

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06626

研究課題名(和文)熱中症リスク評価を目的とした皮膚温・心拍数の利用法に関する研究

研究課題名(英文)Use of skin temperature and heart rate for heat stroke risk assessment

研究代表者

桑原 浩平 (Kuwabara, Kouhei)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：40374582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ウェアラブル端末から得られる皮膚温と心拍数HRから熱中症リスクを評価する手法を検討した。まず被験者実験から手首皮膚温とMSTとの間に比例関係があることを示した。次に被験者の日頃の運動時間とVO2maxの間に高い相関関係が見られ、運動習慣からVO2maxを推定できることが示唆された。さらに作業強度%VO2maxとHRを利用した体力的疲労レベルに達する時間TPFの算定式を提示した。TPFに対する作業時間の割合を疲労率PPFと定義し、設定疲労レベルに達するまでの割合を示すことができた。最後に熱中症リスク評価アプリを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱中症リスクを評価する方法として、既存のウェアラブル端末で実施可能な内容を検討できた。皮膚温を測定できる端末があれば、皮膚温と運動量、最大酸素摂取量から体内温を推定できるため、推定体内温とISO等の基準を用いて熱中症リスクを検知できる。また心拍数のみ測定可能な端末でも、心拍数と年齢から推定可能な疲労率を提案し、リスク評価アプリを開発した。既存の端末で評価可能な指標を提案したことに社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We examined a method to evaluate a risk of heat stroke from skin temperature and heart rate (HR) obtained from wearable devices. First, a proportional relationship between wrist skin temperature and MST was observed from subject experiment. Next, a high correlation between the subjects' daily exercise time and VO2max was observed. We have concluded that VO2max can be estimated from exercise habits using wearable devices. We presented that a calculation formula of the time to reach the physical fatigue level (TPF) using relative work intensity (%VO2max) and HR. The ratio of actual work time to TPF was defined as the fatigue rate PPF, and we were able to show the rate until reaching the set fatigue level. Finally, we developed an application for smartphone to evaluate a risk of heat stroke.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：熱中症 ウェアラブル端末 心拍数 最大酸素摂取量 運動習慣 皮膚温 アプリ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年ウェアラブル端末の開発により、簡便に人体の心拍数や皮膚温が測定できるようになりつつある。心拍数を測定できるリストバンド型の端末は多数販売されており、運動処方による健康管理に用いられている。申請者らは、皮膚温と体内温、心拍数の関係について既往研究を基に整理している¹⁾。心拍数・体内温は作業量と心肺能力で決まるが、ある皮膚温を超えると暑さの影響で上昇することを示しており、この関係が熱中症リスク評価に有効であると考えた。ウェアラブル端末として、リストバンド型、Tシャツ型、メガネ型など多数検討・販売されているが、本研究では、最も普及しているリストバンド型に着目する。文献1)で得られる関係は、全身の平均皮膚温と体内温の関係であるため、体内温を推定するためには平均皮膚温が必要である。リストバンド型を使用する場合、手首皮膚温が測定される。手首の皮膚温から全身の皮膚温を推定可能か検討する必要があると考えた。また、体内温の推定のためには、作業量と平均皮膚温の他に、人の心肺能力を表す最大酸素摂取量 (VO_{2max}) が必要である。 VO_{2max} の推定法には、20m シャトルランなど多大な作業を要するものが多く、その推定は容易ではない。毎日測定されるライフログには運動時間等が記録されており、運動習慣からその人の心肺能力を推定できれば多大な労力がかからずに VO_{2max} を推定できると考えた。さらに、現状では皮膚温を測定できないウェアラブル端末がほとんどであるため、体内温と密接なかわりがある心拍数のみから熱中症リスクを評価できればさらに有用性は増すと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、第一に手首をはじめとした部位皮膚温から平均皮膚温を推定可能か検討するために、被験者実験により検証することを目的とする。第二に、日ごろの運動習慣から VO_{2max} を推定することが可能か、文部科学省による新体力テストの統計データとウェアラブル端末を着用した被験者のデータを用いて検証することを目的とする。第三に、熱中症リスクを評価する一つの方法として心拍数を用いた体力的疲労の評価法を検証することを目的とする。最終的に、熱中症リスク評価アプリを開発する。

