続	1	自転車エルゴメータ
Test 2 間欠式三段階負荷試験	漸増	間欠	3	トレッドミル
Test 3 間欠式漸増負荷試験	漸増	間欠	5~7	自転車エルゴメータ
Test 4 連続式漸増負荷試験	漸増	連続	多段階	往復走
Test 5 間欠式一定負荷試験	一定	間欠	3~5	自転車エルゴメータ
Test 6 連続式一定負荷試験	一定	連続	1	自転車エルゴメータ
Test 7 模擬消防活動試験	消防活動を模擬した様々な負荷			トレッドミル 踏台昇降

次に、高強度の身体負荷により、活動継続不能へと至る際に、生理情報および生体情報がどのような変化を示すかを検討するために、間欠式漸増負荷試験 Test 3、連続式漸増負荷試験 Test 4、間欠式一定負荷試験 Test 5、連続式一定負荷試験 Test 6 を実施した。最後に、提案する身体負荷状況の評価手法が実際の消防活動中においても適用可能かを検証するために、模擬消防活動試験 Test 7 を実施した。

### 2.3.1 心拍一定保持試験 (Test 1)

耳朶に装着した光電式心拍センサからの心拍数データを基に心拍数を一定のレベルに保つようペダル負荷を自動的に制御するフィードバック制御機能を有する自転車エルゴメータを用いて、任意に設定した目標心拍数に保持する心拍一定保持試験 (Test 1) を実施した。

身体負荷強度および心拍数の経時変化の代表例を図 2.1 に示す。なお、負荷の継続時間は目標心拍数に達してから 30 分とした。

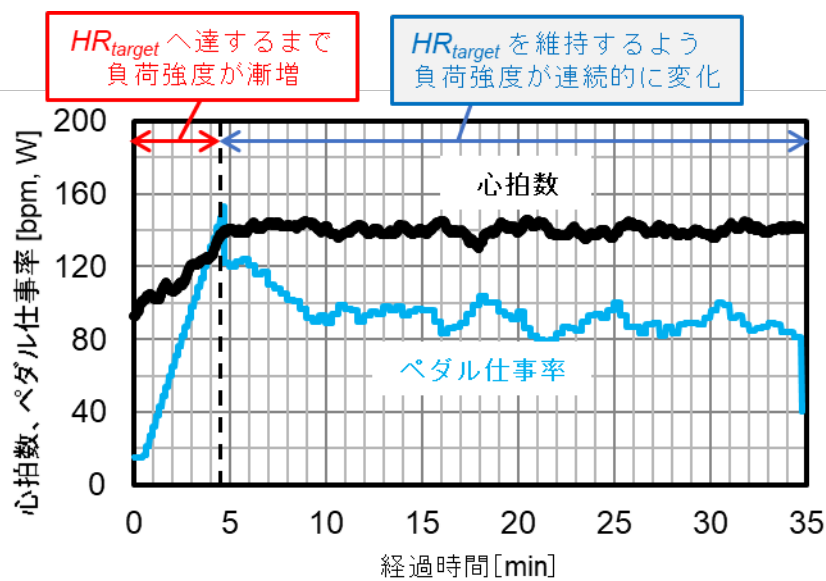


図 2.1 Test 1 における身体負荷強度の変化

協力者は、21, 25, 30, 53 歳の一般男性 4 名、熱的な負荷を避けるために通常の運動服とし、26°C に設定した室内で実施した。自転車エルゴメータは、株式会社コナミスポーツ&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。

### 2.3.2 間欠式三段階負荷試験 (Test 2)

1 呼吸につき 1 点しか取得できない呼吸データを数多く取得するために、負荷継続時間を十分確保し、各身体負荷の間に休憩を設けることで間欠的に身体負荷強度を増加させた間欠式三段階負荷試験 (Test 2) を実施した。

身体負荷は、低強度、中強度、高強度を意図した 3 段階とし、トレッドミルの速度と傾斜を変更することで身体負荷強度を変化させた。各身体負荷強度の活動継続時間は 15 分間、次の負荷活動までの休憩は 10 分とした。身体負荷強度の経時変化を図 2.2 に示したように、一段目は傾斜無しの歩行速度 3 km/h、二段

目は傾斜 10%の歩行速度 5 km/h、三段目は 15%の歩行速度 5 km/h と、徐々に身体負荷強度を増加させた。試験開始から終了までの手順を表 2.2 に、試験中の様子を図 2.3 に示す。

間欠式三段階負荷実験の協力者は、年齢層の異なる男性 2 名（23 歳、58 歳）である。服装は身体への熱的負荷を排除するため通常の運動服とし、26°Cに設定した室内で実施した。トレッドミルには HORIZON FITNESS Co. ltd.製 Elite T 5000 を使用した。

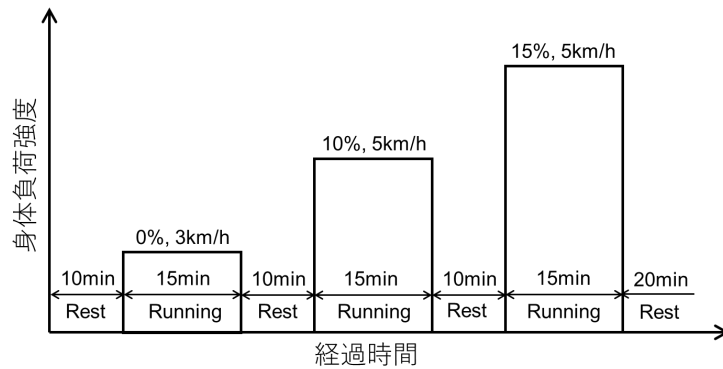


図 2.2 Test 2 における身体負荷強度の変化

表 2.2 間欠式三段階漸増負荷試験（Test 2）手順

手順	
(1)	安静座位 : 10 min
(2)	負荷 I 3 km/h, 0 % slope : 15 min
(3)	安静座位 : 10 min
(4)	負荷 II 5 km/h, 10 % slope : 15 min
(5)	安静座位 : 10 min
(6)	負荷 III 5 km/h, 15 % slope : 15 min
(7)	安静座位 : 20 min



図 2.3 Test 2 身体負荷実施の様子

### 2.3.3 間欠式漸増負荷試験（Test 3）

身体負荷強度の変化に対する生体情報および生理情報の応答をより詳細に検討するために、図 2.4 に示したように各協力者の運動能力に合わせて設定した初期負荷から自転車エルゴメータのペダル負荷を 20 W ずつ漸増させた間欠式漸増負荷試験（Test 3）を実施した。

実験協力者が実施した身体負荷強度は、前述のように身体負荷強度は協力者により異なり、表 2.3 に示すように 40 ~ 220 W の範囲であった。各負荷段階での負荷活動時間は生体情報と生理情報の応答とその解析に最低限必要な時間である 6 分間、負荷と負荷の間に 2 分間の休憩を設けた。

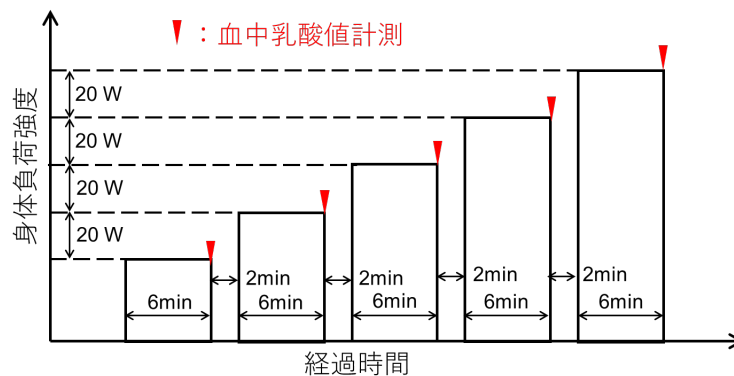


図 2.4 Test 3 における身体負荷強度の設定

協力者は表 2.3 に示すように 20 歳から 63 歳までの一般男性 9 名と 31 歳の消防隊員 1 名の計 10 名で、服装は通常の運動服とし、26°C に設定した室内で実施した。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 - ex とエアロバイク 75XLIII (株)コナミスポーツクラブ）を使用した。

負荷活動試験中の協力者の瞬時心拍数をリアルタイムでモニタリングし、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直ちに実験を中断し、呼吸代謝計測用のマスクを取り外した。

表 2.3 Test 3 における協力者の身体負荷強度

協力者	年齢	身体負荷強度 [W]	所属
3A	20	80 - 180	Student
3B	31	100 - 200	Firefighter
3C	63	60 - 160	Officer
3D	22	60 - 140	Student
3E	53	40 - 120	Officer
3F	38	100 - 220	Officer
3G	22	120 - 220	Student
3H	25	40 - 140	Student
3I	25	80 - 160	Student
3J	25	60 - 160	Student

#### 2.3.4 連続式漸増負荷試験 (Test 4)

運動強度の増加に伴って起こる好気性代謝から嫌気性代謝が卓越する点（詳細については 4 章で述べる）を呼吸代謝情報から推定し、その前後で生体から得られる情報がどのような変化をするのかを検討するために、負荷とその次の負荷の間に休憩を設けず、段階的にかつ連続的に活動継続限界まで、負荷を増加させた連続式漸増負荷試験 (Test 4) を実施した。

Tests 2, 3 に比べ短時間で急激に身体負荷強度を上昇させる身体活動として、20 m シャトルランを採用した。20 m シャトルランは、20 m の区間を往復して走り、約 1 分ごとに折り返しの時間間隔が短くなる往復持久走である。シャトルランは、開始と同時に 8.0 km/h の走行という比較的高強度の身体負荷を要求するため、本研究では、シャトルラン開始前に一定時間の歩行し、その後に往復持久走を継続した。これにより、低強度から高強度まで一連の身体負荷での呼吸代謝情報および心電位を取得した。身体負荷強度の経時変化と実験手順を図 2.5 および表 2.4 に示す。

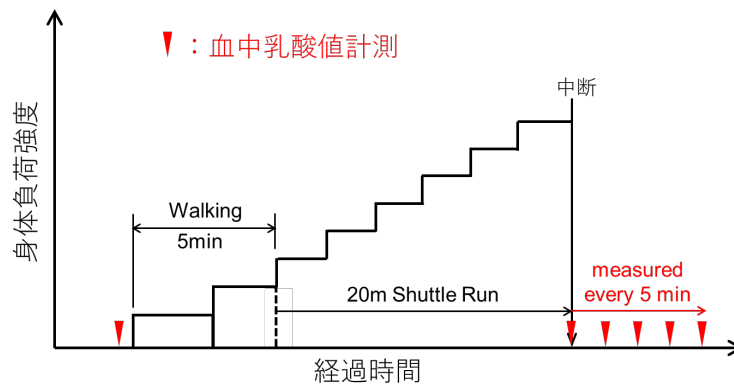


図 2.5 Test 4 身体負荷強度の設定例

表 2.4 連続式漸増負荷試験 (Test 4) 手順

手順	
(1)	所属の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメット、革手袋およびすべての測定器を装着（靴は通常の運動靴とした）
(2)	座位状態で血中乳酸値を測定後、その状態で 5 分間安静
(3)	5 分間歩行（通常歩行 3 分間＋速足歩行 2 分間）
(4)	歩行終了直後、往復持久走を開始
(5)	往復持久走中断後、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

協力者は、横浜市消防局に勤務する男性職員 17 名（21～53 歳, JPFFs）および Lancashire Fire and Rescue Service に勤務する 5 名（37～50 歳, UK FFs）である。横浜市消防局での測定は、2015 年 11 月 16 日～12 月 1 日の 9:00～15:00 に横浜市消防局消防訓練センターで、Lancashire Fire and Rescue Service での測定は、2015 年 10 月 12 日～16 日の 9:00～12:00 に Lancashire Fire & Rescue Service, International Training Centre にてそれぞれ実施した。いずれの協力者も、各所属消防局の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメット、皮手袋を装着したが、呼吸代謝用マスクで足元が見づらいことから、防火靴ではなく通常の運動靴とした。また、空気呼吸器用ボンベの取付枠に呼吸代謝情報の計測器を取り付けたハーネスを背負い実施した。図 2.6～2.8 に実施の様子と装着した装備を示す。

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直ちに実験を中断し、呼吸代謝計測用のマスクを取り外した。





図 2.6 Test 4 実施の様子



図 2.7 防火衣・防火ズボン・防火ヘルメット・皮手袋（横浜市消防局）



図 2.8 空気呼吸器用ボンベと背負具  
(空気ボンベを取り外した背負具に呼吸代謝測定装置を固定)

### 2.3.5 間欠式一定負荷試験 (Test 5)

本研究で提案する消防活動支援手法において設定した閾値の妥当性を検証す

るために、一定の高強度の身体負荷を活動継続不能に至るまで繰り返す間欠式一定負荷試験（Test 5）を実施した。

Test 3 で活動限界に至った身体負荷強度を参考に、各協力者が複数回実施可能な身体負荷強度で 6 分間活動し、直後の 2 分間の休憩を加えた 8 分間を 1 サイクルとし、活動継続不能に至るまで自転車エルゴメータを用いて負荷を繰り返した。身体負荷強度の経時変化を図 2.9 に示す。

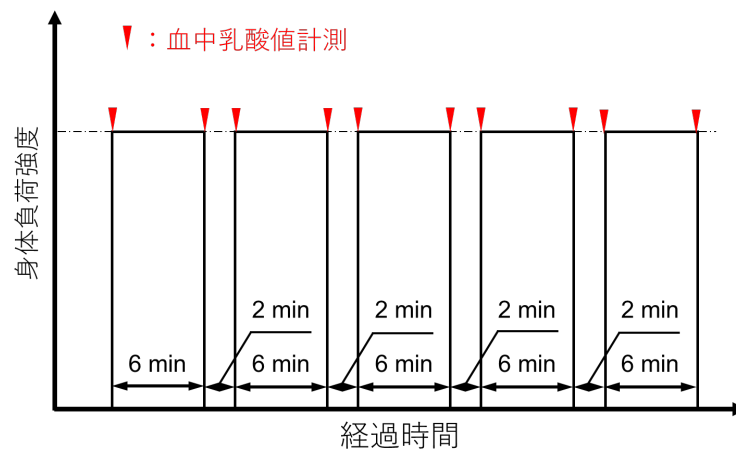


図 2.9 Test 5 身体負荷強度の設定

表 2.5 Test 5 における協力者の身体負荷強度

協力者	年齢	身体負荷強度[W]	所属
5A	20	160	Student
5B	22	160	Student
5C	38	240	Officer
5D	22	200	Student
5E	25	160	Student
5F	25	140	Student

表 2.5 に示したように、協力者は 20 歳から 38 歳までの一般男性 6 名である。服装は通常の運動服とし、26°C に設定した室内で実施した。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-ex とエアロバイク 75XLIII (株)コナミスポーツクラブ）を使用した。負荷試験中は協力者の心拍数をリアルタイムでモニタリングし、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直ちに実験を中断し、呼気代謝計測用のマスクを取り外した。

### 2.3.6 連続式一定負荷試験 (Test 6)

消防活動支援手法にもとづき活動継続中止の判定が下された後に、安全な場所まで隊員が戻るだけの能力が確保できるかを検討するために、一定の高強度負荷を活動継続不能に至るまで継続する連続式一定負荷試験 (Test 6) を実施した。

身体負荷強度の経時変化と実験の様子を図 2.10、図 2.11 に示す。ウォーミングアップおよび自転車エルゴメータに対する慣れを促す目的で、自転車エルゴメータのペダル重さ変更し、軽強度の一段階目を設けた。

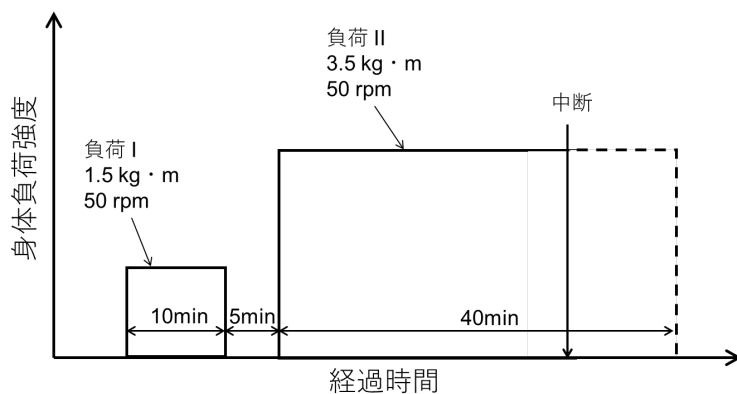


図 2.10 Test 6 身体負荷強度の設定



図 2.11 Test 6 実施の様子

10 分間の非常に軽強度の負荷（1.5 kg・m, 50 rpm, 負荷 I）を実施後、5 分間の休憩を挟んで、高強度負荷（3.5 kg・m, 50 rpm, 負荷 II）を最大 40 分間として実施した。Test 5 と異なり、本試験で身体負荷強度は全ての協力者で同じとした。

協力者は横浜市消防局に勤務する男性職員 15 名（21 ~ 53 歳）である。防火靴の代わりに通常の運動靴とした以外は、出動時の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメット、革手袋を装着した。実験は気温 30℃、湿度 60~70% に設定した人工気候室（主気候室）で実施した。室内のレイアウトを図 2.12 に示す。主気候室と準備室は、それぞれ個別に温湿度調整が可能である。夏季を想定した主気候室入室前に気温 25℃、湿度 50~60% 前後に設定した準備室で血中乳酸値等の生理情報の取得を行う間、協力者は座位状態で 20 分間滞在した。

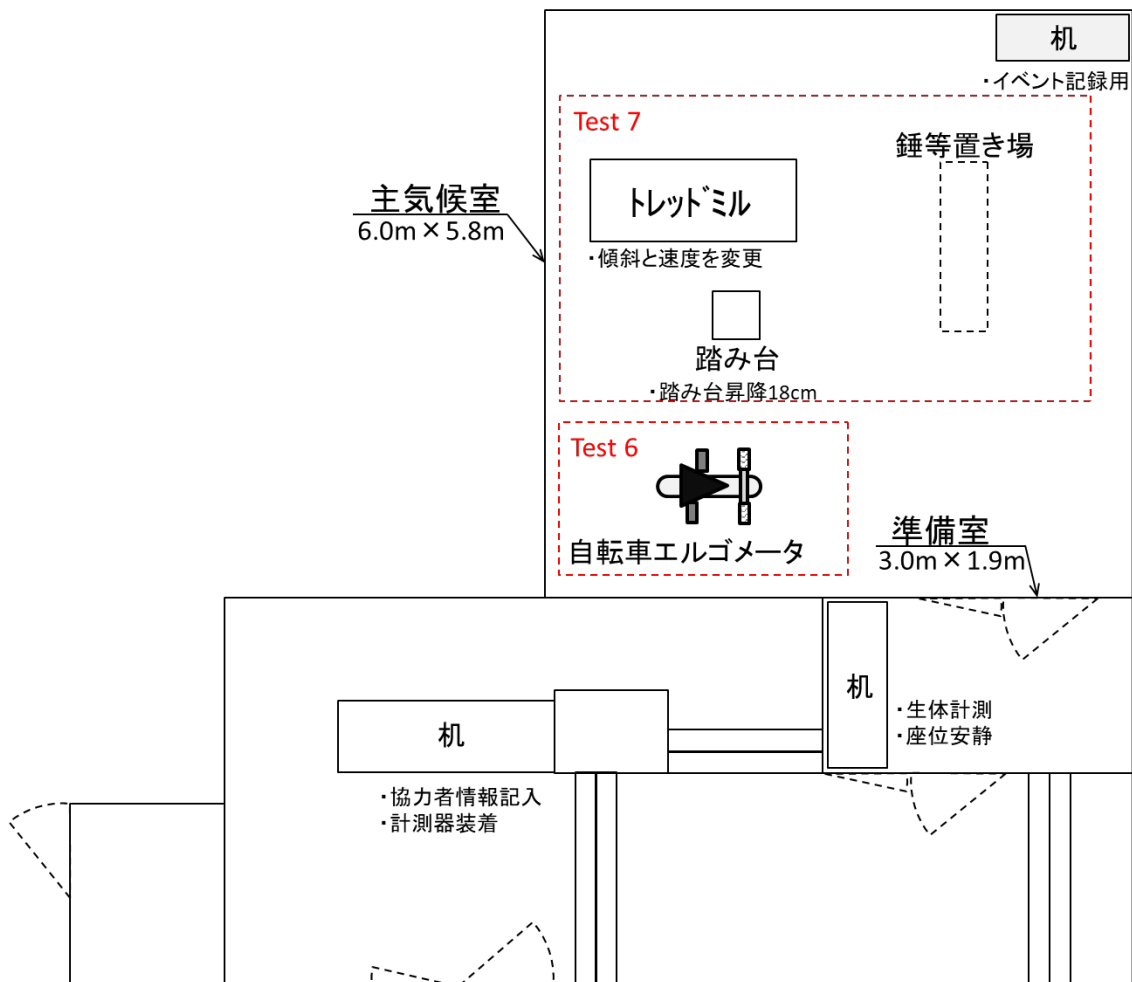


図 2.12 人工気候室内レイアウト

負荷活動中の協力者の瞬時心拍数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、協力者からの自己申告があった場

合、ペダル回転数を一定に維持することが困難となった場合のいずれかの条件が該当した時点で実験終了とし、血中乳酸値を測定するとともに呼気代謝計測用のマスクを取り外した。

### 2.3.7 模擬消防活動試験（Test 7）

消防活動が隊員の心肺機能や肉体にどのような負荷がかかっているのかを、負荷の程度と生体から得られる情報との関係を示すデータを安定した条件下で再現性よく積み重ねることができること、各活動におけるデータ解析が実施できるだけの十分な時間が確保された活動で構成されていること、消防活動支援手法における活動継続注意および活動継続停止警告等の閾値を決定するための信頼性の高いデータを取得できることを条件とした模擬消防活動試験（Test 7）を実施した。

理想的には、現場で活動隊員中の心肺機能に係わる各データを入手することが望ましい。しかし、実際の消防活動は、出動の度に活動内容が変化すること、各隊員の詳細な活動記録を入手することが非常に困難である。このため、同一の活動下でのデータを積み重ねることが不可能であるため、標準的な消防活動の身体負荷強度を再現する模擬消防活動モデル[16, 17]に従った試験を実施した。

第 1 章で述べたように、消防活動の身体負荷強度は、活動対象となる建築物の階高や用途の影響を受ける。消防法 8 条の 2 および、建築基準法第 55 条を参考にすると、建築物は高層建築物、中層建築物、低層建築物に分類することができる。図 2.14 に示すように、日本では 31m を超える建築物は高層建築物とされ、基本的に非常用の昇降機（消防活動用のエレベータ）の設置が要求される。そのため、非常用の昇降機の設置が要求されていない中層建築物での消防活動は、20kg もの一連の装備を装着して、階段を介しての機材重量物や要救助者の搬送となるため、消防隊員への身体的負担が最も大きい考えられる。そこで、図 2.13 に示す横浜市消防局消防訓練センター内にある 8 階建ての中層建築物（中層建屋）での消防訓練での消防隊員の活動記録をもとに、模擬消防活動モデルは作成された[18]。



図 2.13 消防活動訓練を実施した 8 階建て中層建屋  
(横浜市消防局消防訓練センター内)

建築物	高層建築物	中層建築物	低層建築物
高さ	$\geq 31\text{m}$ (およそ11階建)	$31\text{m} > H > 12\text{m}$	$12\text{m} \geq$ (主に1~3階建)
非常用エレベータ 設置	基本的に必要 (緩和条件あり)	不要	不要
消防活動の 身体負荷	中	高	低

図 2.14 建築物の高さによる消防活動の身体負荷強度比較

8 階建て中層建屋での消防訓練では、4 階で出火し 6 階まで延焼、4 階から 6 階に要救助者が残されているとの火災シナリオのもと、屋内階段を利用したのホース延長後、消防車両から送水、要救助者の搬送等を実施した。中層建屋内に設置されたビデオ映像を基に、建屋内での消防活動を主に担当した隊員 2 名の活動内容が分析され、中層建屋での立体的な消防隊員の動きを、室内で実施可能な 13 項目の平面的な活動へ置き換えた 26 分間の身体活動メニューへと読み替えた。それぞれの活動項目と読み替え手法の概要を表 2.6 に示す。ここで、消防活動における身体活動を再現するため、消防ホース展開作業の代わりに 10kg の重りが、照明器具の代わりに 24kg の吊り下げの重りを使用した。要救助者 1 名当たり 2 名で搬送したことから、要救助者の半分の重さを想定し、25kg の砂のナップザックを使用した。消防隊員の立体的な移動による身体負荷は、トレッドミルの傾斜角度と速度で再現され、階段の昇降は、踏み台昇降に置き換えた。使

用した錘等を図 2.15 に示す。

表 2.6 模擬消防活動モデル

中層建屋での消防活動訓練		策定した模擬消防活動モデル	
① 現場到着	1F	① 開始	1分
② 空気呼吸器装着		② 空気呼吸器装着	
③ ホース搬送	1F→4F	③ $\phi 50\text{mm}$ ホース2本 (7 kg×2個) トレッドミル (傾斜10%, 5 km/h)	3分
④ ホース延長	4F→5F	踏み台昇降 (ステップ高さ: 18 cm)	1分
⑤ 要救助者発見	5F	④ 10 kg (5 kg×2個) の錘を持つ トレッドミル (傾斜10%, 4 km/h)	3分
⑥ 要救助者搬送	5F→1F	踏み台昇降 (ステップ高さ: 18 cm)	1分
⑦ 意識の再確認	1F	⑤ 要救助者①に接触、バイタル確認	1分
⑧ 資機材搬送	1F→5F	⑥ 25 kgのナップサックを前面で抱える トレッドミル (傾斜0%, 2 km/h)	3分
⑨ 照明活動	5F	⑦ 要救助者①のバイタル再確認	1分
⑩ 救助活動へ移行	5F→6F	⑧ 24 kg (12 kg×2個) の吊り下げ錘を持つ トレッドミル (傾斜10%, 3 km/h)	3分
⑪ 要救助者発見	6F	踏み台昇降 (ステップ高さ: 18 cm)	1分
⑫ 要救助者搬送	6F→1F	⑨ 発電機起動, 照明活動	2分
⑬ 活動終了	計25分	⑩ トレッドミル (傾斜10%, 5 km/h)	2分
		⑪ 要救助者②に接触、バイタル確認	1分
		⑫ 25 kgのナップサックを前面で抱える トレッドミル (傾斜0%, 2 km/h)	3分
		⑬ 活動終了	計26分

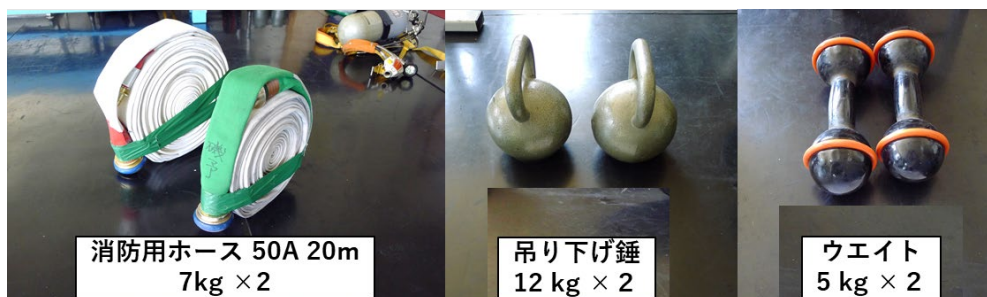


図 2.15 消防活動における身体負荷再現のために使用した錘

同一人物の心拍数と体温 (外耳温) の経時変化の比較から、この実践的な模擬消防活動を標準化した模擬消防活動試験の再現性が確認されてる[17, 18]。

Test 7 の身体負荷強度の経時変化を図 2.16 に、試験の様子を図 2.17 示す。図 2.16 に緑で示した部分の高さは、身体的動作による身体負荷強度に、黄色で示した部分の高さが、それぞれの錘等の重量に対応する。

協力者は横浜市消防局に所属する 19 歳から 59 歳の 78 名の消防隊員である。実験は、初夏を再現した気温 30°C、湿度 70%に設定した人工気候室で実施した。

室内のレイアウトを図 2.12 に示す。服装は図 2.6 に示した防火靴の代わりに通常の運動靴とした以外は、通常の勤務時と同様、活動着の上に出動時の防火衣、防火ズボン、防火ヘルメット、革手袋を装着した。また、活動中の装備重量を再現するために、図 2.8 に示したような空気呼吸器用ポンペを装着して実施した。しかし、空気マスクは視界確保のため、装着しなかった。

次節では身体負荷試験と同時に実施した生体計測に焦点を絞り、本研究において実施した計測項目について、その詳細を述べる。

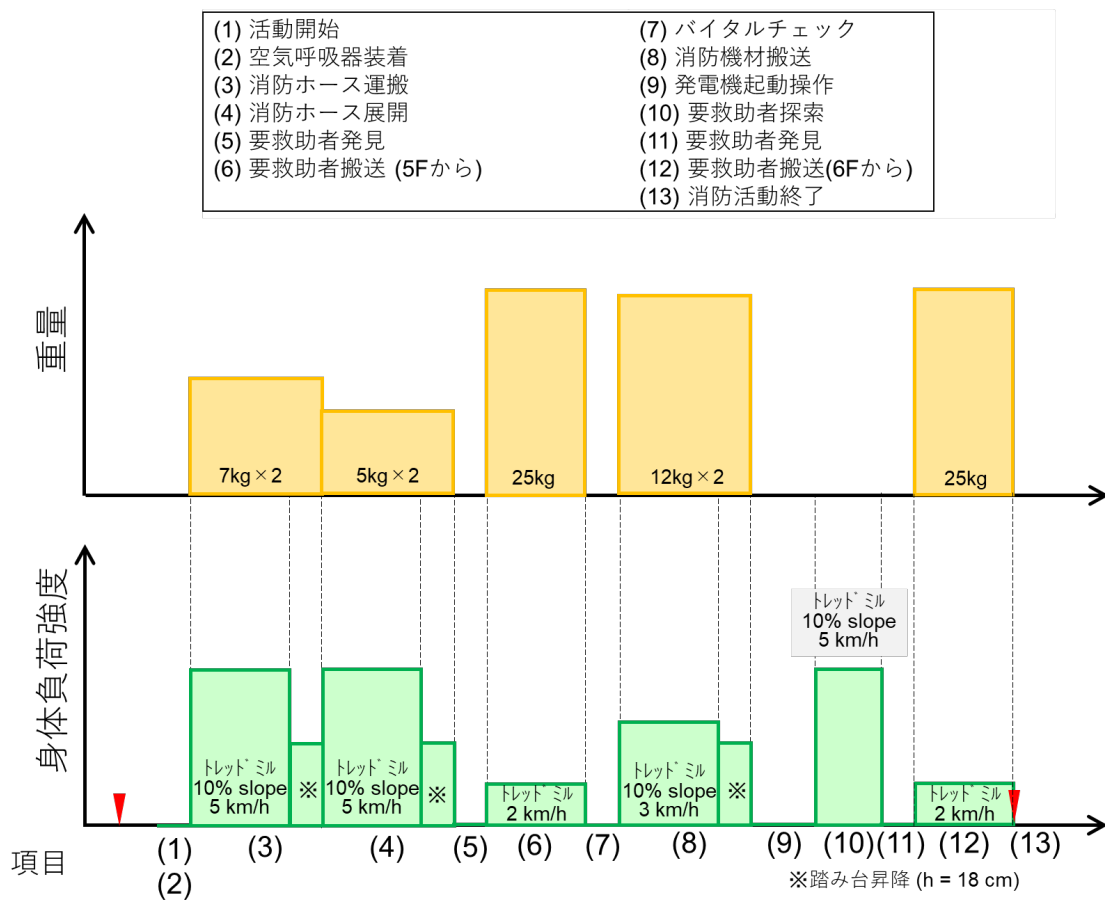


図 2.16 Test 7 における身体負荷強度の設定





図 2.17 Test 7 身体負荷実施の様子

## 2.4 計測項目の設定と計測方法

身体負荷試験で取得した生理情報と生体情報をそれぞれの表 2.7 に示す。

表 2.7 各試験で取得した生理情報、生体情報一覧

項目		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
計測した情報	得られる指標							
心電位	RR 間隔	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
外耳温度		◎	◎	×	◎	×	◎	◎
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	×	◎	◎	◎	◎	◎	×
血中乳酸値		×	×	○	前後	○	前後	前後
動脈血中酸素飽和度(SpO <sub>2</sub> )		×	×	◎	×	◎	×	×

※◎：連続計測、○：間欠計測、前後：実験前と終了直後の計測

第 1 章で述べたように、心電位は消防活動中にも非侵襲的に取得出来ることが期待される生体情報であり、身体負荷に対する心臓の応答を評価できる。本研究では、最も重要な生体から得られる情報であることから、心電位計測は全ての身体負荷試験で実施した。

外耳温度は、外耳道に赤外線センサプローブを挿入することで得られる深部体温に近い体温である。間欠式漸増負荷試験 Test 3 および間欠式一定負荷試験 Test 5 を除く試験で計測した。

呼吸代謝情報は、身体負荷強度の変化による生体内のエネルギー代謝に関する情報を得ることが出来る生理情報である。心拍一定保持試験 Test 1 および、消防活動における身体負荷強度を再現した模擬消防活動試験 Test 7 を除く、全ての身体負荷試験で計測した。

血中乳酸値は、呼吸代謝情報と同じく生体内のエネルギー代謝に関する情報を得ることが出来る生理情報である。心拍一定保持試験 Test 1 および呼吸代謝情報の取得を目的とした間欠式三段階負荷試験 Test 2 を除く全ての身体負荷試験で計測した。

動脈血中酸素飽和度は、血液中の総ヘモグロビンのうち、酸素と結合したヘモグロビンが占める割合である。身体負荷中のエネルギー代謝と酸素需要に関する検討を補助する目的で、間欠式漸増負荷試験 Test 3 および間欠式一定負荷試

験 Test 5 で計測した。各身体負荷試験で使用した計測器を表 2.8 に示すとともに、次節ではそれぞれの生理情報と生体情報の計測方法の詳細を述べる。

表 2.8 各試験で使用した測定項目と計測器の一覧

計測器			Test						
測定項目	型番	製造会社	1	2	3	4	5	6	7
心電	AC301A	Armel Electronics, Inc.	○	○					○
	DL310	(有)エスアンドエムイー			○	○	○	○	○
体温	DBTL-1-	テクノリスト株式会社	○	○					○
	DL242	(有)エスアンドエムイー				○		○	○
呼吸代謝	FIT2000	COSMED Srl		○					
	VO2000	(有)エスアンドエムイー			○	○	○	○	
血中乳酸	Lactate Pro	アークレイ株式会社			○	○	○	○	○
SpO <sub>2</sub>	PULSOX-300i	コカミノルタジャパン株式会社			○		○		

