

衣服内および衣服外の温湿度を局所的に評価する 安価で簡便な新手法の開発

新潟大学 天野 達郎
(共同研究者) 同 加藤 はなの
同 岡本 優美
同 大塚 純都

Development of A Novel Method to Assess The Intra- and Extra-Clothing Microenvironments

by

Tatsuro Amano, Hanano Kato,
Yumi Okamoto, Junta Otsuka
*Laboratory for Exercise and Environmental Physiology,
Faculty of Education, Niigata University*

ABSTRACT

Developing a device that can easily evaluate the intra-clothing microenvironment is important for developing new garments to prevent heat-related illness in summer periods. We evaluated the effectiveness of an originally developed fixture assessing the intra-clothing microenvironments during outdoor exercise on summer days. Eleven long- and middle-distance runners participated in a two-day summer experiment on the same schedule. The originally developed fixture was attached to participants on their chest and back skin sites using collodion to measure the temperature and humidity inside their clothing. The experiment consisted of two bouts of 30-minute moderate-intensity running, with the first bout wearing a conventional polyester fabric T-shirt (CON) on both experimental days. The second bout was conducted by wearing a

commercially available T-shirt with high breathability (Dry Aero Flow, DAF) or CON. We showed that the intra-clothing temperature and relative humidity were successfully measured using the developed fixture in all participants. We also found that although there was no difference in intra-clothing temperature and relative humidity between conditions during the first bout of exercise, the DAF attenuated intra-clothing humidity than the CON in the second bout. These results suggest that the fixture developed in the present study is effective to assess the intra-clothing environment during outdoor exercise in summer periods.

キーワード

体温調節, 機能性衣服, 衣服内環境, 発汗, iButton

Keyword

thermoregulation, functional clothing, intra-clothing environment, sweating, iButton

要 旨

衣服内環境を簡便かつ安価に評価するデバイスの開発は、熱中症予防等を目指した新たな衣服開発にとって重要である。本研究では、我々が開発した衣服内環境を評価する固定具の有効性を、屋外での運動時の測定から明らかにする。陸上競技部に所属する長距離選手11名が、全員同じ日程で夏季2日間の実験に参加した。研究参加者は開発した固定具をコロジオンで胸部と背部に貼り付け、衣服内温湿度を測定した。研究参加者は屋外で30分間の中強度ランニングを2セット実施し、1セット目は2日間とも一般的なポリエステル生地 of Tシャツを着用した (CON)。2セット目は通気性の高い比較的新しい市販Tシャツ (Dry Aero Flow, DAF) あるいはCONを着用した。その結果、研究参加者全員において衣服内環境を測定することができた。1セット目の衣服内温湿度は条件間で差がなかったものの、2セット目の衣服内湿度はDAFがCONより低値を示した (全て $P \leq 0.048$, 衣服の主効果)。これらの結果は、本研究で開発した固定具は屋外における衣服内環境の測定に有

用であることを示している。

緒 言

近年地球の気温上昇が急速に進み、地球温暖化時代が終わり地球沸騰化時代に突入したと言われるようになった。しかし、夏季オリンピックや世界陸上、あるいは学校の部活動といったスポーツイベントは夏の暑熱環境下で行われることが多い。暑熱環境下で運動を行うとアスリートの過度な体温上昇を誘発し、身体パフォーマンスの低下や熱中症のリスクを高める。特に衣服を着用すると発汗による熱放散が阻害されることから、熱放散効果の高い衣服を開発することが求められている。

これまで多くの研究によって衣服が運動時の衣服内環境や体温調節に及ぼす影響が検討されてきた^{1,2)}。熱中症予防や夏のスポーツパフォーマンス向上に向けて今後もより効果の高い衣服を開発することが期待される。衣服の機能性を評価する上で重要な測定項目に衣服内の温度や湿度の変化 (衣服内環境) がある。実験的に衣服の評価を行う場合、人工気象室などで運動実験が行われるこ

