
令和 3 年度 修士学位論文

生体信号を用いた屋外作業員の
熱中症に関する研究

指導教員 池浦 良淳 教授

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

人間支援システム研究室

岩坂 航太

目次

第 1 章論.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 本論文の構成	4
第 2 章 送電鉄塔での建設作業における作業内容と熱中症のリスク	5
2.1 作業内容, 環境	5
2.2 鉄塔の架線作業における熱中症の危険性.....	7
第 3 章 砕石路面上での歩行動作における足部運動計測.....	9
3.1 実験内容及び実験条件	9
3.2 実験装置概要	11
3.2.1 深部体温検出方法	12
3.2.2 脈拍数検出方法.....	13
3.3 アンケートによる作業者の熱中症レベル.....	13
3.4 評価方法	14
3.5 実験結果	14
第 4 章 熱中症レベルと深部体温及び脈拍数との関係.....	27
4.1 熱中症レベルと脈拍数の変動.....	27
4.2 領域 B における熱中症レベルと深部体温の変動	28
4.3 屋外作業員身体データ測定実験のまとめ及び考察.....	30
第 5 章 結論	34
5.1 まとめ	34
5.2 今後の課題	34

参考文献	36
謝辞	38

第 1 章

序論

1.1 研究背景

電鉄塔は日本各地に電気を供給するために数多くに点在しており、現在でも新たな建設が行われている。送電鉄塔の建設は、まだ人による手作業の作業が多く、電線を張るような空中での作業になると、かなり体に負担のかかる作業になる。さらに猛暑日などの厳しい環境下で作業を行う場合、熱中症などの災害や集中力低下などを原因としたヒューマンエラーにつながりやすい。空中での作業においては地上の作業に比べ、こうした異変を早めに検知しなければ作業員の怪我、事故につながる危険性が高まってしまうことが予想される。そのため、作業員の身体への負担を評価する指標を検討することが必要不可欠である。

人間の運動時の身体データと熱中症に関する研究はほかにも行われている。中井らは環境温度と熱中症発生件数に着目し運動時の熱中症予防指針の環境温度だけでなく、人口環境による温度変化も併せて考慮する必要があることを指摘した^[1]。個人の生理的な要因を考慮した熱中症予防に関する研究として山本らは水分補給と心拍変動（HRV）の関係性に着目し、スポーツ活動中の飲水が HRV に与える影響の解明に向けた計測実験を行い、飲水の交感神経系への効果は速やかに現れ、副交感神経への影響は持続する可能性が示唆された^[2]。渡井らは簡易的な運動後 15 分間の深部体温、脈拍数、呼吸数から熱中症に近い被験者の特徴を分析し指標を検討している^[3]。その他にも様々な研究が行われている^{[4]-[5]}。

このように熱中症に関して環境温度との関係や模擬運動時の身体データとの関係に関

する研究は数多く行われているが、実際の建設現場での作業員の身体データと熱中症の関係に関する研究は行われていない。実際の作業員の熱中症を予防するためには作業員の身体データから熱中症の指標を確立することが重要だと考える。

1.2 研究目的

熱中症を予防するために暑さ指数（WBGT, Wet Bulb Globe Temperature）が使われることが多い。WBGTは人体と外気との熱のやりとり（熱収支）に着目した指標で、人体の熱収支に与える影響の大きい ①湿度、②日射・輻射(ふくしゃ)など周辺の熱環境、③気温の3つを取り入れた指標となっている^[6]。図 1.1 に WBGT と熱中症予防運動指針との関係を示す。近年、気温が上昇傾向にあり、WBGT が 31℃以上になることもしばしばあり、その場合は、屋外での作業が不可能となる。先に示したように、WBGT は湿度、熱環境、気温といった環境のデータのみを利用して求められているが、周囲の環境温度の条件だけでは組織全体に対しての熱中症に対する予防しかできない。熱中症の状態を各個人の身体に関するデータより特定することができれば、WBGT より正確に熱中症の状況を把握ことができると考えられる。また、実際に現場で働いている作業員の方の身体データから熱中症を予測できれば、より実用性の高い熱中症予防が可能になると考えられる。そこで、本研究では、身体データと熱中症との関連を調べることを目的とし、夏場での建設現場における作業を対象とし、作業員の身体データを測定し、熱中症に関する指標を検討する。

熱中症と身体データとの関係として、ヒトは恒温動物であるが、体温を一定に保てるわけではなく、視床下部の体温調節中枢の誤動作により、例えば、セットポイントが 40℃になれば、熱射病で体温が 38-39℃となっても体が震えるとのことである^[7]。体の震えは、さらなる体温上昇を招き、筋肉、肝臓の破壊がおこり重篤化する。とくに、深部体温が 40℃を超えると筋骨格の変成や壊死が起こり、筋細胞より蛋白や電解質などのい

ろいろな成分が血液中に流出するという。それらを防止するには、作業前、作業中、作業後でリアルタイムに皮膚体温と深部体温の計測が必要とのことである。

熱中症の症状にはI度からIII度の3段階の症状があり^[8]、III度に行くほど症状が重くなる。本実験で熱中症として予防する対象はI度の熱失神の状態である。熱失神に至る主な原因は体表血流の増加に伴う血圧低下とされている。熱中症の分類とそれぞれにみられる症状、原因を示したものを図 1.2 に示す。これより、熱中症の原因に関係する身体的なデータとして、発汗量、脈拍数、深部体温が有効であることが分かる。本研究ではその中でも脈拍数、深部体温について注目し、深部体温を測定できるウェアブル型のセンサーを選定して利用する。

気温 (参考)	暑さ指数 (WBGT)	熱中症予防運動指針	
35°C以上	31°C以上	運動は原則中止	特別の場合以外は運動を中止する。 特に子どもの場合には中止すべき。
31~35°C	28~31°C	厳重警戒 (激しい運動は中止)	熱中症の危険性が高いため、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。 10~20分おきに休憩をとり水分・塩分の補給を行う。 暑さに弱い人※は運動を軽減または中止。
28~31°C	25~28°C	警戒 (積極的に休憩)	熱中症の危険が増すので、積極的に休憩をとり適宜、水分・塩分を補給する。 激しい運動では、30分おきくらいに休憩をとる。
24~28°C	21~25°C	注意 (積極的に水分補給)	熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。 熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極的に水分・塩分を補給する。
24°C未満	21°C未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補給は必要である。 市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。

※暑さに弱い人：体力の低い人、肥満の人や暑さに慣れていない人など
(公財) 日本スポーツ協会「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」(2019)より

Fig1.1 Heat stroke prevention guidelines by WBGT

新分類	従来分類	原因	症状/所見	治療
I度	熱痙攣 heat cramp	大量発汗に伴う 塩分喪失	筋肉の有痛性痙攣 いわゆる「こむら 返り」	安静、環境改善、 塩分+水分補給、 経口補水液など、 必要に応じて点滴
	熱失神 heat syncope	体表血流の増加 に伴う血圧低下	一過性の意識消失	安静、環境改善、 輸液
II度	熱疲労 heat exhaustion	暑熱への曝露 水分、塩分喪失	頭痛、悪心、嘔吐、 倦怠感など 深部体温 40℃ 未 満	安静、環境改善、 輸液、場合によっ ては入院
III度	熱射病 heat stroke	暑熱への曝露 水分、塩分喪失	意識障害 臓器障害	気道・呼吸・循環 確保、急速冷却 輸液、その他臓器 障害に対する治療

(日本救急医学会熱中症に関する委員会. 熱中症の実態調査-日本救急医学会Heatstroke STUDY 2012最終報告-.日救急医
会誌. 2014;25:846-862.より引用改変)

Fig1.2 Symptoms by classification of heat stroke

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章では、本研究で取り上げる作業現場における作業内容と熱中症が起きた際の問題点について述べる。第3章では、作業員の身体データ収集実験に用いる機器の説明と実験方法、結果について述べる。第4章では収集したデータと被験者へ行ったアンケートから熱中症との関連性について述べる。最後に第5章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章

送電鉄塔での建設作業における作業 内容と熱中症のリスク

送電鉄塔の建設作業では熱中症のリスクが高い屋外での架線作業における地上及び空中での作業内容、作業環境について調査することは今後の熱中症に関連した事故を防ぐためにも必要である。2.1 節では作業内容や作業環境について説明する。2.2 節では建設現場での熱中症発生時の問題点について説明する

2.1 作業内容，環境

今回対象とする建設現場は 135kv 送電鉄塔を建設するため設営された現場である。現場の環境は、日射を遮るものがなく、地表部に重機搬入のための鉄板を敷いているため、反射熱で暑い環境になっている。作業現場の様子を図 2.1 に示す。また、20 kg-60 kg の重量物を人力で扱うため、作業者の身体的負荷が大きい⁹⁾。作業内容に関しては地上作業と空中作業があり、地上作業では電線を送り出すためのウィンチの巻き上げ作業や、重機による現場環境の設営などがある。地上作業の様子を図 2.2 に示す。地上作業は空中に比べ身体的負荷は少ないが日射の反射熱により熱い環境になっている。空中作業では鉄塔に電気が流れることを防ぐためのがいしの交換や、電線に乗り出し作業を行う。鉄塔上部での作業は地表より多少風があるため、体感する温度は地上と比べ低い、電線への乗り出し作業については作業をし始めると 30 分-1 時間程度の間、自分の体幹のバランスで姿勢を保ち続ける必要があるため、集中力と筋力を使う。空中での乗り出し作業の様子を図 2.3 に示す。同じ現場であっても作業内容が違う場合、温度の感じ方や作業者の負担の度合いが違うため、従来の WBGT による熱中症に関する温度指標だけではなく、

作業者の身体データから熱中症を推定できるような指標が必要であると考える.