3. 研究の方法

(1) 部位皮膚温と平均皮膚温の比較のための被験者実験

本実験では、健康な男子学生 5 名を対象として恒温恒湿室で被験者実験を行った。室温 26, 28, 30, 相対湿度 50% の 3 条件で設定した。軽作業時の代謝量 ($223W/m^2$ 程度) を想定してトレッドミルによる走行運動を 120 分間行わせた。まず被験者にサーミスタ (LT-8A, Gram) と心拍計 (POLAR, A360) を所定の位置 (サーミスタは前額、前腕、手背、腹部、背部、大腿前面、下腿前面、足背、手首の 9 部位、心拍計は手首) に取り付けた。その後実験衣 (吸汗速乾性 T シャツ, トランクス, 作業用ズボン, 靴下, 靴) を着用し、トレッドミルによる走行運動 (1 分間立位休息, 9 分間トレッドミル走行運動で 1 サイクル) を計 12 サイクル行なわせた。全身の平均皮膚温は Hardy-DuBois の 7 部位面積比に基づき算出し、最終 30 分値を定常とみなし、その平均値を用いた。

(2) 運動習慣と VO_{2max} の関係

釧路高専で本科 1~4 年生を対象に毎年行われている文部科学省の新体力テスト²⁾から 20m シャトルランを利用し、 VO_{2max} 推定表²⁾を用いて VO_{2max} を推定した。1 か月の運動日数と 1 日の運動時間などもアンケートで得られており、この 2 つの項目と VO_{2max} との関係について検証した。対象者は 15~18 歳までの男女とし、2016~18 年度の結果を用いた。運動日数については毎日 (月 12 日以上), 時々 (月 6 日以上), 時々 (月に 2 日程度), しないの 4 項目に分類し、運動時間は 1 日に 2 時間以上, 2 時間未満, 1 時間未満, 30 分未満の 4 項目に分類して検証を行った。運動時間の影響を検証するために、Steel-Dwass 法を用いて運動日数ごとに多重比較を行った。検定の有意水準は 5% とした。また、釧路高専の 5 年男子学生 14 名に Polar の心拍計 A360, A370 を手首に装着して生活してもらい日々の運動習慣を記録した。実測は 2017, 18 年 11~1 月に行った。心拍計は運動状態を睡眠, 着座, 低い (軽い家事), 中程度 (ウォーキング等), 高度 (ランニング等) の 5 つに分けて記録する。中程度と高程度を合わせた時間を運動時間とした。1 日の運動時間は実測期間の運動時間の平均とした。男子学生の VO_{2max} は別途シャトルランで計測した。

表 1 日々の運動習慣 (2016-18 年度男子学生のみ)

	Over 2h	Under 2h	Under 1h	Under 30min
Every day	565	203	63	27
Sometimes	11	42	89	101
Occasionally	7	8	28	86
Nothing	5	6	25	479

(3) 体力的疲労 (Physical Fatigue, PF) の導入 PF の定義と尺度化

体育科学センター³⁾は、有酸素能力向上に望ましいトレーニング時間と相対作業強度%VO_{2max}（体力への負担度）との関係を運動強度（軽，中，強）別に表2のように示している．本研究では，この運動強度を「体力的疲労 Physical Fatigue, PF」と定義する．本研究では，新たに「非常に強い」と「体力的限界（疲労困憊）」を加え，PFを表3のように5段階に尺度化する．

表2 トレーニング時間（分）と運動強度（%VO_{2max}） 表3 体力的疲労PFの5段階尺度化

%VO _{2max}	時間(分)	5	10	15	30	60
	軽	70	65	60	50	40
中	80	75	70	60	50	
強	90	85	80	70	60	

