

運動・労働時の 深部体温の変動予測と 暑熱順化トレーニング評価システム

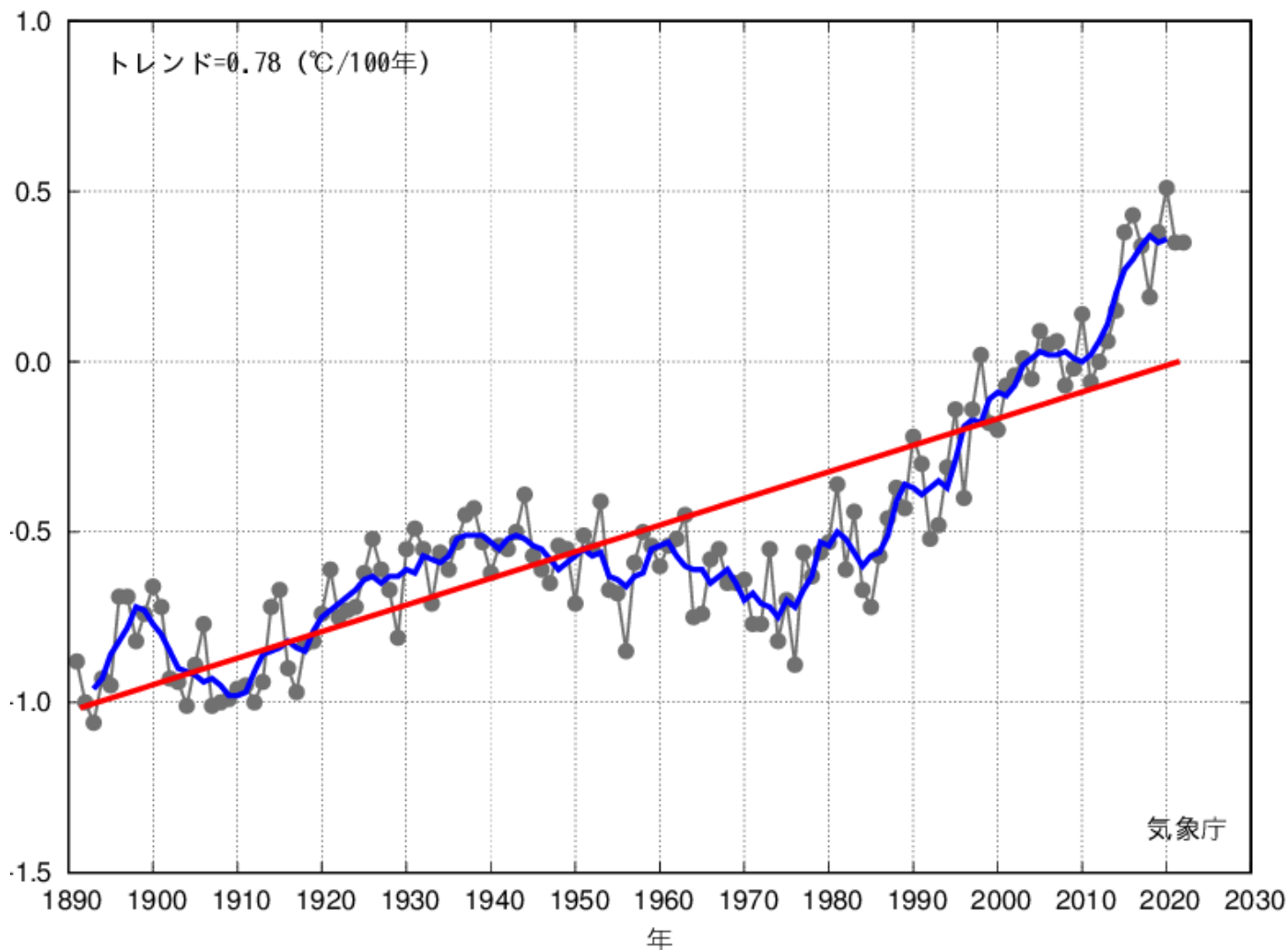
大阪公立大学 都市健康・スポーツ研究センター
教授 岡崎 和伸

2023年10月31日

背景

◎地球沸騰化

北半球の年平均気温偏差

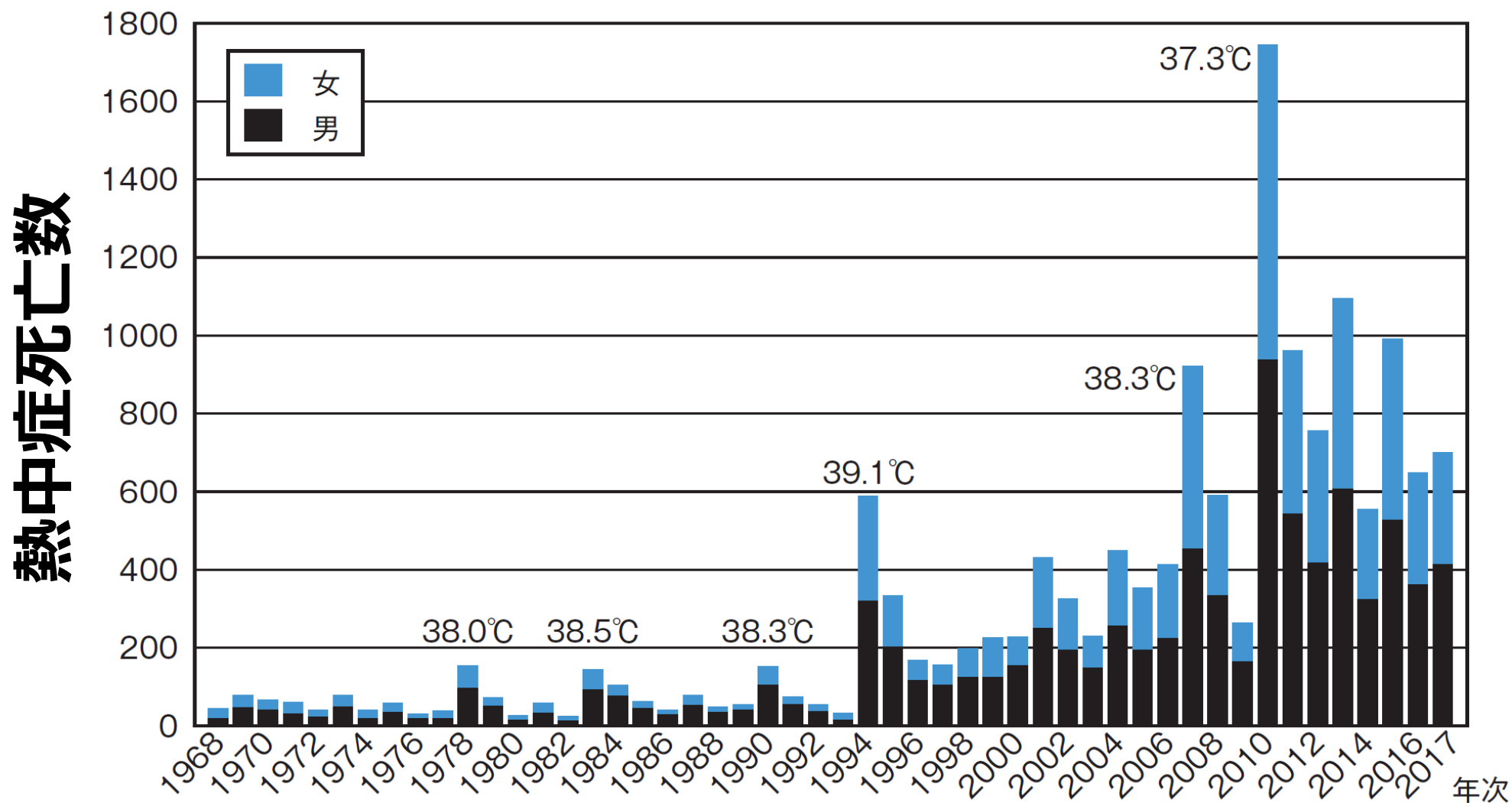


<https://www.econetworks.jp/>

https://www.data.jma.go.jp/cpd/info/temp/an_wld.html

背景

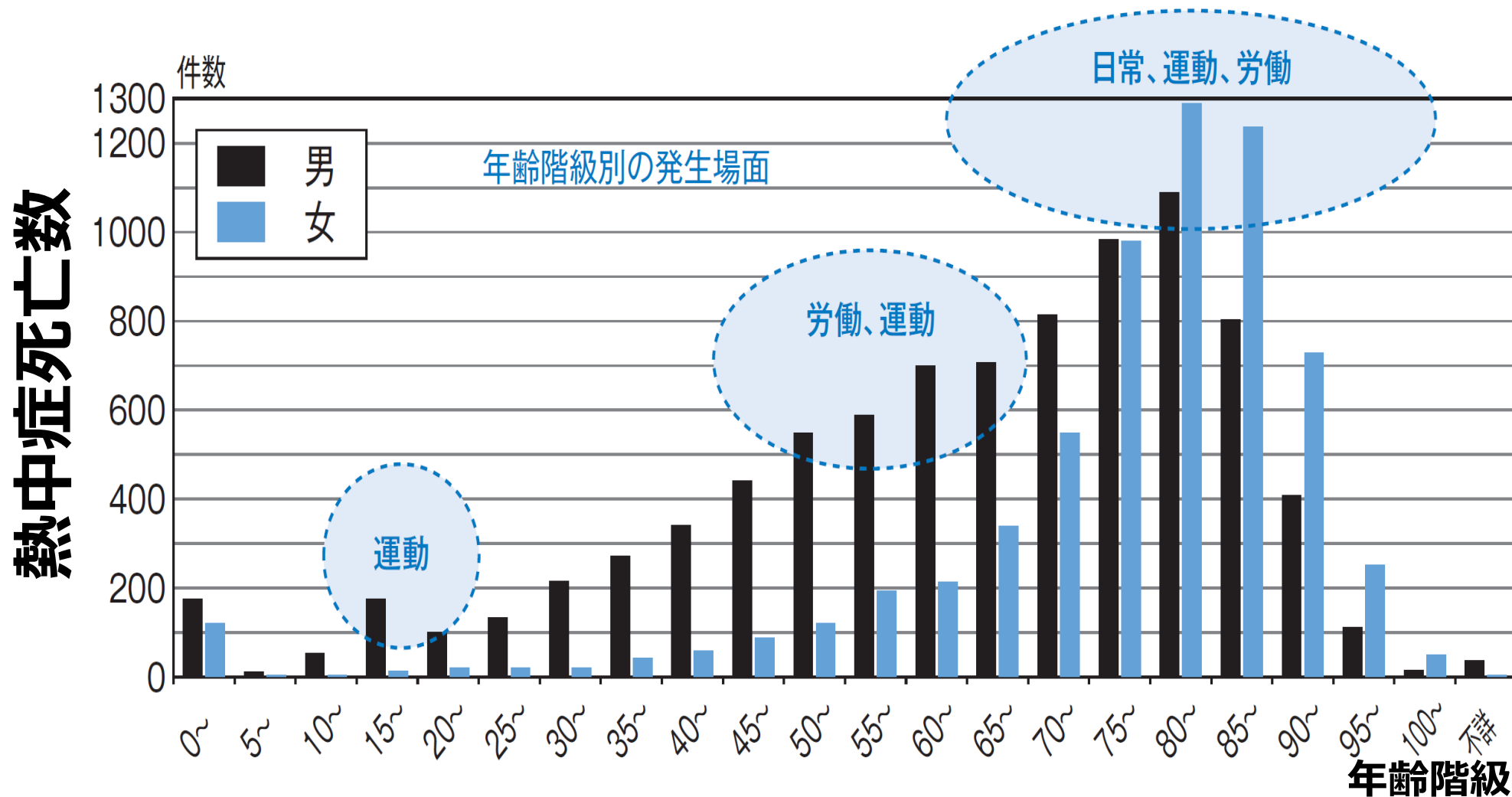
◎地球温暖(沸騰)化の進行に伴い熱中症が増加



