

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)

令和元(2019)年度 総括研究報告書

研究代表者 丸山 崇

令和2(2020)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活用の可能性 丸山崇、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. 暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討 丸山崇、山田晋平、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	6
別添資料	11

2. 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 八谷百合子、丸山崇、山田晋平、黒坂知絵、上田陽一、東敏昭	18
別添資料	26

3. シャツ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 山田晋平、丸山崇、黒坂知絵、八谷百合子、上田陽一、東敏昭	29
別添資料	34

III. 研究成果の刊行に関する一覧	61
--------------------	----

熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサー活用の可能性

研究代表者： 丸山 崇 産業医科大学 医学部 第1生理学 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。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(厚生労働省「業務上疾病発生状況等調査」)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(令和元年5月17日厚生労働省発表、確定値)。熱中症予防対策として、作業時間の短縮などの作業管理、空調の導入などの作業環境管理、労働衛生教育による普段からの健康管理の呼びかけや補水や休憩など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。

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。

当研究課題では、平成30年度(2018年度)に、「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ウェアラブルセンサー(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、ウェアラブルセンサー(IoT機器)導入の効果や課題なども把握出来た。

2018年度の調査で抽出されたウェアラブル機器の中から、発売元企業の協力が得られた2種類のウェアラブル機器(腕時計型1機種、シャツ型1機種)を用いて、2019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「熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験」を行った。

この実験で、「①暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討」により、実験系の妥当性と生体データの変化を検討し、「②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」及び「③シャツ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」にて腕時計型及びシャツ型のウェアラブル機器による熱中症予防対策への有用性を検討した。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唆された。

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）

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（産業医科大学学長研究室）

研究協力者

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）

江口 泰正（産業医科大学産業保健学部人間情報科学）

A. 研究の背景および目的

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体調変化を早期に捉え、熱中症予防に利用できるデバイスも上市されている。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。

当研究課題では、2018年度に、「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ウェアラブルセンサー（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、ウェアラブルセンサー（IoT機器）導入の効果や課題なども把握出来た。

2018年度の調査で抽出されたウェアラブル機器の中から、発売元企業の協力が得られた2種類のウェアラブル機器（腕時計型1機種、シャツ型1機種）を用いて、2019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「熱中症対策に用いられるウェアラブルセンサーの実証実験」を行った。

この実験で、「①暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討」により、実験系の妥当性と生体データの変化を検討し、「②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」及び「③シャツ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」にて腕時計型及びシャツ型のウェアラブル機器による熱中症予防対策への有用性を検討した。

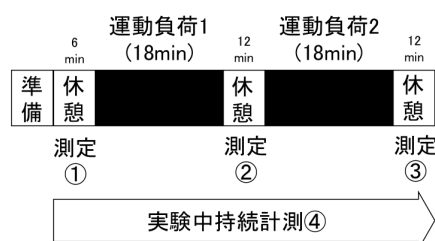
暑熱環境下の運動負荷試験で、一定の熱中症リスクを高める実験モデルを確立し、同時に2種類のウェアラブル機器を装着して各種生体データと比較することによって、ウェアラブル機器による熱中症予防の有効性に関して検討した。

B. 研究方法

実験は、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℃）の環境で、トレッドミルにて80W相当（きつい肉体労働レベル）の運動負荷を18分×2回行った。

心電、深部体温、自覚的運動強度（ボルグスケール）、負荷前後の体重、採血・採尿検査等を行なった。（詳細分担研究報告にて後述）

<人工気候室環境:気温35℃/25℃、湿度50%>



「①暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討」
（研究担当：丸山崇）では、暑熱環境下での運動負荷による生体データ（心拍数、深部体温、自覚的運動強度（ボルグスケール））の変化や運動負荷前後のデータ（体重、血液検査所見、尿検査所見）等を比較し、実験系の妥当性や安全性を検討した。

「②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」（研究担当：八谷百合子）では、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機器を装着し、同時に各種生体データを計測することで、ウェアラブル機器システムによる評価データと各種生体データを比較することで、熱中症予防対策への有用性を検討した。

「③シャツ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」（研究担当：山田晋平）では、暑熱環境下運動負荷実験において、シャツ型ウェアラブル機器を装着し、同時に各種生体データを計測することで、ウェアラブル機器システムによる評価データと各種生体データを比較することで、熱中症予防対策への有用性を検討した。

尚、当研究の実施内容は、産業医科大学倫理委員会の承認と利益相反委員会での審査を受けた上で実施された。

C. 研究結果

被験者の協力のもと、成人健康男性 12 人（年齢 21～42）より、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 条件での生体データが計測された。また、同時に腕時計型及びシャツ型のウェアラブル機器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た。（詳細分担研究報告にて後述）

ただし、直腸温による深部体温測定は、被験者 1 名について測定不可能であったため、11 例の測定と

なった。また、実験中及び実験後に熱中症により体調不良となる被験者はいなかった。

D. 考察及び結論

「①暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討」では、熱中症リスクを評価するための実験として、人工気候室において暑熱環境下での運動負荷実験を行い、気温 35℃ 湿度 50% の環境条件において、アメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）の示す、Heat Strain（暑熱ストレイン、熱緊張）の状態を被験者の安全を確保しながら再現出来た。この実験モデルは人工気候室での集中的な運動負荷をかける特殊な条件であるが、熱中症リスクの予測や予防対策の有効性を検証する実験モデルとして一定の妥当性があると考えられた。この実験での環境条件は、気温 35℃ 湿度 50%（WBGT30℃）という特殊な環境である。本来の作業現場では、作業負荷自体を軽減し、まず WBGT を低下させるための作業環境管理が必要であるが、近年の猛暑による日中の気温上昇では十分にあり得る環境条件である。実際の作業現場では、このような環境で作業が必要になる場面も想定する必要があると考えられる。

「②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」では、Heat Strain（暑熱ストレイン、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できた。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。

「③シャツ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」では、暑熱負荷がない（暑くない）実験条件においても、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

高い条件においては、ウェアラブルデバイスの評価結果は、直腸温、心拍数、ボルグスケール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。

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

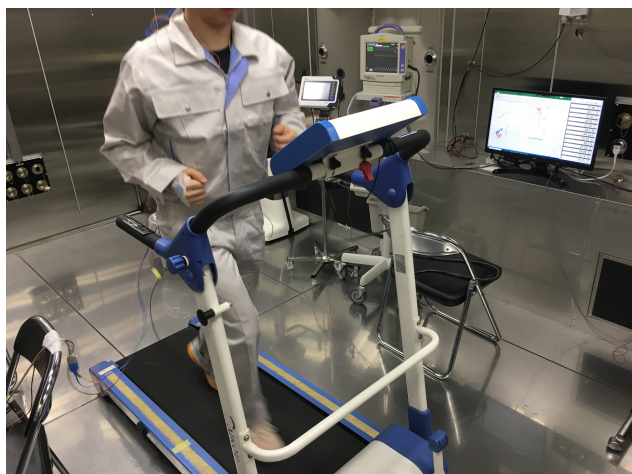
2. 実用新案登録

なし

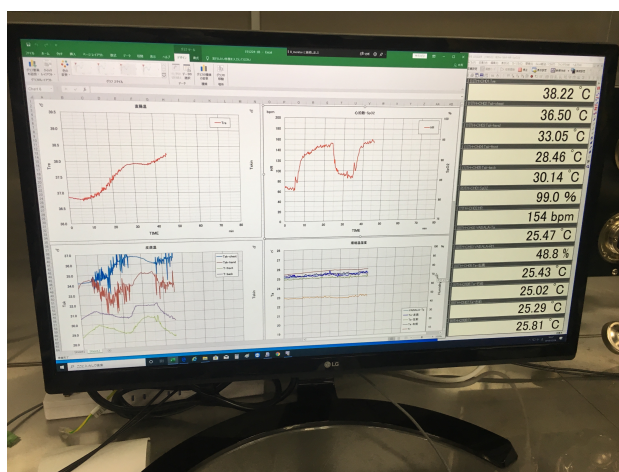
3. その他

なし

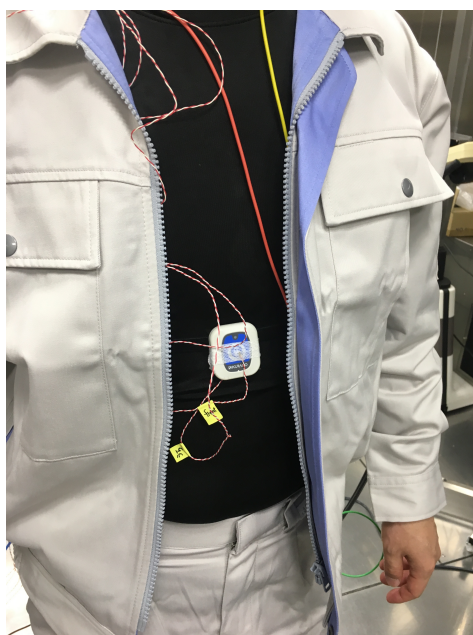
＜参考資料 1＞ 産業医科大学人工気候室における実験写真



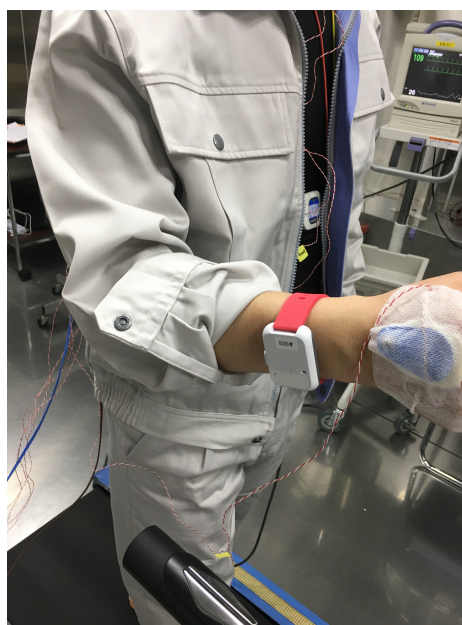
トレッドミルによる運動負荷



深部体温（直腸温）、心拍等の連続測定



シャツ型ウェアラブル機器の装着



腕時計型ウェアラブル機器の装着

暑熱環境下運動負荷時の生体データ変化検討

研究代表者： 丸山 崇 産業医科大学 医学部 第1生理学 准教授

研究要旨：

熱中症は、時に生命に関わることもある病態であり、効果的な熱中症予防法を見出し、暑熱労働現場で働く労働者の労働衛生管理に役立てることが求められている。これまで、日々の体調管理、作業前の体調確認、飲水の励行、電解質の摂取、適切な休憩等の熱中症予防対策が行われており、最近では、インターネット通信技術の発展やセンサー技術の発展に伴い、Internet of Things (IoT) 技術を用いて、体調変化を推測し、熱中症予防に応用出来るウェアラブル機器の開発が進んできている。これら熱中症予防対策の実効性を検証するために、人工的に暑熱環境を作り、被験者に運動負荷を与えた際の生体データを計測することによって、熱中症リスクの予測が可能であるか、また熱中症リスクを低下させることに繋がるかどうかのエビデンスが得られるものと考えられる。まずここでは、暑熱環境下での運動負荷実験を行ない、その際の生体データの変化を検討することによって、熱中症リスク評価に用いる実験モデルの確立について検証した。

実験は、成人健康男性12名に被験者として協力を頂き、産業医科大学人工気候室において、各被験者がそれぞれ条件1 > 気温35℃、湿度50%、< 条件2 > 気温25℃、湿度50%の2つの環境条件で、トレッドミルによる運動負荷実験をおこなった。運動負荷前から、心電図、深部体温（直腸温）、血圧、脈派等を持続測定し、暑熱運動負荷の前後において、脱水の指標となる精密体重測定や採血・採尿検査を行ない、生体データの変化を検討した。尚、被験者の安全を考慮し、深部体温が38.5℃を超えた時や頭痛、嘔気など何らかの身体症状が出現した際には運動負荷を中止する基準を設けて実施した。

気温 35℃湿度 50%の環境条件において、10/11 例で深部体温は 38.5℃に達し、また全例で心拍数が（180-年齢）まで増加した。また、体重による脱水評価に関しても平均で体重の 1.75%の減少が見られ、アメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）が示す、Heat Strain（暑熱ストレイン）の状態を再現出来ていることを確認した。また、血液及び尿検査では、25℃条件においては、血中アルドステロン、血中 HANP、尿中アングiotensin 2 で有意な変化が認められ、35℃条件においては、血中総蛋白 (TP)、血中アルブミン (Alb)、血中中性脂肪 (TG)、血中 Na (ナトリウム)、血中 Cl (クロール)、血中 K (カリウム)、血中浸透圧、血中抗利尿ホルモン (AVP)、血中 HANP、尿中アングiotensin 2 において有意な変化が認められた。ヘマトクリットや尿酸など一般的な脱水評価の指標では有意な差は認められなかったにもかかわらず、血中総蛋白 (TP)、血中アルブミン (Alb)、ペプチドホルモン等において変化が見られていることから、暑熱環境での身体負荷による変化を早期に反映する生理指標として重要な知見を得ることが出来た。また、この実験において、熱中症症状を呈する被験者は認めなかった。

今回用いた人工気候室での暑熱環境下運動負荷実験は、熱負荷や脱水による生体の変化を安全に再現することが可能であり、この実験モデルを用いて、ウェアラブルデバイスなどによる熱中症リスクの予測や予防対策の有効性を検証する実験が可能となると考えられた。

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）

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（産業医科大学学長研究室）

A. 研究の背景および目的

熱中症は暑熱環境において労働などの身体活動を行うことにより、脱水や電解質の喪失、深部体温の上昇などの身体影響が引き起こされ、時に生命の危機に至ることもある病態である。暑熱環境の作業現場では、日々の体調管理、作業前の体調確認、飲水の励行、電解質の摂取、適切な休憩等の熱中症予防対策が行われており、最近では、インターネット通信技術の発展やセンサー技術の発展に伴い、Internet of Things (IoT) 技術を用いて、体調変化を推測し、熱中症予防に応用するウェアラブル機器の開発が進んできている。これらの予防策の効果を検討するためには、ほぼ同じ条件の下に暑熱環境で熱ストレスを身体に孵化した際の身体変化を測定しながら、各対策の効果を実証することが必要になってくる。

今回、我々は人工的に暑熱環境を作ることの出来る実験室環境で運動負荷をかけることにより、熱ストレスに対する身体反応を計測し、熱中症予防対策の検証に資する実験系の妥当性を検討した。

B. 研究方法

a. 暑熱環境における運動負荷実験

被験者は健康成人男性とした。産業医科大学人工気候室（エスペック）において、＜条件1＞気温 35℃、湿度 50%（暑熱環境）、＜条件2＞気温 25℃、湿度 50%の2条件で、同一被験者がそれぞれ別の日程で

実験を行った。各条件における実験スケジュールは、6分間の安静+18分間運動負荷+12分安静+18分間運動負荷+12分安静とした。運動負荷の強度は、時速 7km（きつい労力：80w 相当）とし、事前に最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）を測定し 70% $\dot{V}O_{2max}$ 以下になるように設定した。

b. 測定項目

[測定①、測定②、測定③]

（運動負荷前後の休憩時間で測定）

- ・体重、体組成、覚醒度、自覚的運動強度
- ・血液検査、尿検査

[持続生体指標測定④]

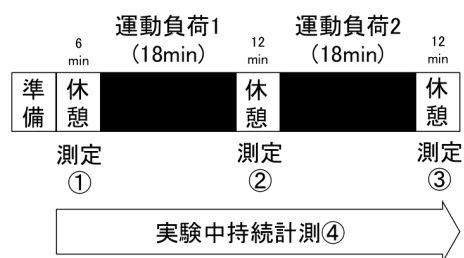
深部体温（直腸温/カプセル体温計）

血圧、心拍、脈波、血中酸素濃度

皮膚温、ボルグスケール（自覚的運動強度）

環境測定：WBGT 等

＜人工気候室環境：気温35℃/25℃、湿度50%＞



c. 中止基準

深部体温が 38.5 度を超える/痙攣が起きる/激しい頭痛/めまい/嘔気嘔吐/目の前が暗くなる/意識障害が出現した場合には、即時実験を中止することとした。

c. 分析

深部体温に関しては、計測不良のあった 1 例（被験者 2）を除外した。統計解析には JMP バージョン 11.0（SAS Institute Inc.）を使用し、有意水準は 5%とした。

尚、当実験は、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

実験対象者

成人健康男性：12 人（年齢 21～42）×2 条件

〈環境条件 1〉 低リスク（注意レベル、気温 25℃湿度 50% WBGT22℃）

〈環境条件 2〉 高リスク（厳重警戒レベル、気温 35℃湿度 50% WBGT30℃）

〈運動負荷〉トレッドミル 80W（きつい肉体労働レベル）18 分×2 回

a. 心拍、深部体温、自覚症状の変化

トレッドミルによる運動負荷により、心拍数、深部体温、ボルグスケールは、いずれも値が上昇した。心拍数は、運動負荷と同時に上昇し、個人毎の最高心拍数の平均は、25℃条件でベースライン平均の 76.1/min と比べ、約 109.1%の上昇、35℃条件でベースライン平均の 82.8/min と比べ、約 106.8%の上昇を認めた。また、運動負荷後の安静期間に心拍数の低下を認めるものの、ベースラインに比べ、運動負荷間インターバルの安静時間において 25℃条件で平均値 101.9/min で 33.9%、35℃条件で平均値 117.1/min で 41.4%、運動負荷終了後の安静時間においては 25℃条件で平均値 104.9/min で 37.7%、35℃条件で平均値 128.4/min で 55.0%の心拍上昇を認めた。熱負荷の一指標である、(180-年齢)を超えた被験者は、25℃条件で 7/12 例(58.3%)、35℃条件で 12/12 例（100%）であった。

直腸温による深部体温測定は、被験者 1 名について測定不可能であったため、11 例の測定となった。深部体温は、運動開始後軽度低下を認める事例もあったが、運動負荷とともに徐々に上昇し、運動負荷間インターバルの安静時にもほとんど低下せず、運動負荷終了まで上昇傾向を認めた。深部体温が 38.5℃に達した際には、速やかに運動負荷を中止し、安静に移行した。被験者毎の深部体温の平均は、25℃条件でベースラインの 37.1℃と比べ、約 0.7℃の上昇、

35℃条件でベースラインの 37.1℃と比べ、約 1.4℃の上昇を認めた。個人毎に観察した際に、気温 25℃条件では、深部体温 38℃を超えた事例は 9/11 例（81.8%）、深部体温 38.5℃を超えた事例は 4/11 例（36.3%）であった。気温 35℃条件では、深部体温 38℃を超えた事例は 11/11 例（100%）、深部体温 38.5℃を超えた事例は 10/11 例（90.9%）であった。ボルグスケール（自覚的運動強度）は、20 段階で評価され、19/20 を超えた際には速やかに運動負荷を中止し、安静に移行した。運動負荷をかけると徐々に自覚的運動強度は上昇し、安静時には低下するという傾向が見られた。

25℃条件において、前半の運動負荷で平均 14 まで上昇、後半の運動負荷で平均 14.2 まで上昇が認められた。35℃条件においては、前半の運動負荷で平均 13.5 まで上昇、後半の運動負荷で平均 14.8 まで上昇が認められた。自覚的に 17（かなりきつい）のレベルを超えた事例は、25℃条件において 3/12 例(25.0%)、35℃条件において 5/12 例（41.0%）であった。

b. 体重変化

精密体重計を用いて、運動負荷（安静時間含む）前後の体重測定を行い、脱水の指標とした。

平均体重は、25℃条件において運動負荷前 63.12kg ±2.1、運動負荷後 62.44±2.053 であり、体重差平均は 0.68kg(体重比 1.08%)であった。35℃条件においては運動負荷前 63.48kg±2.16、運動負荷後 62.37 ±2.08 であり、体重差平均は 1.11kg(体重比 1.75%)であった。体重の 1.5%以上の体重減少を認めた事例は、25℃条件において 1/12(8.3%)、35℃条件において 8/12(66.7%)であった。

c. 血液・尿データ

運動負荷の前後において、採血及び採尿検査を行った。尚、運動負荷の前後において、補水は行っていない。

25℃条件において有意な増減が見られた項目は、血中アルドステロン、血中 HANP、尿中アングiotensin 2 (クレアチニン換算値) であり、35℃条件において有意な増減が見られた項目は、血中総蛋白(TP)、血中アルブミン(A1b)、血中中性脂肪(TG)、血中 Na (ナトリウム)、血中 Cl (クロール)、血中 K (カリウム)、血中浸透圧、血中抗利尿ホルモン(AVP)、血中 HANP、尿中アングiotensin 2 (クレアチニン換算値) であった。

D. 考察

今回、人工気候室において、2つの異なる温度環境の下、運動負荷を行ない、生体データを測定することで、暑熱環境が生体に及ぼす影響を評価した。アメリカ産業衛生専門家会議 (ACGIH) は、熱中症に至る前のHeat Strain (暑熱ストレイン、熱緊張) の状態の基準として、

①深部体温が38.5℃を超える場合 (暑熱順化出来ない場合や高齢者は38.0℃を超える場合)

②体重変化が体重の1.5%を超えて減少している場合

③脈拍 (心拍数) が、3分以上継続して (180-年齢) を超える場合

を示している。

これに、自覚症状として、強い疲労感、頭痛、めまい、嘔気などの訴えがある場合を加えて、熱中症のリスクが高くなるHeat Strain (暑熱ストレイン) の状態と考えることが出来る。当実験では、自覚症状に関してボルグスケール (自覚的運動強度) を用いて評価した。今回の実験では、25℃条件では、8/12事例 (約67%) でHeat Strainの状態となり、35℃条件では、10/10全例Heat Strainの状態に至ったことが確認出来た。しかし、深部体温や心拍数、自覚的運動強度は上昇したものの、痙攣が起きる/激しい頭痛/めまい/嘔気嘔吐/目の前が暗くなる/意識障害等の重篤な症状を呈する被験者は認めなかった。今回の実験モデルは、暑熱環境で運動負荷をかけた際に、熱中症リスクが高くなるHeat Strain (暑熱ストレイン) の状態を安全に作り出すための負荷やタイムスケジ

ュールとして適切であったと言える。この実験モデルにおいて、ウェアラブル機器によるデータ取得を同時に行ない、暑熱環境下の熱ストレスの影響を評価するアプリケーションが、適切にリスク評価出来ているかの相関を検討することにより、各ウェアラブル機器及び評価システムの有用性を検証することができると考えられた。

今回の実験で、深部体温や心拍数、ボルグスケールに関して、ベースラインの個人差が大きいことも観察された。本来は、ベースライン測定や定常時のデータを元に個人特性に合わせた解析が行われることが理想であり、今後はテーラーメイドのシステムも導入されてくると考えられるが、運動負荷がかかった場合の変化はどの被験者においてもほぼ同様に認められたため、一律の評価方法でも熱中症予防に対する一定の評価の有用性はあると考えられる。

血液及び尿検査から得られたデータの解析では、25℃条件では、血中アルドステロン、血中HANP、尿中アングiotensin 2などのペプチドホルモンのみ有意な変化を認めた。35℃条件では、これに加え総蛋白、アルブミン、血漿浸透圧などの指標において有意な変化を認めた。ペプチドホルモンは測定は容易ではないが、熱ストレスや脱水の影響を早期に見つけるには良い検査項目であることが考えられる。また、一般に脱水の指標となる血液検査項目は、マトクリット、尿素窒素/クレアチニン比、尿酸値などが知られているが、今回の研究結果では暑熱環境での運動負荷による有意な変化は示していない。平均体重変化では、35℃条件において、体重の1.5%以上の減少を認めており、脱水は進んでいると考えられるが、血液データには反映されていないことが示唆された。また、熱中症重症度の指標となる肝機能などは有意な変化を見せおらず、今回の実験モデルでは、過度の熱負荷や脱水が加わった際の熱中症の状態を再現するレベルではなかったと考えられる。

E. 結論

- ・ 熱中症リスクを評価するための実験モデルとして、人工気候室において暑熱環境下での運動負荷実験を行った。
- ・ 気温35℃湿度50%の環境条件において、Heat Strain (暑熱ストレイン) の状態を再現出来た。
- ・ 血液及び尿検査で熱負荷や脱水による変化を観察することが出来た。
- ・ この実験モデルを用いて、ウェアラブルデバイスなどによる熱中症リスクの予測や予防対策の有効性を検証する実験が可能となると考えられた。

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

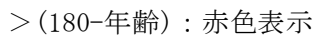
なし

暑熱環境での運動負荷実験

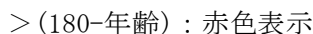
＜被験者身体特性＞

被験者No.	環境条件	実験日	性別	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
R-001	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/9/27 2019/9/30	男	23	176.5	74.6
R-002	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/10/7 2019/10/8	男	24	172	75.3
R-003	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/10/29 2019/12/17	男	22	180	59.5
R-004	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/24 2019/11/15	男	42	165	61.6
R-005	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/11/21 2019/12/4	男	22	178	65.7
R-006	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/2 2019/12/13	男	27	168	58.8
R-007	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/2 2019/12/6	男	25	160	52.8
R-008	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/3 2019/12/6	男	24	178	61
R-009	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/9 2019/12/11	男	22	177	63
R-010	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/9 2019/12/13	男	22	175	70.6
R-011	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/11 2019/12/18	男	21	171	59.6
R-012	気温 25℃、湿度 50% 気温 35℃、湿度 50%	2019/12/12 2019/12/19	男	21	169	54.3