PF	1	2	3	4	5
	軽	中	強	非常に強い	疲労困憊

PFの予測式

図1はPFレベルをパラメータとしてトレーニング時間（PFレベルに達する時間）を%VO_{2max}に対して表したものである．任意の%VO_{2max}において任意のPFレベルに達する時間 TPF（Time to a level of Physical Fatigue）は指数関数で近似できる（図1）．

$$TPF = k_1 \times \exp(-0.079 \times \%VO_{2max}) \quad (1)$$

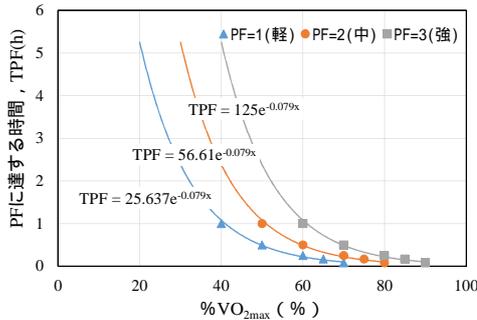


図1 作業強度%VO_{2max}とTPF(h)との関係

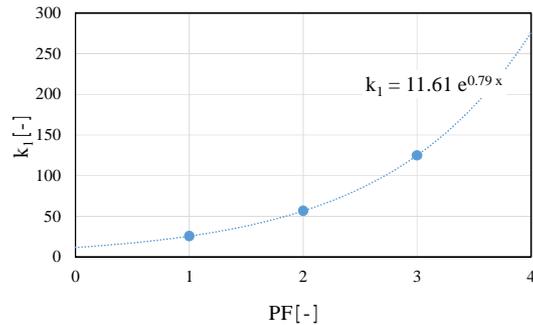


図2 係数k₁とPFの関係

ここで，係数k₁は図2のように指数関数で近似できる．

$$k_1 = 11.6 \times \exp(0.79PF) \quad (2)$$

ゆえに，PFに達する時間は作業強度の関数として表せる．

$$TPF = 11.6 \times \exp(0.79PF - 0.079 \times \%VO_{2max}) \quad (3)$$

4. 研究成果

(1) 手首皮膚温と全身の平均皮膚温の関係

26, 28, 30のそれぞれの実験結果において，定常状態とみなされる最終30分間の平均値を解析対象とした．図3は全環境条件における手首皮膚温と全身の平均皮膚温の関係を示している．それぞれ被験者5人の平均値を用いた．体表温度，手首温度の値はともに温度が上昇するにつれ増加していた．両者は高い相関関係にあり，高温になるほど両者の値が近づいていることがわかる．高温環境では全身の皮膚温が一様に近づくことはよく知られており，この影響であると考えられる．

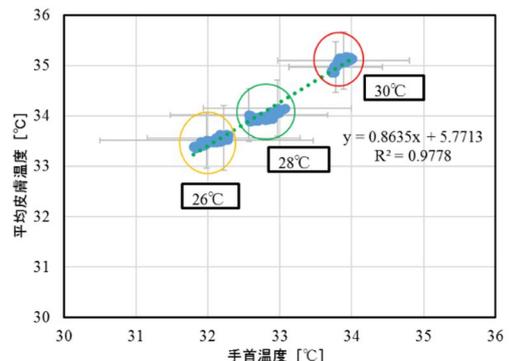


図3 手首皮膚温と全身の平均皮膚温の関係

(2) 運動習慣とVO_{2max}の関係

図4左に毎日運動する学生の1日の運動時間とシャトルラン回数の関係を，図4右に時々運動する学生の同様の関係を表す．毎日運動する場合，2時間以上とそれ以外，2時間未満と1時間未満の間に有意差がみられた．毎日運動している場合は，1日の運動時間により心肺能力に差が出る可能性が示された．また時々運動でも2時間以上運動すると，高い心肺能力を維持できる可能性が示唆された．図5に，ウェアラブル端末から得た運動時間（中等度4と高度5の合計時間）とVO_{2max}の関係を示す．運動時間が多くなるほどVO_{2max}が高くなり，高い相関関係が見られた．図4に体育科学センターが示した心肺能力向上のための運動時間と相対作業強度（%VO_{2max}）の関係を軽，中，強の3段階で示す．これに被験者の4.中程度（5METs相当），5.高度（7METs相当）の運動時間をプロットすると，軽よりも左側に分布し，被験者の現在の運動時間では心肺能力を向上させるほどの運動をしていないことが分かった．