公益財団法人日本スポーツ協会, スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック2019より作成

背景

◎ 熱中症の発症は**運動・スポーツ・労働時**に多い

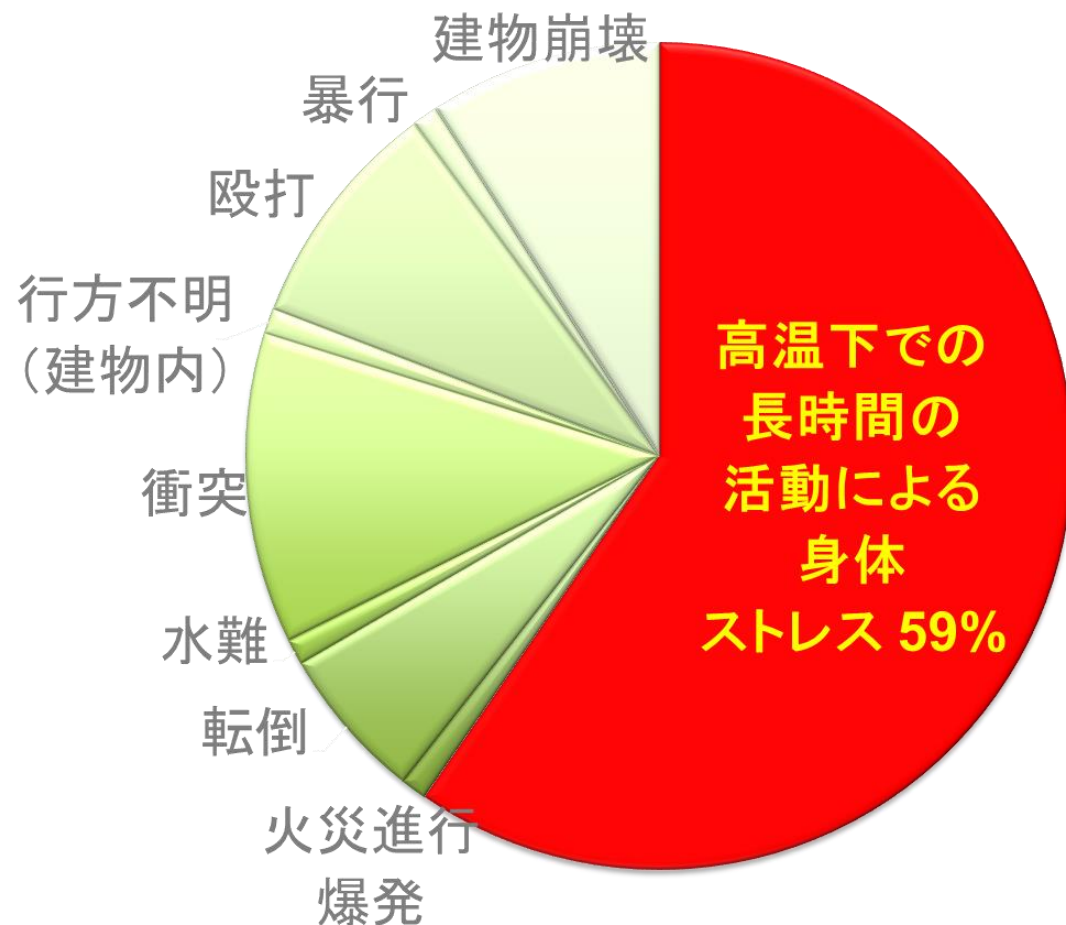


公益財団法人日本スポーツ協会，スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック2019より作成

背景

**◎ 暑熱に曝される労働時の熱中症
発症・重症化を低減する取組が必要！**

消防隊員の主な死因



イメージ写真

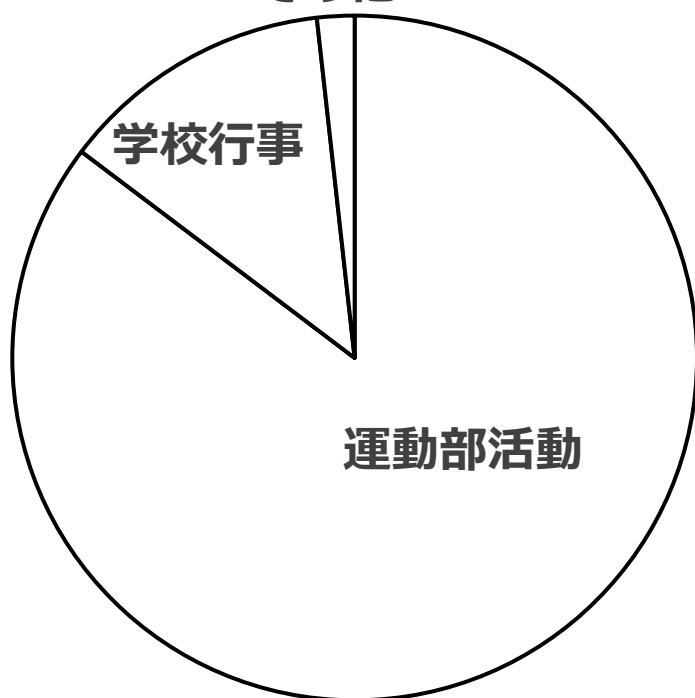
米国, National Fire Protection Association (NFPA), 2015年