Fig.2.1 Ground work on iron plate



Fig.2.2 Winch operation on the ground



Fig.2.3 Electric wire embarking in the air

2.2 鉄塔の架線作業における熱中症の危険性

2020年では送電線工事の死者数が過去20年間で最も多く、送電線建設技術協会によると6名が死亡した^[10]。業界としても危険な作業としてのイメージがつくと、新しい作業員が確保しづらくなり、鉄塔作業員の労働年齢が上がることで、ますます熱中症による事故の危険性が増してしまうといった状況である。

鉄塔での架線作業では基本的に空中での作業となる。作業員は自ら鉄塔にのぼり手作業で架線の作業に取り組む。電線を張り替える際は、電線を一時的につるしておく必要があり、そのための金車という器具を持って鉄塔に上る^[11]。金車は10-15kgの重量があり、また、ボルトやナット工具類が落下するのを防ぐためそれら一つ一つにひもを結び付け自分の体につないでいる。この状態で鉄塔に上るのはかなりの運動量となり、熱中症のリスクが高い。また、この金具をつけた状態で、熱中症にかかり意識を失うことになった場合、落下の危険性が本人だけでなく地上の作業員にも衝突という危険性も予想される。このように架線作業における熱中症のリスクは非常に高く、先

に示した熱中症のⅢ度の症状である意識障害を引き起こす前に作業者が熱中症の状態であることを確認し、速やかに作業の中止を知らせる必要がある。

第 3 章

作業者の身体データ計測実験

屋外作業において人間の熱中症を推定するために必要な情報の中で、環境に関する情報として気温、湿度、WBGT 値が重要である。また作業員の身体データとしては深部体温、脈拍数、が重要である。本実験では環境条件と作業による運動について得られたデータから評価を行う。3.1 節では実験内容と実験条件について述べる。3.2 節では実験で用いた装置の概要を述べる。3.3 節では深部体温、脈拍数などについて、得られた実験データから評価する方法を述べる。3.4 節では深部体温、脈拍数に関して評価する方法について述べる

3.1 実験内容及び実験条件

屋外作業における熱中症推定のために身体データがどのように変化するのかを捉えるために身体データ収集実験を行った。対象となる作業は日射を浴びる屋外環境で 1 日通しての作業を行い、幅広い年代の作業員のデータを収集できる送電線工事鉄塔の架線作業とした。作業内容については作業基礎の設営、撤去(重機作業)、電線の延線(空中作業)、ウィンチ操作(地上作業)などがある。また、鉄塔作業現場では鉄塔以上に高い建物がなく空中または地上作業において日陰となる部分がなく、作業中は常に日光にさらされることから熱中症にかかった際の事故につながる危険性が高い現場である。実験協力者には事前に実験内容を説明し、実験協力の承諾を得られた 24~58 歳の男性 5 名を対象とした。各実験協力者にそれぞれ A-E の番号を割り当て、性別と経験年数を表したものを表 3.1 とする。実験協力者は 1 日あたり 4 人の方に協力してもらう。検証は熱中症の危険性が高い夏場である 9 月に計 5 日間行った。各実験日と WBGT 値、気温・湿度などの環境状況と各実験日に協力してもらう実験協力者をまとめたものを表 3.2 に示す。

実験協力者には身体データ測定のために作業時間である午前 8 時から午後 5 時まで

の間、身体データ測定機器を装着してもらい、1日を通してのデータを測定する。また作業者の主観的な健康状態を把握するためにアンケートを作業前、午後12時から午後1時までの昼休憩、作業後のタイミングで実施した。アンケートでは起床時間、朝食の有無などの基本的な作業前の身体状況から熱中症の兆候に関する健康状態、水分や塩分の取得状態を問う質問項目を用意した。アンケート内容を表3.3に示す。この現場実験は、工学研究科の実験倫理委員会にて承認を得て実施をしている

Table3.1 Sample data of experimental collaborators

Experimental collaborator	Age[years]	Gender	Years of experience
A	58	Male	37
B	49	Male	28
C	37	Male	12
D	37	Male	1
E	24	Male	1

Table.3.2 Environmental status

Experiment date	Average temperature[°C]	Highest temperature[°C]	Humidity[%RH]	experimental collaborators
9/9	29.3	31.9	62.7	A,C,D,E
9/10	30.4	32.3	44.2	A,B,C,E
9/13	30.4	34.3	42.0	A,B,C,D
9/14	25.8	28.8	58.9	A,B,C,D
9/15	30.3	32.2	48.6	A,B,C,D

Table3.3 Survey content

Check list	Contents
Lifestyle Habit	Sleeping time, Breakfast intake
Symptoms of heat stroke(5 level by each)	Dizziness, Sweat, Cramp, Heatache, Heaviness, Loss of concentration
Nutritional condition	Body salt , body water

3.2 実験装置概要

計測装置は Vitalgram (アフォードセンス社製) を使用した。[12]計測装置の外観を図 3.1 に示す。計測装置では、環境温度、深部体温、皮膚温度、心電を 1-60 秒サンプリングで測定し、csv 形式で保存する。計測装置の寸法は幅 54mm×奥行 20mm×高さ 5mm であり、重量は 4g である。ゲル電極を介して絆創膏のように直接胸に張り付けることで装着する。実際に皮膚に取り付けた様子を図 3.2 に示す。



Fig 3.1 Appearance of measuring



Fig 3.2 Wearing a body data measuring device

3.2.1 深部体温検出方法

Vitalgram (アフォードセンス) による深部体温の測定原理を図 3.3 に示す。相対温度により深部体温を算出しているため、アルゴリズムが簡易になっている。絶対値についてはアフォードセンスにて、エアロバイクなどによる運動時に直腸温度を直接測定した結果と相関性が高いことを確認している。深部体温の算出は、まず、射温度計により皮膚表面温度(T_{skin})を測定する。この際、黒体テープにより熱流の反射を防止している。次に、空隙を空けて、内部の基板で基板温度 T_{sub} を測定する。この際、熱流 W の方向性を一定とするため、端末の両側に断熱ブロックを設置している。

熱流 W は皮膚表面から基盤の間の熱抵抗を R_{air} として、次式で算出される。

$$W = \frac{T_{sub} - T_{skin}}{R_{air}}$$

また、深部体温 T_{core} は皮下の熱抵抗より次式で算出される。この際、皮下脂肪厚 R_{body} は 10 で計算した。

$$T_{core} = T_{skin} + W \cdot R_{body}$$

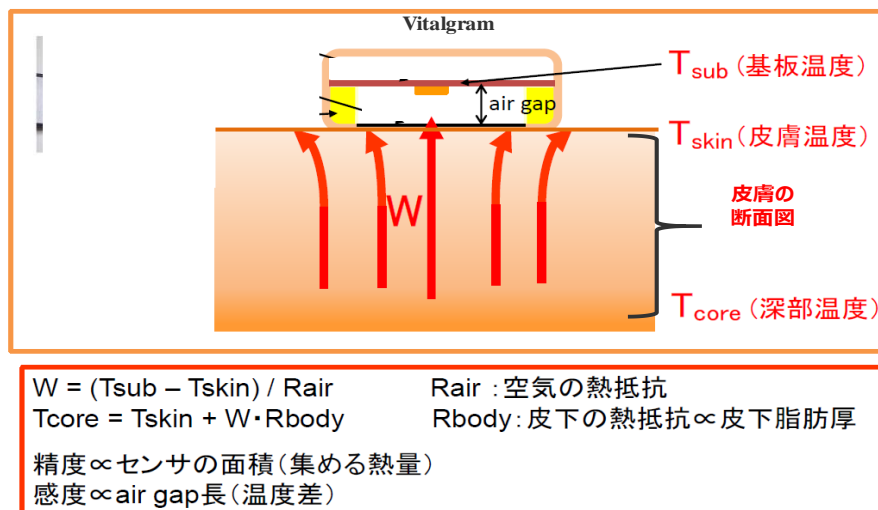


Fig.3.3 Principle of measuring deep body temperature in Vitalgram

3.2.2 脈拍数検出方法

作業者の脈拍数は Vitalgram によって測定された RRI から計算する^[12]。RRI は心室興奮から次の心室興奮までの時間を表しており周期的である。脈拍数は心室が 1 分間に収縮する回数なので本実験では運動時にリアルタイムで脈拍数を計測することができなかつたため RRI を用いて次式で脈拍数 P を計算する。

$$P = 60/RRI$$

3.3 アンケートによる作業者の熱中症のレベル

主観アンケートによって作業者の熱中症のレベルを区分けするために、アンケート項目を熱中症との関連度順に分けた。一番関連する項目として、頭痛、けいれんがあげられる。その次に関連する項目として吐き気、めまいがある。その次に関連する項目としてだるさ、集中力の低下があげられる。それぞれの項目の 5 段階評価によって作業者の熱中症レベルを決定する。このアンケート結果によって熱中症レベルを決定する。それぞれのレベルと特徴を図 3.4 に示す。

レベル0：健康状態に問題がない

レベル1：普段よりも発汗している

レベル2：だるさ，集中力の低下を訴えている

レベル3：吐き気，めまいを訴えている

レベル4：頭痛，腕や足のけいれんを訴えている

レベル5：まったく汗をかかない，意識障害

※今回の実験では軽い初期症状と中程度の初期症状を同時に訴えた者はいなかった
汗をかかない場合は受診が必要なレベルなので今回は単に汗をかいていないと判断

Fig3.4

3.4 評価方法

熱中症の主な要因とされている身体データとして深部体温，脈拍数があげられる．主観的なアンケートによる結果から実験協力者の熱中症レベルを決定し，身体データとの関連性やどのような特徴があるのかを確認する．具体的な解析として熱中症レベルごとの脈拍数の推移を確認する．そのあと脈拍数の上昇区間における熱中症レベルと深部体温の関係を確認し，熱中症かどうかの指標としての有効性を検証する．

3.5 実験結果

各実験日ごとの WBGT 値，実験協力者のアンケート結果による熱中症レベルを表 3.1 に示す．今回の実験で熱中症の症状がみられたのは全 20 回のデータ収集のうち 9 月 9

日の被験者 D,被験者 E,9月10日の被験者 E,9月13日の被験者 E,9月15日の被験者 D の5人であった。9月9日の被験者 D に関しては熱中症レベル1であり、アンケートでは普段より汗をかいていると回答していた。9月9日の被験者 E に関しては、熱中症レベル3であり、アンケートでは普段より多い発汗、めまい、だるさ、集中力の低下、頭痛を訴えている。この被験者に関しては複数の症状を訴えているが、レベル4未満の症状しか訴えていないので、熱中症レベル3とした。9月10日の被験者 E に関しては熱中症レベル4であり、アンケートでは、頭痛、吐き気だるさを訴えていた。9月13日の被験者 D に関しては熱中症レベルは2であり、アンケートでは普段より多い発汗とだるさを訴えていた。9月15日の被験者 D に関しては、熱中症レベルは1であり、アンケートでは普段より多い発汗を訴えていた。また、9月15日の被験者 D のデータに関しては測定に問題があり十分なデータが得られなかったため今回はそれを除いた19回のデータを全取得データとし、そのうち4人のデータを熱中症の傾向があるデータとして扱う。熱中症傾向にあった4人の脈拍数、深部体温の時系列データを図3.5-8に示す。第1縦軸に脈拍数、単位は[bpm],第2縦軸に温度、単位は[°C],横軸に時刻、単位は[hh:mm]を表している。青尾色の線は脈拍数の変動、橙色の線は深部体温、黄色の線は脈拍数の255区間の移動平均をとったものである。熱中症レベルが0であった被験者のデータを図3.9-23に示す。

Table 3.1

Date · WBGT[°C]	Experimental collaborators	LV.	Date	Experimental collaborators	Date	Date	Experimental collaborators	LV.
9/9 · 28.2	A	0	9/13 · 27.4	A	0	9/15 · 26.3	A	0
	C	0		B	0		B	0
	D	1		C	0		C	0
	E	3		D	2		D	1
9/10 · 26.4	A	0	9/14 · 25.8	A	0			
	B	0		B	0			
	C	0		C	0			
	E	4		D	0			