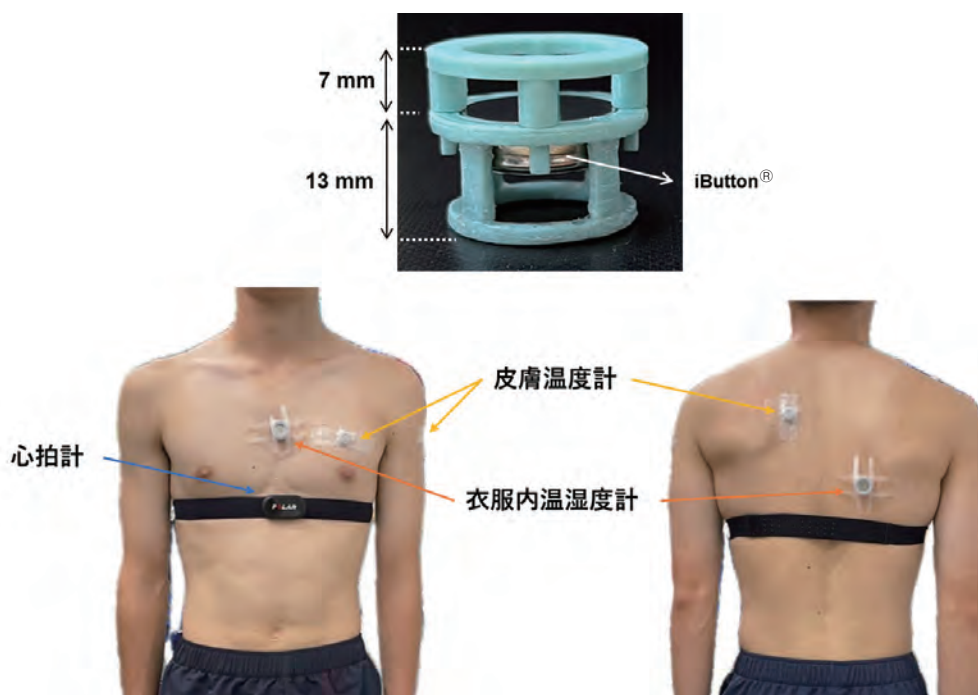


図1 The newly developed fixture to assess intra-clothing environments (upper) and their attachments to the skin (lower)

とが多いものの，人工環境は必ずしもその運動が行われる屋外フィールドの環境を模擬できているとは限らない．そのため屋外でも衣服評価を実施することが重要となるものの，有線センサーなどの身体の拘束を伴わずに，衣服内環境を評価する適切な方法の検討は十分ではない．

近年温湿度をワイヤレスで測定できる小型のデバイスが多く開発されており，環境生理学分野においても導入が進められている³⁾．我々はその一つである iButton[®] を使って衣服内環境を測定できる無拘束の固定具を3Dプリンターで製作した(図1上)．しかし，この固定具を用いて屋外で運動時に衣服内環境を測定できるのかどうかは明らかではない．そこで本研究では，我々が開発した新たな固定具を用いて，夏の屋外で運動時に衣服内環境を測定できるかどうかを明らかにする．生地を通気性が大きく異なる2種類の衣服を着用した時の応答を比較することで，衣服内環境を評価できているかどうかの指標とした．

1. 研究方法

1. 1 研究倫理

研究参加者には事前に目的，方法および生じうる危険を説明し，書面にて研究参加の同意を得た．本研究は新潟大学研究倫理審査委員会の承認を得て実施した(2021-0195)．

1. 2 研究参加者

研究参加者は新潟大学陸上競技部に所属する中・長距離ランナー 11名であった(年齢：20 ± 1 歳，身長：1.69 ± 0.5m，体重：56.3 ± 6.0kg)．実験は2023年9月4日および11日の9時から行った．研究参加者は全員同じ日程で実験に参加した．

1. 3 試験衣服

試験衣服はコントロール条件として一般的なポリエステル素材のTシャツ(CON)を，高通気性素材として疎水・撥水素材が配合された市販T

シャツ (ミズノ社製; Dry Aero Flow, DAF) を用いた。衣服が湿潤した状態で, DAFはCONより通気性がおおよそ500倍高くなる⁴⁾。

1. 4 実験手順

本研究は衣服条件を変えて異なる日程で2日間実施した。日程の違いによる環境の違いを考慮するため, 全て同じスケジュールで実施している。研究参加者は本実験を行う前日の就寝前および実験室来訪2時間前に水を500ml 飲水した。また, 実験前日および当日は激しい運動, アルコールおよびカフェインの摂取を控え, 当日の実験室来訪2時間前までに食事を済ませるよう指示した。