背景

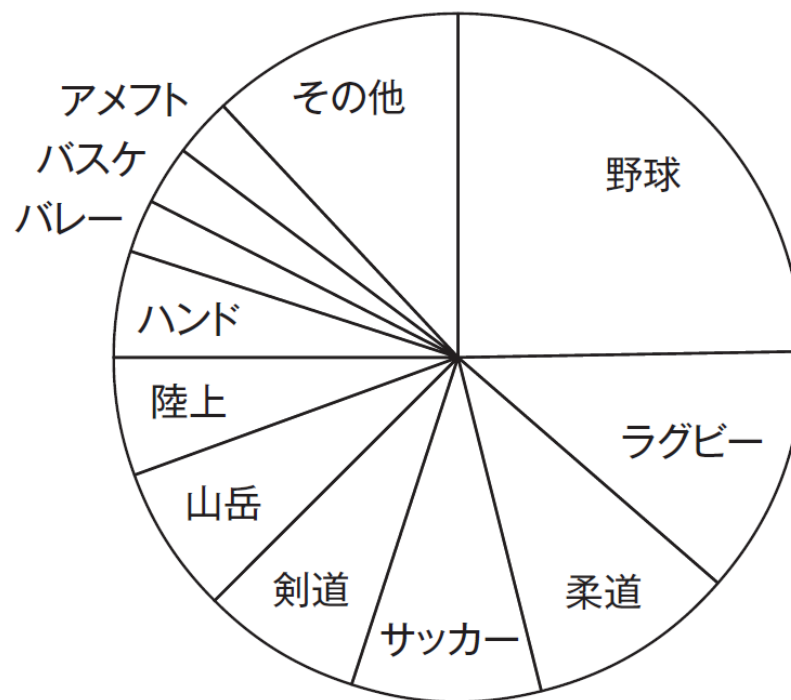
◎ 運動・スポーツ時の熱中症 発症・重症化を低減する取組が必要！

学校管理下の熱中症死亡事故

1975年～2017年
総数 170件の内訳
その他

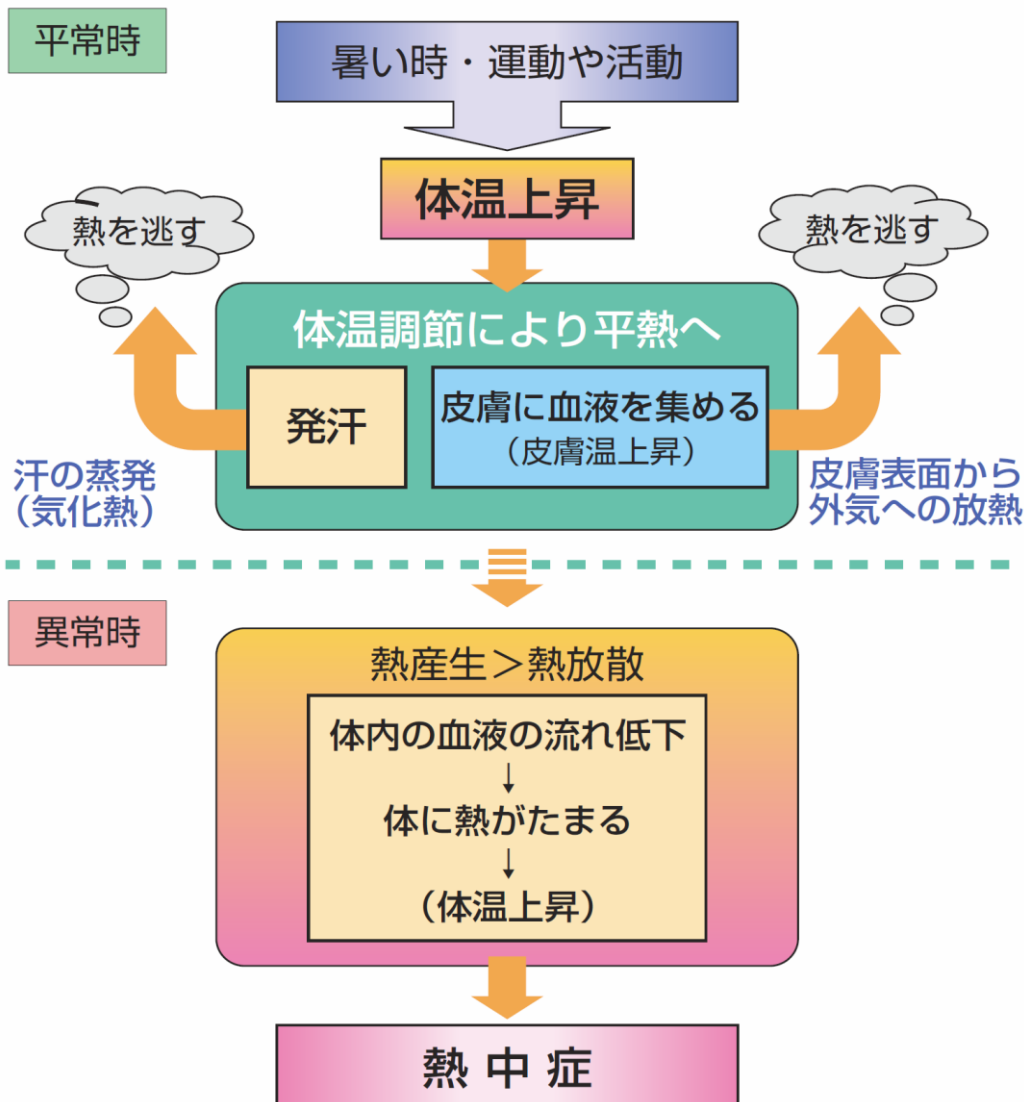


運動部活動 145件
種目別の内訳

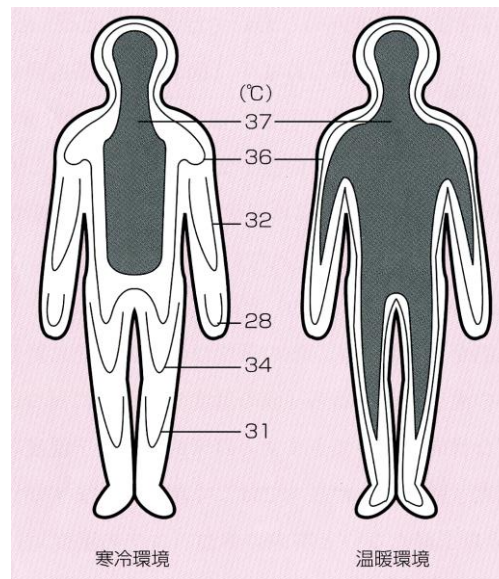


背景

◎ 重篤な熱中症（熱射病）の原因は深部体温の上昇



◎ 深部体温を測ればよいが…



体表面温度×
・外気温の影響
・汗の影響

深部体温の実測は…

- 食道温：センサーを体内に挿入
- 直腸温：センサーを体内に挿入
- 外耳道温：気温の影響を大きく受ける
耳をふさいでしまう

**運動・スポーツ・労働時
の測定は困難**

目的

★非接触で深部体温を予測する



暑熱に曝される労働時
高断熱性の被服の着用

断熱系



運動・スポーツ時
軽装で行われる

非断熱系

★非接触で深部体温を予測する

断熱系

筋肉で作られた熱が
体内に蓄積



【温熱モデルのコンセプト】

①運動による筋肉
からの産熱・蓄熱

②筋肉⇒血液
への伝熱

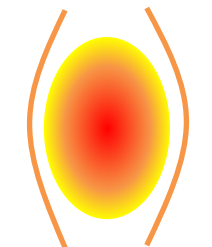
③脳に供給される
血液が上昇（蓄熱）

④血液⇒蓄熱
パートへの伝熱

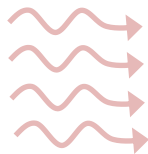
⑤蓄熱パート（末端
・臓器）に蓄熱

⑥皮膚⇒外界への
伝熱

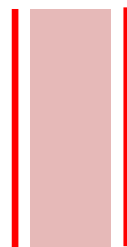
⑦衣服内温度
の上昇



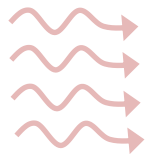
筋肉の熱容量 C_1



抵抗 R_1



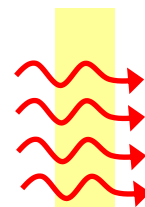
血液の熱容量 C_2



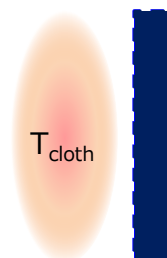