#### 2.4.1 心電情報の取得

心電情報は 2 種類の計測器のいずれかで計測した。2 種類の計測装置の計測システム概要を図 2.18 に、計測装置を図 2.19 に示す。

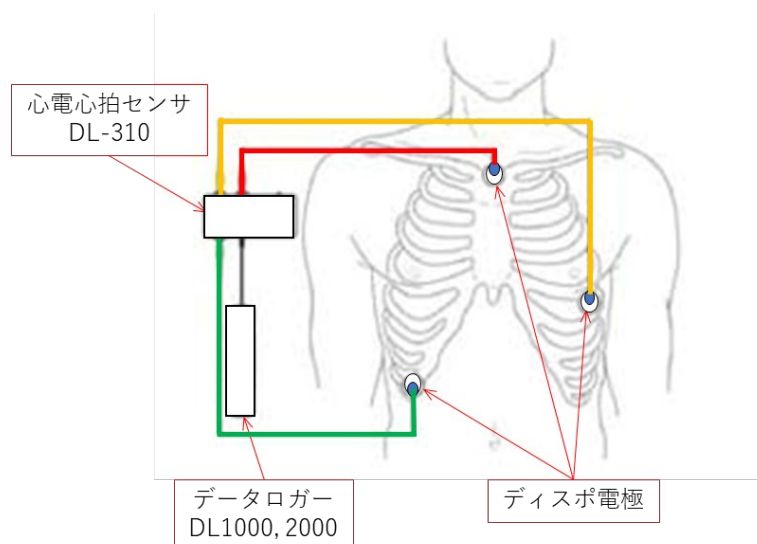


図 2.18 心電計測システム系統図(有)エスアンドエムイーホームページより引用)

<http://www.sandme.co.jp/sensor.html>

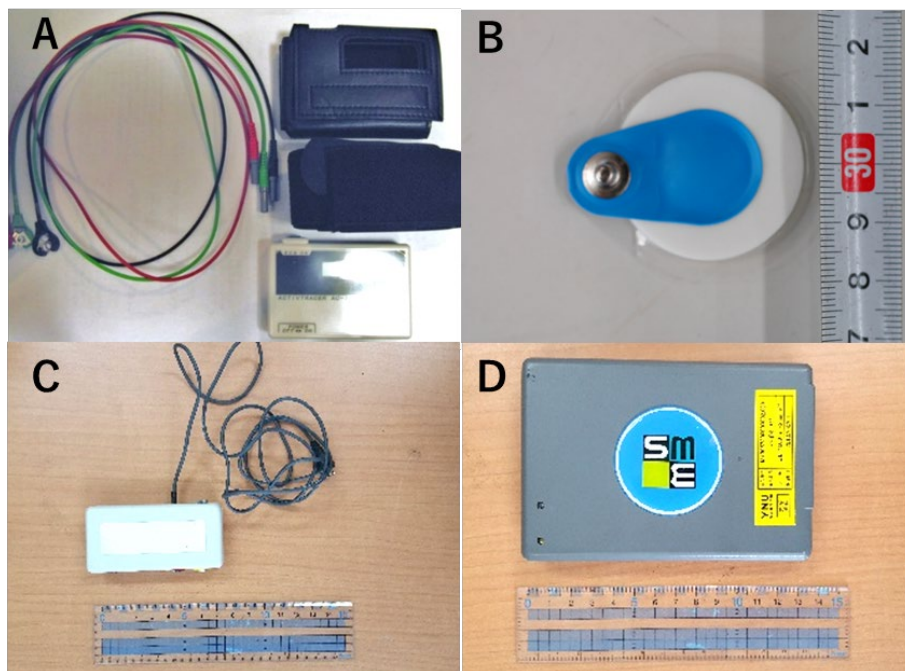


図 2.19 心電計測機器

A : ホルター心電計 AC-301A

B : ディスポ電極 Blue Sencer SP-00-A Ambu A/S

C : 心電心拍センサ DL310

D : データロガー DL1000

心電位情報は胸部に配置したディスポ電極を用いて取得した。日常的な長時間の計測に用いられるホルター心電計で主に用いられる配置方法には、いくつかあるが今回、骨格筋による影響が少ないCM<sub>5</sub>誘導[19]の電極配置で計測した。電極取付位置はアルコール綿で体表面の油分や汚れを十分に落とし、体毛を避けて設定した。

ホルター心電計 (AC301A, Armelectronics 社製) は、1 msec 間隔で連続計測した心電位から求めた RR 間隔を本体内に自動的に記録した。その後、PC へ接続することで、RR 間隔を取り込んだ。

心電心拍センサ (DL-310, (有)エスアンドエムイー) は、2 msec 間隔で心電位を取得し、データロガー (DL-1000, 2000, 3100, (有)エスアンドエムイー) を経由して PC へ自動的に記録した。その後、取得した心電位を、PC 内で時系列解析ソフト MemCalc/Win (株式会社ジー・エム・エス) を用いて、心電位データから RR 間隔を検出した。

## 2.4.2 呼吸代謝情報の取得

呼吸代謝情報は2種類の計測器を用いて測定した。計測の様子を図 2.20 に、計測装置を図 2.21 に示す。



図 2.20 呼気ガス計測システム系統図

まず、呼吸代謝装置 FIT-2000 は COSMED 社製で呼吸数、換気量および酸素摂取量が本体内へ自動的に記録され、身体負荷試験終了後に PC に接続してデータを取り込んだ。酸素濃度は、ガルバニック燃料電池で計測し、計測範囲は 0～22%、精度±0.02 %である。呼気流量は双方向デジタルタービンで計測し 0～50L/min、精度±2 %である。FIT-2000 を用いた場合、二酸化炭素排出量を計測できない。

VO2000 は MedGraphics 社（現 MGC Diagnostics 社）製で日本代理店エスアンドエムイーのポータブル代謝分析装置であり、呼気ガス分析は、3 呼吸毎の平均値で計測される。酸素濃度は、ガルバニック燃料電池で計測し、計測範囲は 0～96%、精度±0.1 %である。二酸化炭素は、NDIR 法で計測し、計測範囲は 0～10%、精度±0.2 %である。また、流量は 2 方向ピトー管で計測し、20～200 L/min であり、精度±3%である。呼吸代謝測定装置からの出力は、Test 4 では、データロガー（DL-2000, DL-3100, (有)エスアンドエムイー）へ記録され、身体負荷試験終了後に PC へ接続してデータを取り込んだ。ただし、自転車エルゴメータを用いた身体負荷試験である Test 3 および Tests 5, 6 では、データロガーからリアルタイムで、PC へ送信され、デジタル変換して保存した。

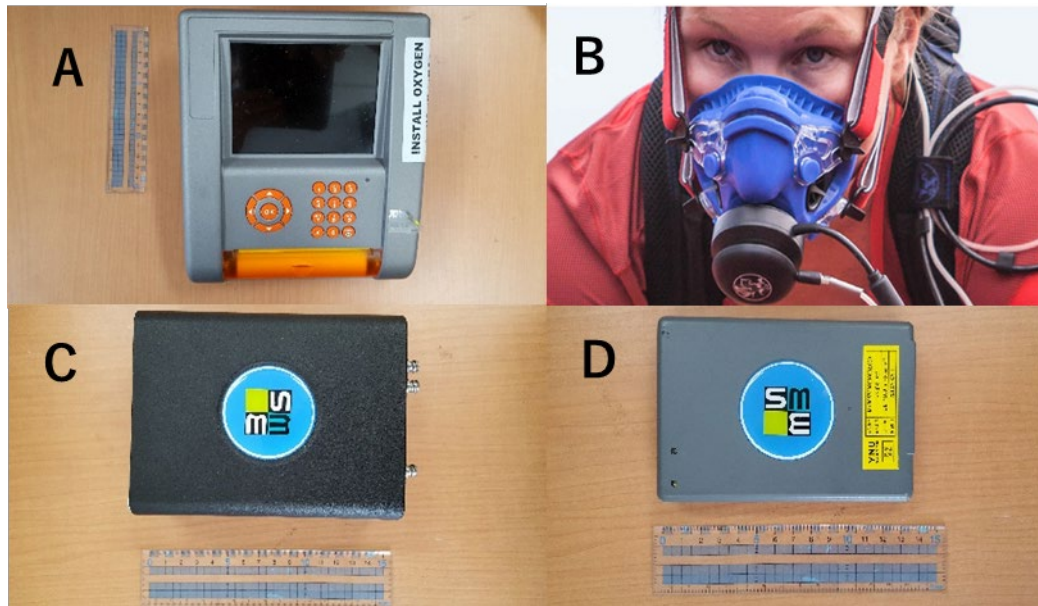


図 2.21 呼気ガス情報計測システム系統図とガス分析器

A : 呼吸代謝計測装置 FIT-2200

B : 呼気ガス計測用マスク C03612-01-10

COSMED Srl のホームページより引用

([https://www.cosmed.com/hires/PG\\_Facemask\\_C04211-01-93\\_A4\\_print\\_IT.pdf](https://www.cosmed.com/hires/PG_Facemask_C04211-01-93_A4_print_IT.pdf))

C : 呼吸代謝計測装置 VO2000

D : データロガーDL-2000, DL-3100

### 2.4.3 血中乳酸値の取得

血中乳酸値は ARKRAY 社製簡易血中乳酸測定器 Lactate Pro LT1710 を用いて計測した。指先から採取した少量の血液を取り込むことで毛中乳酸値を計測した。計測にあたっては、汗等の混入による影響を防ぐため、まず指先をアルコール消毒し乾燥させ、指先を穿刺後に少量の血液を出した。その後、ガーゼ等で血液を一度ふき取り、再度少量の血液を出したものを計測した。計測方法の詳細について図 2.22 に、計測器を図 2.23 に示す。

乳酸オキシダーゼ酵素電極法により計測し、血液中の乳酸と反応して生成する  $\text{H}_2\text{O}_2$  を検出した。計測範囲は  $0.8 \sim 23.3 \text{ mmol/L}$  である。高温環境下で高強度の運動の影響で汗が混入、あるいは血液がほとんど出ずに計測エラーとなってしまった場合もあった。その場合は、再度同様の手順を繰り返した。

血中乳酸値の測定タイミングは次の通りとした。間欠式負荷試験 Test 3 では、各身体負荷終了時毎 (図 2.3)、連続式漸増負荷試験 Test 4 では、実験開始前の安静時と実験終了直後に加え実験終了後 25 分まで 5 分ごとに 5 回測定した。間欠式一定負荷試験 Test 5 では、負荷前の安静時と実験終了直後以外に、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 (図 2.9)。連続式一定負荷試験 Test 6 および模擬消防活動試験 Test 7 では、実験前に、防火衣を着装しない通常の活動着を身に着けた状態で、気温 25°C、湿度 50~60%に設定した準備室 (図 2.12) で計測した。実験後は、負荷終了時に即座に測定し、準備室へ移動後に、血中乳酸値を 5 分ごとに 25 分間計測した。



図 2.22 簡易血中乳酸測定器計測手順

(Arkray, Inc ホームページより引用、写真の機器は後継機 Lactate Pro2 LT-1730)  
<https://biz.arkray.co.jp/lact/confirm/introduction.html>



図 2.23 簡易血中乳酸測定器  
Lactate Pro LT-1710

#### 2.4.4 動脈血中酸素飽和度の取得

動脈血中酸素飽和度は、コニカミノルタ社製パルスオキシメータ PULSOX-

300i を用いて計測した。指先へプローブ（フィンガークリッププローブ SR-5C、コニカミノルタ社製）を装着し、体動の影響を最小限とするため、ガーゼテープを用いて固定した。指先を透過する赤外光、赤色光成分の比率により計測し、計測範囲は 0～100 %SpO<sub>2</sub>、精度±2 %である。



図 2.24 パルスオキシメータ PULSOX-300i  
フィンガークリッププローブ SR-5C

## 2.5 まとめ

本章では、高強度の身体負荷が継続する消防活動中の隊員の生体内でのエネルギー代謝量の変化に伴う生理情報および生体情報の変化を追跡するために、消防活動を想定した身体負荷試験を立案し、その際の生理情報、生体情報の計測方法を記述した。

身体負荷試験は、身体負荷が課された際の変化を把握するための基礎試験、身体負荷強度の変化に対する生理情報、生体情報の変化の対応関係を把握するための試験、活動継続不能に至る高強度での生理情報、生体情報の変化を把握するための試験、実際の消防活動を模擬した試験を実施した。

- ① 身体負荷が課された際の変化を把握するための基礎試験として 2 種類の試験を実施した。まず心拍一定保持試験 Test 1 は、安静時や低負荷活動で用いられる心拍変動指標が、心拍数を一定に保持したときにどのような変化をするか把握するために実施した。次に、間欠式三段階負荷試験 Test 2 は、身体負荷に応じた変化を把握するために、トレッドミルを用いて走行速度と走行面の傾斜を変更することで三段階の身体負荷強度を印加させときの呼吸代謝情報との関係に注目した。なお、呼吸情報は一呼吸毎にしかデータを取得できないため、各段階の身体負荷継続時間を 15 分に設定することで解析に必要なデータ数を取得した。
- ② 身体負荷強度の変化に対する生理情報、生体情報の対応関係を把握するための試験として 2 種類の試験を実施した。まず間欠式漸増負荷試験 Test 3



は、自転車エルゴメータを用いて、各協力者の活動限界に至るまで、6分間の身体負荷を20Wずつ上昇させる試験である。各段階の負荷活動終了直後に2分間の短い休憩を設けることで、各身体負荷強度における生理情報を取得した。次に、連続式漸増負荷試験 Test 4 は、1分ごとに走行速度が増加する往復持久走を実施することで、全身運動による負荷強度を軽強度から活動継続不能に至る高強度まで、連続的に漸増する身体負荷状況下での生理情報および生体情報を取得した。

- ③ 活動継続不能に至る高強度での生理情報、生体情報の変化を把握するために4種類の試験を実施した。まず、身体負荷強度の増加により活動継続不能に至る状況を再現するため、前述の Test 3 および Test 4 を活動継続不能に至る条件として実施した。また、高強度の身体負荷を時間的に継続させ、活動限界状況を再現するために、Tests 5,6 を実施した。いずれの試験も、自転車エルゴメータを用いた。間欠式一定負荷試験 Test 5 は、Test 3 の結果を基に協力者が数回の実施で活動継続不能に至る身体負荷強度を設定し、活動不能に至るまで Test 3 と同様の時間間隔で繰り返す試験である。連続式一定負荷試験 Test 6 は、一定の高強度身体負荷が課せられた状態で協力者が活動不能に至るまで最大40分継続する試験であり、このような身体負荷状況下での生理情報および生体情報を取得した。
- ④ Test 1～6とは異なり実際の身体負荷強度が時間的に連続して変動する消防活動における身体負荷を再現するために実施したのが模擬消防活動試験 Test 7 である。この試験は、実践的な中層建築物での消防訓練の活動内容を13の活動項目に分類し、各活動項目における身体負荷をトレッドミルや踏み台昇降、錘などを用いて再現することで、安定して再現良くデータ取得ができるように工夫した身体負荷試験である。

7種類の身体負荷試験において、生体の応答を把握するため生理情報として、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、血中乳酸値、動脈血中酸素飽和度を、生体情報として、心拍数、体温、呼吸数を計測した。

以上のように、本研究で実施した消防活動に匹敵する高強度の身体負荷の実施方法、その時の身体状況を推定するための生体計測方法を決定した。

## 2.6 参考文献

- [1] 中村好男, 運動処方における「快適強度」の意味, 早稲田大学人間科学研究, vol.9(1), pp.31-45, 1996.

- [2] 日本呼吸管理学会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会, 日本呼吸器学会ガイドライン施行管理委員会, 日本理学療法士協会ガイドライン作成委員会: 呼吸リハビリテーションマニュアル-運動療法-, 日本呼吸管理学会/日本呼吸器学会/日本理学療法士学会, 2003.
- [3] 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会呼吸リハビリテーション委員会ワーキンググループ, 日本呼吸器学会呼吸管理 学術部会, 日本リハビリテーション医学会呼吸リハビリテーションガイドライン策定委員会, 他: 呼吸リハビリテーションマニュアル-運動療法-第2版, 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会/日本呼吸器学会/日本リハビリテーション医学会/日本理学療法士学会, 2012.
- [4] 日本体力医学会体力科学編集委員会, 運動処方指針—運動負荷試験と運動プログラム—, 株式会社南江堂, p.289, 2011.
- [5] American College of Sports Medicine, ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription 7th ed, Lippincott Williams & Wilkins, p.289, 2005.
- [6] Ainsworth B.E., Haskell W.L., Herrmann S.D., Meckes N., Bassett D.R., Jr Tudor-Locke C., Greer J.L., Vezina J., Whitt-Glover M.C., Leon A.S., 2011 Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol.43(8), p.1575-1581, 2011.
- [7] 国立健康・栄養研究所のホームページ, 改訂版「身体活動のメッツ(METs)表」, URL: <http://www.nibiohn.go.jp/eiken/programs/2011mets.pdf>, (参照:2020年5月22日).
- [8] Fukuoka Y., Gwon O., Sone R., and Ikegami H., Characterization of sports by the VO<sub>2</sub> dynamics of athletes in response to sinusoidal work load, *Acta Physiologica*, vol.153(2), pp.117-127, 1995.
- [9] 鍋倉賢治, 吉岡利貢, 高嶋渉, 篠田知之, 池上晴夫, 正弦波運動負荷に対する心拍応答と運動習慣との関係, 筑波大学体育科学系紀要, vol.29, pp.23 - 33, 2006.
- [10] Casaburi R., Barstow T.J., Robinson T., Wasserman K., Influence of work rate on ventilatory and gas exchange kinetics, *Journal of Applied Physiology*, vol.67(2), pp.547-555, 1989.
- [11] 谷口興一, 運動負荷テストの原理とその評価法(原著第2版), 南江堂, pp.10-59, 1999.
- [12] Koike A., Wasserman K., McKenzie D.K., Zanconato S., Weiler – Ravell D., Evidence that diffusion limitation determines oxygen uptake kinetics during

- exercise in humans, The American Society for Clinical Investigation, vol.86(5), pp.1698-1706, 1990.
- [13]花田智, 関根正樹, 田村俊世, 新地友和, 藤元登四郎, 嫌気性代謝閾値を指標としたインターバルトレーニングにおけるプロトコルの検討, 生体医工学, vol.49(1), pp.48-53, 2011.
- [14]名越 秀樹, 臨床生理 エルゴメータとトレッドミルの比較, 臨床検査, vol.27(7), pp.827-829, 1983.
- [15]国立スポーツ科学センターのホームページ, フィットネス・チェック マニュアル 20m シャトルランテスト(有酸素性持久力), URL:[http://www.jpnsport.go.jp/jiss/Portals/0/column/fcmanual/16\\_20mshuttlerun.pdf](http://www.jpnsport.go.jp/jiss/Portals/0/column/fcmanual/16_20mshuttlerun.pdf), (参照:2020年5月22日).
- [16]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(2), pp.11-17, 2015.
- [17]Kuriyama, Y., Oka, Y., Ito, Y., and Enari, M., Proposals of standardized training procedure and indices indicating firefighters' fatigue, Proceedings of 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Interflam, pp.681–686, 2013.
- [18]Ito Y., Oka Y., and Kuriyama Y., Objective indices to evaluate Fire-fighter's Cardiorespiratory state Based on Frequency Analysis of Heart Rate, Proceedings of International Conference on Research and Advanced Technology in Fire Safety (FIRESAFETY2017), pp.101-118, Santander, University of Cantabria, 2017.
- [19]井上博, 村川裕二, 安喰恒輔, ホルター心電図パーフェクトガイド, 株式会社中山書店, pp.32-35, 2014.

## 第3章 消防隊員の身体状況把握に用いる心拍情報の検討

### 3.1 緒言

第1章で述べたように、消防隊員は緊迫した火災現場への出動を繰り返し、身体的に大きな負担がかかる活動を実施する上に、市民の生命と財産を守るという特別な使命感から、自身の体調を楽観的に捉える傾向があり[1]、自身を追い込んで作業を継続してしまうため、客観的な情報を追加することで、身体状況を管理することが望まれる。身体的負担の要因として、肉体的負荷、精神的ストレス、作業環境汚染物質の3つが挙げることができ、特に最大心拍数近くに達することによる心肺機能への負担、緊急通報に起因する急激な交感神経の亢進による心血管系の緊張[2]が、消防隊員の身体に対する負担となっており、本研究では過大な身体負荷を把握することで、隊員の体調と判断力の低下防止を目指す。

電極センサ装着による心電計測は、血圧、血中乳酸値の計測、および呼気ガス分析に比べると違和感が少なく、消防活動中にリアルタイムで計測可能と考えられる。さらに計測に関しても比較的簡易に実施出来、そこから得られる心拍数は一般的に広く利用されている。

そこで、本章では心電情報から得られる心臓の拍動に関する情報に焦点を絞り、消防隊員の活動中に取得可能な、身体的負担状況を評価する生体情報として、心拍数の有用性について検討する。次に、心拍情報から心拍数とは異なる情報を引き出すことができる心拍変動の周波数解析に着目し、身体活動中の評価に用いるための基礎的な検討をする。

### 3.2 身体負荷に対する心拍数の変化

第1章に述べたように身体負荷強度が上昇すると、体内のエネルギー代謝量が増加するため、それに応じて血液吐出量および換気量が増加する。代表的な協力者（協力者3A）身体負荷強度を間欠的に増加させた間欠式漸増負荷試験 Test 3における経時変化を図3.1に示す。

瞬時心拍数は各負荷に対して速やかに上昇し、ペダル仕事率の増加に対して単調に増加し、身体負荷強度をよく反映していることが判る。実際に心拍数は身体負荷強度の変化とよい相関があり、運動を企図した段階で増加が生じるほど運動に対する非常に応答性も良いことが知られている[4]ことから、有用な生体情報である。

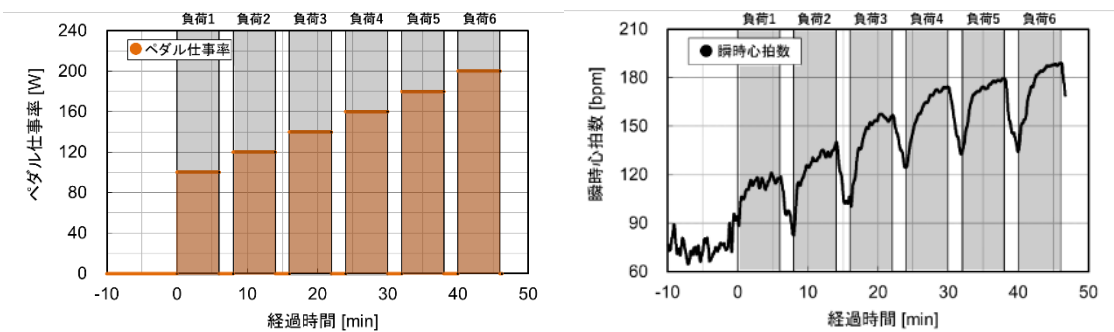


図 3.1 間欠式漸増負荷試験における心拍数の経時変化一例

このように各段階で得られた心拍数の最大値をペダル仕事率に対して整理した結果を図 3.2 に示す。協力者 3A の心拍数はペダル仕事率増加に比例して増加しており、心拍数が得られればペダル仕事率を客観的に推定することができる。

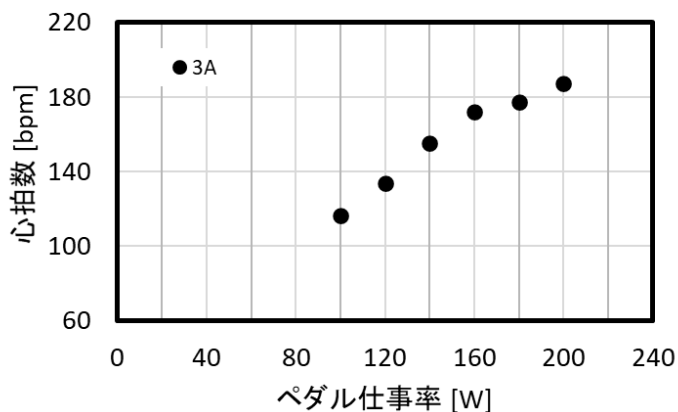


図 3.2 間欠式漸増負荷試験の各ペダル仕事率に対する心拍数一例

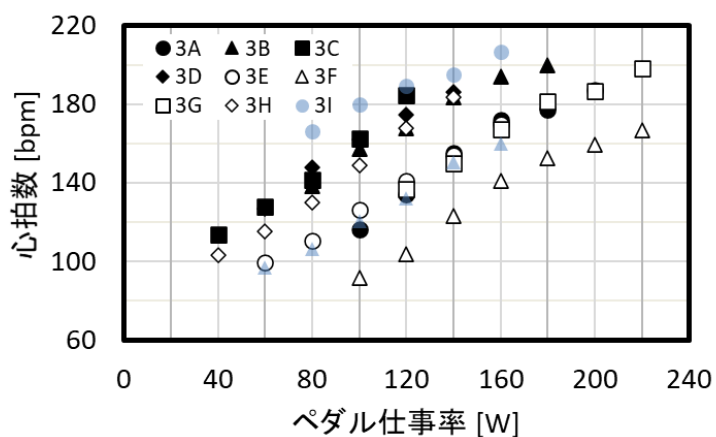


図 3.3 各協力者のペダル仕事率に対する心拍数の変化

次に間欠式漸増負荷試験 Test 3 を実施した協力者全員のペダル仕事率に対す

る心拍数の最大値をプロットしたものを図 3.3 に示す。

心拍数について絶対値は個人毎に異なるものの、いずれもペダル仕事率に対して線形的に増加していた。同じ負荷が課せられても各協力者の運動習慣、体格等の特性による違い[6]により心拍数の応答は異なる。同じ消防隊員であっても年齢差、さらに勤務体系とそれに伴う身体錬成の違いにより、身体能力は一律ではないことから、同様の傾向が見られることが推察される。予め個人毎に身体負荷試験を実施し、心拍応答について情報を得ることが出来れば、協力者の身体負荷状況を判断できるが、消防隊員一人一人の身体負荷に対する心拍数の応答を把握することは現実的ではない。

そこで、次節では特にペダル仕事率と良い相関が得られた心拍数を用いて、個人差を少なく身体負荷に関する情報を判断できる指標を検討する。

### 3.3 心拍数による身体状況の把握

心拍数は、前述のように身体負荷強度と相関がみられる。したがって、活動中に心拍数を測定することで、身体負荷強度を推定することが出来ると考えられた。ただし、身体負荷に対する心拍数の応答の個人差が大きいと、体調管理の精度に影響を与える、あるいは個人ごとに異なる閾値を用いて管理する必要が生じることから、本節では可能な限り個人差の影響を受けにくい指標を検討する。

第 1 章で述べたように体内の好気性代謝量を反映することから運動強度の指標として代謝当量を用いることが多い[7, 8]。代謝当量の推定には以下の式(3-3)が提案され身体負荷設定の目安として用いられている。

$$\text{歩行} \quad [\text{METs}] = \frac{3.5 + (0.1 \times V) + (1.8 \times V \times S/100)}{3.5} \quad (3-1)$$

$$\text{走行} \quad [\text{METs}] = \frac{3.5 + (0.2 \times V) + (0.9 \times V \times S/100)}{3.5} \quad (3-2)$$

$$\text{自転車エルゴメータ} \quad [\text{METs}] = \frac{3.5 + 3.5 + (1.8 \times W)/M}{3.5} \quad (3-3)$$

式(3-1)~(3-3)に示した代謝当量の推定式で、 $V$ は速度(m/min)、 $S$ は勾配(%表示)、 $W$ は仕事率(kg・m/min)、 $M$ は体重(kg)を意味する[9, 10]。そこで、間欠式漸増負荷試験 Test 3 において、各負荷が課せられた時間帯における心拍数の応答値をペダル仕事率から、式(3-3)を用いて推定した代謝当量としてプロットしたものが図 3.3 である。

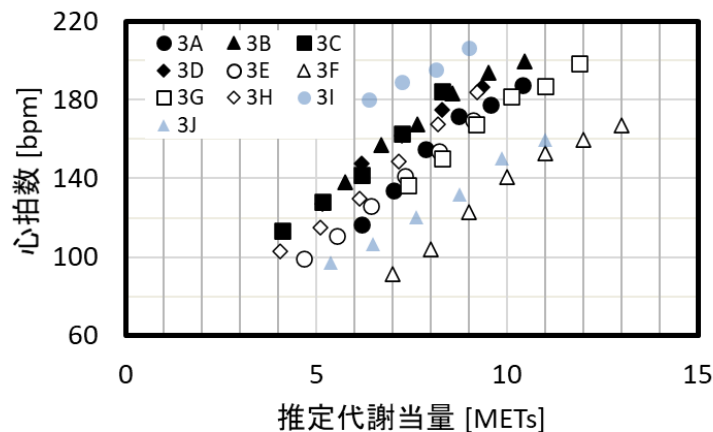


図 3.4 Test 3 における推定代謝当量と心拍数の関係

身体負荷強度として代謝当量を基に心拍数の応答値をプロットすることで、図 3.3 よりも幾分か改善が認められるが、個人差がまだ大きいことが分かる。そこで、規定値の心拍数との差をとることで個人差を緩和することが出来る心拍数上昇量  $\Delta HR$  を用いた検討を行う。

基底値とされる心拍数には様々な定義ものがある。ヒトが生命を維持するときに必要な最小のエネルギー代謝量を基礎代謝量といい、その時の心拍数は基礎心拍数(basal heart rate)と呼ばれる。その測定には、室温が 18~20°C の環境下で、食後 10~12 時間を経過し、朝目覚めた時の静かに横たわった状態での計測[11]が必要であり、その計測には多くの時間と労力が必要である。より一般的に用いられている心拍数の基準として、適正室温で食後数時間経過し、肉体的にも精神的にも安定している代謝量(安静代謝量)で計測した時の心拍数と定義される安静心拍数(resting heart rate,  $HR_{rest}$ )がある[11]。 $HR_{rest}$  の測定条件は、比較的実験実施者に委ねられた部分があり[12]、基礎心拍数に比べて信頼性と再現性に欠けるものの、前述のように基礎心拍数は測定条件が厳しいことから、 $HR_{rest}$  が心拍数の基底値として用いられることも多い。本研究では、実験開始前に椅子あるいは自転車エルゴメータ上に自然に腰かけた座位状態で計測された 1 分間の平均心拍数を安静時心拍数( $HR_{rest}$ )とした。

以下の式(3-4)を用いて、各協力者の安静時心拍数  $HR_{rest}$  との差をとり、 $\Delta HR$  を算出して整理した結果を図 3.5 に示す。

$$\Delta HR = HR - HR_{rest} \quad (3-4)$$

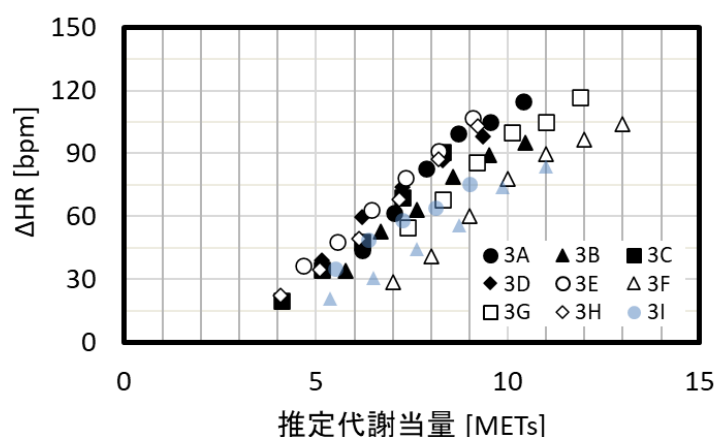


図 3.5 Test 3 における推定代謝当量と  $\Delta HR$  の関係

このように、心拍数は安静時心拍数からの上昇量 ( $\Delta HR$ ) で評価することで、負荷強度と心拍数の関係を個人差少なく評価出来るため有用である。そこで、次に個人ごとに上限 (最大心拍数) 用いて評価することで、さらに個人差を減らす検討を実施する。

第 1 章で述べたように心拍数は、身体負荷強度の増加に比例して上昇するが、活動継続が限界に近づくと、遂には運動強度が増加しても心拍数の増加が見られなくなる。その時の心拍数を最大心拍数(maximal heart rate,  $HR_{max}$ )といい、この  $HR_{max}$  が心拍数の上限値と考えられ、一般的に 180 bpm から 210 bpm 程度で、年齢や有酸素能力等といった個人の特性に影響を受ける[13]。

心拍数を用いた運動強度の管理方法の一つに、予備心拍数(Heart rate reserve,  $HRR$ )を用いる方法がある。予備心拍数は、最大心拍数と安静時心拍数の差を意味する。その管理は、最大心拍数を 100% $HRR$ 、安静時の心拍数を 0% $HRR$  と定義し、ある身体負荷下の心拍数が何% $HRR$  にあたるかを管理する方法である。ACSM(American College of Sports Medicine)では、50 - 85 % $HRR$  が、安全な運動強度の基準としてされている[14]。

$$HRR = \frac{HR - HR_{rest}}{HR_{max} - HR_{rest}} \times 100 \quad (3-5)$$

$HRR$  を利用して運動強度を管理するには、個人ごとの  $HR_{max}$  の把握が不可欠である。 $HR_{max}$  の計測は、被計測者を最大運動にまで追い込む必要があることから、安全管理のために大がかりな設備、あるいは専門的な知識を持つ人間の立ち合いが安全管理上不可欠であることから、その実施は容易ではない。日常から体力向上に励み変化する消防隊員の  $HR_{max}$  を、隊員毎に追跡して管理することは難しい。このように  $HR_{max}$  を把握することが難しいことから、式(3-6)に示した年齢



を基にした推定式を用いて、推定最大心拍数( $HR_{max\_age}$ )の採用が一般的である。これまでも様々な改良が加えられているが[15, 16]、誤差が大きく、40歳以上で過小評価となる傾向があることが分かっている[16]。