〈気温 25℃湿度 50% 条件〉



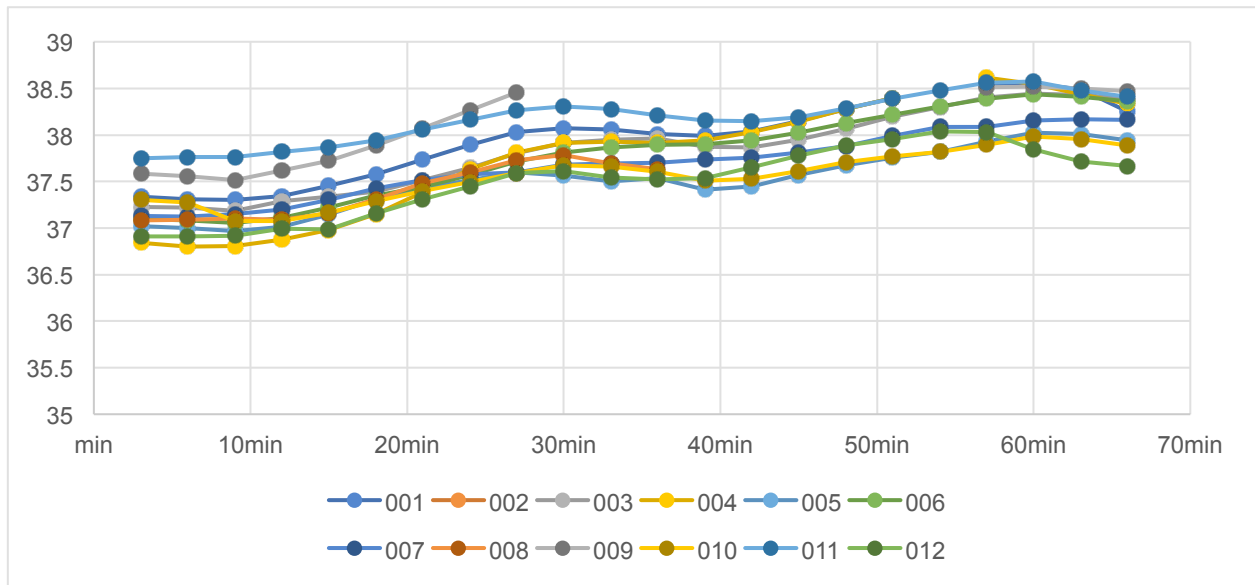
〈気温 35℃湿度 50% 条件〉



-12-

深部体温（直腸温）

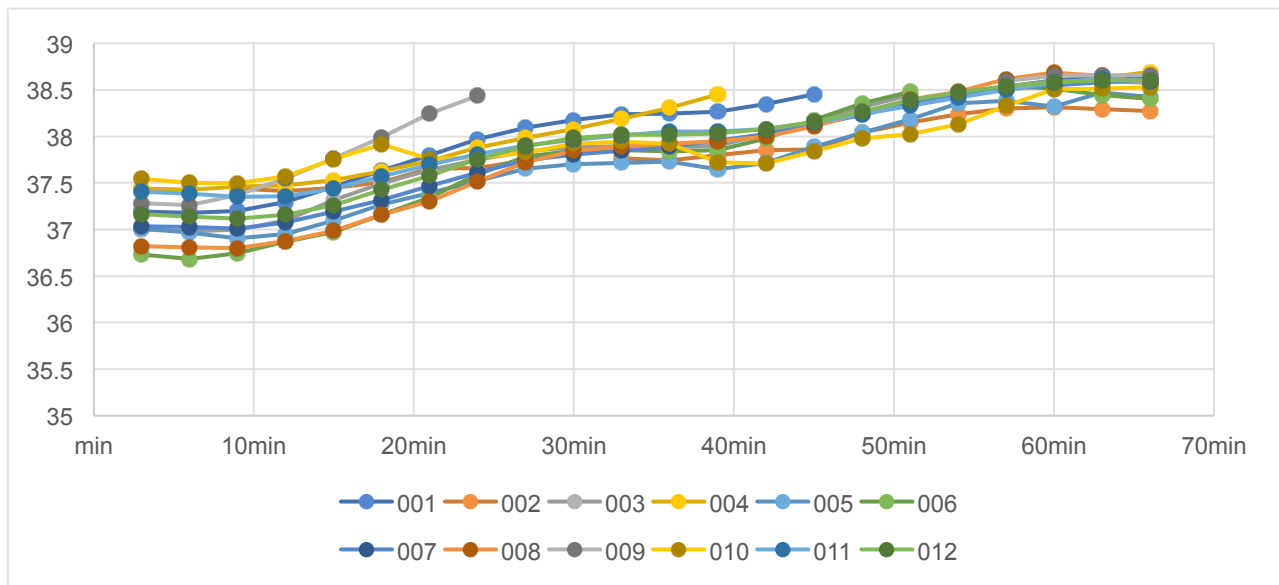
＜気温 25℃湿度 50% 条件＞



>38.0℃ : 黄色表示 >38.5℃ : 赤色表示

	作業前安静		トッド30分										トッド30分										作業後安静	
	30分	60分	90分	120分	150分	180分	210分	240分	270分	300分	330分	360分	390分	420分	450分	480分	510分	540分	570分	600分	630分	660分		
001	37.23887196	37.30887449	37.20055491	37.34333271	37.45333271	37.57444363	37.73555459	37.89166599	38.02999999	38.07110977	38.05777677	38.01333278	37.99333212	38.0388787	38.14999898	38.27888849	38.38822259		38.54777729	38.54999799	38.49555492	38.55444411	38.254447	
002	37.22499889	37.21666569	37.18277774	37.29111051	37.33887774	37.39277713	37.51444372	37.64722125	37.80333265	37.91444333	37.95111105	37.96333122	37.87444305	37.8688878	37.84833247	38.06332445	38.18833226	38.29944377	38.40499947	38.44722197	38.42833222	38.39055443		
003	36.83844405	36.80055491	36.80611017	36.87777771	36.97811025	37.15888807	37.38222122	37.63111103	37.80999904	37.91110992	37.93111081	37.81388808	37.84222111	38.03333244	38.14444331	38.27722124	38.38769158		38.51333291	38.54722197	38.43444358	38.33499889		
004	37.01999919	36.99666574	36.96722137	37.01277769	37.14555444	37.30944358	37.42666584	37.51722168	37.59888861	37.64999905	37.49944327	37.53055448	37.40999964	37.44699907	37.57055473	37.67166583	37.75277771	37.81944381	37.92999892	38.02333261	38.01388825	37.94499905		
005	37.98444364	37.0788838	37.05333263	37.11111069	37.21666559	37.46888819	37.57055473	37.7116659	37.81166593	37.86888801	37.89944378	37.86999938	37.84938818	38.021666	38.12466624	38.21888818	38.30832444	38.38811005	38.43832269	38.45066495	38.39777699			
007	37.32000473	37.1266655	37.14888785	37.18999849	37.30055449	37.42666529	37.5149996	37.57999909	37.59722974	37.68111017	37.69666629	37.69444324	37.73333271	37.75333235	37.80999925	37.88277647	37.98833296	38.08333272	38.18555474	38.15499978	38.18333263	38.16777634		
008	37.08222135	37.08166527	37.105555	37.08999908	37.15833292	37.31222132	37.48333295	37.60055438	37.72777706	37.78277715	37.68444323	37.63555442	35.98555461	33.03944376	32.7355548	32.83777703	31.98999915	31.90333282	33.5883326	35.11611027	35.58222136	35.82499928		
009	37.58111021	37.55944337	37.5127769	37.61999938	37.72444344	37.88944308	38.0711102	38.26333259	38.45722114											38.51333291	38.5188888	38.50166586	38.46999888	
010	37.30499894	37.2727765	37.07333294	37.07555474	37.16555468	37.28111078	37.40055487	37.49444368	37.59055456	37.67866582	37.66055425	37.80333252	37.50722165	37.52777714	37.61055438	37.70611085	37.7683328	37.81888813	37.89499919	37.98166551	37.95222155	37.88666471		
011	37.74666532	37.76444372	37.76333237	37.81555494	37.86611027	37.9444436	38.05666427	38.16333241	38.26222144	38.36888708	38.27888849	38.26999881	38.15444332	38.14499853	38.18722132	38.28388765	38.39055443	38.48055478	38.58333293	38.5777769	38.47777642	38.40888785		
012	36.91333199	36.90833198	36.91944377	36.98388822	36.98833254	37.15499943	37.30944379	37.44666672	37.58944321	37.81388751	37.53999943	37.51999962	37.534999	37.65611055	37.77722147	37.88633258	37.95499903	38.03777718	38.03888768	37.8438888	37.7183325	37.64999922		

＜気温 35℃湿度 50% 条件＞

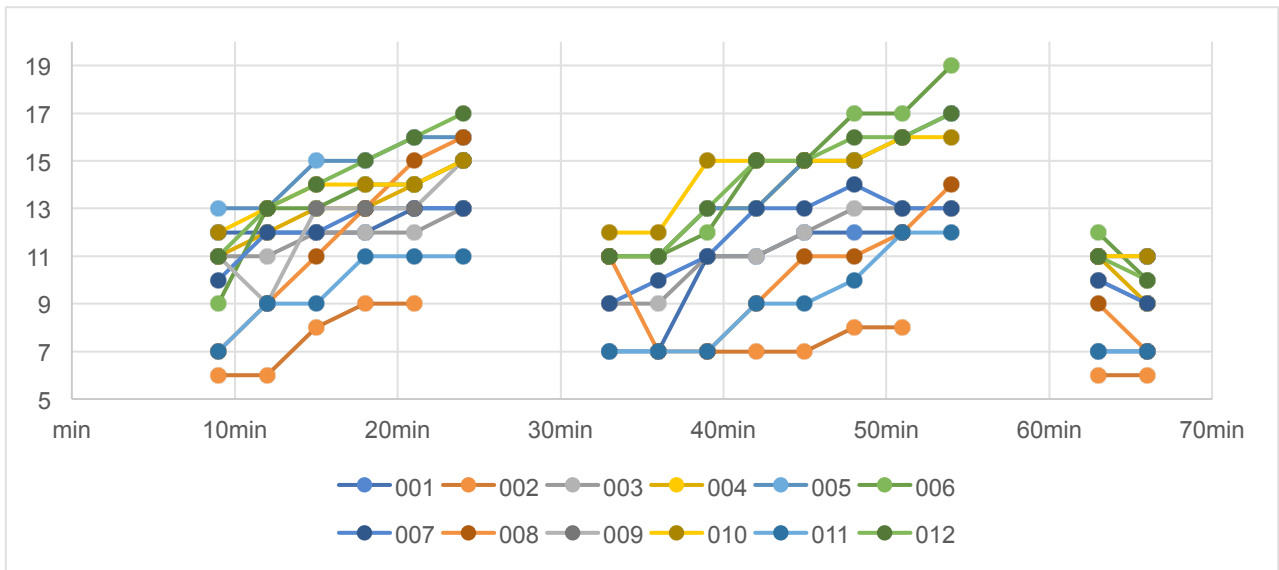


>38.0℃ : 黄色表示 >38.5℃ : 赤色表示

	作業前安静		トッド30分										トッド30分										作業後安静	
	30分	60分	90分	120分	150分	180分	210分	240分	270分	300分	330分	360分	390分	420分	450分	480分	510分	540分	570分	600分	630分	660分		
001	37.18999847	37.17666562	37.19999886	37.29277653	37.63444353	37.78777675	37.86777704	38.09111029	38.17666562	38.23722089	38.24222098	38.26777734	38.24722116	38.45285806					38.53555467	38.60444344	38.63388967	38.64918928		
002	36.95966617	36.97555394	36.99944327	37.09722137	37.31499847	37.49722143	37.63666556	37.74999978	37.84166569	37.86110957	37.89444268	37.88277688	37.90277693	38.02555445	38.1722215	38.31499905	38.44333246		38.5333324	38.59444364	38.59833292	38.57186659		
003	37.43666628	37.4272213	37.45833206	37.41499847	37.52888785	37.62222078	37.73722119	37.87888781	37.95555417	38.07999886	38.18833245	38.30722152	38.4595542						38.6166659	38.67222109	38.69999859	38.69777698		
005	37.00999917	36.98444321	36.90499857	36.85277659	37.08611063	37.26866529	37.38944372	37.52111032	37.702221	37.71555413	37.73166574	37.64666578	37.71222132	37.80777699	38.03555425	38.17844353	38.35666538	38.58222059	38.73277701	38.74333262	38.42333244			
007	36.73444366	36.80955517	36.74444347	36.705554	36.91499975	37.15722189	37.34111044	37.59110981	37.78055445	37.84033272	37.82222158	37.8366659	37.85166555	37.87722138	38.14444377	38.25277727	38.47899927		38.53833292	38.53833292	37.79444311	38.3994431		
008	37.02666645	37.02444394	37.00333299	37.07777732	37.14444336	37.31833232	37.48333265	37.74388801	37.80333265	37.84666608	37.88222059	37.95388715	38.02555445	38.11999983	38.22888798	38.35499904	38.45799904	38.50444371	38.5555543	38.5555543	38.0333327			
009	36.81888729	36.806110975	36.79888769	36.87222143	36.98777707	37.15499899	37.30499925	37.51666599	37.72055456	37.84333271	37.88388718	37.92166562	37.94722218	37.99555482	38.1099987	38.25444349	38.39777692	38.47799911	38.5177769	38.68499969	38.65055407	38.58999948		
010	37.28222111	37.26166619	37.27333298	37.55166584	37.78222165	37.86666551	38.24111027	38.43666549											38.59722095	38.64887432	38.54444311	38.65888788		
011	37.54166603	37.49833234	37.49722142	37.57222178	37.75333256	37.81333283	37.75277717	37.71666621	37.8272207	37.8388831	37.84388877	37.92333327	37.72444388	37.7055475	37.83555476	37.97611025	38.02611054	38.12833256	38.23555474	38.50277699	38.51166619	38.52777733		
012	37.40333197	37.38166661	37.34722201	37.35611089	37.44055494	37.56777638	37.69277679	37.80999904	37.86444363	38.0944392	38.0505547	38.04944356	38.081111	38.14999877	38.23499913	38.32388814	38.41944334	38.52166554	38.57499885	38.62333171	38.53055519			
012	37.16388766	37.13388803	37.11666595	37.15444395	37.25999938	37.42444399	37.57777659	37.7527771	37.89277649	38.08388799	38.0144435	38.01666641	38.03166623	38.0777768	38.15777673	38.24666556	38.38333231	38.49999995	38.57222149	38.58499889	38.60388801	38.60166593		

ボルグスケール（自覚的運動強度）

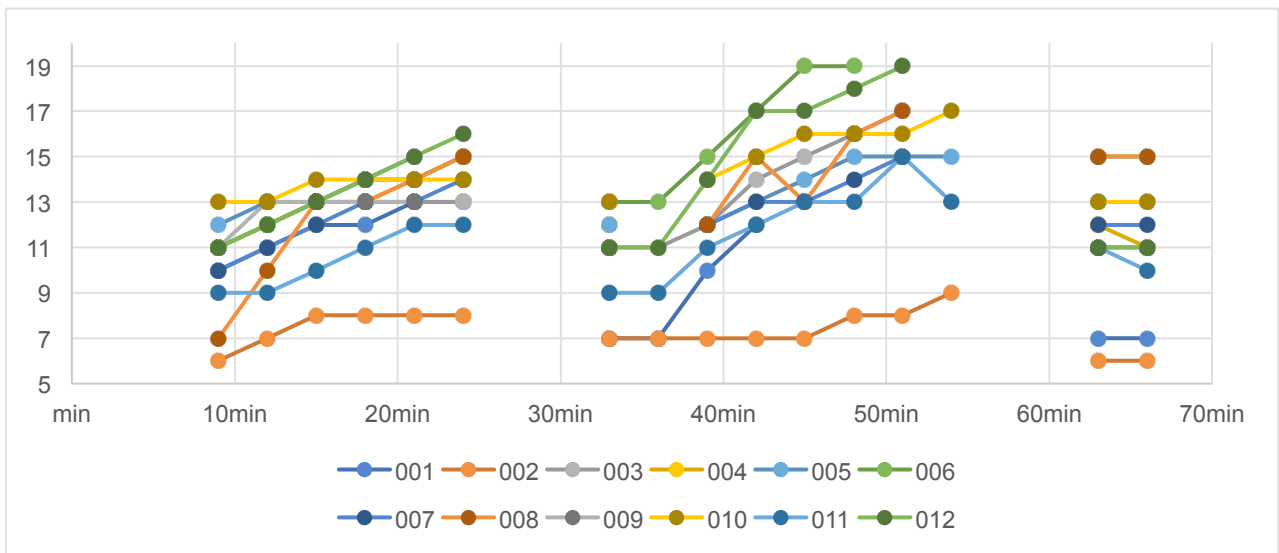
＜気温 25℃湿度 50% 条件＞



>17/20：赤色表示

	作業前安静		トレッドミル1								休憩								トレッドミル2								作業後安静			
	3m n	6m n	9m n	12m n	15m n	18m n	21m n	24m n	27m n	30m n	33m n	36m n	39m n	42m n	45m n	48m n	51m n	54m n	57m n	60m n	63m n	66m n								
001			12	12	12	12	13	13			7	7	11	11	12	12	12				7	7								
002			8	8	8	8	9	9				7	7	7	7	8	8				6	6								
003			11	11	12	12	12	12			9	9	11	11	12	12	13	13			10	9								
004			11	12	13	13	14	14			11	11	13	13	13	15	15				11	8								
005			13	13	15	15	16	16			11	11	13	13	15	15	16	16			11	11								
006			9	13	13	14	14	15			11	11	12	15	15	15	11				12	10								
007			10	12	12	13	13	13			9	10	11	13	13	14	13	13			10	9								
008			7	9	11	13	15	16			11	7	7	9	11	11	12	14			9	7								
009			11	9	12	13	13	15			12	12	15	15	15	15	16	16			11	11								
010			12	13	14	14	14	15			12	12	15	15	15	15	16	16			11	11								
011			7	9	9	11	11	11			7	7	7	9	9	10	12	12			7	7								
012			11	13	14	15	16				11	11	13	15	15	16	16				11	10								

＜気温 35℃湿度 50% 条件＞



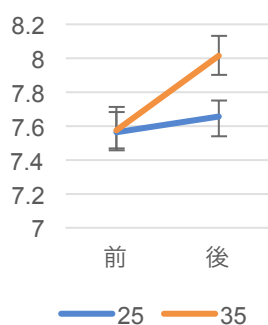
>17/20：赤色表示

	作業前安静				トレッドミル1				休憩				トレッドミル2				作業後安静					
	3m n	6m n	9m n	12m n	15m n	18m n	21m n	24m n	27m n	30m n	33m n	36m n	39m n	42m n	45m n	48m n	51m n	54m n	57m n	60m n	63m n	66m n
001			10	11	12	12	13	13			7	7	10	12	12					7	7	7
002			9		9	9	9				7	7	7	7	7	8	8	9			6	6
003			11	12	13	13	13	13			11	11	12	14	15	15					11	11
004			11	12	13	13	14	15			12	12	12	14	15	15					12	11
005			12	13	13	14	15				12	12	13	14	15	15	15				13	13
006			11	12	13	14	14	15			13	13	15	15	15	15					15	15
007			10	11	12	13	13	14			11	12	12	13	13	14	15				12	12
008			7	10	13	13	14	15			11	7	7	12	16	13	16				15	15
009			11	13	13	13	13	13			12	12	15	15	15	15	16	16			11	11
010			13	13	14	14	14	14			13	13	14	15	16	16	16				13	13
011			9	9	10	11	12	12			9	9	11	12	13	13	15	15			11	10
012			11	12	13	14	15	16			11	11	14	16	16	16	16				11	11

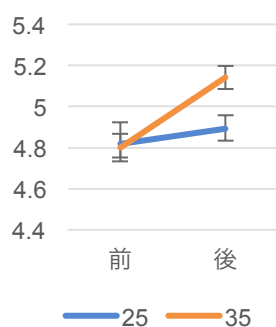
1 血液・尿検査の前後比較

	25°C					35°C				
	Pre		Post		pre vs post p-value	Pre		Post		pre vs pos p-value
	Mean	±SEM	Mean	±SEM		Mean	±SEM	Mean	±SEM	
総蛋白(TP)	7.56	0.15	7.65	0.09	0.59	7.58	0.11	8.02	0.11 **	0.01
HDL-コレステロール	61.73	2.37	63.27	2.74	0.70	60.92	2.86	66.00	2.79	0.18
LDL-コレステロール	105.82	9.30	107.18	9.23	0.92	96.75	8.57	103.83	9.83	0.58
アルブミン(Alb)	4.82	0.11	4.89	0.07	0.51	4.80	0.07	5.14	0.06 **	0.00
総ビリルビン(T-Bil)	0.85	0.11	0.86	0.11	0.90	0.78	0.12	0.79	0.08	0.95
中性脂肪(TG)	90.27	8.31	66.00	6.64	0.22	116.17	21.95	74.17	9.86 *	0.03
総コレステロール(T-Cho)	180.45	8.61	181.73	8.66	0.92	172.92	7.87	182.50	9.33	0.43
尿素窒素(UN)	15.01	0.89	15.77	0.96	0.60	13.71	1.02	14.81	1.05	0.43
クレアチニン	0.86	0.03	0.90	0.03	0.33	0.84	0.03	0.91	0.03	0.09
尿酸(UA)	5.80	0.39	6.05	0.41	0.66	5.78	0.36	6.30	0.37	0.34
Na(ナトリウム)	140.18	0.33	141.00	0.36	0.18	140.58	0.43	141.92	0.48 *	0.02
Cl(クロール)	102.82	0.64	104.27	0.60	0.08	102.58	0.51	104.83	0.51 *	0.01
K(カリウム)	4.39	0.07	4.38	0.06	0.92	4.18	0.05	4.38	0.07 *	0.03
AST(GOT)	20.91	1.69	21.64	1.71	0.70	19.17	0.84	21.25	0.82	0.25
ALT(GPT)	17.45	1.68	17.82	1.68	0.88	15.50	1.56	16.75	1.57	0.58
LD(LDH)	170.64	8.34	176.64	8.29	0.59	171.42	6.84	190.25	7.46	0.09
アルカリホスファターゼ(ALP)	227.55	17.61	219.09	14.79	0.89	223.00	13.90	222.50	11.88	0.41
γ-GTP	18.18	1.33	18.45	1.06	0.89	18.33	1.43	19.83	1.35	0.41
コリンエステラーゼ(ChE)	323.91	16.36	326.36	17.17	0.92	322.42	17.06	340.42	19.41	0.46
浸透圧	283.73	0.97	284.64	0.82	0.43	282.17	0.73	286.00	0.65 **	0.00
白血球数(WBC)	5436.36	388.07	5700.00	391.73	0.59	5283.33	227.91	5608.33	338.10	0.49
赤血球数(RBC)	518.09	6.05	519.55	6.66	0.90	513.33	9.29	527.33	8.35	0.20
血色素量(Hb)	15.76	0.18	15.81	0.17	0.87	15.62	0.21	16.08	0.20	0.09
ヘマトクリット(HT)	46.81	0.50	46.55	0.48	0.77	46.71	0.70	47.55	0.67	0.32
MCV	90.39	0.82	89.65	0.80	0.36	91.07	0.71	90.23	0.77	0.12
MCH	30.44	0.25	30.45	0.28	0.98	30.46	0.26	30.52	0.23	0.87
MCHC	33.67	0.20	33.95	0.19	0.37	33.46	0.23	33.82	0.23	0.24
血小板数	27.48	0.91	28.48	0.84	0.46	26.95	0.97	29.24	0.98	0.08
グルコース	94.00	2.29	90.00	3.27	0.36	91.08	4.15	97.67	1.61	0.12
乳酸	11.15	1.82	11.16	1.23	0.99	11.18	1.37	13.77	1.59	0.23
抗利尿ホルモン(AVP)	3.13	0.90	4.14	1.23	0.56	3.35	1.00	6.82	1.48 *	0.04
コルチゾール	11.78	0.44	8.92	1.39	0.11	12.66	1.04	13.81	1.62	0.50
アルドステロン	262.91	22.60	453.55	41.85 **	0.00	244.42	21.80	542.50	39.29 **	<.0001
クレアチニン	185.79	49.29	244.35	40.52	0.31	120.61	27.15	194.77	40.74	0.20
Na(ナトリウム)	107.92	19.38	122.50	14.97	0.53	100.67	16.02	101.67	14.70	0.97
Cl(クロール)	116.67	19.37	161.25	17.61	0.10	116.42	19.50	135.67	18.37	0.47
K(カリウム)	44.49	8.49	89.14	17.43	0.87	417.12	380.80	65.25	12.29	0.20
尿中浸透圧	707.58	91.67	833.17	66.01	0.30	578.08	95.11	629.17	83.19	0.67
アケアリン2濃度	8.73	2.71	14.82	3.04	0.05	6.03	2.18	16.25	3.94	0.02
アケアリン2クレアチニン換算値	4.24	0.78	6.18	0.76 *	0.04	3.97	0.97	8.02	0.81 **	0.00
HANP	17.08	1.94	29.25	2.72 **	0.00	19.70	2.19	34.56	3.19 **	0.00

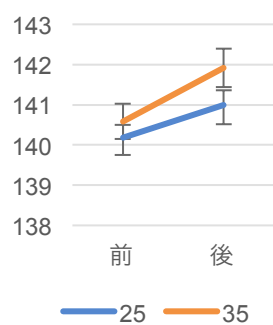
総蛋白(TP)



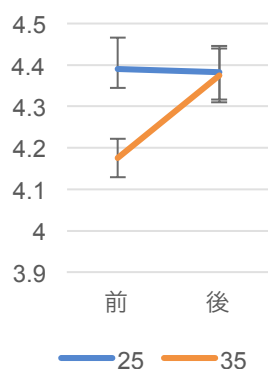
アルブミン(Alb)



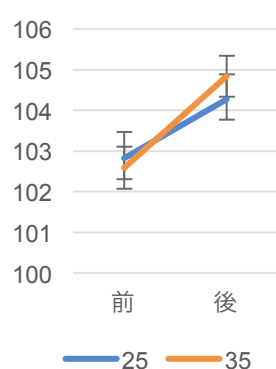
Na(ナトリウム)



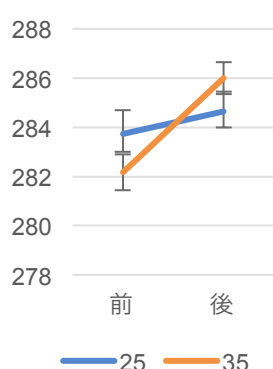
K(カリウム)