抵抗 R_2



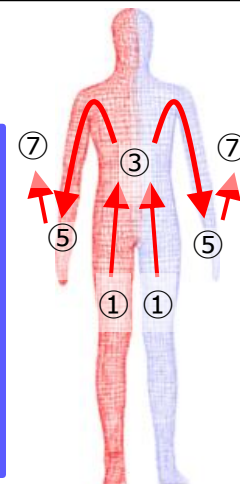
蓄熱パートの熱容量 C_{st}



抵抗 R_{st}



衣服内温度 T_{cloth}



【熱移動イメージ】

【温熱モデルの入力】

・運動による活動筋での産熱量を算出
⇒ **入力：3軸加速度**

・放熱量を実測値に基づき算出
⇒ **入力：被服内温度**

・個人に応じた熱収支特性
⇒ **入力：身長, 体重, 持久力**

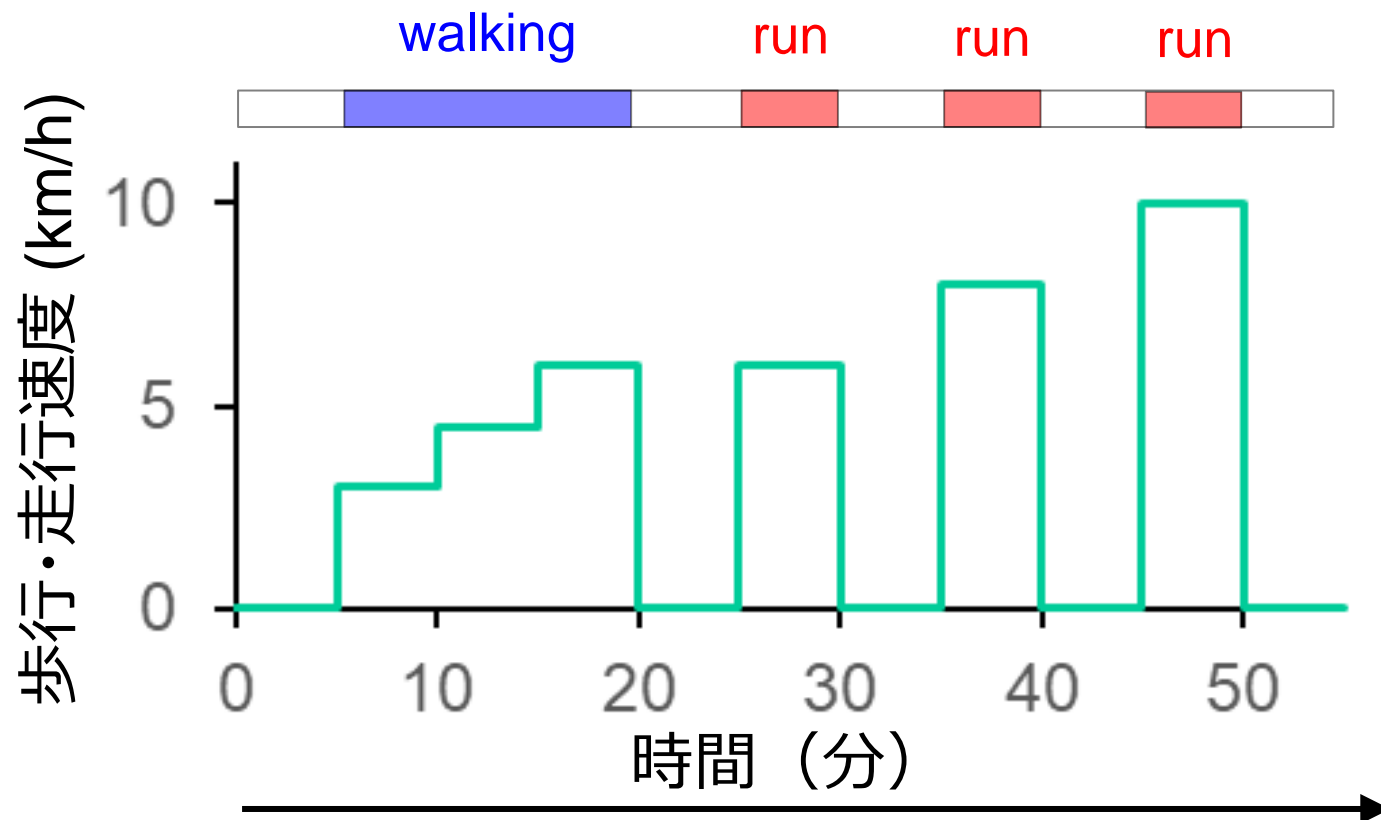
実験室での評価

被験者：消防活動に従事している男性消防隊員

着用物：通常業務で着用する消防装備一式を着用

下着, 執務服, 消防防火服, ボンベ, ヘルメット, 編上げ靴, グローブ

評価環境：人工気象室（室温 25℃, 湿度 40%）

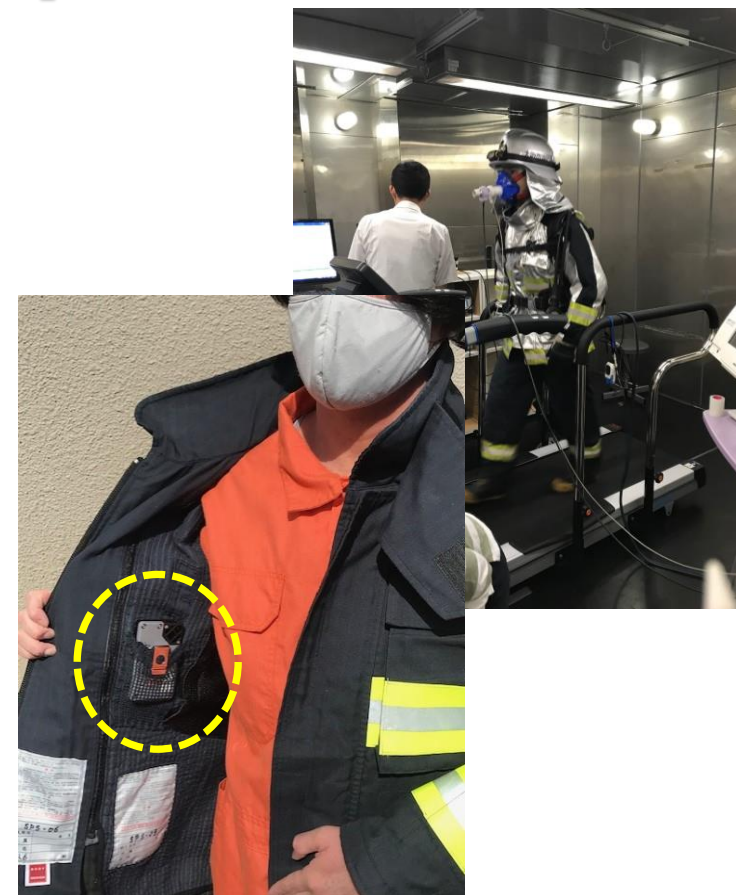


食道温, 皮膚温（額, 胸, 上腕, 前腕, 背中, 腹, 大腿, 下腿）

心拍数, 呼気ガス交換諸量, 胸・前腕発汗量（換気カプセル法）

胸・前腕皮膚血流量（レーザードップラー法）

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性（持久力）⇒深部体温予測値



[実験終了条件]

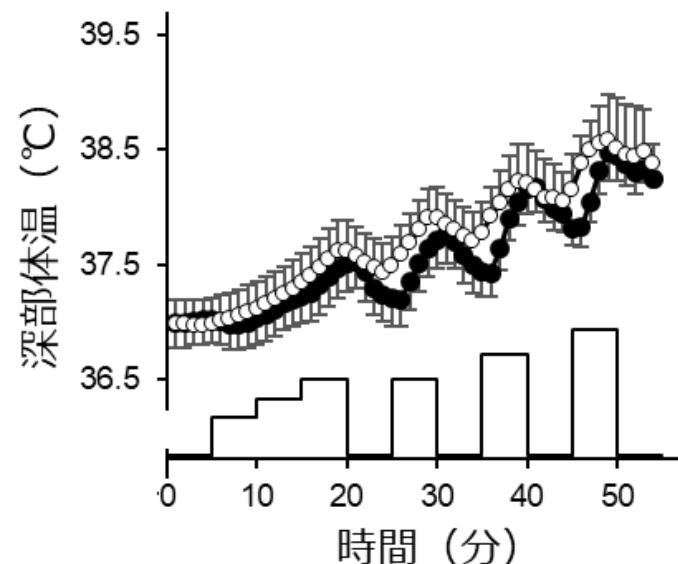
- ✓ 食道温 $\geq 38.5^{\circ}\text{C}$
- ✓ 心拍数 \geq 予測最大心拍数の85%
- ✓ 被験者からの中止要請

木村ら, 第75回日本体力医学会, 2021

実験室での評価結果

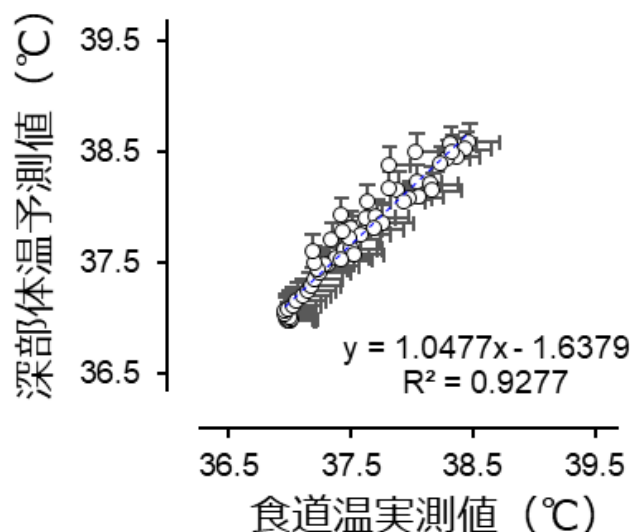
全被験者平均値

● 食道温実測値 ○ 深部体温予測値



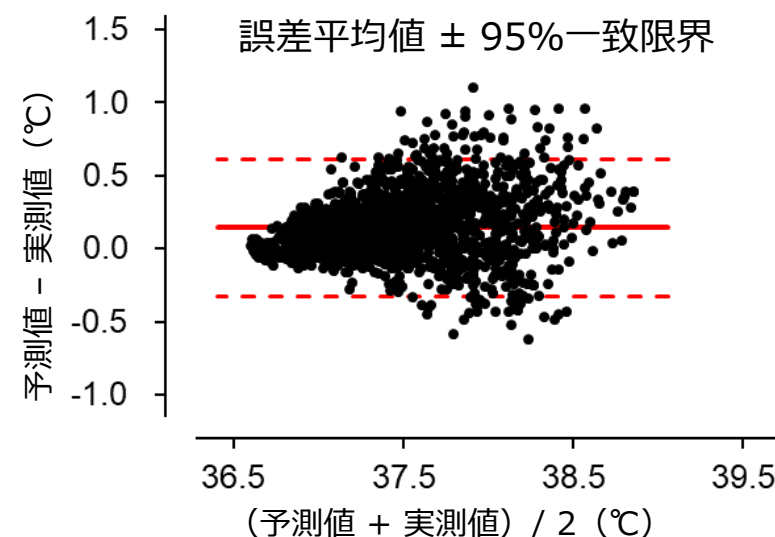
深部体温実測値に対し、深部体温予測値は同様の挙動を示した

実測値・予測値 2変量相関関係 (全被験者平均値)