そのため、式(3-5)を用いた  $HRR$  を基にするトレーニングでは、身体負荷を過少に評価してしまいトレーニング効果が得られない等の多くの問題点も指摘されている[17, 18]。そのため、年齢を用いた推定式は修正され、様々な式が提案されてきたが、近年では Gellish ら[19]によって提案された式(3-7)が最も正確とされている。

$$HR_{max\_age} = 220 - age \quad (3-6)$$

$$HR_{max\_age} = 206.9 - (0.67 \times age) \quad (3-7)$$

そこで、式(3-7)を用いて、年齢から算出した推定最大心拍数  $HR_{max\_age}$  と安静時心拍数  $HR_{rest}$  から  $HRR$  を算出し、 $HR_{max\_age}$  を導入することで、心拍数 (図 3.4) および  $\Delta HR$  (図 3.5) に比べて身体負荷強度を個人差少なく評価できるのではないかと考えた。各協力者の代謝当量に対する  $HRR$  を図 3.6 に示す。

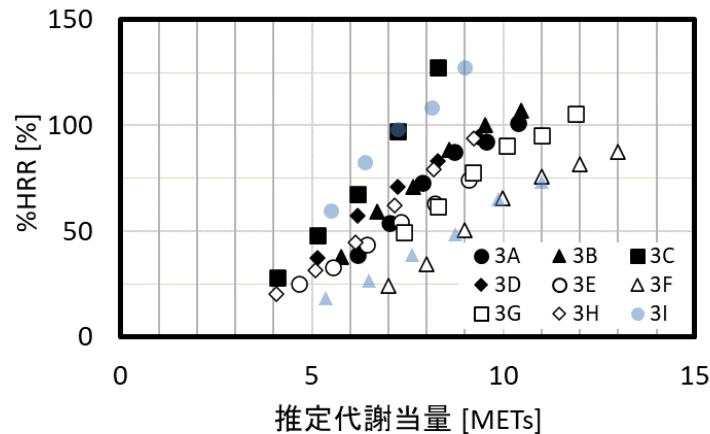


図 3.6 Test 3 における推定代謝当量と% $HRR$  の関係

$HRR$  による評価は、 $\Delta HR$  に比べて個人差の影響が増加する結果となった。また、協力者 10 名中 7 名の最大心拍数が、式(3-4)から算出される 100% $HRR$  以上まで上昇していた。田中ら[20]は、実測した最大心拍数は、加齢とともに低下するが、その減少率が個人により異なること、同年齢であっても 40~50 bpm 以上の個人差が認められることを報告している。また、田中[21]は、健康増進を目的として高齢者の有酸素能力を評価する方法に関して報告し、その中で  $HR_{max\_age}$

を基にした  $HRR$  を用いて効果のあるトレーニング強度の設定ができない理由として、計測された  $HR_{max}$  は  $SD = 15 \text{ bpm}$  程度の大きな標準偏差を持つことを挙げている。この最大心拍数の推定精度が推定代謝量に対する  $\%HRR$  の個人差を大きくした要因であると考えられる。

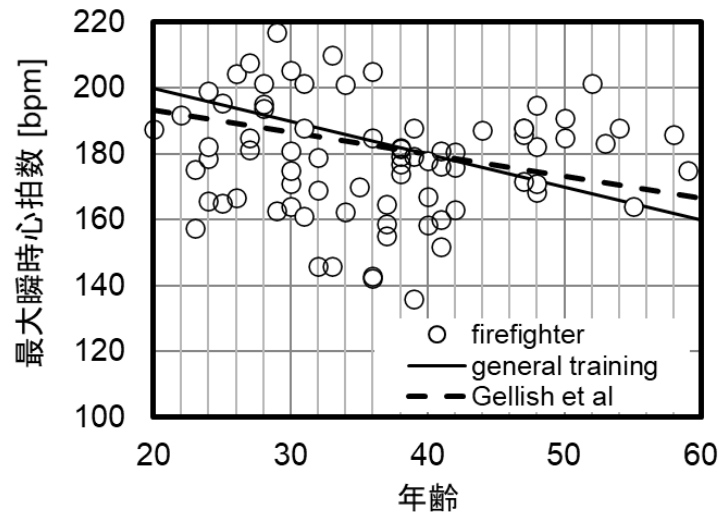


図 3.7 Test 7 で観測された瞬時心拍数の最大値

消防隊員が、模擬消防活動試験 Test 7 を実施した時間帯における各協力者の瞬時心拍数の最大値と  $HR_{max\_age}$  を比較した結果を図 3.7 に示す。横軸に年齢をとることで  $HR_{max\_age}$  を直線で示している。これによると、模擬消防活動試験(Test 7)は最大運動未満の活動であり、余裕をもって模擬消防活動を終えた協力者がほとんどであったにもかかわらず、瞬時心拍数の最大値は 79 名中 33 名の協力者が Gellish の式から算出される  $HR_{max\_age}$  を超える心拍数に到達していたこのことから、やはり年齢から推定される  $HR_{max\_age}$  では精度に問題があると考えた。

以上の結果から、 $HRR$  は簡易的に運動強度を管理でき、個人差の影響を軽減して閾値を設けることが出来る非常に有用な指標であるが、個人ごとの最大心拍数を把握することが困難であり、本研究で対象とする多数の消防隊員の評価には適さない。

今回検討した心電情報から身体負荷強度を推定できる心拍数、 $\Delta HR$ 、 $HRR$  の中で、最も個人差が小さく体への負荷程度の推定が行えると考えられる指標は  $\Delta HR$  であった。 $\Delta HR$  の算出には消防隊員毎に異なる  $HR_{rest}$  の取得が必要となる。ただし、出動要請直後から精神的な緊張などにより心拍数が継続的に上昇することから、予め  $HR_{rest}$  の計測を実施しておく必要がある。消防隊員の職務状況を鑑みると、一刻一秒を争う緊急性の高い出動要請後の出動開始時に計測センサ

等を取り付けることは考えにくく、各消防署への出勤時に、計測機器を取り付けて連続計測して職務にあたることになると考えられ、その他の健康管理への応用が可能となる利点もある。例えば、出勤時に健康アンケート等の座位での作業を設ける、あるいは事務作業などのタイミングで、 $HR_{rest}$ に近い値を取得することは十分可能であると考え。そのため、リアルタイムでの消防活動に伴う身体負荷強度の評価を考えた場合、 $\Delta HR$ に閾値を設定して管理することが最も望ましいと判断した。

一方、 $\Delta HR$ のみで心肺機能への負荷状況を把握する問題点として、精神的な影響も大きく受けるという問題がある。図3.8に消防士などが非常用階段を駆け上り現場に行くことを競技にしたタイムレースであるステアレース[22]と呼ばれる階段駆け上がりレースに臨む消防隊員の心拍数の経時変化を示す。計測開始直後(矢印A)では100 bpm前後の心拍数であったが、レース開始10分以上前から130 bpm~140 bpmへと上昇した。この消防隊員は、活動開始前にストレッチや休憩等を自由に行っており、身体運動を実施していなかったにも関わらず、これだけ長時間の高値の心拍数が継続していたのは、レース前の緊張や昂りによるものと推察される。

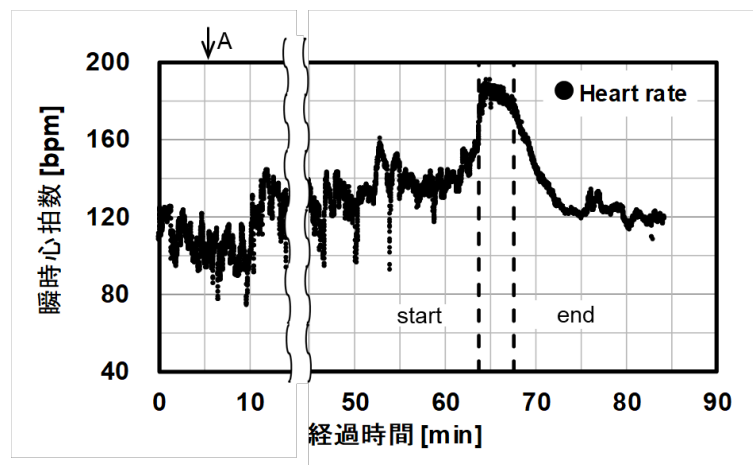


図 3.8 ステアレース前後の協力者の瞬時心拍数の経時変化

この消防隊員は運動開始前に心拍数が高値となっていたことになる。このように心拍数は、精神的な影響で鋭敏に反応して上昇することから、限定された状況ではあるが身体への負荷強度の推定を難しくしてしまう。

以上のことから、心拍数は身体負荷強度の変化に敏感に対応し、身体負荷強度をモニタリングすることに関して有望な指標であり、安静時心拍数からの上昇値である  $\Delta HR$  を用いることが望ましい。ただし、心拍数は精神的な影響等に影

響されること、嫌気性代謝の高まりに関する情報が得られないこと、対象とする消防活動は、消防隊員の最高心拍数が 195~200 bpm に達する程度があるほど高い身体負荷がかかる活動であり[23, 24]、消防活動は活動の初期から非常に大きな身体負荷が継続され、心拍数も高値を継続することから、 $\Delta HR$  単独では、活動継続の可否を判定する閾値を設定することは望ましくないと判断した[25]。

そのため、消防活動中に計測可能な生体情報を  $\Delta HR$  と同時に計測できれば、より詳細な身体負荷状況の判断が可能となる。ただし、消防活動中にリアルタイムで取得できる生体情報は限られており、計測センサを多数装着することは消防隊員の負担になる。そこで、 $\Delta HR$  の取得に必要な RR 間隔から心拍数以外の情報を引き出す検討を実施した。

### 3.4 心拍のゆらぎと周波数解析

前節では、協力者に対して違和感が少なく比較的簡易的に計測可能な心拍数を、消防活動中の隊員の身体的負担状態をモニタリングする指標として活用することを検討した。その結果、心拍数のみで消防隊員の身体負荷状況を判断することが難しいことが分かった。

そこで、本節では、第 1 章で述べた心拍変動の周波数解析について、解析条件を設定し、実際に周波数解析から得られるパワースペクトル密度の周波数依存性の高強度負荷時の特徴に関する検討する。

#### 3.4.1 周波数解析手法について

心拍変動の周波数解析を実施するにあたって、本研究で用いる周波数解析手法とその解析条件を決定する必要があるが、まず解析すべきデータの性質に応じて、周波数解析手法を選定する必要がある。

代表的な周波数解析手法であるフーリエ展開は、関数を周期関数で級数展開する手法であり、離散データを対象としたアルゴリズムである高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform、以下 FFT と記す) が確立され、様々な分野で広く活用されている。しかしながら、この手法は周期関数を仮定するため、サンプリング区間の端の立ち上がりによる折り返しノイズ (エイリアシング) の問題や、サンプリング長より周期が長い低周波の同定が出来ないといった課題がある。

他の手法として、サンプリングされたデータから情報エントロピーが最大となるよう最尤推定する最大エントロピー法 (Maximum Entropy Method、以下 MEM と記す) という手法がある。これは Jaynes ら[26]によって提唱された統計物理学の最大エントロピー原理に基づく手法であり、Burg[27]によって確立された。ベ

イズ推定と同様に、最尤推定であるため、サンプリング長より長い周期でも同定しやすいという特徴がある。

本研究の周波数解析では、PC 上で MEM が実施可能な計算プログラム MemCalc/Win を用いた。短時間のデータから詳細な分析が可能で、特に生体・生理分野をはじめとする様々な研究で実績のあるソフトウェアである[28-31]。

今回採用した周波数解析手法である MEM が、周期より短いデータ長で精度良い解析が出来る特徴を確認する。表 3.2 に示すように、RR 間隔に含まれる LF, HF のピークを、それぞれ 0.1 Hz, 0.2 Hz の正弦波、さらにその低周波数側 0.01 Hz および高周波数側 0.75Hz とし、4つの正弦波を合成した。

周波数解析の対象とした合成データを図 3.9 に示す。非常に複雑な変化をしていることが分かる。解析セグメント長さは1分間、データのサンプリング間隔は 0.5 s とした。

表 3.2 時系列データを構成する正弦波

構成する正弦波	周波数 [Hz]	周期 [sec]	振幅 [sec]	備考
正弦波 1	0.01	100	1	低周波側
正弦波 2	0.1	10	1	LF 想定
正弦波 3	0.2	5	1	HF 想定
正弦波 4	0.75	1.33	1	高周波数側

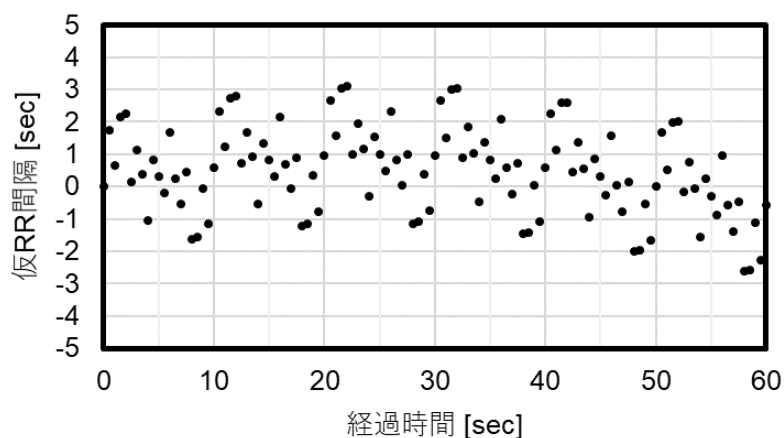


図 3.9 周波数解析手法比較のための時系列離散データ

このデータをそれぞれ FFT と MEM で周波数解析を行った。フーリエ変換は Microsoft Office Excel 2019 のアドインソフトを、MEM は MemCalc/Win をそれぞれ使用した。フーリエ変換による解析結果を図 3.10(a)に示す。0.1, 0.2, 0.75 Hz に

対応する 3 つのピークが観察された。しかしながら、データのサンプリング長が 60 sec であるのに対し、最も低い 0.01 Hz の正弦波の周期が 100 sec とデータ長より長いため、フーリエ変換では検出できなかった。一方 MEM による解析結果を用いて算出した結果が図 3.10 (b)に示す。0.01, 0.1, 0.2, 0.75 Hz に対応して明瞭に各ピークを認めることができる。これらの比較から MEM を用いた解析結果はピークも鋭いことから FFT による解析結果より低い周波数帯域までパワースペクトル密度を、精度よく解析できる手法であることが分かる。

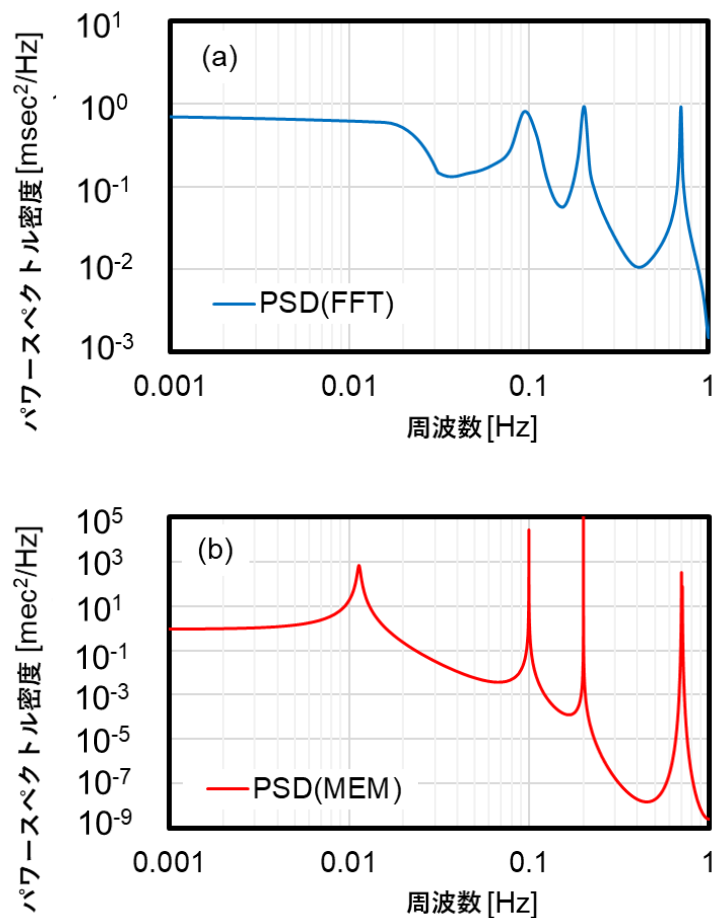


図 3.10 周波数解析手法によるパワースペクトル形状の比較  
 (a)高速フーリエ変換を用いたパワースペクトル密度と周波数の関係  
 (b)最大エントロピー法を用いたパワースペクトル密度と周波数の関係

また周波数解析については、適切なセグメント長さを決定する必要がある。図 3.11 に、健康な協力者（22 歳）が安静座位時に取得した RR 間隔データを周波数解析するとき、セグメント長さを 1, 2, 3, 5, 10, 20 分と 6 段階変更した場合の、LF/HF のセグメント長さに対する変化を示す。セグメント長さの延長に伴っ

て、LF/HF の値に収束していく様子が見られる。解析に用いるデータが長ければ長いほど、解析結果が安定するが、消防活動では 3 分程度で次々に活動内容が変化することから、本研究での周波数解析のセグメント長さは 3 分とする。

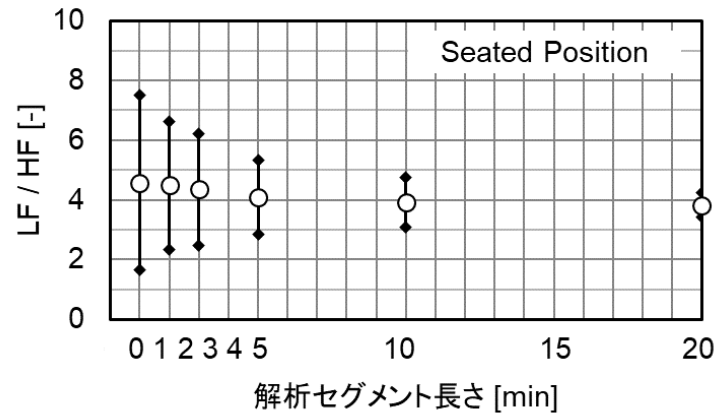


図 3.11 セグメント長さの LF/HF に対するの影響

### 3.5 心拍変動の周波数解析による身体状況評価

第 1 章で述べたように心拍の周波数解析により算出された LF や HF のパワーには、自律神経系の亢進具合の情報が含まれ、眠気[32]についての研究などに活用されている。HF は平常時の呼吸周期帯域 (0.1 ~ 0.3 Hz) と同程度の周期帯域であり、副交感神経活動を反映している[33]。一方、LF の周波数帯域は Mayer 波と呼ばれる血圧の変動と同程度の周期帯域であり、主に交感神経の影響を反映している。神経伝達物質の制御による研究が行われており、例えば、 $\beta$ 遮断薬と呼ばれる薬剤を用いて交感神経のアドレナリン受容体である  $\beta$ 受容体を遮断した際に臥位から立位に移行した際に生じる LF の増加が消失する[34]。また、アセチルコリンという副交感神経の神経伝達物質遮断に使用される硫酸アトロピンと投与によって、HF 消失と同時に LF も減少する[34]。このような神経伝達物質の制御により、LF は交感神経以外に副交感神経の影響も多少受けている。

前節では、心拍数に基づいて消防隊員が課されている身体負荷強度を評価する検討を行ったが、本節で記したように、心拍変動の周波数解析から得られる指標は、身体負荷、交感神経の亢進度などとの対応があることから、心拍変動の周波数解析から得られる指標を用いて消防活動中の身体負荷や疲労状況の評価の可能性を検討した。

### 3.5.1 身体負荷中の心拍変動周波数解析指標の変化

前述のように心拍変動の周波数解析は、心拍数よりも詳細な情報を提供する解析方法であり、これまでの検討は安静時を対象としたものが中心であった。そこで、心拍数を一定に制御した心拍一定負荷試験 Test 1 で、心拍変動の周波数解析から得られる周波数スペクトルの変化を検証する。

心拍数、ペダル仕事率、LF/HF の経時変化を図 3.12 に示す。

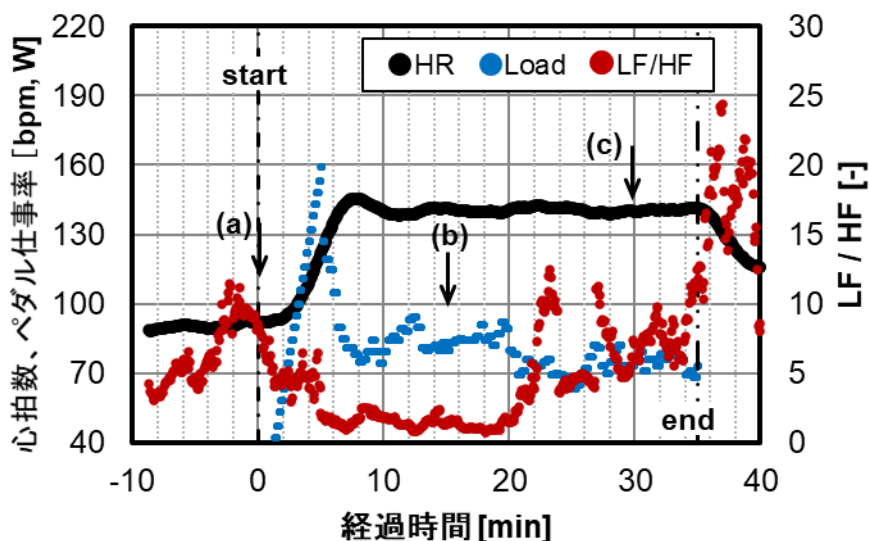


図 3.12 Test 1 における心拍数、ペダル仕事率、LF/HF の経時変化

制御する目標心拍数は 140 bpm に設定され、試験開始後 5 分 7 秒で目標心拍数に達し、その後はペダル仕事率を調整して一定の値に保持した。目標心拍数に達するまで、ペダル仕事率は一定の割合で増加し 160W に達し、その後、80~90W に即座に低下した。さらに、試験開始後 20 分前後から負荷強度は 70~80W へわずかに低下した。この時の交感神経亢進度の指標である LF/HF は負荷開始と同時に低下、さらに 20 分前後から元の水準まで上昇し、負荷終了後には元の水準を超えて上昇していた。

LF/HF は安静時を対象とした研究では交感神経亢進度の指標として用いられるが、高強度の身体負荷時に低下する様子が見られた。ここで、負荷開始時、負荷開始後 15 分、負荷開始後 30 分での心拍変動の周波数スペクトルを図 3.13 に示す。これをみると LF/HF の低下していた時間帯では、他の時間帯と異なる周波数スペクトル形状となっており、低周波数側に比べて高周波数側のパワーの増加が見られることが判る。この変化により LF/HF の低下が見られたものとみられる。



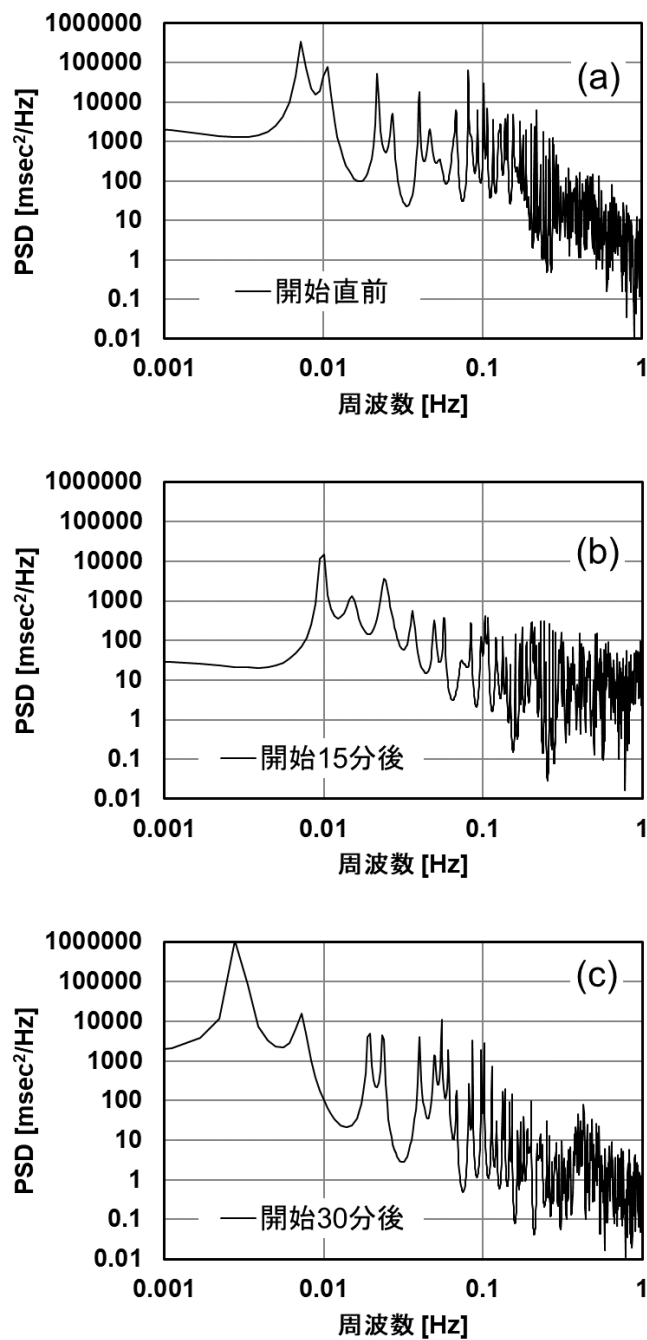


図 3.13 Test 1 における心拍変動の周波数スペクトル

この変化は、ペダル仕事率の変化による影響であると考え、次に低強度から高強度の負荷まで負荷を変化させた間欠式三段階負荷試験 Test 2 でも同様の変化が起きているか検証を行ったものを図 3.14 に示す。

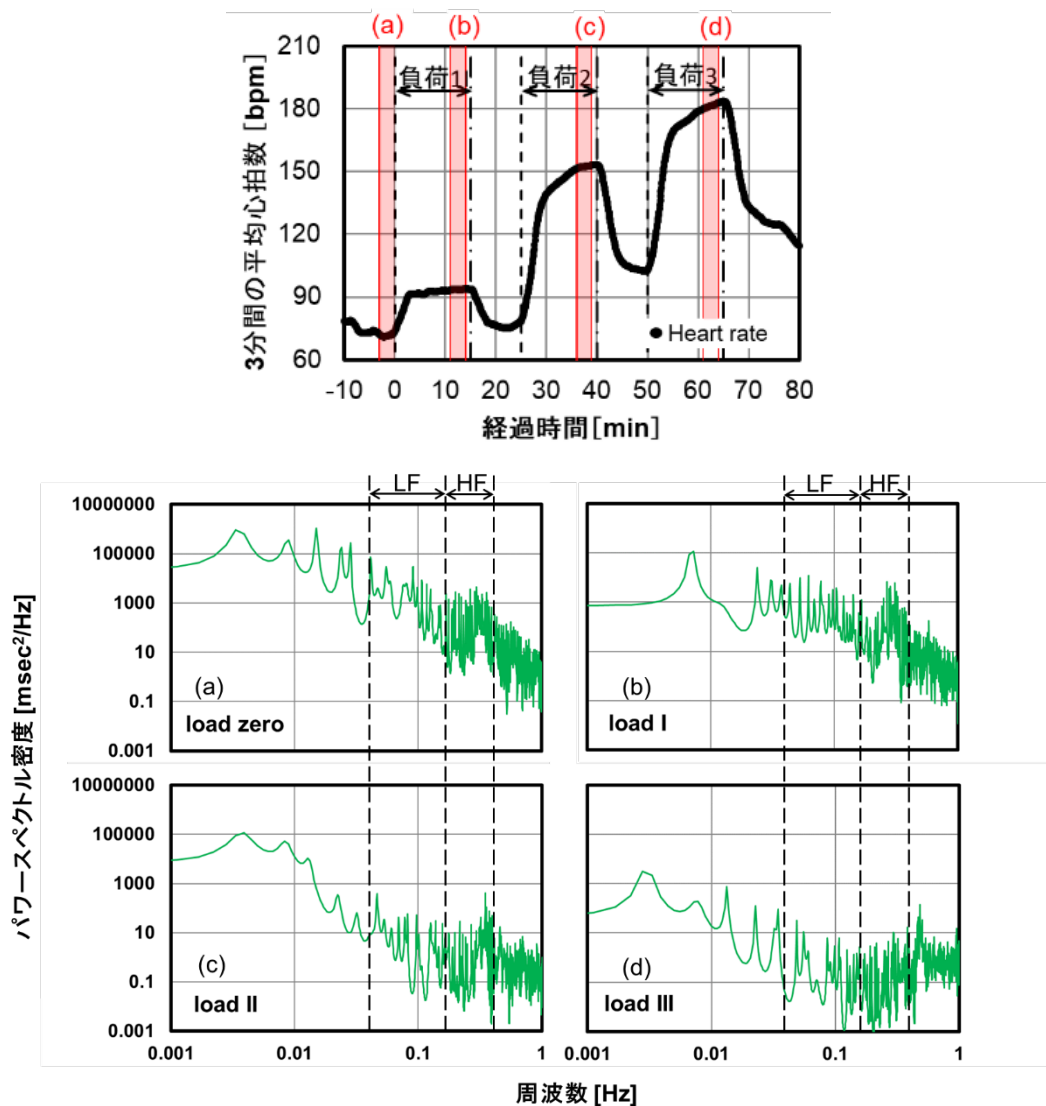


図 3.14 Test 2 における心拍変動の周波数スペクトルの変化

間欠式三段階負荷試験 Test 2 の安静時を図 3.14(a)、各負荷終了前の周波数スペクトルを図 3.14(b)~(d)にそれぞれ示す。その結果、安静時と低強度の1段階目の負荷では高周波数側に対して低周波数帯周波数側が大きくなっている様子が見られたが、高強度の身体負荷である3段階目の負荷では、低周波数側に比べて高周波数側が相対的に大きくなっている様子が確認された。

以上のことから、身体負荷中の心拍変動周波解析により得られたスペクトル形状は個人へ掛かる身体負荷に応じて変化することが分かった。特に高強度身体負荷中の心拍の周波数スペクトルを扱う場合、パワースペクトル密度の形状変化に注目する必要がある。この変化は、高強度の運動負荷中には HF が消失するという報告とも一致し[34]、さらに、HF よりも高周波数帯の領域のパワーが上昇していた。今回の身体の許容限界に近い高強度身体負荷にある全ての協力

者で観察された。前述のように、既知の心拍変動の周波数スペクトルに現れるピーク成分として、体温、血圧、呼吸に関わる調節があり、最も高周波数側では呼吸に関する情報が反映されることが知られていることから呼吸の影響でないかと推察した。

呼吸情報からは嫌気性代謝の高まりに関わる情報を得られる可能性があることから、次章では心拍変動の周波数スペクトルに対する呼吸の影響に焦点をあて検討する。

### 3.6 まとめ

本章では、全身の酸素供給や二酸化炭素排出などに重要な血流を司る心臓に着目して、消防隊員の身体負荷状況を評価する指標を検討した。身体負荷として、心拍数を一定に保持し、時間的な変化をみる心拍一定負荷試験、および段階的に負荷を変えて負荷の変化に対する応答をみる漸増負荷試験を実施し、そのデータを基に検討した。

心拍に関する情報の計測は心電位を計測し、R波の間隔から心拍数を求めた。さらに、その心拍数の変動 (Heart Rate Variability, HRV) を周波数解析することにより得られる周波数スペクトル、自律神経系の活動と関連するとされている既往の LF, HF について身体負荷との対応を評価した。

その結果、以下の事項が明らかになった。

1. 心拍数は身体負荷に応じて鋭敏に変化するが、心臓の能力 (安静時心拍数、最大心拍数) が個人ごとに異なるため、心拍数の絶対値のみで身体負荷を評価することは難しい。安静時心拍数からの上昇  $\Delta HR$  は、心臓の能力の個人差を低減し、身体負荷を評価するのに有効である。 $HRR$  は、安静時心拍数だけでなく最大心拍数も考慮して心臓への負荷を評価するので、 $\Delta HR$  より身体負荷の評価に適していると考えられたが、最大心拍数の実測は危険を伴うため難しく、最大心拍数の推定は誤差が大きいことから、 $\Delta HR$  での身体負荷評価に及ばないことが判った。
2. 心拍変動 (HRV) の周波数解析手法として、FFT (高速フーリエ変換) と MEM (最大エントロピー法) を比較検討した。負荷が数分で変動する状況で 0.0028 Hz といった低周波までの同定を行う必要がある身体負荷状況の評価では、FFT では低周波の同定が難しく MEM がピークの同定に関して有利であることが判った。また、周波数解析を行うサンプリング時間であるセグメント長さは長い方が良いが 3 分でも十分な同定が行えることが判った。

3. 心拍変動 (HRV) を周波数解析することにより得られる周波数スペクトルは心拍数一定であっても変化することから、心拍数とは異なる情報を得られる可能性があることが判った。
4. 心拍変動 (HRV) を周波数解析することにより得られる周波数スペクトルは高強度の身体負荷時に 0.1 ~ 1.0 Hz の領域で高周波数側の形状が変化することが判った。既知の心拍変動の周波数スペクトルに影響を与える因子の中で最も高周波数側に影響するのは、呼吸であることから、心拍変動の周波数解析を用いて、呼吸に関する情報を得ることが出来る可能性を見出した。

以上のことから、消防活動中の隊員の心肺機能への負荷状況を推定する指標として  $\Delta HR$  と心拍変動の周波数スペクトルの形状変化が有望である。そのため、次章では、呼吸の情報に着目しながら、心拍変動の周波数スペクトルの変化検出できる指標を提案し、その指標がその他の生理、生体情報とどのような関連があるかを検討する。

### 3.7 参考文献

- [1] 小笠原儀彦, 新藤貴久, 佐藤健司, 玄海嗣生, 熊野裕二, 暑熱環境下での主観的評価と客観的指標の関係について, 消防技術安全所報, vol.51, pp.55-62, 2014.
- [2] Barnard R.J and Duncan H.W., Heart rate and ECG responses of fire fighters, Journal of Occupational and Environmental Medicine, vol.17(4), p.247, 1975.
- [3] 目崎 登, スポーツ医学入門, 株式会社文光堂, p.15, 2009.
- [4] 宮村 実晴, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)出版部, pp.76, 2012
- [5] 山下 武志, 心筋細胞の電気生理学 - イオンチャンネルから、心電図、不整脈へー, 株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル, p.39, 2002.
- [6] 佐藤方彦, 佐藤陽彦, 勝浦哲雄, 津田隆志, 原田一, 山崎和彦, 安河内朗, 心拍数による酸素摂取量の推定, Journal of the Anthropological Society of Nippon, vol.85(1), pp.23-28, 1977.
- [7] American College of Sports Medicine, Position statement on the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining fitness in healthy adults, Medicine and Science in Sports. vol.10(3), pp. vii-x, 1978.
- [8] 岩間英太郎, 鈴木慎次郎, 石河利寛, 浅見俊雄, 加賀谷瀬彦, 青木純一郎, スポーツ活動による運動処方の手引きの作成, 公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団 機関紙デサントスポーツ科学, vol.1, pp.38-42, 1981.

