

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420620

研究課題名(和文)衣服素材の特性を考慮した平均皮膚温予測モデルと熱中症リスクセンサー開発への研究

研究課題名(英文) Study on a human thermal model for predicting mean skin temperature considering a property of clothing material and development of a sensor for predicting heat disorders

研究代表者

桑原 浩平 (Kuwabara, Kouhei)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：40374582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：密着度の異なる4種類のTシャツを着用した人体の生理・心理反応に及ぼす影響を被験者実験によって評価し、通常密着度より高密着の着衣の方が作業時の体表温が低くなった。これは着衣ぬれ部位の熱抵抗が減少したためである。市販WBGT計の精度検証の結果、黒球の大きさが精度に影響していることが示唆された。3DプリンターでPLA樹脂製のグローブ、頭形状、人体形状を製作し、温度計として測定した。屋外では銅製グローブ温よりPLAグローブ温の方が低い値を示した。樹脂の熱抵抗が影響していると考えられる。PLA頭・人体のような不均一な形状の場合、日射に対する向きにより温度が異なることが示された。

研究成果の概要(英文)：This study evaluates the effect of the clothing fit (CF) on physiological and psychological responses. Experiments were conducted with five young male subjects to test the effect of CF of T-shirt of which four sizes were applied for individual subject: loose size(L), regular (R), fit (F) and compression (C). The tight T-shirts gave lower body surface temperature than that of regular. As a result of the verification of the accuracy of the commercially available WBGT meter, the size of the black globe influenced the accuracy. In order to verify the effect of the shape of thermometer on temperature, the thermometer of the shapes of globe, head and human body of polylactic acid (PLA) resin were manufactured with a three dimensional printer. PLA globe temperature is lower than copper globe temperature in outdoor condition due to the thermal resistance of the PLA resin. In case of non-uniform shape like head / human body, the temperature varies depending on the direction to the sun.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：熱中症 平均皮膚温 着衣密着度 衣服 グローブ温度計 3Dプリンター 対流熱伝達率 熱抵抗

1. 研究開始当初の背景

熱中症を予防するための評価指標として、WBGT (湿球黒球温度) や PHS (Predicted Heat Strain) が利用されている。しかし WBGT は、1) 欠点が指摘されている有効温度 (ET) を基にしている、2) 湿球温等にかかる係数は軍服 (オリーブ色) の日射吸収率で補正した値、3) 軍事訓練での熱中症による犠牲者を減らすために作られた指標である。WBGT は現在、スポーツや作業現場のみならず日常生活における熱中症予防のための指標として利用されており、上述の点からもそのまま適用するのは問題である。また PHS は、熱平衡式に適用する平均皮膚温が被験者実験で得られた結果を重回帰分析して得られた実験式であり実験条件に大きく制約されている (生理特性に直接的に基づいた式ではない)。筆者らは、熱中症による救急搬送者数のデータ (引用文献①) を用いて当該環境条件における 1 日当たりの搬送者数を算出したが、WBGT よりも日最高気温との相関が高いことが示された。また近年は、この WBGT を基にした熱中症計が販売されている。携帯型タイプは安価であるが、グローブ温の測定を省略し温湿度のみから WBGT を推定しているため、放射の影響を省略することで屋外では日射の影響を過小評価する危険性がある。

2. 研究の目的

(1) 筆者らは、熱中症予防のための評価指標として平均皮膚温予測モデルを創案 (無効発汗に伴う着衣のぬれや日射の反射・透過の影響を考慮) し、被験者実験によりその有効性を検証してきた (引用文献②,③)。近年、生地編み方の工夫や繊維の毛管現象等を利用して、衣服の外気側表面で汗を蒸発させ皮膚側表面のぬれ感を少なくすることで快適性を保つ吸汗速乾性の衣服が多数販売されている。筆者らは、吸汗速乾素材と綿素材の衣服が生理心理反応に及ぼす影響を評価するために被験者実験を行った。その結果、速乾素材の方が着衣に残留する汗量は有意に少なかったが、平均皮膚温は有意に高くなった。速乾素材により吸収された汗の一部は蒸発しても体温調節に寄与しない、すなわち汗の蒸発による人体冷却効果を阻害する要因となっている可能性が示唆された (文献④)。そこで本研究では、衣服に吸収された汗の蒸発が人体を冷やすことに寄与する割合について、濡れた着衣部位における熱移動を繊維素材の特性を考慮してモデル化することにより定量化し、吸汗速乾素材等の様々な素材にも適用可能な新しい平均皮膚温予測式を創案 (発表雑誌論文①) し、被験者実験により適用可能性を検証することを第一の目的とする。