実測値と予測値の2変量間
高い相関関係 (決定係数 $R^2 = 0.928$,
相関係数 $R = 0.96$)

予測値 予測誤差分析 (Bland-Altman 解析)



Bland-Altman Analysis
誤差範囲 0.14 ± 0.47 °C
(※誤差平均値 \pm 95%一致限界, $\text{avg} \pm 1.96\sigma$)

木村ら, 第75回日本体力医学会, 2021

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性 (持久力) から
深部体温を高精度で予測可能 (断熱系)

消防活動時の評価

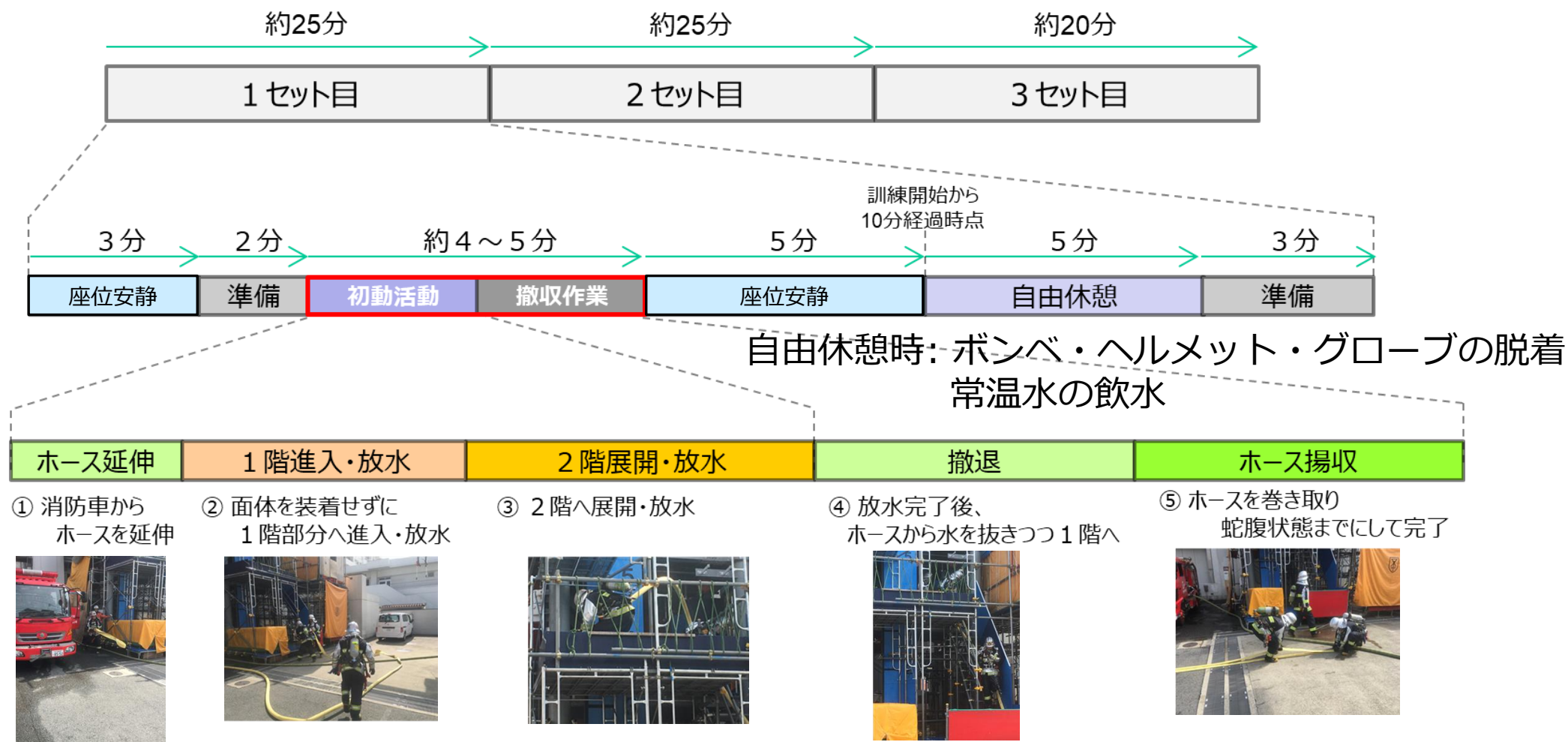
被験者：消防活動に従事している男性消防隊員

着用物：通常業務で着用する消防装備一式を着用

下着, 執務服, 消防防火服, ボンベ, ヘルメット, 編上げ靴, グローブ

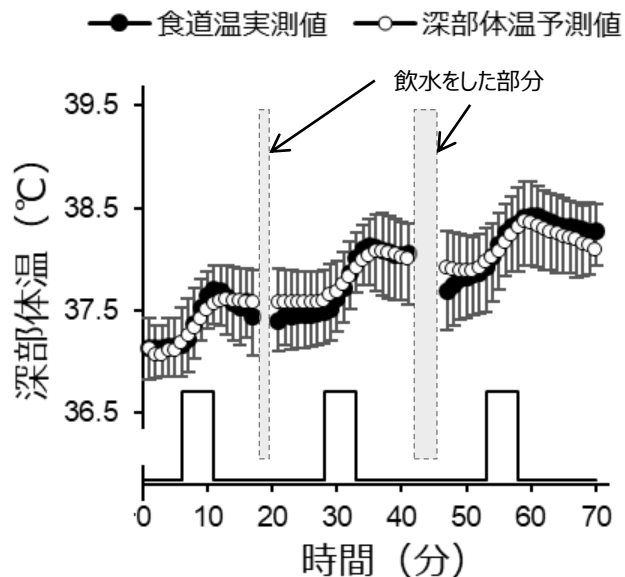
評価環境：屋外活動（気温 32.1 ± 0.6 °C）

測定項目：食道温, 心拍数, **3軸加速度, 被服内温度, 個人特性（持久力）** ⇒ 深部体温予測値



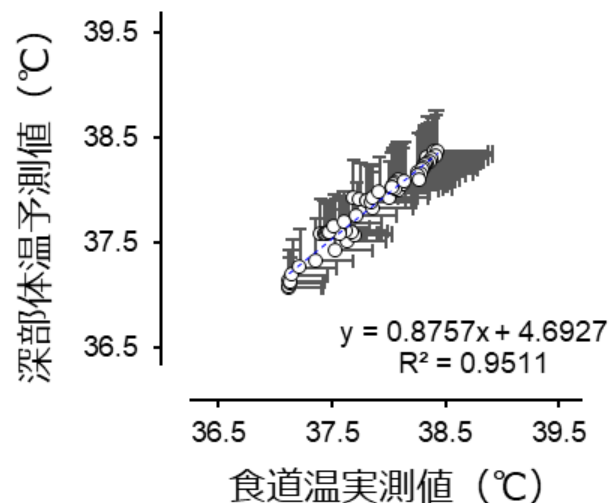
消防活動時の評価結果

全被験者平均値



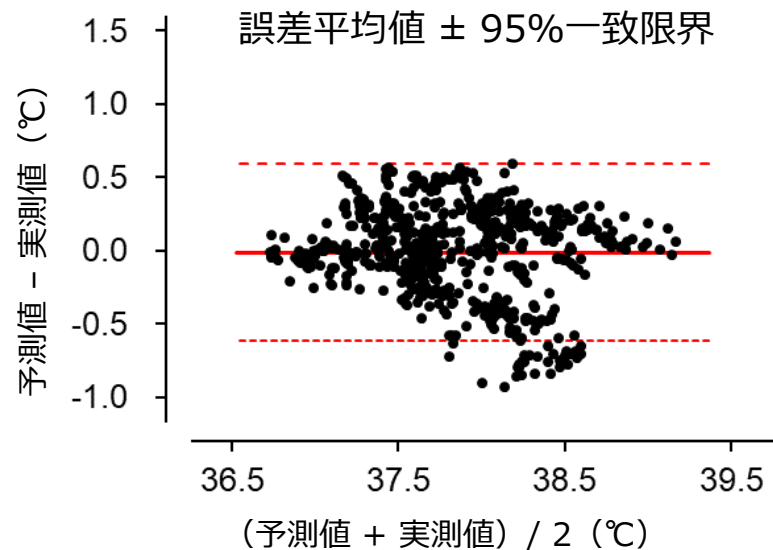
深部体温実測値に対し、深部体温予測値は同様の挙動を示した

実測値・予測値 2 変量相関関係
(全被験者平均値)