研究参加者は実験前日に実験室に来訪し, 経口投与するピル型体温計および試験用のランニングパンツを受け取り, 身長測定を行った。実験当日の朝, 実験開始4時間前にピル型体温計を経口投与した。試験用ランニングパンツを着用した状態で実験室に来てもらい, 採尿 (尿比重測定) を行い, 続いて心拍計, 局所皮膚温センサーおよび衣服内温湿度計を各身体部位に取り付けた。その後, グラウンドに移動し, 体重測定を行った。衣服内環境の測定に用いた固定具の概要とその貼付け位置を図1に示した。

グラウンドのテント内で5分間座位姿勢を保持してベースライン (BL) を測定した後, 心拍数120 ~ 130拍/分を目安とした強度で30分間の自由走を行った (EX1)。EX1では, 両実験日ともに研究参加者は全てCON条件の衣服を着用した。EX1終了後25分間の休息を挟み, EX1と同じ運動を繰り返した (EX2)。25分間の休息中に感覚評価と体重測定を行った後, 研究参加者の半数が再度新しいCONを着用し, 残る半数がDAFを着用した。その後, EX2開始5分前までに500mlのスポーツ飲料 (大塚製薬株式会社: ポカリスエット) を飲水した。EX2終了後には, EX1と同じ感覚評価と体重測定を行った。

1. 5 測定項目

本研究では尿比重, 心拍数, 胃腸温, 局所皮膚温, 衣服内温湿度, 体重 (全身発汗量) を測定した。尿比重はデジタル尿比重計 (アタゴ社製: UG-D) を用いて測定した。心拍数は心拍計 (ポラール・エレクトロ社製: H10心拍センサー) を用いて測定し, 研究参加者はペアリングされたスマートウォッチ (ポラール・エレクトロ社製: Unite) を装着してリアルタイムで心拍数を確認できるようにした。胃腸温はピル型体温計 (BodyCap社製: e-Celsius[®]) を用いて1分間ごとに測定した。局所皮膚温は上腕, 胸, 大腿, 下腿, 背中5か所にiButton[®] (胸, 背中: DS1922L-F5#, 上腕, 大腿, 下腿: DS1921H-F5#) を貼付けて胸と背中5秒ごと, 他の3か所は1分ごとに測定した。胸, 上腕, 大腿, 下腿の皮膚温から平均皮膚温を算出した⁵⁾。衣服内温湿度はiButton[®] (DS1923-F5#) を取り付けるための固定具を胸部および右背部にコロジオン5% (ナカライテスク) で貼り付けて装着し, 5秒ごとに測定した。固定具を皮膚に貼り付ける際には, ドライヤーを用いてコロジオンを乾燥させながら行うことで, 装着時間をできるだけ短縮するようにした (~5分/個程度)。本研究で用いたiButtonの性能はそれぞれ次の通りであった: DS1922L-F5# (温度測定, 精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 分解能 0.0625°C), DS1921H-F5# (温度測定, 精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 分解能 0.5°C), DS1923-F5# (温度・相対湿度測定, 精度 $\pm 1^{\circ}\text{C} \cdot \pm 5\%$, 分解能 $0.5^{\circ}\text{C} \cdot 0.04\%$)。

全身発汗量はBLからEX2終了時の体重変化から算出し, 運動間の休息時に摂取した飲料500ml分を引いて決定した (A&D社製: HW-100KC, $\pm 0.01\text{kg}$)。体重測定は身体および衣服の汗を十分拭きとり, 半裸体 (下着, ランニングパンツ, 靴下, 測定機器) で実施した。

主観的感覚として温熱感 (-10寒い ~ 25とても暑い), 湿潤感 (0とても乾いている ~ 30とても濡れている), べたつき感 (0全くべたつかない

～12とてもべたつく), 肌触り(－9とても滑らか～9とても粗い), 着用不快感(1快適～7とても不快)を評価した⁶⁾。なお温熱感のみ「とても(暑い)」の指標が含まれていなかったため, 他の感覚尺度との整合性を考慮して, 先行研究の指標(－10寒い～20暑い)を改変して用いた。

