

労災疾病臨床研究事業費補助金

熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサーの活用と
効果的な熱中症予防法の検証(180801-01)

令和 2(2020)年度 総括研究報告書

研究代表者 丸山 崇

令和 3(2021)年 3 月

目次

I. 総括研究報告

1. 熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサーの活用と効果的な熱中症予防法の検証 丸山崇、倉岡宏之、江口泰正、山田晋平、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	1
---	---

II. 分担研究報告

1. シャツ型ウェアラブルデバイスによる暑熱作業リスク評価の検証 黒坂知絵、丸山崇、倉岡宏之、江口泰正、山田晋平、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	6
2. 腕時計型ウェアラブルセンサーによる熱中症予防（現場実証） 八谷百合子、丸山崇、倉岡宏之、江口泰正、山田晋平、黒坂知絵、上田陽一、東敏昭	29
3. シャツ型ウェアラブルセンサーによる熱中症予防（現場事例報告） 山田晋平、丸山崇、倉岡宏之、江口泰正、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	46
4. シャツ型ウェアラブルセンサーによる熱中症予防（現場事例報告） 倉岡宏之、丸山崇、江口泰正、山田晋平、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	50

III. 研究成果の刊行に関する一覧	55
--------------------	----

熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサーの活用と効果的な熱中症予防法の検証

研究代表者： 丸山 崇 (産業医科大学 医学部 第1生理学)

分担研究者： 山田晋平 (産業医科大学 産業保健学部 安全衛生マネジメント学)

倉岡宏之 (産業医科大学 産業保健学部 安全衛生マネジメント学)

黒坂知絵 (産業医科大学 産業保健学部 人間情報科学)

江口泰正 (産業医科大学 産業保健学部 人間情報科学)

八谷百合子 (産業医科大学 産業保健学部 産業・地域看護学)

上田陽一 (産業医科大学 医学部 第1生理学)

東敏昭 (一般財団法人 西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授)

<研究要旨>

研究の背景：

熱中症は暑熱環境下で働く労働者に生命の危機をおよぼすこともある病態であり、労働災害防止の観点からも、予防すべき重要な課題の一つである。業務上疾病としての熱中症発症者数(死亡数)は、平成27年464(29)人、平成28年462(12)人、平成29年544(14)人となっており、特に、平成30年は休業4日以上業務上疾病者の数は1,178人で内28人が死亡災害と倍増した。また、最新報告では平成31年/令和元年790(26)人(厚生労働省「業務上疾病発生状況等調査」)となっており、労働災害における熱中症の発生は減っていない。熱中症予防対策として、作業時間の短縮や定期的な休憩などの作業管理、空調の導入などの作業環境管理、普段からの体調管理の呼びかけなどの健康管理、労働衛生教育による熱中症対策の啓蒙等が行われてきているが、気候変動による猛暑の影響もあり、死亡災害も後を絶たない状況である。各企業において様々な対策がなされ、熱中症予防対策が講じられているが、詳細な現場の実態は把握されておらず、先進的な対策や効果的な対策の情報も広く共有されていない状況である。

また、近年、ウェアラブルセンサーを用いて心拍や体動などの生体情報をセンシングしインターネットを通じ、そのデータを労働者の健康管理に活用するInternet of Things(IoT)技術が多く開発されている。このIoT技術が、暑熱環境下の身体状況を評価し体調変化を早期に捉え、熱中症予防に利用できる可能性も示唆されている。一部の企業ではこのウェアラブルセンサー(IoT技術)を用いて熱中症対策が行われていることも知られているが、有効な熱中症予防対策として十分な認識はされていない。

研究目的：

労働現場での熱中症対策の実態やを把握するため、「労働現場で行われている熱中症対策の現状調査」および「先進的な熱中症対策の抽出」が本研究課題の1つ目の目的である。次に、先進事例の中で、近年利用が進んでいる、「ウェアラブルセンサーによる体調変化予測システムが、熱中症予防に有用であるかの検証」を行う

ことが2つ目の目的である。3つ目の目的は、「ウェアラブルセンサーによる体調変化予測システムが、実際の労働現場において、熱中症予防に有用であるか検証を行うこと」である。これら一連の研究において、ウェアラブルセンサーによる熱中症対策をはじめとした、先進的な熱中症対策が、多くの労働現場に展開されることで熱中症による労働災害を防止することが本研究課題の目的である。

方法及び結果の概要：

2020年度は、ウェアラブルデバイス（シャツ型1機種）を用いて、産業医科大学人工気候室において、被験者の協力のもと、暑熱環境下での運動負荷試験を行い「熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験」を行った。その結果、いずれのウェアラブル機器も熱中症予防に一定の有用性を示し、熱中症予防対策の一つとなり得ることが示された。人工気候室実験で、有用性の示されたウェアラブルセンサーを用いて、実際の暑熱環境の労働現場において、作業者にセンサーを装着しモニタリングする現場実験を行った。個人要因（主観的な疲労感など）や環境要因（WBGTなど）より熱中症リスクを見積もり、ウェアラブルセンサーにより推定されたリスク評価との関連性などを検討した。また、現場実証に加え、暑熱環境下において作業者にウェアラブルセンサーを装着した際の、現場実例と使用効果について調査を行った。その結果、暑熱環境の労働現場においてもウェアラブルセンサーによるアラーム通知システムは、熱中症リスクを妥当に評価しており、適時に作業者に対処行動を促すことで、熱中症防止に有用であることが示された。

まとめ総括：

今年度のシャツ型ウェアラブルセンサーの検証では、暑熱環境における体調変化を妥当な検出が可能であると考えられた。ウェアラブルセンサーを用いた熱中症対策の現場実証では、暑熱環境の労働現場において、作業者にセンサーを装着しモニタリングする現場実験により、暑熱環境下作業現場での熱中症予防に一定の効果があることが示された。ウェアラブルセンサーから得られる生体データをリアルタイムに分析し、体調変化や身体負荷のリスク評価をおこなうことで、事前に危険性を知らせる通知システムが、熱中症予防に一定の効果があることが本研究により示された。

熱中症は学童や高齢者の発生が多いことも知られており、労災防止対策として検証された本研究課題での知見が、教育現場や高齢者医療においても有用になることが考えられる。

分担研究者

山田晋平（産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学）

倉岡宏之（産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学）

黒坂知絵（産業医科大学産業保健学部人間情報科学）

江口泰正（産業医科大学産業保健学部人間情報科学）

八谷百合子（産業医科大学産業保健学部産業・地域看護学）

上田陽一（産業医科大学医学部第1生理学）

東敏昭（一般財団法人西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授）

A. 研究の背景および目的

熱中症は暑熱環境下で働く労働者に生命の危機をおよぼすこともある病態であり、労働災害防止の観点からも、予防すべき重要な課題の一つである。これまで、補水や休憩などの労働衛生管理や労働衛生教育による予防法の啓蒙等が行われてきているが、死亡災害も後を絶たない状況である。

近年、心拍や体動などの生体情報をセンシングするIoT技術（ウェアラブルセンサー）が多く開発されており、暑熱環境下の身体状況を評価し熱中症予防に利用できる可能性も示唆されている。一部の企業ではこのIoT技術を用いて熱中症対策を行っていることも知られているが、その効果は十分に検証されていない。

当研究課題では、昨年度に引き続き、産業医科大学人工気候室において、被験者の協力のもと、暑熱環境下での運動負荷試験を行い熱中症対策に有効と考えられるIoT技術を用いて「熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験」を行った。ウェアラブルセンサーによりモニター出来る生体データから推測される、体調変化や身体負

荷などのリスク評価と、熱中症の指標となる深部体温、脱水指標、自覚症状などのデータと相関を検証し、ウェアラブルセンサーの有効性や得られるデータからの熱中症リスクの推定の可能性を検討した。

また今年度は、これらのウェアラブルセンサーを暑熱環境下で作業する労働者に装着していただき、実際の現場で使用した際の、生体指標等を継続測定する中で、「ウェアラブルセンサーを用いた熱中症対策の現場実証」を行った。

B. 研究方法

熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験

本年度は、シャツ型ウェアラブルセンサー1機種に対し、産業医科大学人工気候室において、低リスク（注意レベル：気温25℃湿度50%WBGT22℃）および、高リスク（厳重警戒レベル：気温35℃湿度50%WBGT30℃）の2条件で、トレッドミルにて80W（きつい肉体労働レベル）相当の運動負荷を18分×2回行う実験を行った。運動負荷実験の間、各ウェアラブルセンサーを装着し、体調変化を評価するとともに、深部体温や心拍、自覚的運動強度（ボルグスケール）、負荷前後の体重、採血・採尿検査等を行ない、熱中症リスクが適切に評価できているか検証を行った。

ウェアラブルセンサーを用いた熱中症対策の現場実証

人工気候室で検証した腕時計型ウェアラブルセンサーを用いて、研究協力会社2社の協力のもと暑熱環境下での現場実証を行った。腕時計型ウェアラブルセンサーを装着し、作業時のWBGT（℃）、問診票による疲労度・温熱感覚・熱性適性、と同時に腕時計型ウェアラブルセンサーによるパルス数（脈波）及び温度・湿度と作業時間の計測から出力した身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱スト

レスレベルを計測し、WBGT (°C) 及び問診票によるHeat Strain状態と腕時計型ウェアラブルセンサーによる異常検出閾値の結果を比較検討した。また、高層ビルの建設現場において、約100名超を対象にウェアラブルデバイスによる熱中症対策が行われている現場事例を調査した。さらに、シャツ型ウェアラブルセンサーを用いてBLEルータを用いたスマホレスシステムの現場導入事例を調査した。

尚、当研究課題における調査・実験は、産業医科大学倫理委員会の承認を受け実施された。

C. 研究結果

熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験

2020年度は成人健康男性7人（年齢21～42）の被験者に協力頂き、低リスク環境（注意レベル、気温25℃湿度50% WBGT22℃）及び高リスク環境（厳重警戒レベル、気温35℃湿度50% WBGT30℃）の2条件での運動負荷実験が行われ、生体データが計測された。この時、シャツ型のウェアラブル機器1機種による生体データ計測と暑熱環境による生体影響の評価が行われ、熱中症リスクの予測が可能であるか検討された。（詳細分担研究報告にて後述）

ウェアラブルセンサーを用いた熱中症対策の現場実証

腕時計型ウェアラブルセンサーを用いて、合計14名に被験者として協力を頂き、各社の作業現場において、各被験者が7日間作業した際の、生体データや主観的な疲労度等および環境データが得られた。これらのデータより、ウェアラブルセンサーによりHeat Strain状態の推定が可能であったか検討が行われた。また、現場事例報告に関しては、現場でのシステム導入の実際や利点、改善が必要な点などに関して整理された。（詳細は分担研究報告にて後述）

D. 考察

今年度のシャツ型ウェアラブルセンサー（ミツフジ社製）の検証では、高い精度で心拍数が計測できおり、計測誤差の少ない高率群では、暑熱リスク通知は極めて高い確率で検出された。Heat Strain状態の検出率も高く、妥当な検出が可能であるといえる。

ウェアラブルセンサーを用いた熱中症対策の現場実証では、暑熱環境の労働現場において、作業者にセンサーを装着しモニタリングする現場実験を行った。環境要因（当日の天候やWBGTなど）とウェアラブルセンサーにより得られたリスク評価との関係の検証を行い、暑熱環境下作業現場での熱中症予防に一定の効果があることが示された。現場事例の調査においては、ウェアラブルセンサーによるリスク評価に基づいた指示により、熱中症の予防行動がとられ、結果的に熱中症を回避できると推察された。

E. 結論

- ・ 人工気候室における、暑熱環境下運動負荷試験によって、ウェアラブルセンサーは、熱中症リスクが高まった状態を妥当に検出することが出来ると考えられた。
- ・ ウェアラブルセンサーは、実際の作業現場においても熱中症リスクの予測や予防行動を促すためのシステムとして有効であると考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表
なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

シャツ型ウェアラブルデバイスによる暑熱作業リスク評価の検証

研究分担者： 黒坂 知絵 産業医科大学 産業保健学部 人間情報科学 講師

研究要旨：

熱中症は、重症化すると生命の危機にもたらす病態であり、64 歳以下では運動中や屋外での作業中に発症する事例が多く割合を占める。したがって、企業や学校では、熱中症に関する教育や休憩時間の見直しなど積極的な対策に取り組んでいるものの、地球温暖化をはじめとする環境の影響もあり、ただちに改善することは困難である。このような状況の中、近年では、生体情報をセンシングするデバイスが多く開発され、リアルタイムに身体の状態を評価する試みが始まっている。小型センサを組み込んだウェアラブルデバイスは、行動制限が少なく、毎日装着することが可能であることから、熱中症対策や労働災害防止、高齢者の見守りなど、幅広い分野での活用が期待されている。

本研究課題では、2018 年に労働現場における熱中症対策の実態についてアンケート調査を実施し、2019 年には、運動負荷実験による腕時計型とシャツ型のウェアラブルデバイスの検証結果を報告した。本稿では、昨年とは異なったシャツ型ウェアラブルデバイスについて、昨年度と同様の運動負荷実験を実施し、Heat Strain 検出やアプリの信頼性について検討した。

実験参加者（成人男性 7 名）を対象に、人工気候室にてトレッドミルでの運動負荷実験を行った。実験環境は、＜条件 1＞低リスク（注意レベル、気温 25 度、湿度 50%、WBGT22℃）、＜条件 2＞高リスク（厳重警戒レベル、気温 35℃、湿度 50%、WBGT30℃）である。実験手順は、運動前に安静時のベースライン計測後、18 分間のトレッドミル（時速 7km、80W 相当）と 24 分間の休憩を 2 回繰り返した。実験中は、心電図、深部体温（直腸温）、体表面温度を連続的に計測し、3 分毎に自覚的運動強度（ボルグスケール）を収集した。同時に、ウェアラブルデバイスを用いて心拍データを計測し、心拍データから推定される暑熱リスク、眠気、体調、ストレスの値を記録した。

暑熱リスクを評価指標は、ISO9886：2004 および米国政府労働衛生専門家会議 ACGIH を参考に、直腸温と心拍数の閾値を定義し、人工気候室とウェアラブルデバイスでの心拍数一致率の高い群（高率群）と低い群（低率群）でウェアラブルデバイスの各通知の調査を行った。更に、ボルグスケールスコアを加え、心拍数、深部体温の 3 つのうちいずれかが閾値を超えた「Heat Strain 状態」と暑熱リスク通知との関連を検討した。

結果、全体的にウェアラブルデバイスでは非常に高い精度で心拍数が計測できており、計測誤差の少ない高率群では、深部体温が閾値を超えた場合の暑熱リスク通知は極めて高い確率で検出された。Heat Strain 状態の検出率も高く、妥当な検出が可能であるといえる。一方で、暑熱リスク以外の体調変化やストレスについては検出率が低く、改善が必要であると考えられた。

心拍数計測や暑熱リスクのためのアルゴリズムは妥当であると考えられ、計測位置や電極との密着などを改良し心拍数計測の精度を上げることで、検出率向上が十分に期待できるといえる。また、心拍数だけではなく、他の生体量を用いた多角的なアルゴリズムを構築することで、更によりアプリになることが期待できる。

分担研究者

丸山崇(産業医科大学医学部第1生理学)

江口泰正(産業医科大学産業保健学部人間情報科学)

山田晋平(産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学)

倉岡宏幸(産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学)

八谷百合子(産業医科大学産業保健学部産業・地域看護学)

上田陽一(産業医科大学医学部第1生理学)

東敏昭(一般財団法人西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授)

A. 研究の背景および目的

熱中症は、暑熱環境下において、体内の水分や塩分の均衡が喪失したり、体温調整機能が破綻することで発症し、重症化すると生命の危機をもたらす病態である。熱中症患者数においては、屋内での発症が最も多い高齢者に対し、64歳以下では運動中や屋外での作業中が多く割合を占める。したがって、企業や学校では、熱中症に関する教育や戸外の連続作業時間の見直しなど、積極的な対策に取り組んでいるものの、ヒートアイランドの影響もあり、ただちに改善することは困難である。このような状況の中、近年では、心拍や体動などの生体情報をセンシングするデバイスが多く開発され、ネットワークを介してリアルタイムに身体の状態を評価する試みが始まっている。小型センサを組み込んだウェアラブルデバイスは、スポーツや作業などの行動制限が少なく、毎日装着することが可能である。この特長を活かし、日々の体調管理や高齢者の見守り支援、熱中症対策や労働災害防止における活用など、幅広い分野での活用が期待されている。本研究課題では、2018年に労働現場における熱中症対策の実態についてアンケート調査

を実施し、2019年には、運動負荷実験による腕時計型とシャツ型のウェアラブルデバイスの検証結果を報告した。本稿では、昨年とは異なったシャツ型ウェアラブルデバイスについて、同様の運動負荷実験を実施し、Heat Strain 検出やアプリの信頼性について検討したので報告する。

B. 実験手順

男性参加者(mean±SD:22.9±3.36歳)7名を対象に、産業医科大学人工気候室において、トレッドミルでの運動負荷実験を行った。実験環境は、低リスク(注意レベル、気温25度、湿度50%、WBGT22℃)と、高リスク(厳重警戒レベル、気温35℃、湿度50%、WBGT30℃)の2条件とし、すべての参加者が日を改めて各条件を1回ずつ遂行した。実験手順は、休憩1(Rst1)6分、トレッドミル(Tre1)18分、休憩2(Rst2)12分、トレッドミル(Tre2)18分、休憩3(Rst3)12分である。トレッドミルは、時速7km(80W相当、きつい肉体労働レベル)の運動負荷に設定した。

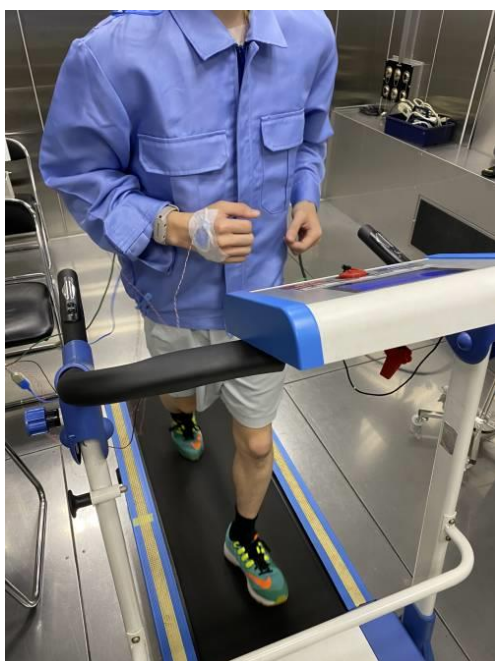
実験中は、心電図、深部体温(直腸温)、体表面温度(胸部、掌、センサ表面、センサ裏面)を連続的に計測し、心電図は無線式心電計(BSM-2401、日本光電工業株式会社)で1.5kHzのサンプリング周期でコンピュータに記録した。深部体温と体表面温度は熱電対で計測し、10秒間隔で記録した。また、3分毎に自覚的運動強度(ボルグスケール)を収集した、休憩開始時には反応時間検査(Psychomotor Vigilance Task:PVT)を実施した。

同時に、ウェアラブルデバイスを用いて心拍データを計測し、心拍データから推定される暑熱リスク、眠気、体調、ストレスの値を記録した。ウェアラブルデバイスには、ミツフジ株式会社のhamonを用いた。

なお、本実験では、深部体温が38.5℃を超えた場合や参加者が体調不良を訴えた場合は実験を中止した。



(1) ウェアラブルデバイスの着用



(2) 運動負荷中

図 1 実験中の様子

C. ウェアラブルデバイス

製品名:hamon

製造元:ミツフジ株式会社(京都府)

製品概要:

普段着感覚で身に付けられるウェアラブルウェア(図 2)で、シャツ型電極から計測された電気信号をスマートフォンやクラウドに送信するためのトランスミッターを介し、心拍データを取得する。スマートフォンに送信されたデータは解析され、心拍データ、指標／アラート情報がアプリ上に表示される。また、クラウドに送信されたデータは Web アプリで参照が可能であ

り、企業の管理者による遠隔モニタリングに利用できる。さらに、クラウドに送信されたデータは、蓄積し分析されることにより、ストレス、体調、暑熱リスク、眠気、または転倒など、新しいアルゴリズム開発のために活用され、産業分野やスポーツ領域まで幅広い活用が期待される。



図 2 ウェアラブルデバイス

利用者への通知:

アプリのダッシュボード画面で、ストレス・体調・眠気・暑熱リスクの 4 項目について状態が表示される(図 3)。通知設定により、アラートを通知させることも可能である。また、グラフ画面では、ストレス、暑熱リスク、心拍数の 3 項目について、設定期間の測定記録が一覧表示される。

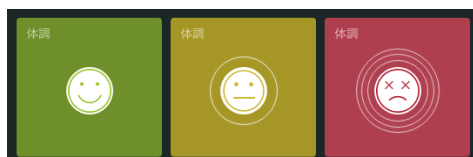


図 3 アプリ ダッシュボード画面

ダッシュボード画面表示項目：

- ・ 体調[3 段階]

良好(緑色) 注意(黄色) 警告(赤色)



- ・ ストレス[3 段階, 最高値 100]

良好(緑色) 注意(黄色) 警告(赤色)



- ・ 暑熱リスク[3 段階]

正常(緑色) 注意(黄色) 警告(赤色)



- ・ 眠気[2 段階]

眠気なし(緑色) 眠気あり(赤色)



収集データ：

シャツ型電極で計測された心拍情報は Bluetooth でスマートフォンに送信され、1 拍間隔で記録される。同時にクラウドにも送信され管理者用データとして蓄積される。