- [9] 日本体力医学会体力科学編集委員会, 運動処方指針—運動負荷試験と運動プログラム—, 株式会社南江堂, p.289, 2011.
- [10] American College of Sports Medicine, ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription 7th ed, Lippincott Williams & Wilkins, p.289, 2005.
- [11] 山崎昌廣, 坂本和義, 関邦博, 人間の許容限界辞典, 株式会社朝倉書店, pp.120, 2005.
- [12] 本多薫, 座位安静時の心拍変動に関する検討, 山形大学大学院社会文化システム研究科紀要, vol.7, pp.27-37, 2010.
- [13] 谷口興一, 心肺運動負荷テスト—呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方—, 株式会社南江堂, pp.323, 1993.
- [14] 日本体力医学会体力科学編集委員会訳, 運動処方指針 原書第8版 運動負荷試験と実施プログラム, pp.162-163, 2011.
- [15] Londeree B.R., Moeschberger M.L., Effect of age and other factors on maximal heart rate, Research Quarterly for Exercise and Sport, vol.53, pp.297-304, 1982.
- [16] Hirofumi Tanaka, Kevin D Monahan, Douglas R Seals, Age-predicted maximal heart rate revisited, Journal of the American College of Cardiology, vol.37(1), pp.153-156, 2001.
- [17] Paterson D.H., Cunningham D.A., Koval J.J., St.Croix C.M., Aerobic fitness in a population of independently living men and women aged 55-86 years, Medicine & Science in Sports & Exercise, vol.31(12), pp.1813-1820, 1999.
- [18] Fabre C., Masse-Biron J., Ahmaidi S., Adam B., Prefaut C., Effectiveness of individualized aerobic training at the ventilatory threshold in the elderly, The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences. 52A(5), B260-B266, 1997.
- [19] Gellish R.L., Goslin B.R., Olson R.E., McDonald A., Russi G.D., Moudgil V.K., Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate, Medicine & Science in Sports & Exercise, vol.39(5), pp.822-829, 2007.
- [20] 田中喜代次, 吉村隆喜, 有酸素性運動において心拍数処方推奨できるか?, 体力科学, vol.69(3), pp.285-288, 2020.
- [21] 田中宏暁, 高齢者の有酸素能力とその測定法, 体力科学, vol.52(1), pp.39-46, 2003.
- [22] 日本警察消防スポーツ連盟, 日本警察消防スポーツ連盟公式ホームページ, URL:<https://jpfsfwpg.wixsite.com/jpfsf/games-jpg>, (参照:2020年5月16日)
- [23] Barnard R.J. and Duncan H.W., Heart rate response of firefighters to actual emergencies, Implications for cardiorespiratory fitness, Journal of Occupational and

- Environmental Medicine, vol.34(8), pp.797-800, 1992.
- [24] Sothmann, M.S., Saupe, K., Jasenof, D., and Blaney, J., Heart rate and ECG responses of fire fighters, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol.17(4), pp.247-250, 1975.
- [25] 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(2), pp.11-17, 2015.
- [26] Jaynes E.T., *Information Theory and Statistical Mechanics*, physiological reviews, *Physical Review Journals*, vol.106(4), pp.620-630, 1957.
- [27] Childers D.G., *Modern Spectrum Analysis*, IEEE press, 1978.
- [28] Tateishi O, Shouda T, Azuma Y, Chin K, Nogimura T., Gotou Y., Itou T., Mochizuki S., Machida K., Heart rate variability in congestive heart failure, *Clinical and Experimental Hypertension*, vol.24(1-2), pp.75-81, 2002.
- [29] Morokuma S., Horimoto N., and Nakano H., Diurnal changes in the power spectral characteristics of eye movements and heart rate variability in the human fetus at term, *Early Human Development*, vol.64(1), pp.27-36, 2001.
- [30] 長瀬真幸, 原田高志, 原田高志, 武田憲治, 小林裕見子, 百枝加奈子, 心拍変動の極短時間相関に着目した術中麻酔深度モニタリングの試み, *臨床麻酔*, vol.22(10), pp.1449-1450, 1998.
- [31] 久保田勝明, 宮崎益輝, ストレスを加えた防災訓練時の生理的指標と心理的指標の関係, *日本建築学会計画系論文集*, vol.65(536), pp.1-6, 2000.
- [32] 好田裕史, 淡路友香子, 内田雅昭, 永井成美, ウイスキーの香り刺激後の体温変化と眠気に関する予備的検討, *日本栄養・食糧学会誌*, vol.71(5), pp.243-250, 2018.
- [33] Pomeranz B., Macaulay R.J., Caudill M.A., Kutz I., Adam D., Gordon D., Kilborn K.M., Barger A.C., Shannon D.C., Cohen R.J., and Benson H., Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis, *The American journal of physiology*, vol.248(1), pp.H151-H153, 1985.
- [34] 林博史, 心拍変動の臨床応用—生理学的意義、病態評価、予後予測, *医学書院*, p.32, 1999.

## 第4章 呼吸代謝情報に基づく心肺負荷状態評価指標の検討

### 4.1 緒言

第1章で述べたように、循環機能の身体活動中の役割は、酸素を全身の細胞へ運搬することの他に、糖などのエネルギー発生源、身体活動により発生する乳酸や二酸化炭素、熱の運搬である。その他に身体活動中に重要な生体機能として、空気中から酸素を取り込み、二酸化炭素を排出する呼吸機能、エネルギーを産生する代謝機能がある。これらは相互に影響し合い、身体活動中に変化する[1]。

第3章では、循環機能に関わる情報として、身体負荷中に取得した心拍変動データを周波数解析したところ、高強度の身体負荷がかかる状態では、0.4 Hz 以下に対して、0.4 ~ 1.0 Hz の高周波数側のパワーが相対的に上昇し、この主要因が呼吸の影響である可能性を示した。

本章では呼吸代謝機能に関わる情報に着目し、心拍情報のみでは得られない好気性代謝から嫌気性代謝への変化を捉える。次に、呼気計測の代わりに心拍情報を用い、その変化を捉えることができる指標を提案する。最後に、高強度の身体負荷に伴う嫌気性代謝の高まりを判断する換気性作業閾値 (VT) と血中乳酸蓄積開始点 (OBLA) と提案指標との関連について検討する。

### 4.2 呼吸代謝情報から得られる身体状況

高強度の身体負荷時の呼吸代謝情報の変化について検証するため、身体負荷強度を間欠的に増加させた間欠式漸増負荷試験 Test 3 における呼吸代謝情報の経時変化例 (協力者 3A) を図 4.1 に示す。

ペダル仕事率に対する応答値として、各負荷段階で観測された最大値を読み取る。酸素摂取量は、心拍数と同様に負荷に対して速やかに応答しており、負荷開始前には 3.9 mL/kg/min であったが、ペダル仕事率の増加に応じて増加し、第1段階 (ペダル仕事率 100W) で、17.3 mL/kg/min になり、最終段階 (ペダル仕事率 200 W) では 39.7 mL/kg/min に達していた。二酸化炭素排出量も同様に負荷開始前には 3.6 mL/kg/min であったが、第1段階で、18.2 mL/kg/min になり、最終段階では 54.5 mL/kg/min に達していた。換気量は負荷開始前には 9.0 L/min であったが、第1段階で、32.6 L/min になり、最終段階では 105.0 L/min に達した。また、血中乳酸値は負荷開始前に 1.6 mmol/L だったが、第1段階終了直後に 3.6 mmol/L となり、最終段階では 12.2 mmol/L に達した。

換気量、二酸化炭素排出量、および血中乳酸値に着目すると、心拍数と同様に負荷に対して速やかに応答し、ペダル仕事率の上昇により単調に増加した。心拍

数および酸素摂取量と異なる挙動として、特に 4 段階目以降の身体負荷強度では、ペダル仕事率に対する変化量が上昇した。高強度の身体負荷に伴う換気量および二酸化炭素排出量増加率の上昇は、嫌気性代謝の高まりを反映していると判る。

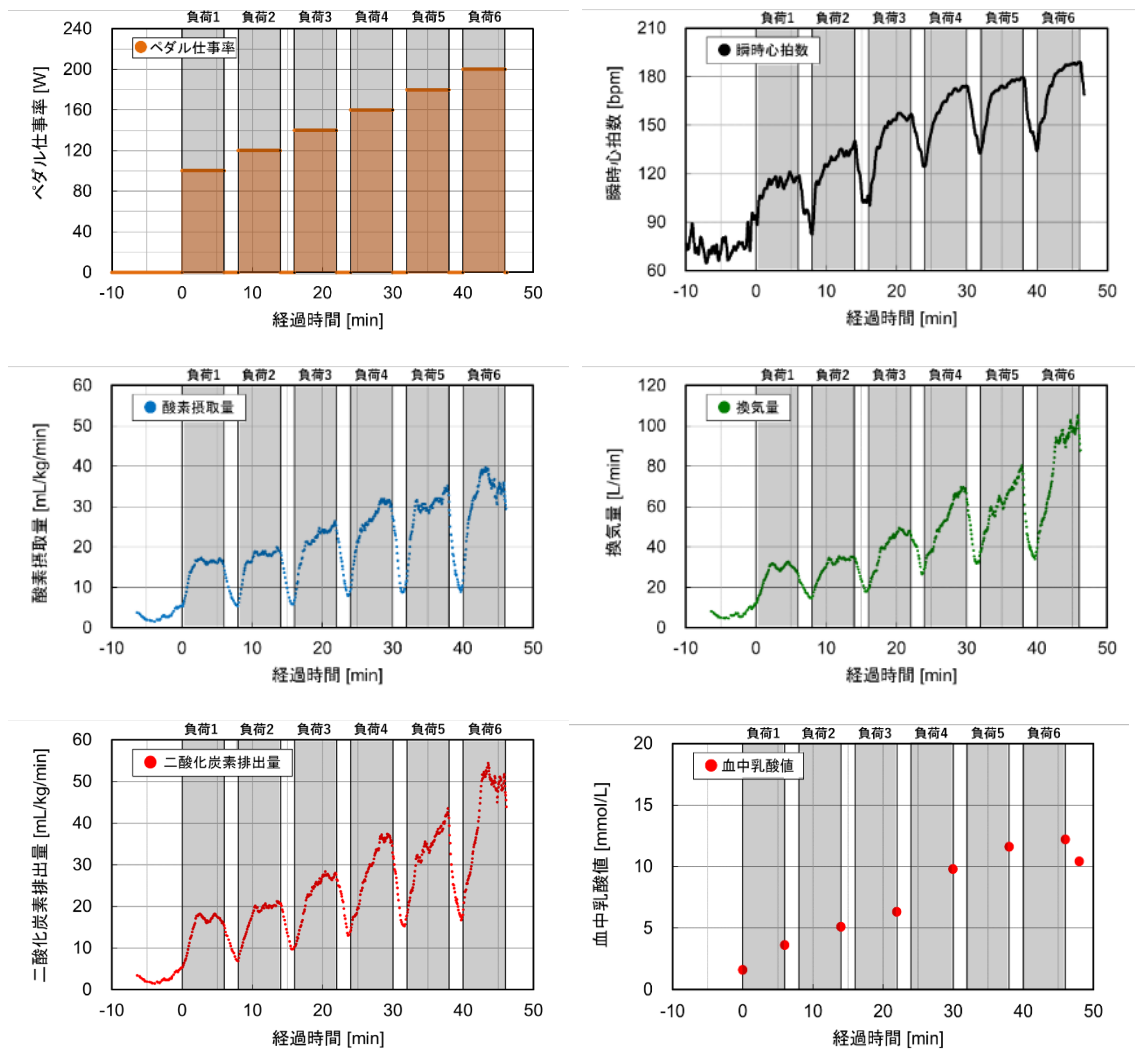


図 4.1 Test 3 における生理情報、生体情報の経時変化例

次に間欠式漸増負荷試験 Test 3 での協力者全員のペダル仕事率に対する応答値を抽出したものを図 4.2 に示す。ペダル仕事率は、ペダル回転数、ペダルトルク、ペダル円周長さの積から算出した。酸素摂取量も心拍数と同様にペダル仕事率の増加に対して線形的に増加していた。これは  $\Delta HR$  と同様に第 3 章で述べた個人の実性によるものであり、このような協力者が存在することにも留意する必要がある。

換気量と二酸化炭素排出量は、軽強度負荷では個人間の差が小さいが、協力者



毎に異なるペダル仕事率を境に負荷強度に対する増加率が変化し、個人間のばらつきが大きくなる結果となった。血中乳酸値も、同様に軽負荷時には低値であるが、負荷強度の増加に対して、ある協力者毎に異なるペダル仕事率を境に上昇し、増加率が増していく様子が確認できる。こちらもやはり、急上昇を開始する点は、個人毎の差が大きく見られる。

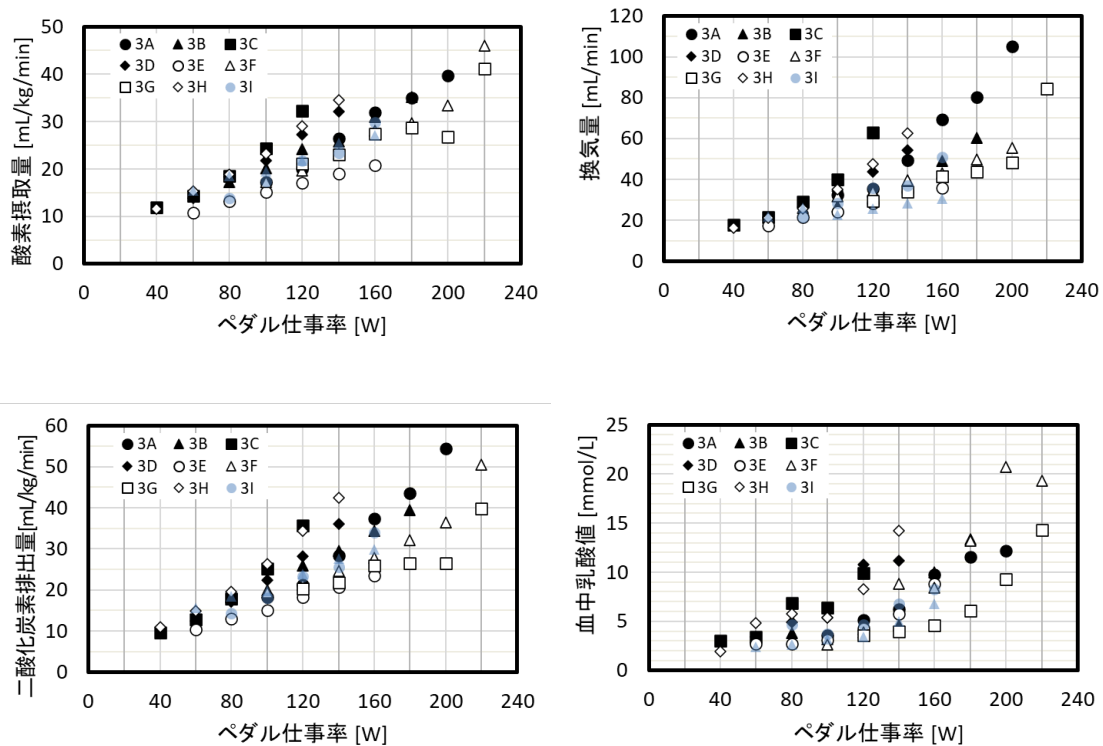


図 4.2 Test 3 におけるペダル仕事率に対する各協力者の生理、生体情報

次に、取得した酸素摂取量をもとに算出した実測代謝当量で整理した結果を図 4.3 に示す。実測代謝当量は、各負荷での酸素摂取量を安静時の酸素摂取量で除すことで算出し、安静時酸素摂取量は身体負荷試験開始前にシートへ腰かけた際に観測された酸素摂取量とした。

$\Delta HR$  は、ペダル仕事率と同様に代謝当量の増加に対応した上昇が見られた。第 3 章で述べたように  $\Delta HR$  を用いることで身体負荷強度を個人間のばらつきを小さく評価することが出来る。ただし、協力者 3E に関しては、他の協力者と異なる挙動を示しており、実測代謝当量に対する  $\Delta HR$  が高値を示していた。

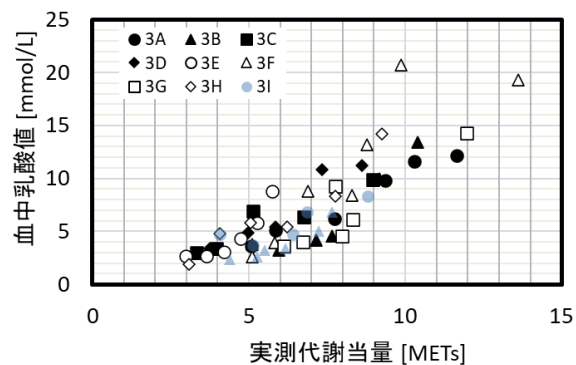
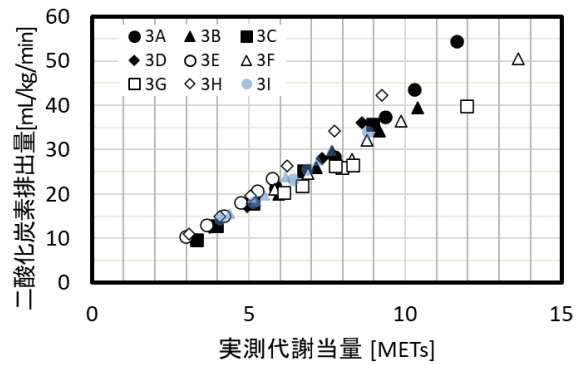
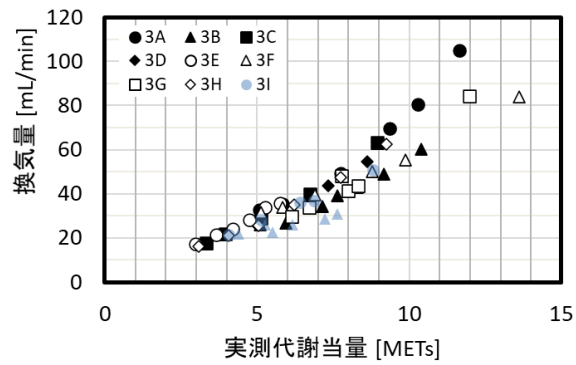
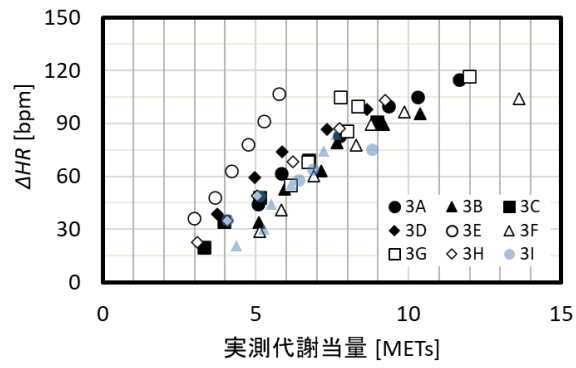


図 4.3 Test 3 における各協力者の実測代謝当量に対する生理、生体情報

これは、個人の特性によるもので、このことから  $\Delta HR$  以外の指標を併せて

評価する必要がある。

実測代謝当量に対する換気量、二酸化炭素排出量、血中乳酸値は、ペダル仕事率での整理に比べて個人差が減少している。また、図 4.2 と同様に低強度の負荷では、実測代謝当量の増加に応じて増加するが、高強度になるとばらつきが大きくなる傾向がある。また、実施した活動強度をみると、一般の成人男性 3 名の協力者が消防活動の目安となる 9 METs の代謝当量まで実施出来ずに活動継続不能に至った。

次に、消防隊員における代謝当量に対する生理情報、生体情報について述べる。横浜市消防局所属の消防隊員協力のもと実施した連続式漸増負荷試験 Test 4 について同様に高強度の身体負荷時の心拍数と呼吸代謝情報の変化を検証する。Test 4 は、図 4.4 に示したように身体負荷強度が時間経過と共に徐々に漸増し、活動限界に至る身体負荷試験である。まず、初めに低速で 2 分、高速で 3 分間の計 5 分間歩行した後に、シャトルランを開始した。休憩を挟まず、徐々に負荷強度が上昇するため、身体負荷に応じた一連の呼吸代謝情報を得ることができる。

連続式漸増負荷試験 Test 4 において取得した代表的な協力者（協力者 3A）の心拍数、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気量の経時変化を図 4.5 (a)~(c) に示す。図 4.3 と同様に呼気計測で得られた酸素摂取量から実測代謝当量を算出している。心拍数、酸素摂取量、二酸化炭素排出量と換気量は負荷開始と同時に上昇を開始し、負荷強度の増加とともに増加する。Test 3 での結果と同様に、特に高強度の身体負荷強度では、心拍数、酸素摂取量に比べて、二酸化炭素排出量と換気量の増加率が異なる。

次に、走行速度が変化する直前での、心拍数、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気量を協力者全員のものを読み出し、日本と英国の消防隊員について整理した結果を図 4.6 に示す。まず、全ての協力者が消防活動の目安である 9 METs を超える大きな負荷強度まで実施していたことを確認した。Test 3 と同様に、代謝当量の増加に対応して心拍数は増加していた。二酸化炭素排出量と換気量については、高負荷側で変化率が増加していた。この変化は、一般の協力者と消防隊員、あるいは日本人と英国人間で差異は認められなかった。

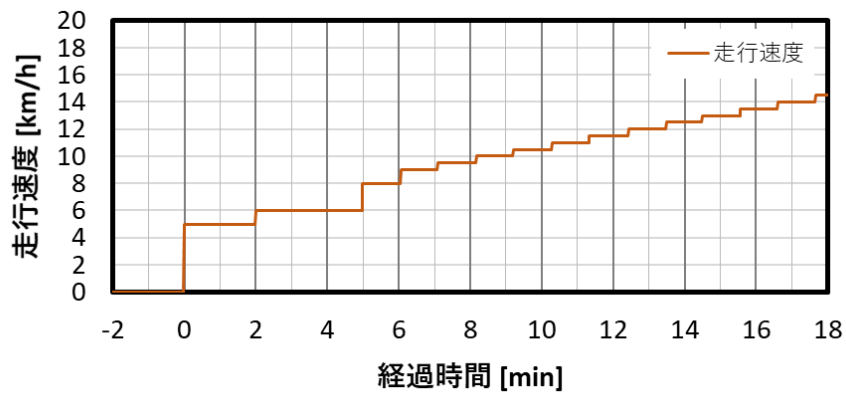


図 4.4 Test 4 における走行速度の変化

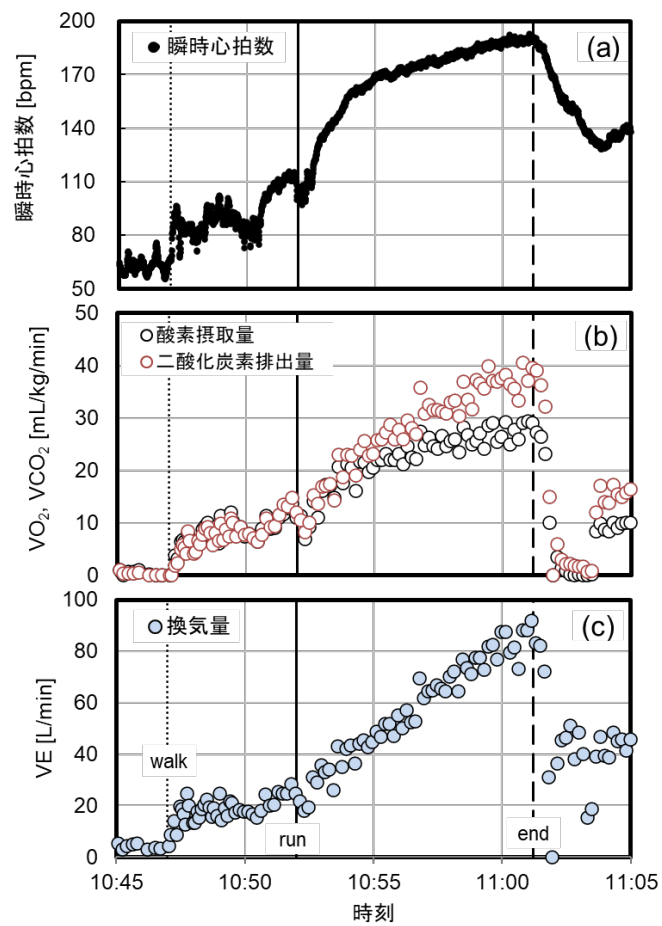


図 4.5 Test 4 における心拍数、酸素摂取量、二酸化炭素排出量の経時変化例

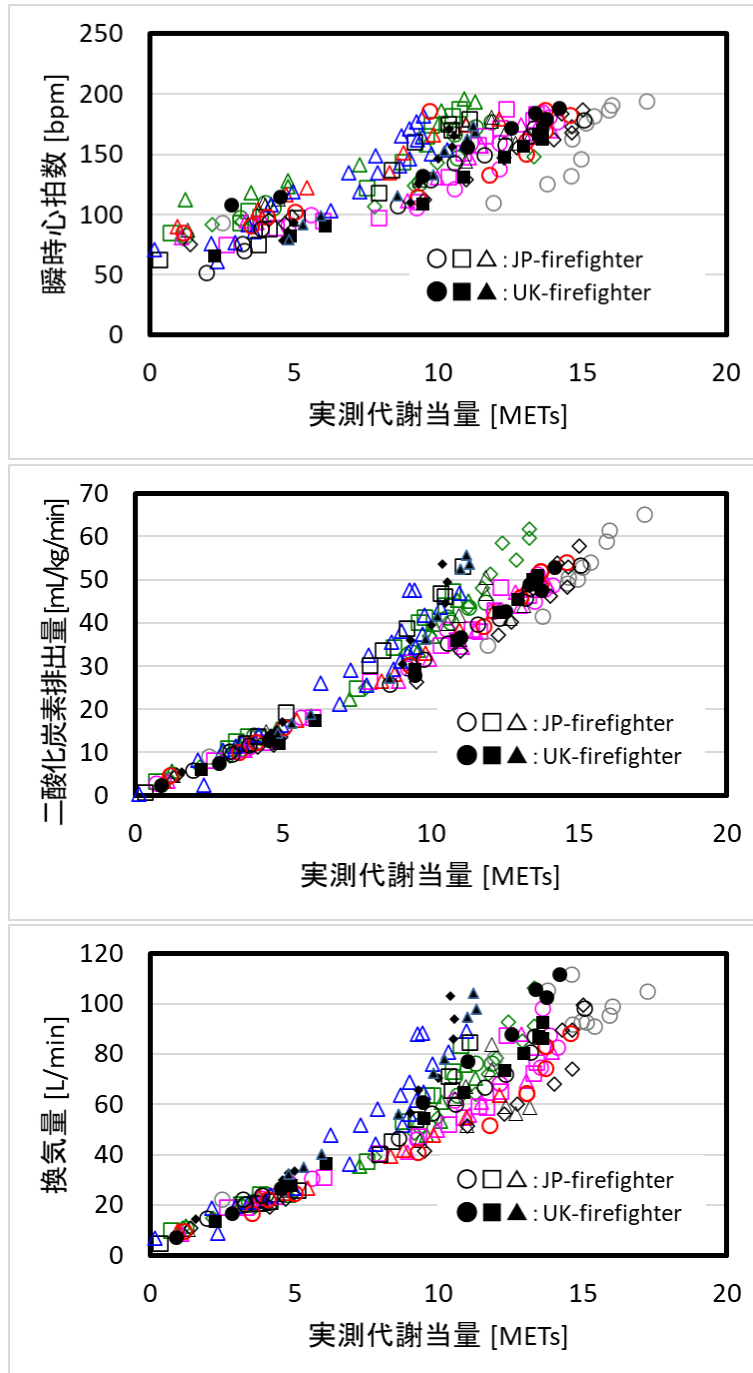


図 4.6 Test 4 における各協力者の実測代謝当量に対する生理情報、生体情報

図 4.6 に示した一部の協力者を抜粋し、各協力者で上昇率が変化する負荷強度が異なることを強調したものを、図 4.7 に示す。生理情報、生体情報は身体負荷強度の増加に着目すると、身体負荷強度との対応が得られる心拍数、酸素摂取量に加えて、高強度の身体負荷強度側で応答が変化し、嫌気性代謝の高まりを反映する換気量、二酸化炭素排出量、血中乳酸値が重要である。

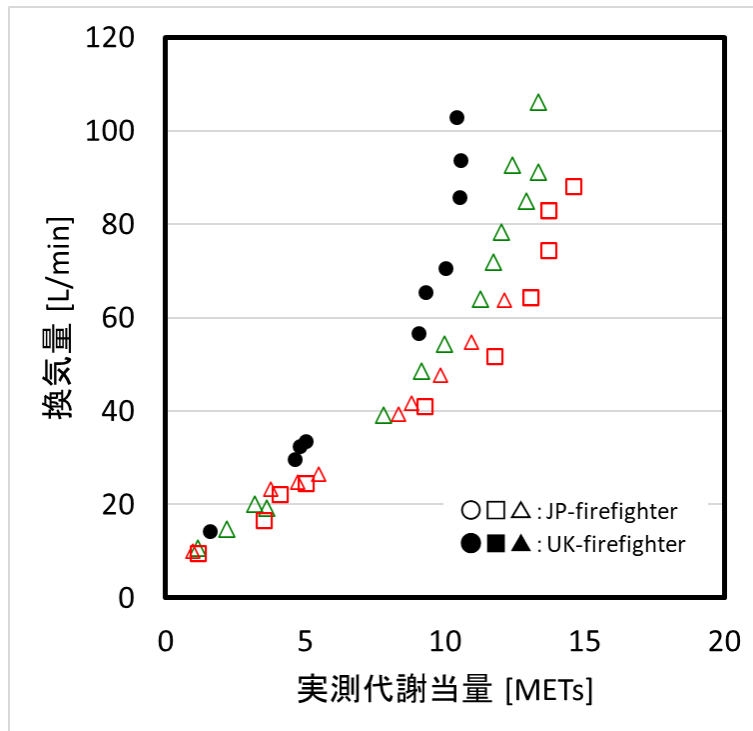


図 4.7 Test 4 における実測代謝当量に対する換気量の変化

第 1 章で述べたように、身体負荷強度の増加に伴って好気性代謝が支配的な状態から嫌気性代謝が支配的な状態への遷移がおこる点を無酸素性作業閾値 (Anaerobic Threshold, AT) と呼び、図 4.5 (b) で確認できるように酸素摂取量に対する二酸化炭素排出量の比率が増加しだす点から推定したものを換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold, VT)[2-4]、血中乳酸値の上昇開始点から推定したものは乳酸性作業閾値 (Lactate Threshold, LT) [5] と呼ばれる。さらに、嫌気性代謝の亢進による血中乳酸の増加量がある点に達すると血液が酸性化し、それに伴う生体反応として二酸化炭素排出量に対する呼吸性代償という換気量の亢進が見られ[6]、これ以上の負荷強度となると、乳酸により血液が酸性に傾いていき、換気量が急激に増大し、身体活動継続不能に至る。これらは、身体に対する過大な負荷を判断する重要な情報である。

以上のように、呼吸代謝情報は高強度の身体負荷下で身体状況に関わる詳細な情報を含んでおり、高強度の身体負荷時の身体状況の判断指標として有用である。ただし、呼吸代謝量の中で、酸素摂取量と二酸化炭素排出量の計測はガス分析装置を必要とすることから、消防活動中の計測がより困難な生理情報であり、ガス分析装置を必要とせずに計測可能なものは換気量である。

換気量は単位呼吸あたり換気量 (tidal volume, TV) と呼吸数 (respiratory rate, RR) の積で表される[7]。間欠式三段階漸増負荷試験 Test 2 における 2 名の協力

者の換気量、単位呼吸あたり換気量および呼吸数の経時変化を図 4.8 に示す。呼吸数の単位は bpm (breaths per minute) とした。

図 4.8 (a) に示した換気量は、負荷開始前は 9.0 L/min であるが、負荷 1 では、18 L/min、負荷 2 と負荷 3 では、それぞれ 39 L/min, 64 L/min と負荷強度が増加するとそれに伴って上昇した。次に、図 4.8 (b) に示した単位呼吸換気量は、負荷開始前では 0.5 L/b ほどであるが、負荷に対して速やかに上昇し、負荷 1 では 1.2 L/b、負荷 2 と負荷 3 は 2.1 L/b, 2.3 L/b まで上昇し、単位呼吸換気量は負荷 2 と負荷 3 の上昇量が少なかった。図 4.8 (c) に示した呼吸数の経時変化は、負荷開始前のばらつきが大きかったが、負荷 1 では 16 bpm, 負荷 2 および負荷 3 では、それぞれ、19 bpm, 28 bpm ほどであり、負荷 1 と負荷 2 では呼吸数の差は少なかった。いずれの指標も負荷終了時には速やかに低下した。

以上のように、換気量、単位呼吸あたり換気量、呼吸数は身体負荷強度に対して素早く応答して上昇し、それぞれに対して、各負荷の後半 10 分間の平均値を各身体負荷に対する応答値とし、身体負荷強度の指標として安静時酸素摂取量を 3.5 mL/kg/min [8] と仮定して代謝当量を算出した。

これらの呼吸代謝情報の応答値を代謝当量に対してプロットしたものを図 4.9 に示す。換気量は負荷 3 で急激に上昇しており、負荷 3 の負荷強度は生体内で嫌気性代謝が卓越していたと推定される。ここで、単位呼吸換気量に着目すると、単位呼吸換気量は負荷量に対して増加し、片方の協力者では負荷 2 に対する負荷 3 の増加率は低下していた。ここで呼吸数は負荷 1 と負荷 2 の違いに対して負荷 2 と負荷 3 の増加率は明らかに大きかった。身体負荷強度を上昇させていくと、初期は一回換気量が主に増加し、最終的には呼吸数が増加するとされており [9]、この結果は一致していた。

この結果は、協力者 2 名のみのものであったことから、連続式一定負荷試験 Test 6 の予備実験として、横浜市消防局所属の消防隊員 18 名に自転車エルゴメータを使用して 3 段階の身体負荷試験を実施した時のデータを用いて確認する。ペダル回転数は 50 rpm、負荷時間は第 1 段階 (2.0 kg・m) および第 2 段階は 10 分間 (3.0 kg・m)、第 3 段階 (4.0 kg・m) は活動継続不能に至るまで実施した。第 3 段階を 7 分間以上継続できた 6 名の協力者の各段階の終了直前 1 分間の平均を応答値として算出し、図 4.10 のように整理すると、図 4.9 と同様に高強度の身体負荷時には呼吸数が急上昇することが判る。