1. 6 データ解析および統計処理

本研究は屋外で別日に実施することから, 天候が結果に影響する可能性があった。そのため, EX1では研究参加者全員がCONを着用し, その応答に実験日間で差が生じないことを確認することで, 実験日の違いの影響を確認できると考えた。もしEX2のみ衣服条件間の差が認められる場合には, 衣服の影響のみを評価することができていると考えられる。そのため, 本研究ではEX1とEX2を分けて統計分析を行った。衣服内温湿度, 胃腸温, 心拍数, 平均皮膚温, 局所皮膚温について, それぞれ繰り返しのある2要因の分散分析(時間×運動条件)を用い, 多重比較には各時点の条件間を比較するSidak testを用いた。すべてのデータは平均±標準偏差で示した。いずれの場合も有意水準を $p \leq 0.05$ とした。

2. 結 果

9月4日はやや曇り, 11日は晴れであった。実験を行った時間帯の平均気温および相対湿度は4日がそれぞれ31.1℃および57%, 11日が33.3℃および51%であった。

各測定項目のBL(実験開始前の値)は衣服条件間(2セット目でCONを着用した日のBLとDAFを着用した日のBLの比較)で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.057$)。走行速度の平均値はCONが $9.79 \pm 0.95 \text{ km/h}$ で, DAFが $9.82 \pm 1.06 \text{ km/h}$ であり, 衣服条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.705$)。運動時の心拍数も衣服条件間で有意な差は認められなかった(衣服の主効果,

全て $P \geq 0.278$)。

全員CONを着用したEX1では, 胸部の衣服内温度および湿度, 背部の衣服内温度は条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.193$, 図2)。背部の衣服内湿度は交互作用($P=0.014$)が認められたものの, 各時点で差は認められなかった(全て $P \geq 0.515$, 図2)。一方, EX2では胸部および背部の衣服内温度は条件間で差は認められなかったものの(全て $P \geq 0.139$)、両部位共にDAFの衣服内湿度はCONと比較して低下した(全て $P \leq 0.048$, 衣服の主効果, 図2)。

EX1において平均皮膚温, 胸部皮膚温, 背部皮膚温, 上腕皮膚温は条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.122$)。EX2においても平均皮膚温, 胸部皮膚温, 背部皮膚温は条件間で差は認められなかったものの(全て $P \geq 0.204$)、上腕皮膚温で衣服の主効果が認められ, DAFがCONと比較して低値を示した($P=0.033$)。胃腸温および全身発汗量はEX1, EX2ともに衣服条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.065$)。

EX1において温熱感, べたつき感, 肌触り, 着用不快感は条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.126$)。EX1の湿潤感はEX2でCONを着用した群がDAFを着用した群と比較して高い値を示した($P=0.016$)。一方, EX2では全ての感覚パラメーターは衣服条件間で差が認められなかった(全て $P \geq 0.166$)。RPEも同様に, EX1, EX2ともに衣服条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.103$)。

3. 考 察

本研究で開発した衣服内温湿度を計測するiButton[®]を用いた固定具は皮膚に直接取り付けことができ, 汗を多量にかくような屋外の運動中にも外れることがなく, 衣服内温湿度を計測できることが明らかになった。実際に, 通気性が高い生地を着用すると衣服内湿度が低下することを屋

外環境下で確認することができた。これらの結果は、本研究で開発した固定具は屋外運動時の衣服内環境を評価する新たな手段になることを示している。

本研究で用いた固定具は筆者らがデザインし

てASE技研(株)に製作を依頼した。研究実施時の単価は30個(上下セット)で単価が2,000円程度であった。一方、iButton®は昨今の円安もあり価格が高騰しており、衣服内温湿度の測定に使用した精度の高いDS1923-F5は2024年6月18日