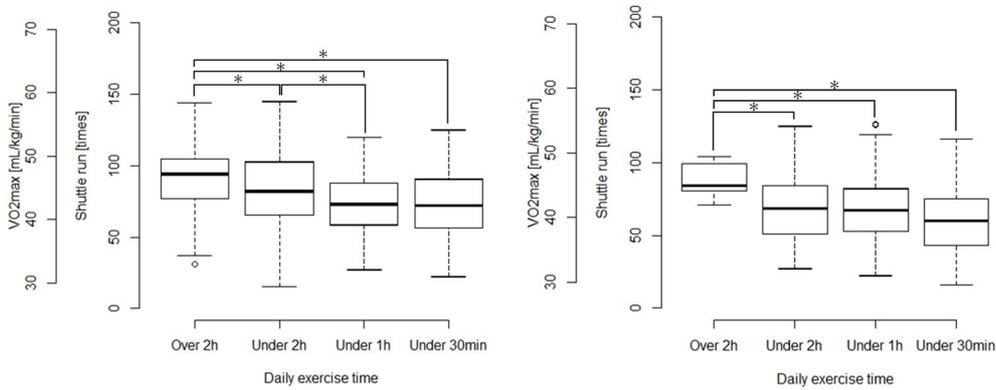


図4 新体カテストでの運動習慣がシャトルラン回数や VO_{2max} に及ぼす影響 (左: 毎日, 右: 時々)

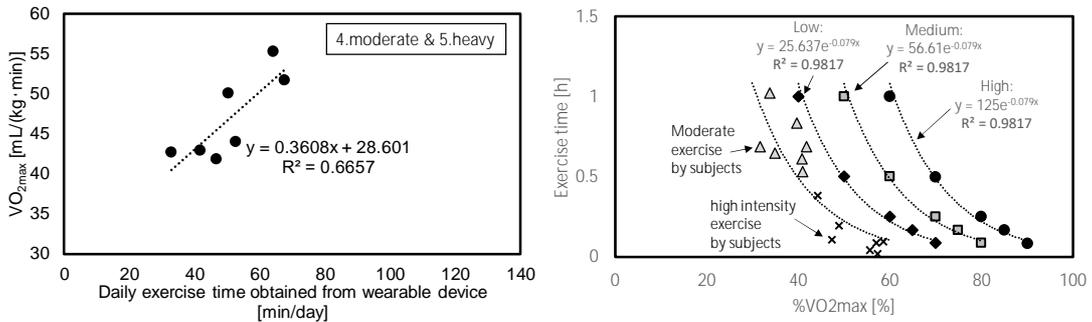


図5 ウェアラブル端末で得られた運動時間と VO_{2max} の関係 (左), 体育科学センターが示した心肺能力向上のための運動時間と %VO_{2max} の関係とウェアラブル端末で得られた運動時間と %VO_{2max} (右)

(3) 心拍数 HR に基づく疲労到達時間 TPF の推定

HR と作業強度 %VO_{2max} の関係

任意の体力的疲労に到達する時間 TPF は, 式(3)のように %VO_{2max} の関数で表される。ここで, 心拍数 HR と %VO_{2max} の関係を次式 (式(4)) で近似すると, %VO_{2max} は HR の関数として式(5)のように表すことが出来る。

$$HR = a_{HR} \%VO_{2max} + b_{HR} \quad (4), \quad \%VO_{2max} = \frac{HR - b_{HR}}{a_{HR}} \quad (5)$$

式(3), (5)より, 以下の式が得られる。

$$TPF = 11.6 \times \exp\left(0.79PF - \frac{0.079(HR - b_{HR})}{a_{HR}}\right) \quad (6)$$

山地⁴⁾は日本人の各年齢の心拍数 HR と %VO_{2max} の関係を整理しているが, 筆者らは, 山地のデータを基にして a_{HR} と b_{HR} の値を導いた (表 4)。上式から, 任意の PF 許容レベル (Permissible Level of Physical Fatigue, PLPF) (たとえば, PLPF=3) に達する時間 TPF は HR により求まる。

表 4 年齢別 a_{HR} と b_{HR}

年齢 (歳)	a _{HR}	b _{HR}
20-29	1.33	57
30-39	1.28	57
40-49	1.15	60
50-59	1.03	62
60-69	0.92	63