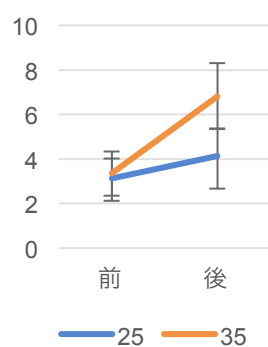
Cl(クロール)



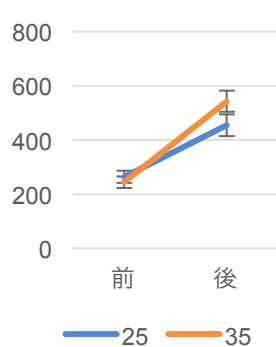
浸透圧



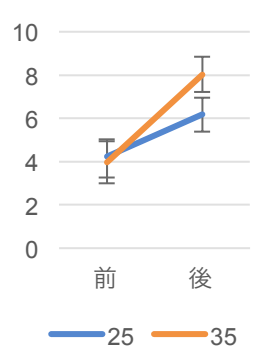
抗利尿ホルモン



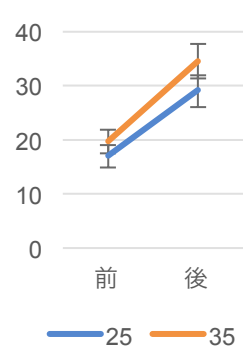
アルドステロン



アクアポリン2

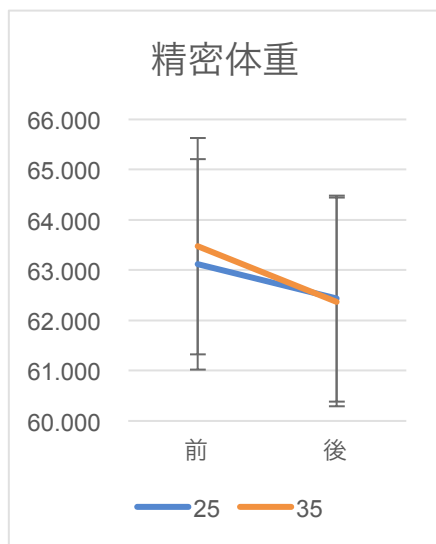


HANP



2 精密体重の前後比較（推定脱水量）

体重(kg)	25℃					35℃				
	Pre		Post		%Δ	Pre		Post		%Δ
	Mean	±SEM	Mean	±SEM		Mean	±SEM	Mean	±SEM	
	63.119	2.097	62.437	2.053	1.080	63.480	2.155	62.370	2.081	1.750



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。

本年度、我々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。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。

実験は、成人健康男性12名（ 24.6 ± 5.6 歳）に被験者として協力を頂き、産業医科大学人工気候室において、各被験者がそれぞれ<環境条件1>低リスク（注意レベル、人工気候室内の温度 25°C 、湿度50%、WBGT 22°C ）、<環境条件2>高リスク（厳重警戒レベル、人工気候室内の温度 35°C 、湿度50%、WBGT 30°C ）の2条件で、トレッドミルによる運動負荷実験を行った。運動負荷は、1実験においてトレッドミル80W（きつい肉体労働レベル）18分を2回ずつ行い、測定項目は、運動負荷前から、人工気候室内で深部体温、心拍数、ボルグスケールなどを持続測定し、同時に腕時計型ウェアラブルセンサーにより、パルス数（脈波）、体動（加速度センサー）、温度・湿度、作業時間の計測による、身体（カラダ）熱環境レベル、身体負荷レベルレベル、熱ストレスレベルを推定し比較検討した。尚、被験者の安全を考慮し、深部体温が 38.5°C を超えた時や頭痛、吐き気など何らかの身体症状が出現した際には運動負荷を中止する基準を設けて実施した。

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。

今回用い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。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）

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（産業医科大学学長研究室）

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、死亡災害後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年度に、「①労働現場における熱中症対策の実際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。

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検討することで、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. 暑熱環境における運動負荷実験

環境条件を表1に、測定項目を表2に実験スケジュールを図1に示す。被験者は健康成人男性とした。産業医科大学人工気候室において、環境条件1と環境条件2の2条件で、同一被験者がそれぞれ別の日程で実験を行った。運動負荷の強度は、時速7km（きつい労力：80W相当）とし、事前に最大酸素摂取量（ V_{O2max} ）を測定し70% V_{O2max} 以下になるように設定した。腕時計型ウェアラブルセンサーは、左手首に装着させた。被験者：健康成人男性 12名（ 24.6 ± 5.6 歳）

環境条件：表1を参照

測定項目：表2、表3を参照

実験スケジュール：図1を参照

ウェアラブルセンサー：腕時計型ウェアラブルセンサー

表 1 環境条件

	環境条件1	環境条件2
リスク レベル	低リスク 注意レベル	高リスク 嚴重警戒レベル
室温 (°C)	25	35
湿度 (%)	50	50
WBGT (°C)	22	30
運動負荷 (W)	80	80

表 2 測定項目

番号	項目	サンプリング
①	年齢	—
②	ボルグスケール	3分毎
③	深部体温 心拍数	10秒毎
④	腕時計型ウェアラブルセンサー	60秒毎

表 3 ボルグスケール

ポイント	内容
6	
7	非常に楽である
8	
9	かなり楽である
10	
11	楽である
12	
13	ややきつい
14	
15	きつい
16	
17	かなりきつい
18	
19	非常にきつい
20	

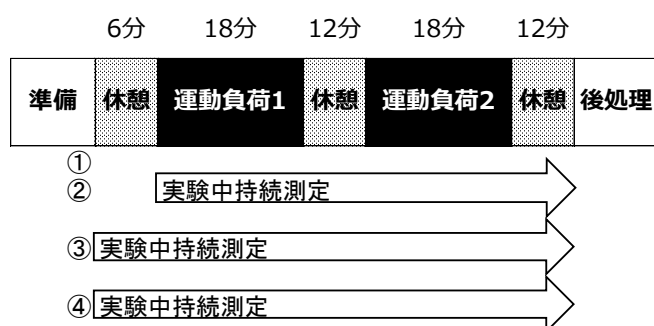


図 1 実験スケジュールと測定項目

b. 中止基準

中止基準：深部体温が 38.5°Cを超える/痙攣が起きる/激しい頭痛/激しいめまい/嘔気嘔吐/目の前が暗くなる/意識障害/本人の申し出

c. 腕時計型ウェアラブルセンサー

a. 製品名 (商品名)

安全管理支援ソリューション

(FUJITSU IoT Solution 安全管理支援ソリューション)

b. 製造元 (開発元)

富士通株式会社、〒211-0053 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1-1

c. 製品概要

[安全管理支援ソリューションとは]

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。

[安全管理支援ソリューションの特徴]

- ・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]

表

裏(皮触接触面)



図2 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。

「安全管理支援アプリ」を搭載したスマートフォン
 アクセス画面 パルス数、温度湿度画面



アラーム画面



図3 スマートフォン画面

- ・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。

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

d. 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4）。
- ・作業員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5）。
- ・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。

表4 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		●

表5 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	
	安全	平常	

・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 6）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 6 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 7）

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 7 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 8）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 9）。

表 8 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 9 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。

e. 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

f. 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 4 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

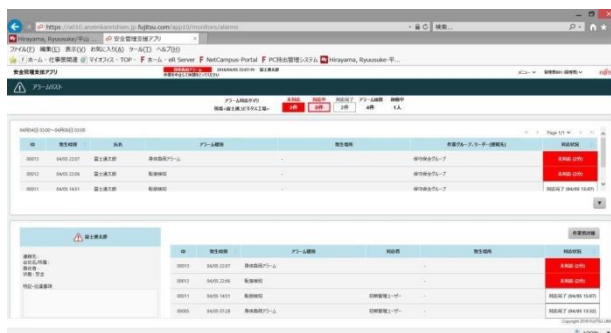


図 5 管理画面（PC）

D. 研究結果

a. 深部体温もしくは心拍数もしくはボルグスケールの結果による Heat Strain 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

深部体温もしくは心拍数もしくはボルグスケールの結果による Heat Strain 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の結果を示す（表 10）。

人工気候室において測定した深部体温が 38.5℃以

上もしくは心拍数が（180-被験者の年齢）bpm 以上もしくはボルグスケールが 17 ポイント以上になった場合、アメリカ産業衛生専門家会議（ACGIH）が示す Heat Strain（熱緊張）状態と判断した。

Heat Strain に該当したのは、環境条件 1（室温 25℃、湿度 50%、WBGT22℃）について、運動負荷 1 回目の全 12 回の内 5 回、運動負荷 2 回目全 11 回（中止の 1 回は除外）の内 8 回であった。また、環境条件 2（室温 35℃、湿度 50%、WBGT30℃）について、Heat Strain に該当したのは、運動負荷 1 回目の全 11 回（測定不能の 1 回は除外）の内 9 回、運動負荷 2 回目の全 10 回（測定不能および中止の 2 回は除外）の内 10 回であった。Heat Strain に該当したのは合計 32 回であり、全測定数 44 回に対しての 72.7%であった。

これに対し、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アラーム検出レベル以上と判定した基準は、身体（カラダ）熱環境アラームが 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 ポイント以上であった。

アラーム検出レベルと該当したのは、環境条件 1（室温 25℃、湿度 50%、WBGT22℃）について、運動負荷 1 回目の全 12 回の内 4 回、運動負荷 2 回目全 11 回（中止の 1 回は除外）の内 6 回であった。また、環境条件 2（室温 35℃、湿度 50%、WBGT30℃）について、Heat Strain に該当したのは、運動負荷 1 回目の全 11 回（測定不能の 1 回は除外）の内 11 回、運動負荷 2 回目の全 10 回（測定不能および中止の 2 回は除外）の内 9 回であった。合計 30 回であり、全測定数 44 回に対しての 68.2%であった。

また、人工気候室の深部体温、心拍数、ボルグスケールより Heat Strain（熱緊張）状態と判断した合計 32 回の内、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、環境条件 1（室温 25℃、湿度 50%、

WBGT22℃）の運動負荷 1 回目は 2 回（全 5 回中）、運動負荷 2 回目は 4 回（全 8 回中）、環境条件 2（室温 35℃、湿度 50%、WBGT30℃）の運動負荷 1 回目は 9 回（全 9 回中）、運動負荷 2 回目は 9 回（全 10 回中）、合計 24 回であり、Heat Strain（熱緊張）状態の全 32 回に対しての 75.0%であった。

人工気候室において測定した深部体温が 38.5℃以上もしくは心拍数が（180-被験者の年齢）bpm 以上もしくはボルグスケールが 17 ポイント以上と判定し、Heat Strain（熱緊張）状態と判断した結果と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結果を図 6～11 に示す。

E. 考察

今回、人工気候室において、2つの異なる温度環境下、運動負荷を行い、暑熱環境における生体データ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負荷推測結果と比較した。

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、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関連を検証するために、被験者12名毎の環境条件1（室温25℃、湿度50%、WBGT22℃）環境、条件2（室温35℃、湿度50%、WBGT30℃）の運動負荷1回目、運動負荷2回目について比較した。

Heat Strain に該当した回数は合計 32 回であり、全測定数 44 回に対しての 72.7%であった。

この Heat Strain に該当した回数は合計 32 回に対し、腕時計型ウェアラブルセンサーのアラーム検出レベルは合計 24 回であったが、特に環境条件 2（室温 35℃、湿度 50%、WBGT30℃）の運動負荷 1 回目は Heat Strain に該当した回数全 9 回中 9 回（対 Heat Strain 状態、100%）、運動負荷全 2 回目は Heat Strain に該当した回数全 10 回中 9 回（対 Heat Strain 状態、90%）であり、Heat Strain 状態を推

測していると考えられる。労働者が働く上でより厳しい暑熱環境を考えると、腕時計型ウェアラブルセンサーを用いて環境条件2（室温35℃、湿度50%、WBGT30℃）でHeat Strain状態を90～100%推測できたことは腕時計型ウェアラブルセンサーおよび評価システムが妥当といえる。

また、Heat Strain（熱緊張）状態の指標の1つである自覚症状のボルグスケールで17ポイント以上となったのは、環境条件2（室温35℃、湿度50%、WBGT30℃）の運動負荷2回目において5回であった。いずれも深部体温と心拍数がHeat Strain（熱緊張）状態に該当しており、言い換えれば自覚症状で17ポイントの「かなりきつい」と訴えた場合は、Heat Strain（熱緊張）状態であると考えられる。

以上より、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。

今回用い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。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期待される

F. 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検証を行った。

・人工気候室において、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、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。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期待される。

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

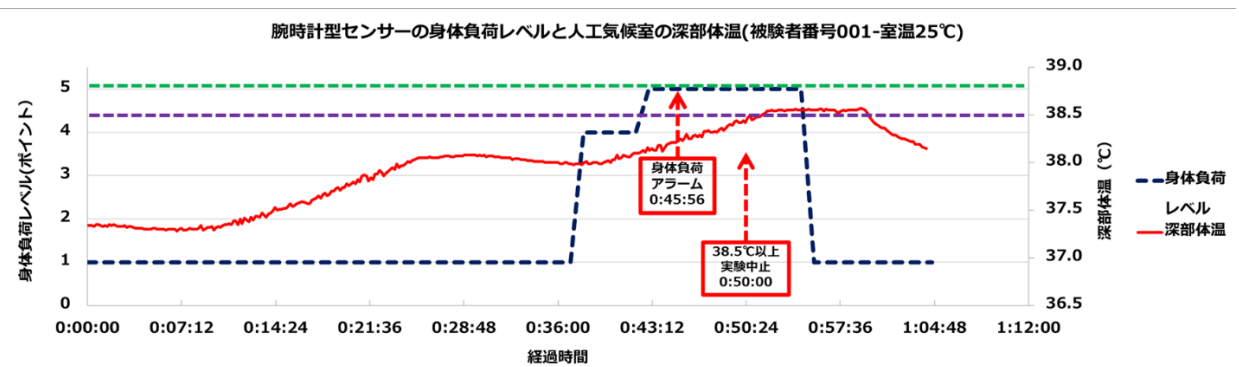
なし

3. その他

なし

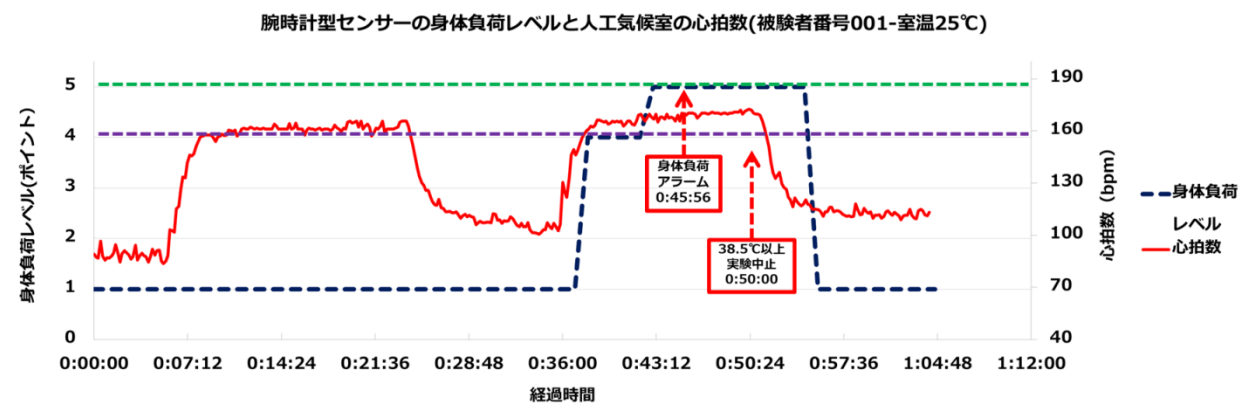
表 10. 深部体温もしくは心拍数もしくはボルグスケールの結果による Heat Strain 該当と
腕時計型ウェアラブルセンサーの検出閾値以上との比較

				深部体温もしくは心拍数もしくはボルグスケールの結果による Heat Strain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			
○：有り ×：無し －：中止、測定できず			ACGIHの Heat Strainの 脈拍の基 準	運動負荷1回目		運動負荷2回目	
				人工気候室	腕時計型ウェアラブル センサー	人工気候室	腕時計型ウェアラブル センサー
				Heat Strain該当 深部体温 $\geq 38.5^{\circ}\text{C}$ or 心拍数 $\geq$ (180-年齢) or ボルグスケール ≥ 17	身体 (カラダ) 熱環境 アラーム ≥ 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	Heat Strain該当 深部体温 $\geq 38.5^{\circ}\text{C}$ or 心拍数 $\geq$ (180-年齢) or ボルグスケール ≥ 17	身体 (カラダ) 熱環境 アラーム ≥ 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
				該当	検出	該当	検出
室温 湿度 被験者番号 年齢	180-年齢						
25℃ 50%	R-001	23	157	○	×	○	○
	R-002	24	156	○	×	○	×
	R-003	22	158	×	×	○	○
	R-004	42	138	○	○	○	○
	R-005	22	158	×	○	○	×
	R-006	27	153	×	×	○	×
	R-007	25	155	×	×	○	×
	R-008	24	156	×	○	×	○
	R-009	22	158	○	×	－	－
	R-010	22	158	×	×	×	×
	R-011	22	158	×	×	○	○
	R-012	21	159	○	○	×	○
35℃ 50%	R-001	23	157	○	○	○	×
	R-002	24	156	－	－	－	－
	R-003	22	158	○	○	○	○
	R-004	42	138	○	○	○	○
	R-005	22	158	×	○	○	○
	R-006	27	153	○	○	○	○
	R-007	25	155	○	○	○	○
	R-008	24	156	○	○	○	○
	R-009	22	158	○	○	－	－
	R-010	22	158	○	○	○	○
	R-011	22	158	×	○	○	○
	R-012	21	159	○	○	○	○



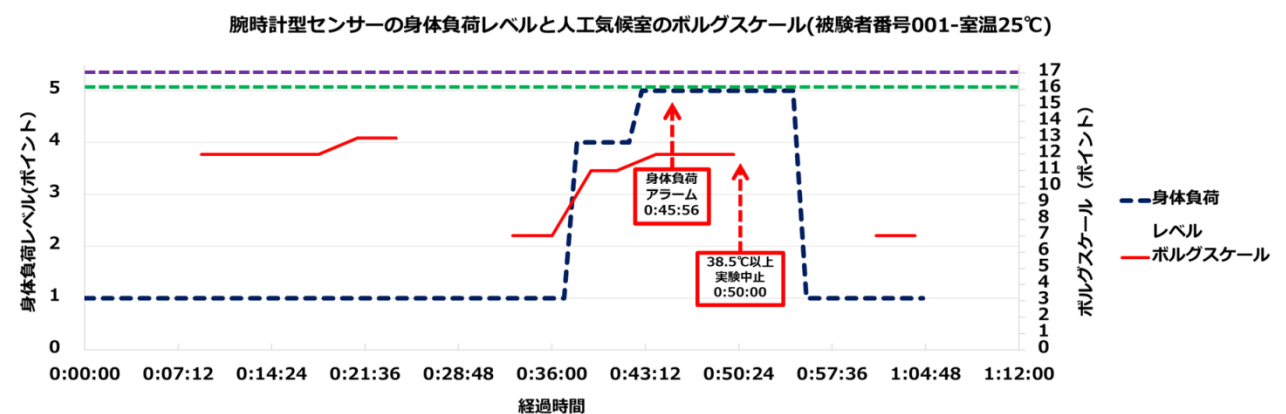
緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：深部体温の閾値

図 6. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室の深部体温との比較 (001、25℃)



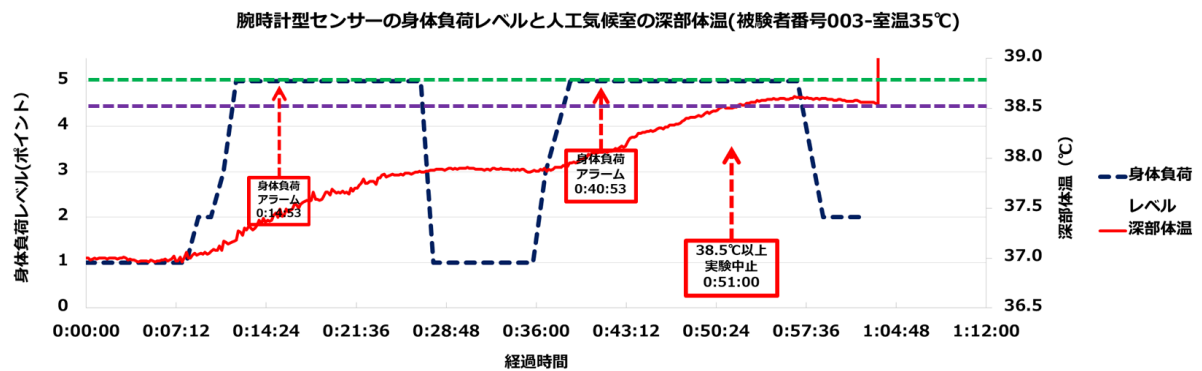
緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：心拍数の閾値

図 7. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室の心拍数との比較 (001、25℃)



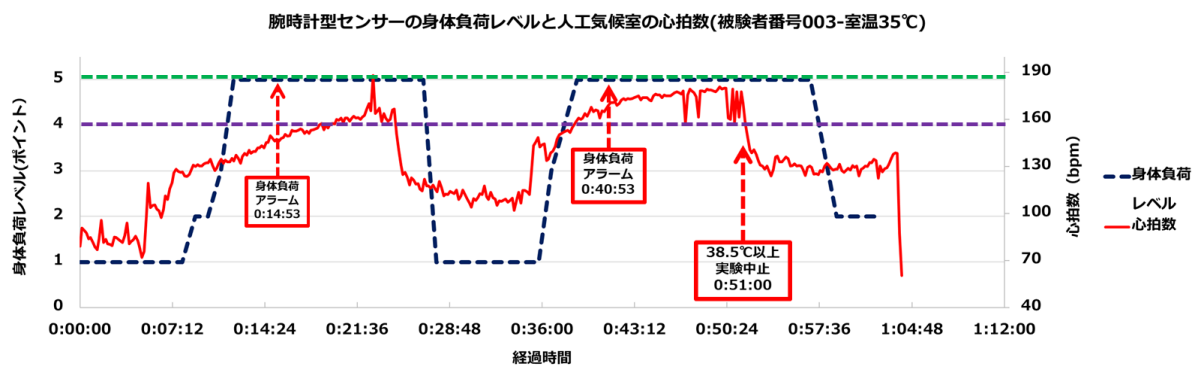
緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：ボルグスケールの閾値

図 8. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室のボルグスケールとの比較 (001、25℃)



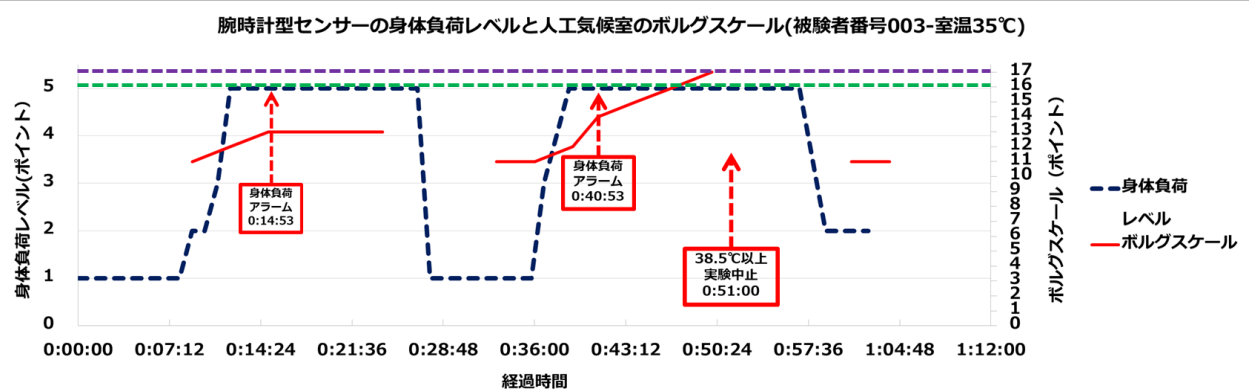
緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：深部体温の閾値

図 9. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室の深部体温との比較 (003、35℃)



緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：心拍数の閾値

図 10. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室の心拍数との比較 (003、35℃)



緑の点線：身体負荷レベルの閾値、紫の点線：ボルグスケールの閾値

図 11. 腕時計型センサーの身体負荷レベルと人工気候室のボルグスケールとの比較 (003、35℃)

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：

本研究は、従来の許容基準の範囲(ISO7243:2017)を超えた高い熱負荷条件において、実験参加者が感じる負担とウェアラブルデバイスの評価結果の一致性を確認することを目的として実施した。産業医科大学人工気候室において、実験参加者(成人健康男性12名)を対象に実験を行った。各実験参加者がそれぞれ〈条件1〉室温25℃、湿度50%、〈条件2〉室温35℃、湿度50%の2つの環境条件で、トレッドミルによる運動負荷実験を行った。運動負荷前から、心電図、深部体温(直腸温)、体表面温度(胸部、手背部)、血圧、脈波などを持続測定し、運動負荷の前後において、脱水の指標となる精密体重測定や採血・採尿を行い、生体データの変化を検討した。また運動負荷中は、主観的な運動強度(ボルグスケール)を評価させた。これらの測定と並行して、シャツ型センサーを有するウェアラブルデバイスを用いて、RR間隔(心拍数を算出)、加速度(作業強度を算出)、衣服内温度(ウェアラブルデバイス内の温度)の計測を行った。またウェアラブルデバイスによる衣服内温度を評価するために、ウェアラブルデバイスの前面と背面に温度センサーを貼り付け、温度を測定した。ウェアラブルデバイスは、Smartfit for work(倉敷紡績株式会社)を用いた。このウェアラブルデバイスでは、ISO7243:2017の熱負荷の許容範囲を危険側に外れると予想される場合に「危険」、「注意」などと表示し、注意を促している。