実測値と予測値の2変量間に
高い相関関係 (決定係数 $R^2 = 0.951$,
相関係数 $R = 0.98$)

予測値 予測誤差分析
(Bland-Altman 解析)



Bland-Altman Analysis
誤差範囲 $-0.01 \pm 0.61^{\circ}\text{C}$
(※誤差平均値 \pm 95%一致限界, $\text{avg} \pm 1.96\sigma$)

木村ら, 第75回日本体力医学会, 2021

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性 (持久力) から
深部体温を高精度で予測可能 (断熱系)

非断熱系でも予測可能？



非断熱系

筋肉で作られた熱が体内に蓄積
体表面から熱が放散

【温熱モデルのコンセプト】

①運動による筋肉からの産熱・蓄熱

②筋肉⇒血液への伝熱

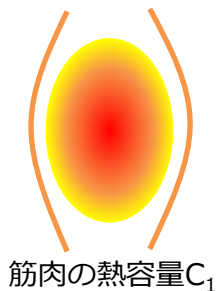
③脳に供給される血液が上昇（蓄熱）

④血液⇒蓄熱パートへの伝熱

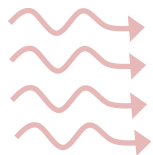
⑤蓄熱パート（末端・臓器）に蓄熱

⑥皮膚⇒外界への伝熱

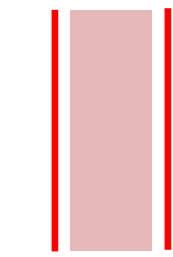
⑦衣服内温度の上昇



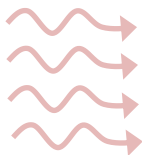
筋肉の熱容量 C_1



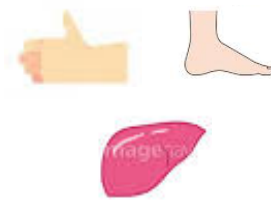
抵抗 R_1



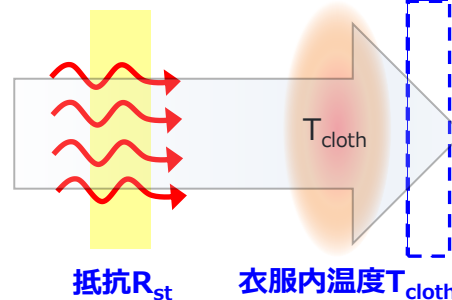
血液の熱容量 C_2



抵抗 R_2

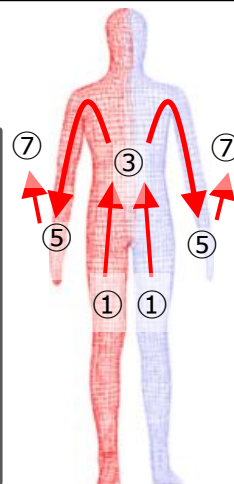


蓄熱パートの熱容量 C_{st}



抵抗 R_{st}

衣服内温度 T_{cloth}



【熱移動イメージ】

【温熱モデルの入力】

・運動による活動筋での産熱量を算出
⇒ **入力：3軸加速度**

・放熱量を実測値に基づき算出
⇒ **入力：被服内温度**

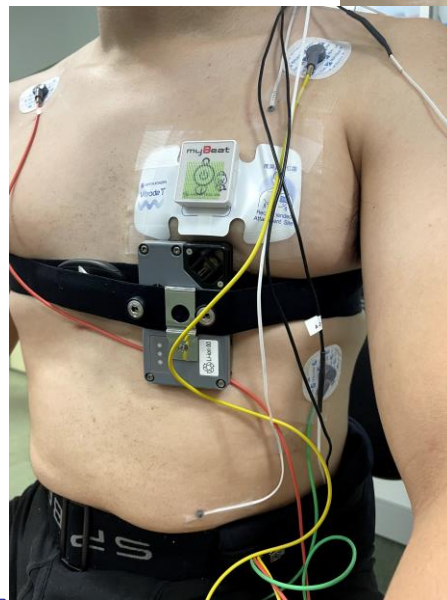
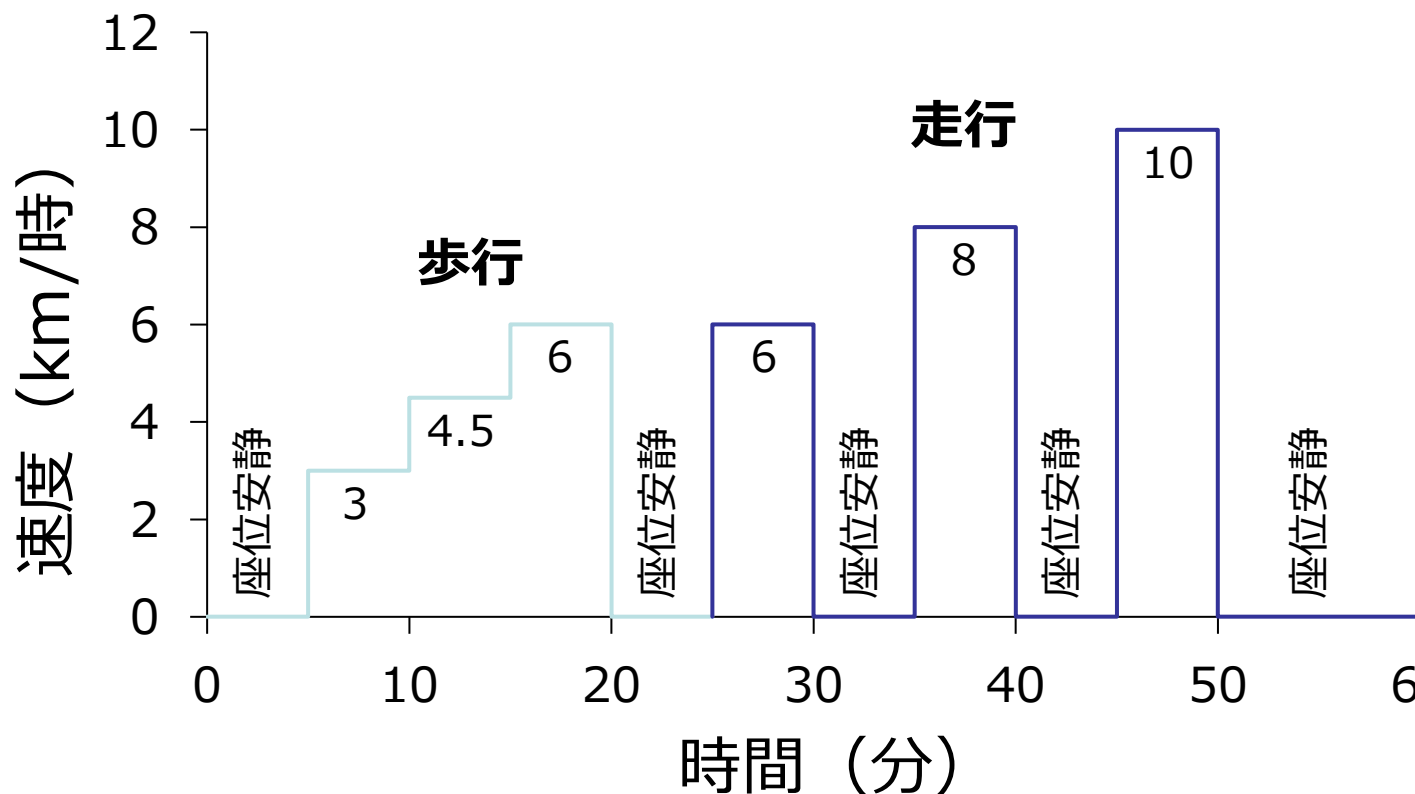
・個人に応じた熱収支特性
⇒ **入力：身長, 体重, 持久力**

軽装での運動時の測定

被験者：若年男性

着用物：Tシャツ, パンツ, ジャージ上下, 靴下, 運動靴

評価環境：人工気象室（室温 25℃, 湿度 40%）



[実験終了条件]