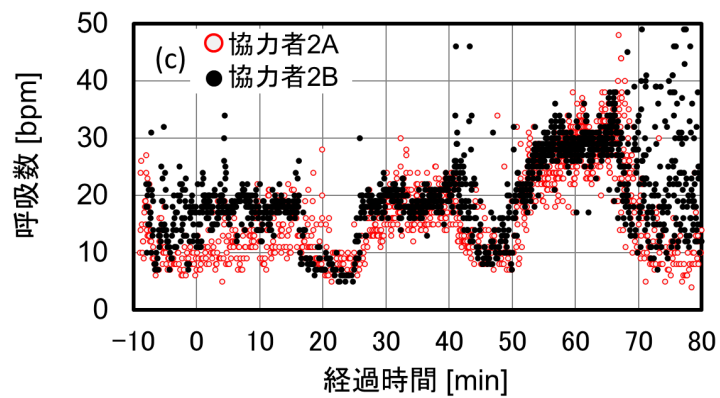
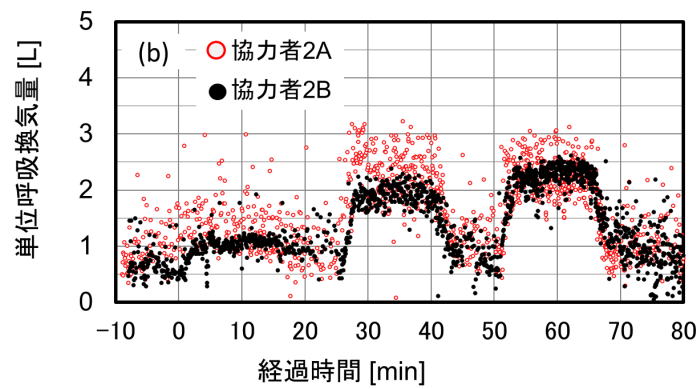
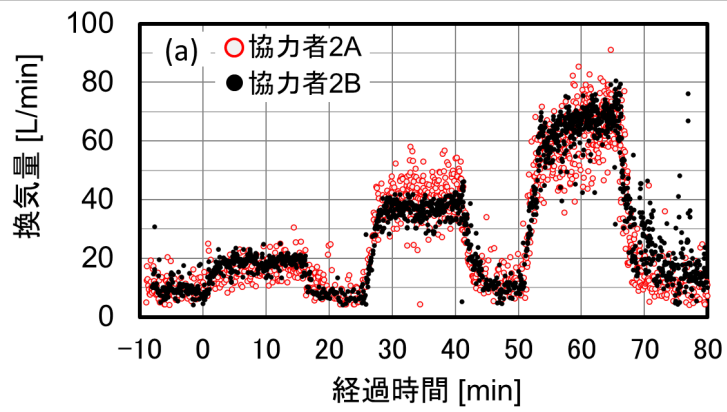


図 4.8 Test 2 における換気量、単位呼吸換気量、呼吸数の経時変化



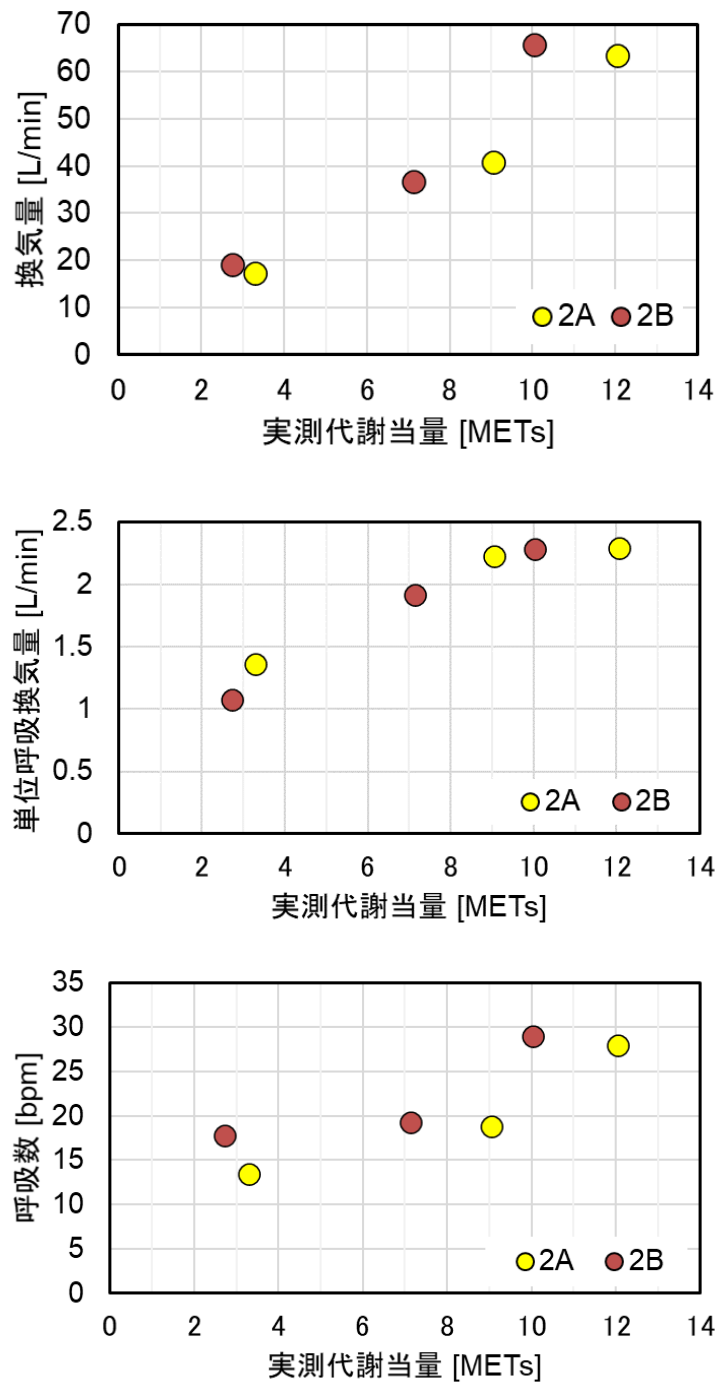


図 4.9 Test 2 における実測代謝当量に対する換気量、単位呼吸換気量、呼吸数の応答

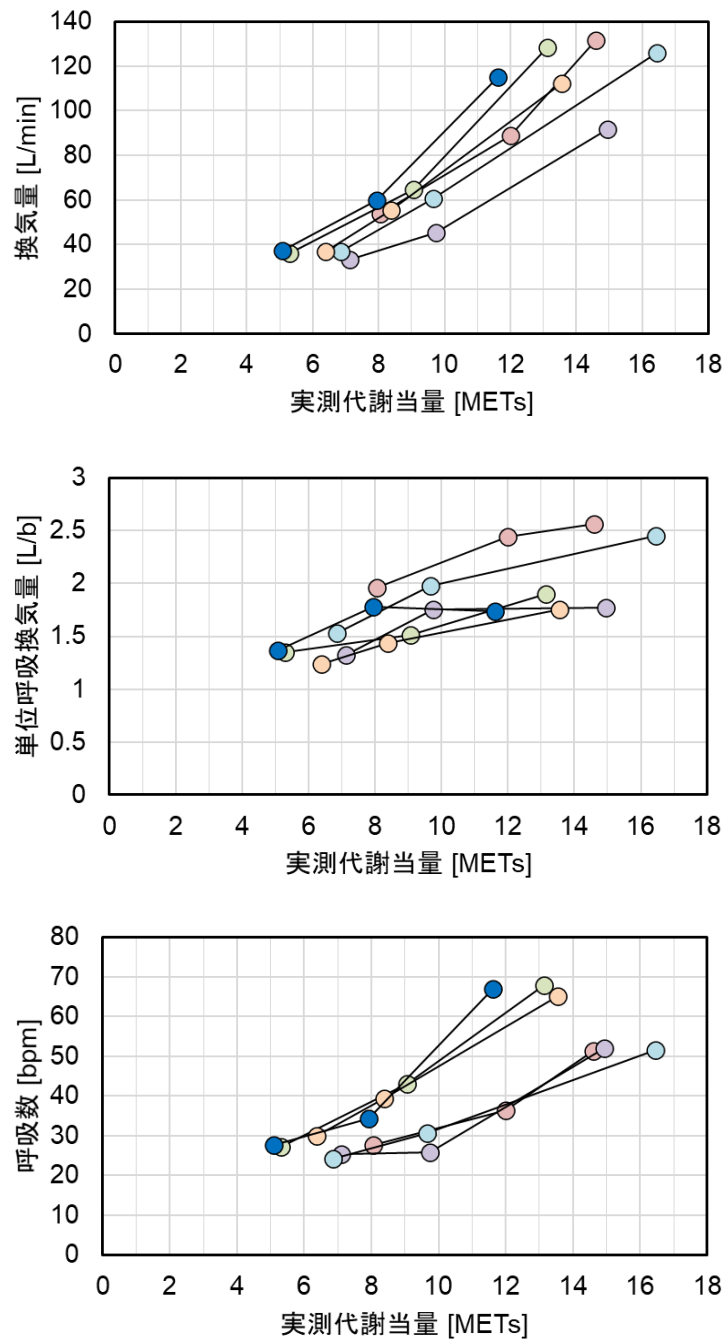


図 4.10 実測代謝当量に対する換気量、単位呼吸換気量、呼吸数の応答

以上のように、呼吸代謝情報は消防活動中の計測は困難であるが、特に呼吸数は高強度の身体負荷下で急激に上昇することから、指標として有望である。そこで、次節では消防活動中に計測可能な心拍変動を周波数解析することで得られる周波数スペクトルと呼吸数との相関について検討する。

## 4.3 心拍変動の周波数スペクトルと呼吸

### 4.3.1 心拍変動と呼吸の相関

呼吸は心拍数へ影響する。具体的には呼気時に心拍数は低下し、吸気時には心拍数は上昇することが知られており、肺胞でのガス交換効率上昇に寄与するRSA(Respiratory Sinus Arrhythmia)と呼ばれる生体反射[10]がある。そのため、呼吸数が心拍変動を周波数解析することで得られる周波数スペクトルに反映され、その影響が表れる領域としてHFが定義されている。高強度の運動時にどこまでRSAが心拍変動へ影響を与えるかについては不明であるが、高強度の身体負荷時は、既存のHFより高周波数側の領域に注目する必要がある。

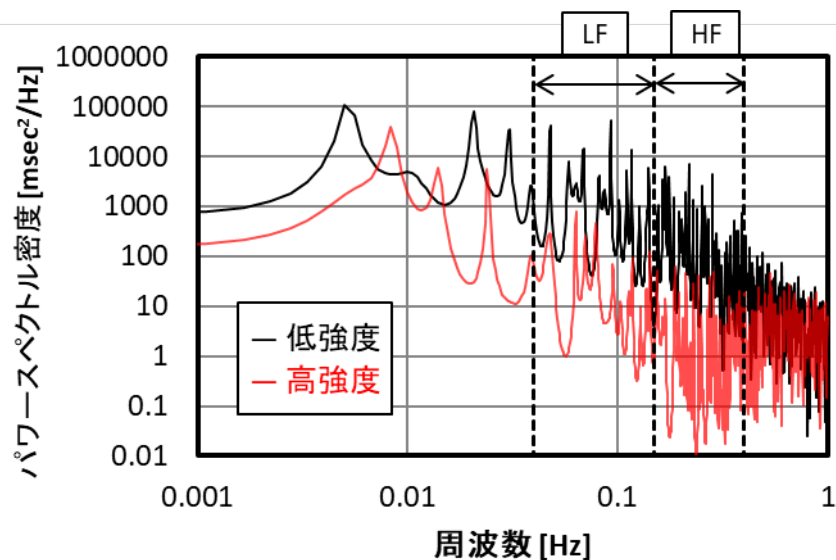


図 4.11 低強時と高強度負荷時の心拍の周波数スペクトル

ここで、Test 2 で計測された安静時と高負荷時の周波数スペクトルの比較を図 4.11 に示す。高強度の身体負荷時の心拍変動を周波数解析することで得られる周波数スペクトルに関しては、LF のパワースペクトル密度が低下するという報告[11]、さらに全体的にパワー(TP)が低下するという報告[12]があり、それぞれの報告と一致した変化を示した。さらに、HF 領域のパワーの相対的低下と同時に HF 以上の領域でのパワーは減少せず、相対的に増加した。この変化は上述の呼吸周波数の上昇による HF の逸脱に関係するのではないかと考えた。

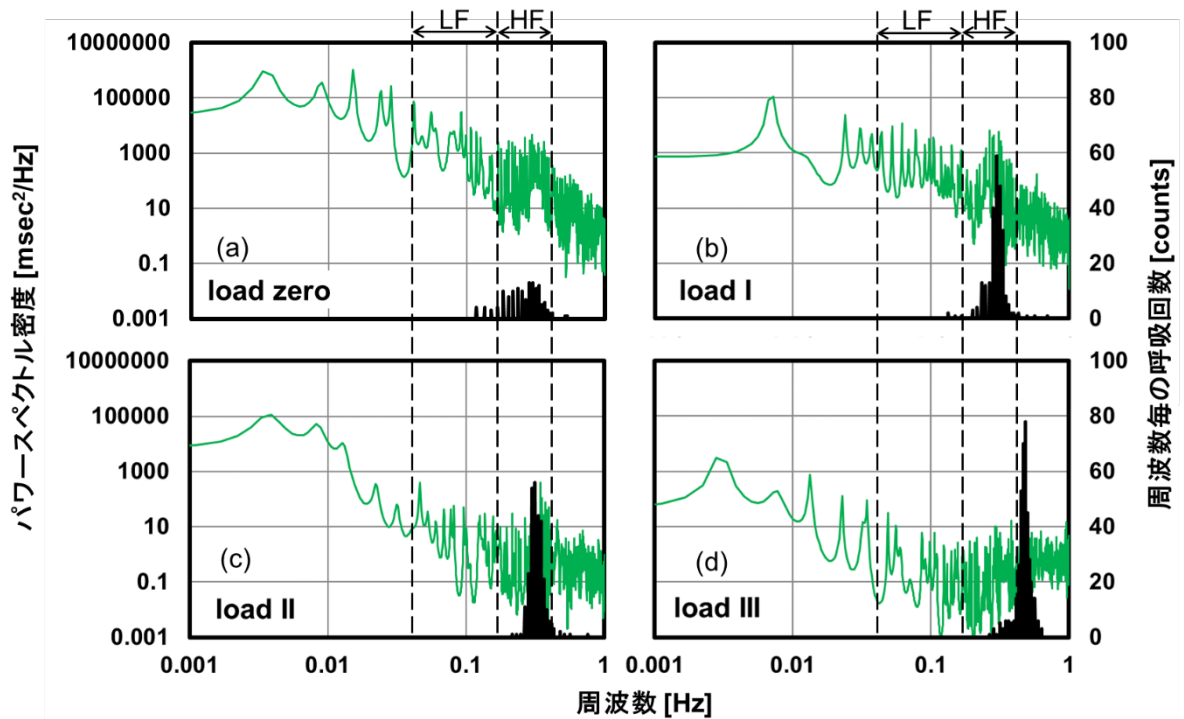
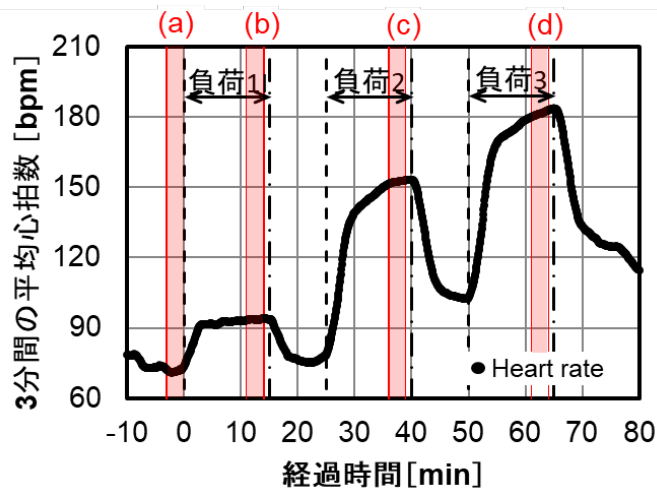


図 4.12 Test 2 における心拍数と PSD、呼吸数の関係

そこで、呼吸の影響を検討するため、例として間欠式三段階負荷実験 Test 2 において呼吸数が安定して得られた協力者の結果を用いて確認する。心拍数の経時変化を図 4.12 に、負荷開始前の 3 分間を図 4.12 (a) に、各負荷の終了 1 分前から 4 分前の 3 分間に観測された RR 間隔を用いて算出された PSD を図 4.12 (b) ~ (d) に各負荷の代表として示す。それぞれ、各負荷段階中に観測された呼吸数の周波数毎のデータ点数を黒色のヒストグラムとして表示している。まず、心拍数は 3 分間の平均値をプロットしており、それぞれ、軽強度である負荷 1 では 94.1 bpm、中強度である負荷 2 では 153.4 bpm、高強度である負荷 3 では 183.7 bpm

に達した。

負荷 1, 2, 3 全体での平均呼吸数は 18.1 bpm (SD 3.2), 19.8 bpm (SD 2.9), 28.5 bpm (SD 3.7)であった。負荷開始前、負荷 1、負荷 2 での呼吸数は HF 領域に含まれていたが、負荷 3 では呼吸数が上昇し、HF の周波数範囲を逸脱した。また、それぞれ呼吸数に対応した周波数領域で PSD のピークが確認された。

さらに PSD の形状に着目すると負荷開始前、および負荷 1 では緩やかな傾きを持っていたが、負荷 2 では全体的な PSD の低下が見られ、HF 以上の領域で傾きが見られなくなった。さらに負荷 3 の PSD は LF, HF よりも高周波数側 PSD が相対的に大きくなっていた。

#### 4.3.2 心肺負荷状態評価指標 *RIR* の提案

協力者が活動継続不能となった身体負荷試験中には、前項で確認した特徴的な PSD 形状の変化がほぼ全ての協力者において見られ[13]、この変化は安静時や低負荷活動時の呼吸反射は HF に現れる[14, 15]が、長時間の活動が困難なほどの高負荷活動時では、HF よりも高周波数帯域に呼吸反射ピークが現れる[16]ことと関連していると推察される。第 1 章でも述べたように、呼吸数は成人の安静時ではおよそ 12~20 bpm であることから、HF の周波数帯は安静時の呼吸数を包含していることが分かる。しかしながら、高強度の身体負荷時になると呼吸数は最大で 60 bpm (= 1.0 Hz)に達することもある[17]。そこで呼吸数の上昇を捉えることを意図し、HF 周波数帯域よりも高い周波数帯域 (0.4~1.0 Hz) を VHF と定義した。さらに、トータルパワー (0.04 ~ 1.0 Hz) に対する比とすることで、呼吸の乱れによる心肺機能への負荷程度を示す心肺負荷状態評価指標 (Reflection Index of Respiratory, *RIR*) と定義した[18]。

$$RIR = \frac{P_{VHF}}{P_{LF} + P_{HF} + P_{VHF}} \quad (1)$$

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

この指標 *RIR* の身体負荷に対する変化について、Test 2 の協力者 2 名の心拍数と *RIR* の経時変化を図 4.13 に示す。どちらの協力者も軽強度の負荷である負荷 1 および休憩中では *RIR* の上昇はほとんど見られなかったものの (*RIR* < 0.1)、中強度、高強度の負荷 2, 3 では明確に上昇した (*RIR* < 0.6)。ただし、中強度負荷 2 に関しては、実験協力者 2 名のうち 23 歳の協力者 2A では *RIR* の上昇が小

さいが ( $RIR < 0.3$ )、58歳の協力者 2B は大きく上昇しており ( $RIR > 0.6$ )、異なった応答を示していた。

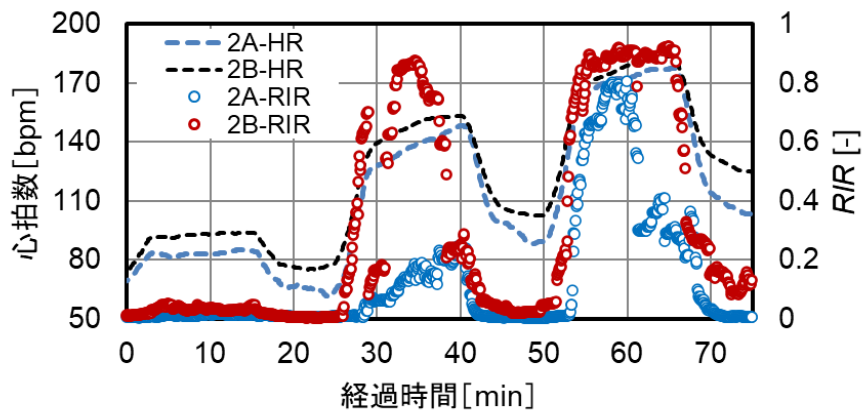


図 4.13 Test 2 における心肺負荷状態評価指標  $RIR$  の経時変化

心肺負荷状態評価指標  $RIR$  は身体負荷強度の上昇に対して非常に良い応答性をもって上昇するが、低強度の身体負荷時には低値を保持しており、これはリアルタイムで管理する場合には有利である。さらに、呼吸数の急上昇がみられる呼吸代償は嫌気性代謝が卓越していることを示し、 $RIR$  の上昇は嫌気性代謝の卓越と一定の相関が得られる可能性があると考えた。もし消防活動中に計測可能な心電情報を用いて  $AT$  との相関が得られれば、推定できればモニタリング指標として非常に有用である。そこで、次節では  $RIR$  と  $AT$  に関わる生理情報の関連を検討する。

#### 4.4 嫌気性代謝の卓越と $RIR$ の変化

間欠式三段階負荷実験 Test 2 では協力者数が 2 名、負荷強度も 3 段階と限られていたことから、 $RIR$  とその他の生理指標の相関を詳細に検討することができない。そこで、図 4.5 に示した連続式漸増負荷試験 Test 4 の結果から、 $RIR$  と  $VT$  に関わる生理指標との関係を検討する。

4.1 節で述べたように身体負荷強度が低い領域では好気性代謝が支配的となり、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的に増加する。しかし、ある負荷強度を超えると負荷強度に対する換気量、二酸化炭素排出量の増加率が上昇する。この変化点である換気性作業閾値 ( $VT$ ) を求めるため、 $V$ -Slope 法[19]に従い、身体負荷時に取得した酸素摂取量に対する二酸化炭素排出量の全てのデータに対し、2 直線で近似できると仮定して交点を変化させ、相関係数が最大となる交点の位置、および二直線を決定し、

その交点を図 4.14 のように換気性作業閾値と決定した。

Test 4 を実施した協力者の中で、RR 間隔、呼吸代謝情報のデータ欠損が多く計測に失敗した協力者を除く消防隊員 14 名、英国の消防隊員 4 名の VT にあたる酸素摂取量を図 4.15 に示す。年齢、国籍によらず各協力者の VT における酸素摂取量は平均 24.3 ml/kg/min (SD 3.2 ml/kg/min) となった。大学の運動部に所属する男子大学生の VT 時の酸素摂取量は平均で 22.8 ml/kg/min という報告 [20] と比較すると、消防隊員の換気性作業閾値は運動習慣のある若年者の値とほぼ一致しており、VT の推定精度に問題がないと見られる。

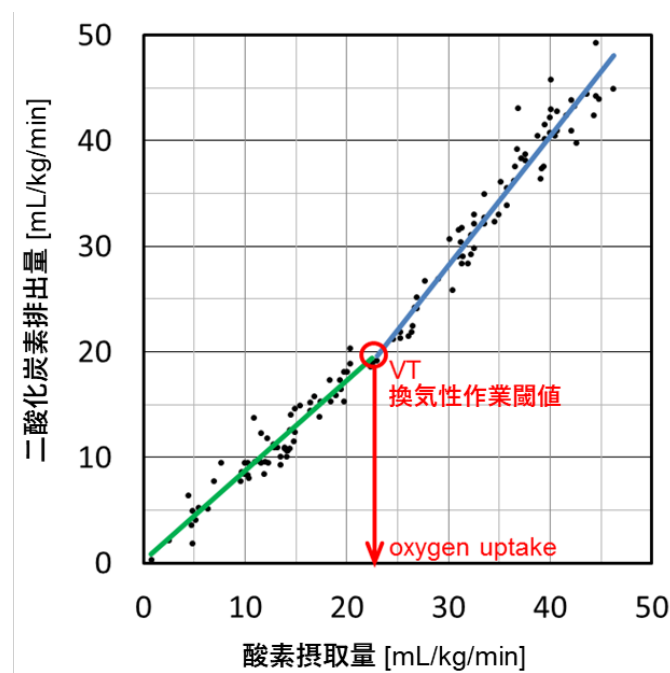


図 4.14 酸素摂取量と二酸化炭素排出量の関係と VT の定義 (V-slope 法)

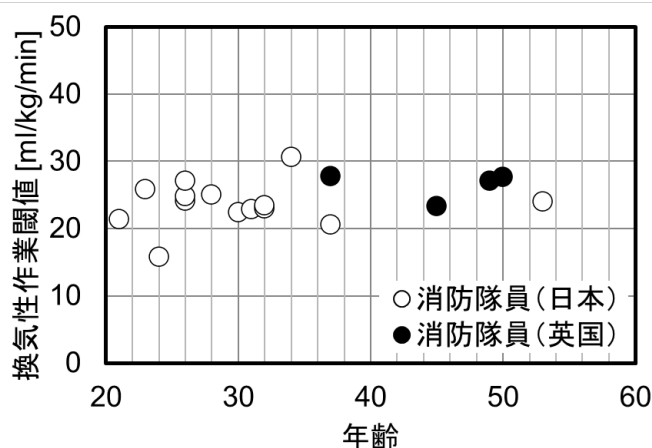


図 4.15 Test 4 協力者の年齢に対する換気性作業閾値 VT

VT 前後での  $RIR$  の変化を確認するため、連続式漸増試験で酸素摂取量が各隊員の VT に達した時刻( $t_{VT}$ )を基準とした心拍数と  $RIR$  の経時変化を図 4.16 に示す。シャトルラン開始直後は殆どの協力者の心拍数は負荷増大とともに上昇した。 $RIR$  の値は 0.2 以下であったが、VT を越えると  $RIR$  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。いずれの協力者も VT に達した時間から 1 分以内に  $RIR$  が急激に上昇していた。

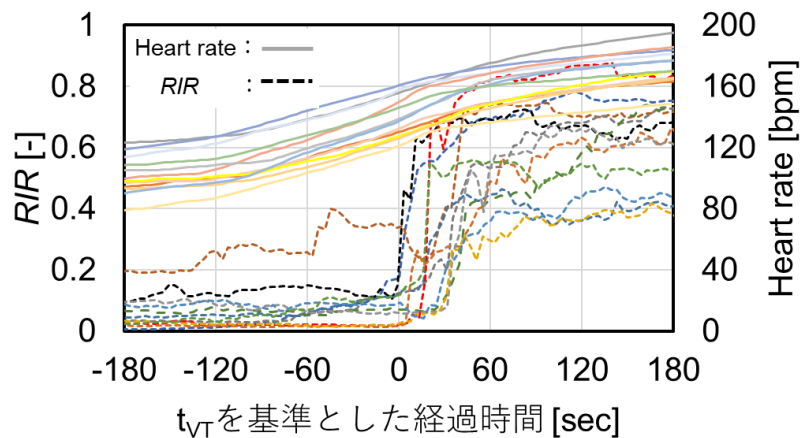


図 4.16 Test 4 における  $t_{VT}$  前後での  $RIR$  の変化

このことから、 $RIR$  が 0.3 以上の領域へ上昇を観察することで VT に達した負荷強度であるかどうかを判断できると考えられる。 $RIR$  と VT との相関がみられたことから、嫌気性代謝の卓越を判断できる他の生理指標として血中乳酸値に着目し、 $RIR$  の相関を検討する。

間欠式漸増負荷試験 Test 3 について、各負荷強度に対する  $RIR$  の経時変化を図 4.17 に示す。図中の×は実験協力者が負荷を中断した点を示している。Test 2 で確認したように負荷に対して  $RIR$  は速やかに上昇し、身体負荷を終了するまで、高値を継続した。その負荷中での  $RIR$  の最大値を負荷強度に対してプロットしたものが図 4.18 である。 $RIR$  は身体負荷強度の上昇に伴って上昇していたが、上昇する負荷強度は個人毎に異なっていた。

次に、間欠式漸増負荷試験 Test 3 で身体負荷強度に対する血中乳酸値の応答を図 4.19 に示す。各負荷に対応する血中乳酸値は負荷終了時に計測されたものである。血中乳酸値は負荷に対して指数関数的に増加し、急増する負荷強度は個人の身体能力により異なっていたことを確認した。このとき、血中乳酸値が急増し出す負荷強度を血中乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation, OBLA) と呼ばれ、AT と関連する指標として、一般的に  $4\text{mmol/L}$  が用いられ [21, 22]、VT と同様に OBLA へ達する負荷強度は個人の身体能力により異なる。

$RIR$  と血中乳酸値の関係を図 4.20 に示す。すると血中乳酸値が OBLA を超え



る点は  $RIR = 0.6$  以上の領域で発生していることが分かる。また、 $SpO_2$  が比較的安定して計測できた 3 名の協力者 (3A~3C) の負荷終了前 1 分前の平均値を  $RIR$  に対して整理した結果を図 4.21 に示す。計測に成功した人数は 3 名と少ないものの、 $RIR$  が上昇するに従って、生理情報である  $SpO_2$  は減少傾向が認められた。

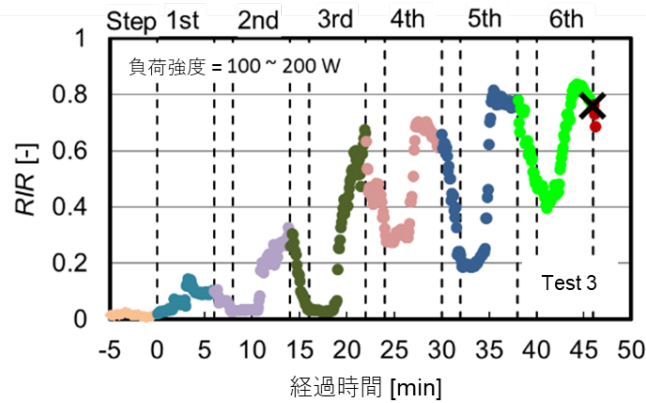


図 4.17 Test 3 中の  $RIR$  の代表的な経時変化例

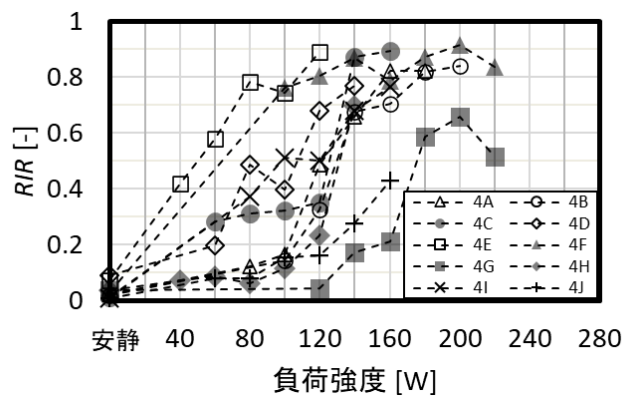


図 4.18 Test 3 における負荷強度に対する  $RIR$  の応答

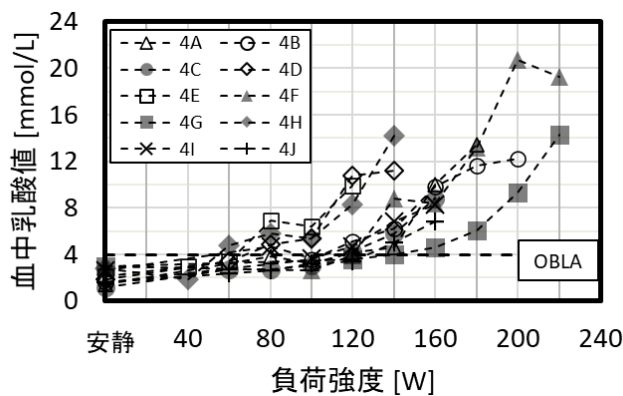


図 4.19 Test 3 における負荷強度に対する血中乳酸値の変化

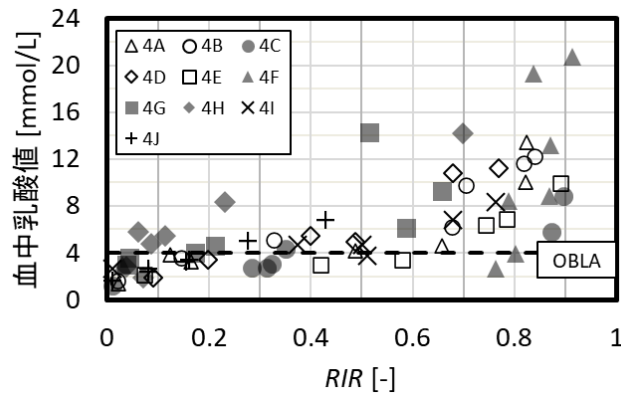


図 4.20 Test 3 における  $RIR$  に対する血中乳酸値の対応

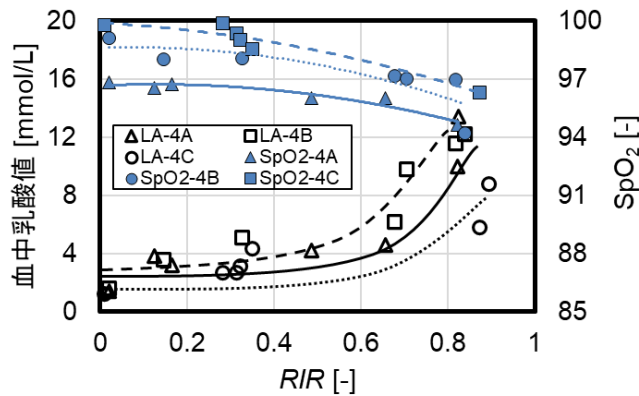


図 4.21 Test 3 における  $RIR$  に対する  $SpO_2$  と血中乳酸値の対応

以上のことから、ここで、血中乳酸値が **OBLA** を超える状況下では  $RIR$  が高値を示していることを確認できたことから、 $RIR$  を用いて嫌気性代謝の卓越を推定できることが判った。しかしながら、これらの検討に用いたデータはコントロールされた条件下で実施した漸増負荷試験のものを用いていることから、様々な身体負荷強度が連続的に課される状況下での  $RIR$  の適用性を確認する必要がある。