体調と眠気は、心拍データから算出された RRI の周波数解析により自律神経バランスを算出し、各値の推移を監視することによりそれらの変化を検知し、約 1 分間隔で状態を更新する。ストレスは、心拍変動の周波数解析である LF/HF を約 10 分間隔で統計的手法を用いてストレス値に換算して表示する。暑熱リスクは、心拍データのポアンカレプロット解析から深部体温の推定を行い、基準値に達した場合に、注意

もしくは警告のアラートが通知される。トランスミッター内には加速度センサも搭載されており、前後左右上下の 3 軸について加速度も計測可能であり、姿勢判別や転倒検知などの開発も進められている。ただし、本報告では検討しないため加速度データについては省略する。

D. 解析方法

暑熱リスクを評価するための生体量として、ISO9886:2004 では、核心部体温(直腸温、食道温、腹腔内温、鼓膜温、外耳道温、尿温)、皮膚温度(局所部位、複数部位平均値)、心拍数、体重減少量の 4 つが示されている¹⁾。米国政府労働衛生専門家会議 ACGIH では、作業時における直腸温の限界値は、暑熱順化者では 38.5℃、未順化者では 38.0℃と定義している。また、心拍数については、180－(年齢) bpm が持続する場合や、作業強度がピークに達した後に 1 分後の心拍数が 120bpm 以上で回復しない場合は作業を中止するよう勧告している。本報告では、人工気候室で計測された心拍数と深部体温がこれらの条件に達した時と、ボルグスケールスコアが高値となった時について、ウェアラブルデバイスの各種通知状況を解析した。

ウェアラブルデバイスで計測された心拍数は、人工気候室のサンプリング間隔に合わせてデータを整理した。その後、全試行を 3 分毎に分けて平均心拍数を算出し、被験者毎に比較した。なお、本報告において、安静や運動負荷の手順をフェーズ、3 分間の解析データをブロックとする。各ブロックにおいて、人工気候室とウェアラブルデバイスの差が 10bpm 以内(約 10%)の回数を検出し、一致率を算出した。ACGIH の基準値を参考に、180－(年齢)を閾値とし、ウェアラブルデバイスの各種通知の有無を調査した。なお、ウェアラブルデバイスの通知は心拍数を元に判定されていることから、一致率の高い群(高率群)と

低い群(低率群)に分けて検討した。

深部体温については、人工気候室の実測値においてブロック毎の平均値を算出した。ACGIH の基準値を参考に、38.0℃を深部体温の閾値とし、高率群・低率群別に、ウェアラブルデバイスの暑熱リスク通知の有無を調査した。

ボルグスケールスコアは、15 で「かなりきつい」、17 で「非常にきつい」と評価されるため、閾値を 15 とした。

最後に、心拍数、深部体温、ボルグスケールのいずれかが閾値を超えたブロックを「Heat Strain 状態」と定義し、暑熱リスク通知との関連を検討した。

なお、人工気候室で計測された生体量・主観評価とウェアラブルデバイスからの通知の関係において、本報告では、表1のように、閾値と通知の有無の組合せで「正しい判定」「検出」「未検出」「誤検出」と定義した。また、必要に応じて統計解析を行い、条件間の傾向や問題点の把握と原因について考察を行った。

表 1 通知判定の定義

	閾値以上	閾値未満
通知あり	検出	誤検出
通知なし	未検出	正しい判定

E. 結果と考察

各参加者の生体量および主観評価の時系列変化を、図 6～図 19 に示す。14 例中、3 例は、いずれも 2 回目のトレッドミル(Tre2)中に深部体温が 38.5℃に達したため実験を中止し、直ちに座位で休息させた。体調不良を訴えた参加者はいなかったため、座位のまま、可能な範囲で、生体量、ボルグスケール、PVT の計測を継続した。

・ 心拍数と各種通知

人工気候室で計測された心拍数を図 6～図 19 a. に、ウェアラブルデバイスでの心拍数を b. に示す。グ

ラフ内に各参加者の年齢から算出した閾値および実験中止後の計測結果も示した。なお、心拍数の一致率の算出は、実験中止までのデータを対象とした。一致率は全体的に高く(表 2)、精度よく計測ができているが、フェーズ別の平均一致率をみると、計測前半では計測値が安定せず誤差が大きくなる傾向が見られた(図 4)。特に、14 例中 7 例で、計測開始直後の安静時(Rst1)に、心拍数の閾値を超えて記録されている点は、注意が必要である(表 2 ※)。ここで、Rst1 から正しく計測されており全体の一致率が 80%以上の 7 例を高率群(表 2 グレー)、それ以外の試行を低率群とした。

時間経過に伴って心拍数の一致率が上昇していることから、計測誤差の原因のひとつとして電極の密着度があげられる。計測開始直後は体動や呼吸の影響で皮膚に密着していない電極が、運動中の発汗によって計測部位に固定されることで、精度の高い計測ができるようになったと推測できる。解決策として事前に保湿クリームなどで電極を肌に密着させる工夫も効果的かもしれない。また、計測不能区間の情報通知や補間アルゴリズムなどについては検討の余地があると考ええる。

表 2 人工気候室とウェアラブルデバイス
における心拍数の一致率

	条件 1 室温 25℃	条件 2 室温 35℃
S01	86.4%	81.8%
S02	90.9%	68.8% ※
S03	18.2% ※	100.0%
S04	81.8% ※	100.0%
S05	81.8% ※	81.8%
S06	40.9%	4.5% ※
S07	95.5%	40.0% ※

グレーの 7 試行を高率群とする

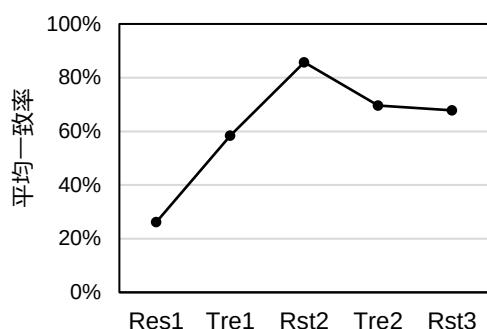


図4 心拍数のフェーズ別平均一致率

全参加者において、心拍数が閾値を超えたブロック数は、条件 1=25 回 (15.5%)、条件 2=32 回 (22.7%)であり、室温の高い条件 2の方が心拍数は上昇する傾向にあった。ウェアラブルデバイスからの暑熱リスク、体調変化、ストレス通知の判定割合を(表 3~5)に示す。暑熱リスクは高率群で 17.2%検出されているものの、誤検出率も高く、心拍数の閾値に関係なく暑熱リスクが多く通知されていることがわかる。ここで、hamon では暑熱リスクの判定には深部体温を利用している、詳しくは次節で述べる。体調およびストレスについては、正しく検出ができているとは言い難い結果であった。参加者別に観察すると、条件 1-S02・S04・S07、条件 2-S05 では、安静から運動負荷への移行時に通知がされていることから精神的な変動とも考えられるが、座位から立位への体位変動を捉えている可能性も否定できない。

表 3 心拍数と暑熱リスク通知 ()内はブロック数

	高率群 (151)	低率群 (152)
正しい判定	39.7%	37.5%
検出	17.2%	11.8%
未検出	6.6%	6.6%
誤検出	36.4%	44.1%

表 4 心拍数と体調通知 ()内はブロック数

	高率群 (149)	低率群 (147)
正しい判定	67.6%	81.0%
検出	0.0%	3.4%
未検出	24.1%	15.6%
誤検出	8.3%	0.0%

表 5 心拍数とストレス通知 ()内はブロック数

	高率群 (149)	低率群 (147)
正しい判定	63.1%	74.5%
検出	1.3%	2.1%
未検出	22.8%	17.2%
誤検出	12.8%	6.2%

・ 深部体温と暑熱リスク

人工気候室で計測された深部体温を図 6~図 19 c. に示し、図中に通知された暑熱リスクを書き加えた。14 例中、12 例で実験中に深部体温が 38.0℃を超え、5 例は 38.5℃以上となった。5 例のうち、3 例は中止、2 例は最後の安静時(Rst3)に体温が達したため、最後まで計測を実施した。なお、閾値を超えなかった 2 例はいずれも条件 1 での試行であった。暑熱リスクは、13 例で「注意」が通知され、うち 5 例については、「警告」レベルに進んだ。計測中に暑熱リスクが通知されなかった 1 例(条件 2-S06)は心拍データが計測できていなかった(心拍数一致率 4.5%)。

深部体温が閾値以上で暑熱リスクが通知された検出率は、高率群=94.8%(55/58)、低率群=76.9%(30/39)と高かった。しかし、深部体温が 38℃に満たない場合の誤検出は、高率群=28.0%(26/93)、低率群=48.7%(55/113)であり、低率群の誤検出は高値であった。心拍数一致率の群別における暑熱リスクの通知割合を表 6 に示す。高率群においては、80%以上のブロックで正しい通知(検出+正しい判定)が行われていることは非常に興味深い。また、危険な状態を放置してしまう「未検出」の割合が極めて低く、暑熱リスク管理システムとして高く評価できる結果であるといえる。

表 6 深部体温と暑熱リスク通知 ()内はブロック数

	高率群 (151)	低率群 (152)
正しい判定	44.4%	38.2%
検出	36.4%	19.7%
未検出	2.0%	5.9%
誤検出	17.2%	36.2%

心拍数一致率と暑熱リスク判定の割合の相関係数を表 7 に示す。心拍数一致率と検出率、未検出率との間に有意な相関が認められた。心拍数の計測誤差を小さくすることで、検出率は高くなり、未検出率は低くなる可能性がある。また、個々の試行を観察すると、計測開始直後の安静時(Rst1)に閾値以上の心拍数が記録されている試行では暑熱リスクが多く通知されているため、安定した心拍数計測に対する改善検討が望まれる。

表 7 心拍数一致率と通知割合の関係(深部体温)

判定の割合	r	
正しい判定	-0.200	n.s.
検出	0.572	<.05
未検出	-0.504	<.05
誤検出	-0.114	n.s.

・ ボルグスケール

3 分毎のボルグスケールのスコアを図 6～図 19 e. に示す。全参加者において、ボルグスケールが閾値を超えた(参加者数、ブロック数)は、条件 1=(2 名、12 回(10.8%))、条件 2=(4 名、25 回(24.0%))であり、条件 2 の方が多かった。そのうち、スコアが 17(かなりきつい)を超えた数は、条件 1=(1 名、3 回)、条件 2=(2 名、13 回)であった。

・ Heat Strain と暑熱リスク

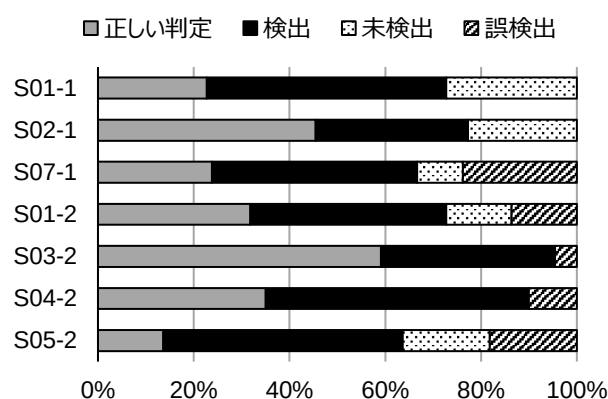
Heat Strain 状態で暑熱リスクが通知された検出率は、高率群=76.7%(66/86)、低率群=71.7%(43/60)であった。深部体温のみの判定に比べて検出率が低下したのは、心拍数やボルグスケールスコアが加わったことで、検出すべきブロック数が増加したためである。Heat Strain と暑熱リスクの判定割合を表 8 に、参加者毎の詳細を図 5 に示す。深部体温のみを用いた判定(表 6)に比べて未検出の割合は上がってしまうものの、高率群の検出率は 40%を超え、通知の必要はない誤検出は低く、妥当な検出ができてい

といえる。

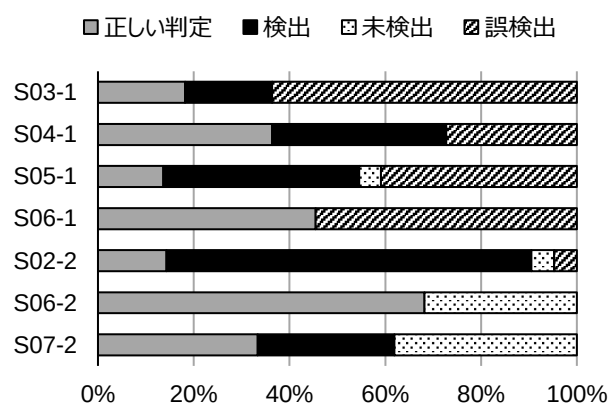
χ^2 検定の結果、心拍数一致率の高低群と判定割合には有意な関係が認められた($p<.001$)。残差分析では、「検出」の割合は高率群で有意に高く、「誤検出」の割合は低率群で有意に高かった。

表 8 Heat Strain と暑熱リスク通知 ()内はブロック数

	高率群(151)	低率群(152)
正しい判定	33.1%	32.9%
検出	43.7%	28.3%
未検出	13.2%	11.2%
誤検出	9.9%	27.6%



(1) 高率群



(2) 低率群

図 5 各参加者の暑熱リスク判定割合

心拍数一致率と暑熱リスク判定の割合の相関係数を表 9 に示す。心拍数一致率と検出率との間に有意な相関が認められた。

表 9 心拍数一致率と通知割合の関係 (Heat Strain)

判定の割合	r	
正しい判定	-0.236	n.s.
検出	0.691	<.01
未検出	-0.289	n.s.
誤検出	-0.298	n.s.

F. 結論

hamon では、計測開始時の検討は必要であるものの心拍数は非常に高い精度で計測できていた。心拍数はすべての通知に関与しており、正確な計測ができていた高率群では、深部体温が閾値を超えた場合の暑熱リスク通知は 94.8%と極めて高い確率で検出された。各検出状態の割合をみると、深部体温を基準とした暑熱リスクについては、危険状態を放置してしまう未検出率が極めて低く(2.2%)、安全性が最優先とされる暑熱リスク検知システムとして高く評価できるといえる。深部体温だけではなく、心拍数やボルグスケールを含めた Heat Strain 状態の検出率も 70%を超えており、妥当な検出が可能であるといえる。Heat Strain 状態との関連では、誤検出率も低くなることが確認できた。

体調変化やストレスは検出できているとはいいい難い結果であった。また、条件 1-S01、条件 2-S06・S07 では眠気が通知されているが、本研究のような運動負荷実験においては適切な通知とはいえない。体調変化・眠気・ストレスの通知は、心拍情報の周波数解析を元に算出されている。RRI 周波数解析は、その周波数帯域により、交感神経活動と副交感神経活動を示すといわれており²⁾、近年、ストレス状態を判定するアプリに利用される傾向にある。これらの先行研究の多くは、デスクワークや仰臥位から起立への姿勢変化時³⁾の生理計測で検証された知見である。運動後の回復を検討した研究⁴⁾はあるが、本研究のような運動負荷時に適用できるかどうかは慎重に検討しなければならないと考える。

本報告で用いたようなアプリでは、生体計測から通知に至るまでの経緯がブラックボックス化されており、ユーザは判定基準やそのアルゴリズムを知ることができないケースが多い。また、ウェアラブルデバイスの場合、ユーザの装着により計測部位のズレや体動の影響を受けやすいため、計測ができない区間をなくすことは不可能である。ユーザや健康管理者に誤った情報が通知されるリスクも十分に考慮し、計測不可区間の通知方法なども検討する必要があると考える。

hamon の心拍数計測や暑熱リスクのためのアルゴリズムは妥当であると考えられ、計測位置や電極との密着などを改良し心拍数計測の精度を上げることで、検出率向上が十分に期待できる。また、暑熱リスク判定として、深部体温は未検出率、心拍数は誤検出率の減少に寄与する可能性があり、複数の生体量を用いた多角的なアルゴリズムを構築することで、更によりアプリになるものと考えられる。

G. 健康危険情報

なし

H. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

I. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

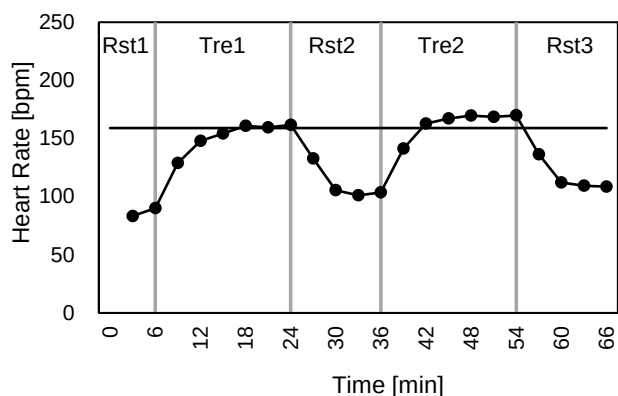
3. その他

なし

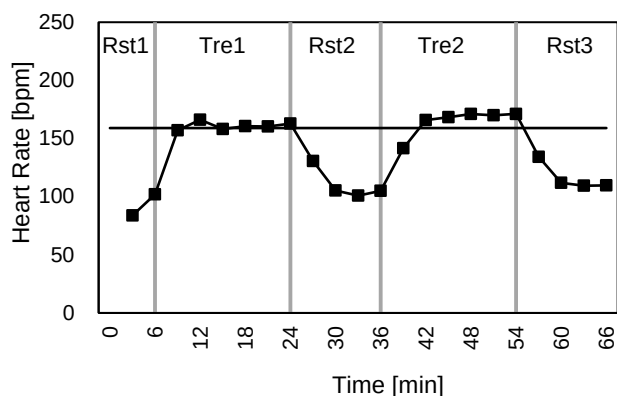
参考文献

- 1) ISO9886, Ergonomics — Evaluation of thermal strain by physiological measurements.
- 2) 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 —, European Heart J, 17, 354-381, 1996.
- 3) Pagani M. et al.: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. American Heart Association. 59(2), 178-193, 1986.
- 4) Castrillón C.I.M. et al., High-Intensity Intermittent Exercise and Autonomic Modulation: Effects of Different Volume Sessions, International Journal of Sports Medicine, 38(6), 468-472, 2016.

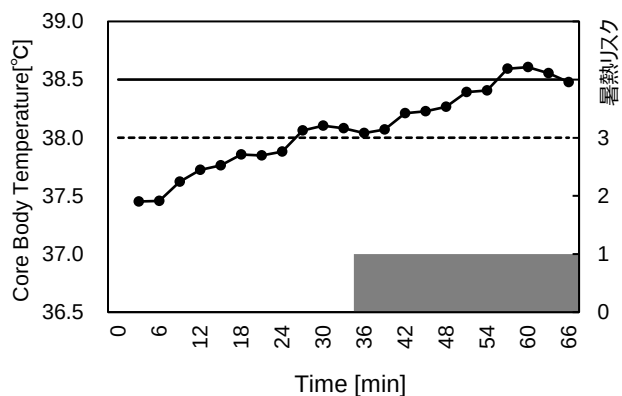
実験参加者 01: 室温 25℃, 湿度 50%, 21 歳



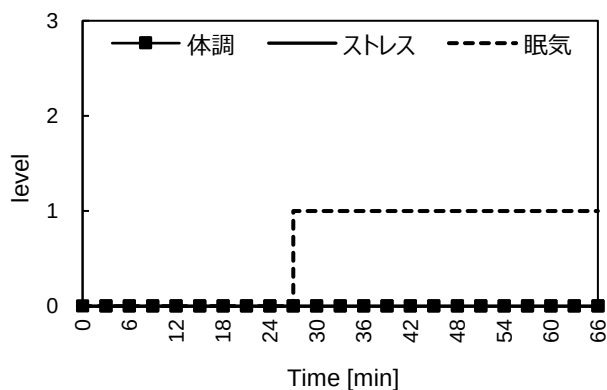
a. 心拍数(人工気候室)



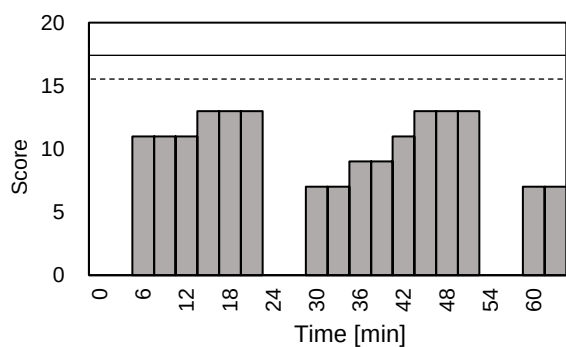
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



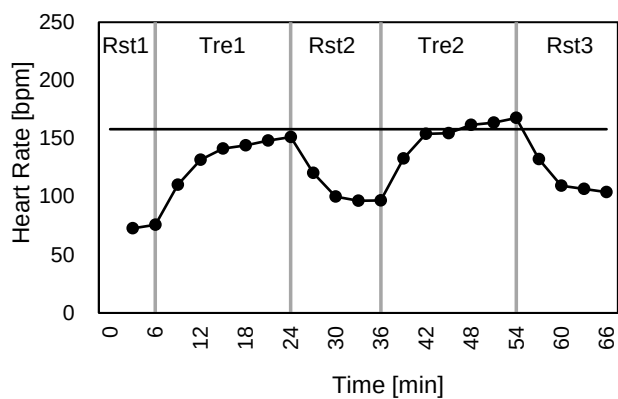
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



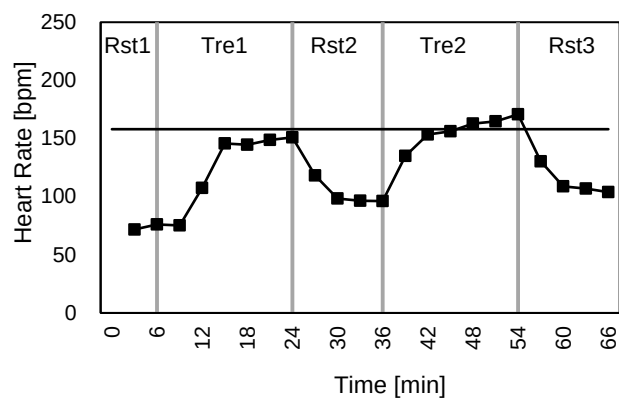
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 6 条件 1 における実験参加者 01 の測定データ