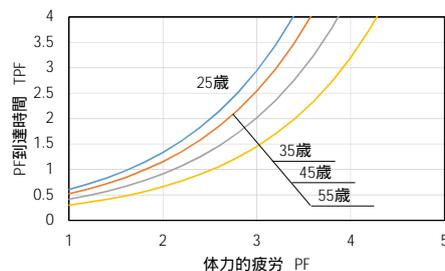


図6 PF と TPF (上限心拍数 120 bpm) の関係

TPF の計算例

心拍数の上限を仮に 120 bpm と設定し, この上限強度の作業を継続する場合, 年齢別の TPF は式(6)より図 6 のように計算される。例えば許容疲労レベルを「強」(PLPF=3)とした場合, 到達する時間 TPF は 25 歳で 3 h, 55 歳で 1.5 h であることが判る。PLPF=2 (「中」程度の疲労) の段階で休憩をとるとすれば, 25 歳で 1.3 h, 55 歳で 0.75 h となる。一般的に任意の負荷(必要酸素摂取量 VO₂)の作業を行う場合, 最大酸素摂取量 (VO_{2max}) が年齢と共に減少するために相対作業強度 %VO_{2max} (=VO₂/VO_{2max} × 100) は年齢と共に高くなる。

5. 疲弊率の提案

(1) 疲弊率の定義

HR は作業強度の変化に即応する。そのため作業強度が時々刻々変化する実際の作業において

は、ある一定の時間間隔 t の平均値を用いて評価する必要がある。すなわち任意の時刻 t_i における t 時間の平均 HR (=HR_i) とすると、この間の TPF は TPF(HR_i) である。従って、 t 時間に作業継続可能時間の $t/TPF(HR_i) \times 100(\%)$ を失ったことを意味する。この累積値を疲弊率 (PPF: Percentage of PF) と仮称する。PF 許容レベル PLPF=5 としたときが疲労困憊に至るまでの疲弊率である。

$$PPF = \sum \left(\frac{\Delta t}{TPF(HR_j)} \times 100 \right) \quad [\%] \quad (7)$$

(2) PPF の適用例

筆者らが実施した既往の実験データ⁵⁾を用いて、疲弊率 PPF(%) を評価する。気温 37 の運動実験で、実験終了時に疲労困憊となった被験者のデータを用いた。PPF の計算は以下の手順で行われた。

$t=10$ 分として、実測 HR を用いて式(5)より %VO_{2max} を推定した。PF 許容レベル PLPF=5 と置き、%VO_{2max} を式(3)に代入して TPF を計算した。 $t/TPF \times 100(\%)$ を積算し、疲弊率 PPF を計算した。

PPF が 100% に達する時間は、被験者が疲労困憊して実験を中断した時間である 140 分と概ね一致した (図 7)。

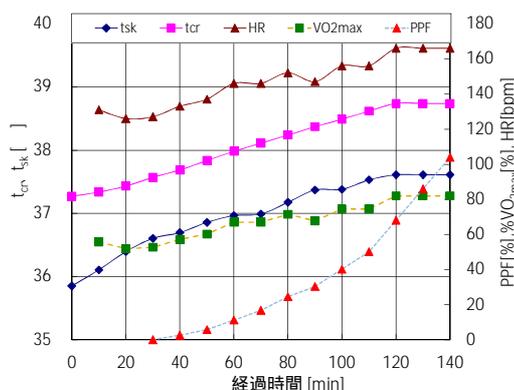


図 7 被験者実験データの経時変化

6. 熱中症リスク評価アプリの開発

アプリケーションの開発は、Google 社の Android Studio をエディタとして使用し、言語は Java を使用した。動作確認は VAIIO 社製 VAIIO Phone A VPA0511S を用いて、Android バージョンは 6.0.1 (API レベル 23) として実験を行った。また、心拍数取得装置ではデバイスに Arduino SRL 社製 Arduino Micro、心拍センサに SparkFun Electronics 社製 Pulse Sensor SEN-11574、Bluetooth によるシリアル通信には浅草ギ研製 BLESerial2 を用いた。プログラムの開発には Arduino の統合開発環境である Arduino IDE を用いた。本アプリケーションは労働者を対象としているため、端末やセンサの持ち運びが作業に支障をきたさないことが重要である。そこで今回は広く普及している Android 端末と、小型だが拡張性の高いマイコンである Arduino を用いてアプリケーションを作成した。本アプリケーションでは、心拍センサから取得した心拍数を Android 端末上で表示する。また、取得した心拍数から身体疲労を算出して表示、警告を行う。本アプリケーションを起動すると、周辺の Bluetooth を接続するための BLE モジュールをスキャンし表示する。表示した一覧にはその BLE モジュールの名前、アドレス、信号強度を表示する。次にその一覧にある装置を選択すると心拍数や現在の身体状況の表示画面に遷移する。表示画面では年齢と許容できる疲労状態をスピナーで選択し、式を用いて TPF と PPF を算出し表示する。スタートボタンを押すと PPF の算出がごとに行われ、もう一度押すとタイマーがリセットされ算出が停止する。算出された PPF より危険度を判定、警告文を表示する。PPF を 4 段階の危険度で判別し、Android 端末に表示して警告を行った。