本研究では、直腸温38.5℃以上を基準として、高熱負担の状態を判断した。条件1と条件2の負荷(環境と運動による負荷)の状態において、負担(直腸温で評価)と、ウェアラブルデバイスが「危険」と評価した状態との一致性を検証した。

〈条件1〉は、従来の基準(ISO7243, ACGIH TLV)においては熱負荷がほぼない状態であるが、実験では運動負荷により、直腸温、心拍数、ボルグスケールが高値を示した。この条件においても、ウェアラブルデバイスが評価した暑熱作業リスクは増加し、「危険」の判断基準に近づいた。とはいえ、「危険」、「注意」と判定された例は、10例中3例であった。熱負荷がほぼない状態であるため、従来の基準では判定が難しい条件と考えられる。

高い熱負荷がある〈条件2〉では、全実験参加者において強い負担がみられた。ウェアラブルデバイスの評価結果も、全例で「危険」と判定された。従来の許容基準を超えた熱負荷条件では、実験参加者が大きな負担を感じる事が確かめられた。以上の結果から、本研究で検討したウェアラブルデバイスは、環境の熱負荷の有無にかかわらず、暑熱作業リスクが適切に評価できていると考えられる。近年の国内の猛暑では、ISO7243やACGIHのTLVの許容範囲を守ることが困難になっているが、そのような環境においてもウェアラブルデバイスを援用したリスク評価には有用性があると考えられる。

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)

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(産業医科大学学長研究室)

A. 研究目的

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小型化と測定に伴う負担(皮膚とセンサーとの接触面の処理、センサーの固定など)の軽減が求められるため、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。

本研究では、人工気候室にて設定した暑熱環境下において、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)や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することを目的とする。

B. 研究方法

産業医科大学の人工気候室において、実験参加者(成人健康男性 12 名、 24.6 ± 5.8 歳)を対象に実験を行った。各実験参加者がそれぞれ〈条件 1〉室温 25℃、湿度 50%、〈条件 2〉室温 35℃、湿度 50%の 2 つの環境条件で、トレッドミル(80W)による運動負荷実験を行った。実験は、作業前安静(6 分)、トレッドミルでの運動負荷(以下、トレッドミル 1)(18 分)、休憩(12 分)、トレッドミルでの運動負荷(以下、トレッドミル 2)(18 分)、作

業後安静(12 分)の順で行った。条件 1 は、湿球黒球温度(Wet-bulb Globe temperature: 以下、WBGT)が 22℃程度であり、従来の暑熱労働環境の基準にてらせばこの環境は考慮すべき熱負荷がない条件である。一方、条件 2 は、WBGT が 30℃程度の熱負荷に相当し、低代謝の運動強度であっても、深部体温が上昇する条件である。

実験中は、心電図、直腸温、体表面温度(胸部、手背部)、脈波、動脈血酸素飽和度を持続測定した。また 3 分毎に左腕より収縮期血圧と拡張期血圧の測定を行った。運動負荷の前後において、精密体重測定(発汗量の推定のため)と、採血・採尿を行った。また運動負荷中は、3 分毎に主観的な運動強度をボルグスケールを用いて評価させた。心電図は無線式心電計(BSM-2401、日本光電工業株式会社)にてサンプリングレート 1000Hz で計測を行い、深部体温と体表面温度は熱電対を用いた温度センサーにて、10 秒間隔で記録した。

これらの測定と並行して、ウェアラブルデバイスを用いて、RR 間隔、加速度、衣服内温度(ウェアラブルデバイス内の温度)の測定を行った。またウェアラブルデバイスによる衣服内温度を評価するために、ウェアラブルデバイスの正面と背面に熱電対を用いた温度センサーを貼り付け、温度を測定した。本研究では、Smartfit for work(倉敷紡績株式会社)のウェアラブルデバイスを用いた(図 1)。このデバイスではシャツの内側に貼り付けられた電極より心電波形を導出している。導出された心電波形はシャツの前面に装着されたデバイスにて RR 間



図 1 シャツ型ウェアラブルデバイス

隔に変換された後、Bluetooth でスマートフォンに送信される。このデバイスは作業強度の評価のための加速度センサーと衣服内温度の測定のための温度センサーが内蔵されており、これらのデータも併せて送信される。また、オプションでウェアラブルデバイスとは別に温湿度の測定ユニットが用意されており、作業環境の温度と湿度が測定できる(屋外での利用の場合は、気象情報とスマートフォンの位置情報から導出した温湿度データで代用することが可能)。これらのデータを基に、このウェアラブルデバイスでは、独自の暑熱作業ストレス指標を用いてリスクを評価している。加えて、この指標の閾値を設定し、ISO7243:2017 の熱負荷の許容範囲を危険側に外れると予想される場合に「危険」、「注意」などを表示し、注意を促している。これらの測定データとリスク評価の結果は、30 秒間隔で出力される。リスク評価については、過去 10 分間の平均値が出力される。本研究ではウェアラブルデバイスのプログラム内でのみ使用される 30 秒ごとに判定される暫定的なリスク評価の提供を受けており、その評価を用いて検討を行っている。

人工気候室の実験装置での測定値とウェアラブルデバイスによる測定値は、3 分毎に測定・評価している指標(血圧、ボルグスケール)と対応させるために 3 分毎に中央値を算出した。本稿では各種測定項目の中から、直腸温、ウェアラブルデバイスの正面と背面の温度、無線式心電計にて測定した心電図より算出した心拍数、ボルグスケールを選定して解析を行った。ウェアラブルデバイスから出力される項目については、衣服内温度、心拍数(RR 間隔より算出)、作業強度、暑熱作業リスク、暑熱作業リスクレベルを選定した。これらも 3 分毎に中央値を算出した。よって実験結果は 3 分ごとのブロック(作業前安静_1, 2、トレッドミル 1_1~6、休憩_1~4、トレッドミル 2_1~6、作業後安静_1~4)に分けて検討した。

暑熱作業の負担は直腸温を用いて評価した。直腸温の評価基準は、国際標準機構(ISO)¹⁾²⁾や米国政府労働衛生専門家会議(ACGIH)³⁾にて提示されている。この条件を参考にして、本研究独自の高負担状態の評価基準を直腸温 38.5℃と定めた。また、高負担の評価基準に達しないまでもリスクが高いと考えられる基準を参考基準として 38.0℃に設定した。これらを高負担の基準として、ウェアラブルデバイスによって暑熱作業リスクレ

ベルが「危険」と評価された状態との一致性を検証した。

ウェアラブルデバイスが参考に行っている熱負荷の許容基準(ISO7243:2017)と本研究で想定している高負担の基準が異なることに留意すべきである。本研究の目的は、高い熱負荷条件におけるウェアラブルデバイスの判定結果と、直腸温より評価される熱負担との一致性の検証である。本研究の実験条件は、ISO7243:2017 において想定されていないものであるため、ウェアラブルデバイスの ISO7243:2017 への準拠を検証するものではない。また、ISO7243:2017 では 1 時間当たりの平均値を用いることが推奨されており、本研究のような 3 分毎の評価は想定されていない。ウェアラブルデバイスの評価と直腸温を用いて評価する負担との一致の評価については、実験中に直腸温 38.5℃と定めた評価基準に達した時点から前後 3 ブロック(達したブロックを含めて 7 ブロック、時間にして 21 分間)に、ウェアラブルデバイスが「危険」と判定した場合に「一致」と判定した。一方で、ウェアラブルデバイスが「危険」と判定した時点から前後 3 ブロック(7 ブロック: 21 分間)に、直腸温 38.0℃と定めた参考基準を示す負担が見られた場合に、「一致」と判定した。以後、評価基準(直腸温 38.5℃)に達した状態と「危険」が一致したかの判定を〈一致判定 1〉とする。また、「危険」と判定した状態において参考基準(直腸温 38.0℃)に達していたかの判定を〈一致判定 2〉とする。

実験参加者の安全を考慮し、深部体温が 38.5℃を超えた場合には、直ちに作業後安静に移行した。頭痛、嘔気など何らかの身体症状が出現した場合は実験を中止することとした。

本研究は産業医科大学倫理委員会での承認を得て実施された。また、本報告に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

尚、実験参加者 02 は直腸温の測定を行っていない。

C. 研究結果

条件 1 の実験参加者 08 と条件 2 の実験参加者 10 の直腸温のデータに一部欠損があった(図 9、23)。そのため一致判定の対象から除外した。

深部体温が 38.5℃を超えた実験参加者は 13 名となった(図 2、5、10、12、14、16、17、19、20、21、22、24、25)。なお、38.5℃を超えた場合は、直ちに作業後安静

に移行したためプロットが途絶えているが時間的には連続している。

条件 1(室温 25℃、湿度 50%)における結果

条件 1 において、直腸温が評価基準である 38.5℃を超えたのは、実験参加者 01、04、09、11 の 4 名であった(図 2、5、10、12)。ただし、実験参加者 04、09、11 については直腸温が 38.5℃に達した時点で運動負荷を中止したために 3 分毎に算出した中央値においては 38.5℃に達していない(図 5、10、12)。

暑熱作業リスクは、実験参加者 02 のみ「危険」に達していた(図 3)。暑熱作業リスクは、すべての実験参加者において、運動負荷に対応した上昇がみられ、0.5 以上の上昇が見られた。「注意」の基準である 0.8 に達したのは 3 名(実験参加者 03、05、10)、そのうち「危険」の基準である 1.0 にも達したのは 1 名(実験参加者 02)であった(図 3)。

一致判定 1 は、直腸温が 38.5℃を超えた 4 名の実験参加者が対象となる。一致は 1 名(実験参加者 09)であった。一致判定 2 は、「危険」に達した実験参加者 02 は直腸温を測定していないので検討できなかった。

条件 2(室温 35℃、湿度 50%)における結果

条件 2 において、直腸温が評価基準である 38.5℃を超えたのは、実験参加者 01、03、04、06、07、08、09、11、12 の 9 名であった(図 14、16、17、19、20、21、22、24、25)。ただし、実験参加者 01、04、07、09 については直腸温が 38.5℃に達した時点で運動負荷を中止したために 3 分毎に算出した中央値においては 38.5℃に達していない(図 14、17、20、22)。「注意」と「危険」は全実験参加者において達していた(図 14~25)。

一致判定 1 は、直腸温が 38.5℃を超えた 9 名の実験参加者すべてにおいて一致した。一致判定 2 は、直腸温の測定を行っていない実験参加者 02 と直腸温のデータ欠損があった実験参加者 10 は検討の対象から除いた。残り 10 名における一致判定 2 において一致が確認されたのは 6 名であった(図 14、16、17、22、24、25)。

D. 考察

条件 1(室温 25℃、湿度 50%)における考察

条件 1 では、評価基準との、一致性は高くなかった(4 例中 1 例)。条件 1 は、従来の基準(ISO7243, ACGIH TLV)において、暑熱負荷はほぼないと考えられる。それにもかかわらず、直腸温の上昇が生じた原因は、高強度の運動負荷による体内での熱産生である。20 分程度で深部体温が 1℃上昇するような高強度作業は通常の労働環境では想定されていないため、現状のウェアラブルデバイスでは十分に対応できていないと考えられる。実験参加者間での直腸温や心拍数の差が大きかったため、暑熱順化の有無や運動習慣の有無の違いがあったと考えられる。そのため、共通の基準を用いて体内の熱産生を評価することは難しいと考えられる。今回用いたウェアラブルデバイスでは、AI 機能により個人毎の運動時心拍数の特性が学習され、個人差を考慮した運動・作業強度の推定が実現されている。今後、そのような機能を改良することで、条件 1 のような環境でも暑熱作業リスクの推定精度が改善できるかもしれない。

条件 2(室温 35℃、湿度 50%)における考察

条件 2 では、一致判定 1 においてウェアラブルデバイスと実験参加者の負担評価が全例において一致した。一致判定 2 においては、10 名中 6 名が一致した。残り 4 名についても実験中に参考基準に達していた。一致判定 2 は、ウェアラブルデバイスが「危険」と判定した時点から前後 3 ブロック(7 ブロック: 21 分間)に、直腸温 38.0℃と定めた参考基準を示す負担が見られた場合を一致と判定している。また、ウェアラブルデバイスが参考に行っている ISO7243:2017 では 1 時間当たりの平均値を用いることが推奨されている。この点を鑑みると、ウェアラブルデバイスは参考としている基準が想定している時間分解能においては全例で一致している。

これらの結果から、ウェアラブルデバイスによる暑熱作業リスクレベルの評価は適切であると考えられる。暑熱労働環境の基準については、ISO7243:2017、あるいは ACGIH の TLV が参考にされることが多い。これらの基準はいわゆる許容基準であり、労働者が毎日の労働において許容できる範囲として定められている。暑熱労働環境での許容基準は、深部体温 38℃の状態を容易

に維持できる条件範囲に定められている。今回用いたウェアラブルデバイスについては、ISO7243:2017 を参考にして、「危険」の判定基準が定められていると説明されている。条件2の実験結果を踏まえれば、ISO7243:2017 の基準に適切に対応していると考えられる。これまで、深部体温が 38℃を超えることが想定される暑熱労働環境においては、深部体温(直腸温、鼓膜温など)や心拍数などの生理指標を作業中に計測し、深部体温が 38.5℃を超えたと想定される場合に、作業を中止することが推奨されてきた。近年国内では、夏季の猛暑日の日数が増加傾向にあり、WBGT 指標に基づく従来の基準(ISO7243:2017)では対応できないような過酷な暑熱環境で働く実状が見られる。そのような環境においても作業者の安全を見守るためには、よりリスクが高いと考えられる環境において、信頼のおけるリスク評価法が必要である。今後さらなる検証が必要であるが、そのようなリスク評価機器として、ウェアラブルデバイスが有用であることが、今回の結果から示唆された。

E. 結論

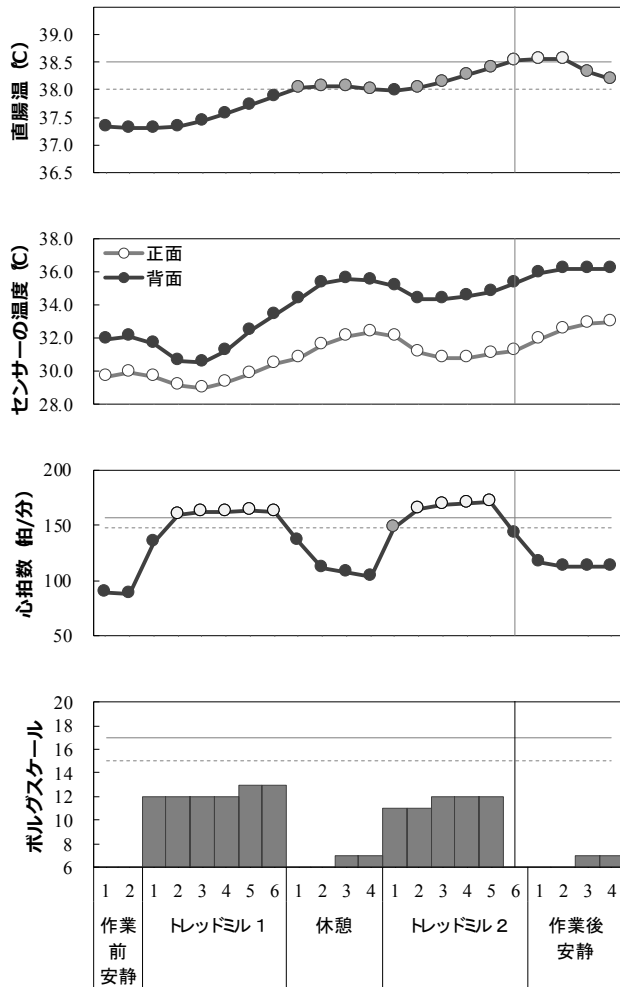
本研究では、従来の許容基準の範囲(深部体温 38℃以下を想定 [ISO7243:2017])を超えるような暑熱負荷条件において、ウェアラブルデバイスを用いて評価される暑熱作業リスクの有用性を検証した。実験参加者の暑熱負担の評価のために直腸温、心拍数、ボルグスケールを評価指標として、ウェアラブルデバイスの評価結果との一致性を検証した。暑熱負荷がない(暑くない)実験条件においても、ウェアラブルデバイスは運動負荷に応じた暑熱作業リスクの増加を示した。しかし、想定外の使用条件のため、危険と判定される領域の一致性は高くなかった。暑熱負荷の高い条件においては、ウェアラブルデバイスの評価結果は、直腸温、心拍数、ボルグスケール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る。

F. 参考文献

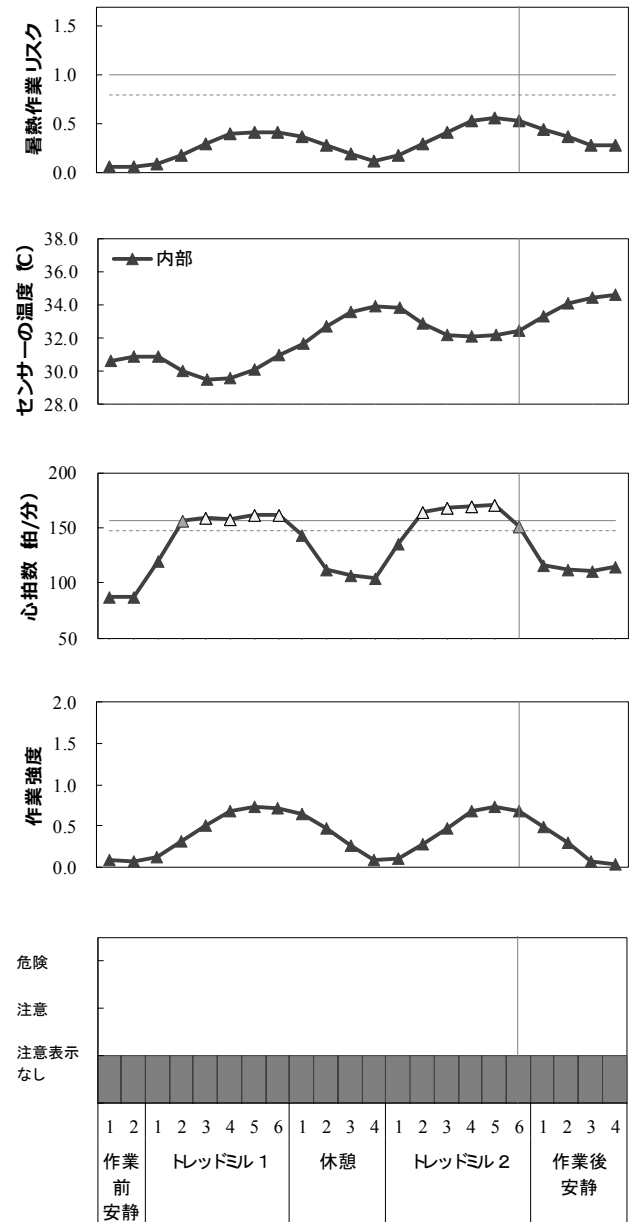
1. ISO8996 ISO 9886 (2004) Ergonomics of the thermal environment : Evaluation of thermal strain by physiological measurements. Geneva
2. ISO10551 (1995) Ergonomics of the thermal environment: Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales. Geneva.
3. ACGIH (2012) Heat Stress and Strain TLV@ ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati.

実験参加者01:室温25℃, 湿度50%

人工気候室の測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$
 $\bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

ボルグ
 スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \blacksquare < 17$
 $\blacksquare < 15$

暑熱作業
 リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

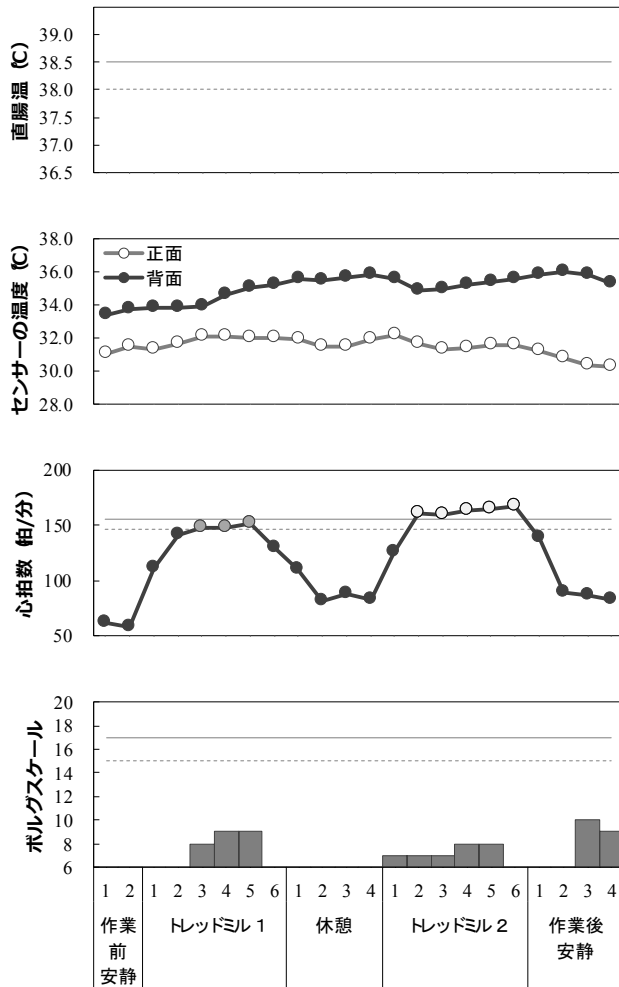
心拍数 $180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

暑熱作業
 リスクレベル $\square$ 危険
 $\blacksquare$ 注意
 $\blacksquare$ 注意表示なし

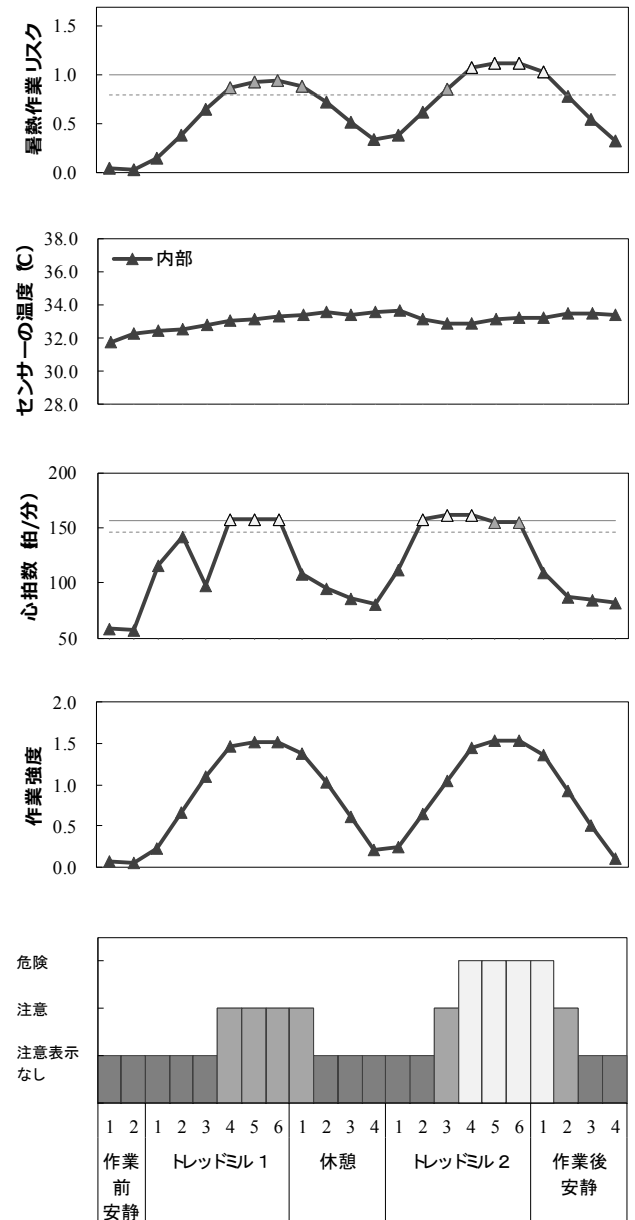
図 2 条件 1 における実験参加者 01 の各種測定データ

実験参加者02:室温25℃, 湿度50%

人工気候室の測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
 スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
 リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

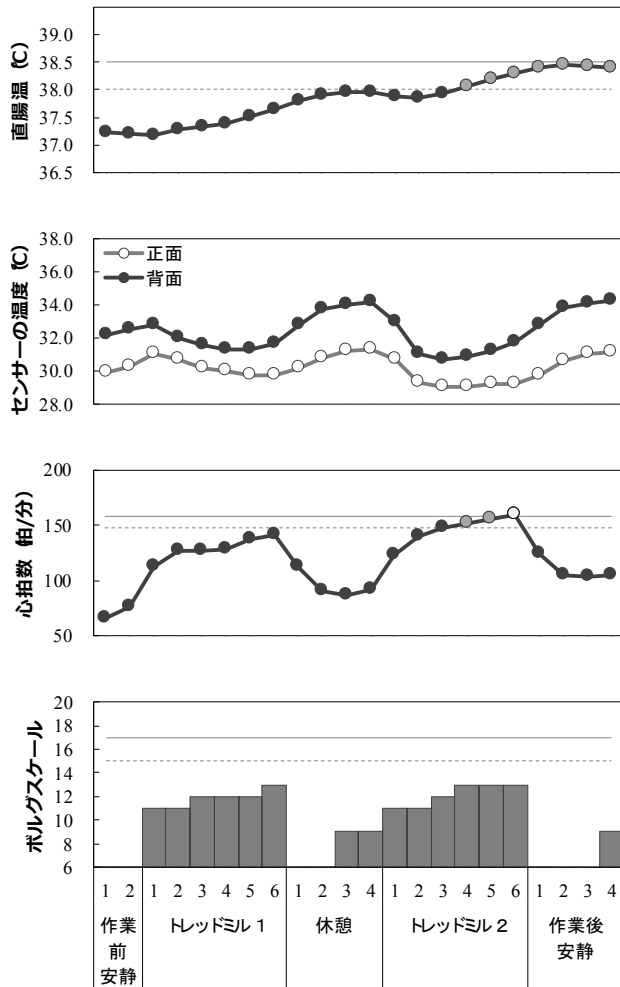
心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
 リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