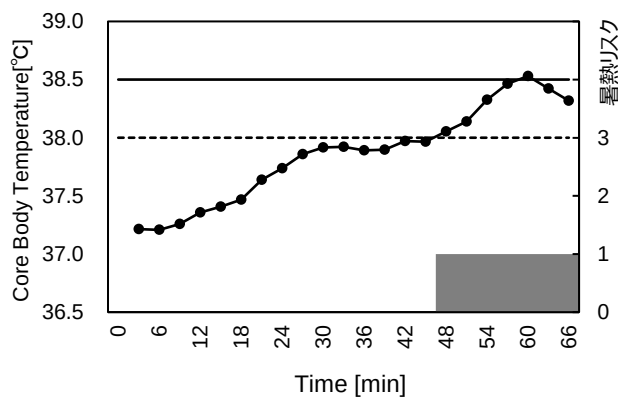
実験参加者 02: 室温 25℃, 湿度 50%, 22 歳



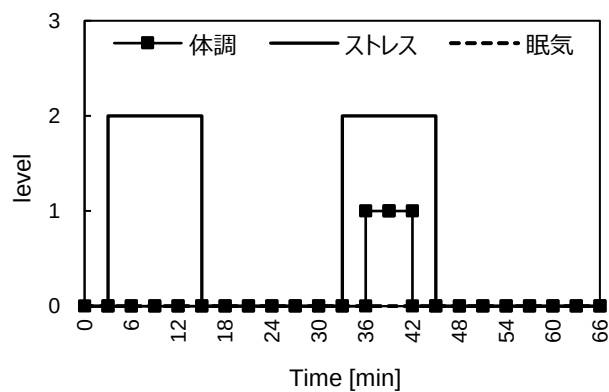
a. 心拍数(人工気候室)



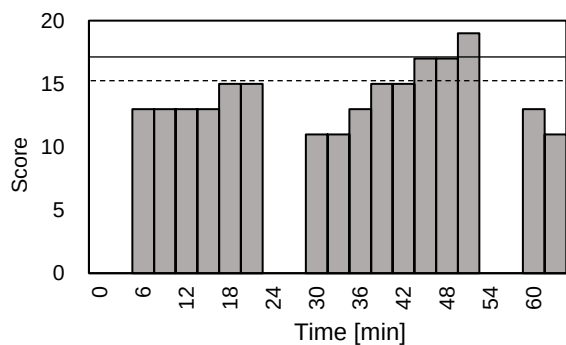
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



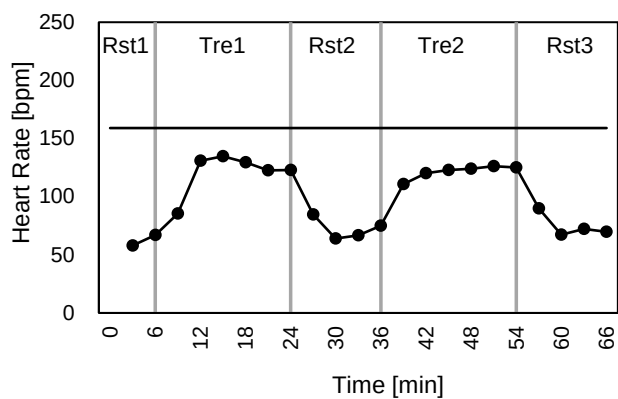
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



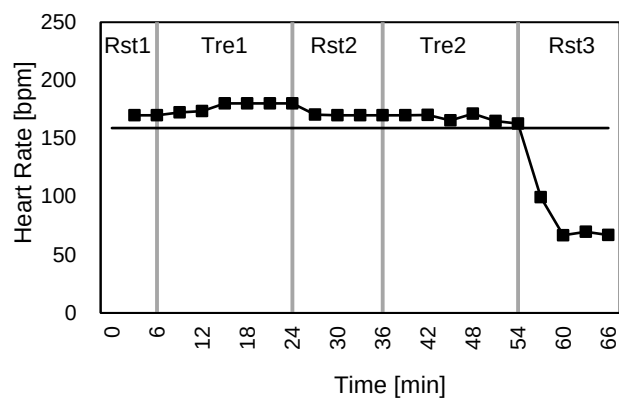
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 7 条件 1 における実験参加者 02 の測定データ

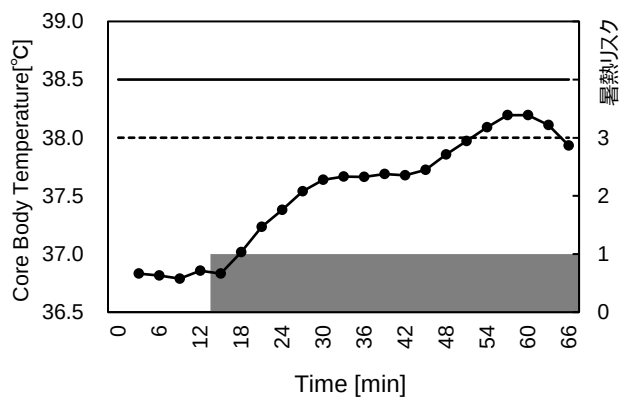
実験参加者 03: 室温 25℃, 湿度 50%, 21 歳



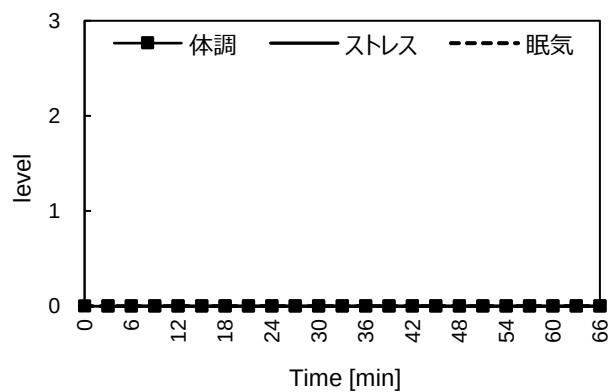
a. 心拍数(人工気候室)



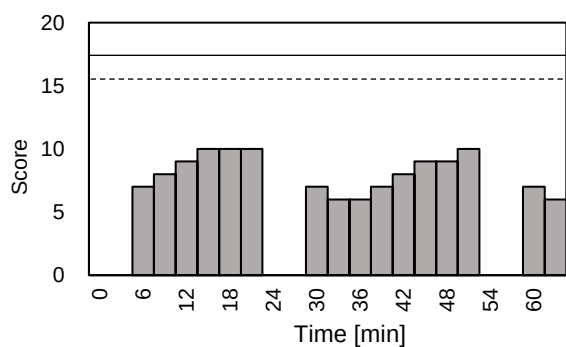
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



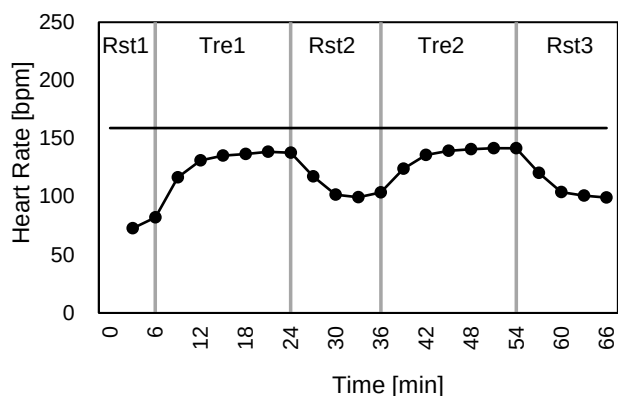
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



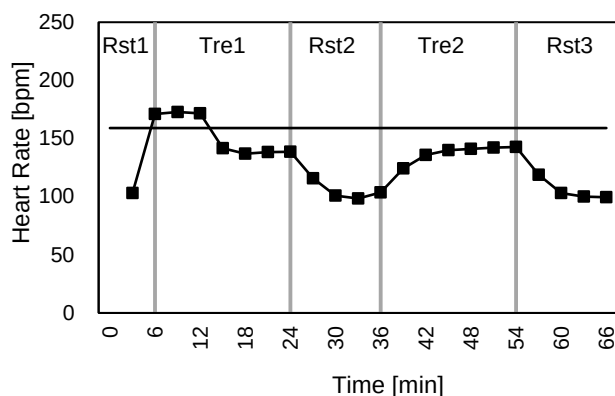
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 8 条件 1 における実験参加者 03 の測定データ

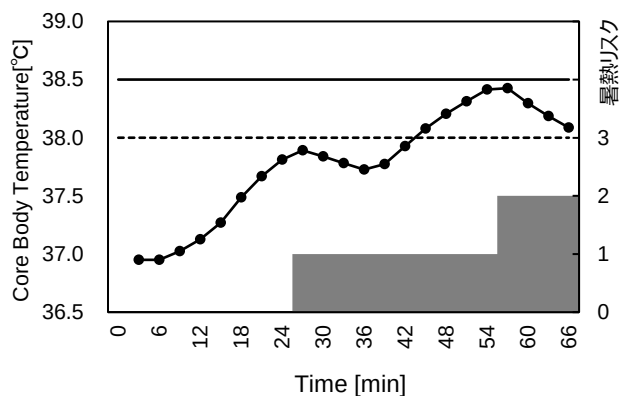
実験参加者 04: 室温 25℃, 湿度 50%, 21 歳



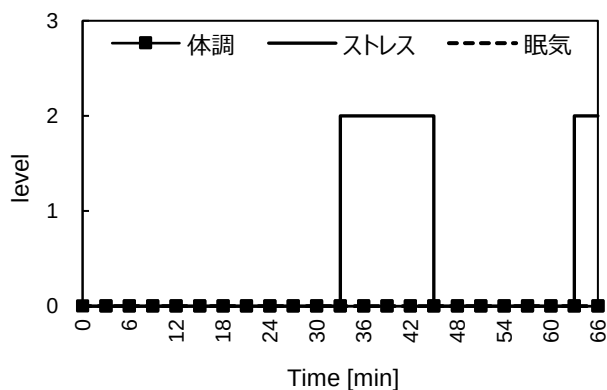
a. 心拍数(人工気候室)



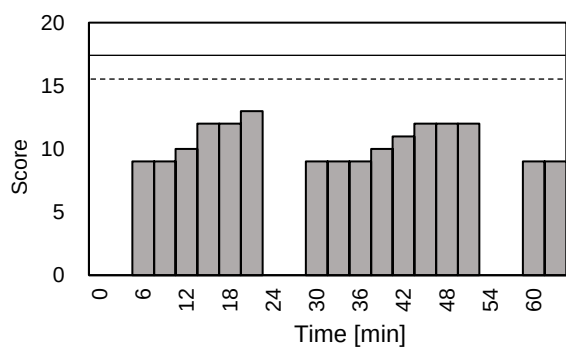
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



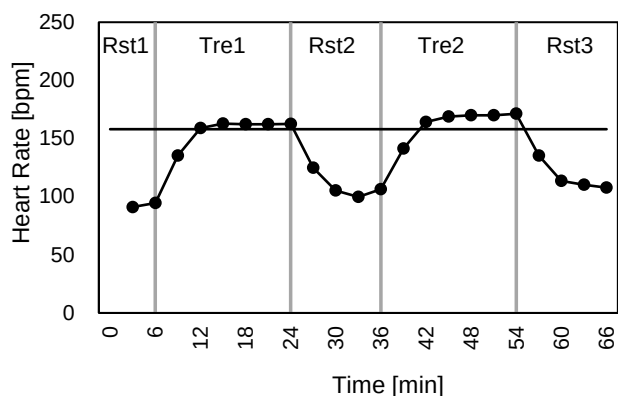
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



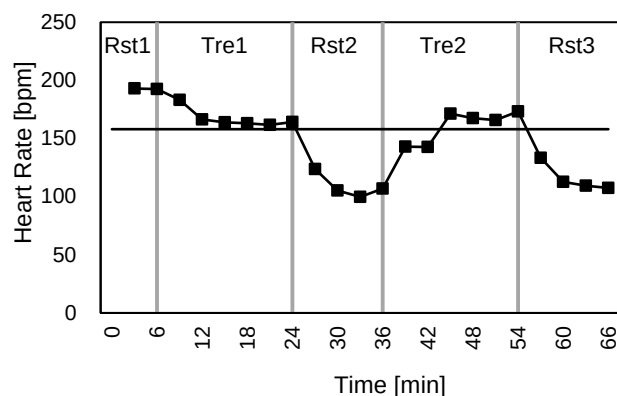
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 9 条件 1 における実験参加者 04 の測定データ

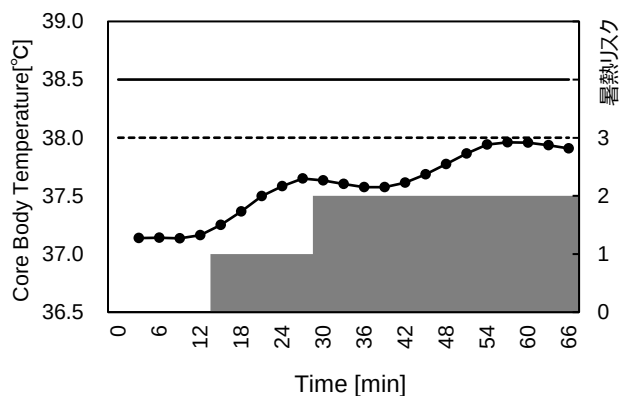
実験参加者 05: 室温 25℃, 湿度 50%, 22 歳



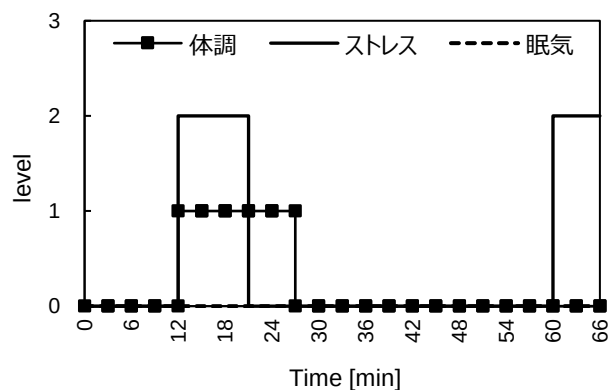
a. 心拍数(人工気候室)



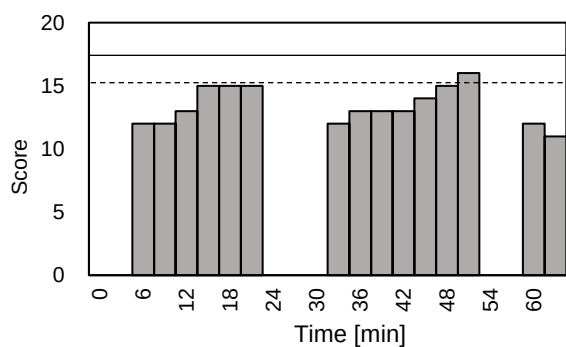
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



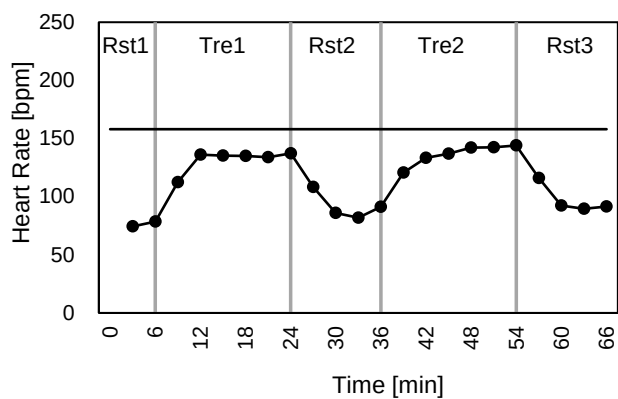
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



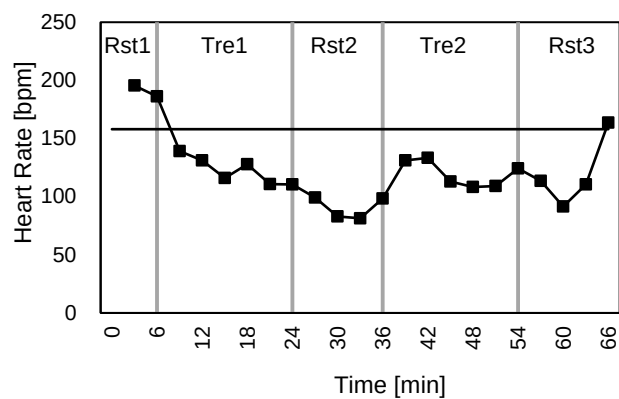
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 10 条件 1 における実験参加者 05 の測定データ

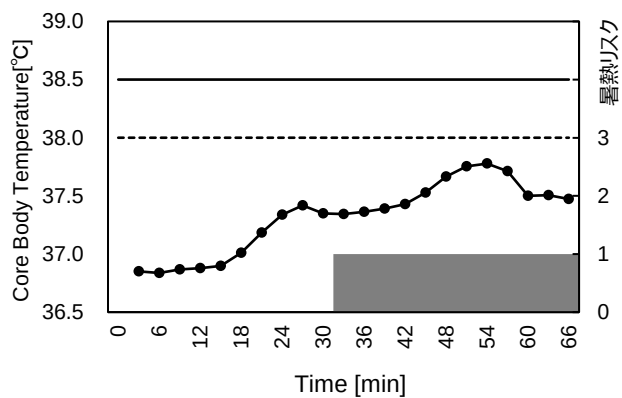
実験参加者 06: 室温 25℃, 湿度 50%, 22 歳



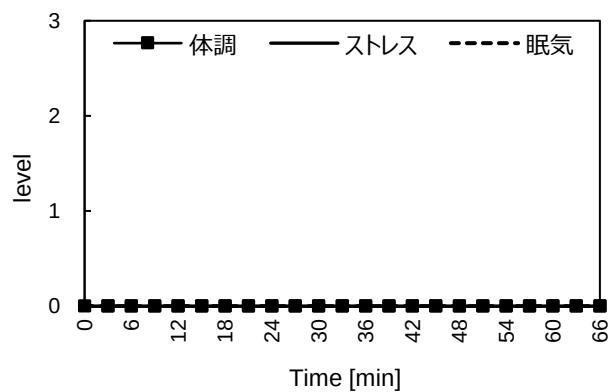
a. 心拍数(人工気候室)



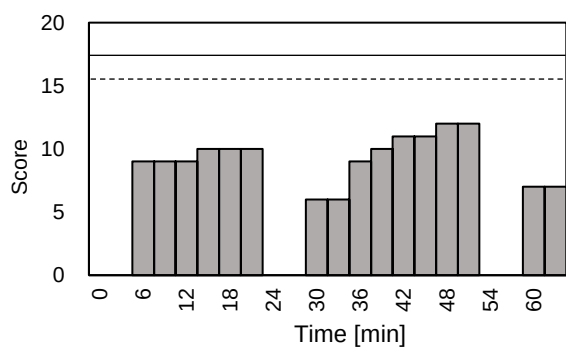
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



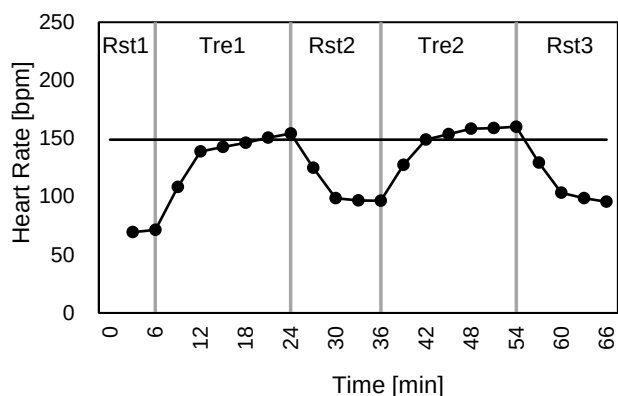
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



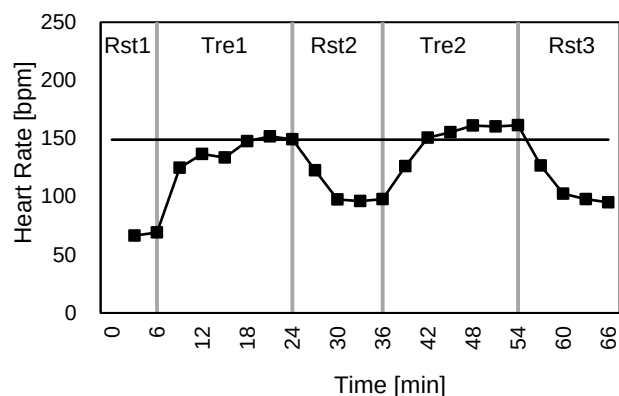
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 11 条件 1 における実験参加者 06 の測定データ