(2) 実際に平均皮膚温を用いて暑熱環境を評価するためには、皮膚温と深部体温や心拍数といった生理量との関係を明らかにする必要がある。深部体温や心拍数は、個人の心肺

能力を表す最大酸素摂取量 VO_{2max} に応じて変化することが指摘されている。筆者らは、これに暑さの状態に対応した平均皮膚温の影響を組み合わせることにより、個人の心肺能力と暑さの影響を考慮した深部体温、心拍数の予測式を導いている (研究業績 26)。平均皮膚温と深部体温等の関係が明らかになれば、平均皮膚温により暑熱環境の評価が可能となる。最終的には、簡易な計器で環境側要素 (気温、湿度、風速、放射) を計測し、人体側要素 (着衣量、代謝量、発汗能力、心肺能力) を入力することにより熱中症リスクを評価可能な熱中症リスクセンサー開発を目指している。本研究では、3D プリンターを用いて様々な形状の温度計を製作し、その物性値を測定して計器としての有効性を検討することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 筆者らは、発汗による着衣濡れ表面の熱収支を考慮した新しい平均皮膚温予測モデルを開発した (発表雑誌論文①)。暑熱下の熱ストレス低減を目的として、被験者実験により予測モデルの有効性を検証した。健康な男子学生 5 名を対象として恒温恒湿室で被験者実験を行った。気温と相対湿度を 28.7°C, 50%, 27.9°C, 65% と 27.3°C, 80% の 3 条件とした。65% では R (通常) のみ、50, 80% では 4 種類全ての衣服を使用した。着用する衣服は L (緩め), R (通常), F (密着), C (高密着) の 4 種類とした。実験では軽作業時の代謝量を想定して自転車エルゴメーター運動を 120 分間行わせた。運動の負荷は軽作業時の代謝量を想定し、43.5 W/m² に設定した。また、50% 環境で R (通常) の服に関しては 30, 60, 90, 120 分間と時間別に区切り主観申告による温冷感や濡れ着衣の質量増加量の変化を評価した。

(2) 市販で使われている 6 種類の WBGT 計の精度を評価するために屋内外で実測し、乾湿計とグローブ温度計から求められる WBGT と比較検討した。WBGT 計は 6 種類である。2 つは三脚等に取り付ける型であり、他の 3 つは身に着けられる携帯型、1 つは卓上型である。WBGT は気温、相対湿度、グローブ温から計算されるが、温湿度のみから WBGT 値を推定する計測器もあった。基準とする WBGT 値はアスマン通風乾湿計と 150mm φ グローブ温度計の実測値より算出した。実測は、2014 年 7 月に釧路高専構内にて屋外で、2014 年 11 月~2015 年 1 月に釧路高専の恒温恒湿室で行われた。一回の測定時間は 30~60 分とし、5 分毎に計測機の数値を読み取った。恒温恒湿室は、WBGT が 25°C [(28°C, 71%rh), (34.2°C, 30%rh)], 28°C [(31.4°C, 70%rh), (38°C, 30%rh)], 31°C [(35°C, 70%rh), (38.2°C, 45%rh)] になるように設定した。

(3) 屋外で測定可能な熱中症リスクセンサーの開発へ向けて、3D プリンターを用いて黒色 PLA 樹脂グローブ温度計を試作し、グロー

ブ表面の状態や厚さ(1, 1.5, 2mm)が温度に及ぼす影響を検討した。75mmφのPLAグローブ温度計と銅製グローブ温度計を屋内外で比較実測した。また、3DプリンターでPLA樹脂頭部(黒, 白, 灰)と人体形状(黒, 白, 灰)の温度計を製作し、実験住宅内の窓際にて日射環境下での比較実測を行った。さらにPLA樹脂そのものの物性を調べるために、日射吸収率, 熱抵抗, 対流熱伝達率を測定した。