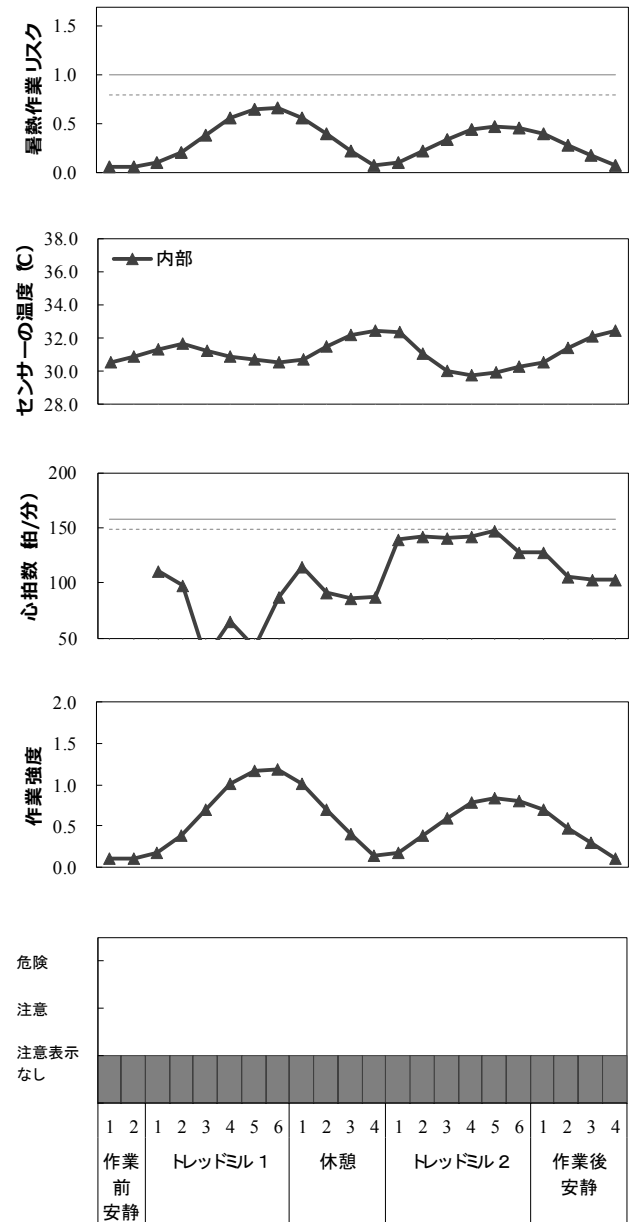
図 3 条件 1 における実験参加者 02 の各種測定データ

実験参加者03:室温25℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



暑熱作業リスクレベル



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $\leq 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $\leq 180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$
 $\bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

ボルグスケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

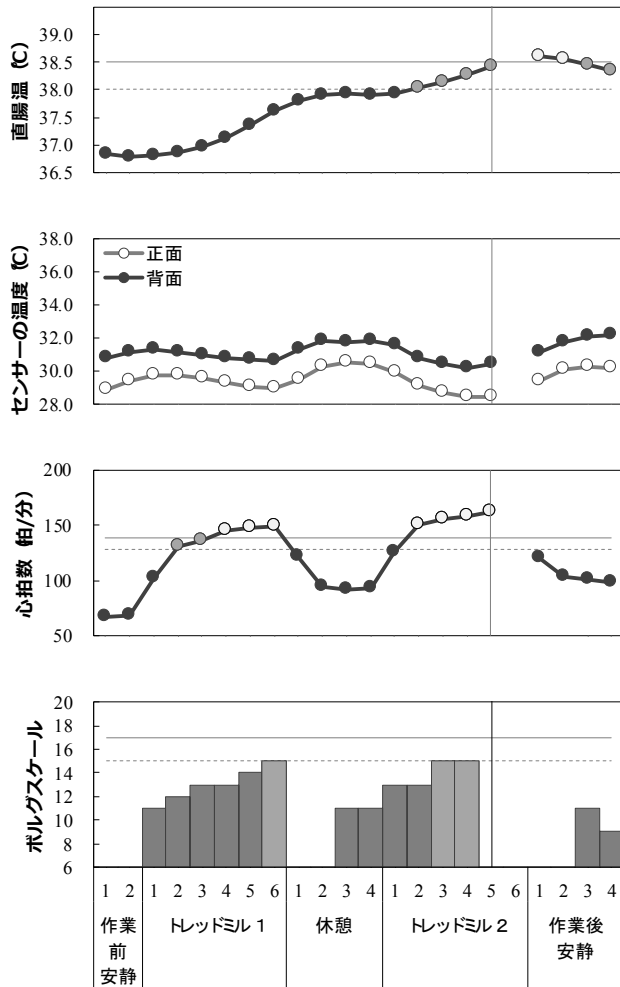
心拍数 $\leq 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $\leq 180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

暑熱作業リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

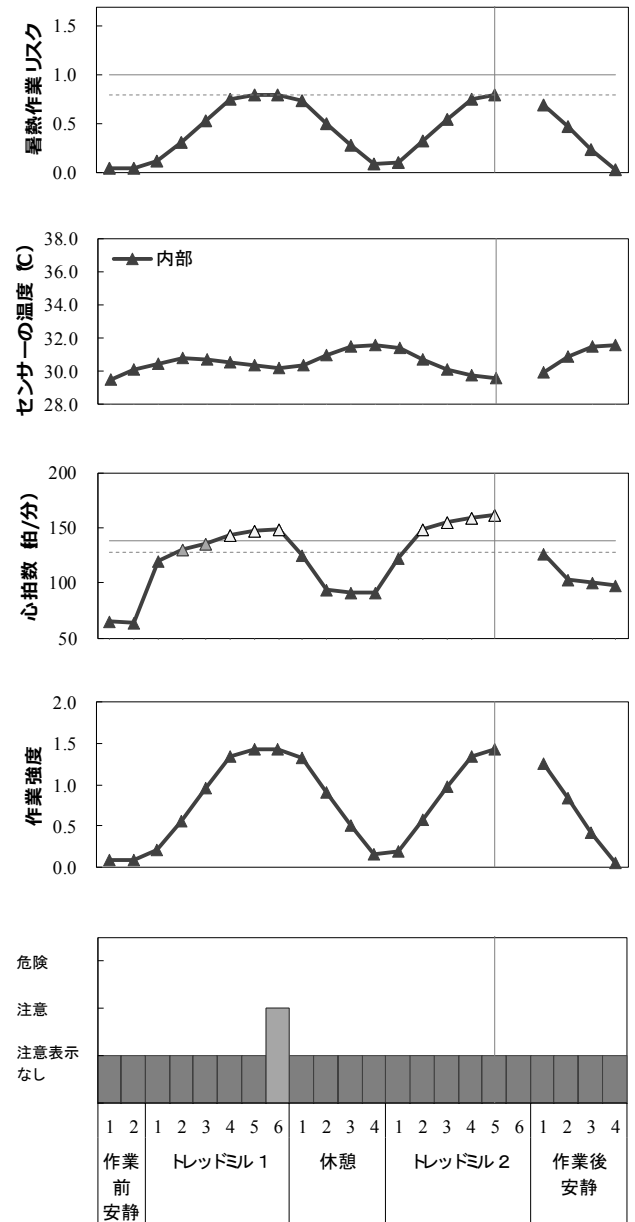
図 4 条件 1 における実験参加者 03 の各種測定データ

実験参加者04:室温25℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
 スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
 リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

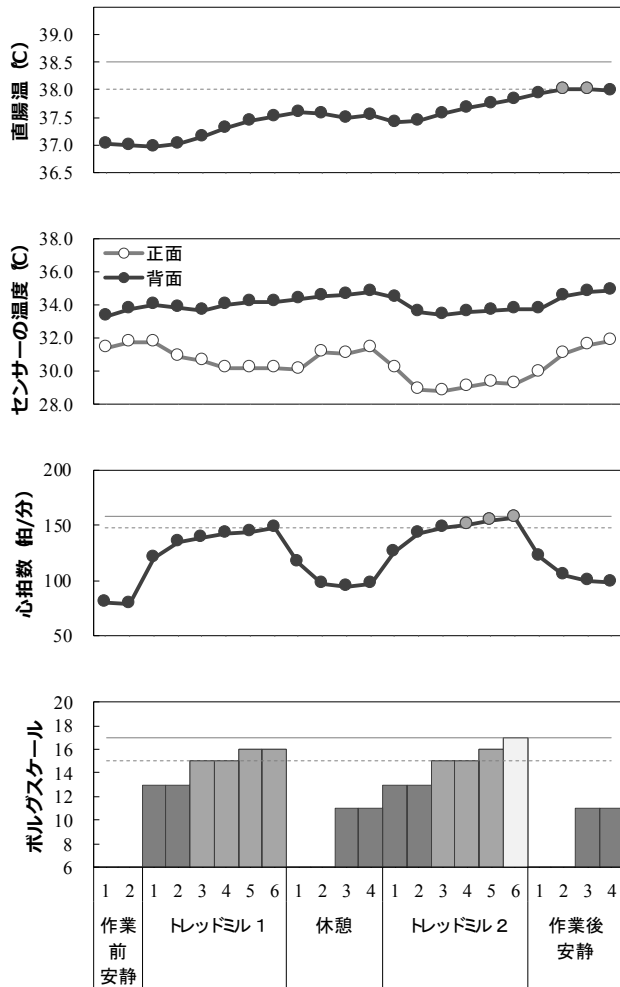
心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
 リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

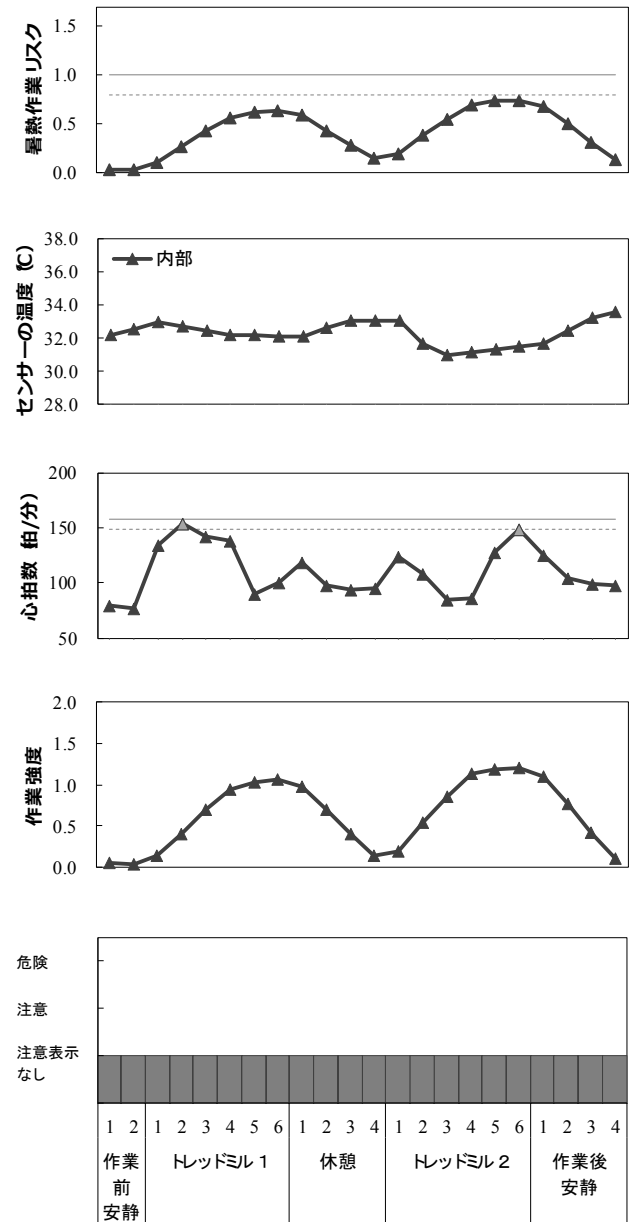
図 5 条件 1 における実験参加者 04 の各種測定データ

実験参加者05:室温25℃, 湿度50%

人工気候室の測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

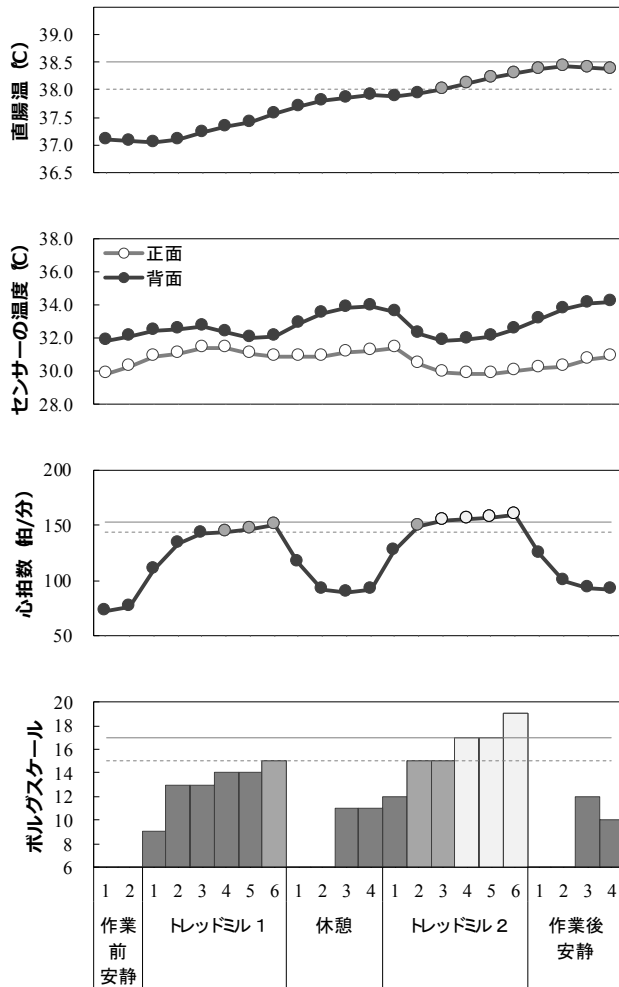
心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

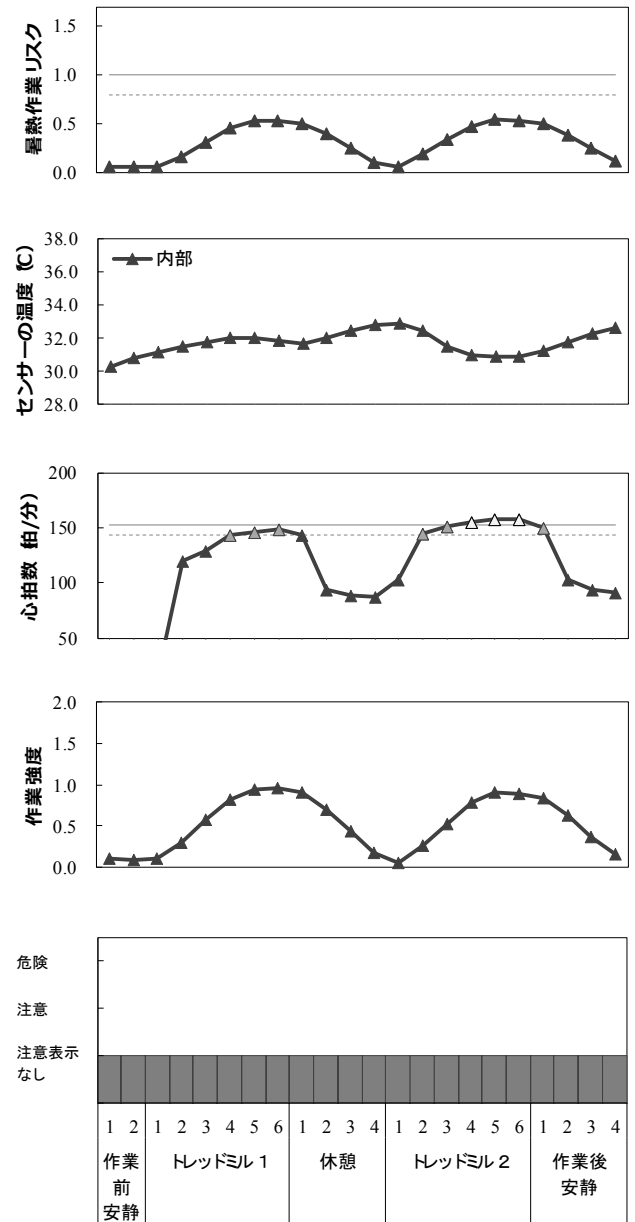
図 6 条件 1 における実験参加者 05 の各種測定データ

実験参加者06:室温25℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $\leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分 $\leq \bigcirc$
 $\leq 180 - (\text{年齢} - 10)$ 拍/分 $\leq \bullet < \leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分
 $\bullet < \leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分

ボルグスケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

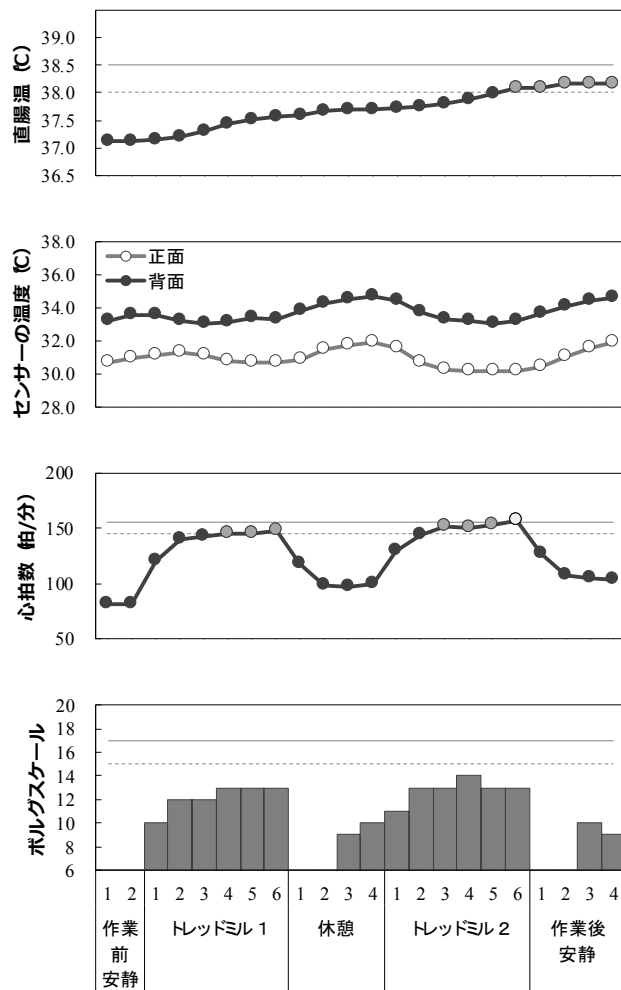
心拍数 $\leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分 $\leq \triangle$
 $\leq 180 - (\text{年齢} - 10)$ 拍/分 $\leq \blacktriangle < \leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分
 $\blacktriangle < \leq 180 - (\text{年齢})$ 拍/分