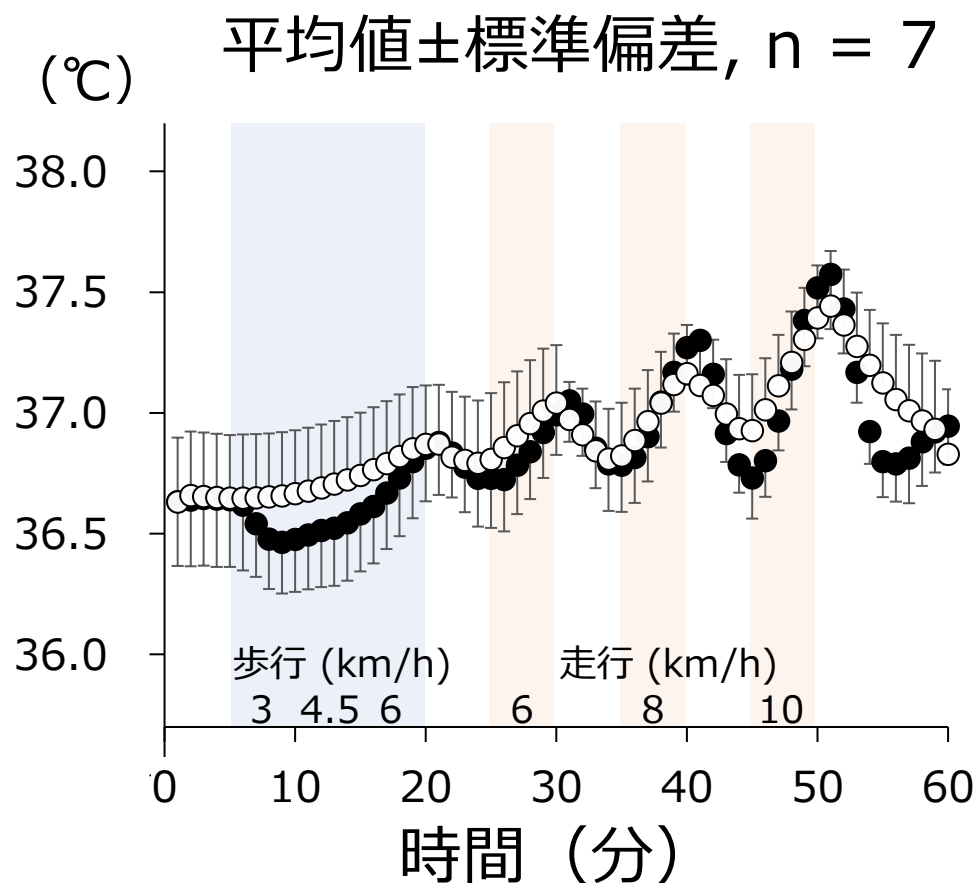
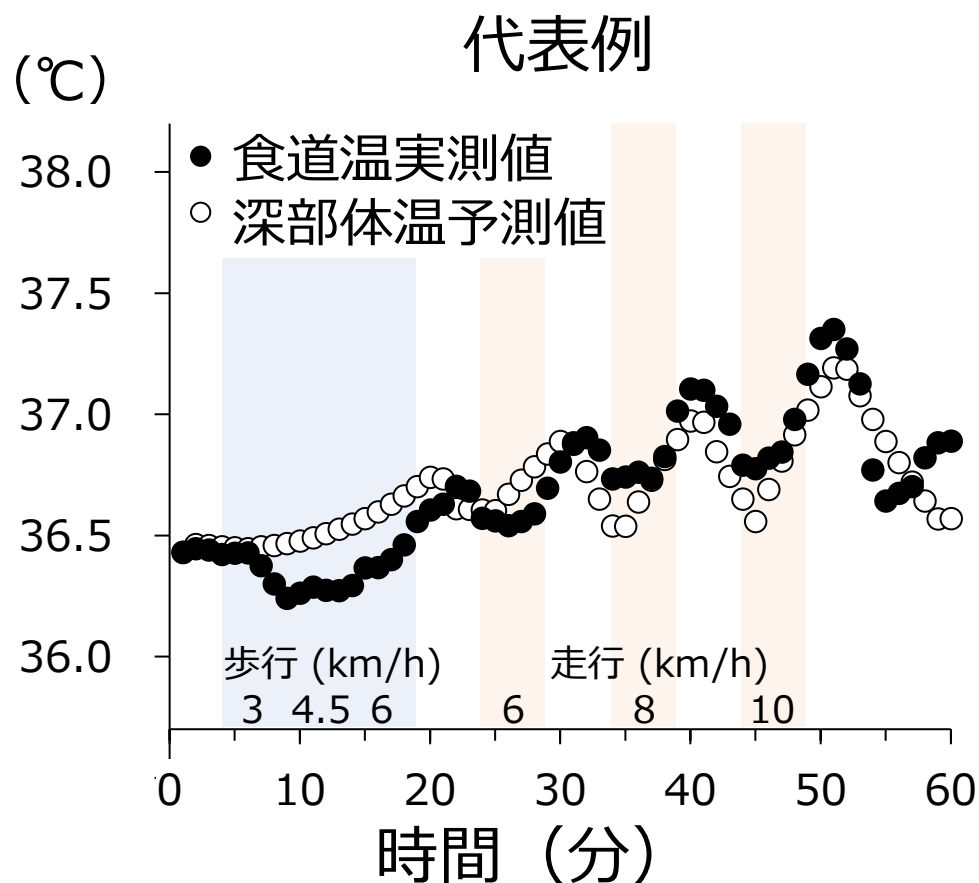
- ✓ 食道温 $\geq 38.5^{\circ}\text{C}$
- ✓ 心拍数 \geq 予測最大心拍数の85%
- ✓ 被験者からの中止要請

食道温, 皮膚温 (額, 胸, 上腕, 前腕, 背中, 腹, 大腿, 下腿)
心拍数, 呼気ガス交換諸量, 胸・前腕発汗量 (換気カプセル法)
胸・前腕皮膚血流量 (レーザードップラー法)

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性 (持久力) \Rightarrow 深部体温予測値

軽装での運動時の測定結果

深部体温の予測値（シャツ内デバイス）vs 食道温の実測値

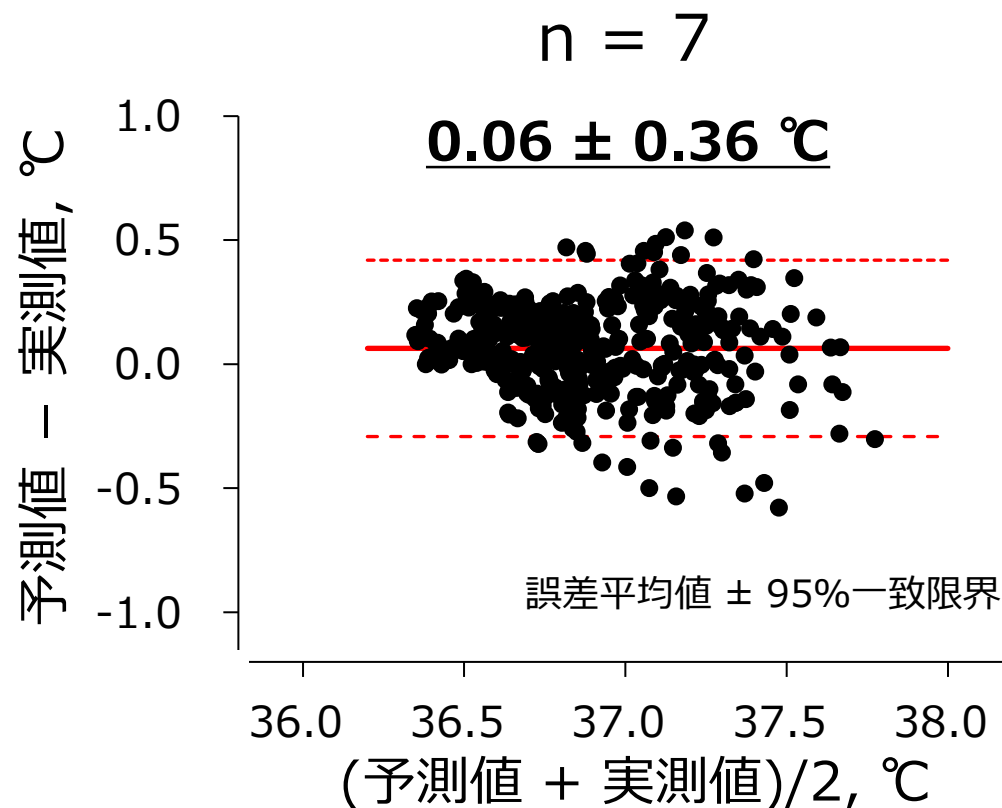
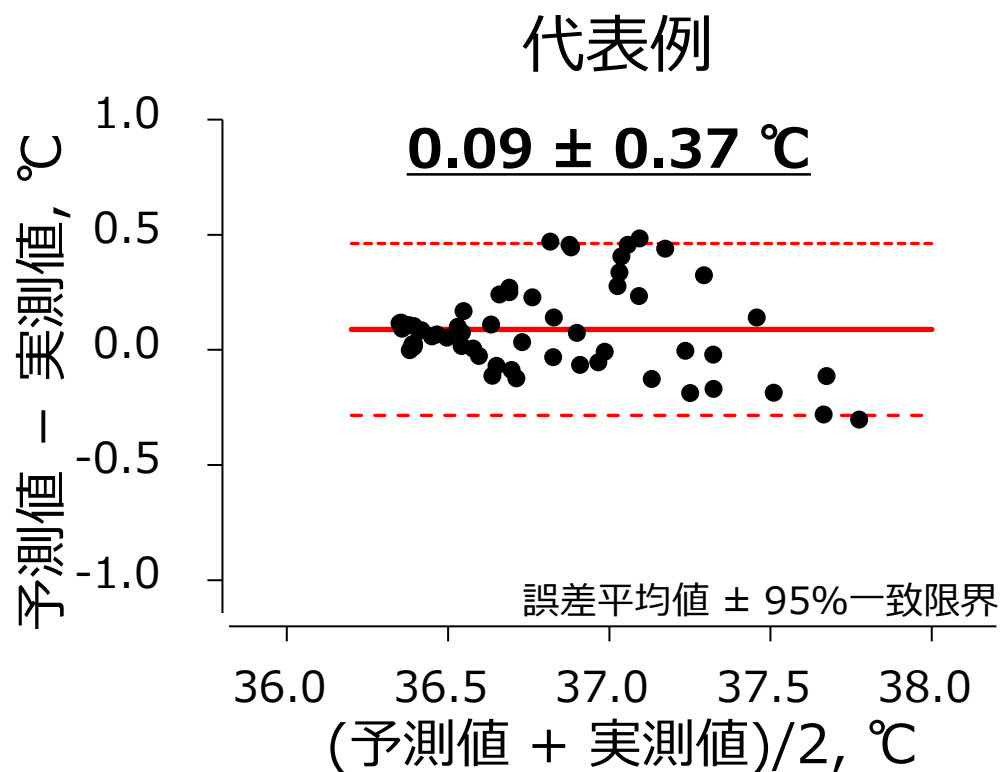