#### 4.5 $RIR$ による模擬消防活動中の身体状況評価

$RIR$  による身体状況判断の消防活動に対する適用性を検証するために、模擬消防活動 Test 7 中に  $RIR$  がどのような変化をするしているかを確認する。まず、図 4.22 (a)–(d)に代表として模擬消防活動中の消防隊員の 4 名の心拍数と  $RIR$  の経時変化を示す。この心拍数は周波数解析における解析セグメント内での平均心拍数のことを指す。図 4.22 (a), (c)は余裕をもって身体負荷試験を終えた協力

者(協力者 7A, 7C)、図 4.22 (b), (d)は不安定な動作で疲弊した様子が顕著にみられた典型的な実験協力者(協力者 7B, 7D)である。疲弊した実験協力者の判断基準はインタビューと観察結果に基づいており、体の動きが不安定、テスト直後に身体をサポートが必要、あるいは参加者が自ら消防用具を外せない様子のいずれかが観察された協力者である。

図 4.22 (a), (b)はそれぞれ 27, 28 歳、図 4.22 (c), (d)はどちらも 41 歳であり、年齢が近似した協力者のデータを選定した。協力者 7A の心拍数は 110 - 194 bpm、*RIR* は 0.01 - 0.62、協力者 7B では、136 - 181 bpm、0.02 - 0.82、協力者 7C は、98 - 143 bpm、0.02 - 0.51、協力者 D は、121 - 181 bpm、0.05 - 0.91 の範囲で変動した。心拍数の変動範囲は協力者 7B に比べて協力者 7A が大きく、*RIR* は対照的に協力者 7B の変動範囲の方が大きかった。同様の傾向は協力者 7C および 7D でも見られ、心拍数の変動範囲は協力者 7C、*RIR* の変動範囲は協力者 7D の方が大きかった。

経時変化を直接確認しても 20 代、40 代ともに疲弊した協力者の *RIR* の方が高値を継続していることが見て取れる。これは嫌気性代謝が有意な状況で活動を実施していたためであり、消防活動のような時間的変動が大きい負荷中であっても嫌気性代謝が有意な状況を判断できる可能性がある。ただし、心拍数に関しては、余裕があった協力者と疲弊した協力者での傾向の違いはられなかった。

これらの実験協力者の模擬活動中の平均心拍数及び *RIR* の計測値の分布を確認するため、その頻度分布を図 4.23 (a) - (d)に示す。平均心拍数は 60 ~ 200 bpm までを 5 bpm 毎に、*RIR* は 0 から 1.0 までの範囲を 0.1 毎にそれぞれ算出した。平均心拍数の分布に関しては協力者 C を除いて差はほとんど見られなかったが、*RIR* の分布では図 4.23 (a), (b)と図 4.23 (c), (d)間では明確な違いが確認され、余裕を持って実験を終えた協力者 4A および 4C では、ほとんど *RIR* < 0.6 の領域に分布していたが、4B および 4C は *RIR* > 0.6 の領域まで広く分布していた。

そこで、全協力者での分布を確認したものを図 4.24 (a) - (d)に示す。Test 6 中の *RIR* の値によって実験協力者は 2 つのグループ S, H に分類された。*RIR* が 0.6 を超えた時間帯が全活動時間の 20%未満であったものをグループ Sy、それ以外をグループ Hy とした。安定して測定を完了した 61 名の協力者のうち 40 名がグループ Sy、21 名がグループ Hy に分類された。

図 4.24 (c), (d)に示すようにそれぞれの平均心拍数分布は、グループ間での際は認められなかったが、図 4.24 (a), (b)に示す *RIR* の分布に関しては、グループ Sy の分布が 0.3 以上にほとんど分布していないにも関わらず、グループ Hy では全体的に分布している様子が見られた。

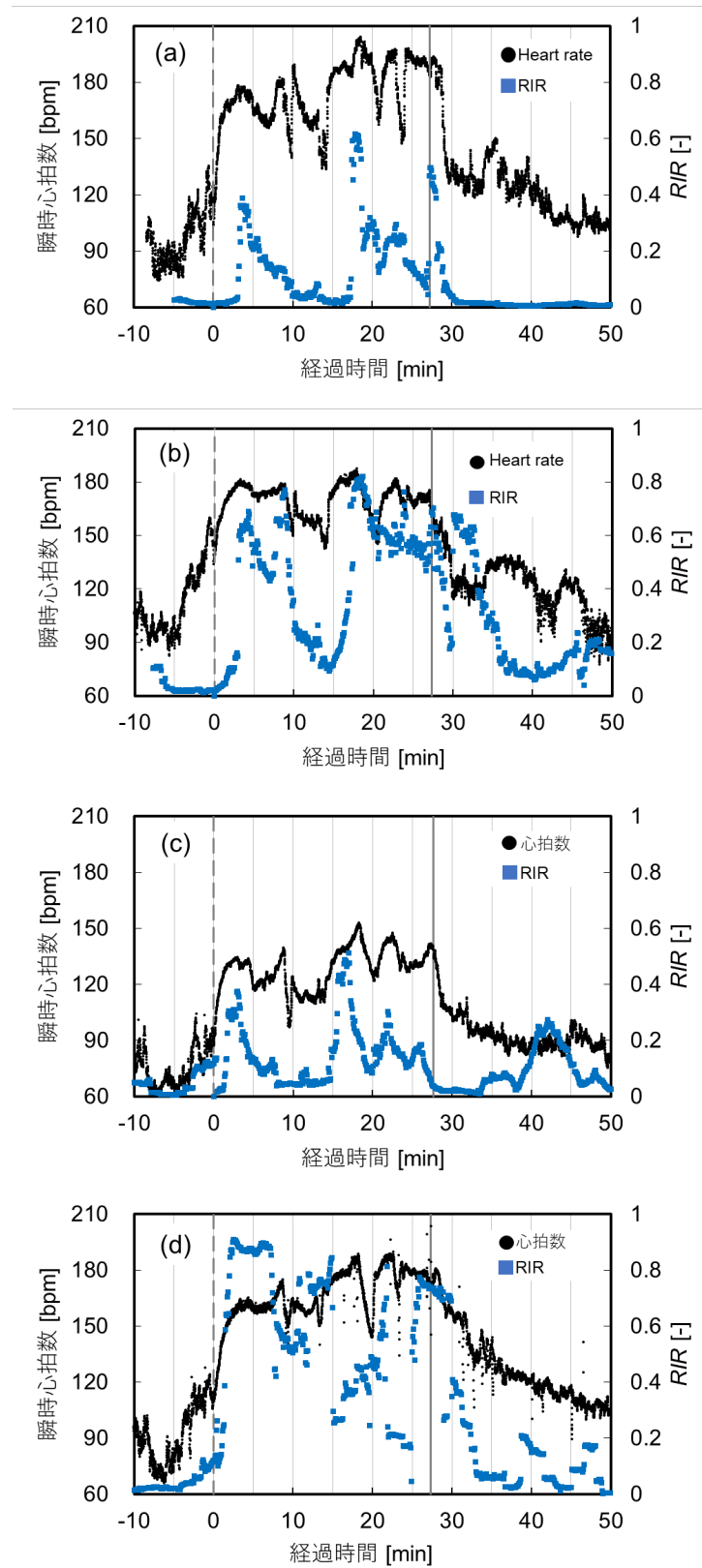


図 4.22 Test 7 中の心拍数と RIR の経時変化

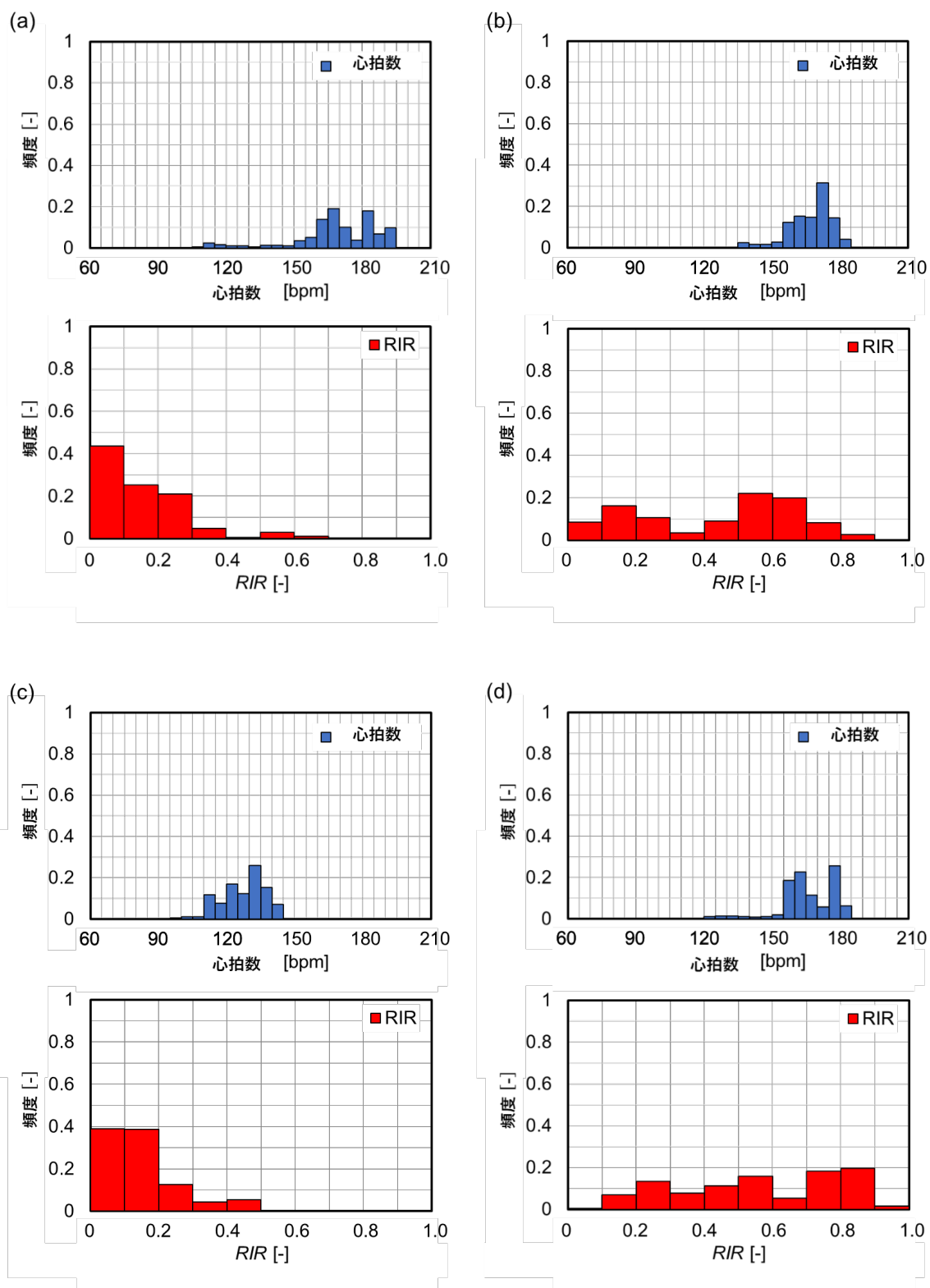


図 4.23 代表的な協力者の Test 7 中の心拍数と  $RIR$  のヒストグラム  
 (a), (c) 余裕をもっていた協力者、(b), (d) 疲弊した協力者

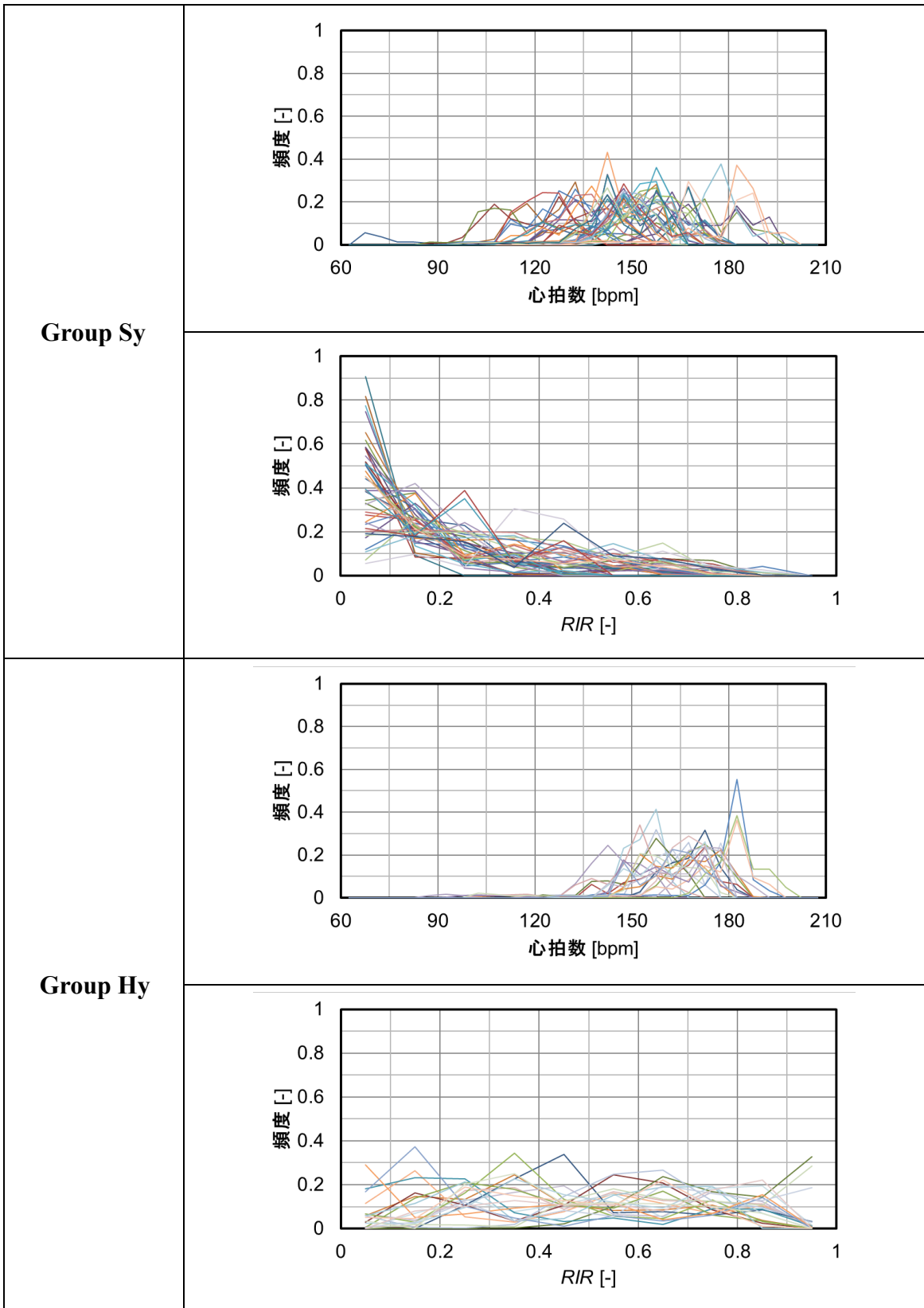


図 4.24 Test 7 中の心拍数と  $RIR$  の頻度分布

表 4.1 グループ Sy と Hy 間の比較

グループ		Sy	Hy
		n = 40	n = 21
年齢[years]	平均	34	39
	最大	55	54
	最小	19	24
	<i>p</i> 値	$2.1 \times 10^{-2}$	
身長[cm]	平均	173	170
	最大	184	181
	最小	164	163
	<i>p</i> 値	$4.1 \times 10^{-2}$	
体重[kg]	平均	69	70
	最大	84	90
	最小	57	58
	<i>p</i> 値	$5.9 \times 10^{-1}$	
血中乳酸値[mmol/L]	平均	3.0	5.8
	最大	7.3	9.8
	最小	1.2	1.8
	<i>p</i> 値	$9.1 \times 10^{-5}$	
平均 <i>RIR</i> [-]	平均	0.20	0.49
	最大	0.41	0.77
	最小	0.04	0.32
	<i>p</i> 値	$4.0 \times 10^{-12}$	

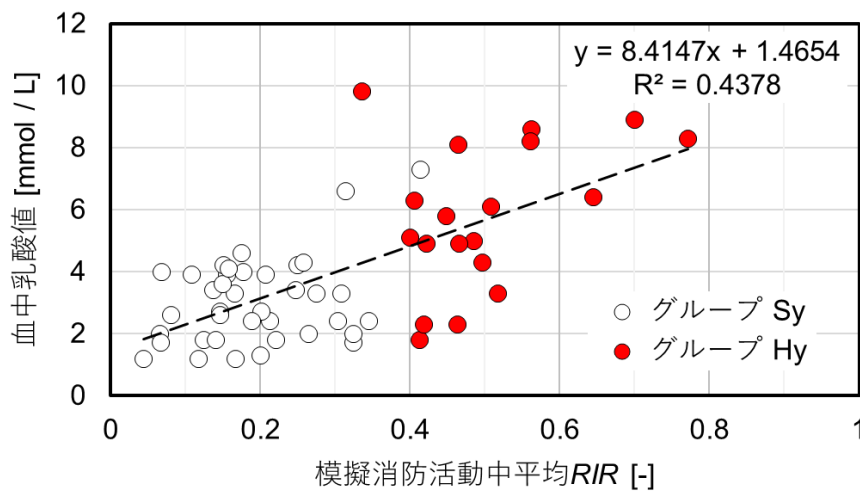


図 4.25 Test 7 中の平均 *RIR* と活動後血中乳酸値の関係

次にそれぞれのグループの年齢、身長、体重、血中乳酸値を表 4.1 に示す。Welch の *t* 検定を用いてグループ間での有意差を確認すると、血中乳酸値で有意差が確認された ( $p < 0.01$ )。以上のことから、乳酸の蓄積状況の違いは *RR* 間隔データから導出される *RIR* の頻度分布によって区別できる。

図 4.25 は、表 4.1 中の指標の中で各協力者の血中乳酸値と模擬活動中の *RIR* の平均値をプロットしたものである。2つの指標に対して Pearson の積率相関係

数を算出すると  $R = 0.66$  ( $p < 0.01$ ) で、両社の間には正の相関が認められた。

以上のことから、*RIR* は負荷強度が連続的に変化する消防活動中であっても Test 3, 4 のようにコントロールされた負荷条件下と同様に、各隊員の AT と相関があり、消防活動への適用性があることを確認した。

## 4.6 まとめ

本章では、身体活動に伴うエネルギー代謝に必要な酸素摂取および二酸化炭素排出を行う呼吸に着目し、間欠式三段階漸増負荷試験、間欠式漸増負荷試験、連続式漸増負荷試験、および、実際の消防活動を再現した模擬消防活動試験の各試験で取得したデータを基に、身体負荷状況を評価する指標を検討した。

具体的には、身体負荷強度の変化に対する呼吸代謝情報および血中乳酸値の変化と心拍変動の周波数解析により得られる指標との関連に注目し、以下の事項が明らかになった。

1. 身体負荷強度の上昇に対して心拍数は線形的に増加するが、呼吸代謝情報からは生体内での嫌気性代謝の高まりを反映した変化が得られる。マスク装着、ガス分析装置が必要であることから、消防活動中の取得は困難であるものの、嫌気性代謝が優位な状態での二酸化炭素排出量、換気量、呼吸数は、好気性代謝が優位な状態とは異なる性状を示すため、心拍数のみでは得られない呼吸代謝の変化を感度よく捉えることができる。
2. 心電計の装着により消防活動中に取得できる心電情報から得られる心拍変動の周波数スペクトルに注目すると、呼吸数の影響が現れる周波数帯が、軽負荷時に呼吸の影響が現れると報告されている周波数帯 HF(0.15 ~ 0.4 Hz)を逸脱し、高強度身体負荷時では 0.4 ~ 1.0 Hz 付近の周波数帯に顕著に表れることを実験的に明らかにした。この特徴的な変化が現れる周波数帯を VHF(0.4 Hz ~ 1.0 Hz)と新たに定義した。
3. 間欠式三段階負荷試験と連続式漸増負荷試験の試験結果をもとに、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 波の間隔の変動を周波数解析することで求められる 0.04 ~ 1.0 Hz の周波数帯のパワーに対して、高負荷活動時に呼吸反射が現れる VHF (0.4 ~ 1.0 Hz)周波数帯のパワー比を心肺負荷状態評価指標 (Reflection Index of Respiration, *RIR*) として提案した。この *RIR* は、身体負荷強度の変化に敏感に対応するとともに、*RIR* の変動範囲が 0 ~ 1.0 であることから、客観的比較も可能である。
4. 漸増負荷試験で取得した身体負荷強度の上昇とともに変化する酸素摂取量



と二酸化炭素排出量に V-slope 法を適用し決定した換気性作業閾値に到達する時間の前後で、いずれの協力者も *RIR* 値が急上昇することが判った。さらに、同じ試験で取得した血中乳酸値の変化に注目し、血中乳酸蓄積開始点として一般的に血中乳酸値が急上昇する点である OBLA と比較したところ、いずれの協力者も *RIR* が 0.6 を超えると、OBLA を超え、血中乳酸値が急激に上昇することを確認した。これにより、心電情報から得られる *RIR* から、血中乳酸値の変化を推定できることを示した。

5. 模擬消防活動試験で、身体負荷が時間的にさまざまに変動する活動継続によって疲弊した協力者と余裕をもって終えた協力者を比較したところ、*RIR* が高値 ( $RIR > 0.6$ ) を示した時間が異なっていた。そこで、*RIR* が高値を継続した時間を基に協力者を分別すると、余裕をもって終えたグループよりも継続時間が長いグループでの訓練終了直後の血中乳酸値が高くなっており、t 検定から有意な違いがあることを確認した。このことから、*RIR* を用いて消防活動中の身体負荷が AT を超える強度が長時間続いているかどうかを判断することが出来る。

以上のことから、消防活動中の心肺機能への負荷状況を推定する指標として、 $\Delta HR$  と同様に *RIR* が有望である。そのため、次章ではこれら指標を用い、消防活動継続に対する注意喚起と中断を推奨するための閾値を検討する。

## 4.7 参考文献

- [1] 谷口興一編, 心肺運動負荷テスト, 株式会社南江堂, pp.11, 1993.
- [2] Wasserman, K., McIlroy, M.B., Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise, Am. J. Cardiol., vol.14, pp.844-852, 1964.
- [3] Wasserman, K. et al, Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise., J. Appl. Physiol., vol.35, pp.236-243, 1973.
- [4] William L, Karlman Wasserman, Brian J Whipp, A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, J. Appl. Physiol, 60-6, pp.2020-2027, 1986.
- [5] Beaver, W.L. et al, Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation, J. Appl. Physiol., vol.59, pp.1936-1940, 1985.
- [6] 吉川貴仁, 藤本繁夫, 診断と検査 -心肺運動負荷検査(CPET)-, 日本内科学会雑誌, vol.101(6), pp. 1555 - 1561, 2012.
- [7] 藤澤宏幸, 運動時の呼吸循環応答, 理学療法の歩み, vol.26(1), 2015.
- [8] American College of Sports Medicine, ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription 7<sup>th</sup> ed, Lippincott Williams & Wilkins, p.289, 2005.

- [9] 外畑 巖, 他 (編), 運動心臓病学, 医学書院, pp.25-29, 1989.
- [10] Junichiro Hayano, MD; Fumihiko Yasuma, MD; Akiyoshi Okada, MD; Seiji Mukai, MD; Takao Fujinami, MD, Respiratory Sinus Arrhythmia A Phenomenon Improving Pulmonary Gas Exchange and Circulatory Efficiency, *Circulation*, vol.94, pp.842-847, 1996.
- [11] 宮村実晴, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易株式会社, pp. 50 - 54, 2012.
- [12] Park, S.W., Brenneman, M., Cooke, W. H., Cordova, A., and Fogt, D., Determination of anaerobic threshold by heart rate or heart rate variability using discontinuous cycle ergometry, *International Journal of Exercise Science*, 7(1), 45–53, 2014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, *Circulation*, 93(5), 1043-65, 1996.
- [16] 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.
- [17] 宮村実晴, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易株式会社, pp. 50 - 54, 2012.
- [18] 伊藤悠史, 岡 泰資, 栗山幸久, 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(1), pp.56-64, 2018.
- [19] 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.
- [20] 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, vol.28, pp.43-49, 1994.
- [21] 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.
- [22] 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*, 37-46, pp.656, 1988.

## 第5章 心肺負荷状態評価指標に基づく身体負荷評価手法の

### 提案と検証

#### 5.1 緒言

消防活動は身体的に大きな負荷がかかる活動であり[1-4]、橋本ら[5]は、過労・ストレスによる隊員の死傷事故防止、筋疲労による活動能力や注意力の低下抑制のため、隊員の休憩・交代の必要性を述べている。しかしながら、消防隊員は、厳しい状況下での活動完遂に対する強い使命感により、主観的判断では自身を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[6]。そこで、生体から得られる情報をもとに、消防隊員にかかる心肺機能への負担状況を客観的に把握することで、より適切な休憩・交代の判断支援を行うことが望まれる。

第3章、第4章では、心拍情報および呼吸代謝情報に基づき、活動中の身体状況を推定可能な生体指標について検討した。その結果、身体負荷強度と相関が見られた $\Delta HR$ 、および嫌気性代謝の卓越と相関が見られた心肺負荷状態評価指標  $RIR$  が有望であることが判った。

そこで、本章では、身体状況を推定可能な生体指標  $\Delta HR$ 、 $RIR$  を用い、消防活動中に休憩・交代のタイミングを与える判定方法と判定基準値を検討する。次節では、消防活動中に計測可能な心拍情報と呼吸代謝情報をもとに消防活動中の休憩・交代の判断支援に役立つ判定方法を構築する。

#### 5.2 客観的情報に基づく消防活動中の身体負荷状況把握

##### 5.2.1 消防活動支援手法に用いる客観的な指標

消防活動中の消防隊員は、高強度の身体負荷に晒され、筋でのエネルギー代謝量が増加することにより、呼吸による酸素の摂取量、二酸化炭素の排出量、および、これらを全身に循環させる血液流量が増加する。そのため、消防活動中の身体状況は、血液循環と呼吸代謝の双方から評価することを意図した。

連続式漸増負荷試験 Test 5 における生理情報と生体情報の経時変化の代表例を図 5.1 に示す。循環機能に関わる心臓の拍動に関する指標  $\Delta HR$  は、活動継続不能に至るまで、走行速度の増加に伴い徐々に上昇し、 $\Delta HR$  の最大値は 133bpm、VT に至ったときは 96 bpm であった。その変化量に着目すると VT 以前の負荷強度増加に対する上昇量に比べ、VT 以上の負荷強度では上昇量が小さくなっていった。

呼吸代謝機能に関する酸素摂取量  $VO_2$  と二酸化炭素排出量  $VCO_2$  を確認する

と、 $\Delta HR$  と非常に似た傾向を示しており、VT 以降、身体負荷上昇に対する上昇量は低下、さらに高強度の領域では減少へ転じていた。さらに、身体負荷強度の上昇に対する換気量  $VE$  の応答は異なる。活動継続不能になるほどの高強度の身体負荷時に  $\Delta HR$ ,  $VO_2$ ,  $VCO_2$  では上昇率が低下したが、 $VE$  は直線的に上昇した。これは血中乳酸増加によって引き起こされる血液の pH 低下に起因する生体反応とされ、呼吸性代償と呼ばれる[7]。

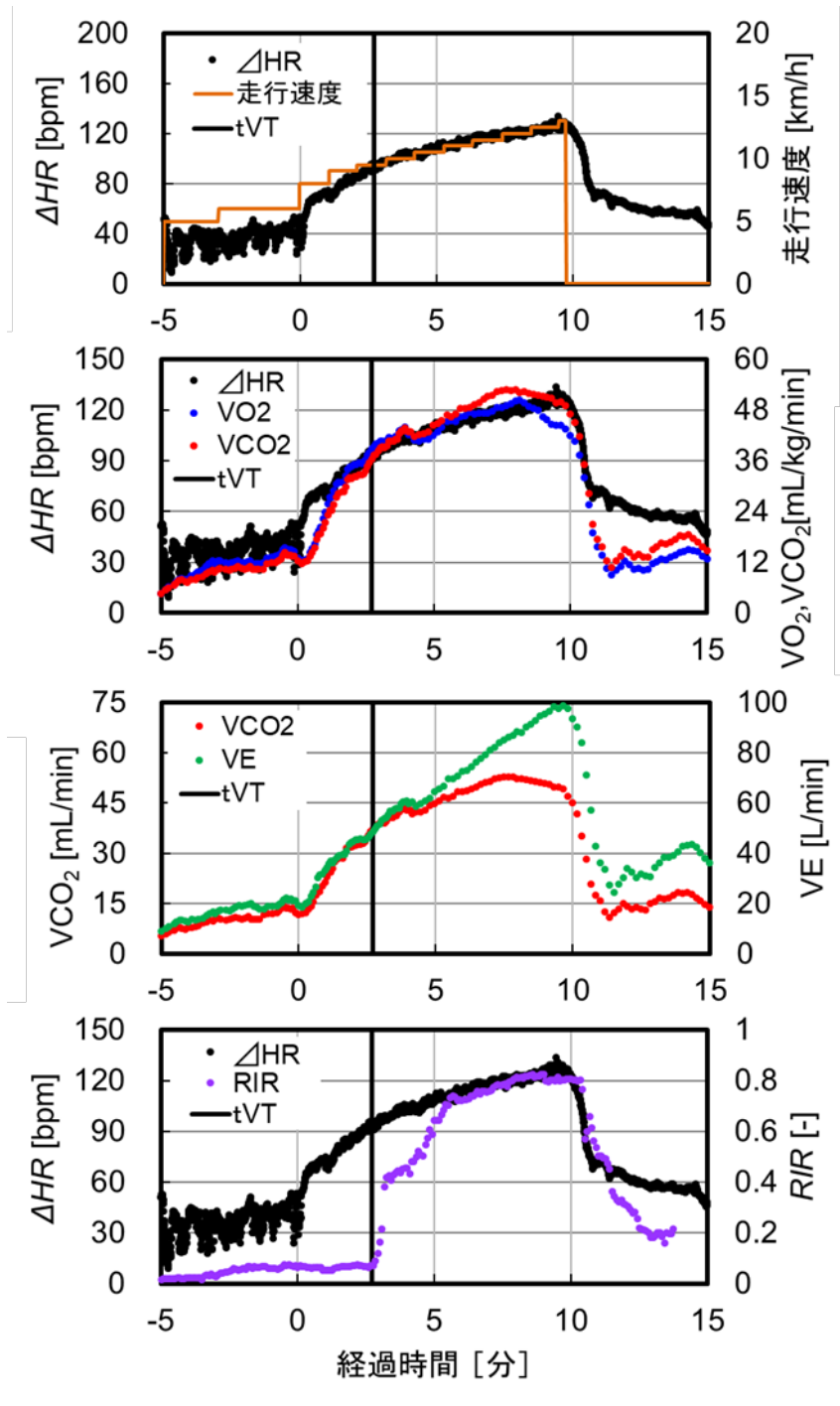


図 5.1 Test 4 における  $\Delta HR$ 、呼吸代謝情報の経時変化例

心拍変動の周波数解析から求められ、呼吸数の上昇を捉えることを意図して定義した心肺負荷状態指標 *RIR* に着目すると、その応答は  $\Delta HR$ ,  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $VE$  と異なり、呼吸代謝情報から得られる換気性作業閾値  $VT$  を境としてステップ状の応答を示した。心臓の拍動に関する情報である  $\Delta HR$  と呼吸代謝に関する情報が得られる *RIR*、これらの身体負荷強度に対して異なる応答を示す2つの指標を管理することで消防活動の管理支援に役立てることを目指す。

### 5.2.2 消防活動における身体負荷状況の定義

消防活動中の指揮者と隊員は時々刻々と変化する火災の状況に対応しており、 $\Delta HR$  と *RIR* の2つの指標の経時変化を常時監視して身体状況の評価を行うことは難しい。適切な休憩あるいは交代を促すため、まず消防活動中の隊員の身体負荷状況を定義し、連続計測した  $\Delta HR$  と *RIR* を基にどの身体負荷状況かを評価する閾値を設定する。本研究における消防活動中の身体負荷状況を表 5.1 に示す。

表 5.1 本研究における消防活動中の身体負荷状況

項目	隊員の活動状況の客観的判断		
	小さい	大きい	非常に大きい
身体への負荷	小さい	大きい	非常に大きい
生理学的な身体状況	好気性代謝が優位	嫌気性代謝が優位	血中乳酸値の蓄積
現場での指示	活動の継続	活動負荷抑制	活動停止、帰還

本研究で提案する判断基準は、消防活動の中断を推奨する信号を発する前に、活動継続に対する注意喚起を与えることにより、指揮者が高強度の身体負荷が課されている隊員に対して注意を向け、現場で特有の興奮状態にある隊員自身が冷静な自己の体調判断を促すことが出来る。本研究においては、消防活動中に取得可能な心電情報を基に算出される2つの指標  $\Delta HR$  と *RIR* に閾値を定め、身体負荷強度が持続的でないことを示す「活動継続注意」、および消防活動を中断して休憩あるいは交代の判断を促す「活動中断推奨」の2段階判定とする。

### 5.3 活動継続注意と活動中断推奨の判定閾値の決定

実際の消防活動は、時々刻々と変化する現場状況に対応するため、高強度負荷が連続的にかかる状況となることも想定される。過剰な負荷に晒された状態の継続は、思考力や判断力の低下および身体の状態変化を引き起こす。そのため、

活動中の隊員等に向けて、活動継続注意を提案するだけでは不十分であり、 $\Delta HR$ と $RIR$ の経時変化から嫌気性代謝が優位な過剰負荷活動状態が一定時間以上継続していると判断し、隊員に活動の中断を推奨する時機である「活動中断推奨」と判断する閾値を決定する。

### 5.3.1 活動継続注意の判定閾値の設定

有酸素性代謝が有意な身体負荷強度では、活動継続により血中乳酸値の持続的な上昇がなく、身体負荷強度の増加に対して血液循環機能が追随していることから、長時間の活動が可能である[8]。そのため、消防活動中に嫌気性代謝が卓越しない負荷強度の頻度を増やすことで、安定した消防力の確保に繋がることを期待できる。そこで、各隊員で嫌気性代謝が卓越したことを「活動継続注意」の提案する時機として、閾値を決定する。