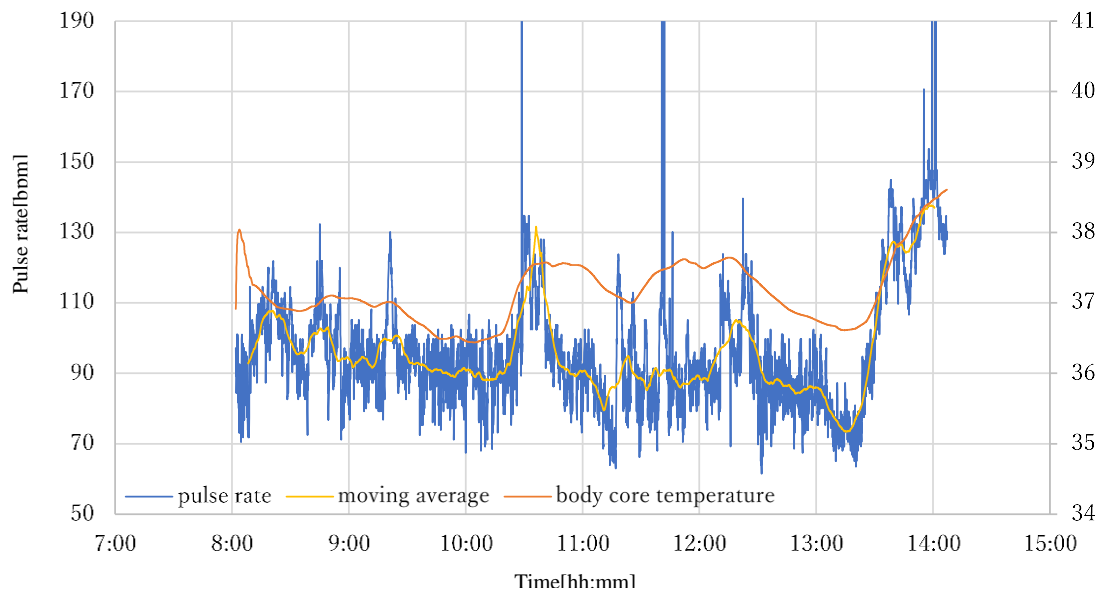


Fig 3.5 Measurement data of heat stroke level 1 (9/9.D)

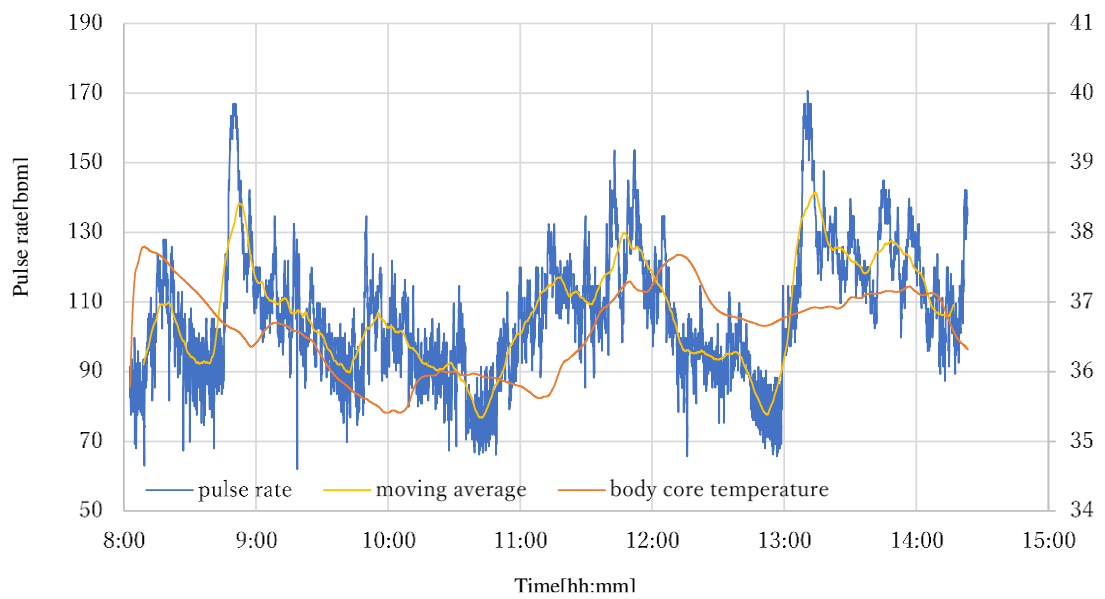


Fig 3.6 Measurement data of heat stroke level 3 (9/9.E)

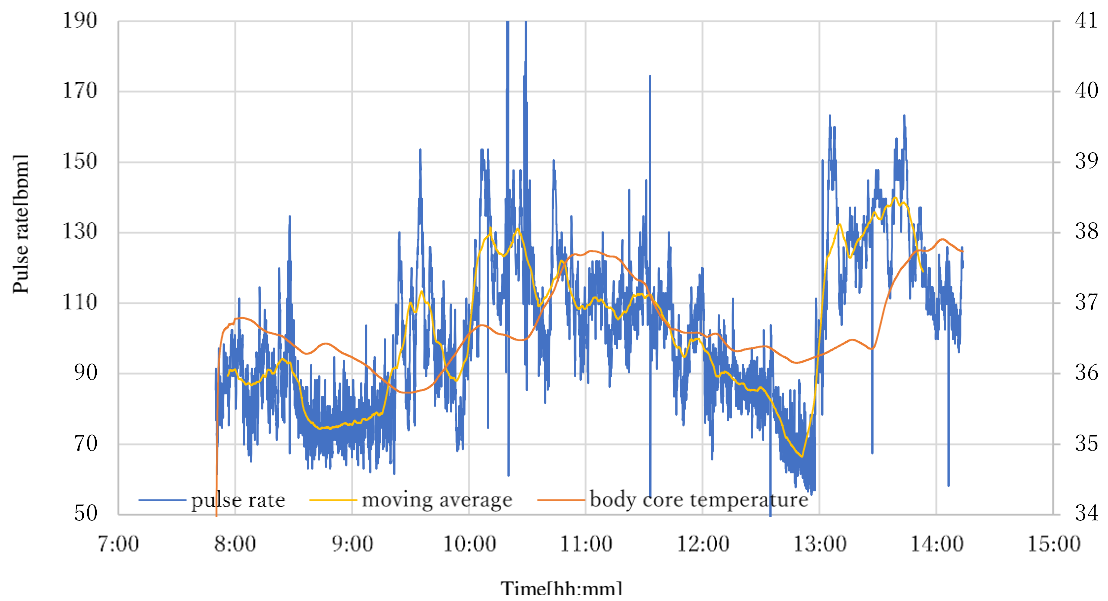


Fig 3.7 Measurement data of heat stroke level 2 (9/13.D)

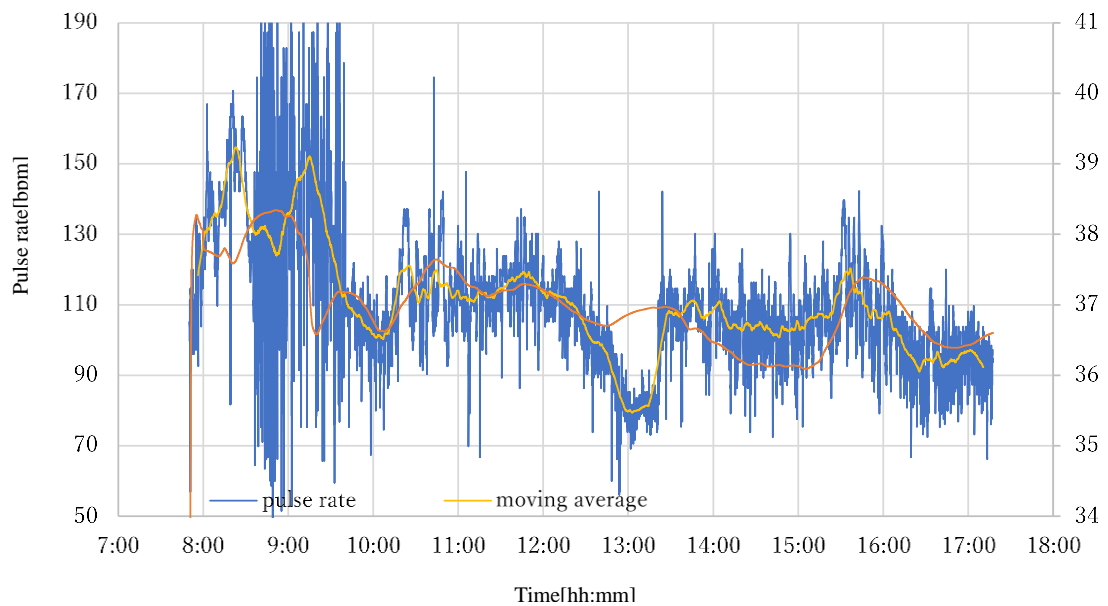


Fig 3.8 Measurement data of heat stroke level 4 (9/10.E)

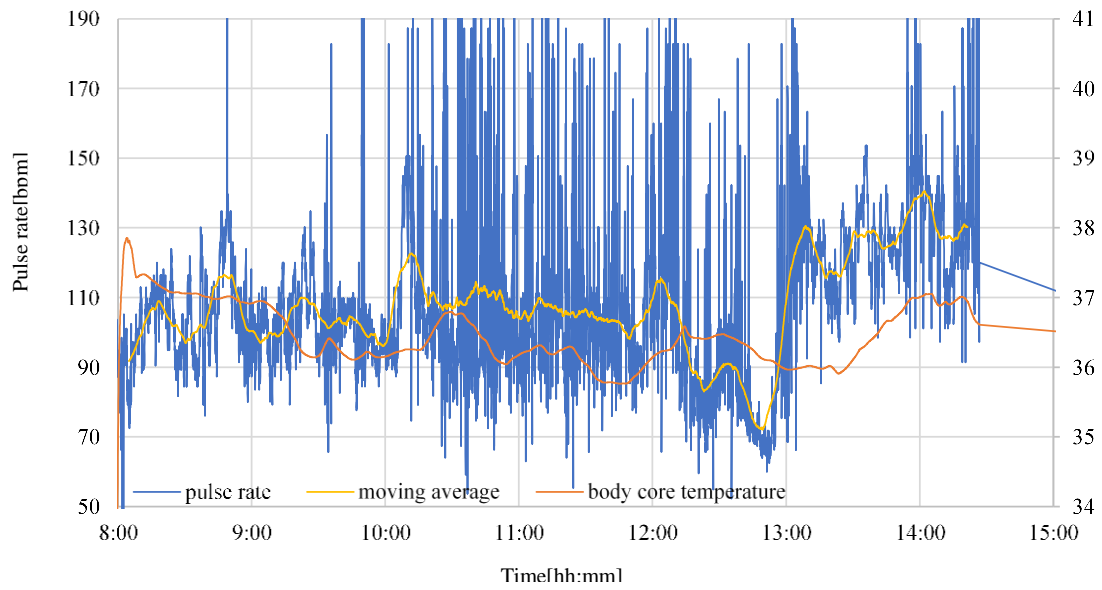


Fig 3.9 Measurement data of heat stroke level0 (9/9.A)