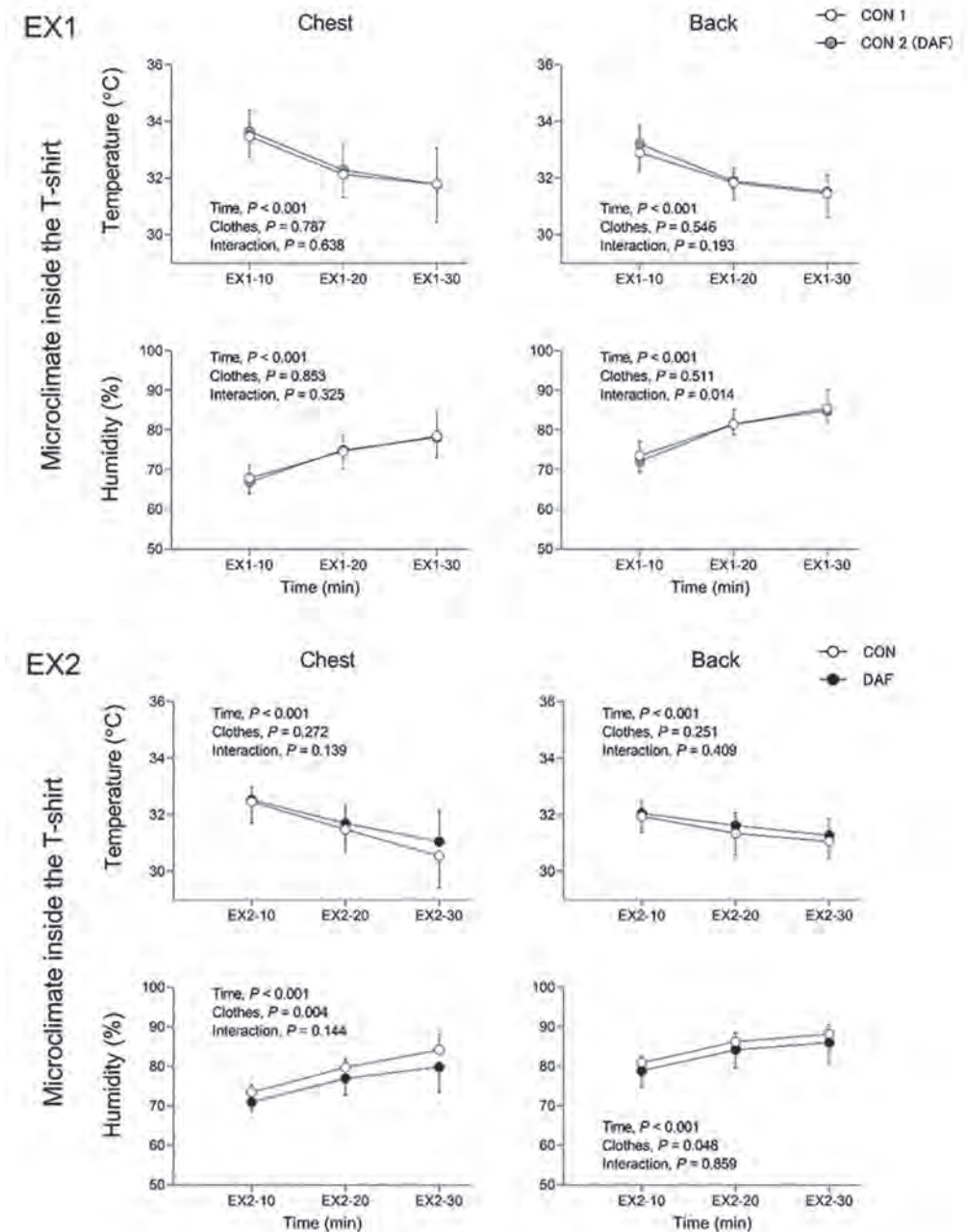


図2 Microclimates inside the T-shirt during EX1 (upper) and EX2 (lower).

CON1 indicates exercise to wear a control T-shirt in both 1st and 2nd bouts.

CON2 (DAF) indicates exercise to wear a control T-shirt in the 1st exercise bout, but to wear DAF in the 2nd bout.

現在で単価がおよそ23,000円であった (Mouser Electronicsの通販サイトで確認)。そのため、研究開始当初の想定 (固定具とiButton[®]合わせて10,000円強) よりも予算がかかってしまうものの、比較的安価といえる範囲で衣服内環境を無拘束で計測することができるようになった。

本研究ではコロジオンを用いて固定具を皮膚に直接貼り付けた。このような方法は局所発汗量を計測する際に発汗カプセルを皮膚に貼り付ける手法として昔から国内外の多くの研究室で実施されている。コロジオンは絆創膏などにも使われる粘着成分で人体への害は最小限である (使用後皮膚に赤みを観察することがあるが、早期に消失する)。本研究で開発した固定具を皮膚に貼り付ける場合には、所属機関における研究倫理審査が必要になると考えられるものの、前例の多い手法であるため、高い汎用性が期待できる。