岡崎ら, 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2023

軽装での運動時の測定結果

深部体温の予測値（シャツ内デバイス）vs 食道温の実測値

Bland-Altman 分析



岡崎ら, 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2023

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性（持久力）から
深部体温を高精度で予測可能（非断熱系）

開発アルゴリズムの応用

3軸加速度, 被服内温度, 個人特性 ⇒ 深部体温予測値, 運動強度

暑熱順化トレーニングモニタリングシステム

共同研究 開発画面

<メニューに戻る

活動状況(トレーニング)

[LGM10103]

消防局 中隊長 全ての小隊

👤 隊員
7

🚫 通信
0



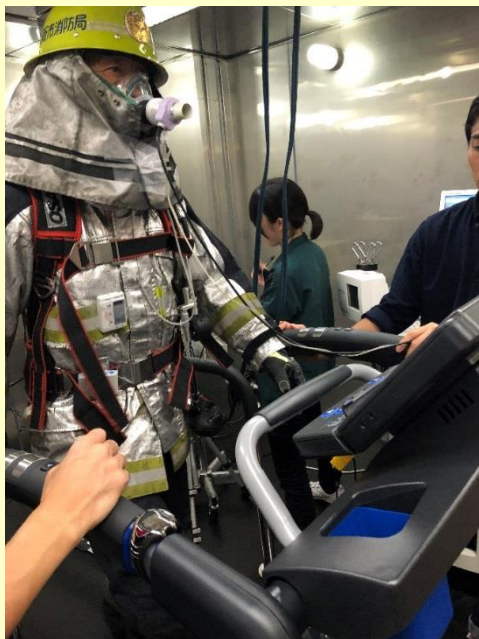
隊名 隊員名	ステータス	トレーニング強度		温度	時間
SMY1-2小隊 062-隊員	🟢 その調子でがんばりましょう	55%	GOOD!	37.0℃	6分
SMY1-2小隊 063-隊員	🟡 もう少しゆるやかな運動にしましょう	82%	High...	37.0℃	7分
SMY1-2小隊 064-隊員	🔴 十分に体温が上がっています。 気を付けてトレーニングを続けましょう	63%	GOOD!	38.6℃	13分
SMY1-2小隊 065-隊員	🟡 もう少しがんばりましょう	24%	Low...	36.8℃	0分

開発アルゴリズムの応用

暑熱順化トレーニング（大阪市消防局）

Preテスト
漸増負荷歩行試験

5月



暑熱順化プログラム
(約1ヶ月間)

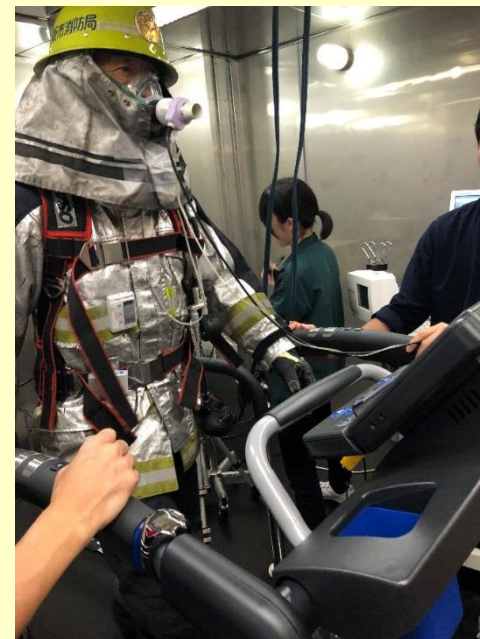
5月～6月

各署ごとに
異なるトレーニング

- ① **深部体温**が+ 1℃
(38℃)以上に上昇
- ② **平均皮膚温**が深部体温
(37℃)以上に上昇
- ③ **20分以上/回**を達成す
る運動・服装・環境
- ④ **約1か月間で6回以上**
(10回目標)実施

Postテスト
漸増負荷歩行試験

7月



開発アルゴリズムの応用

暑熱順化トレーニング（大阪市消防局）

	A群	B群	C群	D群
実施運動	ランニング	歩いて 階段昇降	ベーシック プログラム	重量物+走って 階段昇降
参加人員数(名) (有効データ数)	10 (9)	10 (7)	9 (9)	8 (4)
トレーニング 実施日数(日)	6.0 ± 1.5 (4 - 9)	8.6 ± 2.5 (5 - 12)	7.3 ± 1.7 (4 - 9)	5.3 ± 0.9 (4 - 7)
年齢(歳)	31.7 ± 6.7 (23 - 57)	34.4 ± 9.9 (23 - 57)	36.6 ± 13.8 (19 - 55)	36.6 ± 6.3 (27 - 47)
身長(cm)	170 ± 3 (165 - 174)	173 ± 7 (162 - 183)	173 ± 5 (166 - 180)	172 ± 4.3 (163 - 177)
体重(kg)	69.6 ± 6.1 (61 - 80)	73.7 ± 7.6 (62 - 86)	71.3 ± 6.2 (63 - 80)	69.3 ± 7.5 (58 - 80)

開発アルゴリズムの応用

暑熱順化トレーニング（大阪市消防局）

		A群	B群	C群	D群
実施運動		ランニング	歩いて 階段昇降	ベーシック プログラム	重量物+走って 階段昇降
モニタリング システム 検知結果	予測深部体温37.5℃ 超過時間(分)	21.1 ± 5.4	13.6 ± 5.7	8.9 ± 6.6	13.6 ± 5.7
	予測運動強度40% 超過時間(分)	29.1 ± 2.5	15.2 ± 2.5	8.2 ± 3.4	9.8 ± 3.6
	防火衣内温度30℃ 超過時間(分)	31.4 ± 9.8	29.2 ± 11.4	25.5 ± 6.2	24.2 ± 9.4
Pre/Post測定 結果比較	深部体温低下率 (%)	78	71	44	25
	平均皮膚温低下率 (%)	70	67	33	50
	心拍数低下率 (%)	90	67	13	50

岡崎ら, 日本火災学会2020年度研究発表会, 2020

暑熱順化トレーニング状況のモニタリングが可能

従来技術とその問題点

- ✓ 深部体温の測定について、実用化されている技術
- ◆ 体表面温度：外気温・汗の影響などで不正確
- ◆ 深部体温実測：運動・スポーツ・労働時には困難
- ✓ 熱中症の発症予測について、実用化されている技術
- ◆ 心拍解析：深部体温の測定・推定ではない

等の問題がある

新技術の特徴・従来技術との比較

- 被服内設置のセンサによる3軸加速度、被服内温度、個人特性（体力）から、運動・スポーツ・労働時の深部体温の変動（上昇と下降）を提示する
- 暑熱順化トレーニングを運動・スポーツ・労働の現場で実施・評価可能

想定される用途

- 制服や重装備を着用して活動を強いられる労働現場での暑熱対策・熱中症予防への応用
- 運動・スポーツの現場での暑熱対策・熱中症予防への応用
- 被服等の製品や熱中症予防のための機器の開発などへの展開

実用化に向けた課題

- 現在開発済みのアルゴリズムは、被服内（胸部）で確立済み
- 今後、深部体温を最も精度良く予測できるセンサの設置場所、設置方法について明らかにしていく
- 暑熱順化トレーニングモニタリングシステムの実用化に向けて、センサ、通信技術、アプリなどの開発を進める必要がある

企業への期待

- 深部体温のモニタリング、暑熱順化トレーニングモニタリングを用いた新技術開発に興味のある企業との共同研究を希望
- 熱中症対策、ヘルスケア分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : トレーニング状態
評価システム
- 出願番号 : 特願2020-12303
- 出願人 : 公立大学法人大阪
- 発明者 : 岡崎 和伸、高橋 秀也

産学連携の経歴

- ・ 2017年-2023年 帝人株式会社と共同研究実施
- ・ 2018年-現在 株式会社COSPAウェルネスと共同研究実施
- ・ 2018年-2022年 帝人フロンティア株式会社と共同研究実施
- ・ 2019年-2020年 パナソニック株式会社と共同研究実施
- ・ 2021年-2022年 味の素株式会社・味の素ヘルシーサプライ株式会社・株式会社コカ・コーラと共同研究実施

お問い合わせ先

大阪公立大学

URAセンター 関山 泰司

T E L 06-6605-3550

F A X 06-6605-2058

e-mail gr-knky-chizai@omu.ac.jp