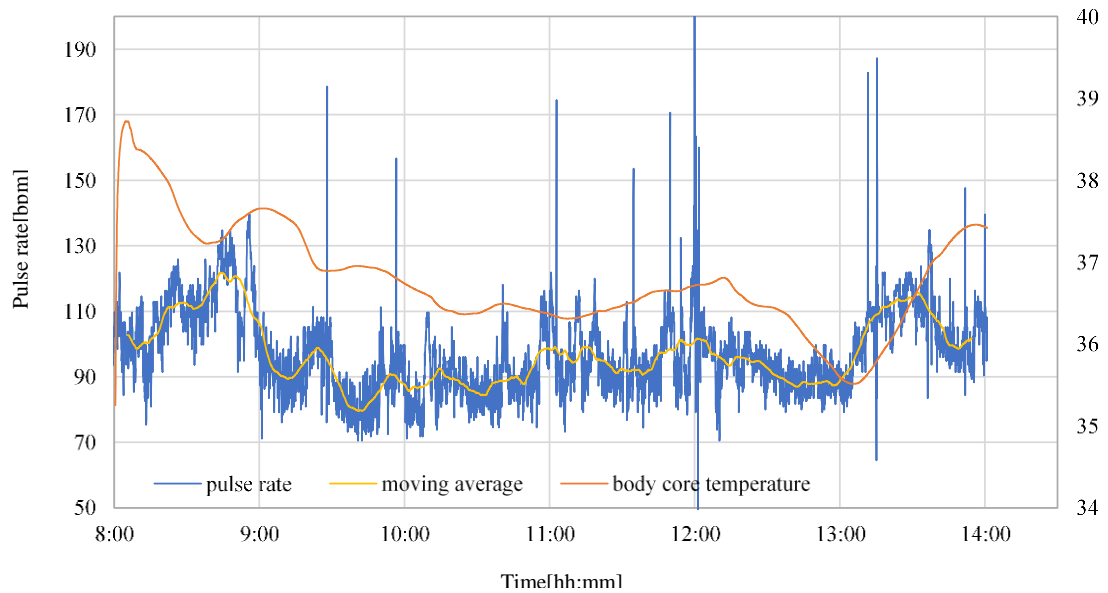


Fig 3.10 Measurement data of heat stroke level0 (9/9.C)

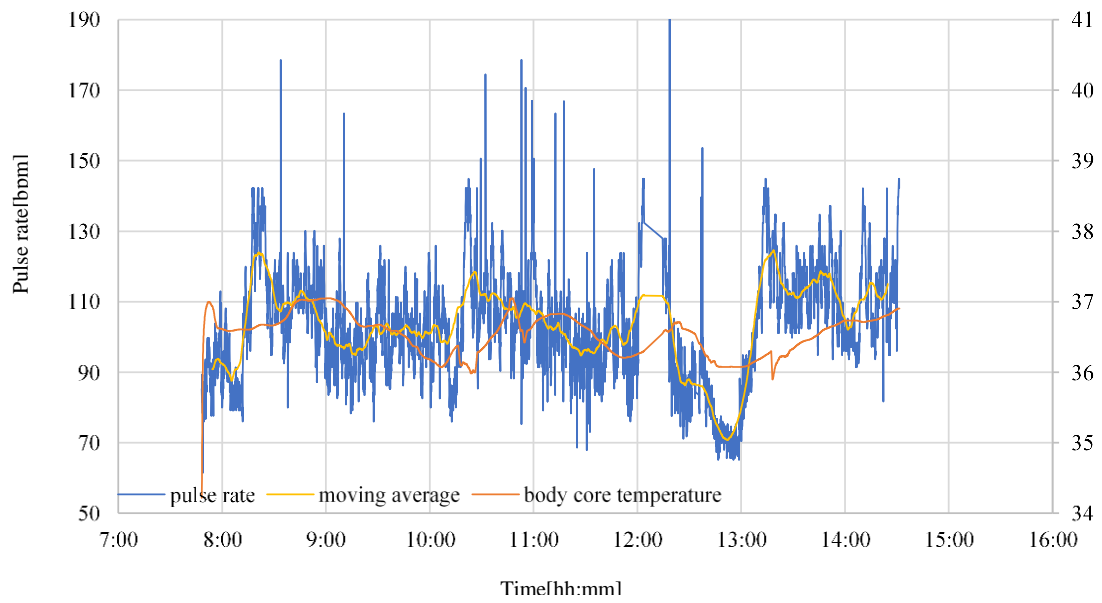


Fig 3.11 Measurement data of heat stroke level0 (9/10.A)

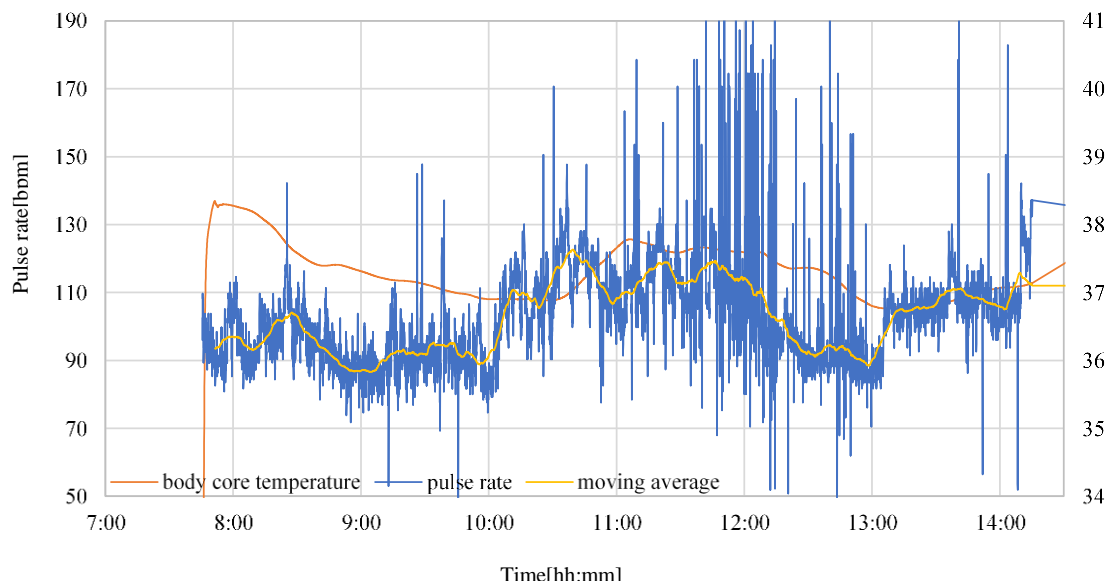


Fig 3.12 Measurement data of heat stroke level0 (9/10.B)

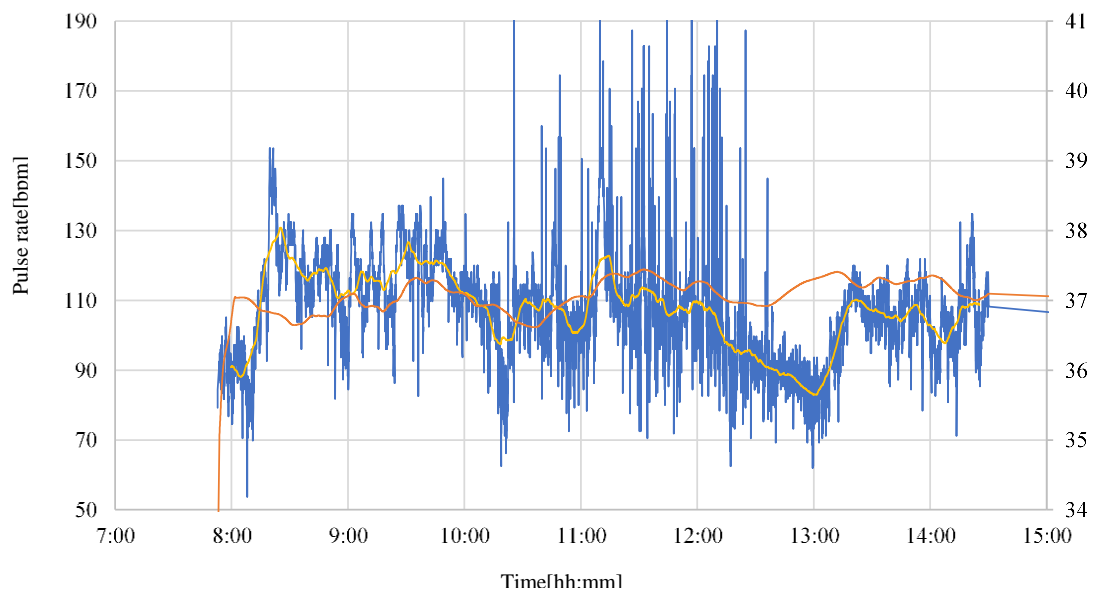


Fig 3.13 Measurement data of heat stroke leve0 (9/10.C)

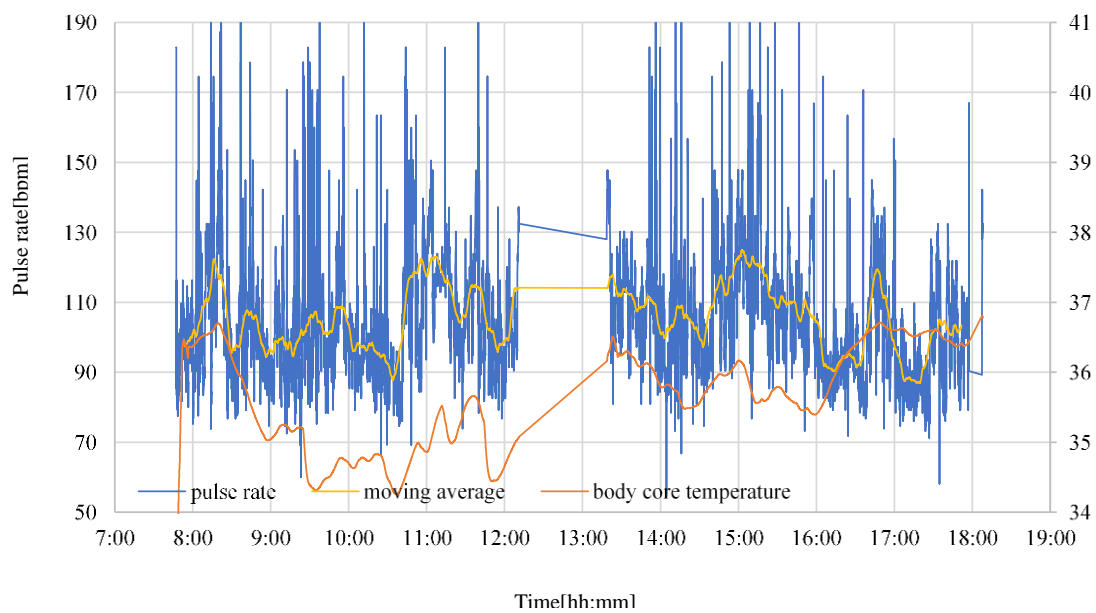


Fig 3.14 Measurement data of heat stroke leve0 (9/13.A)