4. 研究成果

(1) 時間別実験の結果, 着衣質量増加量は増加した後減少し, 安定することが確認された。着衣質量増加量は高湿度下で, より大きい結果となった。総合的な不快感に及ぼす湿度の影響は見られなかった。平均皮膚温から推定されるヒートファクター(HF)と主観申告温冷感の比較を行ない, 両者は概ね一致し, HFの有効性が確認された。HFが幅広い環境で適用可能であれば, 様々な気象条件下での温冷感を評価することができる。R(通常)よりC(高密着)の方が, 体表温が約0.5°C低下した。これは, 環境温度に換算すると約1.6°Cの減少に相当する。密着による効果が確認された。着衣に吸収され残留する汗量および蒸発性能は着衣密着度で有意な差は見られなかった。平均皮膚温予測モデルを用いて, 着衣ぬれ部位の熱抵抗を推定した結果, 高湿度環境でも, 衣服の密着度別の着衣濡れ部位の熱抵抗に差が見られた。通常よりも緩めの衣服についても体表温の低下が見られた。今後, 適切な衣服の密着度について, 暑熱ストレス低減の観点からさらなる検証を行う必要がある。

(2) 各WBGT計から計測された, 気温, 相対湿度, グローブ温を基準値と比較したところ, 相対湿度はややばらついているものの, 乾球温は近い値を示しており, グローブ温の精度に問題があることが示された。携帯型で温湿度のみで評価するWBGT計は, 乾球温が高く, 相対湿度は低く表示されることが示された。温湿度センサーが本体に組み込まれているため, 熱放射の影響を受けやすいものと推察される。携帯型のWBGT値は総じて高い値を示しており, 熱中症リスクを過大評価すると考えられる。WBGT計の精度には, センサーそのものの精度や黒球の大きさが影響していることが示唆された。温湿度のみから熱中症リスクを評価する計器は, 過大評価の傾向が示された。また高温低湿の環境では実際のWBGT値よりも低く評価している計器も見られた。

(3) PLAグローブ温は総じて銅グローブ温よりも低い温度を示し, 屋外では薄いPLAグローブほど, 温度が銅製よりも低くなった。黒PLA板の日射吸収率は1に近い値を示しているため, 日射吸収率が原因ではなく, 熱抵抗が大きいことが影響している可能性がある。PLAグローブの対流熱伝達率を実測したところ, 印刷直後の表面が積層状態のときより

も, 表面を研磨して滑らかにした後のほうが, 対流熱伝達率は小さくなった。また, グローブ表面の熱画像を撮影したところ, 銅グローブは比較的均一の表面温度分布を示しているのに対し, PLAグローブの表面温度の分布はかなり大きいことが示された。研磨後も同様の分布を示したことから, PLAグローブの特性とも考えられる。PLA頭とPLA人体温を比較測定した結果, 窓に対して横を向いているPLA頭(横黒)の温度が最も高く, 正面黒との差は2~3°Cあった。一方, PLA人体では, 横向きより正面の温度が高い。これはPLA頭の場合, 横を向いているほうが日射に対する投射面積率が大きいためであり, PLA人体の場合は横向きよりも正面の投射面積率が大きいことが理由であると考えられる。今後, PLA人体の対流熱伝達率を推定し, 熱中症リスクセンサーとしての有用性を検討したい。

<引用文献>

- ① 国立環境研究所, 熱中症患者速報, <http://www.nies.go.jp/health/HeatStroke/spot/index.html>, 2012
- ② 栗原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘他, 無効発汗と着衣のぬれを考慮した屋外環境における平均皮膚表面温度の予測, 空気調和・衛生工学会論文集, No.144, pp.1~10, 2009
- ③ 窪田英樹, 栗原浩平, 濱田靖弘他, 無効発汗と着衣のぬれを考慮した人体皮膚表面温度の予測, 空気調和・衛生工学会論文集, No.137, pp.9~17, 2008
- ④ 谷地誠, 栗原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘他, 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル(第13報)素材が着衣のぬれと人体に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会大会, pp.917~920, 2012