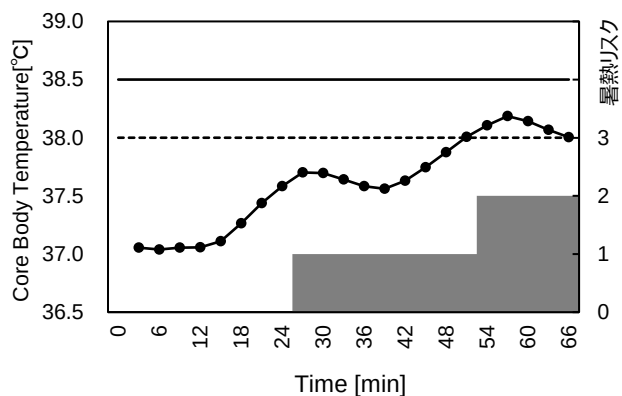
実験参加者 07: 室温 25℃, 湿度 50%, 31 歳



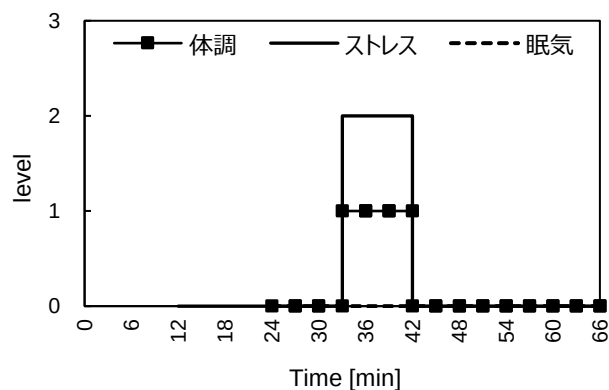
a. 心拍数(人工気候室)



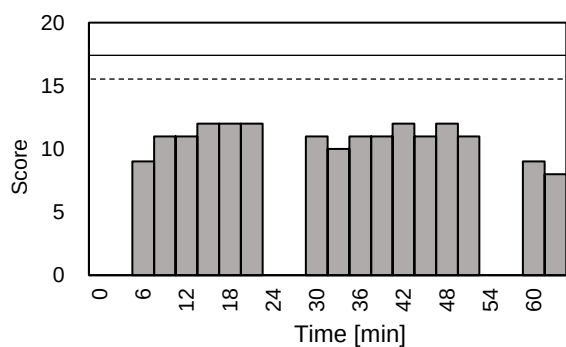
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



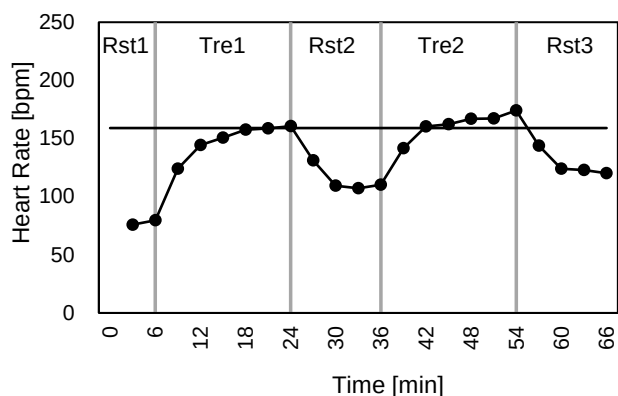
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



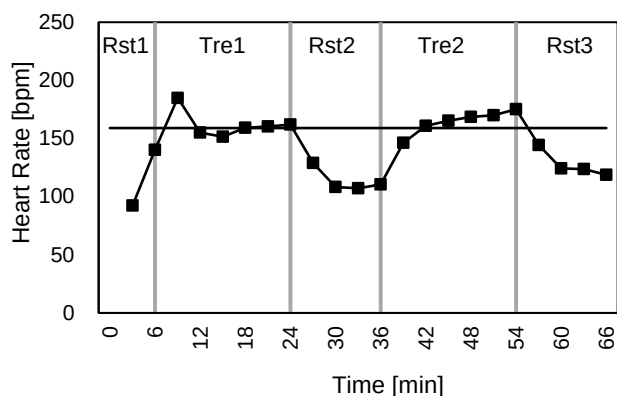
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 12 条件 1 における実験参加者 07 の測定データ

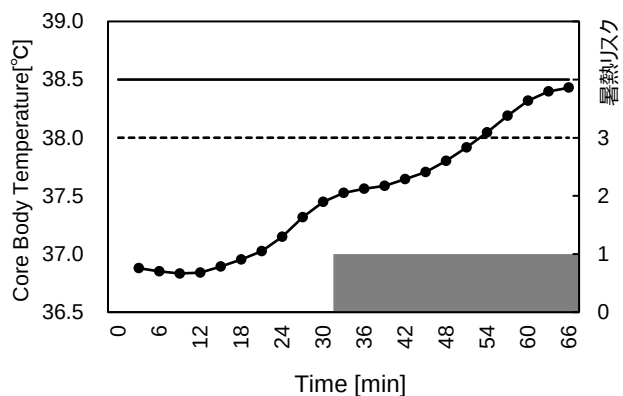
実験参加者 01: 室温 35℃, 湿度 50%, 21 歳



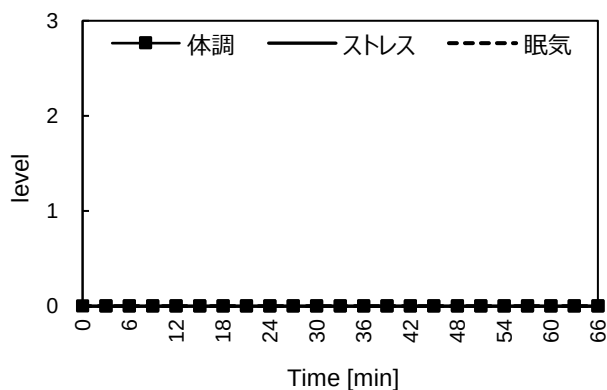
a. 心拍数(人工気候室)



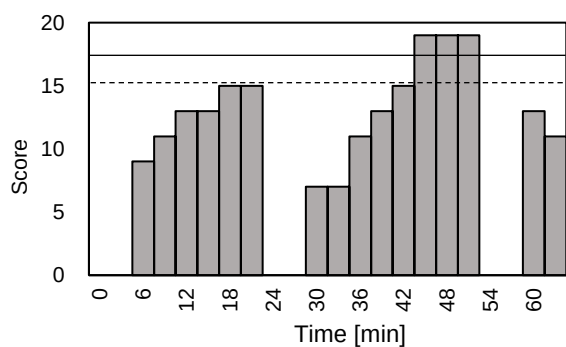
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



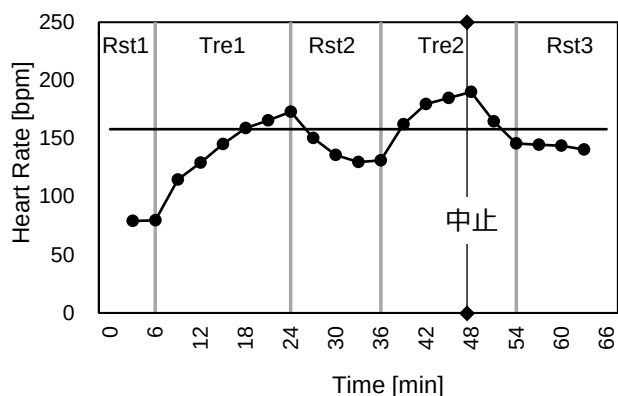
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



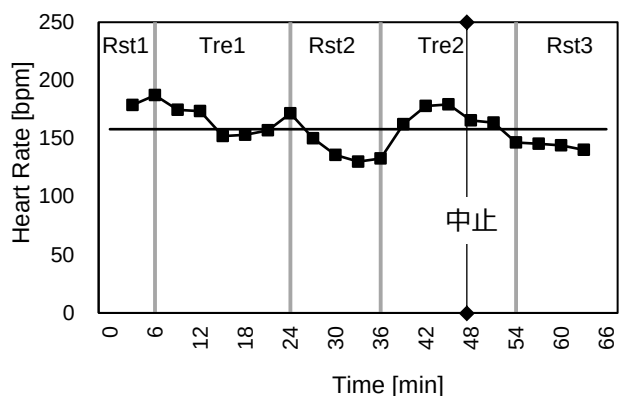
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 13 条件 2 における実験参加者 01 の測定データ

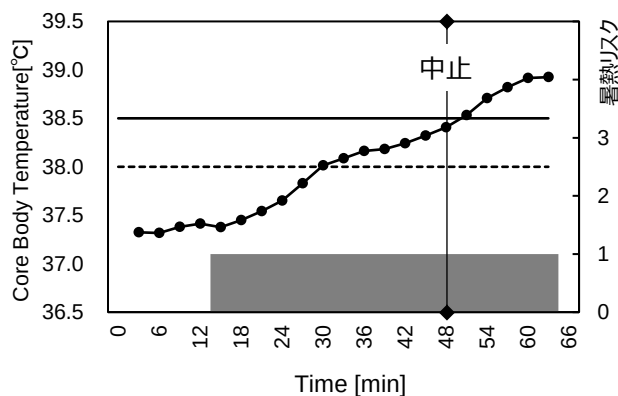
実験参加者 02: 室温 35℃, 湿度 50%, 22 歳



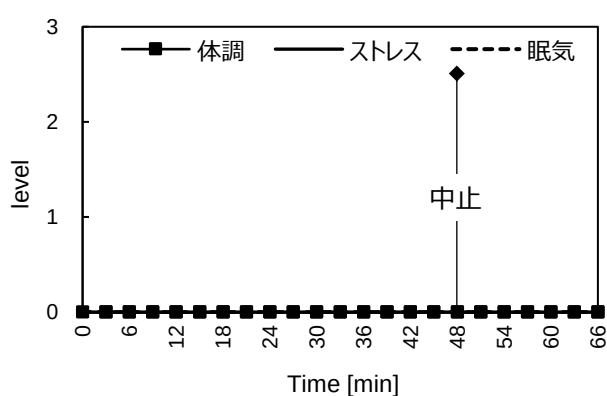
a. 心拍数(人工気候室)



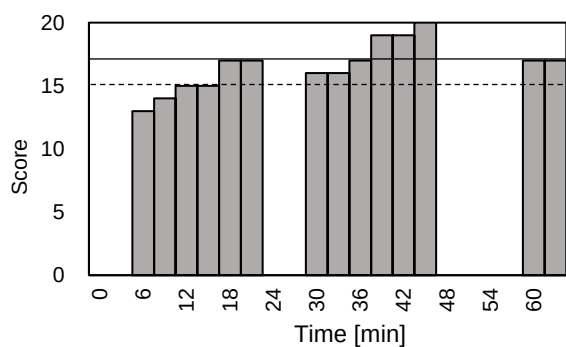
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



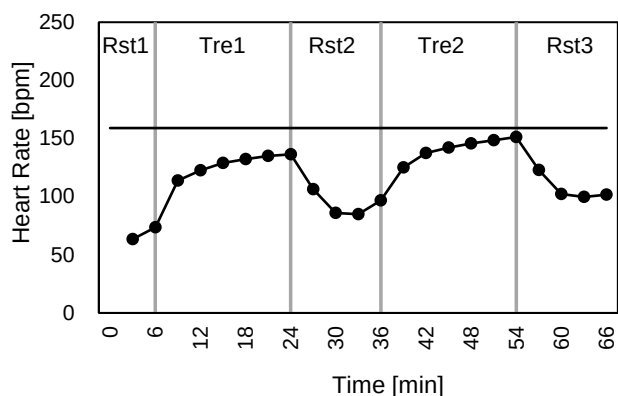
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



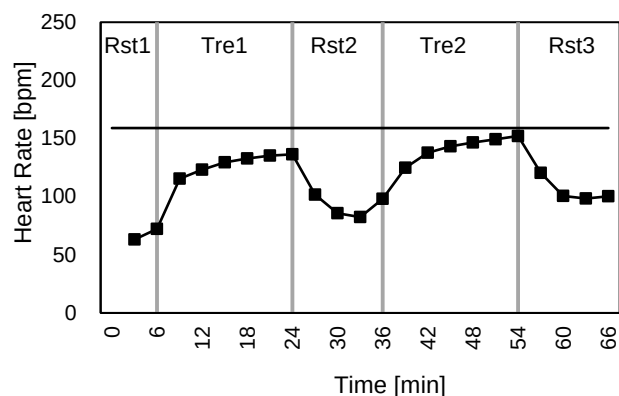
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 14 条件 2 における実験参加者 02 の測定データ

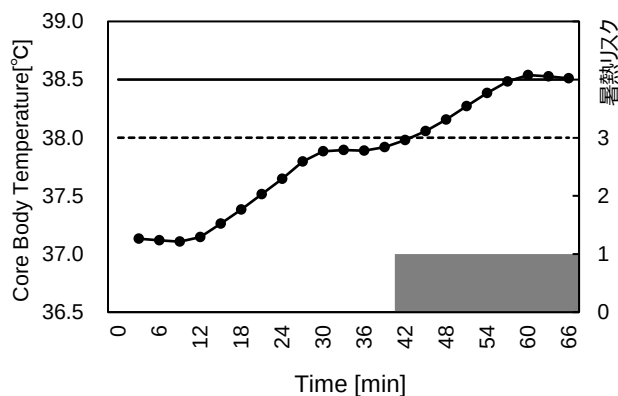
実験参加者 03: 室温 35℃, 湿度 50%, 21 歳



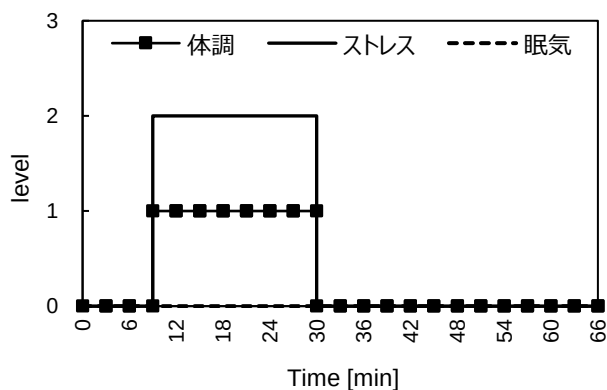
a. 心拍数(人工気候室)



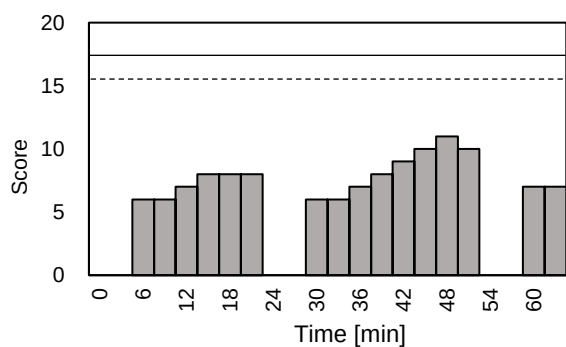
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



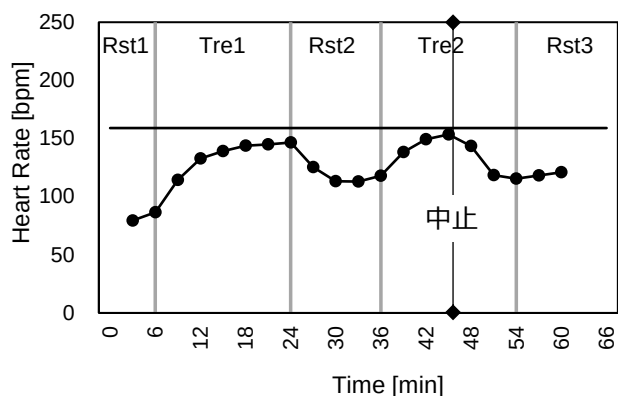
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



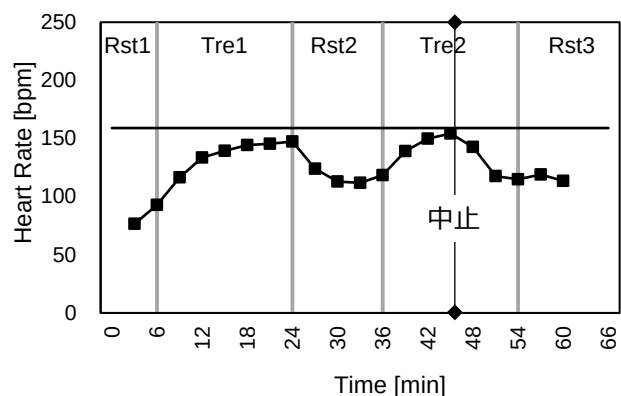
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 15 条件 2 における実験参加者 03 の測定データ

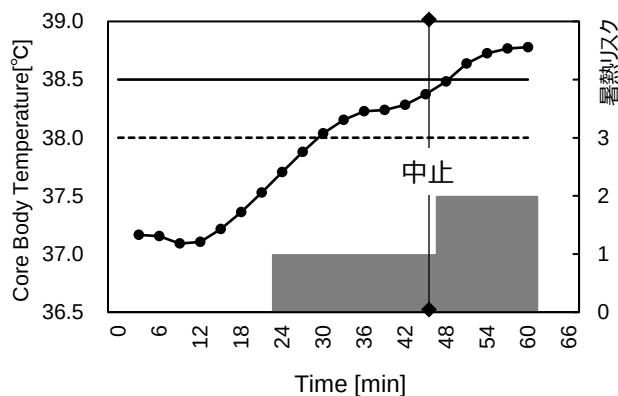
実験参加者 04: 室温 35℃, 湿度 50%, 21 歳



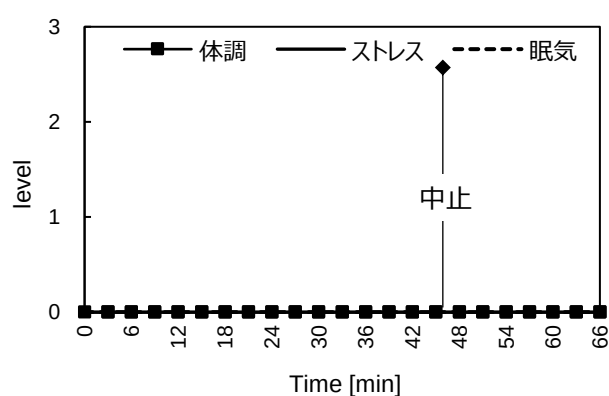
a. 心拍数(人工気候室)



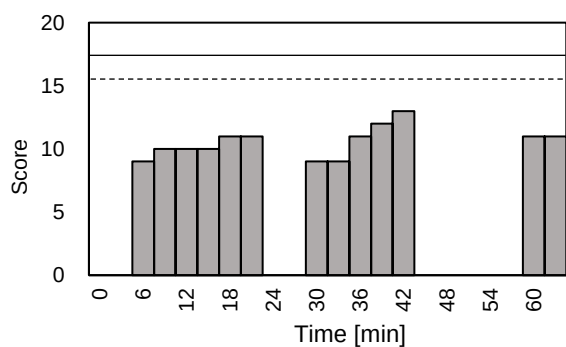
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



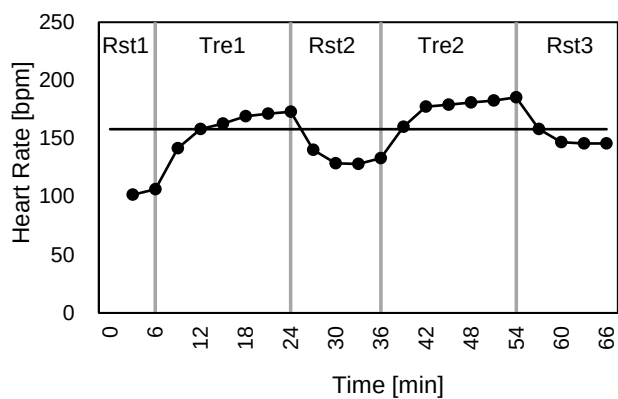
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



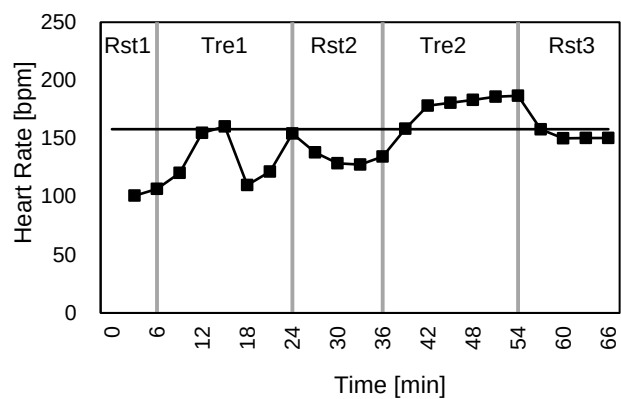
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 16 条件 2 における実験参加者 04 の測定データ

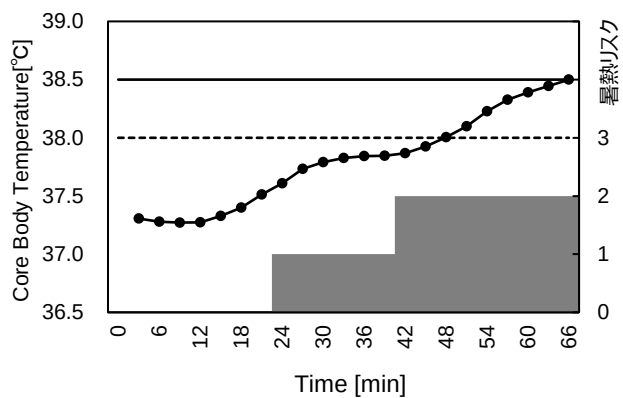
実験参加者 05: 室温 35℃, 湿度 50%, 22 歳



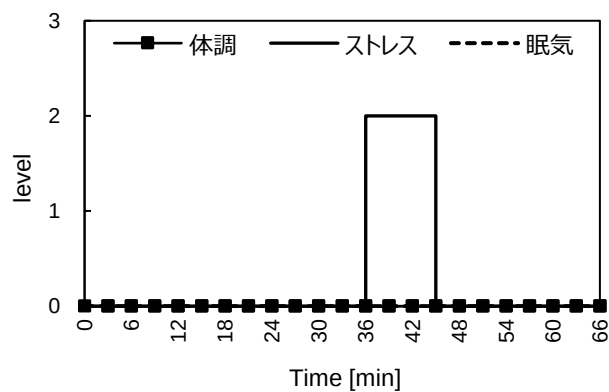
a. 心拍数(人工気候室)