7. まとめ

ウェアラブル端末を用いた熱中症リスク評価のため、被験者実験から手首温度と平均皮膚温度との関係を調べ、両者の間では概ね比例関係が見られた。ウェアラブル端末を装着した被験者から得られた中程度、強度の運動時間と VO_{2max} の間に高い相関関係がみられた。ウェアラブル端末で容易に測定できる心拍数に着目し、心拍数を利用した体力的疲労評価のため、体力的疲労 PF を尺度化し、任意の作業強度 %VO_{2max} で任意の体力的疲労レベルに達する時間 TPF の算定式を提示した。TPF に対する経過時間の割合を疲弊率 PPF と定義し、設定した疲労レベルに達するまでの現在の割合を示すことができるようにした。スマートフォンで危険度の評価を行い、結果をユーザに知らせることで熱中症リスクを回避するアプリケーションを作成した。

参考文献

- 1) 雨宮智史, 乗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹 (他 3 名, 2 番目), 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル (第 7 報) 平均皮膚温と酸素摂取水準 (%VO_{2max}) を用いた心拍数, 体内温度の予測, 空気調和・衛生工学会大会, pp.1181~1184, 2008
- 2) 文部科学省, 新体力テスト要項, http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/stamina/05030101/002.pdf, 2018.10 閲覧
- 3) 体育科学センター編, スポーツによる健康づくり運動カルテ 体育科学センター方式, 講談社, 1983.
- 4) 山地啓司, 心拍数の科学, 大修館書店, p.42, 1986.
- 5) 中谷則天, 乗原浩平, 窪田英樹ら: 平均皮温・体内温予測モデルを用いた暑熱環境の評価 (第 1 報) 予測モデルの検証実験, 空気調和・衛生工学会講演論文集, pp.913~916, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 浅水仁, 栗原浩平	4. 巻 52
2. 論文標題 心拍数を用いた熱中症リスク回避のためのアプリケーションの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 釧路工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗原浩平, 濱田靖弘, 三島利紀, 館岡正樹
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究（第6報）高専生の運動習慣と最大酸素摂取量の関係
3. 学会等名 第43回人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗原浩平, 久保元人, 濱田靖弘, 三島利紀, 館岡正樹
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究（第5報）新体力テストによる高専生の運動習慣と最大酸素摂取量の関係及び経年変化
3. 学会等名 第42回人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保元人, 栗原浩平, 濱田靖弘, 三島利紀, 館岡正樹
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究（第4報）運動習慣と最大酸素摂取量の関係
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第52回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究 (第3報) 任意の体力的疲労度に達する時間の心拍数に基づく推定
3. 学会等名 平成29年度空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柴田侑治, 栗原浩平, 濱田靖弘
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究 第1報 部位体表温と全身平均体表温の関係
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第51回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柴田侑治, 栗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹
2. 発表標題 ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究 第2報 心拍数による体力的疲労評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第51回学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	濱田 靖弘 (Hamada Yasuhiro) (40280846)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	浅水 仁 (Asamizu Satoshi) (40369905)	釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50103)	
研究 協力者	窪田 英樹 (Kubota Hideki)		
研究 協力者	柴田 侑治 (Shibata Yuji)		
研究 協力者	久保 元人 (Kubo Gento)		
研究 協力者	三島 利紀 (Mishima Toshiki)	釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50103)	
研究 協力者	館岡 正樹 (Tateoka Masaki)	釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50103)	