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Kubota H, Kuwabara K, Hamada Y, The development and initial validation of a virtual dripping sweat rate and a clothing wetness ratio for use in predictive heat strain models., *International journal of biometeorology*, 査読有, 58(6), 2014, 1339-1353
DOI: 10.1007/s00484-013-0736-x

[学会発表] (計12件)

- ① K. Kuwabara, Y. Shibata, M. Ogawa, Y. Hamada, H. Kubota, Effect of clothing fit of T-shirt on physiological and psychological responses in hot environments, The Fifth International Conference on Human-Environment System, 2016/11/1, Nagoya University(Nagoya city)
- ② 栗原浩平, 柴田侑治, 濱田靖弘, 窪田英

樹, 高湿度域における着衣の密着度の違いが人体の生理・心理反応に及ぼす影響, 平成 28 年度空気調和・衛生工学会大会, 2016 年 9 月 15 日, 鹿児島大学 (鹿児島市)

- ③ 栗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹, 3D プリンターで製作したグローブ温度計の特性, 2016 年度日本建築学会大会, 2016 年 8 月 24 日, 福岡大学 (福岡市)
- ④ 栗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹, WBGT 計の性能評価と 3D プリンターでのグローブ温度計の試作, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 50 回学術講演会, 2016 年 3 月 22 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑤ 大前裕紀, 栗原浩平, 齊藤大治, 小川まどか, 濱田靖弘, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 7 報) 高湿度域における生理量の定常値予測および過渡的評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 50 回学術講演会, 2016 年 3 月 22 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑥ 浪岡佑宇, 栗原浩平, 柴田侑治, 小川まどか, 濱田靖弘, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 6 報) 高湿度域における着衣の密着度の違いによる暑熱ストレス低減効果の評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 50 回学術講演会, 2016 年 3 月 22 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑦ 栗原浩平, 柴田侑治, 小川まどか, 濱田靖弘, 窪田英樹, 密着度の異なる 4 種類の着衣が人体の生理・心理反応に及ぼす影響, 第 39 回人間-生活環境系シンポジウム報告集, 2015 年 11 月 21 日, 産業技術総合研究所・臨海副都心センター別館 (東京都江東区)
- ⑧ 齊藤大治, 栗原浩平, 小川まどか, 濱田靖弘, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量 (ストレイン) の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 5 報) 生理量の定常値予測と過渡的評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 48 回学術講演会, 2015 年 3 月 10 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑨ 柴田侑治, 栗原浩平, 小川まどか, 濱田靖弘, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量 (ストレイン) の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 4 報) 着衣の密着度の違いによる暑熱ストレス低減効果の評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 48 回学術講演会, 2015 年 3 月 10 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑩ 武者亮佑, 栗原浩平, 濱田靖弘, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 3 報) 体表温・体内温のステップ応答予測モデルの構築

と暑熱環境の過渡的評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 48 回学術講演会論文集, 2014 年 3 月 11 日, 北海道大学 (札幌市)

- ⑪ 澤井拓朗, 栗原浩平, 濱田靖弘, 武者亮佑, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 2 報) 体表温・体内温・心拍数の各予測ストレイン量を評価指標とする暑熱環境許容域の提案, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 48 回学術講演会論文集, 2014 年 3 月 11 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑫ 戸沼大, 栗原浩平, 濱田靖弘, 武者亮佑, 窪田英樹, 着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究 (第 1 報) 環境湿度と着衣の密着度が人体生理心理反応に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 48 回学術講演会論文集, 2014 年 3 月 11 日, 北海道大学 (札幌市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

栗原 浩平 (KUWABARA KOUHEI)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号 : 40374582

(2)研究分担者

濱田 靖弘 (HAMADA YASUHIRO)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 40280846

(3)研究協力者

窪田 英樹 (KUBOTA HIDEKI)

小川 まどか (OGAWA MADOKA)

武者 亮佑 (MUSHA RYOSUKE)

澤井 拓朗 (SAWAI TAKURO)

戸沼 大 (TONUMA DAI)

齊藤 大治 (SAITO DAICHI)

柴田 侑治 (SHIBATA YUJI)

大前 裕紀 (OHMAE YUKI)

浪岡 佑宇 (NAMIOKA YU)

小泉 開 (KOIZUMI KAI)

板倉 裕来 (ITAKURA HIROKI)

後藤 日向子 (GOTO HINAKO)