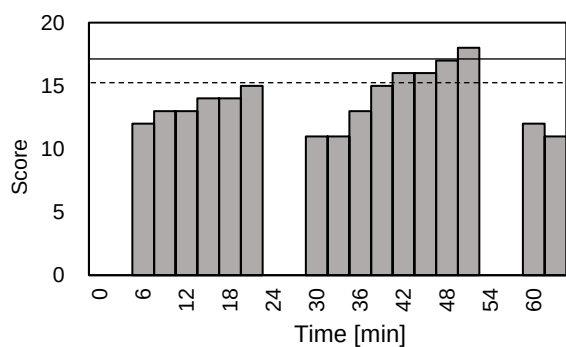
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



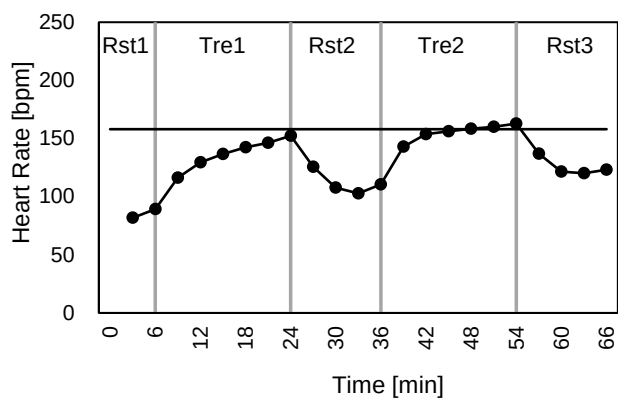
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



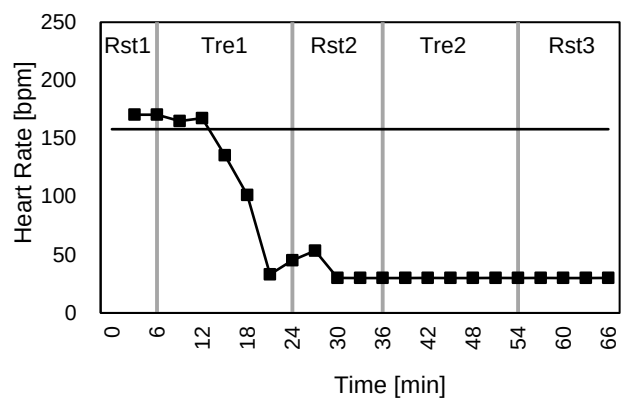
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 17 条件 2 における実験参加者 05 の測定データ

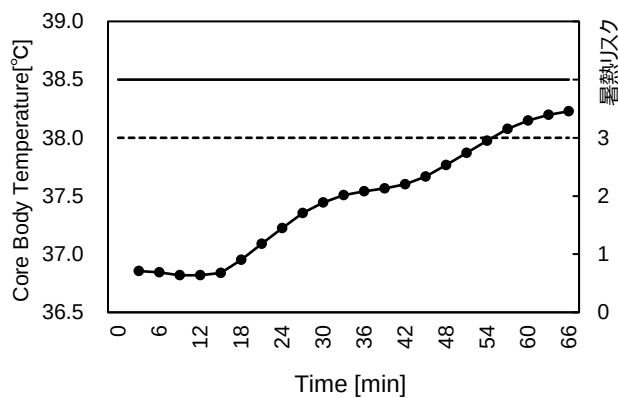
実験参加者 06: 室温 35℃, 湿度 50%, 22 歳



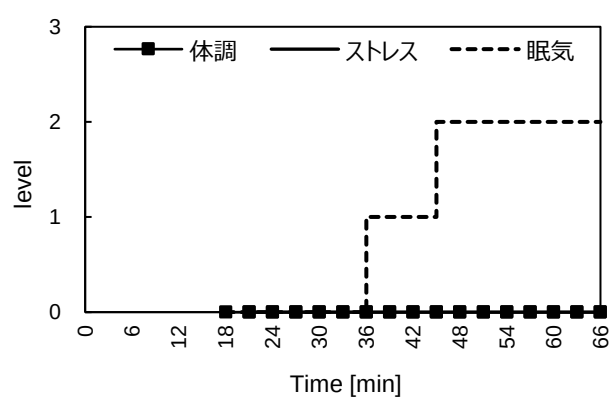
a. 心拍数(人工気候室)



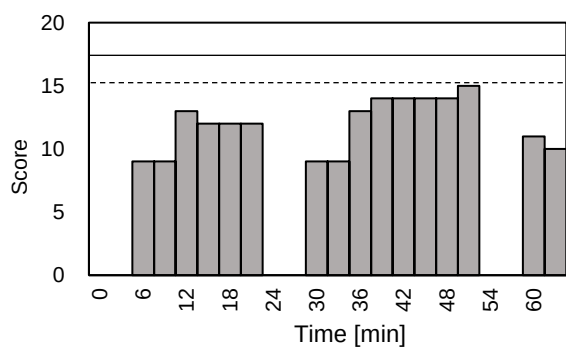
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



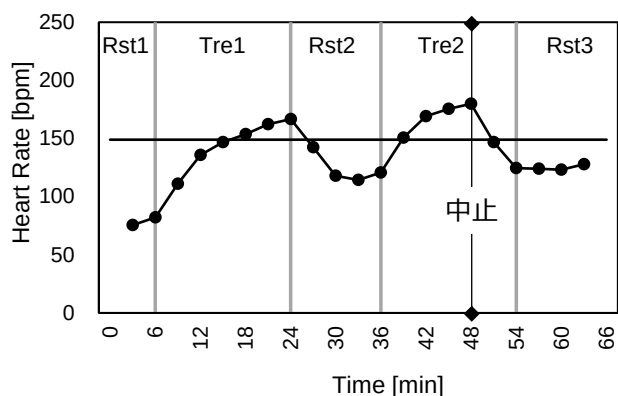
d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



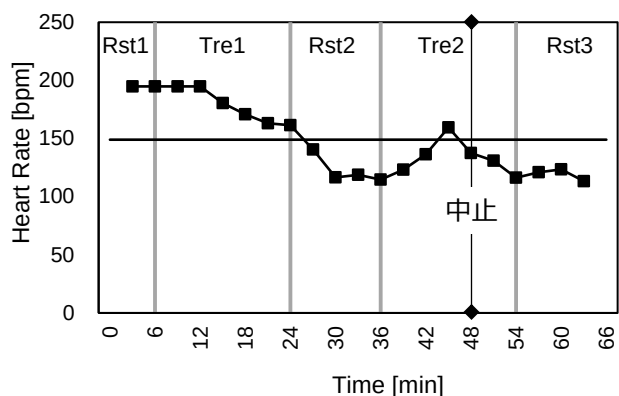
e. ボルグスケール(人工気候室)

図 18 条件 2 における実験参加者 06 の測定データ

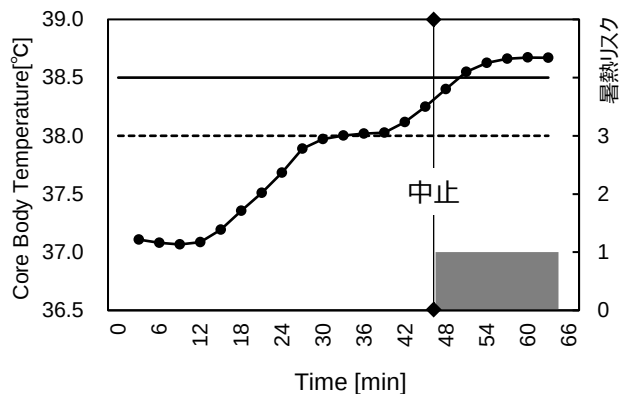
実験参加者 07: 室温 35℃, 湿度 50%, 31 歳



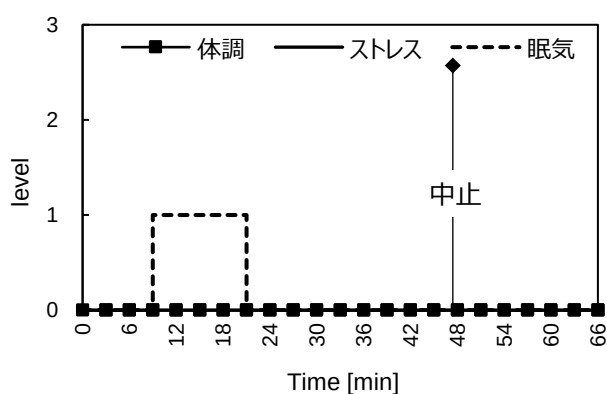
a. 心拍数(人工気候室)



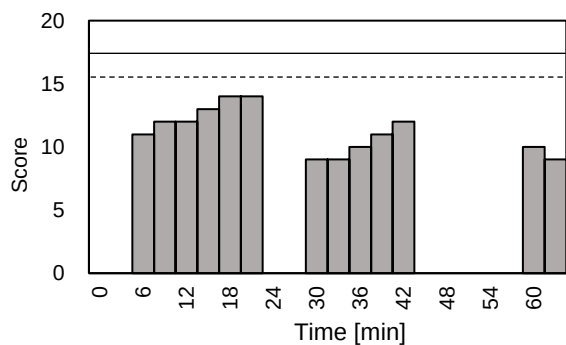
b. 心拍数(ウェアラブルデバイス)



c. 深部体温(人工気候室)と暑熱リスク



d. ウェアラブルデバイスの各種アラート



e. ボルグスケール(人工気候室)

図 19 条件 2 における実験参加者 07 の測定データ

腕時計型ウェアラブルセンサーによる熱中症予防（現場実証）

分担研究者： 八谷 百合子 産業医科大学 産業保健学部 産業・地域看護学 准教授

研究要旨：

熱中症は暑熱環境下で働く労働者に生命の危機をおよぼすこともある病態であり、労働災害防止の観点からも、予防すべき重要な課題の一つである。これまで、補水や休憩などの労働衛生管理や労働衛生教育による予防法の啓蒙等が行われてきているが、死亡災害も後を絶たない状況である。

近年、心拍や体動などの生体情報をセンシングしインターネットを通じ、そのデータを活用するIoT技術が多く開発されており、暑熱環境下の身体状況を評価し熱中症予防に利用できる可能性も示唆されている。一部の企業ではこのIoT技術を用いて熱中症対策を行っていることも知られているが、その効果は十分に検証されていない。

2019（令和元）年度、我々は産業医科大学人工気候室において、暑熱環境下での運動負荷試験を行い、熱中症対策に有効と考えられるIoT技術を用いた「腕時計型ウェアラブルセンサーによる暑熱環境下での身体負荷推測」を行った。アメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）が示すHeat Strain（熱緊張）状態の指標となる深部体温、心拍数、自覚症状を示すボルグスケールなどのデータと腕時計型ウェアラブルセンサーによりモニターする身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベル、熱ストレスレベルとの相関を検証した。その結果、腕時計型ウェアラブルセンサーは、Heat Strain状態をとらえており、効果的な熱中症対策の機器と推察された。

本年度2020（令和2）年度、我々は実際の労働現場において、2019年度に人工気候室で検証した腕時計型ウェアラブルセンサーを使い、研究協力会社（A社・B社）の協力のもと暑熱環境下での現場実証を行った。実験は、A社の成人健康男性7名（74.0±4.3歳）とB社の成人健康男性7名（36.3±6.5歳）の合計14名の被験者に各社の作業現場において7日間、腕時計型ウェアラブルセンサーを装着し普段の作業を行った。測定項目は、熱中症計によるWBGT（℃）、Heat Strain状態を推測する1つの指標として自覚症状を示す問診票による疲労度・温熱感覚・熱性適性、腕時計型ウェアラブルセンサーによるパルス数及び温度・湿度と作業時間の計測から出力した身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベルであった。WBGT及び問診票から熱中症高リスク状態を判断し、腕時計型ウェアラブルセンサーによる異常検出閾値の結果と比較検討した。

その結果、A社は合計49回（被験者7名×7日間）中、WBGT（℃）及び問診票の結果から熱中症高リスク状態だったのは11回（対合計、22.4%）であった。この熱中症高リスク状態だった11回中、腕時計型ウェアラブルセンサーが身体負荷アラームなどを検出するための検出レベル以上と判定したのは、4回（対熱中症高リスク状態、36.4%）であり、熱中症高リスク状態ではなかった38回中、検出レベル以下と判定したのは、36回（対非熱中症高リスク状態、94.7%）であった。同様にB社は熱中症高リスク状態だったのは34回（対合計、69.4%）であった。この熱中症高リスク状態だった34回中、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、27回（対熱中症高リスク状態、79.4%）であり、熱中症高リスク状態ではなかった15回中、検出レベル以下と判定したのは、8回（対非熱中症高リスク状態、53.3%）であった。腕時計型ウェアラブルセンサーは、熱中症高リスク状態をとらえており、作業現場においても効果的な熱中症対策の機器と推察された。今回用いた腕時計型ウェアラブルセンサーは、実際の作業現場においても熱中症リスクの予測や予防対策の機器として有効であるとの見解を得た。今後、実際の労働現場で広く活用されることが期待される

分担研究者

丸山崇（産業医科大学医学部第1生理学）

倉岡宏之（産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学）

江口泰正（産業医科大学産業保健学部人間情報科学）

山田晋平（産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学）

黒坂知絵（産業医科大学産業保健学部人間情報科学）

上田陽一（産業医科大学医学部第1生理学）

東敏昭（一般財団法人西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授）

研究協力者

山本忍（産業医科大学産業保健学部作業環境計測制御学）

A. 研究目的

熱中症は暑熱環境下で働く労働者に生命の危機をおよぼすこともある病態であり、労働災害防止の観点からも、予防すべき重要な課題の一つである。これまで、作業現場では水や休憩などの労働衛生管理や労働衛生教育による予防法の啓蒙等が行われてきているが、死亡災害も後を絶たない状況である。

近年、心拍や体動などの生体情報をセンシングしインターネットを通じ、そのデータを活用するIoT技術が多く開発されており、暑熱環境下の身体状況を評価し熱中症予防に利用できる可能性も示唆されている。一部の企業ではこのIoT技術を用いて熱中症対策を行っていることも知られているが、その効果は十分に検証されていない。

当研究課題では、2018（平成30）年度に、「①労働現場における熱中症対策の実践及び先進事例の調査」を行い、効果的な熱中症対策の抽出とIoT技術などを用いた先進的な熱中症予防対策の検索を行った。この調査により、企業における熱中症対策の現状が把握出来るとともに、IoT技術を用いた熱中症対策に取り組む事業所が、10事例抽出できた。また、

これらの企業のヒアリング調査によって、IoT機器導入の効果や課題なども把握出来た。

そこで、2019（令和元）年度は、産業医科大学人工気候室において、被験者の協力のもと、暑熱環境下での運動負荷試験を行い熱中症対策に有効と考えられるIoT技術を用いて「腕時計型ウェアラブルセンサーによる暑熱環境下での身体負荷推測」を行った。人工気候室で測定したアメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）が示すHeat Strain（熱緊張）状態の指標となる深部体温、心拍数、自覚症状を示すボルグスケールなどのデータと腕時計型ウェアラブルセンサーによりモニターする身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベル、熱ストレスレベルとの相関を検証し、腕時計型ウェアラブルセンサーの有効性や得られるデータからの熱中症リスクの推定の可能性を検討した。

その結果、合計44回（（被験者12名×環境条件2パターン×運動負荷2回）－中止4回）中、人工気候室内で測定した深部体温などの結果からHeat Strain（熱緊張）状態だったのは32回（対合計、72.7%）であった。このHeat Strain（熱緊張）状態だった32回中、腕時計型ウェアラブルセンサーが身体負荷アラームなどを検出するための検出レベル以上と判定したのは、24回（対Heat Strain（熱緊張）状態、75.0%）であり、腕時計型ウェアラブルセンサーは、Heat Strain（熱緊張）状態をとらえており、効果的な熱中症対策の機器と推察された。人工気候室での暑熱環境下運動負荷実験において、腕時計型ウェアラブルセンサーが熱中症リスクの予測や予防対策の機器として推定可能であるとの見解を得た。

そこで、本年2020年度我々は、実際の労働現場において、2019（令和元）年度に人工気候室で検証した腕時計型ウェアラブルセンサーが熱中症リスクの

予測や予防対策の機器として有効であるか検討した。腕時計型ウェアラブルセンサーが熱中症リスクの予測や予防対策の機器として推定可能であるか現場実証を行い、効果的な熱中症対策を明らかにし、多くの労働現場に展開することで熱中症による労働災害を防止することが本研究課題の目的である。

B. 研究方法

a. 暑熱環境における現場実証実験

研究協力会社2社（A社・B社）において現場実証実験を行った。研究協力会社別職場環境を表1に、被験者情報を表2に、測定項目を表3に、A社・B社の実験スケジュールを図1と図2に、A社・B社の問診票の閾値の区分を表4と表5に示す。

研究協力会社2社とも被験者は健康成人男性とした。A社の被験者は、8:00～17:30まで屋外駐車場の見回りをする労働者である。B社の被験者は、昼勤と夜勤の2交替勤務で電子材料の製造を行う労働者である（表1）。被験者の協力のもと暑熱環境下での現場実証を行った。

A社の被験者は、成人健康男性7名（平均年齢74.0±4.3歳、被験者記号：A-001～A-007）、各被験者とも昼勤（8:00～17:30）の勤務中に連続して7日間、延べ49回測定した（表2）。

B社の被験者は、成人健康男性7名（平均年齢36.3±6.5歳、被験者記号：B-001～B-007）、各被験者とも昼勤（勤務時間は8:30～17:30であるが超過勤務を実施した時を考慮し、昼勤は8:30～20:30と表現する）もしくは夜勤（勤務時間は20:30～5:30であるが超過勤務を実施した時を考慮し、夜勤は20:30～8:30と表現する）の勤務の内7日間、延べ49回測定した（表2）。

被験者合計14名に協力を頂き、各社の作業現場において、各被験者が7日間、腕時計型ウェアラブルセンサーを装着し、普段の作業を行った。

測定項目を表3に示す。熱中症計によるWBGT(℃)、

問診票による疲労度¹⁾・温熱感覚^{2,3)}・熱性適性⁴⁾（ポイント）、「腕時計型ウェアラブルセンサー」により、パルス数（脈波）、温度・湿度と作業時間の計測による身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベル（ポイント）を測定した。WBGTが高いかもしくは、問診票の閾値以上の場合を熱中症高リスク状態とし、腕時計型ウェアラブルセンサーの結果と比較検討した（表3）。

熱中症計は、カスタム株式会社の「データロガー熱中症指数計、型番：HI-2000SD」を使用し、WBGT(℃)を持続測定した。

問診票については、A社の被験者は、8:00～17:30まで1時間ごとに、疲労度・温熱感覚・熱性適性を全長14.0cmのアナログスケールに印を入れて記入した。B社の被験者は、昼勤は8:30～20:30まで1時間ごと、夜勤は20:30～8:30まで1時間ごとに疲労度・温熱感覚・熱性適性を全長14.5cmのアナログスケールに印を入れて記入した。

A社の被験者は、昼勤（8:00～17:30）の勤務中、腕時計型ウェアラブルセンサーを装着し、連続して身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベルを持続測定した（図1）。

B社の被験者は、昼勤（8:30～20:30）もしくは夜勤（20:30～8:30）の勤務中、腕時計型ウェアラブルセンサーを装着し、連続して身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベルを持続測定した（図2）。

表 1 研究協力会社別職場環境

会社の 記号	事業内容	作業場の 屋内外 区分	熱源近くで の作業の 有無	交代制勤務の 有無	実験期間
A	駐車場の見回り	屋外	無	無	9月28日～ 10月25日
B	電子材料の製造	屋内	有	有	12月8日～ 12月20日

表 2 被験者情報

会社の 記号	被験者数 (名)	被験者の平均年齢	各被験者の 調査期 間 (日)	合計実験 回数 (回)
A	7	74.0±4.3歳[65-79歳]	7	49
B	7	36.3±6.5歳[22-43歳]	7	49

表 3 測定項目

測定機器等の 種類	測定項目	単位
熱中症計	WBGT	℃
問診票	疲労度	ポイント
	温熱感覚	ポイント
	熱性適性	ポイント
腕時計型ウェアラブルセンサー	身体（カラダ）熱環境レベル	ポイント
	身体負荷レベル	ポイント
	熱ストレスレベル	ポイント

測定機器等の種類	測定項目	測定内容	月曜 日	火曜 日	水曜 日	木曜 日	金曜 日	土曜 日	日曜 日
熱中症計	WBGT (屋外・屋内)	毎日8:00~17:30まで、熱中症指標計が自動的に測定し、SDカードに記録	○	○	○	○	○	○	○
問診票	疲労度 温熱感覚 熱性適性	毎日、8:00~17:30まで、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）の3種類	○	○	○	○	○	○	○
腕時計型ウェアラブルセンサー	身体（カラダ）熱環境レベル 身体負荷レベル 熱ストレスレベル	毎日、8:00~17:30まで、腕時計型ウェアラブルセンサーを手に装着し、専用スマートフォンを携帯	○	○	○	○	○	○	○