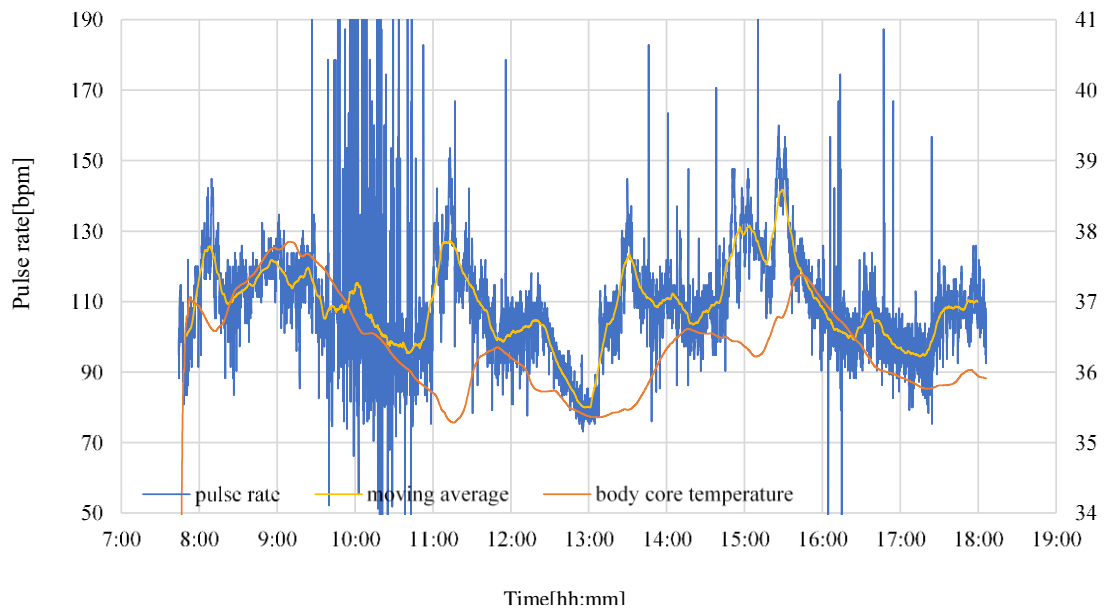


Fig 3.15 Measurement data of heat stroke level0 (9/13.B)

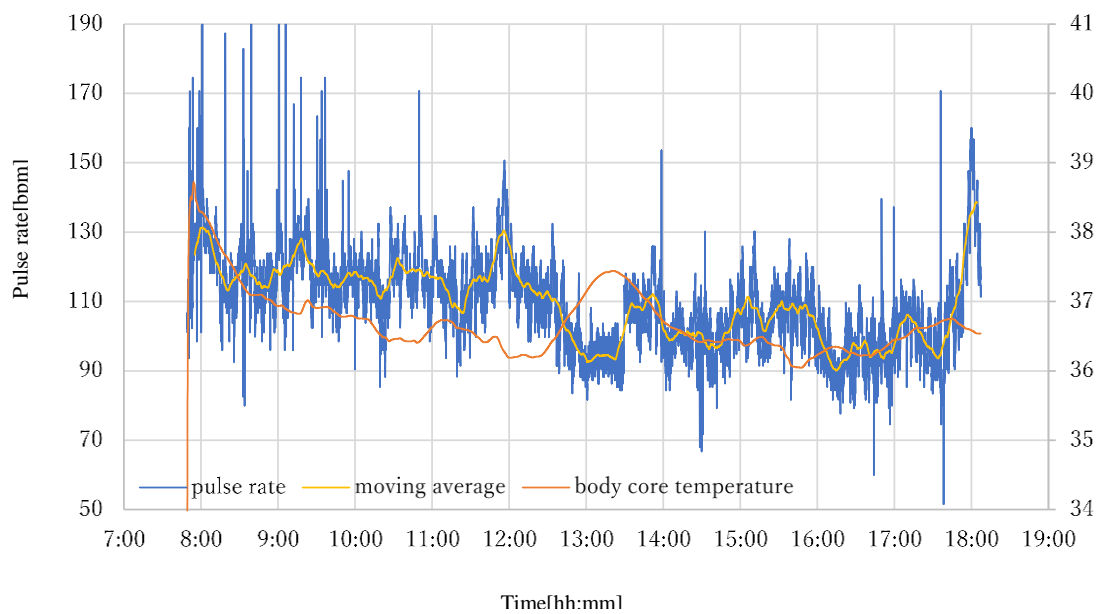


Fig 3.16 Measurement data of heat stroke level0 (9/13.C)

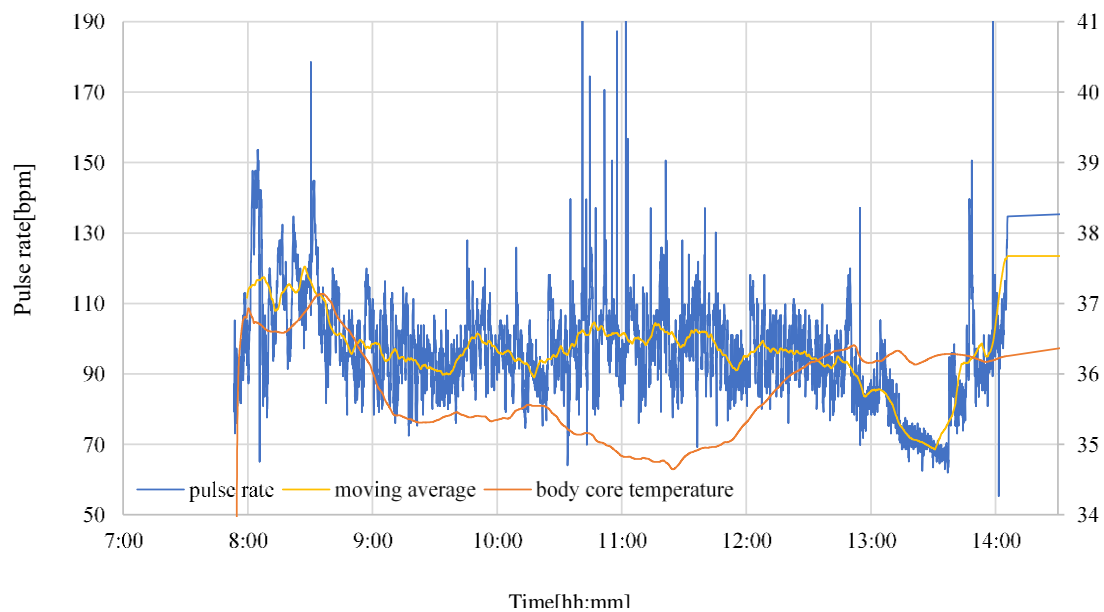


Fig 3.17 Measurement data of heat stroke leve0 (9/14.A)

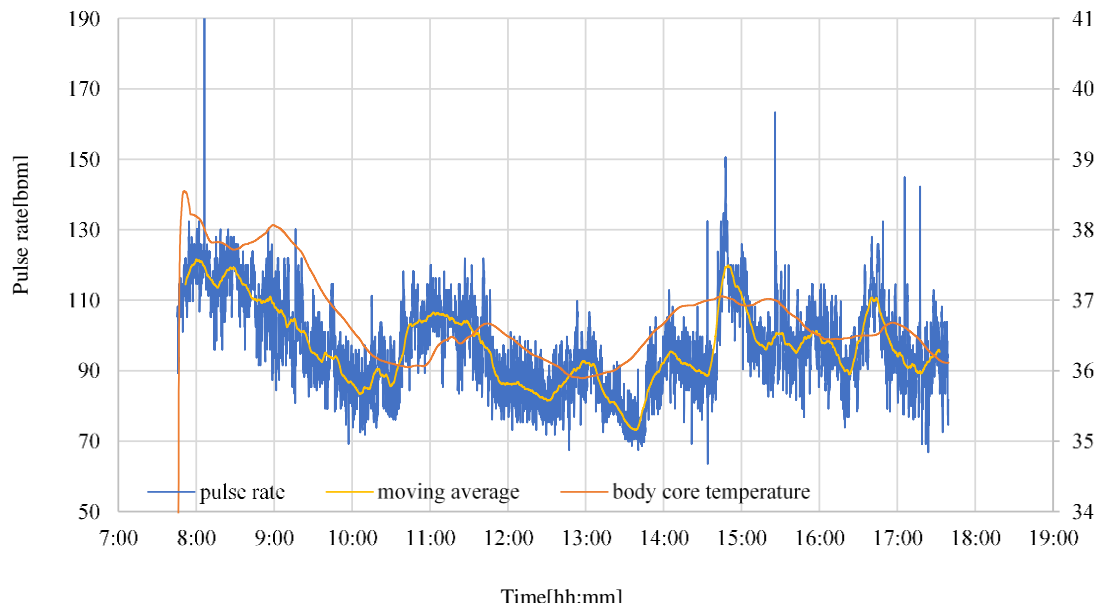


Fig 3.18 Measurement data of heat stroke leve0 (9/14.B)

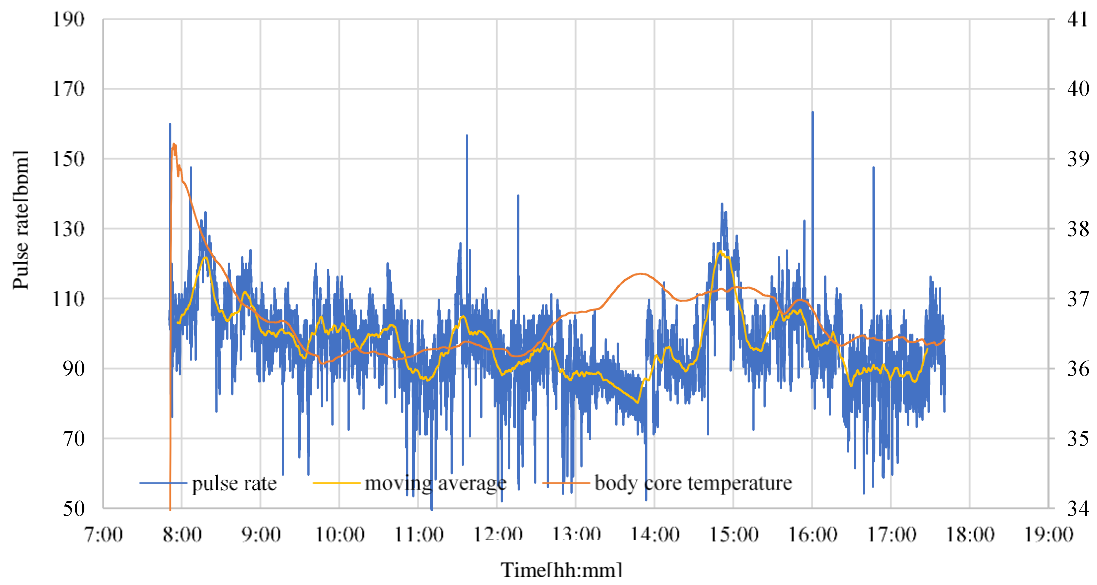


Fig 3.19 Measurement data of heat stroke leve0 (9/14.C)