暑熱作業リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

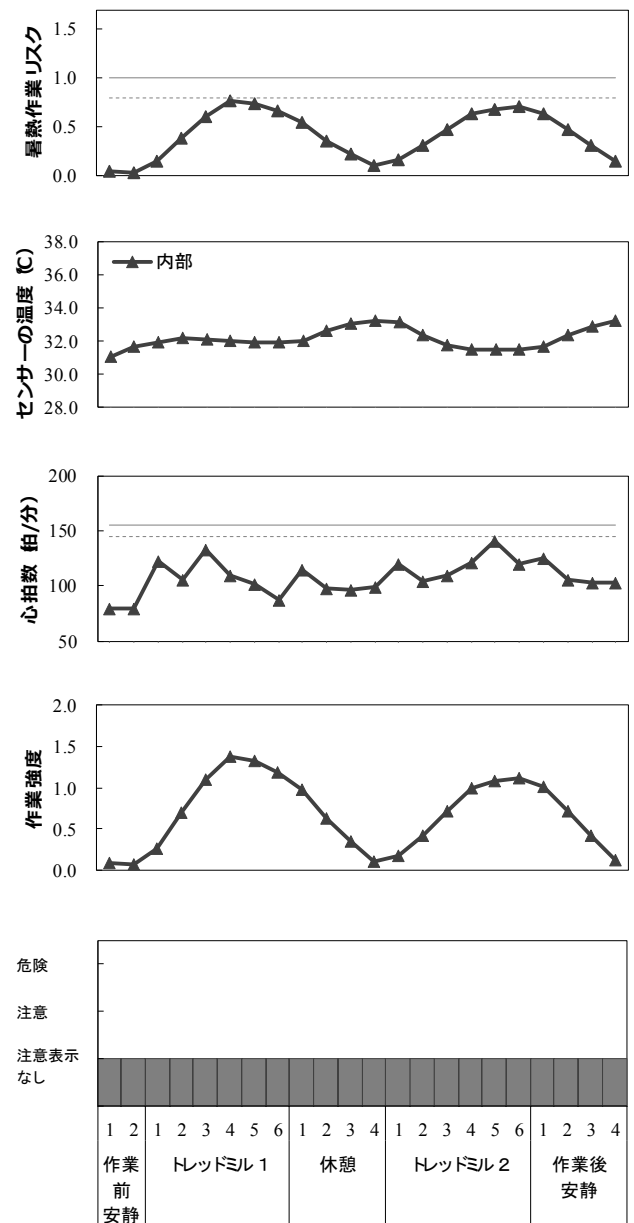
図 7 条件 1 における実験参加者 06 の各種測定データ

実験参加者07:室温25℃,湿度50%

人工気候室の測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

図 8 条件 1 における実験参加者 07 の各種測定データ

実験参加者08:室温25℃, 湿度50%

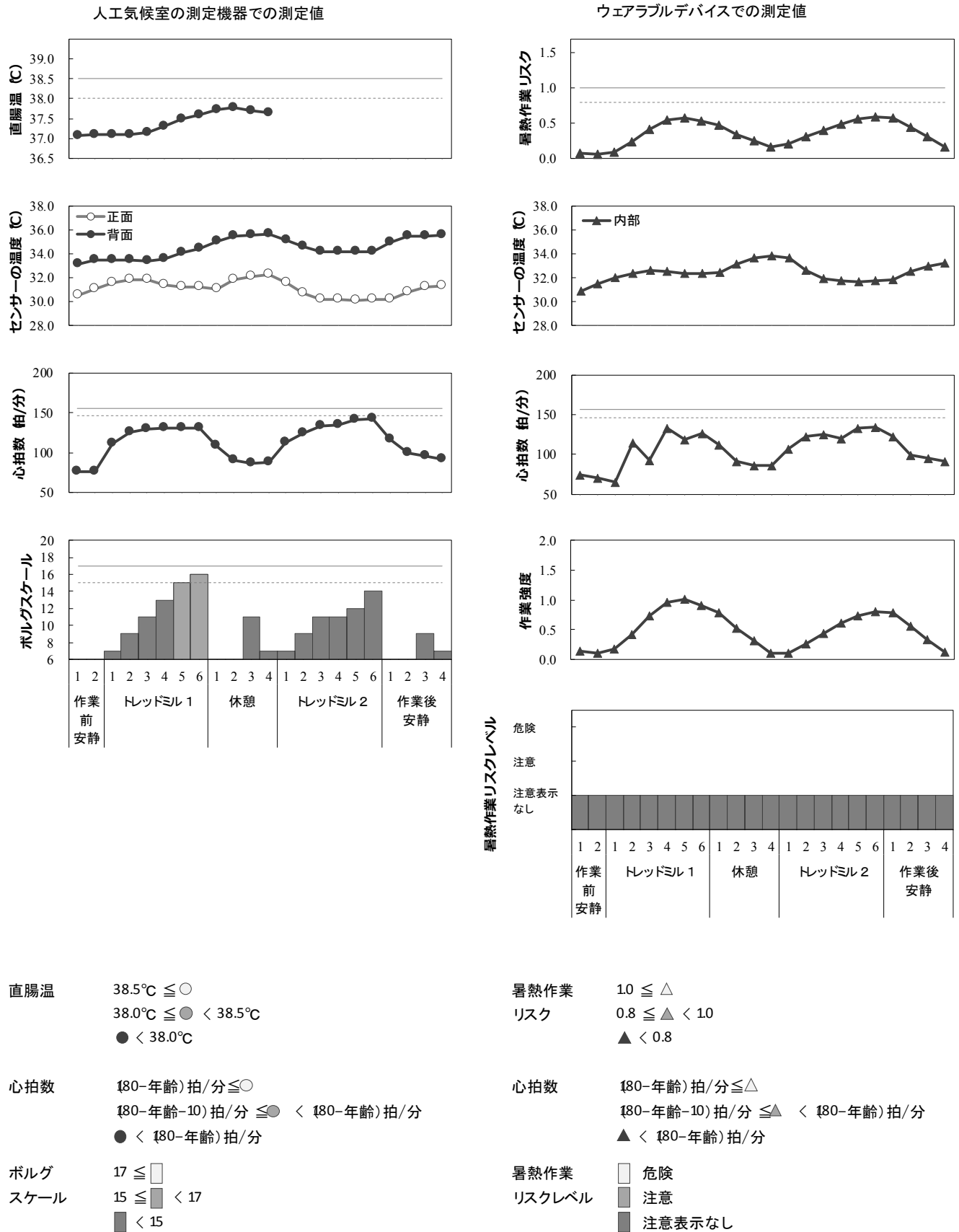


図 9 条件 1 における実験参加者 08 の各種測定データ

実験参加者09:室温25℃, 湿度50%

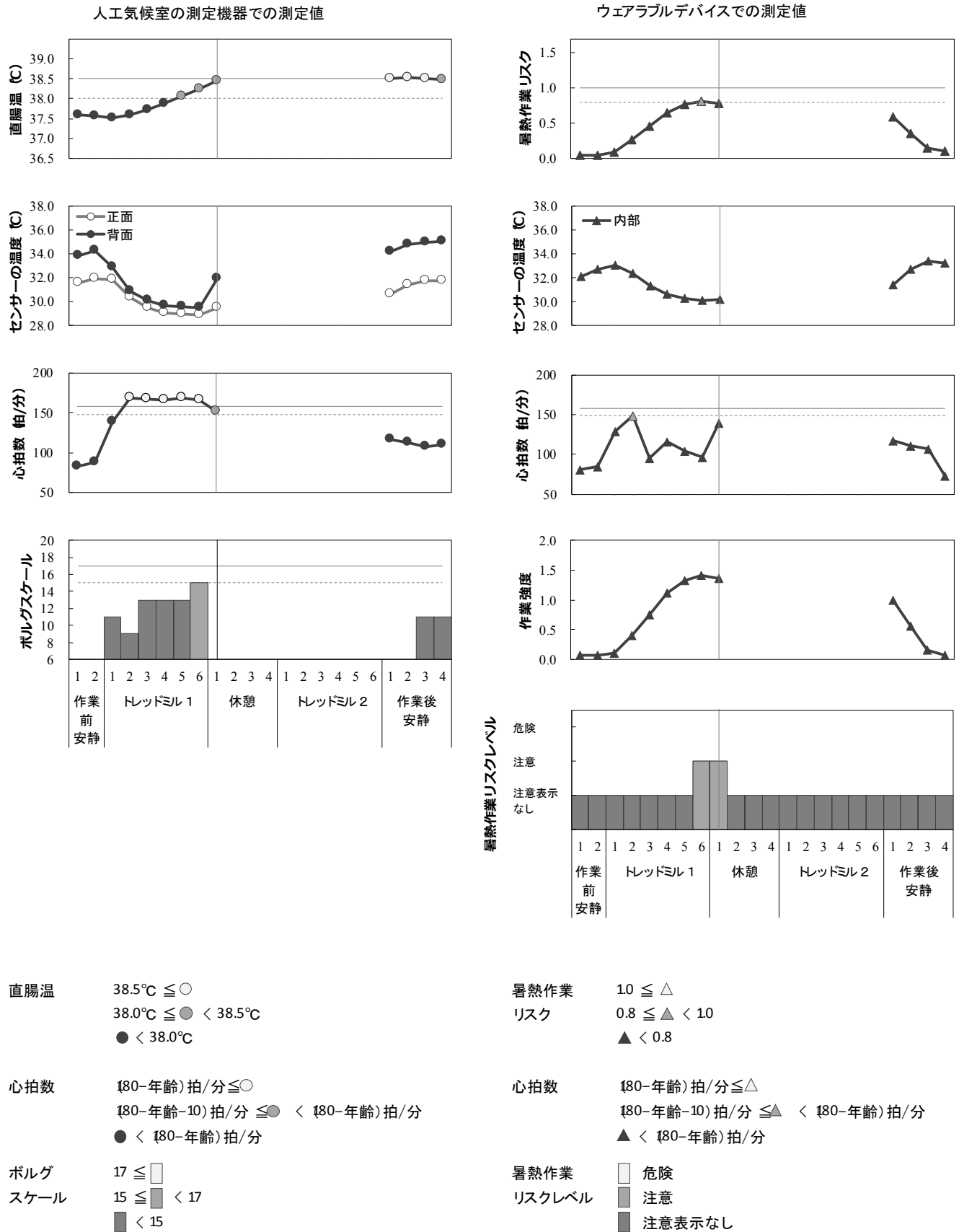
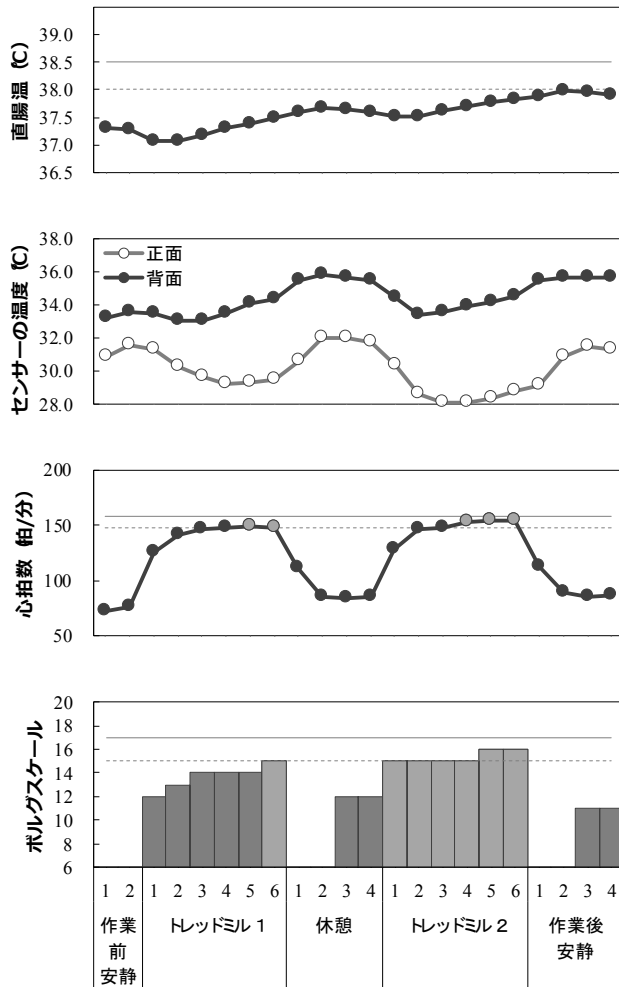


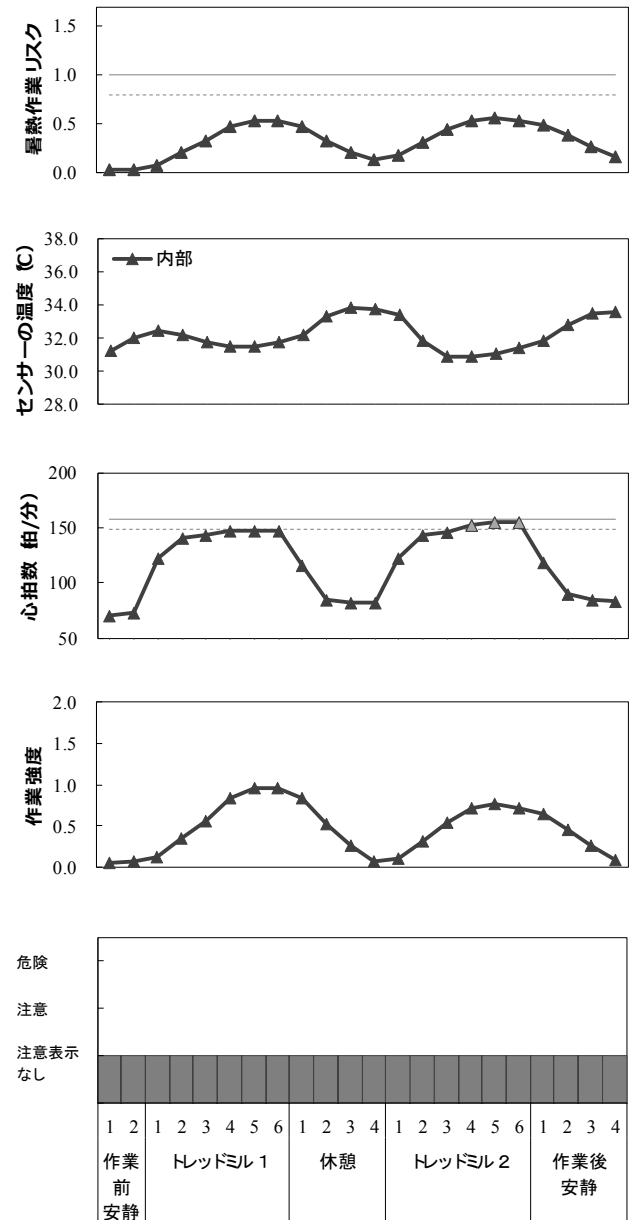
図 10 条件 1 における実験参加者 09 の各種測定データ

実験参加者10:室温25℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

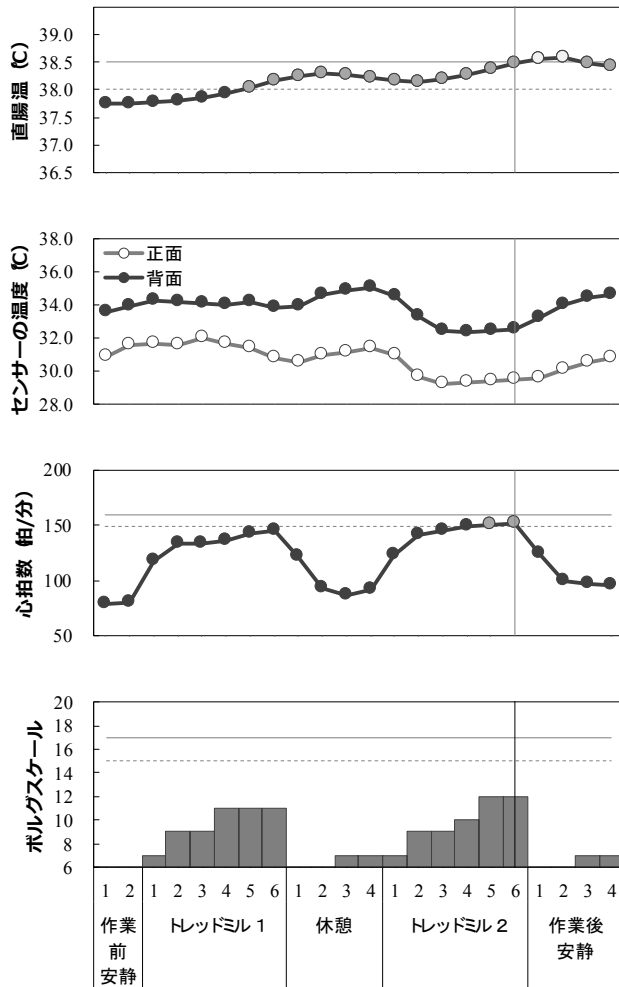
心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

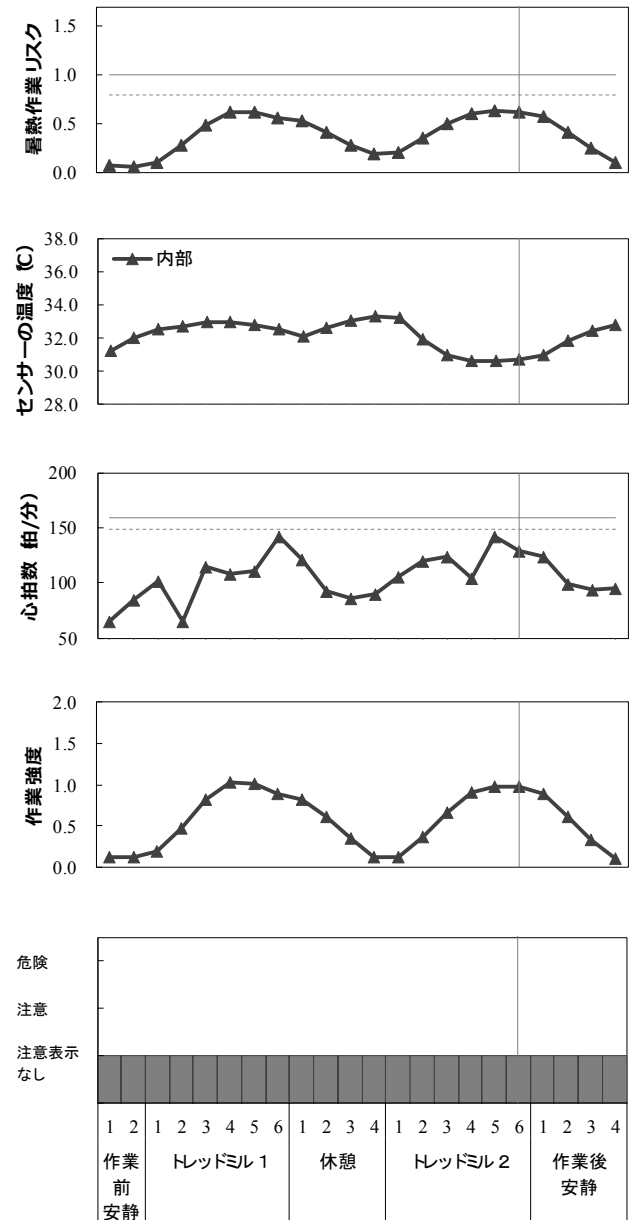
図 11 条件 1 における実験参加者 10 の各種測定データ

実験参加者11:室温25℃,湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温

$38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$

$38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$

$\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数

$180 - \text{年齢} \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$

$180 - \text{年齢} - 10 \text{ 拍/分} \leq \bullet < 180 - \text{年齢} \text{ 拍/分}$

$\bullet < 180 - \text{年齢} \text{ 拍/分}$

ボルグスケール

$17 \leq \square$

$15 \leq \text{■} < 17$

$\text{■} < 15$

暑熱作業リスク

$1.0 \leq \triangle$

$0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$

$\blacktriangle < 0.8$

心拍数

$180 - \text{年齢} \text{ 拍/分} \leq \triangle$

$180 - \text{年齢} - 10 \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < 180 - \text{年齢} \text{ 拍/分}$

$\blacktriangle < 180 - \text{年齢} \text{ 拍/分}$

暑熱作業リスクレベル

$\square$ 危険

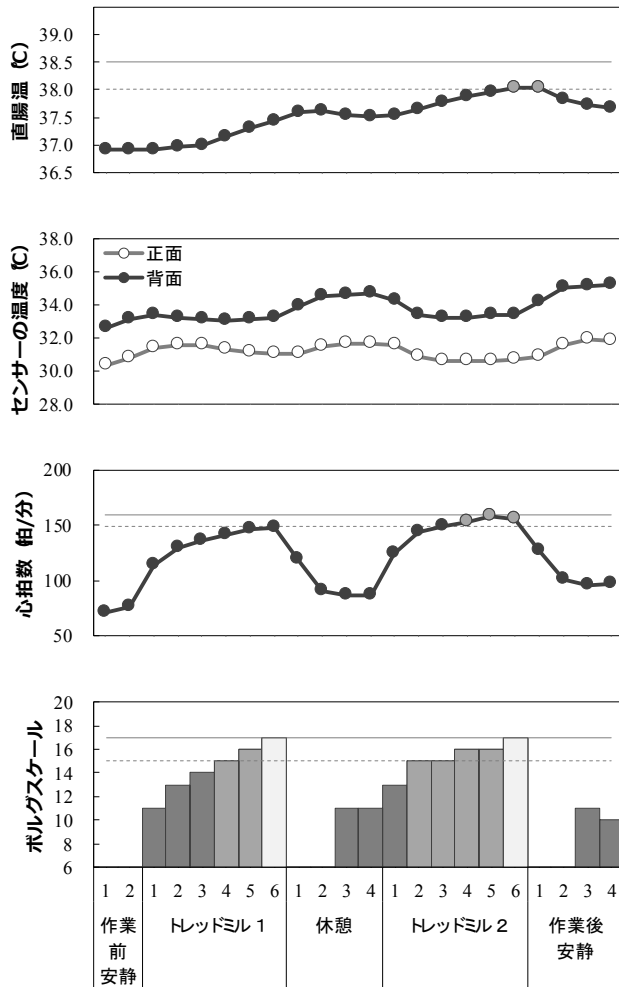
■ 注意

■ 注意表示なし

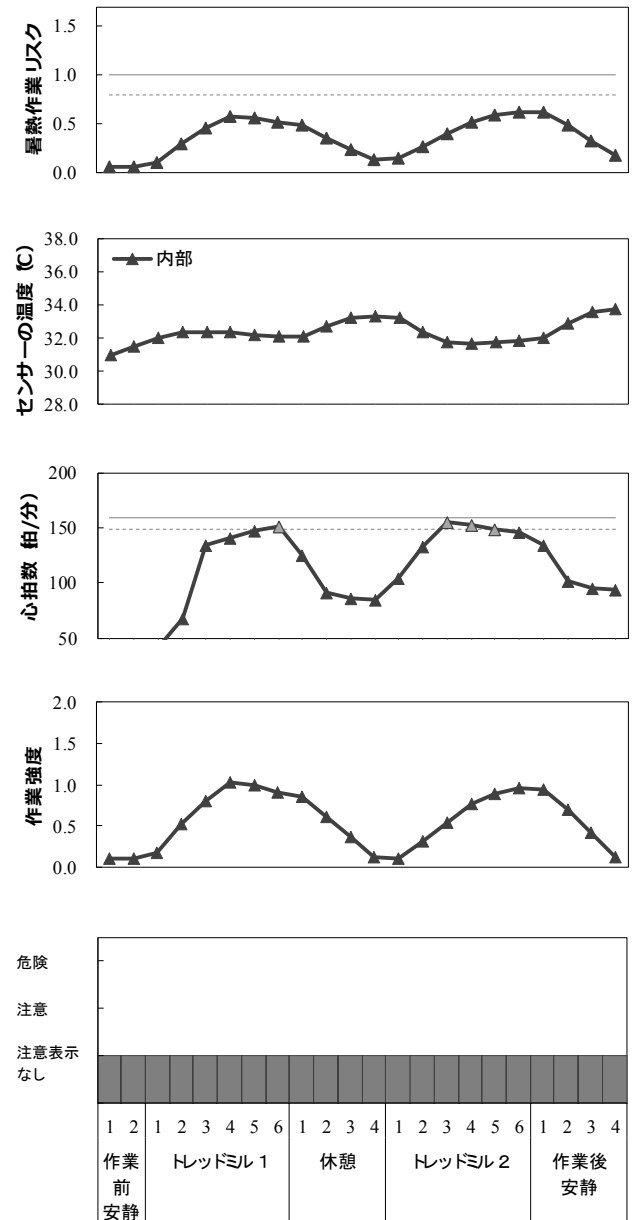
図 12 条件 1 における実験参加者 11 の各種測定データ

実験参加者12:室温25℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\bullet < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

ボルグ
スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

心拍数 $(180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分} \leq \triangle$
 $(180 - \text{年齢} - 10) \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$
 $\blacktriangle < (180 - \text{年齢}) \text{ 拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

図 13 条件 1 における実験参加者 12 の各種測定データ

実験参加者01:室温35℃, 湿度50%

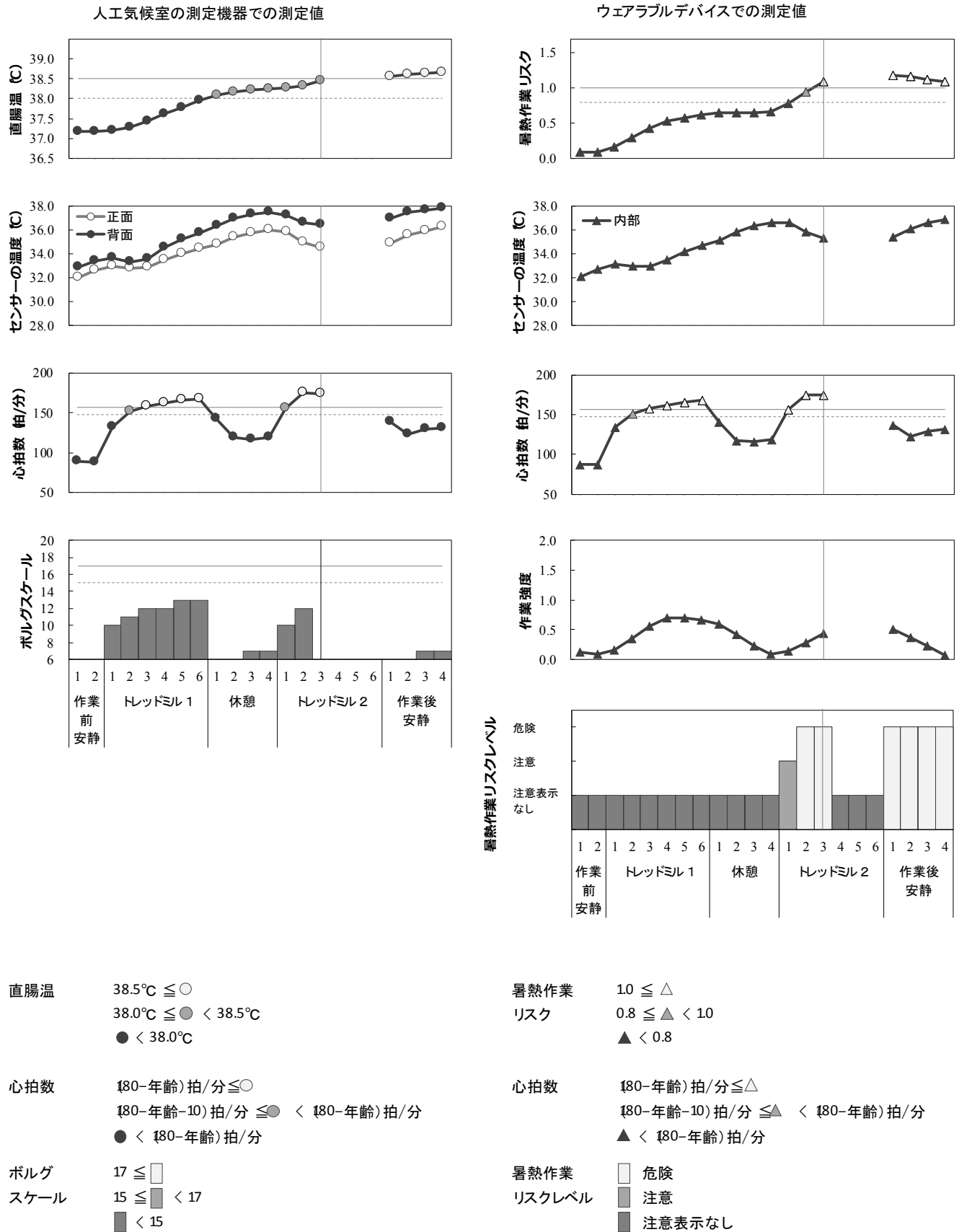
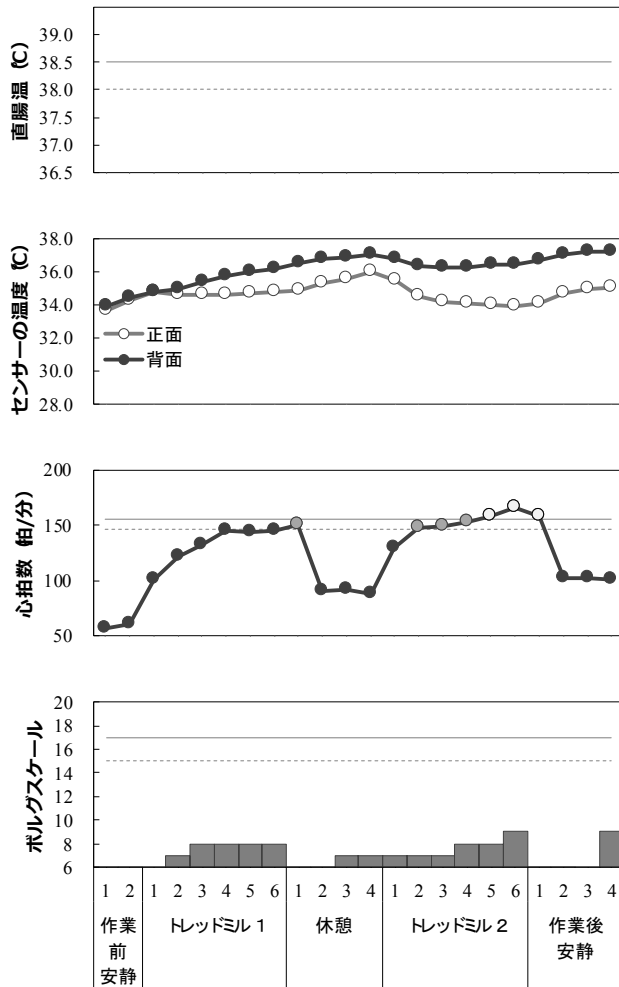


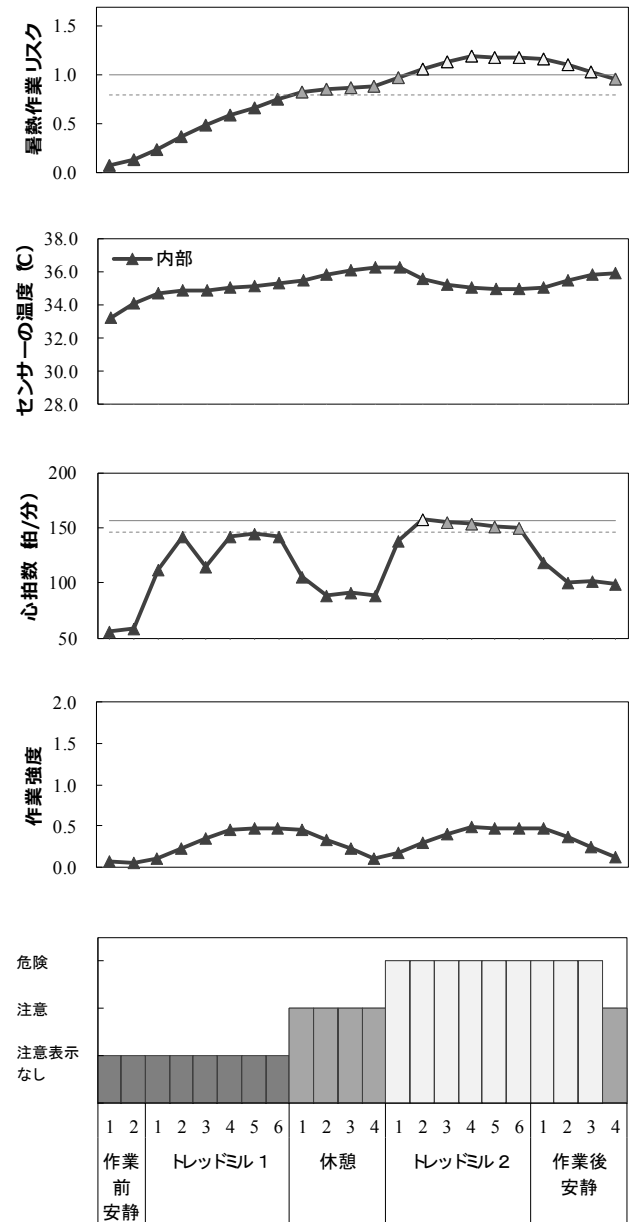
図 14 条件 2 における実験参加者 01 の各種測定データ

実験参加者02:室温35℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $\leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分 $\leq \bigcirc$
 $\leq 180 - \text{年齢} - 10$ 拍/分 $\leq \bullet < \leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分
 $\bullet < \leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分

ボルグ
 スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
 リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

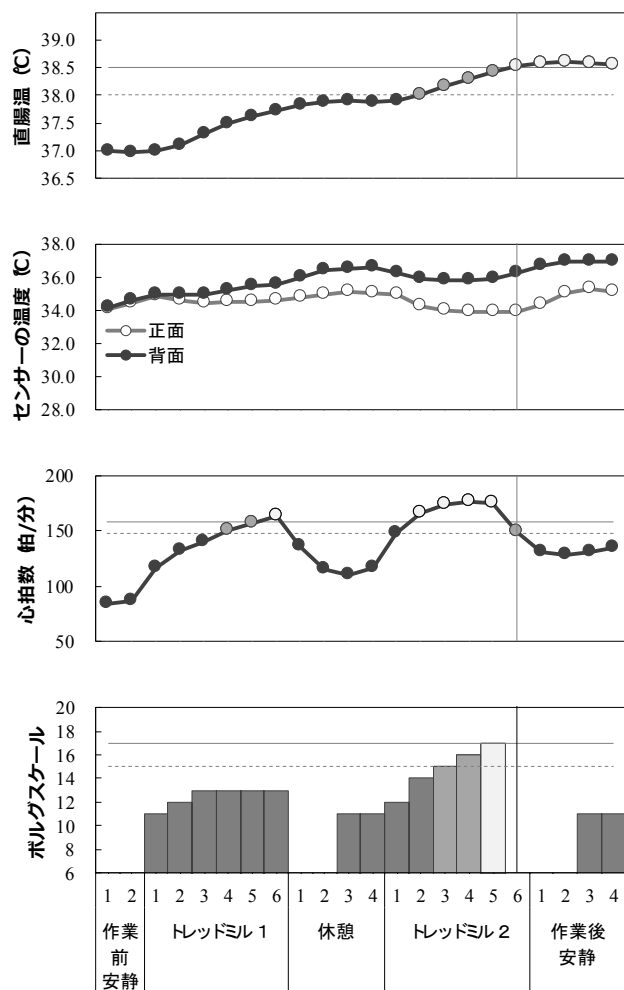
心拍数 $\leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分 $\leq \triangle$
 $\leq 180 - \text{年齢} - 10$ 拍/分 $\leq \blacktriangle < \leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分
 $\blacktriangle < \leq 180 - \text{年齢}$ 拍/分

暑熱作業
 リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

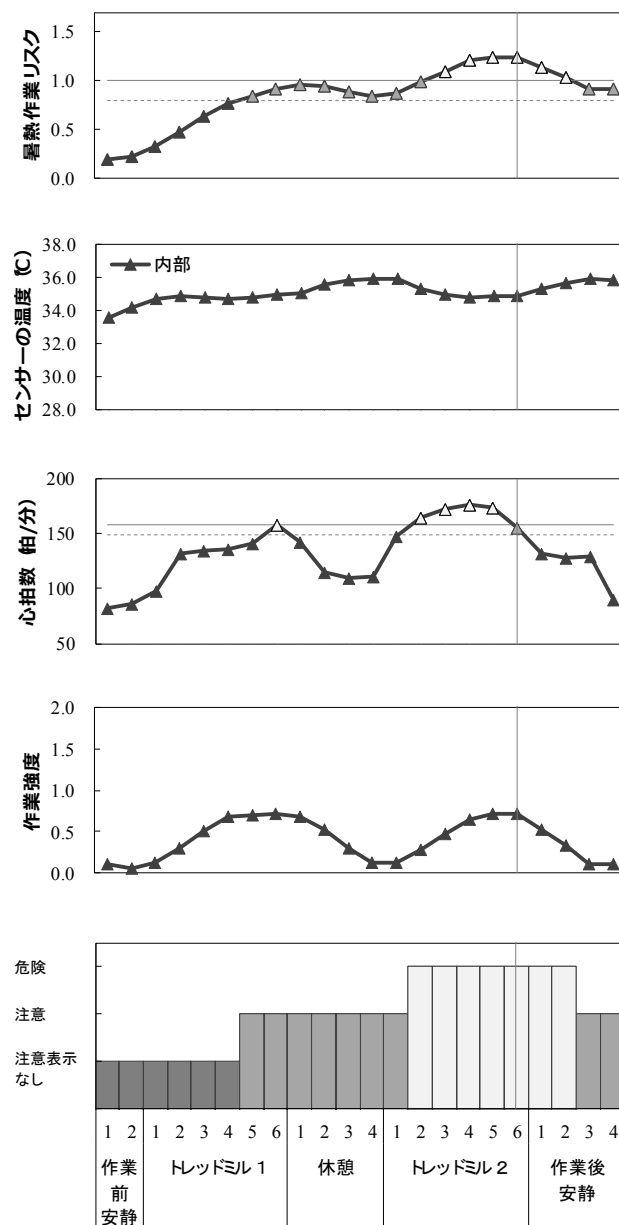
図 15 条件 2 における実験参加者 02 の各種測定データ

実験参加者03:室温35℃, 湿度50%

人工気候室の測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $\{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分} \leq \bigcirc$
 $\{80 - \text{年齢} - 10\} \text{拍/分} \leq \bullet < \{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分}$
 $\bullet < \{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分}$

ボルグ
スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \blacksquare < 17$
 $\blacksquare < 15$

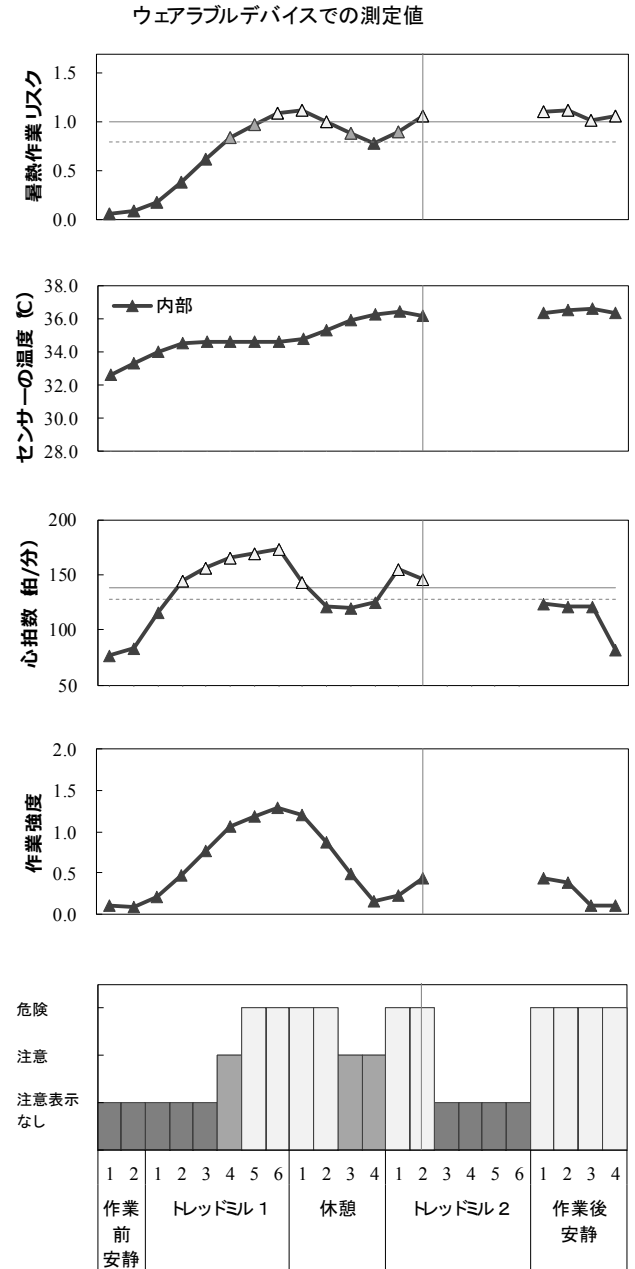
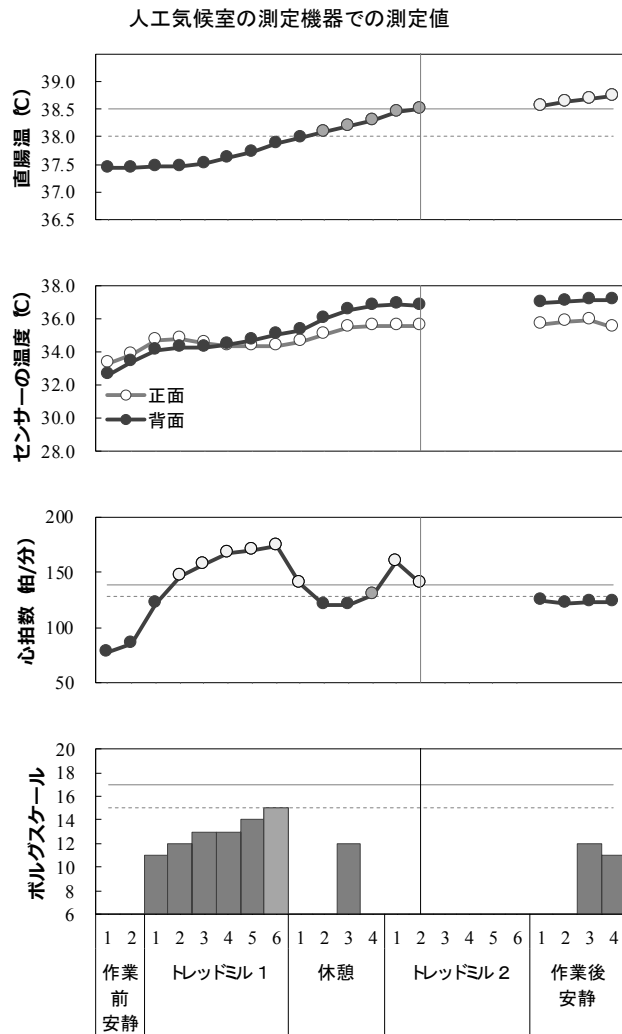
暑熱作業
リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

心拍数 $\{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分} \leq \triangle$
 $\{80 - \text{年齢} - 10\} \text{拍/分} \leq \blacktriangle < \{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分}$
 $\blacktriangle < \{80 - \text{年齢}\} \text{拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル $\square$ 危険
 $\blacksquare$ 注意
 $\blacksquare$ 注意表示なし

図 16 条件 2 における実験参加者 03 の各種測定データ

実験参加者04:室温35℃, 湿度50%



直腸温

$38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数

$180\text{-年齢) 拍/分} \leq \bigcirc$
 $180\text{-年齢)-10) 拍/分} \leq \bullet < 180\text{-年齢) 拍/分}$
 $\bullet < 180\text{-年齢) 拍/分}$

ボルグ
スケール

$17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
リスク

$1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

心拍数

$180\text{-年齢) 拍/分} \leq \triangle$
 $180\text{-年齢)-10) 拍/分} \leq \blacktriangle < 180\text{-年齢) 拍/分}$
 $\blacktriangle < 180\text{-年齢) 拍/分}$

暑熱作業
リスクレベル

$\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

図 17 条件 2 における実験参加者 04 の各種測定データ

実験参加者05:室温35℃, 湿度50%

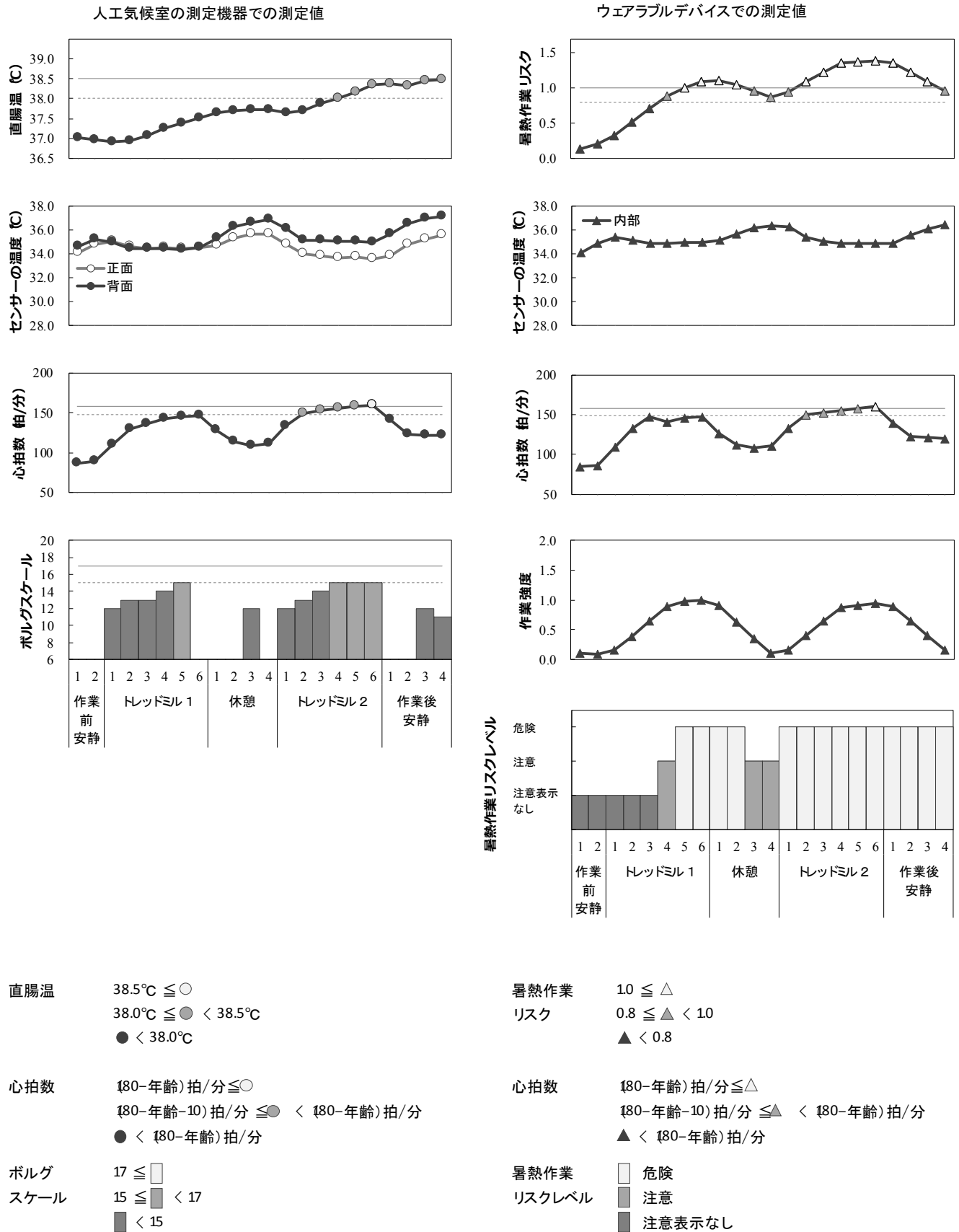
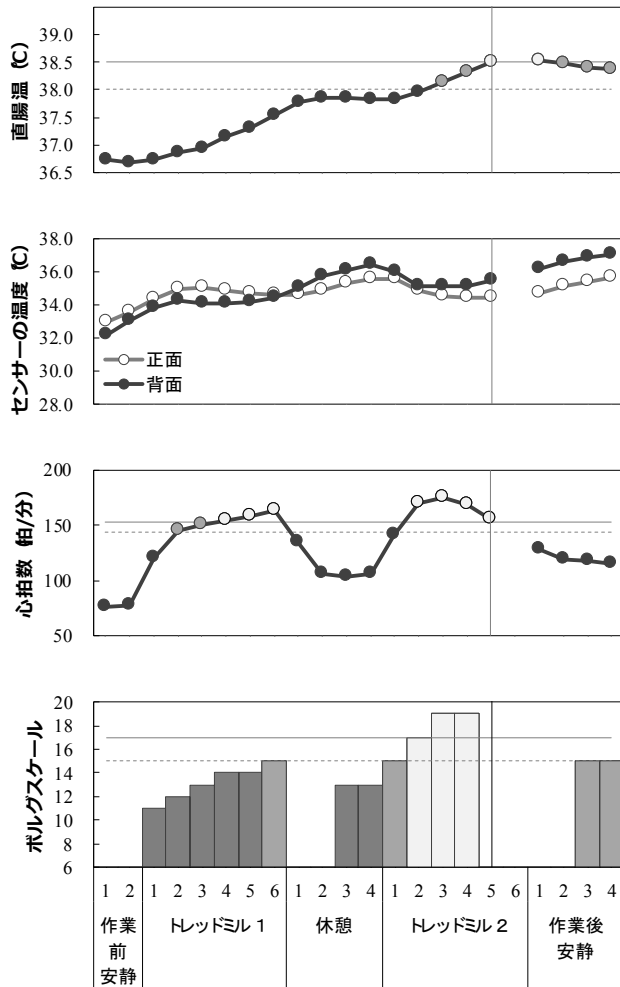


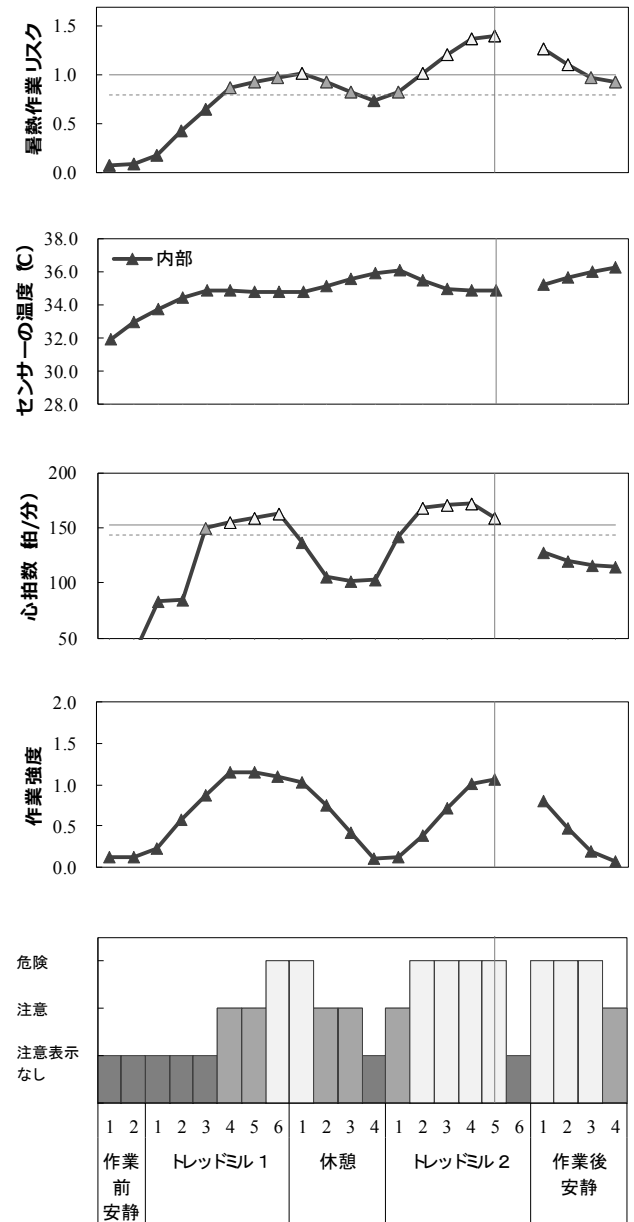
図 18 条件 2 における実験参加者 05 の各種測定データ

実験参加者06:室温35℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温

$38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$

$38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$

$\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数

$180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \bigcirc$

$180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

$\bullet < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

ボルグスケール

$17 \leq \square$

$15 \leq \text{■} < 17$

$\text{■} < 15$

暑熱作業リスク

$1.0 \leq \triangle$

$0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$

$\blacktriangle < 0.8$

心拍数

$180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分} \leq \triangle$

$180\text{-(年齢-10)} \text{ 拍/分} \leq \blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