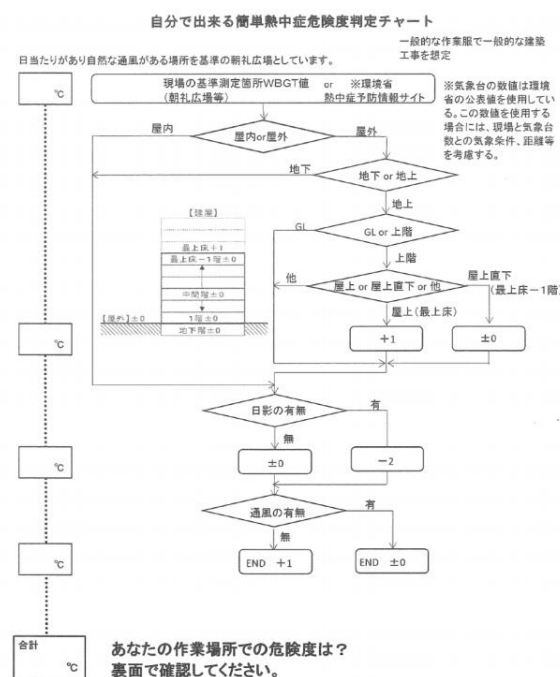
図 1 A 社の実験スケジュール

測定機器等の種類	測定項目	測定内容	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目
熱中症計	WBGT (屋内)	昼間は8:30~20:30まで、夜間は20:30~8:30まで、熱中症指標計が自動的に測定し、SDカードに記録	○	○	○	○	○	○	○
問診票	疲労度 温熱感覚 熱性適性	昼間は8:30~20:30まで、夜間は20:30~8:30まで、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）の3種類	○	○	○	○	○	○	○
腕時計型ウェアラブルセンサー	身体（カラダ）熱環境レベル 身体負荷レベル 熱ストレスレベル	昼間は8:30~20:30まで、夜間は20:30~8:30まで、腕時計型ウェアラブルセンサーを手に装着し、専用スマートフォンを携帯	○	○	○	○	○	○	○

図 2 B 社の実験スケジュール

腕時計型ウェアラブルセンサーと比較する暑さ指数（WBGT）は、労働環境や運動環境の指標として有効であると認められ、ISO等で国際的に規格化されている。（公財）日本スポーツ協会では「熱中症予防運動指針」、日本生気象学会では「日常生活に関する指針」を公表しており、加えて環境省の「自分で出来る簡単熱中症危険度判定チャート」（図3）により、作業環境を考慮した基準値が示されている。労働環境では世界的にはISO7243、国内ではJIS Z 8504 「WBGT（湿球黒球温度）指数に基づく作業者の熱ストレスの評価－暑熱環境」として規格化されている。

本実験は、図3よりA社については、WBGTによる熱中症高リスク状態に該当したと判断した基準は、28.0℃が2時間以上経過、B社は27℃が2時間以上経過とした。また、表4と表5より問診票による熱中症高リスク状態に該当したと判断した基準は、A社・B社とも疲労度 ≥ 0.68 、温熱感覚 ≥ 0.89 、熱性適性 ≥ 0.75 とした。



・本チャートは、簡易的に当日の作業箇所における、熱中症発症に対する危険性を確認するためのもので、作業の安全を保障するものではありません。
・作業時間により日影が変化する場所がある場合には再度チャートで計算してください。
・コンクリート打設後の養生熱が発生する場合には、その点も考慮してください。

図 3 「自分で出来る簡単熱中症危険度判定チャート」（環境省ホームページより）

表 4 A 社の問診票の閾値の区分

問診票の種類	項目	全長14cmの線上に付与した主な言葉			熱中症高リスク状態とした閾値
疲労度	付与した言葉	楽である	ややきつい	きつい	きつい
	実測値(cm)	5.5	7.5	9.5	9.5
	割合(実測値/全長)	0.39	0.54	0.68	0.68
温熱感覚	付与した言葉	普通	やや暖かい	暑い	暑い
	実測値(cm)	7.5	9.0	12.5	12.5
	割合(実測値/全長)	0.54	0.64	0.89	0.89
熱性適性	付与した言葉	とても不快	不快	快適	
	実測値(cm)	3.5	7.0	14.0	
	割合(実測値/全長)	0.25	0.50	1.00	
	付与した言葉	とても不快	不快	快適	とても不快
	全長－実測値(cm)*	10.5	7.0	0.0	10.5
	割合((全長－実測値)/全長)**	0.75	0.50	0.00	0.75

*付与した言葉の意味から、閾値は、全長－実測値とした。

**付与した言葉の意味から、閾値の割合は、(全長－実測値)/全長とした。

表 5 B 社の問診票の閾値の区分

問診票の種類	項目	全長14.5cmの線上に付与した主な言葉			熱中症高リスク状態とした閾値
疲労度	付与した言葉	楽である	ややきつい	きつい	きつい
	実測値(cm)	5.7	7.8	9.8	9.8
	割合(実測値/全長)	0.39	0.54	0.68	0.68
温熱感覚	付与した言葉	普通	やや暖かい	暑い	暑い
	実測値(cm)	7.8	9.3	12.9	12.9
	割合(実測値/全長)	0.54	0.64	0.89	0.89
熱性適性	付与した言葉	とても不快	不快	快適	
	実測値(cm)	3.6	7.3	14.5	
	割合(実測値/全長)	0.25	0.50	1.00	
	付与した言葉	とても不快	不快	快適	とても不快
	全長－実測値(cm)*	10.9	7.3	0.0	10.9
	割合((全長－実測値)/全長)**	0.75	0.50	0.00	0.75

*付与した言葉の意味から、閾値は、全長－実測値とした。

**付与した言葉の意味から、閾値の割合は、(全長－実測値)/全長とした。

C. 腕時計型ウェアラブルセンサー

a. 製品名（商品名）

COLMINA 安全管理支援

(FUJITSU Manufacturing Industry Solution

COLMINA 安全管理支援)

b. 製造元（開発元）

富士通株式会社、〒108-0075 東京都港区港南 1-

2-70

c. 製品概要

[COLMINA 安全管理支援とは]

バイタルセンシングバンドを装着した人のセンシングデータを富士通独自のアルゴリズムにて解析し、熱ストレスアラーム、身体（カラダ）熱環境アラーム、身体負荷アラーム、異常高温アラーム、転倒転落アラームなどの異常を監督者に通知する。装着者の状態や現場を遠隔地からでもリアルタイムに

把握することで、適切な指示や迅速な対応が可能である。

[COLMINA 安全管理支援]

- ・作業員一人ひとりの状態を監督者のスマートフォンに通知することができる。
- ・バイタルセンシングバンド装着者の状態を一人ひとり解析し、装着者に適切な指示を行うことが可能である。
- ・簡単な初期設定を行えば、バイタルセンシングバンドを腕時計の様に装着するだけで装着者の負担、邪魔にならない。

d. 機器について（外観写真含）

[バイタルセンシングバンド]

- ・バイタルセンシングバンドを手首に装着する。
- ・近赤外光によるパルス計測を行う。
- ・作業員周辺の温度と湿度を計測する
- ・スマートフォン経由でデータ送信を行う。

表



裏(皮触接触面)



図 4 バイタルセンシングバンド

[安全管理支援アプリを搭載したスマートフォン]

- ・温度と湿度、作業員の身体負荷、パルス数状況をグラフで確認できる。
- ・熱ストレスアラームなどの警告アラームが確認可能である。

アクセス画面



パルス数、温度湿度画面

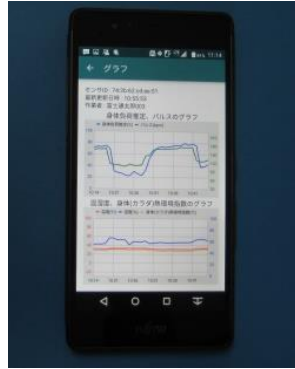


表 6 アラーム種別とその内容

アラーム種別	内容	バイタルセンシングバンド	ロケーションバッジ
熱ストレスアラーム	温度、湿度、パルスから算出・推定した熱ストレスレベルが一定以上に達した場合に発生する	●	
身体(カラダ)熱環境アラーム	温度、湿度から推定した身体熱環境レベルが一定以上に達した場合に発生する	●	
身体負荷アラーム	パルス数から算出・推定した身体負荷レベルが一定以上に達した場合に発生する	●	
異常高温アラーム	一定以上の温度を超えた場合に発生する	●	
転倒アラーム	高さの変化や衝撃等から転倒の状態を検出した後、一定時間立ち上がらない/歩かない場合に発生する	●	●
転落アラーム	高さの変化、無重力状態、衝撃等から転落状態を検出した後、一定時間立ち上がらない/歩かない場合に発生する	●	●
ジオフェンスアラーム	事前に設定したエリアに出入りした場合に発生する	●	●
通知ボタン1	ロケーションバッジのボタン1が押下された場合に発生する		●
通知ボタン2	ロケーションバッジのボタン2が押下された場合に発生する		●

アラーム画面



図 5 スマートフォン画面

表 7 バイタルデータのレベル推定とサマリ表示

アラーム種別	レベル推定	サマリ表示
身体負荷レベル	危険	危険
	注意	注意
	安全(やや注意)	平常
	ほぼ安全	平常
	安全	平常
身体(カラダ)熱環境レベル	危険	危険
	注意	注意
	安全(やや注意)	平常
	ほぼ安全	平常
	安全	平常
熱ストレスレベル	危険	危険
	注意	注意
	ほぼ安全	平常
	安全	平常

e. センシング項目（生体指標、環境指標等）

- ・パルス数（脈波）
- ・体動（加速度センサー）
- ・温度・湿度
- ・作業時間

f. 警告方法（リスク判定項目等）

- ・アラームの種類は 7 種類である（表 6）。
- ・作業者周辺の温湿度とパルスから暑熱による身体への負荷を判定する（表 7）。
- ・リスクを危険、注意、平常の 3 段階で表示する。
- ・リスクがあらかじめ設定したレベルになった際には、スマートフォンにアラーム警告（呼び出し音、バイブレーション）を鳴らす。
- ・転倒を感知した場合にも、アラーム警告を鳴らす。

・身体（カラダ）熱環境アラーム

身体（カラダ）熱環境アラームは、身体（カラダ）熱環境レベル「危険」（表 8）がしばらく継続された場合にアラームを通知する。

身体（カラダ）熱環境レベル推定は、温湿度に対する身体（カラダ）熱環境指数を「危険」「注意」「安全（やや注意）」「ほぼ安全」「安全」の 5 段階に分けて推定する（機能説明書には、下記の表に安全の欄がなかったので記載していない）。

表 8 身体（カラダ）熱環境レベル

身体(カラダ)熱環境レベル	身体(カラダ)熱環境指数	レベルの意味
危険	31℃	運動は原則中止
注意	28℃～31℃	厳重警戒(激しい運動は中止)
安全(やや注意)	25℃～28℃	警戒(積極的に休憩)
ほぼ安全	21℃～25℃	注意(継続的に水分補給)

・身体負荷アラーム

身体負荷アラームは、身体負荷レベル「危険」(表 9) がしばらく継続された場合にアラームを通知する。身体負荷レベル推定は、カルボーネン法などの指標を基に、パルス数から算出した活動による身体負荷を推定する。

身体負荷レベル推定は、「危険」「注意」「安全(やや注意)」「ほぼ安全」「安全」の 5 段階に分けて推定する。安静時パルス数に対する平均パルス数の割合を変更することでアラーム発生レベルを変更できる。

表 9 身体負荷レベル

身体負荷レベル		カルボーネン法	
項目	強度(0.1%)	自覚度	表示
危険	1000	もうだめ	20
	929	非常にきつい	19
	858		18
	786		17
	715	かなりきつい	16
	643	きつい	15
注意	572		14
安全(やや注意)	500	ややきつい	13
ほぼ安全	429		12
	357	楽に感じる	11
安全(やや注意)	266		10
	214	かなり楽に感じる	9
	143		8
	71	非常に楽に感じる	7
	0		6

・熱ストレスアラーム

熱ストレスアラームは、熱ストレスレベル「危険度(高)」(表 10) がしばらく継続された場合にアラームを通知する。

熱ストレスレベル推定は、身体（カラダ）熱指数と気温、温湿度の関係を基に、温湿度にパルス数を加

えて算出している。

熱ストレス状態を「危険」「注意」「ほぼ安全」「安全」の 4 段階に分けて推定する。時間、パルス数、身体（カラダ）熱環境レベルの組み合わせでアラーム発生レベルを変更できる（表 11）。

表 10 熱ストレスレベル

熱ストレスレベル	説明
危険	・120秒間の平均心拍数が150bpmを超えている ・身体(カラダ)熱環境指数31℃以上
注意	・120秒間の平均心拍数が安静時脈拍数の160%を超えている ・身体(カラダ)熱環境指数31℃以上
ほぼ安全	・120秒間の平均心拍数が安静時脈拍数の120%を超えている ・身体(カラダ)熱環境指数31℃以上
安全	「危険」「注意」「ほぼ安全」の条件を全て満たさない

表 11 アラーム設定値

アラーム種別	サマリ表示	項目	単位	具体例(デフォルト)	説明
身体負荷レベル	危険	安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	0.1%	643	1～1000の整数値を入力
	注意	安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	0.1%	572	1～1000の整数値を入力
	安全(やや注意)	安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	0.1%	500	1～1000の整数値を入力
	ほぼ安全	安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	0.1%	375	1～1000の整数値を入力
身体(カラダ)熱環境レベル	危険	身体熱環境指数	℃	31	15～44の整数値を入力
	注意	身体熱環境指数	℃	28	15～44の整数値を入力
	安全(やや注意)	身体熱環境指数	℃	25	15～44の整数値を入力
	ほぼ安全	身体熱環境指数	℃	21	15～44の整数値を入力
熱ストレスレベル	危険	時間	秒間	120	100～180の整数値
		平均パルス数	bpm	150	32～255の整数値
		暑さ指数	℃	31	15～44の整数値
	注意	時間	秒間	120	100～180の整数値
		安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	bpm	160	100～255の整数値
		暑さ指数	℃	31	15～44の整数値
	ほぼ安全	時間	秒間	120	100～180の整数値
		安静時パルス数に対する平均パルス数の割合	bpm	120	100～255の整数値
		暑さ指数	℃	31	15～44の整数値

・アラーム設定値

「閾値パターン管理」画面にて、設定変更が可能な項目およびその入力値である。

g. 通信方法（ネットワークシステム）

- ・ウェアラブルデバイス - スマートフォン間：Bluetooth(通信距離 10m)
- ・スマートフォン - サーバー間（モバイル回線）
- ・データサーバーは、富士通クラウドを利用

h. 個人画面、管理画面

[個人画面（スマートフォン）]

- ・熱ストレスの警告アラームが確認可能
- ・温度・湿度、パルス状況の確認
- ・アラームへの対応の記録画面（図 6）



図 6 個人画面（スマートフォン）

[管理画面（PC）]

- ・管理者が現場及び事務所内で監視（PC、タブレット）
- ・作業者全員の状態の一覧を表示
- ・アラーム警告の発生者は赤字で表示
- ・対応記録の記入画面を表示（図 7）

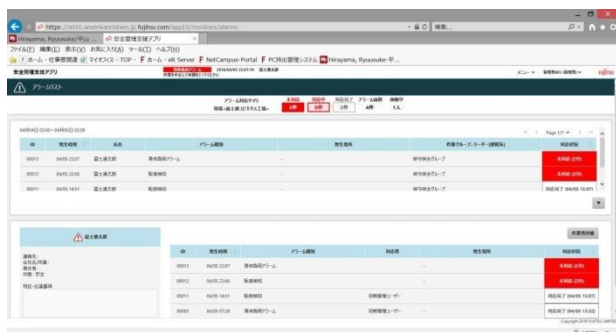


図 7 管理画面（PC）

D. 熱中症計

熱中症計は、カスタム株式会社の「データロガー熱中症指数計、型番：HI-2000SD」を使用した

（図 8）。「データロガー熱中症指数計」は、測定したデータを SD カードに自動的に記録し、そのデー

タを Excel に保存した上で解析できる。サンプリング時間は、1、2、5、10、30、60、120、300、600、1800、3600 秒と設定できるが、本実験では、「腕時計型ウェアラブルセンサー」の心拍数の抽出時間に合わせて 60 秒とした。

A 社の実験では、2 台の「データロガー熱中症指数計」を使用した。1 台は、屋外の駐車場に設置した三脚に乗せ、地面から高さ 140cm の定点観測をした。もう 1 台は、休憩室内の高さ 70cm の事務机の上に設置し、定点観測をした。

B 社の実験時には、2 台の「データロガー熱中症指数計」を使用した。被験者は、熱源の近くで作業するため、2 台ともそれぞれの被験者から 2m 程度の作業に支障がない場所に置き、なるべく作業者の近くの WBGT が測定できるようにした。



図 8 データロガー熱中症指数計の外観
（引用：カスタム株式会社ホームページより）

E. 問診票

問診票は、疲労度・温熱感覚・熱性適性の 3 種類を使用した。

A 社の実験では、作業が昼勤のみのため、記入時間は、8:00、9:00、10:00、11:00、12:00、13:00、14:00、15:00、16:00、17:00 とし、毎日それぞれの項目に合計 10 回記入した。8:00、12:00、17:00 は、その時間にその場で必ず記入し、その他の時間は、作業に支障

がない場合は記入し、さかのぼって記入しても構わないとした（図 9～図 11）。

B 社の実験では、作業が昼勤のときは、記入時間は、8:30、9:00、10:00、11:00、12:00、13:00、14:00、15:00、16:00、17:30、18:00、19:00、20:00、20:30 とし、毎日それぞれの項目に合計 14 回記入した。なお、勤務時間は 8:30～17:30 であるが、超過勤務を実施した時を考慮し、20:30 まで準備した。記入は、退社するまでとした。8:30、12:00、17:30、20:30 は、その時間にその場で必ず記入し、その他の時間は、作業に支障がない場合は記入し、さかのぼって記入しても構わないとした。作業が夜勤のときは、記入時間は、20:30、21:00、22:00、23:00、0:00、1:00、2:00、3:00、4:00、5:00、6:00、7:00、8:00、8:30 とし、毎日それぞれの項目に合計 14 回記入した。なお、勤務時間は 20:30～5:30 であるが、超過勤務を実施した時を考慮し、8:30 まで準備した。記入は、退社するまでとした。20:30、0:00、5:30、8:30 は、その時間にその場で必ず記入し、その他の時間は、作業に支障がない場合は記入し、さかのぼって記入しても構わないとした（図 12～図 17）。

疲労度・温熱感覚・熱性適性については、A 社は全長 14cm のアナログスケールに、B 社は全長 14.5cm のアナログスケールに縦に線を入れて記入し、左端からの長さ（cm）を測定し、実測値をポイント値として求めた。評価する際には、ポイント値を全長で割り、割合を表示し判定に使用した。なお、熱性適性のみ、付与した言葉の性質上、ポイント値は、全長－測定値を実測値とした。なお、A 社は、ほぼ残業がないため、問診票記入の終了を 17:00 としたが、B 社は、残業があった場合も記入するために、昼勤の終了時間を 20:30、夜勤の終了時間を 8:00 とした。

問診票において、熱中症高リスク状態に該当すると判断した閾値を A 社は表 4 に、B 社は表 5 に示す。表 4 に示すように、A 社の問診票の全長は 14.0cm

であり、疲労度については、評価に使用する問診票の閾値の区分は、付与した言葉の「きつい」の位置である 9.5cm（割合は 0.68）とした。温熱感覚については、評価に使用する問診票の閾値の区分は、付与した言葉の「あつい」の位置である 12.5cm（割合は 0.89）とした。熱性適性については、評価に使用する問診票の閾値の区分は、付与した言葉の「とても不快」の位置である 10.5cm（割合は 0.75）とした。表 5 に示すように、B 社の問診票の全長は 14.5cm であり、同様にして疲労度は 9.8cm（割合は 0.68）、温熱感覚は 12.9cm（割合は 0.89）、熱性適性は、10.9cm（割合は 0.75）とした。

2020年10月25日 様

疲労度 (RPE)

・少なくとも黄色の部分の 8:00、12:00、17:00 に記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入して構いません。

毎日チェック

	非常に楽である	かなり楽である	楽である	ややきつい	きつい	かなりきつい	非常にきつい
8:00							
9:00							
10:00							
11:00							
12:00							
13:00							
14:00							
15:00							
16:00							
17:00							

図 9 A 社の問診票（疲労度、昼勤のみ）

2020年10月25日

様

温熱感覚

・少なくとも黄色の部分の8:00、12:00、17:00に記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入して構いません。

毎日チェック

	とても寒い	寒い	涼しい	やや涼しい	普通	やや暖かい	暖かい	暑い	とても暑い
8:00	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
9:00									
10:00									
11:00									
12:00									
13:00									
14:00									
15:00									
16:00									
17:00									

図 10 A 社の問診票（温熱感覚、昼勤のみ）

2020年10月25日

様

熱性適性（気温についての熱性適性）

・少なくとも黄色の部分の8:00、12:00、17:00に記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入して構いません。

毎日チェック

	非常に不快	とても不快	不快	やや不快	快適
8:00	↓	↓	↓	↓	↓
9:00					
10:00					
11:00					
12:00					
13:00					
14:00					
15:00					
16:00					
17:00					

図 11 A 社の問診票（熱性適性、昼勤のみ）

氏名：

昼勤用

施日：2020年12月15日

疲労度（RPE）

- ・勤務時間中の疲労度を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。

・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	非常に家である	かなり家である	家である	ややきつい	きつい	かなりきつい	非常にきつい
8:30	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
9:00							
10:00							
11:00							
12:00							
13:00							
14:00							
15:00							
16:00							
17:30							
18:00							
19:00							
20:00							
20:30							

図 12 B 社の問診票（疲労度、昼勤用）

氏名：

夜勤用

施日：2020年12月20日

疲労度（RPE）

- ・勤務時間中の疲労度を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。

・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	非常に家である	かなり家である	家である	ややきつい	きつい	かなりきつい	非常にきつい
20:30	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
21:00							
22:00							
23:00							
0:00							
1:00							
2:00							
3:00							
4:00							
5:30							
6:00							
7:00							
8:00							
8:30							