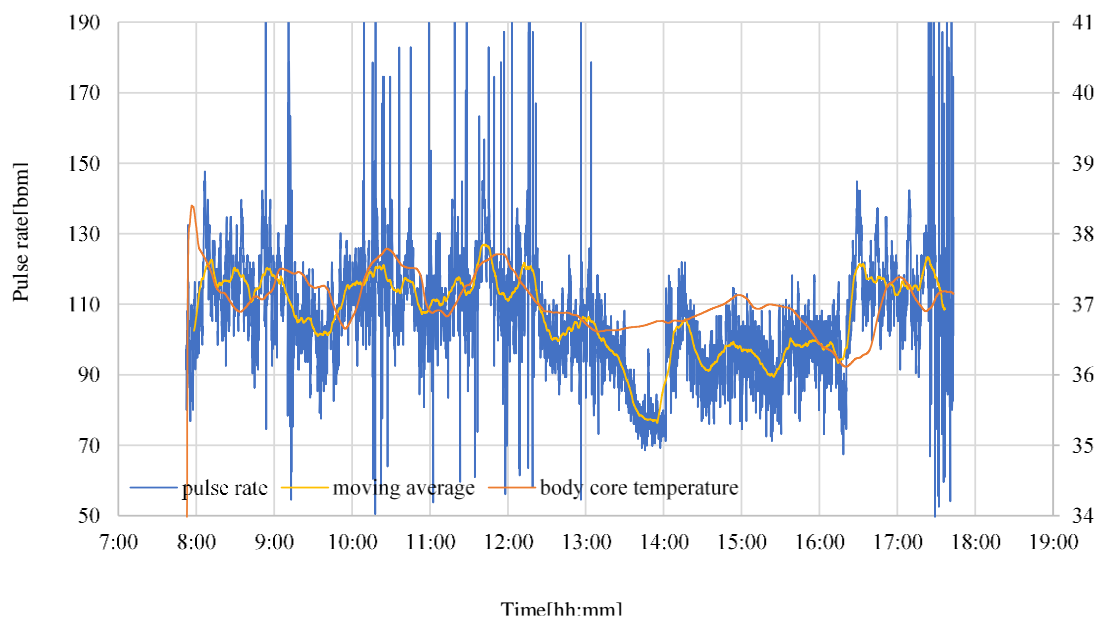


Fig 3.20 Measurement data of heat stroke leve0 (9/14.D)

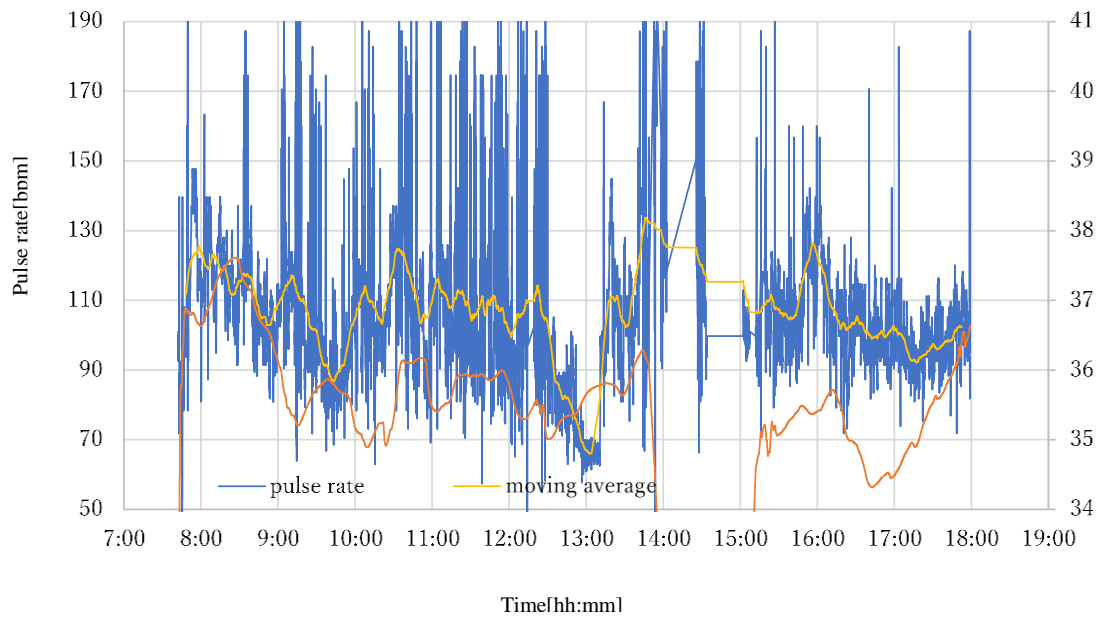


Fig 3.21 Measurement data of heat stroke leve0 (9/15.A)

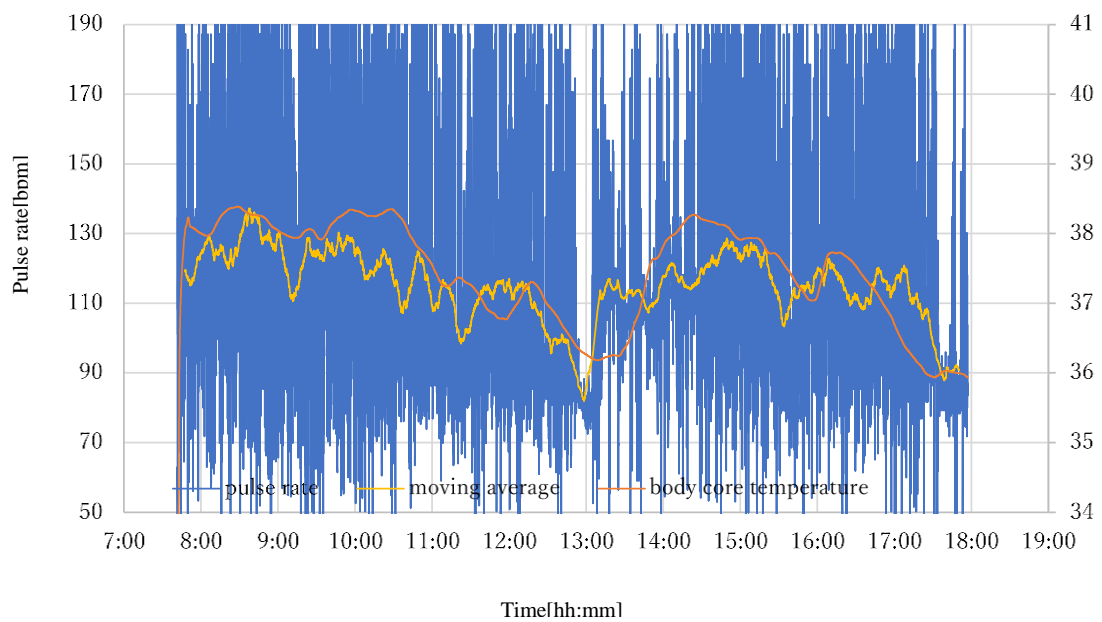


Fig 3.22 Measurement data of heat stroke leve0 (9/15.B)

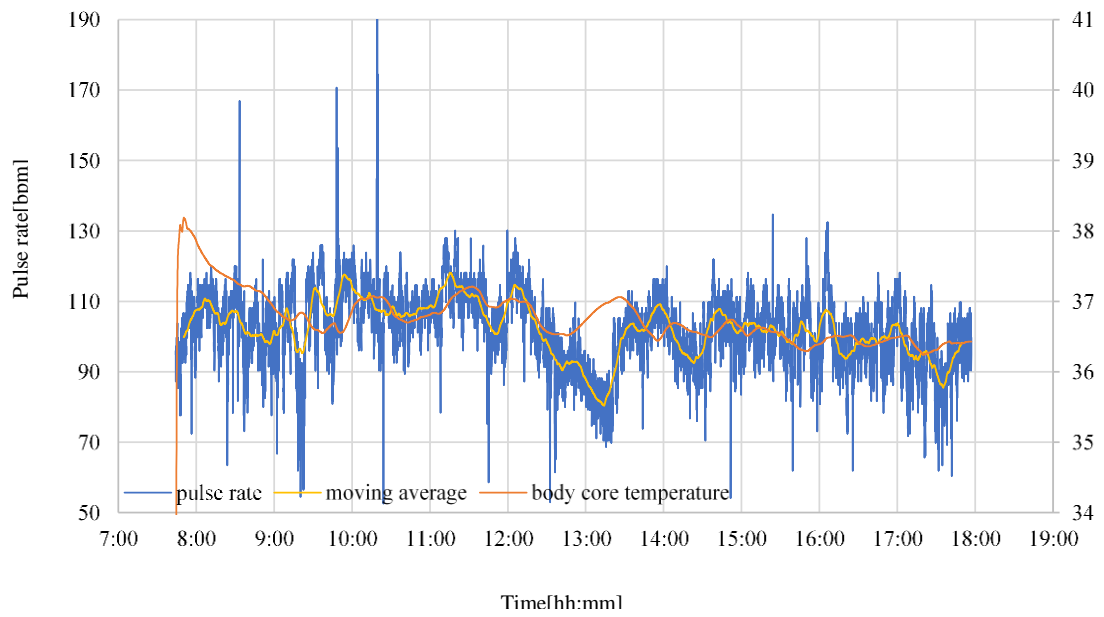


Fig 3.23 Measurement data of heat stroke leve0 (9/15.C)

第4章

熱中症レベルと深部体温及び脈拍数との関係

4.1 熱中症レベルと脈拍数の変動

熱中症レベル1以上のデータに当てはまる特徴として脈拍数の急上昇がある。レベル1以上の被験者の中で最も小さな上昇でも15分で20bpmの上昇がみられた。しかし、測定した19回のデータのうち16回のデータでこの上昇がみられ、ほとんどのデータに当てはまってしまう結果となった。残りの3つのデータに関しては、すべて熱中症レベル0であり、脈拍数もあまり変動することなく激しい運動を伴わない地上での作業をしていた。また脈拍数が15分で20bpm以上上昇していき初めて減少し始めたタイミングでの脈拍数を脈拍数のピークとすると、4つともピーク時の脈拍数が130bpmを超えるという特徴がみられた。上昇が確認された16回のデータを対象としてピーク時の脈拍数とレベルとの関係を図4.1に示す。縦軸に熱中症レベル横軸にピーク時の最大脈拍数を表している。130bpmを境に、ピーク時の脈拍数が130bpmを超えていない領域をA、130bpmを超えている領域をBとすると、領域Bにはレベル1以上のデータ4つのほかにレベル0のデータが3つ含まれている結果となった。このことから脈拍数の特徴を示す領域Bでは熱中症傾向にあるデータは57.1%となり、熱中症を判別する手法としては適切ではない。領域Bのデータの中で深部体温に着目した特徴を見つける必要がある。