$\blacktriangle < 180\text{-(年齢)} \text{ 拍/分}$

暑熱作業リスクレベル

$\square$ 危険

■ 注意

■ 注意表示なし

図 19 条件 2 における実験参加者 06 の各種測定データ

実験参加者07: 室温35℃, 湿度50%

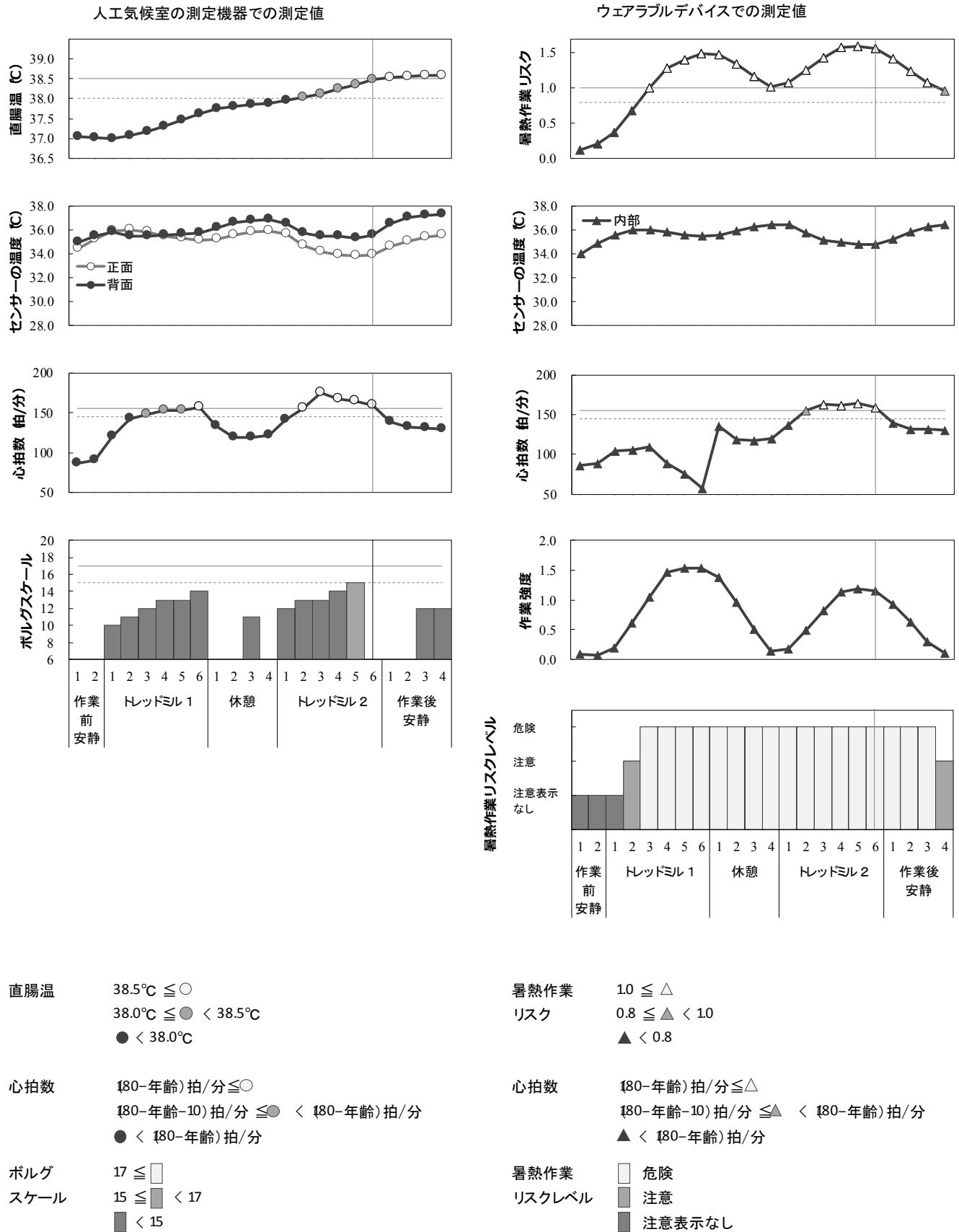


図 20 条件 2 における実験参加者 07 の各種測定データ

実験参加者08:室温35℃, 湿度50%

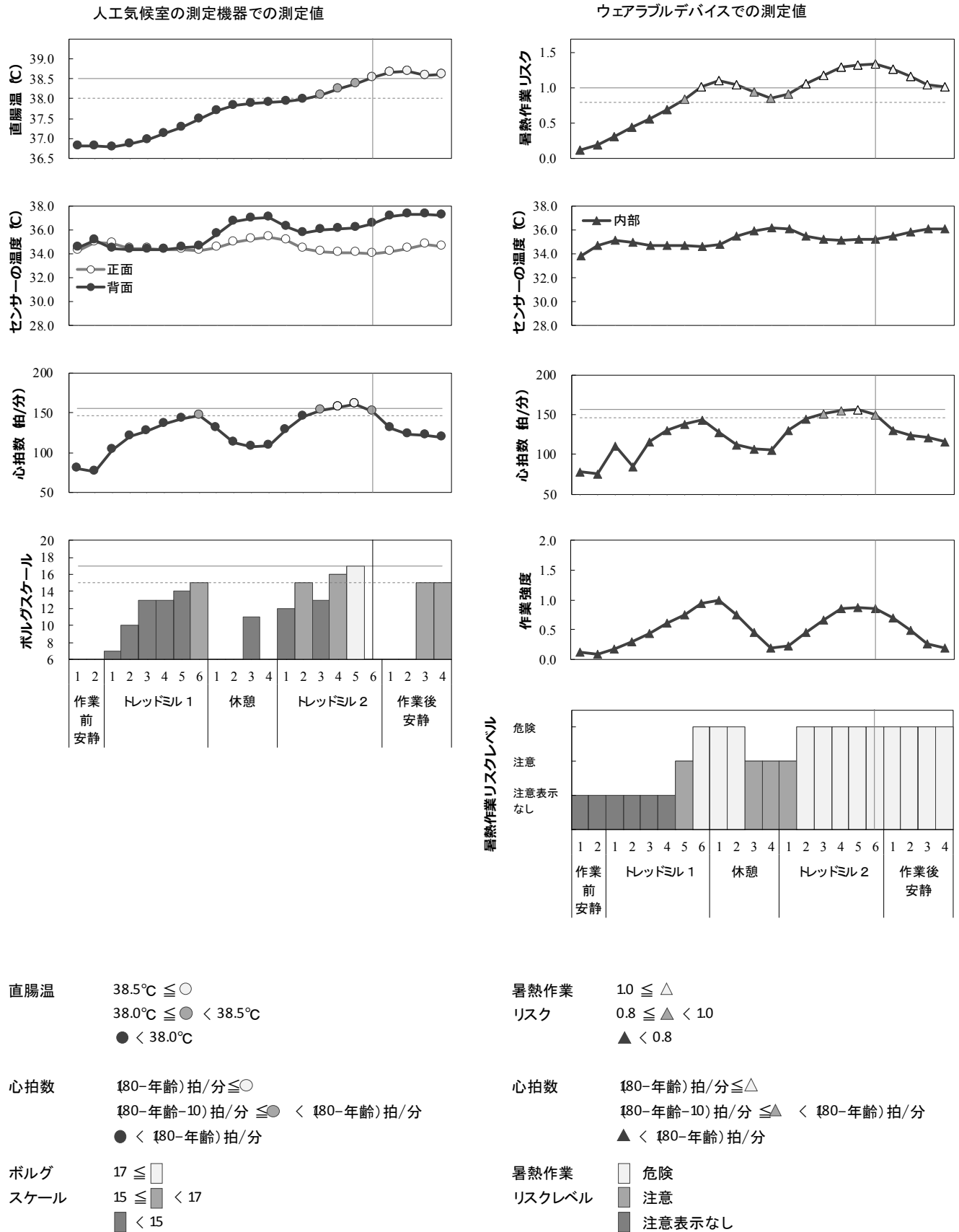


図 21 条件 2 における実験参加者 08 の各種測定データ

実験参加者09:室温35℃,湿度50%

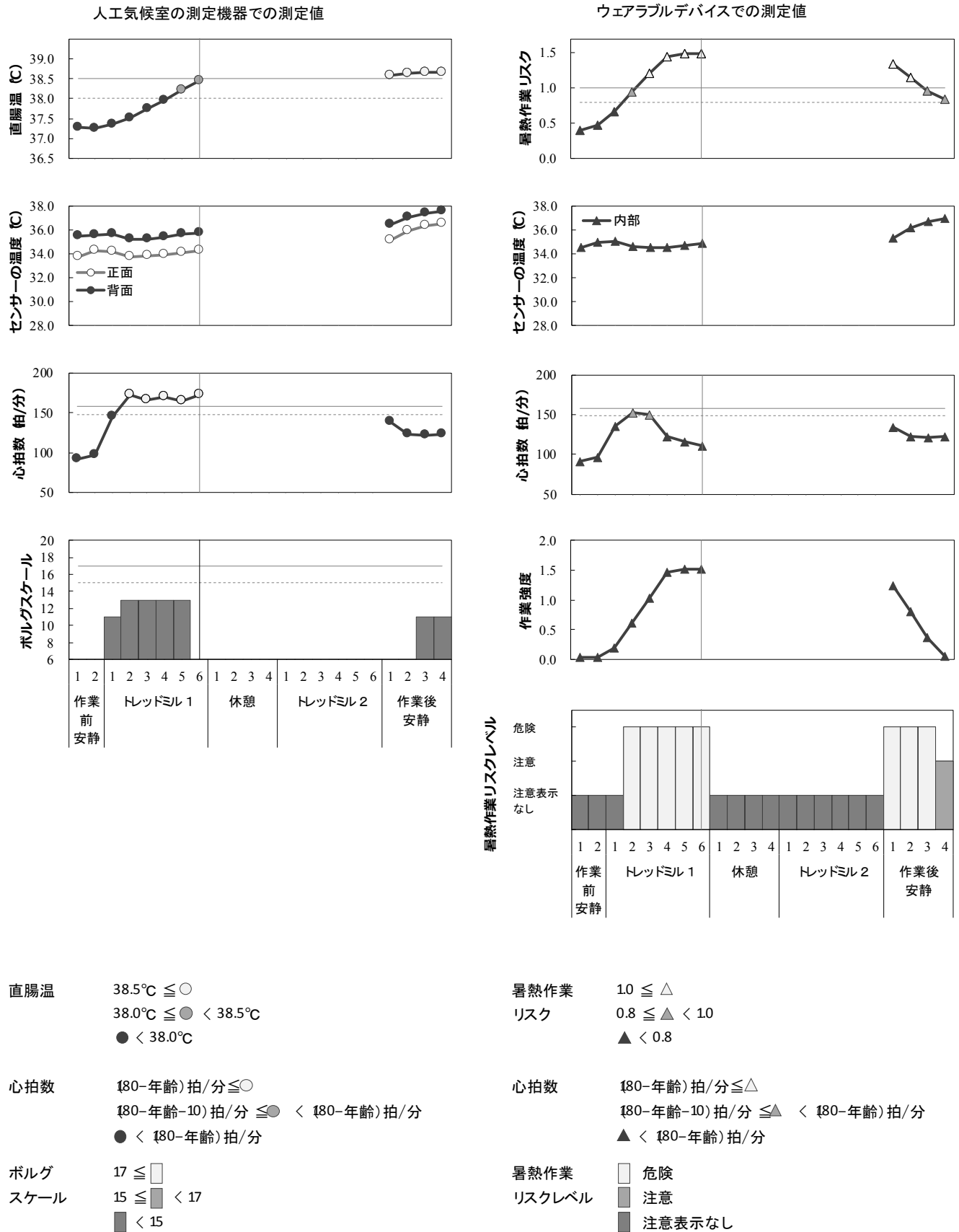
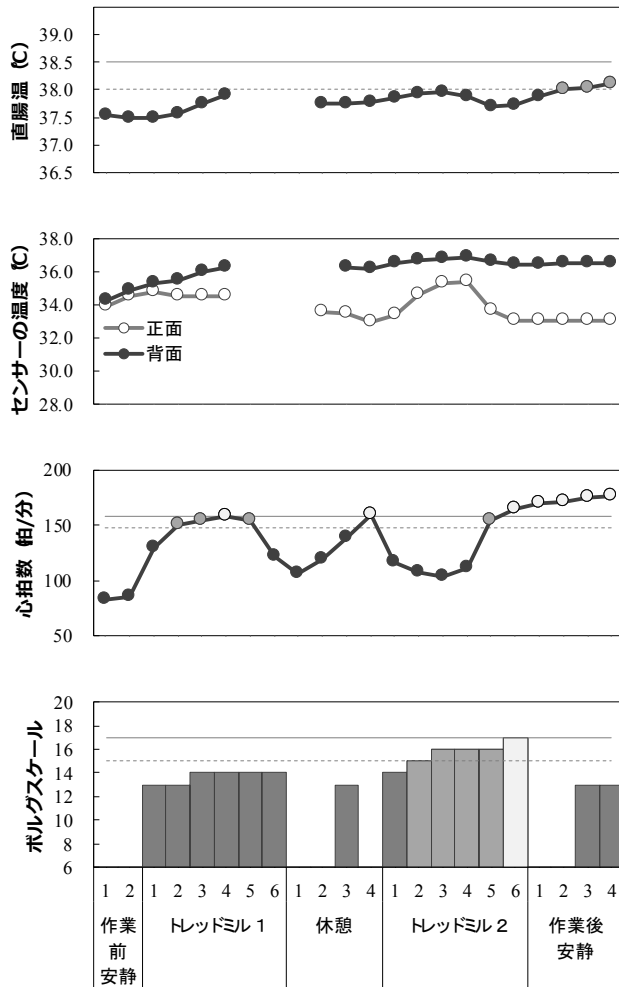


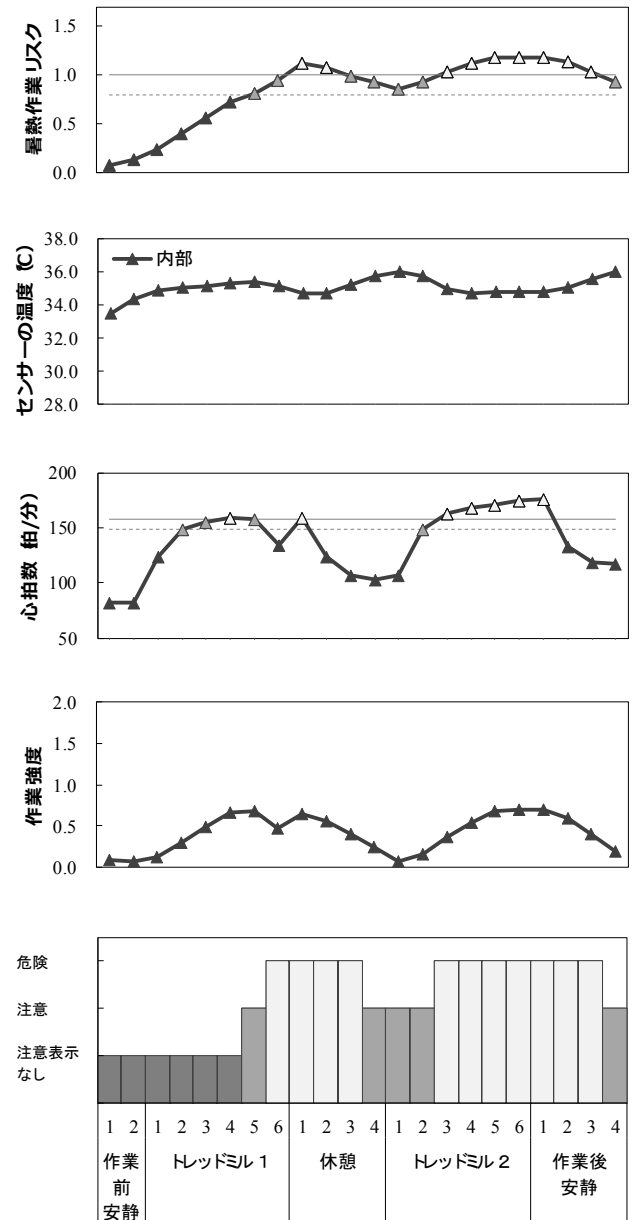
図 22 条件 2 における実験参加者 09 の各種測定データ

実験参加者10:室温35℃, 湿度50%

人工気候室での測定機器での測定値



ウェアラブルデバイスでの測定値



直腸温 $38.5^{\circ}\text{C} \leq \bigcirc$
 $38.0^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 38.5^{\circ}\text{C}$
 $\bullet < 38.0^{\circ}\text{C}$

心拍数 $\text{180-年齢) 拍/分} \leq \bigcirc$
 $\text{180-年齢-10) 拍/分} \leq \bullet < \text{180-年齢) 拍/分}$
 $\bullet < \text{180-年齢) 拍/分}$

ボルグ
 スケール $17 \leq \square$
 $15 \leq \text{■} < 17$
 $\text{■} < 15$

暑熱作業
 リスク $1.0 \leq \triangle$
 $0.8 \leq \blacktriangle < 1.0$
 $\blacktriangle < 0.8$

心拍数 $\text{180-年齢) 拍/分} \leq \triangle$
 $\text{180-年齢-10) 拍/分} \leq \blacktriangle < \text{180-年齢) 拍/分}$
 $\blacktriangle < \text{180-年齢) 拍/分}$

暑熱作業
 リスクレベル $\square$ 危険
 ■ 注意
 ■ 注意表示なし

図 23 条件 2 における実験参加者 10 の各種測定データ

実験参加者11:室温35℃, 湿度50%

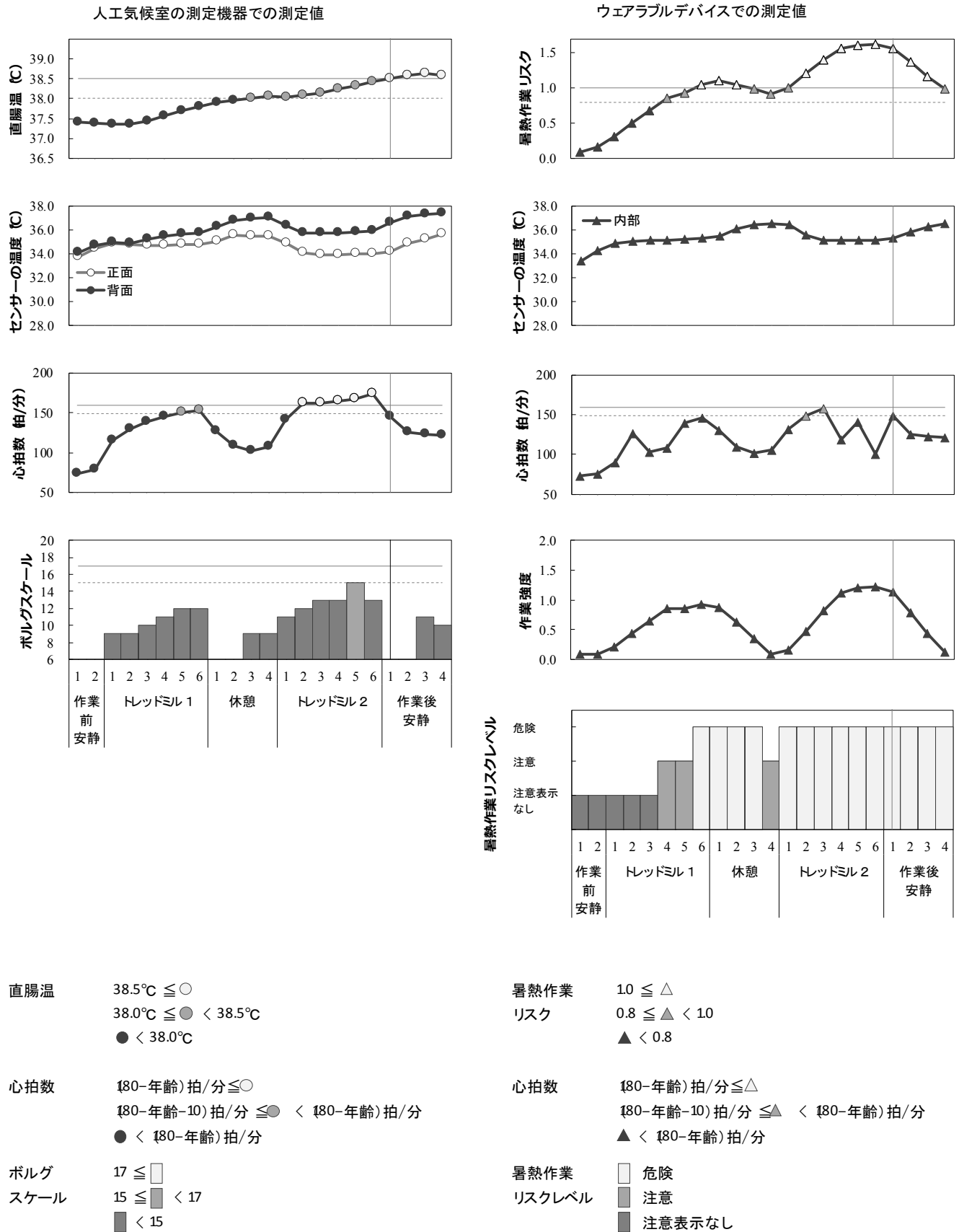


図 24 条件 2 における実験参加者 11 の各種測定データ

実験参加者12:室温35℃, 湿度50%

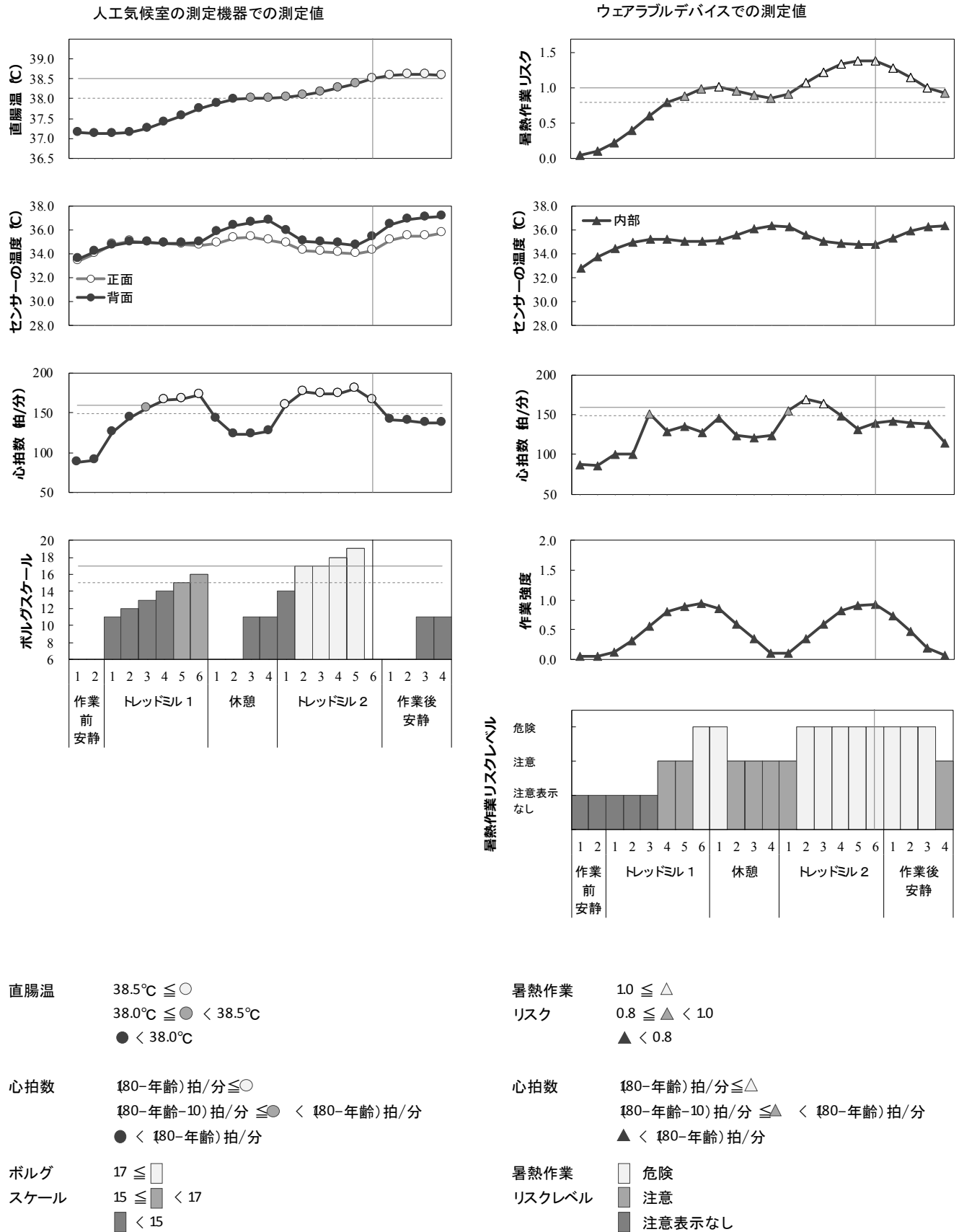


図 25 条件 2 における実験参加者 12 の各種測定データ

製品名 (商品名)	暑熱環境下での作業リスク管理システム (Smartfit for work)
製造元 (開発元)	倉敷紡績株式会社(クラブウ) 〒541-8581 大阪府中央区久太郎町 2-4-31
製品概要	・ 生体情報（心拍、温度、加速度）と気象情報などを解析・評価し、「暑熱環境下での作業熱中症リスク」「体調変化」「転倒転落」などの情報をリアルタイムに作業員や管理者にアラート通知することでリスク管理をサポートするシステム。 ・ リスク状態やデータは、スマートフォンや PC で閲覧可能。 ・ 産学での共創により開発などを進めている (クラブウ・大阪大学・信州大学・日本気象協会・ユニオンツール・KDDI、セックなど)
機器について (外観写真含)	 ・ シャツ型センサー (Smartfit：専用シャツ+専用デバイス) ・ 一人一台のスマートフォンを携帯
センシング項目 (生体指標、環境指標等)	・ センシング：心拍・温度（衣服内温度）・加速度 ・ 連携情報：気象情報(日本気象協会より) ・ 指標：熱ストレス（衣服内の温度、気象情報） 作業強度（加速度センサー、心拍） などを用いて暑熱作業リスクを評価 ・ AI 機能を用いて、個々の体調変化を評価し、体調管理に役立てる。 ・ 加速度を用いて、転倒転落を感知。
警告方法 (リスク判定項目等)	・ リスクを3段階で表示。 ・ リスクが高まった際には、スマートフォンにアラーム警告（表示・呼び出し音・バイブレーション）を鳴らす。（管理者の PC にもアラート表示） ・ 転倒転落状態を感知した場合にも、アラーム警告を鳴らす。
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 Bluetooth(通信距離 10m) ・ スマートホン～サーバー（4G 通信）

- ・ データサーバーは、クラウドサーバー

個人画面 管理画面



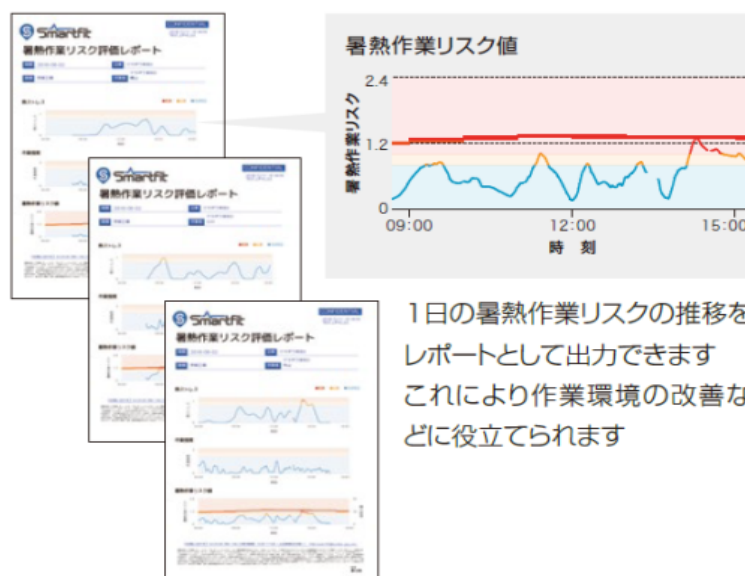
(個人画面 (スマホ))

- ・ 当日の暑熱作業リスク推移が確認可能
- ・ 現在の暑熱作業リスクレベルが確認可能
- ・ 体調等の当日のレベルが確認可能
- ・ 警告アラート通知画面



(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)
- ・ 作業者全員の暑熱作業リスク評価、体調評価の一覧
- ・ アラート警告の発生者は赤字で表示
- ・ 暑熱作業リスクの個別状態が、散布図表示にて確認可能



	(レポート出力機能) ・個別の暑熱作業リスクレポートなど
使用実績 (現場事例)	建設業・製造業・警備業・運送業・ 産業廃棄物処理業・施設管理メンテナンス業・ 小売業など 2018年7月～2019年1月 これまで延べ7000人以上の使用実績 ＊ 当システム使用現場において、熱中症発症者は報告されていない。 ＊ 熱中症予防だけでなく、体調不良者の早期発見にも役立ったという事例あり。 ＊ 現在、データ集積が進んでおり、今後、さらに評価精度が向上することが見込まれる。  (2018.10 緑十字展の展示パネルより)

Ⅱ．研究成果の刊行に関する一覧

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
なし					

<学会発表>

- Current and advanced measures against heat stroke in Japanese workplaces. (oral&poster)

Takashi Maruyama, Shinpei Yamada, Chie Kurosaka, Yuriko Hachiya, Yoichi Ueta, Toshiaki Higashi

The 29th China Korea Japan Conference on Occupational Health(2019 年 4 月 22～23 日、中国南京市)
- 熱中症防止のための AI 技術を用いた深部体温推定の試み（口演）

八谷百合子、筒井保博、黒坂知絵、山田晋平、丸山崇

第 92 回日本産業衛生学会(2019 年 5 月 22～25 日、名古屋)
- 企業における熱中症対策の現状と先進事例調査（口演）

丸山崇、八谷百合子、黒坂知絵、山田晋平、上田陽一、東敏昭

第 92 回日本産業衛生学会(2019 年 5 月 22～25 日、名古屋)
- Poincare plot indexes of heart rate variability: Pattern II responses and mental workload

Chie Kurosaka, Hiroyuki Kuraoka, Shinji Miyake

Human-Computer Interaction (HCI) International 2019 (2019 年 7 月 26～31 日、フロリダ州オーランド)
- AI 技術を用いた深部体温推定の試み(ポスター)

八谷百合子、筒井保博、黒坂知絵、山田晋平、丸山崇

第 54 回全国大学保健管理研究集会(2019 年 10 月 9 日、札幌)
- Keras を用いた熱中症防止のための深部体温推定の試み（口演）

八谷百合子、筒井保博、黒坂知絵、山田晋平、丸山崇

日本産業衛生学会産業保健 AI 研究会第 1 回研究集会（2019 年 12 月 1 日、東京）

労災疾病臨床研究事業費補助金
令和元(2019)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2(2020)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