活動不能に至るまで負荷強度を徐々に増加させた間欠式漸増負荷試験 Test 3 および連続式漸増負荷試験 Test 4 において消防隊員がVTに至った際の $\Delta HR$ および $RIR$ を図5.2に示す。その結果、全ての年齢で $\Delta HR$ は概ね100 bpm以下であった。

このVTが見られた時の $\Delta HR$ について、一般的な嫌気性作業閾値の評価方法として、 $HRR$ が $60\%HRR \sim 70\%HRR$ となる心拍数付近でATが見られるとされ[9, 10]、心拍数を用いたATの簡便な推定方法として知られている。そこで、安静時心拍数 $HR_{rest}$ を今回実験に協力いただいた消防隊員の平均値64 bpmとし、Gellishら[11]によって提案された年齢から最大心拍数を推定する式を用いて、60% - 70%に対応する $\Delta HR$ を算出すると、25歳では75~88 bpm、50歳では65~76 bpmがATに対応すると推定できる。ATでの心拍数は個人差が大きいことが指摘されていること[12-15]を考慮すると、妥当な適切に算出されていたことを確認できる。VT時の $\Delta HR$ は年齢とともに低下することから、今回も年齢により異なる閾値を設定する方法が考えられる。本研究では、一般の方ではなく、消防隊員を対象としており、有酸素能力に関しては日常的な体力錬成で改善する[16]ことから、体力錬成の有無の影響も大きいと考えられ、年齢の影響を考慮せず一定値とし、 $\Delta HR = 100 \text{ bpm}$ を閾値とした。

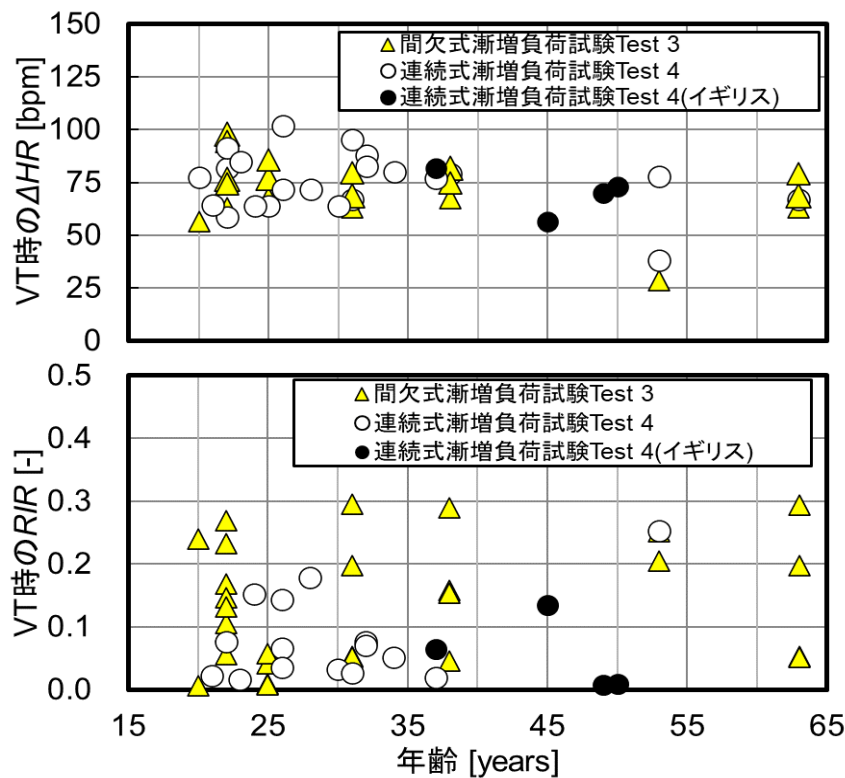


図 5.2 換気性作業閾値 VT での  $\Delta HR$  と  $RIR$

また、 $RIR$  の上昇値は 0.3 未満であったことを確認した。第 4 章で述べたように連続式漸増負荷試験 Test 4 において 0.3 以上への  $RIR$  上昇は、VT 到達後 1 分以内に非常に速やかに起きており、その応答性についても確認されていることから、 $RIR$  に関しては 0.3 を閾値とした。

閾値の決定方法には、全体の分布に対して中間の値とする方法、あるいは最低値とする方法が考えられたが、最低値を用いて設定すると活動中に何度も閾値を超えることになり、有益な情報とならないことが懸念される。そのため、活動継続注意の閾値は、実用性を考慮し、今回の全ての協力者が VT を超えていることが確認されている高値側を閾値として採用した。この閾値を超えると、今回の協力者全員で嫌気性代謝が卓越していることに対応する。

この閾値は連続的に負荷強度が漸増する身体負荷試験によって決定されたものであることから、消防活動のように高強度の身体負荷が間欠的に課される状況での  $\Delta HR$  と  $RIR$  の変化を判定閾値に着目して確認する。繰り返し負荷を課した間欠式一定負荷試験 Test 5 における  $\Delta HR$  および  $RIR$  の経時変化の代表例を図 5.3 に示す。この協力者が VT を越える負荷は 70 W であり、繰り返した負荷は 160 W の一定で高強度の負荷活動である。この協力者は 3 回目の負荷活動を終えた直後に自己申告により活動継続不能として実験を終了した。 $\Delta HR$  の最高到

達値は、負荷反復回数が増える毎に 101、110、113 bpm と徐々に上昇した。また  $RIR$  の最高到達値も 0.86、0.90、0.92 と上昇した。しかし  $\Delta HR$  は 2 分間という短時間の休憩中に 65、72 bpm までの低下に留まったが、 $RIR$  は劇的に減少した。

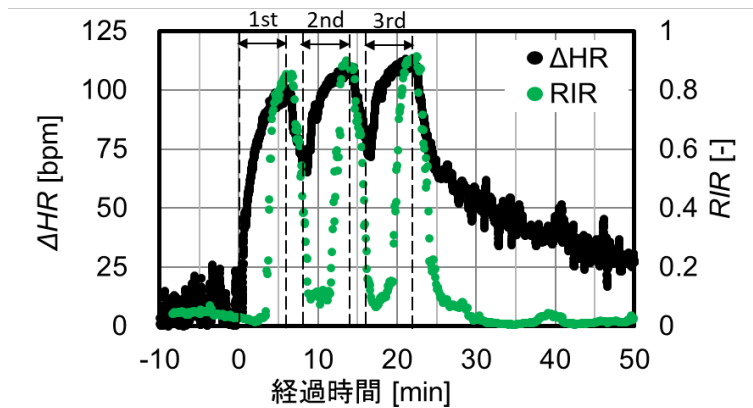


図 5.3 Test 5 における  $\Delta HR$  と  $RIR$  の経時変化

負荷実験中の  $\Delta HR$  と  $RIR$  の経時変化を  $\Delta HR-RIR$  平面に軌跡として表示した結果を図 5.4 に示す。それぞれ、1 回目、2 回目、3 回目、および終了から 10 分後までを強調して表示した。各図中の○は負荷開始時刻、●は負荷終了時に対応する。さらに細実線で囲った淡墨領域外は、活動継続注意の判定に対応し、嫌気性代謝が優位な活動状態へ移行した領域である。いずれの負荷でも、負荷活動開始とともに最初に心拍数の上昇した後に  $RIR$  が上昇した。また、休憩時に  $\Delta HR$  も  $RIR$  もともに低下しており、 $RIR$  の低下が比較的速やかである。そのため、活動中の隊員の  $\Delta HR-RIR$  平面上の軌跡は反時計回りとなっていた。高強度負荷時は嫌気性代謝が優位な活動領域となり、休憩時には好気性代謝の活動領域へ速やかに復帰したことから、漸増負荷試験をもとに決定した閾値であるが、時間的に同一の負荷と休憩を繰り返す活動に対しても身体負荷状況を判定できることを確認した。

以上の結果から、 $\Delta HR$  と  $RIR$  の軌跡から、現場で活動している隊員の活動に伴う身体状態を推測でき、嫌気性代謝が優位な活動となった状態であることを隊員に伝えることで、活動継続に対する注意喚起が可能となる。



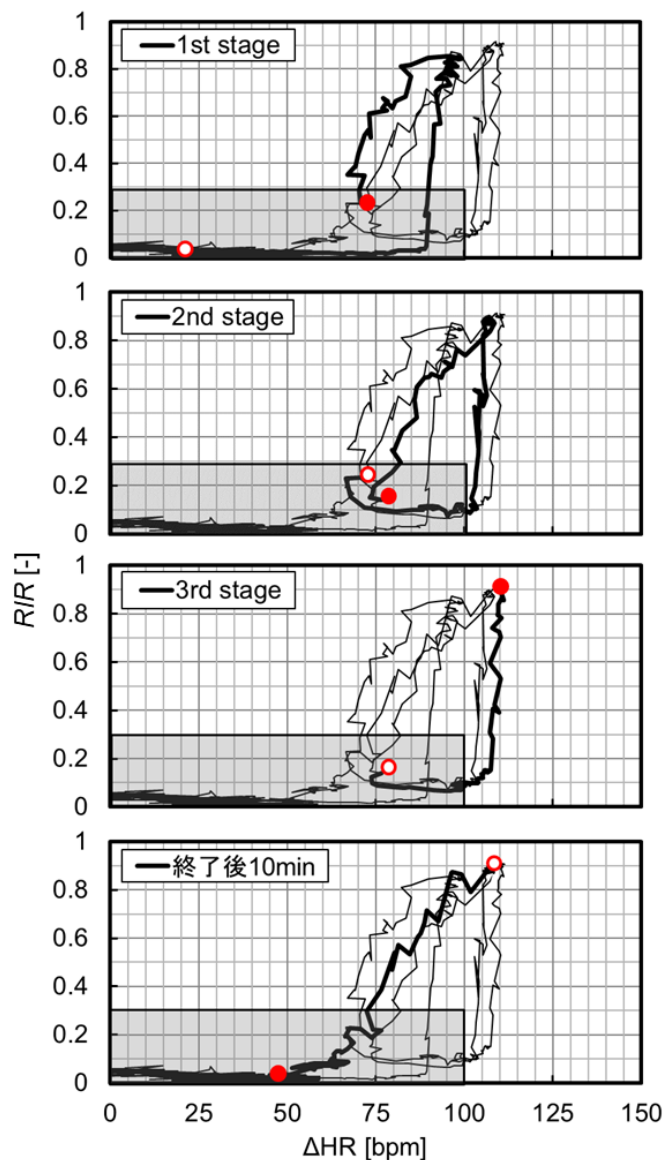


図 5.4 Test 5 における  $\Delta HR - RIR$  平面上の軌跡

### 5.3.2 活動中断推奨の判定閾値の設定

実際の消防活動は、時々刻々と変化する現場状況に対応するため、高強度負荷が連続的にかかる状況となることも想定される。過剰な負荷に晒された状態の継続は、思考力や判断力の低下および身体の状態変化を引き起こす。そのため、活動中の隊員等に向けて、活動継続注意を提案するだけでは不十分であり、 $\Delta HR$  と  $RIR$  の経時変化から嫌気性代謝が優位な負荷活動が一定時間以上継続していると判断し、隊員に活動の中断を推奨する時機である「活動中断推奨」と判断する閾値を決定する。

第 4 章で述べたように間欠式漸増負荷試験 Test 3 の結果から、 $RIR$  が 0.6 以上

となる身体負荷強度で、血中乳酸値が血中乳酸値蓄積開始点 OBLA を超えて上昇していたこと、さらに、模擬消防活動試験 Test 7 において、 $RIR$  が 0.6 以上の値を示している時間が全活動時間の 20 % 以上であった協力者 21 名はその他の 40 名に比べて、血中乳酸値が有意に高値を示していたことを確認している ( $p < 0.01$ )。そのため、血中乳酸値が急激に上昇するような嫌気性代謝が卓越した状況は  $RIR = 0.6$  を閾値とするのが良いと考えた。

ここで代表例を用いて  $RIR$  の経時変化を確認する。模擬消防活動試験 Test 7 を、余裕を持って身体負荷試験を終えた協力者と不安定な動作で疲弊した様子が顕著にみられた協力者の  $RIR$  と  $\Delta HR$  の経時変化を図 5.6 に示す。図 5.5(a) と (c) を比較すると、余裕をもって身体負荷試験を終えた協力者の  $RIR$  の経時変化は、階段駆け上がりや要救助者搬送等の高強度の身体負荷で 0.6 以上まで上昇するものの、各負荷の終了とともに速やかに低下する特徴がある。そのため、単純に  $RIR$  が 0.6 を閾値とすると協力者が活動中断推奨と判断されてしまう。

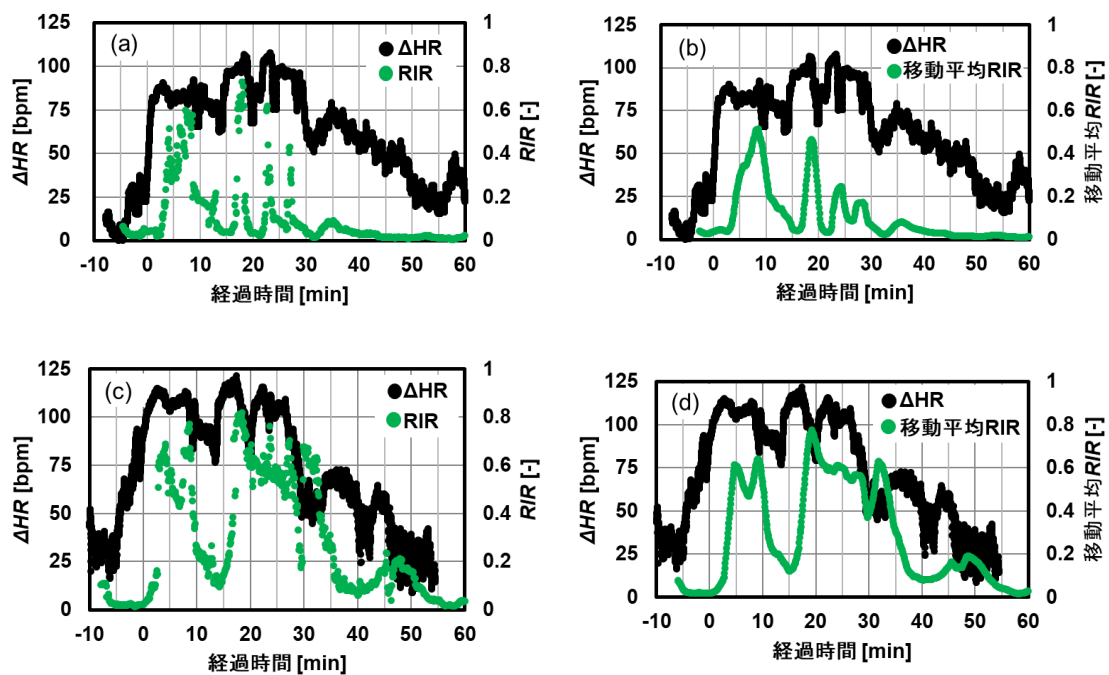


図 5.5 Test 7 における  $RIR$  と  $RIR_{ave}$  の経時変化

(a), (b) 余裕を持って身体負荷試験を終えた協力者

(c), (d) 不安定な動作で疲弊した様子が顕著にみられた協力者

活動中断推奨の判断は、嫌気性代謝の卓越が時間的に継続することによる血中乳酸値蓄積に対応しており、緊迫した状況が想定される消防活動の継続可否に関する重要な情報であることから、瞬間的な  $RIR$  の上昇に影響されないこと

が望ましい。そこで、図 5.5(b), (d)のように  $RIR$  は最新値から遡った時間の移動平均である  $RIR_{ave}$  を用いることで、瞬間的な上昇による影響を防ぐことが出来る。ここで、 $RIR_{ave}$  の移動平均時間について、応答性の観点からは短い方が望ましいこと、実践的な消防訓練の内容の分析結果によると、確認された 13 種類の活動内容の中で、身体負荷は 2~4 分の活動で構成されていたこと[4]を鑑み、移動平均時間は 2 分間とした。第 4 章の図 4.20 に示した間欠式漸増負荷試験 Test 3 で各負荷強度後の血中乳酸値と  $RIR$  の応答値の関係を  $RIR_{ave}$  で同様に確認したものを図 5.6 に示す。移動平均値とした  $RIR_{ave}$  としても 0.6 を境に血中乳酸値が上昇しており、 $RIR$  に対する血中乳酸値の変動と同様な性状が確認されたことから、「活動中断推奨」の判断を行う心肺負荷状態評価指標に関しては、 $RIR_{ave} = 0.6$  を閾値とした。

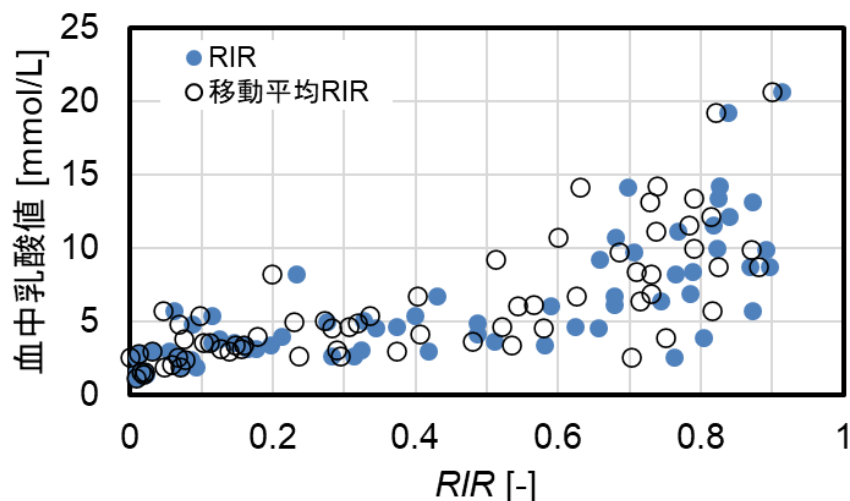


図 5.6 間欠式漸増負荷試験 Test 7 における  $RIR$  と移動平均値の経時変化

次に、 $\Delta HR$  については、図 5.3 で高強度の身体負荷の間には安静時の値付近まで低下しないことを確認している。これは、酸素負債による影響であると推察され、 $RIR$  と同様に移動平均をとってしまうと、時々刻々と変化する消防活動の身体負荷に対応した値が得られなくなってしまう。そのため、 $\Delta HR$  に関しては「活動継続注意」と同様に瞬時値を用いることにした。

以上のことから、活動中止推奨の閾値を  $\Delta HR = 100$  bpm,  $RIR_{ave} = 0.6$  として、消防活動中に嫌気性代謝卓越の継続を判断できているかを確認する。

#### 5.4 活動継続注意と活動中断推奨判定の検証

ここで間欠式漸増負荷試験 Test 3 で 1 名だけ酸素摂取量に対する  $\Delta HR$  の応答

が異なった協力者 3E について、活動継続注意の判定が行えることを検証するため、 $\Delta HR$ - $RIR$  平面での軌跡を図 5.7 に示す。この協力者は、実測した酸素摂取量と二酸化炭素排出量を基に算出した  $AT$  を第 3 段階目から超えていた。一方判定手法では 2, 3 段階の終了付近、第 4 第 5 段階で活動継続注意(図中黄色)の判定となり、活動継続不能に至る最終段階前に活動中断推奨(図中赤色)の判定となることを確認した。このように、協力者 3E は  $\Delta HR$  と実測代謝当量の関係でみると他の協力者と異なる応答を示していたが、 $RIR$  を用いた 2 変数での判定を行うことで他の協力者と同様の閾値で判定できる。

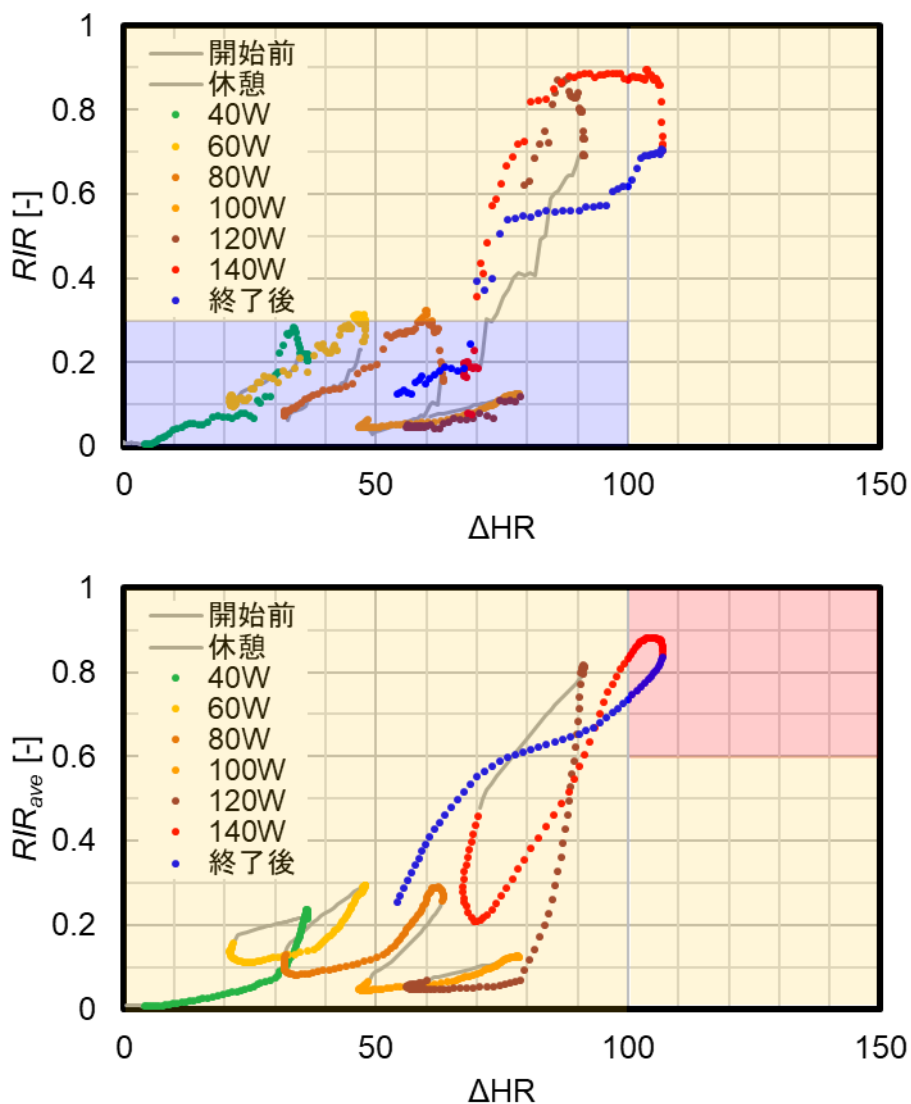


図 5.7 Test 3 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

次に、活動中断の閾値は、一定負荷か漸増負荷かで異なることも懸念されるため、同一の協力者が一定負荷と漸増負荷試験を行い、異なる負荷様式でも同一の

閾値での判定として良いか検証する。以下に Test 3 と Test 5 を実施した一般男性 1 名、Test 3 と Test 6、Test 4 と Test 5 をそれぞれ実施した消防隊員 2 名を取り上げ、 $\Delta HR - RIR_{ave}$  平面上の軌跡を用いて検証する。

一般男性(22 歳)の Test 3 および Test 5 の結果を図 5.8、図 5.9 に示す。

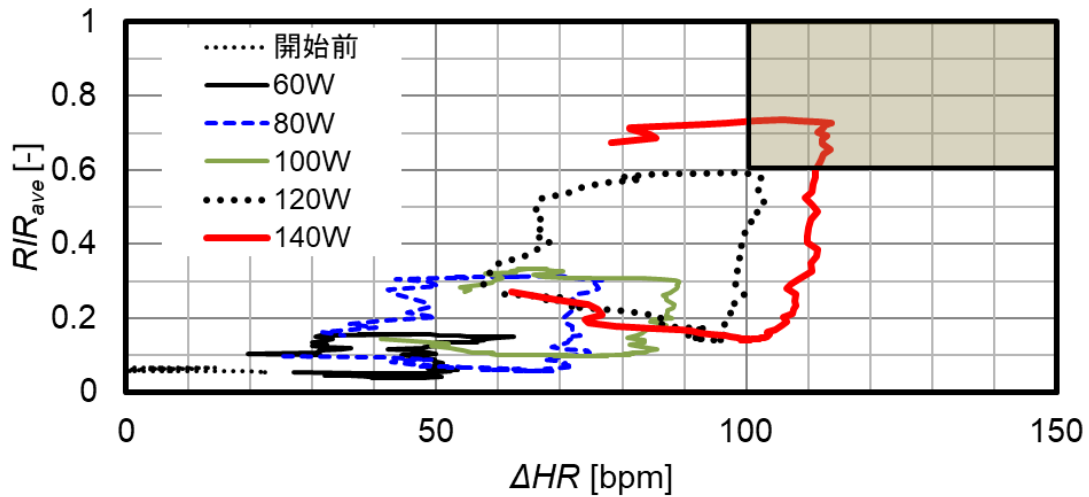


図 5.8 間欠式漸増負荷試験 Test 3 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

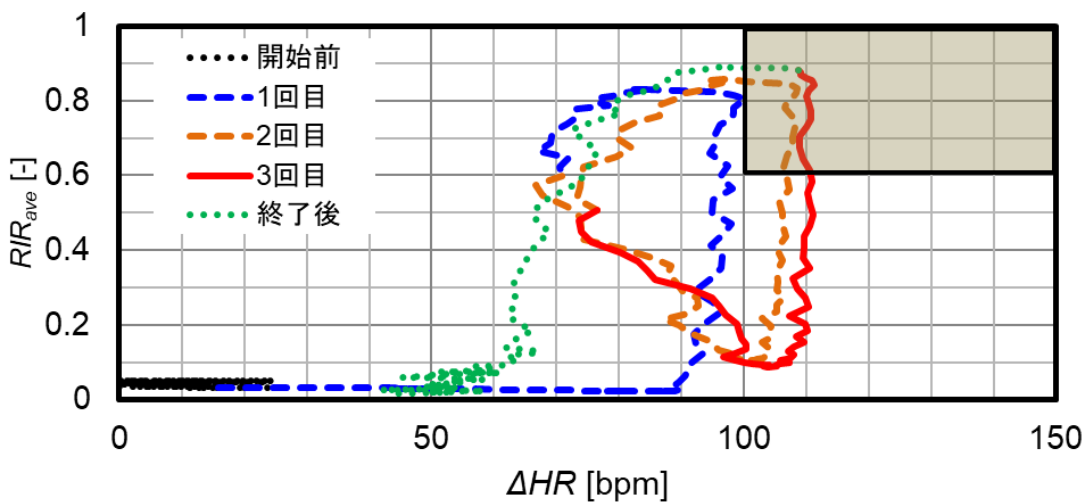


図 5.9 間欠式一定負荷試験 Test 5 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

間欠的に徐々に負荷強度が上昇する Test 3 では、負荷強度に対して、まずは心拍数、続いて  $RIR_{ave}$  が上昇し、休憩により両者の値がともに低下することで、反時計回りの軌跡を描いた。いずれの負荷強度においても軌跡形状は相似であった。その後、軌跡は負荷強度が上昇することで、徐々にグラフの右肩上部へ移動し、活動中断推奨の領域に到達、その負荷強度で実験を終了した。

間欠的に一定の負荷強度を繰り返し実施した Test 5 では、Test 3 と同様に負荷に対して反時計回りの軌跡を示しながら、徐々に右上の領域へ移動した。1 回目の負荷では活動中断推奨の領域に到達しなかったが、2 回目と3 回目は、ともに活動中断推奨の領域に到達し、3 回目の負荷活動終了時に活動継続不能に至った。

次に、横浜市消防局所属の男性消防隊員(31 歳)が実施した Test 3 および Test 6 における  $\Delta HR$ - $RIR_{ave}$  平面上の軌跡を図 5.10, 図 5.11 に示す。

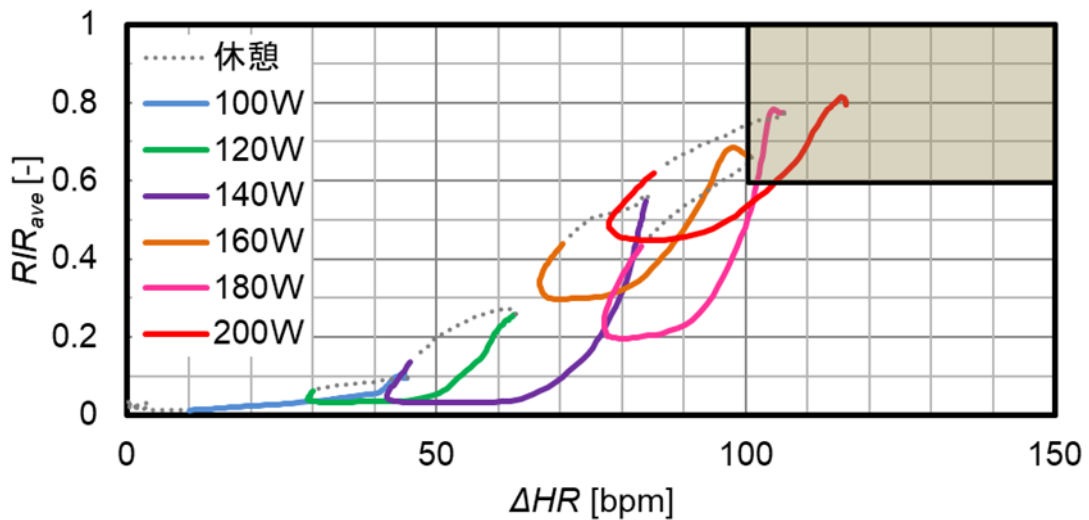


図 5.10 間欠式漸増負荷試験 Test 3 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

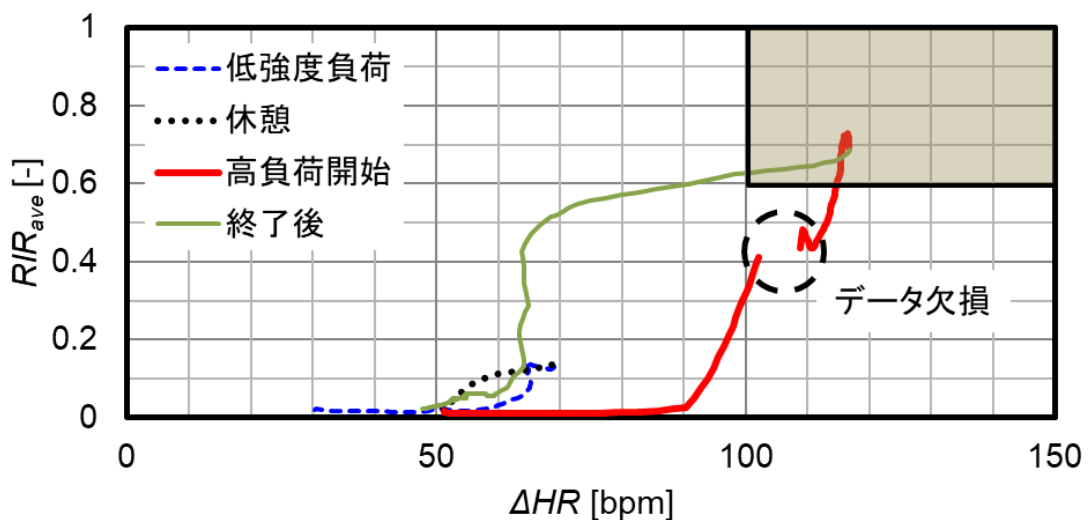


図 5.11 連続式一定負荷試験 Test 6 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

間欠的に徐々に負荷強度が上昇する Test 3 では、負荷がかかることで、負荷強度に応じて心拍数、続いて  $RIR_{ave}$  も上昇、休憩により両者の値が低下、および反時計回りの軌跡という前述の協力者と同様の軌跡を描いた。身体負荷強度が上

昇することで、徐々にグラフの右肩上部へ移動し、活動継続不能に至る前の身体負荷中に活動中断推奨の領域に到達、次の負荷途中で実験を終了した。

連続的に一定の負荷強度を継続した Test 6 では、自転車エルゴメータへの慣れとウォームアップを目的として実施した低強度負荷、および休憩中には  $RIR_{ave}$  の上昇はほとんど見られなかったが、高強度の身体負荷を開始すると同時に  $\Delta HR$ 、次に  $RIR_{ave}$  が上昇した。途中、心電データの欠損が見られたが、活動中断推奨の領域に到達後に活動継続不能に至り実験を終了したことを確認した。

最後に、横浜市消防局所属の男性消防隊員(41 歳)の Test 4 および Test 6 における  $\Delta HR$ - $RIR_{ave}$  平面上の軌跡を図 5.12, 図 5.13 に示す。

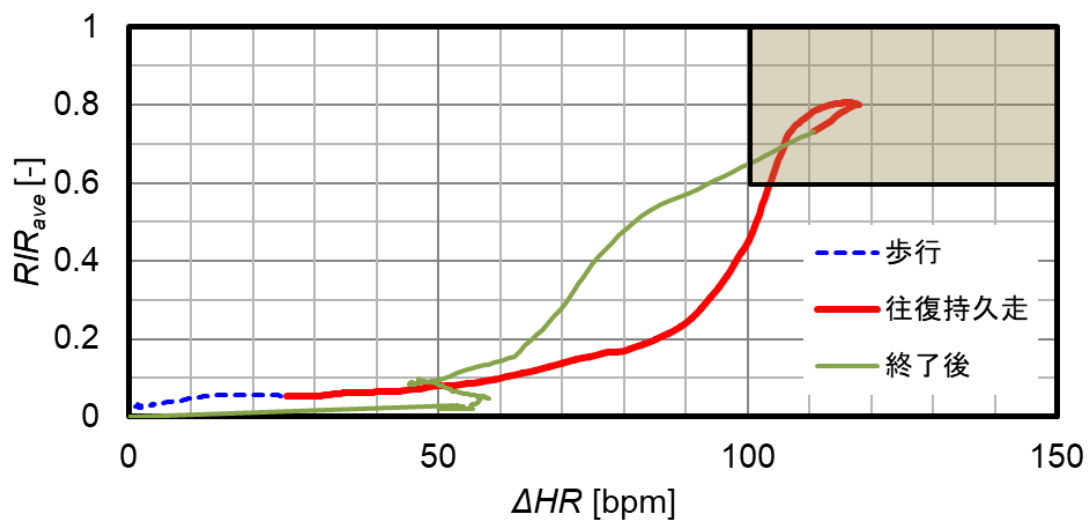


図 5.12 連続式漸増負荷試験 Test 4 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

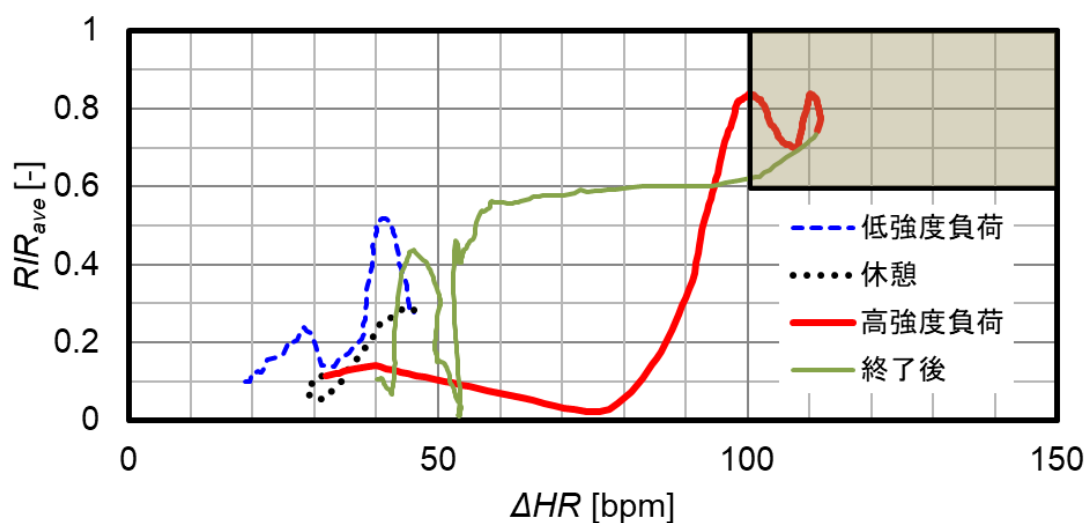


図 5.13 連続式一定負荷試験 Test 6 における  $\Delta HR$  と  $RIR_{ave}$  の軌跡

連続的に負荷強度が増加する Test 4 では、負荷強度の増加に伴って、 $\Delta HR$  が上昇、その後  $RIR_{ave}$  が上昇し、右上の活動中断推奨領域へ至った後に、活動継続不能に至った。

連続して一定の負荷強度を継続した Test 6 では、ウォーミングアップとして実施した軽強度の負荷、および休憩中には  $\Delta HR$ 、および  $RIR_{ave}$  の急激な上昇がみられなかったが、高強度の負荷開始と同時に急激に上昇、活動中断推奨の領域へ至った後に活動継続不能として実験を中断した。

以上のように、活動中断の閾値は、消防隊員の安全確保に重要であるため、漸増負荷で定めた閾値が一定負荷でも適用できるか、また、身体能力の異なる人にも適用できるかを一般男性と消防隊員に協力頂いて試験した。一定負荷試験と漸増負荷試験を同一の協力者のデータで直接比較検討した結果、一般男性でも消防隊員でも、適切に活動中断推奨の判定を行っていたことから、提案する判断手法は妥当であると考ええる。

次に、前述のように活動中断推奨の判断は、現場活動中の隊員に向け、安全な場所へ帰還、休憩することを促す時機に対応することを意図している。そのため、この活動中断推奨の判断後には、危険な現場から安全な場所に退避する余力が必要であることから、活動中断推奨の領域に至ったのちに活動継続不能に至るまでの負荷継続時間に注目した。

連続式一定負荷試験 Test 6 の高強度負荷(自転車エルゴメータの負荷を  $3.5 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 、回転数 50 rpm、推定 11 METs) を継続した際に、活動中断推奨の閾値を越えてから、協力者の自己申告あるいは安全管理者が実験継続不能と判断するまでの活動継続時間を余力として定義し、その結果を図 5.14 に示す。本実験の協力者である消防隊員 15 名全員が、活動中断推奨の閾値を越えてから少なくとも 4 分以上活動が可能であり、現場から安全な場所へ退避する時間を確保できており、活動中断推奨の判定時機は妥当であると考ええる。

活動継続中断後、隊員が休憩した後に、現場へ復帰する時機に関して述べる。高強度の身体負荷では、実施後 30 分が経過しても血中乳酸値は高値を示す場合があり[17]、通常の消防活動実施時間で想定される時間内には完全に回復しない可能性がある。さらに筋肉の収縮力に着目すると、血中乳酸値あるいは細胞外へのカリウム流出や筋グリコーゲンなどの生理情報が元の値に回復しても、筋肉を中心とした毛細血管などの組織に受けたダメージがあり、翌日になってもパフォーマンスが回復しないことがある[18]。そのため、休憩後の再投入は極力避けるべきであると考えられ、実際の運用においては重要な課題の 1 つではあるものの、本研究においては活動中断推奨の判断を受けた消防隊員を再度現場へ復帰させる判断は考慮していない。



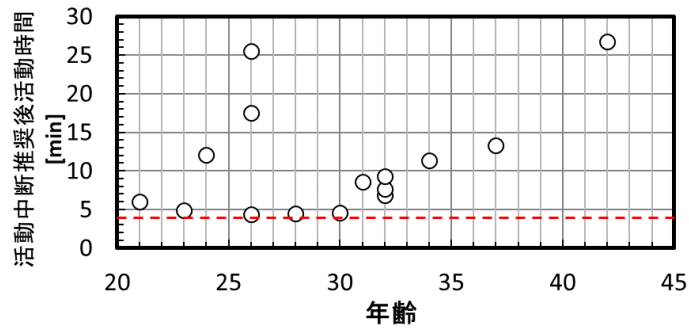


図 5.14 連続式一定負荷試験 Test 6 における活動中止推奨後に活動継続不能に至るまでの時間

### 5.5 模擬消防活動での提案枠組みの評価

活動中止推奨による嫌気性代謝卓越の継続を消防活動中に判断できるかを確認するため、Test 7 で閾値を超えた領域に達したか否かで、隊員を 2 つの群に分けて比較する。

模擬消防活動試験 Test 7 中の  $\Delta HR - RIR_{ave}$  平面での軌跡について、活動中止推奨の領域に達していなかった 44 名(Group Sr)の軌跡を図 5.15 (a)に示す。次に、Test 7 において活動中止推奨の領域に達していた 17 名(Group Hr)の軌跡を図 5.15 (b)に示す。それぞれのグループに該当した隊員を比較したものを表 5.2 に示す。

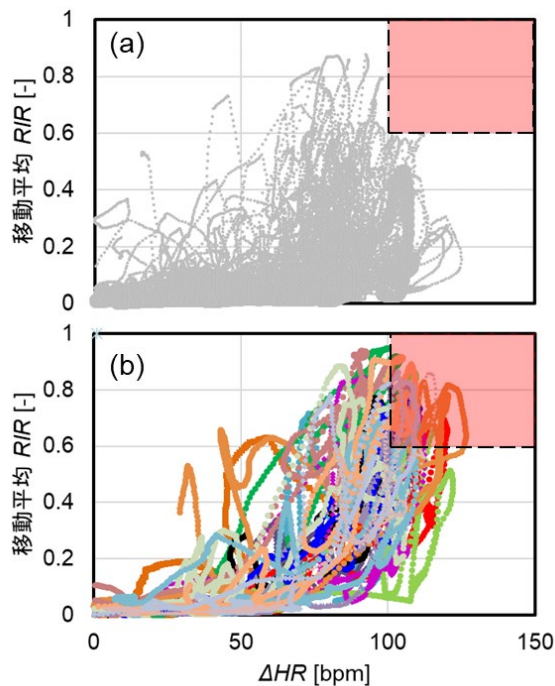


図 5.15 模擬消防活動試験 Test 7 における  $\Delta HR - RIR_{ave}$  平面上の軌跡

表 5.2 グループ Sr と Hr 間の比較

グループ		Sr	Hr
		n = 44	n = 17
年齢	平均	34	39
	最大	55	54
	最小	19	24
	<i>p</i> 値	$5.3 \times 10^{-2}$	
身長 [cm]	平均	173	169
	最大	184	180
	最小	164	163
	<i>p</i> 値	$2.0 \times 10^{-2}$	
体重 [kg]	平均	70	67
	最大	90	81
	最小	57	58
	<i>p</i> 値	$2.4 \times 10^{-1}$	
血中乳酸値 [mmol/L]	平均	3.0	6.5
	最大	6.6	9.8
	最小	1.2	2.3
	<i>p</i> 値	$2.4 \times 10^{-5}$	

第 4 章と同様に Welch の t 検定を用いて確認すると、それぞれのグループ間の、年齢、身長および体重に有意差は見られなかったが( $p > 0.01$ )、Test 7 後の血中乳酸値に有意差を確認した( $p < 0.01$ )。ここで、模擬消防活動中に活動継続注意の判定とならなかった協力者(活動継続可能者)、活動継続注意の判定を一時的にされたが、活動中断推奨の判定とならなかった協力者(活動継続注意者)、一度でも活動中断推奨の判定となった協力者(活動中断推奨者)に分け、活動後血中乳酸値を図 5.16 に比較する。

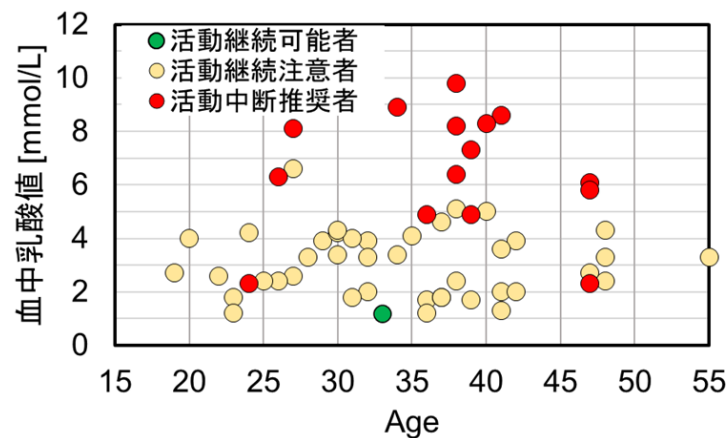


図 5.16 Test 7 中の判定による活動後血中乳酸値の差異

このように、活動継続可能の領域外とならなかった 1 名の協力者の方は血中乳酸値が安静時とほとんど変わらない値であったこと、活動中断推奨の領域に至っていた隊員はその他の隊員と比べて身体負荷終了時の血中乳酸値が有意に高くなっていることを確認した。Test 7 は実際の消防活動における身体負荷強度の変化を再現している試験であることから、実際の消防活動中であっても、提案した判定枠組みを用いることで、嫌気性代謝が卓越し、血中乳酸値が大きく上昇していることを判断できるものとする。

## 5.6 まとめ

本章では、消防活動の休憩あるいは交代に関する判断を支援するため、心肺機能への負担が大きくなる嫌気性代謝が卓越した状態を示す「活動継続注意」、嫌気性代謝の卓越が継続している状態を示す「活動中断推奨」の 2 つの判断を行う判定方法を検討した。判定に用いる指標は、消防活動中に取得可能な心電位を解析することによって得られるものの中から、高強度の身体負荷により増加するエネルギー代謝を反映する血流と呼吸に関連する 2 種類の情報とし、身体負荷強度に対応する安静時心拍数からの上昇量  $\Delta HR$ 、および嫌気性代謝の卓越に対応する心肺負荷状態評価指標  $RIR$  とした。

1. 活動継続注意の提案は、嫌気性代謝の卓越している状況に対応し、好気性代謝の支配的な活動を消防活動の活動継続可能範囲と見なした。活動継続注意が提案される領域では、AT 以上の負荷強度となっており、身体負荷が与える身体への負担が大きいことを示している連続式漸増負荷試験 Test 4 の結果から VT を超えるときの  $\Delta HR$  および  $RIR$  が、それぞれ 100 bpm, 0.3 未満であったことから、その閾値を超えた場合を「活動継続注意」の提案を行う判断基準とした。その判断基準を間欠式一定負荷試験 Test 5 に適用すると、身体負荷時には、嫌気性代謝が卓越した活動となっていること、負荷間の休憩時には、好気性代謝の卓越した状況へ回復していたことを確認した。以上のことから、 $\Delta HR$  と  $RIR$  の軌跡から、現場で活動している隊員の活動に伴う身体状態を推測でき、嫌気性代謝が優位な活動となった状態であることを隊員に伝えることで、身体負荷継続に対する注意喚起が可能となる。
2. 活動中断推奨の提案は、嫌気性代謝の卓越した状態が継続して課された状況に対応しており、交代して休息をとることで血中乳酸値が高値となるような身体的負担を最小限に抑えることができる。間欠式漸増負荷試験 Test 3 の結果を基に  $\Delta HR$  が 100 bpm 以上、且つ  $RIR$  の 2 分間平均値である

$RIR_{ave}$  が 0.6 以上を「活動中断推奨」の提案を行う判断基準とした。活動継続不能に至るまで身体負荷を実施した Test 3 ~ 6 において活動継続不能に至る前に判定基準に到達していたことを確認した。さらに、連続式一定負荷試験 Test 6 でこの基準に到達してから 4 分以上 11 Mets の高強度身体負荷を継続できていたことから、安全な場所へ退避する能力を確保できていたことを確認した。実際の消防活動でも本判定手法が血中乳酸値の増加に対応しているかを検証するため、模擬消防活動試験 Test 7 を実施した協力者のうち、活動継続注意の判定領域へ到達していた協力者とそれ以外の協力者へ分類した。その結果、この閾値を超えた協力者は、活動後の血中乳酸値が高値となっていることを明らかにした。そのため、実際の消防活動においても、活動中断推奨の判断は、嫌気性代謝を伴う活動継続による疲労蓄積を反映していることが期待され、判定された場合には、速やかに休憩あるいは人員交代へ移行することが望ましい。

以上のように、消防活動の身体状況管理を行うための情報として、指揮者および隊員自らの主観的、他覚的情報に加えて、心電情報から算出される  $\Delta HR$  と  $RIR$  の変動から、現在の身体負荷が好気性代謝か嫌気性代謝どちらが優位なのか判断可能なのかを基にした客観的情報を把握することができる。これらの情報を基に、緊急性の高い消防活動中に、高い使命感などによる独特の興奮状態下にある隊員に活動継続可否に関する適切な判断を促すことが期待される。

## 5.7 参考文献

- [1] Kay, Bridget F; Lund, Maureen M; Taylor, Paul N; Herbold, Nancie H. American Dietetic Association. J Am Diet Assoc; Chicago, vol.101(7), pp.807-809, 2001.
- [2] Barnard, R.J. and Duncan, H.W., Heart rate response of firefighters to actual emergencies. Implications for cardiorespiratory fitness, J. Occup. Med. vol.34, pp. 797-800, 1975.
- [3] Sothmann, M.S., Saupe, K., Jasenof, D. and Blaney, J., Heart rate and ECG responses of fire fighters, J. Occup. Med., vol.17, pp. 247-250, 1992.
- [4] 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(1), 2013.
- [5] 橋本好弘, 森谷 紜, 大塚義則, 寒冷環境下での消防活動が隊員に及ぼす作業負担 日本生気象学会雑誌, vol.45(4), pp.109-119, 2009.

- [6] 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, vol.51, pp.52-62, 2014.
- [7] 谷口興一編, 心肺運動負荷テスト -呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方-, 株式会社南江堂, pp.113, 1993.
- [8] 長田尚彦, 村山正博, 運動処方, 総合リハ, vol.23(3), pp.217-222, 1995.
- [9] Tanaka H, Kiyonaga A, Terao Y, et al., Double product response is accelerated above the blood lactate threshold. *Med Sci Sports Exerc*, 3, 503-508, 1995.
- [10] Riley M, Maehara J, Pórszász J, et al., Association between the anaerobic threshold and the break-point in the double product / work rate relationship. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1997.
- [11] Gellish R.L., Goslin B.R., Olson R.E., McDonald A., Russi G.D., Moudgil V.K., Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol.39(5), pp.822-829, 2007.
- [12] 庄野菜穂子, 道下竜馬, 松永和美, 鶴田敏幸, Multiple Risk Factor 保有者の運動療法における乳酸閾値に相当する目標心拍数予測式の検討, 体力科学, vol.52, pp.141-148, 2003.
- [13] Takeshima, N., Kobayashi, F., Watanabe, T., Tanaka, K., Tomita, M., Pollock, M. L. Cardiorespiratory responses to cycling exercise in trained and untrained healthy elderly : with special reference to the lactate threshold. *Appl Human Sci*, vol.15 pp.267-273, 1996.
- [14] Omiya, K., Itoh, H., Osada, N., Kato, M., Koike, A., Sagara, K., Aoki, K., Fu, L. T., Watanabe, H., Kato, K., Tanabe, K., Murayama, M. Impaired heart rate response during incremental exercise in patients with acute myocardial infarction and after coronary artery bypass grafting: evaluation of coefficients with Karvonen's formula. *Jpn Circ J*, 64: 851-855, 2000.
- [15] 牧田 茂, 野原隆司, 浜崎 博, 虚血性心疾患患者の集団スポーツ運動療法における血中乳酸濃度測定の意義—携帯型血中乳酸測定器を用いて—, 臨床スポーツ医学, vol.15, pp.1167-1170, 1998.
- [16] 中住斉, 高橋渉, 菅原法之, 須田力, 有酸素運動・無酸素運動に関する実験, 札幌市消防科学研究所, No.14, pp.22-39, 2007.
- [17] 大島秀武, 田中繁宏, 宮本忠吉, 弘原海剛, 栗原直嗣, 藤本繁夫, 最大運動負荷後の酸素摂取量の回復動態と血中乳酸, グルコースおよびアラニンの関係, 体力科学 vol.46, pp.479-488, 1997.
- [18] 八田秀雄, 乳酸サイエンス—エネルギー代謝と運動生理学—, pp.112, 市村出版, 2017.

## 第6章 総括

消防活動は消防隊員の心肺機能へ大きな負荷をかける活動である。この高強度の身体負荷による疲弊は、危険と隣り合わせで任務にあたる消防隊員の注意力低下を招き、重大な事象を招く危険性があることから、本研究では、消防活動中に生体から計測可能な情報に基づき、活動中の消防隊員に対する心肺機能への負荷を評価する方法を検討することを目的とし、以下の5点を明らかにした。

①身体負荷強度を心拍数により評価する方法は様々あるが、本研究では安静時からの上昇量( $\Delta HR$ )を用いることで、個人差を少なく身体負荷強度に対応した値を得ることが出来る。②心拍変動の周波数解析と身体負荷強度の相関を検討し、高強度の身体負荷時には呼吸数が既往の周波数帯を逸脱すること、心拍変動の周波数スペクトル波形が、身体負荷強度に依存して特徴的な変化をする。③トータルパワー(0.04~1.0 Hz)に対する超高周波数帯 VHF (0.4~1.0 Hz) の比をとることで呼吸が乱れる心肺機能への負荷程度を表す心肺負荷状態指標 ( $RIR$ ) を定義し、身体負荷強度が換気性作業閾値となる前後で急上昇する。④  $\Delta HR$  と  $RIR$  の2変数を用い、嫌気性代謝が卓越している状態に対応する“活動継続注意”の状態を判定する閾値を決定した。⑤消防活動の身体負荷を再現し、“活動中断推奨”の判定を行う閾値を決定した。また、模擬消防活動試験 Test 7 で、この判定がされた協力者では活動終了後の血中乳酸値が有意に上昇していた。

本論文の内容と各章で得られた成果について、以下に記す。

### 第1章 序論

本章では、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

### 第2章 実験方法

本章では、本研究で実施した身体負荷試験と生体計測の実施方法とその選定に関する事項をまとめて記載した。

### 第3章 消防隊員の身体状況把握に用いる心拍情報の検討

本章では、全身の酸素供給や二酸化炭素排出などに重要な血流を司る心臓に着目して、消防隊員の身体負荷状況を評価する指標を検討した。身体負荷として、心拍数を一定に保持し、時間的な変化をみる心拍一定負荷試験、および段階的に負荷を変えて負荷の変化に対する応答をみる漸増負荷試験を実施し、そのデータを基に検討した。

心拍に関する情報の計測は心電位を計測し、R波の間隔から心拍数を求めた。さらに、その心拍数の変動（Heart Rate Variability, HRV）を周波数解析することにより得られる周波数スペクトル、自律神経系の活動と関連するとされている既往の指標 LF, HF について身体負荷との対応を検証した。

その結果、以下の事項が明らかになった。

- ① 心拍数は身体負荷に応じて鋭敏に変化するが、心臓の能力（安静時心拍数、最大心拍数）が個人ごとに異なるため、心拍数の絶対値のみで身体負荷を評価することは難しい。安静時心拍数からの上昇  $\Delta HR$  は、心臓の能力の個人差を低減し、身体負荷を評価するのに有効である。 $HRR$  は、安静時心拍数だけでなく最大心拍数も考慮して心臓への負荷を評価するので、 $\Delta HR$  より身体負荷の評価に適していると考えられたが、最大心拍数の実測は危険を伴うため難しく、最大心拍数の推定は誤差が大きいことから、 $\Delta HR$  での身体負荷評価に及ばないことが判った。
- ② 心拍変動（HRV）の周波数解析手法として、FFT（高速フーリエ変換）と MEM（最大エントロピー法）を比較検討した。負荷が数分で変動する状況で 0.0028 Hz といった低周波までの同定を行う必要がある身体負荷状況の評価では、FFT では低周波の同定が難しく MEM がピークの同定に関して有利であることが判った。また、周波数解析を行うサンプリング時間であるセグメント長さは長い方が良いが 3 分でも十分な同定が行えることが判った。
- ③ 心拍変動（HRV）を周波数解析することにより得られる周波数スペクトルは心拍数一定であっても変化することから、心拍数とは異なる情報を得られる可能性があることが判った。
- ④ 心拍変動（HRV）を周波数解析することにより得られる周波数スペクトルは高強度の身体負荷時に 0.1 ~ 1.0 Hz の領域で高周波数側の形状が変化することが判った。既知の心拍変動の周波数スペクトルに影響を与える因子の中で最も高周波数側に影響するものは、呼吸であることから、心拍変動の周波数解析を用いて、呼吸に関する情報を得ることが出来る可能性を見出した。

#### 第4章 呼吸代謝情報に基づく心肺負荷状態評価指標の検討と評価

本章では、身体活動に伴うエネルギー代謝に必要な酸素摂取および二酸化炭素排出を行う呼吸に着目し、間欠式三段階負荷試験、間欠式漸増負荷試験、連続式漸増負荷試験、および実際の消防活動を再現した模擬消防活動試験で取得したデータを基に、身体負荷状況を評価する指標を検討した。

具体的には、身体負荷強度の変化に対する呼吸代謝情報および血中乳酸値の変化と心拍変動の周波数解析により得られる指標との関連に注目し、以下の事項が明らかになった。

- ① 身体負荷強度の上昇に対して心拍数は線形的に増加するが、呼吸代謝情報からは生体内での嫌気性代謝の高まりを反映した変化が得られる。マスク装着、ガス分析装置が必要であることから、消防活動中の取得は困難であるものの、嫌気性代謝が優位な状態での二酸化炭素排出量、換気量、呼吸数は、好気性代謝が優位な状態とは異なる性状を示すため、心拍数のみでは得られない呼吸代謝の変化を感度よく捉えることができる。
- ② 心電計の装着により消防活動中に取得できる心電情報から得られる心拍変動の周波数スペクトルに注目すると、呼吸数の影響が現れる周波数帯が、軽負荷時に呼吸の影響が現れると報告されている周波数帯 HF (0.15 ~ 0.4 Hz)を逸脱し、高強度身体負荷時では 0.4~1.0 Hz 付近の周波数帯に顕著に表れることを実験的に明らかにした。この特徴的な変化が現れる周波数帯を VHF (0.4 Hz ~ 1.0 Hz)と新たに定義した。
- ③ 間欠式三段階負荷試験と連続式漸増負荷試験の試験結果をもとに、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 波の間隔の変動を周波数解析することで求められる 0.04~1.0 Hz の周波数帯のパワーに対して、高負荷活動時に呼吸反射が現れる VHF (0.4 ~ 1.0 Hz)周波数帯のパワー比を心肺負荷状態評価指標 (Reflection Index of Respiration, *RIR*) として提案した。この *RIR* は、身体負荷強度の変化に敏感に対応するとともに、*RIR* の変動範囲が 0 ~ 1.0 であることから、客観的比較も可能である。
- ④ 連続式漸増負荷試験で取得した身体負荷強度の上昇ともに変化する酸素摂取量と二酸化炭素排出量に V-slope 法を適用し決定した換気性作業閾値に到達する時間の前後で、いずれの協力者も *RIR* が急上昇することが判った。さらに、間欠式漸増負荷試験での血中乳酸値の変化に注目し、一般的に血中乳酸値が急上昇するとされる点である血中乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation, OBLA) と比較したところ、いずれの協力者も *RIR* が 0.6 を超えると、OBLA を超え、血中乳酸値が急激に上昇することを確認した。これにより、心電情報から得られる *RIR* から、血中乳酸値の変化を推定できることを示した。
- ⑤ 模擬消防活動試験で、身体負荷が時間的にさまざまに変動する活動継続によって疲弊した協力者と余裕をもって終えた協力者を比較したところ、*RIR* が高値 ( $RIR > 0.6$ ) を示した時間が異なっていた。そこで、*RIR* が高



値を継続した時間を基に協力者を分別すると、余裕をもって終えたグループよりも継続時間が長いグループでの訓練終了直後の血中乳酸値が高くなっており、t検定から有意な違いがあることを確認した。このことから、*RIR* を用いて消防活動中の身体負荷が *AT* を超える強度が長時間続いているかどうかを判断することが出来る。

## 第5章 心肺負荷状態指標に基づく身体負荷状態推定手法の提案と検証

本章では、消防活動の休憩あるいは交代に関する判断を支援するため、身体負担が大きくなり、嫌気性代謝が卓越しだした状態を示す「活動継続注意」、嫌気性代謝の卓越が継続し、血中乳酸値が大きく上昇している状態を示す「活動中断推奨」の2つの判断を行う判定手法を検討した。判定に用いる指標は、消防活動中に取得可能な心電位を解析することによって得られるものの中から、高強度の身体負荷により増加するエネルギー代謝を反映して変化する血流と呼吸に関連する2種類の情報とし、身体負荷強度に対応する安静時心拍数からの上昇量  $\Delta HR$ 、および嫌気性代謝の卓越に対応する心肺負荷状態評価指標 *RIR* とした。

- ① 活動継続注意の提案は、嫌気性代謝の卓越している状況に対応し、好気性代謝の支配的な活動を消防活動の活動継続可能範囲と見なした。活動継続注意が提案される領域では、*AT* 以上の負荷強度となっており、身体負荷が与える身体への負担が大きいことを示している連続式多段階漸増負荷試験 Test 4 の結果から *VT* を超えるときの  $\Delta HR$  および *RIR* が、それぞれ 100 bpm, 0.3 未満であったことから、その閾値を超えた場合を「活動継続注意」の提案を行う判断基準とした。その判断基準を間欠式一定負荷試験 Test 5 に適用すると、身体負荷時には、嫌気性代謝が卓越した活動となっていること、負荷間の休憩時には、好気性代謝の卓越した状況へ回復していたことを確認した。以上のことから、 $\Delta HR$  と *RIR* の軌跡から、現場で活動している隊員の活動に伴う身体状態を推測でき、嫌気性代謝が優位な活動となった状態であることを隊員に伝えることで、身体負荷継続に対する注意喚起が可能となる。
- ② 活動中断推奨の提案は、嫌気性代謝の卓越した状態が継続して課された状況に対応しており、交代して休息をとることで血中乳酸値が高値となるような身体的負担を最小限に抑えることができる。間欠式漸増負荷試験 Test 3 の結果を基に  $\Delta HR$  が 100 bpm 以上、且つ *RIR* の2分間平均値である  $RIR_{ave}$  が 0.6 以上を「活動中断推奨」の提案を行う判断基準とした。活動継続不能に至るまで身体負荷を実施した Test 3～6 において活動継続不能に至る前に判定基準に到達していたことを確認した。さらに、連続式一定

負荷試験 Test 6 でこの基準に到達してから 4 分以上 11 Mets の高強度身体負荷を継続できていたことから、安全な場所へ退避する能力を確保できていたことを確認した。実際の消防活動でも本判定手法が血中乳酸値の増加に対応しているかを検証するため、模擬消防活動試験 Test 7 を実施した協力者のうち、活動継続注意の判定領域へ到達していた協力者とそれ以外の協力者へ分類した。その結果、この閾値を超えた協力者は、活動後の血中乳酸値が高値となっていることを明らかにした。そのため、実際の消防活動においても、提案した活動中断推奨の判断は、嫌気性代謝を伴う活動継続による疲労蓄積を反映すると考えられる。

以上のように、消防活動の身体状況管理を行うための情報として、指揮者および隊員自らの主観的、他覚的情報に加えて、心電情報から算出される  $\Delta HR$  と  $RIR$  の変動から、現在の身体負荷が好気性代謝か嫌気性代謝どちらが優位なのか判断可能なのかを基にした客観的情報を把握することができる。これらの情報を基に、緊急性の高い消防活動中に、高い使命感などによる独特の興奮状態下にある隊員に活動継続可否に関する適切な判断を促すことが期待される。

今後は、実際にリアルタイムの生体計測を用いて、この消防活動支援手法の実用性を向上させるため、閾値等の精度を高めることが必要であると考えている。また、大規模災害時のように数日間に亘るような長期的な活動を考慮すると、活動中断後にパフォーマンスの回復状況を推定し、再投入可能か否かの判断も生体モニタリングを用いた客観的情報に基づいて支援することが必要であると考えている。

## 本研究に関する公表論文

### A. 主論文を構成する論文

- 1) 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 doi: 10.11196/kasai.65.2\_11
- 2) 伊藤悠史, 岡 泰資, 栗山幸久, 心拍変動に基づく心肺負荷評価指標の提案, 安全工学, Vol.57, No.1, pp.56-64, 2018.02.15 doi:10.18943/safety.57.1\_56
- 3) 岡 泰資, 伊藤悠史, 小川真司, 真下大志, 栗山幸久, 消防隊員の労働安全を向上させるための呼吸循環代謝指標に基づく身体管理手法の提案, 日本火災学会論文集, Vol.68, No.2, pp.1-9, 2018.08.25. doi:10.11196/kasai.68.2\_35
- 4) Ito, Y., Oka, Y., and Kuriyama, Y., “Applicability of the reflection index of respiration based on heart rate variability analysis to firefighting activity”, Fire Science and Technology, Fire Science and Technology, vol.39(1), pp.1-15, 2020.

### B. 国際会議発表

- 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), pp.146-157, 21-23 February, Singapore, 2017. (abstract 審査)
- 2) Ito, Y., Oka; Y., and Kuriyama, Y., Objective indices to evaluate Fire-fighter’s Cardiorespiratory state Based on Frequency Analysis of Heart Rate, Proceedings of International Conference on Research and Advanced Technology in Fire Safety (FIRESAFETY2017), pp.101-118, 20-21 October, Santander, UNIVERSITY OF CANTABRIA Spain, 2017.
- 3) 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. (abstract 審査)
- 4) Kuriyama, Y., Oka, Y., Ito, Y., and Enari, M. “Indices for Fire Fatigue based on on-line physical measurement”, 2nd International Tall building Fire Safety Conference, pp.63-74, University of Greenwich, 17-20th June, 2014. (abstract 審査)
- 5) 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, Poster, 24-26th June, Royal Holloway college, University of London, 2013. (abstract審査)

C. 国内口頭発表

- 1) 大場淳一, 池田盛雄, 藤馬千典, 伊藤悠史, 江成美沙, 岡泰資, 栗山幸久, 消火活動を模擬した訓練手法の提案 消防隊員の疲労度判定方法の検討 その3, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.34-35, 2012.
- 2) 伊藤悠史, 江成美沙, 岡泰資, 栗山幸久, 大場淳一, 池田盛雄, 藤馬千典, 消火活動を模擬した訓練手法の提案 消防隊員の疲労度判定方法の検討 その4, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.36-37, 2012.
- 3) 伊藤悠史, 岡泰資, 栗山幸久, 深田稔, 二本木純一, 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講演予稿集, 2013.
- 4) 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概要集, pp.86-87, 2014.

D. 受賞

- 1) 平成30 (2018) 年度 特定非営利活動法人安全工学会 論文賞

## 謝 辞

本研究の遂行と本論文をまとめるにあたり、学生時代からお忙しい中、終始懇切なご指導とご鞭撻を頂戴しました横浜国立大学大学院 岡泰資教授に深甚なる謝意を表します。

論文の審査の労をとって戴くと共に、学生時代から現在に至るまで、終始適切で親身なご助言と鼓舞激励を賜りました東京大学 栗山幸久元教授（横浜国立大学客員教授）に拝謝申し上げます。

ご多忙中にも関わらず本論文の審査の労をとって戴くと共に有益なご意見を戴きました横浜国立大学大学院 大谷英雄教授、三宅淳巳教授、および中井里史教授、東京大学大学院 福崎千穂特任准教授に心より厚く御礼申し上げます。

生体計測とデータ解析に関する検討に関し、ご支援戴きました木更津高等専門学校 沢口義人氏へ厚く御礼申し上げます。

本研究を実施するにあたり、実験協力者の方との調整を主導して頂き、実際の消防活動に関してご教示戴きました横浜市消防局消防訓練センター 角津光憲氏 藤馬千典氏 二本木純一氏 池田盛雄氏 大場淳一氏を始め、実験の目的と意義をご理解頂き、有志として高強度の身体負荷試験を実施し、生体情報を提供頂いた実験協力者の方々へ心より感謝申し上げます。

実験の計画、実施およびデータ解析を行うにあたり、私の学生時代に研究方針について議論と意見交換をさせて頂きました当時横浜国立大学 岡研究室の江成美沙氏、また、私の卒業後に研究の遂行、また時には実験協力者として協力戴きました当時横浜国立大学 岡研究室の岩見 周氏、小川真司氏、真下大志氏を始めとした横浜国立大学岡研究室の皆様へ改めまして感謝の意を表します。

また、通常業務に加え、本論文に取り組むことに理解戴き、研究成果をまとめる機会を戴きました能美防災株式会社の皆様へ心より御礼申し上げます。

本研究の一部は、科学研究費助成事業（挑戦的萌芽研究 24651185, 基盤研究(B)26282093）、消防防災科学技術研究推進制度（2009年度~2011年度、2018年度~2019年度）により遂行することが出来ました。ここに感謝の意を示します。

最後に、私事ではありますが、これまで陰ながら支えてくれた両親、姉、お世話になった多くの方々へ心よりの謝意を表します。

2021年3月 伊藤 悠史