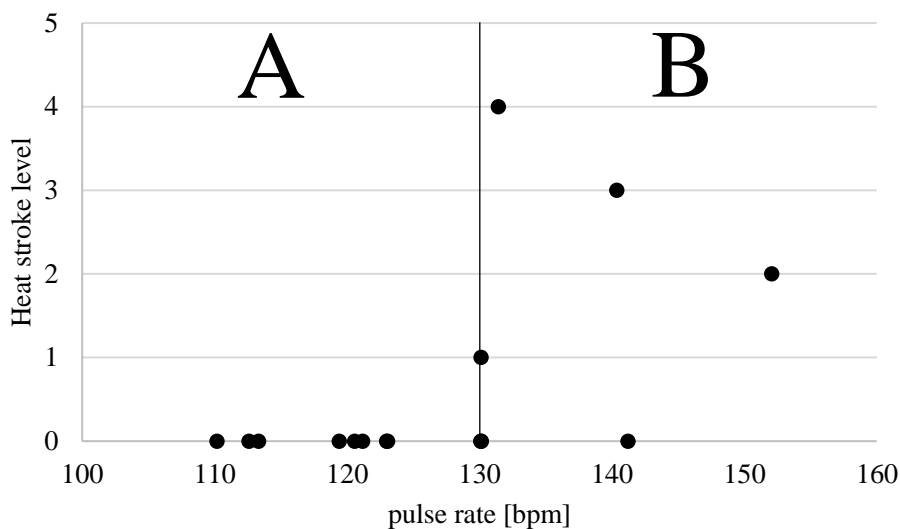


Fig4.1 Maximum pulse rate at peak

4.2 領域 B における熱中症レベルと深部体温の変動

領域 B での 7 回分のデータを対象とし、脈拍数のピークの前後の時間の深部体温に注目する。熱中症の兆候がある測定データでは深部体温がピーク前後の時間で 37.5°C を超えていた。ピーク前後の時間を 15 分、30 分、45 分、1 時間に分け、各時間内の深部体温の最大値を表したものを図 4.2-5 に示す。縦軸に熱中症レベル、横軸にそれぞれの時間ごとの脈拍数のピーク前後の深部体温を表している。区間内での深部体温の値が 37.5°C 以下の領域を領域 C、 37.5°C 以上の領域を領域 D とする。脈拍数のピークから前後 15 分ずつの区間での領域 D のデータは 2 件あり、熱中症レベルが 1 以上のデータでも、領域 C に含まれた。前後 30 分に区間を拡大しても件数は変わらず領域 C に熱中症レベル 1 以上が 2 件と領域 D に 2 件確認された。さらに区間を前後 45 分に拡大すると領域 D にのみ熱中症レベル 1 以上のデータが確認された。区間を前後 1 時間にした場合も領域 D のデータ件数は変わらず熱中症レベル 1 以上のデータのみが残り、新たに 37.5°C を超えるデータは現れなかった。

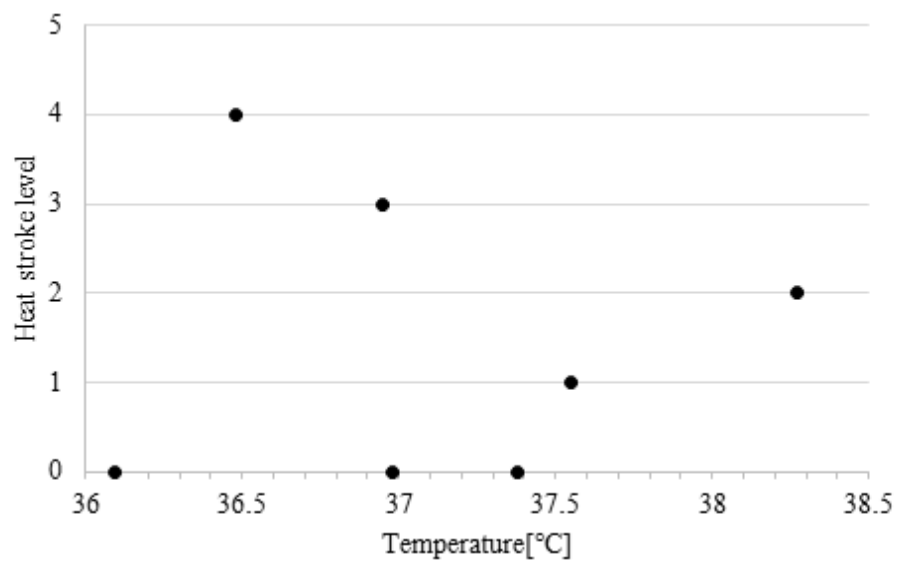


Fig 4.2 Maximum deep body temperature in 15 minutes before and after peak

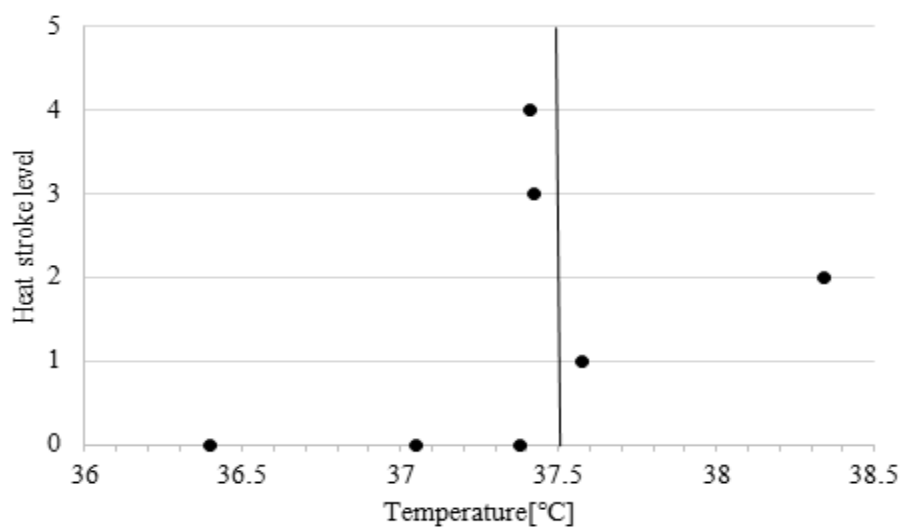


Fig 4.3 Maximum deep body temperature in 30 minutes before and after peak

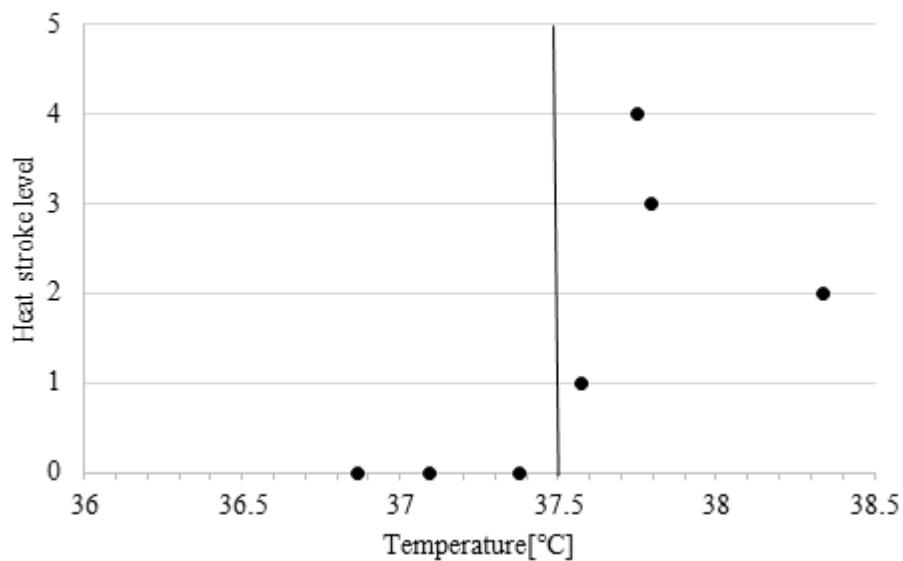


Fig4.4 Maximum deep body temperature in 45 minutes before and after peak

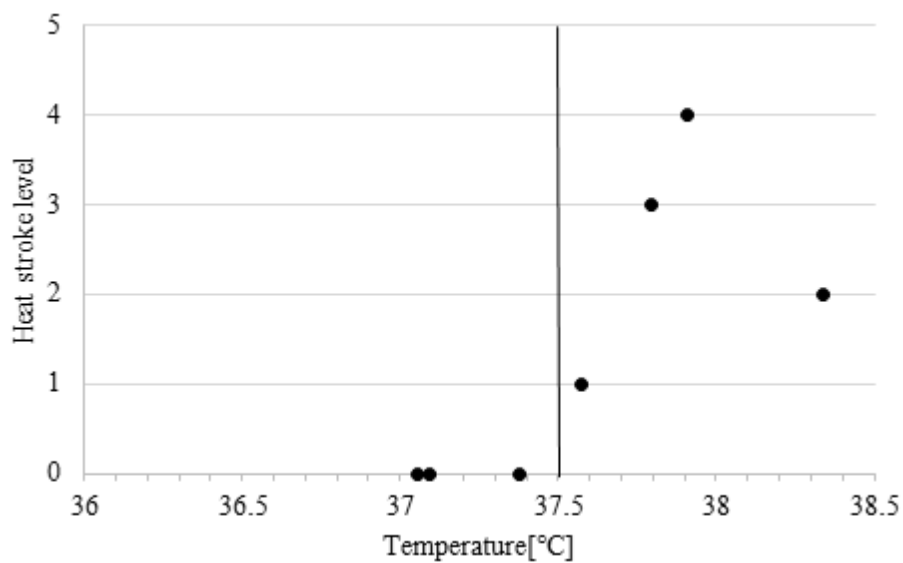


Fig4.5 Maximum deep body temperature at 1 hour before and after peak

4.3 屋外作業員身体データ測定実験結果のまとめ及び考察

深部体温, 脈拍数の測定結果 20 件中 1 件の測定不能を除く 19 件中 4 件のデータに熱中

症の初期症状に近い健康状態の測定があった。その 4 件の脈拍数の特徴として急上昇し、高い数値を示していることが確認できた。4 件のうち一番緩やかな脈拍数の上昇でも 15 分間で 20bpm 上昇し、130bpm を超えるという特徴がみられた。この上昇のみが確認されるものは、他に 12 件存在しているが、130bpm を超えるものは 7 件あり、9/9 の A,D,E がそれぞれ 130.14[bpm],130.13[bpm],140.39[bpm]、9/10 の C,E がそれぞれ 130.11[bpm],131.42[bpm],9/13 の B,D がそれぞれ 141.21[bpm],152.06[bpm]であった。この脈拍数の急上昇及び 130[bpm]を超えるという特徴に当てはまる実験協力者の中で熱中症レベル 1 以上の実験協力者は 57.1%となっており、このままでは熱中症の症状がない人でも熱中症と判断される可能性がある。そのため深部体温に注目した。人間は運動後 15 分での深部体温が 37.5°Cを上回っている場合約 80%の確率で熱中症として判別できるという結果が出ており、^[3]今回の解析でも深部体温に関する指標を 37.5°Cに設定し、脈拍数の特徴が確認できた 7 人の中で脈拍数が上昇していき、初めに下がり始めた時間の前後の深部体温を見た。前後の時間を 15 分、30 分、45 分、1 時間に設定しそれぞれの深部体温の最大値を見たところ、45 分と 1 時間の区間での熱中症レベル 1 以上の深部体温の最大値が 37.5°Cを上回っており、37.5°Cを境にそれ以下の 3 名はすべて熱中症レベル 0 であった。これより、45 分区間で見た場合 37.5°Cの指標が正しいといえる結果となった。脈拍数が急激に上昇し 130bpm を超えるような運動をした後に、通常は体内の熱を放出することで体を正常な状態に保つが、熱をうまく放出できずに深部体温が 37.5 度を超えるような状態になると熱中症の症状が出てくると考えられる。また、熱中