本研究で開発した固定具は、皮膚と衣服の間の微小環境を測定できるデザインになっており、センサー自体が皮膚にも衣服にも当たらず空間に位置している。また衣服あるいは皮膚からの正確な距離も分かる。さらに、体動が伴うような時でもセンサーの位置が変わらないため、ピンポイントで衣服内環境を計測できる特徴がある。皮膚以外にも、衣服に直接縫い付けることで、重ね着をした時の衣服と衣服の間の微小環境を計測することも可能となる。これらのことから、本研究の応用範囲はスポーツ科学、衣服科学、生活科学など多方面に期待できる。

本研究では屋外で衣服内環境を測定することの重要性を考慮して、人工気象室ではなくグラウンドで長距離走をした時の衣服内環境を測定した。しかし、人工気象室とは異なり、異なる日程で実験を行う場合には、天候の変化が結果に影響すると考えられる。本研究ではあらかじめ実験の日程と予備日を決めた上で研究参加者をリクルートした。そのため、全ての参加者が同じ日程で実

験を行うことができた。日程による天候の違いを考慮するため、運動を2セット実施し、第1セット目には全員が同じ衣服を着用した。第2セット目には異なる衣服を着用した。この方法を用いることで、1セット目の応答に差がなく、2セット目に差が観察される場合に、日程 (天候) の違いに関わらず、衣服の効果を検証できると考えた。実際に、衣服内湿度においてこのような反応が認められたことから、本研究デザインは屋外での衣服評価に有用であると考えられる。前述のように本研究で開発した固定具は比較的安価であることから、本研究のような大人数の同時測定が可能になった。この方法は研究参加者ごとに実験を実施するデザインと比べて、実験にかかる時間の大幅な短縮につながる点で画期的である。ただし、天候の違いの影響を完全に排除できたわけではないため、例えば人工気象室内で同じ実験を繰り返して再現性を確認するなど、今後の検証が必要かもしれない。

本研究では主要評価項目ではないものの、深部体温や皮膚温といった生体パラメーターの測定も実施した。衣服の違いによる影響は一部皮膚温を除いて認められなかったことから、本研究で用いた衣服の通気性の違いは体温調節反応に大きく影響しなかったと考えられる。体温調節反応が大きく改善されるような衣服を開発することができれば、夏の運動の安全性やスポーツパフォーマンス向上に寄与できると考えられる。今後、本研究の成果がその一助になれば幸いである。

結 論

本研究で開発した衣服内環境を無拘束で計測する比較的安価な固定具は、夏の屋外でランニング時の衣服内環境を計測でき、通気性の異なる衣服の衣服内湿度の違いを評価できる。

謝 辞

本研究は石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成を基に行われました。助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝いたします。また、実験に協力して頂いた研究参加者の皆様に厚く御礼申し上げます。スマートウォッチを貸与して頂いたポラール・エレクトロ・ジャパン株式会社に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Di Domenico I., Hoffmann S.M., Collins P.K., The Role of Sports Clothing in Thermoregulation, Comfort, and Performance During Exercise in the Heat: A Narrative Review., *Sports Medicine-Open*, 8: 58 (2022)
- 2) Wei H.T., Chan W.S., Chow D.H., Systematic review of selecting comfortable sportswear: Predicting wearing comfort based on physiological responses and materials properties., *Textile Research Journal*, 00405175231167863 (2023)
- 3) Smith A.H., Crabtree D., Bilzon J., Walsh N., The validity of wireless iButtons® and thermistors for human skin temperature measurement., *Physiol. Meas.*, 31: 95 (2009)
- 4) Kato H., Okamoto Y., Otsuka J., Tajima K., Shiraishi A., Shiramoto A., Amano T., Wearing a breathable T- shirt does not affect thermoregulatory responses during exercise under hot conditions., *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*
- 5) Ramanathan N.L., A new weighting system for mean surface temperature of the human body., *J. Appl. Physiol.*, 19: 531-533 (1964)
- 6) Raccuglia M., Heyde C., Lloyd A., Ruiz D., Hodder S., Havenith G., Anchoring biases affect repeated scores of thermal, moisture, tactile and comfort sensations in transient conditions., *Int. J. Biometeorol.*, 62: 1945-1954 (2018)