図 13 B 社の問診票（疲労度、夜勤用）

氏名： 昼勤用
施日： 2020年12月16日

温熱感覚

- ・勤務時間中の温熱感覚を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。
- ・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	とても暑い	暑い	涼しい	やや涼しい	普通	やや暖かい	暖かい	暑い	とても暑い
8:30									
9:00									
10:00									
11:00									
12:00									
13:00									
14:00									
15:00									
16:00									
17:30									
18:00									
19:00									
20:00									
20:30									

図 14 B 社の問診票（温熱感覚、昼勤用）

氏名： 昼勤用
実施日： 2020年12月15日

熱性適性（気温についての熱性適性）

- ・勤務時間中の熱性適性を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。
- ・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	非常に不快	とても不快	不快	やや不快	快適
8:30					
9:00					
10:00					
11:00					
12:00					
13:00					
14:00					
15:00					
16:00					
17:30					
18:00					
19:00					
20:00					
20:30					

図 16 B 社の問診票（熱性適性、昼勤用）

氏名： 夜勤用
施日： 2020年12月20日

温熱感覚

- ・勤務時間中の温熱感覚を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。
- ・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	とても暑い	暑い	涼しい	やや涼しい	普通	やや暖かい	暖かい	暑い	とても暑い
20:30									
21:00									
22:00									
23:00									
0:00									
1:00									
2:00									
3:00									
4:00									
5:30									
6:00									
7:00									
8:00									
8:30									

図 15 B 社の問診票（温熱感覚、夜勤用）

氏名： 夜勤用
実施日： 2020年12月20日

熱性適性（気温についての熱性適性）

- ・勤務時間中の熱性適性を記入して下さい。
- ・線上に縦線を入れてください。説明の文字の↓にこだわる必要はありません。
- ・少なくとも、黄色の部分の時間帯は、記入してください。その他の時間は、さかのぼって記入しても構いません。

	非常に不快	とても不快	不快	やや不快	快適
20:30					
21:00					
22:00					
23:00					
0:00					
1:00					
2:00					
3:00					
4:00					
5:30					
6:00					
7:00					
8:00					
8:30					

図 17 B 社の問診票（熱性適性、夜勤用）

F. 研究結果

a. WBGT もしくは問診票の疲労度・温熱感覚・熱性適性の結果による熱中症高リスク状態と腕時計型ウェアラブルセンサーの身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベルの検出閾値以上との比較

WBGT、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）による熱中症高リスク状態と腕時計型ウェアラブルセンサーで検出レベル以上と判定した（身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベル）閾値以上との比較の結果を示す（表 12）。

現場で測定した WBGT が、A 社は 28.0℃以上もしくは問診票の疲労度 ≥ 0.68 もしくは、温熱感覚 ≥ 0.89 もしくは、熱性適性 ≥ 0.75 の場合は、熱中症高リスク状態と判断した。

現場で測定した WBGT が、B 社は 27.0℃以上もしくは問診票の疲労度 ≥ 0.68 もしくは、温熱感覚 ≥ 0.89 もしくは、熱性適性 ≥ 0.75 の場合は、熱中症高リスク状態と判断した。

これに対し、腕時計型ウェアラブルセンサーで身体（カラダ）熱環境レベルが 5 ポイント以上、もしくは、身体負荷レベルが 5 ポイント以上、もしくは熱ストレスレベルが 4 ポイント以上は、異常を検出したと判断した。

A 社の結果を表 13 に示す。A 社（事業内容：屋外駐車場の見回り、屋外作業、昼勤のみ）について、熱中症高リスク状態に該当したのは、被験者 7 名、7 日間毎日連続測定した全 49 回の内の 11 回、熱中症高リスク状態に該当しなかったのは、全 49 回の内 38 回であった。

これに対し、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当した 11 回の内の 4 回であり、熱中症高リスク状態該当に対しての 36.4%であった。

また、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベ

ル以下と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当しなかった 38 回の内の 36 回であり、熱中症高リスク状態非該当に対しての 94.7%であった。

B 社の結果を表 14 に示す。B 社（事業内容：電子材料の製造、屋内作業、昼勤と夜勤）について、熱中症高リスク状態に該当したのは、被験者 7 名、7 日間毎日連続測定した全 49 回の内の 34 回、熱中症高リスク状態に該当しなかったのは、全 49 回の内 15 回であった。

これに対し、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当した 34 回の内の 27 回であり、熱中症高リスク状態該当に対しての 79.4%であった。

また、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以下と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当しなかった 15 回の内の 8 回であり、熱中症高リスク状態非該当に対しての 53.3%であった。

A 社および B 社において WBGT、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）による熱中症高リスク状態の結果と腕時計型ウェアラブルセンサーで検出レベル以上と判定する（身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベル）閾値以上かどうかを判定した代表的な結果をそれぞれ図 18、図 19 示す。

G. 考察

今回、実際の労働現場において、2つの研究協力会社の異なる作業環境における、WBGT、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）による熱中症高リスク状態を測定すると同時に、腕時計型ウェアラブルセンサーによる（身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベル）を検出し比較した。

実際の労働現場では、アメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）が示す Heat Strain（熱緊張）状態の指標となる深部体温、心電図による心拍数、ボルグスケールなどのデータを測定しにくい状況であった。

そこで、熱中症計によるWBGT（℃）とHeat Strain状態を推測する1つの指標として自覚症状を示す問診票による疲労度・温熱感覚・熱性適性を測定し、熱中症高リスク状態を推定した。腕時計型ウェアラブルセンサーによりモニターする身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベル、熱ストレスレベルとの関連を検証するために、各社被験者は7名ずつ、それぞれ7日間の測定を行い、1社で49回、2社で合計で98回の実験結果を比較した。

A社の被検者は、屋外で駐車場の見回りをしており、夏季であれば、直射日光を浴び暑熱環境となるが、実験期間が9月28日～10月25日までであったことから、熱中症が起きにくい気候であった。そのため、熱中症高リスク状態に該当したのは、全49回の内の11回であり、これに対し、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当した11回の内の4回であり、熱中症高リスク状態該当に対しての36.4%であった。

これに対し、熱中症が起きにくい気候であったことから、熱中症高リスク状態に該当しなかった日は、全49回の内38回であった。

また、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以下と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当しなかった38回の内の36回であり、熱中症高リスク状態非該当に対しての94.7%であった。熱中症高リスク状態ではないことを的確にとらえていた。このことにより、腕時計型ウェアラブルセンサーの熱中症高リスク状態非該当の判定に対する信頼も感じられる。

B社の被検者は、電子材料を製造するために、換気を行い難い屋内で、熱源の近くで作業を行う。また、筋力を使う作業であり、体に対する負荷も大きく、水分補給も随時行われていた。また、交代制勤務であり、夜勤では深夜作業も行っている。十分な暑熱環境対策が行われているが、作業の性質上暑熱

環境であった。

B社で熱中症高リスク状態に該当したのは、被験者7名、7日間毎日連続測定した全49回の内の34回であり、熱中症高リスク状態に該当しなかったのは、全49回の内15回であった。

これに対し、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当した34回の内の27回であり、熱中症高リスク状態該当に対しての79.4%であった。作業の性質上、腕時計型ウェアラブルセンサーは、防護服、汗、手洗い用の石鹸や水などの影響も受けたようであったが、モニターする身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベル、熱ストレスレベルは抽出されていた。腕時計型ウェアラブルセンサーは、防水・防塵の対応がなされ、手洗い等で水に濡れても問題はなく、水の直接噴流によっても有害な影響を受けないようにテストも実施されていた。

また、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以下と判定したのは、熱中症高リスク状態に該当しなかった15回の内の8回であり、熱中症高リスク状態非該当に対しての53.3%であった。

A社およびB社においてWBGT、問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）による熱中症高リスク状態の結果と腕時計型ウェアラブルセンサーで検出レベル以上と判定した（身体（カラダ）熱環境レベル・身体負荷レベル・熱ストレスレベル）閾値以上と判定した結果により、以下のことが推察された。

A社の実験結果から、腕時計型ウェアラブルセンサーは熱中症が起きにくい気候においては、少ない熱中症高リスク状態を検出することは、まだ改善の余地があるが、反対に非熱中症高リスク状態において、腕時計型ウェアラブルセンサーは検出レベル以下と判定し熱中症高リスク状態非該当と判断した割合が94.7%であったことは、腕時計型ウェアラブルセンサーの検出結果を信頼できると思われる。

B社の実験結果から、熱中症高リスク状態に該当し

た34回の内、腕時計型ウェアラブルセンサーが検出レベル以上と判定したのは、27回であり、熱中症高リスク状態該当に対しての79.4%であったことから、実際の作業現場においても熱中症リスクの予測や予防対策の機器として有効であるとの見解を得た。日々労働の場面で使用する機器には、検出技術とともに、機器の堅牢さや使いやすさ（軽さ）なども重要な要素であると考えた。

加えて、表12のB社の結果から、同じ日時の同じ暑熱環境下で働いている労働者でも、腕時計型ウェアラブルセンサーで測定された個人のバイタルセンシングによって、個人毎の熱中症高リスク状態を推定し、それが問診票の疲労度・温熱感覚・熱性適性の結果と合致していることも散見された。熱中症計の活用も熱中症予防の観点から暑熱環境下で有効であるが、併せて腕時計型センシングバンドなどのIoT技術を使えば、年齢、体調などの影響を熱中症予防に反映させる可能性があるかと推察した。

H. 結論

- ・腕時計型ウェアラブルセンサーが熱中症のリスクの予測や予防対策の機器として推定可能であるか、実際の労働現場で検証を行った。
- ・職場環境が違った2つの研究協力会社で、のべ98回実験を行った。
- ・熱中症高リスク状態をWBGTと問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）より判定し、腕時計型ウェアラブルセンサーによりモニターする身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベル、熱ストレスレベルとの相関を検証できた。
- ・その結果、腕時計型ウェアラブルセンサーは、熱中症高リスク状態をとらえており、効果的な熱中症対策の機器と推察された。実際の作業現場においても熱中症リスクの予測や予防対策の機器として有効と推察される。

[引用文献]

- 1) Borg.G., Perceived exertion as an indicator of somatic stress., Scand. J. Rehab. Med. 2:92-98,1970
- 2) Fanger, P. O, Calculation of thermal comfort , Introduction of a basic comfort equation , ASHRAE Transactions, 73-II : IIL4. I/IIIL.4.20. ,1967
- 3) ISO-7730 : Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort,1984
- 4) GAGGE, A.P., STOLWIJK, J.A J., and HARDY, J.D.: Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. Environmental Research, 1 : 1-20, 1967

I. 健康危険情報

なし

J. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
なし

K. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

表 12. WBGT もしくは問診票（疲労度・温熱感覚・熱性適性）のデータの結果による熱中症高リスク状態
該当と腕時計型ウェアラブルセンサーの検出閾値以上との比較

			WBGTと問診票	腕時計型ウェアラブルセンサー
○：有り ×：無し			A社（WBGT $\geq 28^{\circ}\text{C}$ で2時間継続） B社（WBGT $\geq 27^{\circ}\text{C}$ で2時間継続） or 疲労度 ≥ 0.68 or 温熱感覚 ≥ 0.89 or 熱性適性 ≥ 0.75	身体（カラダ）熱環境ストレス ≥ 5 ポイント or 身体負荷レベル ≥ 5 ポイント or 熱ストレス ≥ 4 ポイント
会社別	被験者番号	通し番号	熱中症高リスク状態該当	検出
A社	A-001	1	×	×
		2	×	○
		3	○	×
		4	×	×
		5	○	×
		6	○	×
		7	○	×
	A-002	8	×	×
		9	×	○
		10	○	○
		11	○	○
		12	○	○
		13	○	×
		14	○	×
	A-003	15	×	×
		16	×	×
		17	×	×
		18	×	×
		19	×	×
		20	×	×
		21	×	×
	A-004	22	×	×
		23	×	×
		24	×	×
		25	×	×
		26	×	×
		27	×	×
		28	×	×
	A-005	29	×	×
		30	×	×
		31	×	×
		32	×	×
		33	×	×
		34	×	×
		35	○	○
	A-006	36	×	×
		37	×	×
		38	×	×
		39	×	×
		40	×	×
		41	×	×
		42	○	×
	A-007	43	×	×
		44	×	×
		45	×	×
		46	×	×
		47	×	×
		48	×	×
		49	×	×

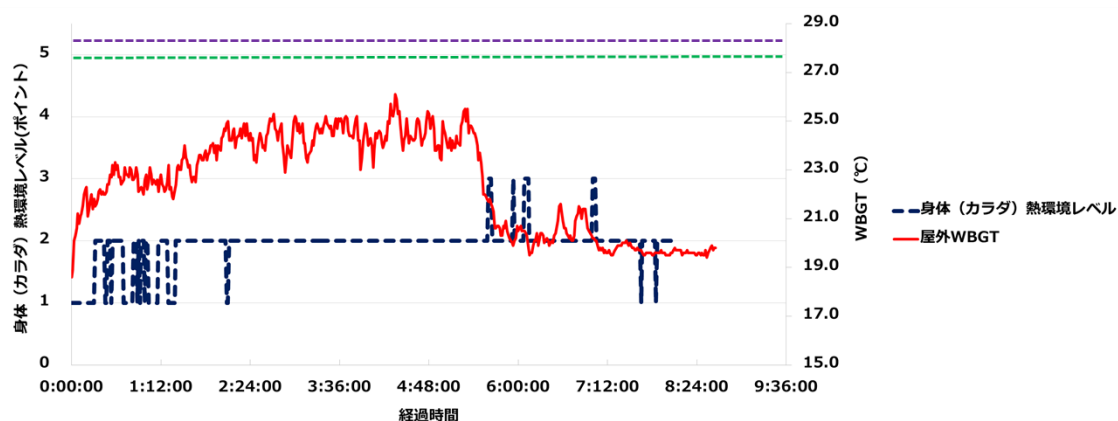
B社	B-001	50	○	○
		51	○	○
		52	○	○
		53	○	×
		54	○	×
		55	○	○
		56	○	○
	B-002	57	○	○
		58	○	○
		59	○	○
		60	○	○
		61	○	×
		62	○	○
		63	○	×
	B-003	64	○	○
		65	○	○
		66	○	○
		67	○	○
		68	○	○
		69	○	○
		70	○	○
	B-004	71	○	○
		72	○	○
		73	×	×
		74	○	×
		75	○	×
		76	×	×
		77	×	○
	B-005	78	○	○
		79	×	○
		80	×	○
		81	○	○
		82	○	○
		83	×	×
		84	×	×
	B-006	85	×	○
		86	×	○
		87	×	○
		88	×	○
		89	×	×
		90	×	×
		91	×	×
	B-007	92	○	○
		93	○	○
		94	○	○
		95	○	○
		96	○	○
		97	×	×
		98	○	×

表 13. A 社の熱中症高リスク状態における腕時計型ウェアラブルセンサーの検出結果

		熱中症高リスク状態（人）		
		+(該当)	－	計
腕時計型ウェアラブルセンサー	+(検出)	4	2	6
	－	7	36	43
	計	11	38	49

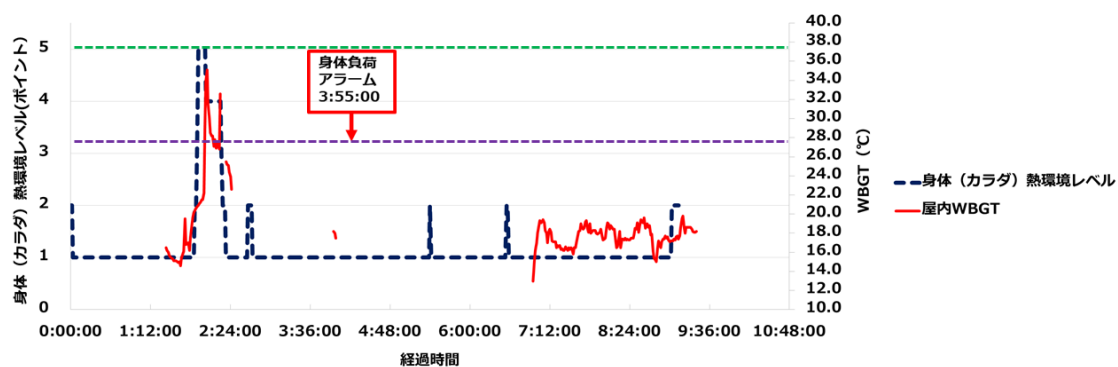
表 14. B 社の熱中症高リスク状態における腕時計型ウェアラブルセンサーの検出結果

		熱中症高リスク状態（人）		
		+(該当)	-	計
腕時計型ウ	+(検出)	27	7	34
エアラブル	-	7	8	15
センサー	計	34	15	49



緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：WBGT の閾値

図 18 腕時計型ウェアラブルセンサーの身体（カラダ）熱環境レベルと熱中症計の屋外 WBGT の比較（A 社、A-002）



緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：WBGT の閾値

図 19 腕時計型ウェアラブルセンサーの身体（カラダ）熱環境レベルと熱中症計の屋内 WBGT の比較（B 社、B-004）

ウェアラブルセンサーによる熱中症予防（現場実例報告）

研究分担者：山田 晋平 産業医科大学 産業保健学部 安全衛生マネジメント学 講師

研究要旨：現場におけるウェアラブルデバイスの導入の経緯や運用の実態、そして熱中症の対策における活用状況を、すでにウェアラブルデバイスを使用している企業の現場実例にて示すことを目的とする。

高層ビルの建設現場において、400 名超の作業員の内、約 100 名超を対象にウェアラブルデバイスによる熱中症対策が行われている。建設業においては人手不足が問題となっており、省人化と作業員の体調と安全の管理の両立が課題となっている。導入したウェアラブルデバイスは、測定したデータをクラウドに送信して、解析・評価することで、情報を複数の端末で共有するシステムとなっており、課題の解決に繋がっていた。製造業の企業においてもウェアラブルデバイスによる熱中症対策が進められている。すでに、人、設備、管理、そして環境の対策を実践しているにも拘らず、重篤になる事例が発生しており、従業員一人一人の体調に着目した対策を取るためにウェアラブルデバイスを導入している。ビックデータと AI 機能を組み合わせることで、従業員一人一人に対して平常範囲の設定する手法を用いることで普段の体調を考慮した熱中症対策の検討されている。

本報告では良好事例の紹介に留まるが、今後、現場での運用実績の蓄積に伴い、ウェアラブルセンサーによる熱中症予防の効果が検証されていくと考えられる。

分担研究者

丸山崇(産業医科大学医学部第1生理学)

倉岡宏幸(産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学)

黒坂知絵(産業医科大学産業保健学部人間情報科学)

江口泰正(産業医科大学産業保健学部人間情報科学)

八谷百合子(産業医科大学産業保健学部産業・地域看護学)

上田陽一(産業医科大学医学部第1生理学)

東敏昭(一般財団法人西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授)

A. 研究の背景

労働災害としての熱中症によって、毎年 20 名ほどが死亡しており、その予防は重要な課題である。また近年、健康管理のツールとして脈拍数や活動量などが計測できるウェアラブルデバイスが普及し始めている。ウェアラブルデバイスの中には、暑熱環境における運動のリスク評価が行える機種も販売されており、熱中症の予防に活用できると考えられる。しかし、ウェアラブルデバイスで計測できる指標は限られており、熱中症において重要な指標である深部体温を測定している製品はない。またウェアラブルデバイスはその特性上、測定部位が制限されるとともにセンサーの小型化が求められる。また、生理計測の専門知識や技能がなくてもセンサーを装着できることと、測定に際して手間や時間がかからないことも要求される。これらの制約のため、実験装置での計測に比べて測定精度が劣る場合があると考えられる。

昨年度(2019 年度)において、人工気候室にて設定した暑熱環境下でトレッドミルによる運動負荷を掛けた際の生理指標(深部体温(直腸温)、心拍数)および主観的な運動強度と、ウェアラブルデバイスによるリスク評価との比較を行い、暑熱環境下での労働におけるリスク評価にウェアラブルデバイスを活用できるか検討を行った。暑熱負荷がない(暑くない)実験条件において、実験に用いたウェアラブルデバイスは運動負荷に応じた暑熱作業リスクの増加を示し、暑熱負荷の高い条件においても、人工気候室の機器で測定した直腸温、心拍数や、口頭で回答させたボルグスケール(主観的運

動強度の評価指標)の評価結果と良い一致が見られ、妥当な判定ができていると考えられた。

B. 研究の目的

昨年度の研究によって、ウェアラブルデバイスで暑熱環境における運動のリスク評価が行えることが確認されたが、これは人工気候室での実験室実験であり、労働の現場における検討は行っていない。そこで今年度(2020 年度)は、現場におけるウェアラブルデバイスの導入の経緯や運用の実態、そして熱中症の対策における活用状況を、すでにウェアラブルデバイスを使用している企業の現場事例にて示すことを目的とする。

C. 現場事例

事例1 建設業

建設業は屋外での作業が多く、夏場の熱中症対策が課題となっている。また、建設業全体でIoTやICTの導入が進んでおり、その一環として作業員のバイタル管理にウェアラブルデバイスが導入されている。

オフィス、住宅、商業施設を含む複合施設が入る高層ビルの建設現場において、ウェアラブルデバイスを試行的に導入している事例を紹介する。ここで導入されているウェアラブルデバイスは、昨年度に人工気候室での実験で用いたシャツ型ウェアラブルセンサーを用いたデバイス(図1)ではなく、腕時計型デバイスである。シャツ型、腕時計型ともにSmartfit for work(倉敷紡績株式会社)と呼ばれる暑熱環境下での作業リスクや体調変化を捉えられるデバイスである。腕時計型もシャツ型と同一のアルゴリズムを用いて評価を行っている。400名超の作業員の内、約100名超がウェアラブルデバイスを装着しており、主な対象は、直射日光を浴びながらの作業が発生する作業員である。

ウェアラブルデバイスの導入の動機は、熱中症の対策は熱中症になってからでは遅く、いかに防ぐかが問題となっている点と、複数の業種があるため一人一人の状態を捉える必要がある点に起因する。また建設業では人手不足が問題となっており、省人化と作業員の体調と安全の管理の両立が課題となっている。

作業員が装着しているウェアラブルデバイスで測定さ

れたデータは作業員が携帯しているスマートフォンを介



図1 シャツ型ウェアラブルデバイス

してクラウドに送信され、気象情報とともにクラウド上の独自アルゴリズムで解析・評価が行われる。解析・評価した結果は、リアルタイムで作業員の携帯しているスマートフォンや管理者が使用するパソコンなどに表示される。この現場では、現場事務所の壁に大型のモニタを設置してシステムの画面を表示することで、事務所内全員が現場の作業員の状態を把握できるようにしている(図2)。

暑熱作業リスクが高まると、作業員のスマートフォンと管理者のパソコンなどにアラートが通知される。通知があった際には管理者は、該当作業員の職長に電話などで連絡を取った上で、作業員本人にも連絡を取るといった運用を行っている。管理者は、対象となっている100名超の作業員の暑熱作業リスクを一画面で把握することができ、必要に応じて作業員ごとにリスクの推移を確認することができるシステムとなっている。仕事に集中しているなどの理由により本人が自覚していない場合でも管理者から連絡を行い対策を促せるようになっている。システム導入前は熱中症予防のための管理者側からの声掛けは一方的であったが、システム導入後は作業員の意識が変わり、声掛けに反応が返ってくるようになったとの報告がある。

実例2 製造業

製造業は屋内の作業が多いが、プレス、鋳造、運搬、



図2 事務所に設置された現場の作業員の状態を表示するモニタ

組み立てなど様々な工程があり、環境もそれぞれ異なる。連結で数十万規模の従業員がいる製造業の企業において、ウェアラブルデバイスを導入し、熱中症への対策だけでなく従業員の健康に対する取り組みがなされている。ここで導入されているウェアラブルデバイスは、昨年度に行った人工気候室での実験で用いたシャツ型ウェアラブルセンサーを用いたデバイスである(図1)。当該企業では、このウェアラブルデバイスを昨年度から一部で試験的に導入を進めており、そこで出てきた要望についてデバイスメーカーとやり取りをした上で、今年度は全社に展開して約120名を対象にウェアラブルデバイスでの測定を行っている。

ウェアラブルデバイスの導入の動機としては、熱中症の対策として、すでに、人、設備、管理、そして環境の対策を実践しているにも拘らず、重篤になる事例が発生しており、それらの場合において体調面に不安があるケースが確認されたことによる。従業員一人一人について、その日の体調だけでなく普段の体調もモニタリングすることで体調管理、健康推進を行い、熱中症の防止に繋げる意図でウェアラブルデバイスを導入している。

当該企業では、運用において従業員一人一人に注目している。また、体調が変化する時点を変化点と名付け、この変化点を管理することを目的としている。使用しているウェアラブルデバイスは、ビッグデータ化した個人の生体情報の解析とAI機能により、普段の体調の平常範囲を設定する機能を有している(この機能は、昨年度の実験室実験では検討していない)。設定される平常範囲の

閾値の精度は、ウェアラブルデバイスの装着期間が長くなるほど高まる。約120名を対象とした運用において、ウェアラブルデバイスのアラートに従って休憩を入れて、心拍と体調が落ち着いたから復帰させることで熱中症を防げたと考えられる事例が報告されている。また、本人が体調の悪化を自覚していない場面でアラートが鳴る場面があり、安全衛生の担当者は隠れた危険性に対する効果も実感していると報告している。従業員からは「仲間が守れる」との声が上がっており、熱中症対策への理解と共感を高まる事例も報告されている。昨年度の試験導入を経て、デバイスメーカーに要望した屋内と輻射熱への対応も進められており、製造業においても効果が期待できる状況となっている。以上の運用実績を踏まえて、当該企業の現場ではグループ企業への展開を期待する声も上がっている。

実例3 アラートの通知例

対象としているウェアラブルデバイスは、装着者の心拍数、加速度、衣服内温度、および環境の温湿度から、熱ストレスと作業強度を推定している。また、これらを組み合わせて暑熱作業リスクを評価して、アラートを通知する機能を有している。一例として、アラートの通知が発生した測定日(2020年8月22日)における暑熱作業リスクの推移と、その際の心拍数、温度の推移を示す(図3-5)。心拍数と温度が高まるにつれて暑熱作業リスクの評価値が上昇しているのが確認できた(図3-5)。アラートの通知は18:05と20:10に発生しており、暑熱作業リスクの評価値が高い状態が継続した場合に行われていた(図3-5)。

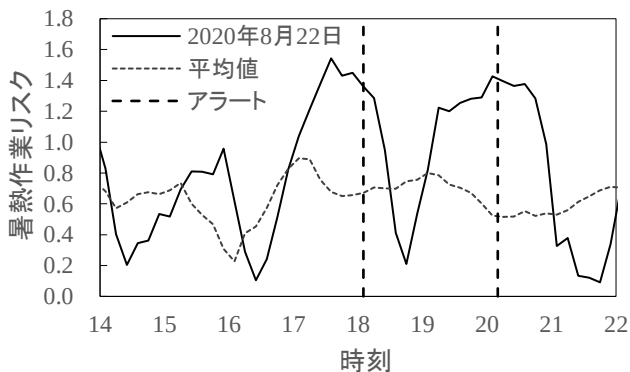


図3 暑熱作業リスクの推移

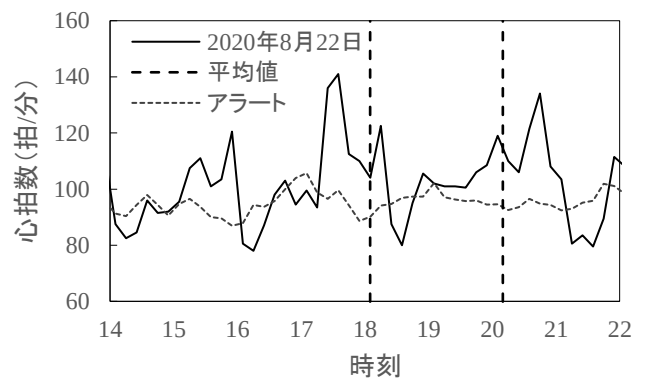


図4 心拍数の推移

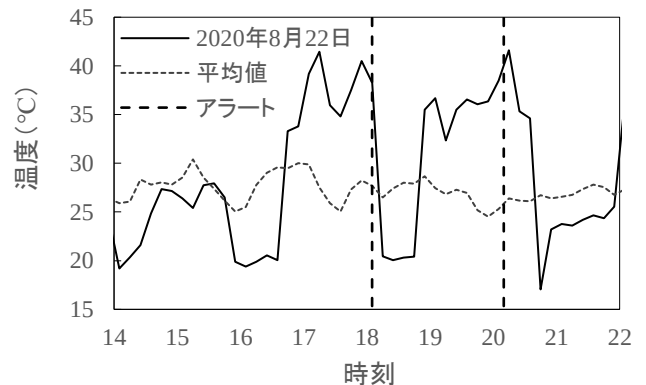


図5 温度の推移

D. 結論

ウェアラブルセンサーによる熱中症予防について、建設業と製造業における現場事例を整理した。直射日光の影響を強く受ける建設業においても、様々な工程や環境が混在する製造業においてもウェアラブルデバイスによる熱中症対策は、すでに進められており複数の良好事例が確認された。「省人化と作業員の体調と安全の管理の両立」や「当日だけでなく普段の体調も管理し健康を推進することでの熱中症の予防」など、ウェアラブルデバイスの導入の動機は、企業ごとに異なっていた。しかし、クラウドを活用した情報を共有するシステムやビックデータとAI機能を組み合わせて平常範囲の閾値を一人一人設定する手法を活用して、効果的な運用方法の検討が進められているのが確認された。

本報告では良好事例の紹介に留まるが、昨年度の研究により暑熱作業のリスクをウェアラブルデバイスで十分に評価できることは確認されており、今後、現場での運用実績の蓄積に伴い、ウェアラブルセンサーによる熱中症予防の効果が検証されていくと考えられる。

シャツ型ウェアラブルデバイスによる暑熱作業リスク評価の検証

研究分担者： 倉岡 宏幸 産業医科大学 産業保健学部 安全衛生マネジメント学 助教

研究要旨：

本稿では、シャツ型ウェアラブルセンサーを用いたオンプレミス hamon システム(ミツフジ株式会社および前田建設工業株式会社による共同開発)の現場導入事例について報告する。本システムは、従来のスマホを用いた計測システムではなく、BLE ルータを用いたスマホレスシステムを使用しており、トランスミッターから直接 BLE ルータを経由してローカルサーバーに生体情報データを蓄積するものである。

2020 年 8 月 25 日から 9 月 5 日にかけて、40～60 歳代の男性作業員 7 名を対象に、シャツ型ウェアラブルデバイスを着用させ、検証実験を実施した。システム計測の時間帯は午前 8 時から午後 5 時とし、検証期間終了後に、シャツの着用感及び計測システムに関するアンケートを行った。シャツの着用感については、締め付け感、吸汗性及びシャツの形状について評価させた。計測システムに関するアンケートでは、測定状況、興味のある計測項目及び体調管理やモニターへの関心について調査した。

実験の結果、計測データ（心拍、ストレス値及び暑熱リスク）をほぼ安定して取得することができたが、ストレス値に関しては未演算が散見されている日もあり、システムの改善が必要とみられた。暑熱アラートについては、第 2 段階アラート（注意）が数回発信されたが、本人の体調不良の自覚症状はなく、アラート発信のタイミングの見直しが必要であることが示唆された。アンケートの結果では、シャツの締め付け感及び吸汗性の項目について、一部の参加者（2 名）が不快感を示していた。センシングの安定性のためにはセンサー部の肌への密着性が求められ、着心地改善へのウェア設計とは相反するところではあるが、長時間着用することによる不快感の軽減などの改善が必要であると考えられた。

現場検証実験を通じて、計測データを安定して取得することができ、BLE ルータを用いたスマホレスシステムの安定稼働が確認できたが、シャツ型ウェアラブルデバイスの着用感（密着性）や参加者の運動強度による心拍数の測定精度への影響など引き続きのモニタリングが必要であることが示唆された。また、実験参加者の多くが体調管理やモニタリングに対する関心が低かったことから、熱中症に関する計測項目だけではなく、ユーザーの関心が高い項目（疲労や眠気）を追加した方が、本システムの導入増加につながることを期待できる。

分担研究者

丸山崇(産業医科大学医学部第1生理学)

江口泰正(産業医科大学産業保健学部人間情報科学)

山田晋平(産業医科大学産業保健学部安全衛生マネジメント学)

黒坂知絵(産業医科大学産業保健学部人間情報科学)

八谷百合子(産業医科大学産業保健学部産業・地域看護学)

上田陽一(産業医科大学医学部第1生理学)

東敏昭(一般財団法人西日本産業衛生会/産業医科大学名誉教授)

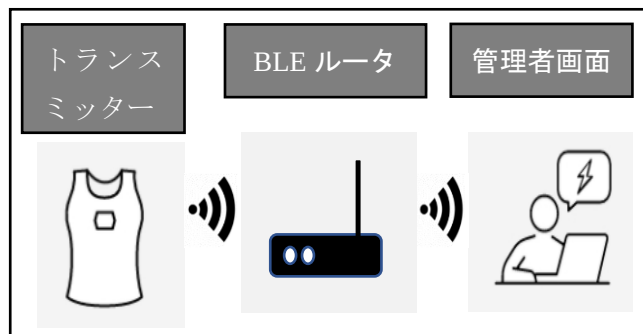
A. はじめに

シャツ型ウェアラブルセンサーを用いたオンプレミス hamon システム(ミツフジ株式会社および前田建設工業株式会社による共同開発)の現場導入事例について紹介する。本システムは、従来のスマホを用いた計測システムではなく、BLE ルータを用いたスマホレスシステムを使用しており、トランスミッターから直接 BLE ルータを経由してローカルサーバーに生体情報データを蓄積するものである(図1)。

本稿では、オンプレ hamon システムを用いた現場検証実験について報告する。

B. 実施状況

2020年8月25日から9月5日にかけて、横浜共立



鋼業株式会社(神奈川県横浜市泉区)の工場

図1 hamon スマホレスシステムの概要
(mitsufuji のホームページ¹⁾の図を参考)

敷地内にて、男性作業員7名(平均年齢:42.8±15.7歳)を対象に検証実験を行った(図2)。BLE ルータ

を工場内に設置し、計測データの管理スペースを食堂内に設置した(図3)。計測の時間帯は午前8時から午後5時とした。検証期間終了後には、シャツの着用感及び計測システムに関するアンケートを実施した。シャツの着用感については、締め付け感、吸汗性及びシャツの形状について評価させた。計測システム使用に関するアンケートでは、測定状況体調管理への意識・興味、興味のある計測項目及びモニターへの関心について調査した。各参加者の計測状況を表1に示した(○:データ取得完了, △:データ取得不可あり)。2名のデータについては、機材トラブルにより一部のデータを取得できなかったが、殆どの参加者で終日問題なくデータ取得を完了し、データ取得率は94.1%(48/51)であった。BLE ルータを用いたスマホレスのシステムでのデータ取得について良好な結果が得られた。



図2 計測場所(上:工場概観, 下:工場内)



図3 計測システムの一部の例（上：BLE ルータ設置，下：管理用 PC）

表1 各参加者の計測状況

日程	参加者						
	01	02	03	04	05	06	07
8/25		○		○		○	○
8/26	○	○	○	○	○	○	○
8/27	○			○		○	○
8/28		△					△
8/29				○		○	
8/30							
8/31	○	△	○		○		
9/1	○	○	○	○	○	○	○
9/2		○		○	○	○	○
9/3	○	○	○			○	
9/4	○	○	○	○	○	○	○
9/5	○	○		○	○	○	○

C. 結果・考察

男性参加者 1 名の計測データを図 4 に示した。計測データ（心拍，ストレス値及び暑熱リスク）をほぼ安定して取得することができたが，ストレス値に関しては未演算が散見されている日もあり，システムの改善が必要とみられる。ストレス指標として，心拍変動性指標である LF/HF が採用されているが，R-R 間隔データの取得で欠損データが多いと，正しく演算することが困難であることから，ポアンカレプロットのような非線形解析手法から得られる指標を使用するのが望ましいことが推察された。暑熱アラートについては，第 2 段階アラート（注意）が数回発信されたが，本人の体調不良の自覚症状はなく，アラート発信のタイミングの見直しが必要であることが示唆された。

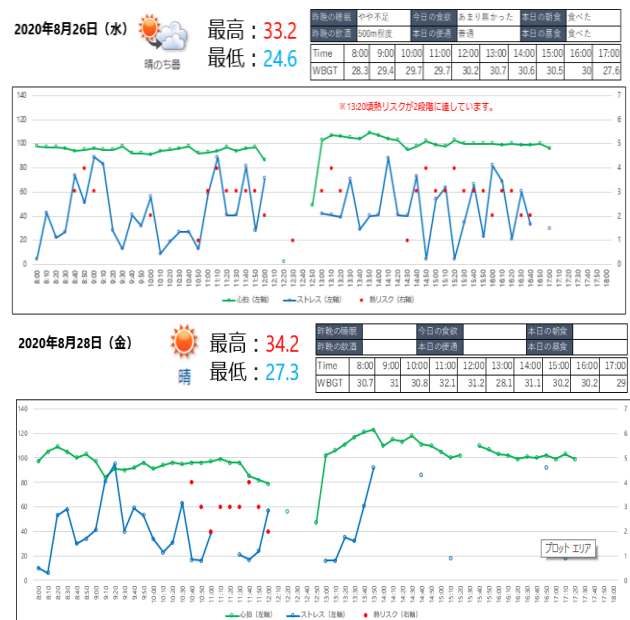


図4 実験参加者 04 の計測データ（上：欠損なし，下：欠損あり）

シャツの着用感に関するアンケートでは，内部電極やトランスミッターについては，特に気にならない意見が殆どであったが，締め付け感及び吸汗性の項目については，不快を示した参加者が 2 名（4 名中）いた（図 5-6）。センシングの安定性のためにはセンサー部の肌への密着性が求められ，着心地改善へのウェア設計とは相反するところではあるが，長時間着用することによる不快感の軽減などウェアにおいては更なる改善が必要であることが示唆された。計測システム使用に関するアンケートでは，体調管理への意識が「前と変わらない」及び「必要な

いと思った」と感じたのが4名(7名中)、モニタリングへの関心については「興味なし」と回答したのが3名(6名中)いた(図7-8)。今回検証したシステムでは、管理者側に生体情報に関するデータを送信することを目的としており、ユーザーへの直接的なフィードバックのメニューは用意されていない。ユーザーの積極的な参加を促すためには、暑熱アラーム受信時に音や振動などの刺激を提示するなどの工夫が必要と思われる。

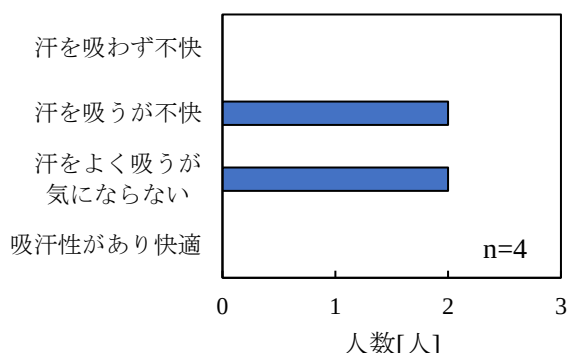


図5 シャツの着用感(吸汗性)に関する結果

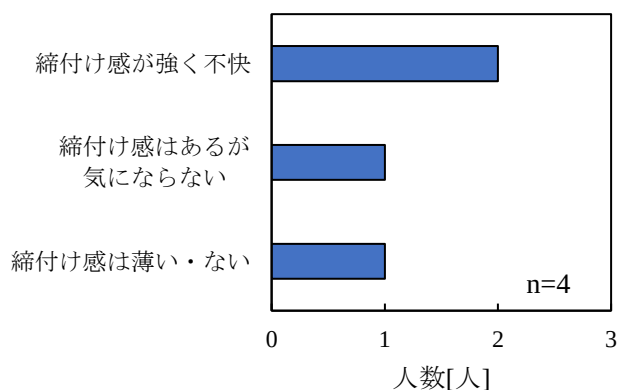


図6 シャツの着用感(締め付け感)に関する結果

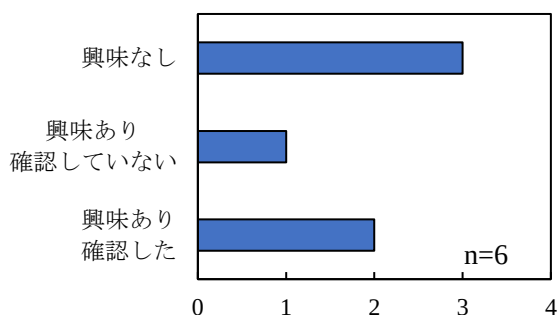


図7 体調管理への意識調査に関する結果

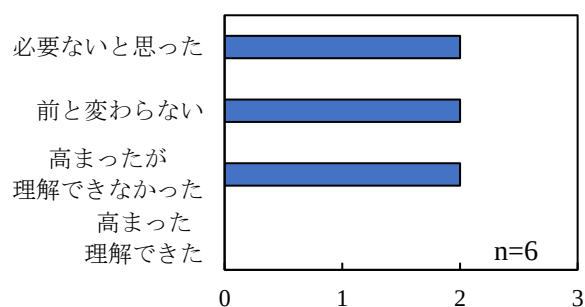


図8 モニタリングへの意識調査に関する結果

D. まとめ

hamon のスマホレスシステムを使用し、参加者7名の計測を実施した。全期間を通じて、計測データを安定して取得することができ、BLE ルータを用いたスマホレスシステムの安定稼働が確認できている。暑熱リスクを示すアラートは、測定から時間が経過した段階で多く発信される傾向があるものの、自覚症状がない場合でも発信される場合が見受けられた。「シャツ型ウェアラブルデバイスによる暑熱作業リスク評価の検証」による報告書の中で、本システムの暑熱リスクの検出精度は、心拍数の測定精度に影響されていることが示されており、シャツ型ウェアラブルデバイスの着用感(密着性)や参加者の運動強度による心拍数の測定精度への影響など引き続きのモニタリングが必要と思われる。シャツの着用感については改善が求められるが、前述のとおり生体計測データの測定精度を安定させるためには、体にフィットしたサイズを選定する必要があるため、シャツを着るのに抵抗があるユーザーには腕時計型センサーを用いたモニタリング等を視野に入れる必要があるかもしれない。また、参加者の多くが体調管理やモニタリングに対する興味が少なかったことから、熱中症に関する計測項目だけではなく、ユーザーの関心が高い項目(疲労や眠気)を追加した方が、本システムの導入増加につながる事が推察された。

E. 参考文献

- 1) MITSUFUJI 株式会社. “サービス紹介”. <https://www.mitsufuji.co.jp/service/>, (参照 2021-1/29)

I. 健康危険情報

なし

J. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

K. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧

<邦文雑誌>

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
丸山崇、山田晋平、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭「企業における熱中症対策の現状と先進事例」健康管理：第 67 巻 8 号 p2-10 2020 年					

労災疾病臨床研究事業費補助金
令和 2(2020)年度 総括研究報告書

熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサーの活用と
効果的な熱中症予防法の検証(180801-01)

令和 3 (2021) 年 3 月

研究代表者 丸山 崇
産業医科大学 医学部 第 1 生理学
〒807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘 1-1