症レベル 1 以上の実験協力者は D と E の 2 名であり、いずれも 2 日間にわたって熱中症レベルが上昇している。実験協力者 D は熱中症レベル 1 を回答した日から 4 日後の測定で熱中症レベル 2 を回答しており、実験協力者 E は熱中症レベル 3 を回答した翌日の測定で熱中症レベル 4 を回答した。実験協力者ごとの脈拍数のピークから前後 45 分及び 1 時間の区間の深部体温が 37.5°C 以上の時間割合を区間ごとに図 5.1-2 に示す。縦軸に時間割合横軸に熱中症レベルを表している青の線が実験協力者 D、橙色の線が実験協力者 E を表している。45 分の区間での 37.5 度以上の時間割合はレベルが上がるに当たって、実験協力者 D では 23.2% から 49.5% に上がっており、実験協力者 E では変化せず 14.5% のままであった。前後 1 時間の区間でのレベルが上がった際の 37.5 度以上の時間割合は実験協力 D では 23.2% から 49.5% に上がっており、実験協力 E でも 12.3% から 27.5% に上がっていた。これより脈拍数のピークから前後 1 時間での深部体温の 37.5 度以上の時間割合は熱中症レベルに比例して上がっていく可能性が示唆された。

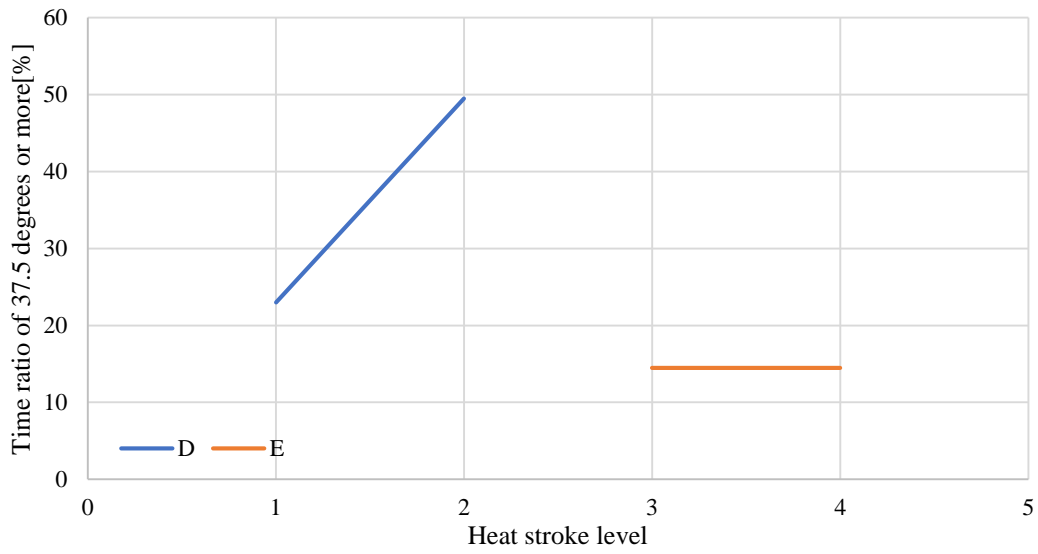


Fig5.1 Heat stroke levels and time ratios of 37.5 degrees or more in 45 minutes before and after

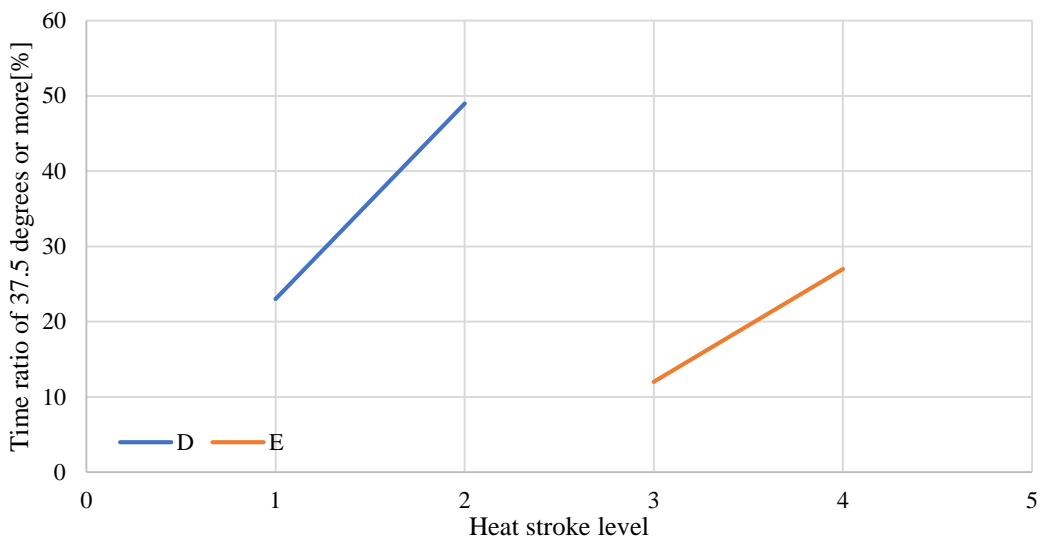


Fig5.2 Heat stroke levels and time ratios of 37.5 degrees or more at 1 hour before and after

第 5 章

結論

5.1 まとめ

空中での作業が多い鉄塔の架線工事では夏場の高温時における熱中症による事故, 怪我のリスクが高いため作業員を熱中症かどうかをできるだけ早く判断する指標が必要である. 本研究では脈拍数と深部体温から熱中症を判断することができる指標の検討を目的として実験を行った.

胸部にウェアラブルセンサを装着し, 作業中の脈拍数, 深部体温を測定した. 熱中症傾向がある測定結果は 4 件であり, 脈拍数が 15 分間で 20bpm 上昇し, 値として 130bpm を超えるという特徴がみられ, 深部体温では, 脈拍数のピーク前後 45 分間の区間において 37.5°C を超えるという特徴がみられた. 脈拍数の特徴を示す領域での熱中症の傾向がある実験協力者の割合は 57.1%であったが, その中でさらに深部体温の特徴がある実験協力者はすべて熱中症の傾向にある実験協力者であった. このことから脈拍数と深部体温の両方の特徴を持つ場合熱中症と判断できると考えられた.

5.2 今後の課題

本研究では空中での作業の危険要素である熱中症の発症を予防するために判断指標を検討した. しかし, 測定時期が夏場のみと限られるため, 十分な測定ができなかった. 今回の実験での 19 件の測定データから得られた指標が別の測定で当てはまるかどうかの検証も必要である. また今回の実験では, 熱中症かどうかの判断指標を個人の主観でのアンケートにしており, ばらつきがあったと考えられるので, より正確に熱中症かど

うかを判断する必要があった。また、本研究は鉄塔作業員の熱中症に関する指標を考え、それを応用した作業員に熱中症の危険があることを知らせるデバイスの提案が最終目的である。この指標を用いた危険警告装置の検討をしていく。

参考文献

- [1] 中井誠一：「熱中症の発生実態と環境温度」, 日本生気象学会雑誌 41(1), 51ー54, 2004ー08ー01
- [2] 山本青空, 久保孝富, 藤原幸一, 山川俊貴, 奥村七彩, 丸野由希：「スポーツ中の熱中症予防を目的とした飲水の心拍変動への影響評価」, 生体医工学 Annual59(Abstract), 381ー381, 2021
- [3] 渡井康之, 松井岳巳：「熱中症予防のための深部体温上昇判別システムの開発ー心拍数, 呼吸数, 体表面温度による判別可能性の検討ー」, 生体医工学 54Annual(28PMーAbstract), S355ーS355, 2016
- [4] 中田 いずみ, 薩本 弥生：「夏季のスポーツ時の熱中症予防のための温熱評価とアンケート調査」, 一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集 67(0), 141, 2015
- [5] 中井 誠一, 新矢 博美, 芳田 哲也, 寄本 明, 井上 芳光, 森本 武利：「スポーツ活動および日常生活を含めた新しい熱中症予防対策の提案：年齢, 着衣及び暑熱順化を考慮した予防指針」, 体力科学 = JAPANESE JOURNAL OF PHYSICAL FITNESS AND SPORTS MEDICINE 56(4), 437ー444, 2007ー08ー01
- [6] 寄本 明：「WBGT を指標とした暑熱下運動時の生体応答と熱ストレスの評価」, 体力科学 41(4), 477ー484, 1992
- [7] 鈴木 崇士, 河端 隆志, 松村 新也, 藤本 繁夫, 菅屋 潤壹, 西村 直記, 宮側 敏明：「暑熱環境下における放射熱が深部体温および運動持続時間に及ぼす影響」, 日本生理学会大会発表要旨集 2005(0), S219ーS219, 2005

-
- [8] 厚生労働省 大阪労働局：「熱中症の症状と重症度分類」,
https://jsite.mhlw.go.jp/osaka-roudoukyoku/hourei_seido_tetsuzuki/anken_eisei/hourei_seido/nettyuu_mokuji/syoujou.html
- [9] 「特設記事 東京電力パワーグリッド(株)±200kV 飛騨信濃直流幹線新設工事,いよ
いよ佳境へ：鉄塔組立,架線工事に見る特徴的な工法の数々」, 電気現場 59(701),
32-40, 2020-10
- [10] 「送電線工事の死者が過去 20 年で最悪、ドローンでも制御できない地方経済の
「深い谷」」, 週刊エコノミスト誌 2.15
- [11] 長島洋雄 「架空送電線の話」, 吊金工法及び搬送方法, 1. 吊金工法
- [12] 株式会社 アフォードセンス 生体センシング技術 Vitalgram 仕様
<http://www.affordsens.com/Technology>

謝辞

本研究を進めるにあたり、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益なご助言を頂き、深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。また、大変お忙しい中本論文を査読して頂くと共に、多数のご教示、ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 矢野賢一教授に厚く御礼申し上げます。また、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授、堤成可助教には研究に関する有益な御助言を頂き、ご指導を親身になって行って頂き、深く感謝致し、厚く御礼申しあげます。さらに、澤井秀樹研究員には支援器具の製作や改良にあたり、親身な御協力、御尽力、アドバイスをくださり、厚く御礼申し上げます。なお、中部電力株式会社には浅学な私に対し多数のご教示、ご助言を賜り、心より御礼申し上げます。そして、先輩方、同期各氏、後輩各氏のおかげで、充実した研究室生活を送ることができました。これら各位のご指導、ご協力に対し、心より御礼申し上げます。最後に、大学生活をする上で惜しみない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます