

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18764

研究課題名（和文）ウェアラブル皮膚熱流センサを用いた人体温冷感評価法の革新

研究課題名（英文）Innovation in human thermal sensation assessment using wearable skin heat flow sensors

研究代表者

浅輪 貴史（Asawa, Takashi）

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：50361796

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人体の効果的な温冷感の予測方法について運動量のステップ変化を伴う歩行条件や室温条件の差異、足裏の局所冷却時などに着目して検討を行い、胸部での皮膚熱流量に加えて、ウェアラブルセンサで容易に測定ができる手首と指先との温度差、足裏の熱流量等による予測の可能性を示した。また、それらに対して主に人体の熱生産能力の違いが及ぼす影響についても検討を加えた。これらは、人々が屋内や屋外の空間移動を伴う日常生活において、非定常的に感じる暑さや寒さ、涼しさといった温冷感の予測に向けて大きく貢献する結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、我々が屋内や屋外の空間移動を伴う日常生活において感じる暑さや寒さ、涼しさといった温冷感や熱ストレスを簡便に予測することを目的としたものである。そのために、主に腹部に装着するウェアラブルセンサによって取得される熱流（身体の内部から皮膚に向けた熱の流れ）に着目し様々な実験を通してその有効性を検証したものである。将来的には、高齢者などの熱ストレスに脆弱な人々が感じる暑さや身体的な負担を検知することに役立てられると期待している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated methods for predicting thermal sensation in the human body, focusing on walking conditions that involve step changes in the amount of movement, differences in room temperature conditions, and local cooling of the soles of the feet, and demonstrated the possibility of prediction using the temperature difference between the wrist and fingertips, which can be easily measured with a wearable sensor, and the heat flow in the soles of the feet, in addition to the skin heat flow in the chest. We also investigated the influence of differences in the heat production capacity of the human body on these factors. These results will contribute to predicting thermal sensations such as hot, cold, and coolness that people experience unsteadily in their daily lives, which involve spatial movement between indoors and outdoors.

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：温冷感 ウェアラブルセンサ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人々は、屋内や屋外の空間移動を伴う日常生活において、非定常的に暑さや寒さ、涼しさといった温冷感や熱ストレスを感じている。しかしながら、これまで屋内外の移動を伴う非定常な状態での温熱生理と温冷感とを結びつけることが難しく、大きな研究課題として残っていた。特に空間移動を伴う場合には、環境だけでなく行動の変化(歩行後に立ち止まるなど)を考慮する必要がある。行動が変化する場合の温冷感予測に関して、既往研究では主に歩行による相対気流速度的変化や気流乱れによる対流熱伝達率の変化に注目していたが、人体温熱生理に十分着目されておらず、有用な指標が見出されていなかった。

2. 研究の目的

人体の温熱生理に着目すると、運動変化時には代謝による熱生産が非定常となり、体内で生産された熱を皮膚へ移動させる皮膚血流制御も定常時と異なる。すなわち、行動が変化する場合の特徴として、深部から皮膚への熱流入量が非定常となり、これが温冷感に影響を与えると予想した。そこで、本研究課題では、ウェアラブルタイプの皮膚熱流センサを用いることで、空間移動と代謝量の変化が起こる場合の温冷感を実用的に予測する手法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験1

温湿度を管理した室内においてトレッドミルを用いた歩行と休止の実験を行った(図1)。研究対象者には腕時計型ウェアラブルセンサをはじめとする測定機器を装着してもらい、歩行と休止を行った際の身体状況や温熱快適性を測定した。具体的な測定項目は、皮膚温度、鼓膜温度(深部体温)、深部から皮膚への熱流量(VitalgramCT、図2)、活動量、心拍数、手首の3次元加速度、体重である。また測定時間中は合図に合わせて温冷感、快適性の申告を行なってもらった。

本実験は3ケースで構成されており、それぞれ温度条件や歩行条件が異なる。実験はいずれも室内で行うが、温度は空調制御空間と屋外を想定して25と30を組み合わせた。また歩行はトレッドミルを用いて一定速度で行い、その直後に椅座安静とした。

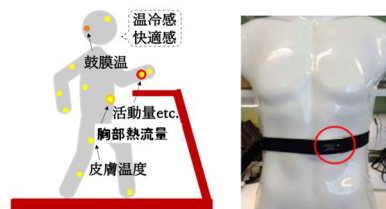


図1 測定項目 図2 VitalgramCT

(2) 実験2

身体の局所冷却に伴う皮膚熱流の変化と温冷感への影響を調べるため、温湿度を管理した室内において、温度を一定に保つ水冷パネルの上に磁器タイルを敷いた状態での足裏冷却の実験を行った。足裏からの熱流を測定するため、2つの磁器タイルの上に熱流パネルを設置した。両実験ともに実験開始から30分間は身体の温熱状態を一定とするため、断熱材上での椅座安静とした。その後、Expt. 1では床パネルに裸足を接触させ、Expt. 2では30分間の歩行後(4.3 km/h)に床パネルへの接触を行った。被験者は半袖Tシャツを長ズボン(0.27 clo)のみ着用し、靴下および靴は着用しなかった(歩行時のみサンダルを着用)。皮膚血流はレーザードップラー流量計を左足の親指と左手の人差し指にクリップで装着し、発汗量は後頸部に換気カプセル型発汗計を装着することで測定した。

4. 研究成果

(1) 2021年度

トレッドミルを用いた歩行と停止の実験により、複数の生理量と温冷感との関係を分析した結果、腹部の皮膚熱流量は着衣や身体内部の熱移動等による非ステップ的な応答が複合的に現れており、それらが温冷感に与える影響も、体組成や生理反応の個人差も含めて、熱流量の動向から把握できることを示した(図3)。

また、人体熱モデルであるTwo-nodeモデルを用いて、上記の非定常状態における人体温熱生理と温冷感を予測するために、Two-nodeモデルに運動時の血管収縮作用や代謝量の非定常性を導入したうえで、発汗に伴う潜熱や脂肪厚に関連するパラメータ(発汗制御係数、熱コンダクタンス、血管拡張係数)を変化させる操作を行い、被験者実験の結果との対応関係を確認した。

さらに実用化に向けた検討として、上記の実測結果とモデル解析の結果を踏まえて、胸部での皮膚熱流量の他に、ウェアラブルセンサでの簡便な取得が期待できる手首での皮膚熱流量や、手首と指先との温度差に注目することで、より実用的かつ容易に深部体温や温冷感を予測できる可能性があることを考察した。

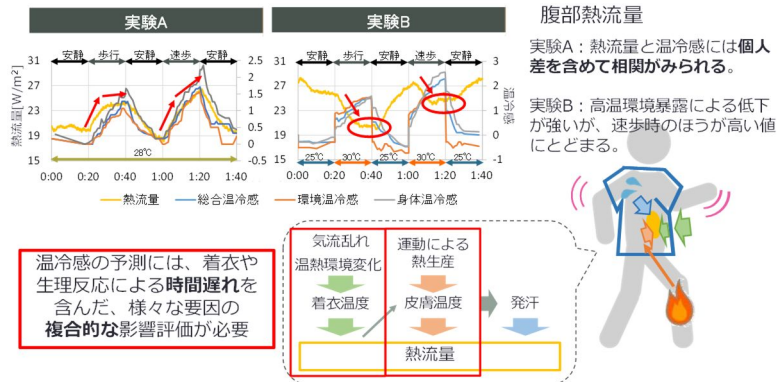


図3 腹部熱流量と温冷感との関係 (実験1)

(2) 2022年度

昨年度の研究成果を踏まえ、胸部での皮膚熱流量の他に、ウェアラブルセンサで容易に測定ができる手首と指先との温度差に注目して、ウェアラブルセンサによる非定常時(運動および室温のステップ変化時)の温熱生理の取得や温冷感の予測の有効性を検討した。その実験結果より、歩行の開始や停止、室温の上昇や低下のタイミングで指先の温度が高感度で変化し、それが血管の収縮と拡張のタイミングや程度を表していることから、手首と指先との温度差を取ることで、身体の温熱生理状態において重要な血流と、その際の温冷感をよく再現できることを確認した。昨年度の研究で課題となっていた被験者による温熱生理反応と温冷感の差異に関して、それらの理由として皮膚の断熱を左右する脂肪厚の影響を考察していたが、今年度の実験により、基礎代謝量や筋肉量の差異がより大きく影響している可能性が示された。

また、皮膚の熱流と血流の両者に着目して、身体の局所冷却が温冷感に与える影響を明らかにするために、足裏の局所冷却による足裏熱流と足指の血流の変化を実験により調べ、その際の温冷感反応を確認した。この結果、足指の血流は室温の影響を強く受け足裏の局所冷却の影響は小さかったものの、足裏の熱流は局所冷却により大きく変化し(図4)、その結果、身体の温冷感に影響を与えていた(図5)。この結果は、熱流と血流を踏まえた温冷感予測において重要な知見を提供するとともに、暑熱環境下で局所冷却により効率的に冷涼感を得るためにも有効な知見である。

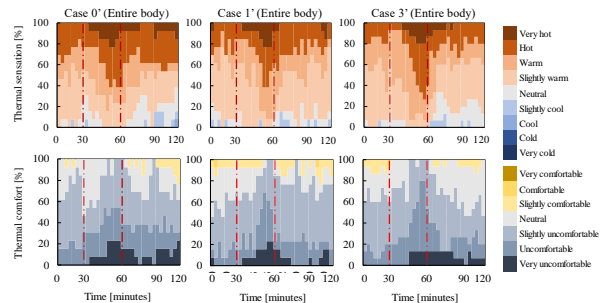
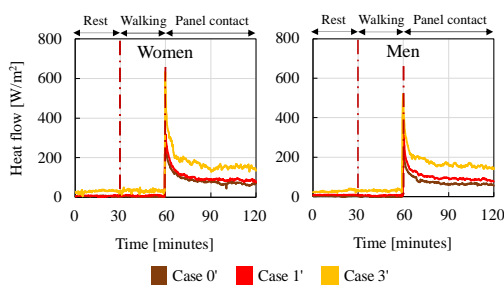


図4 床面接触冷却時の足裏の熱流 (実験2) 図5 床面接触冷却時の温冷感と快適感 (実験2)

(3) 2023年度

これまでの研究の進展とそこで生まれた新たな着眼点を踏まえて、運動量がステップ変化する歩行後における足裏の局所冷却に基づく温熱生理(皮膚熱流と血流)と温冷感の予測に取り組んだ。これは、身体の温冷感予測とともに、効果的な身体冷却方法の提案と温冷感の向上の効果が期待できるためである。加えて、昨年度の研究で示唆された基礎代謝量や筋肉量の影響についても調査した。その結果、歩行後の足裏冷却において、足指の血流量は維持されつつ足裏の熱流量は増加しており、身体の温冷感も有意に低下していたことから、熱流量と温冷感との関係性が確認された。これは、昨年度実施した安静時と同様の結果である。また温冷感との対応が見られる平均皮膚温には男女差が生じた。これに関して、暑熱環境下では発汗量の違いが、標準環境下では基礎代謝量や筋肉量に伴う熱生産能力の違いが皮膚温の性差に影響を及ぼす可能性を示した。

以上を踏まえて研究期間全体の研究より、人体の効果的な温冷感の予測方法について運動量のステップ変化を伴う歩行条件や室温条件の差異、足裏の局所冷却時などに着目して検討を行い、胸部での皮膚熱流量に加えて、ウェアラブルセンサで容易に測定ができる手首と指先との温度差、足裏の熱流量等による予測の可能性を示した。また、それらに対して主に人体の熱生産能力の違いが及ぼす影響についても検討を加えた。これらは、人々が屋内や屋外の空間移動を伴う日常生活において、非定常的に感じる暑さや寒さ、涼しさといった温冷感の予測に向けて大きく貢献する結果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kaho Hakamada, Takashi Asawa, Haruka Kitagawa, Hiroki Aoshima, Rei Kawamura	4. 巻 253
2. 論文標題 Contact cooling for bare feet using floor cooling systems: Experiment on human thermal physiology and sensation in Japanese hot environment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 111256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2024.111256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史
2. 発表標題 暑熱環境下における足の局所冷却が人体温熱生理に及ぼす影響 - 深部体温上昇時における効果的な体温低減法とその予測法に関する研究-
3. 学会等名 日本ヒートアイランド学会第17回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史、青島広樹
2. 発表標題 夏期の室内環境における足裏の局所冷却が人体温熱生理および温熱感覚に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会関東支部 第93回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史、青島広樹
2. 発表標題 夏期の室内温熱環境における足裏冷却の有効性に関する実験的検討 人体温熱生理と温熱感覚の個人差に注目して
3. 学会等名 日本建築学会大会（京都）学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史
2. 発表標題 ウェアラブルセンサを用いた深部体温予測に関する研究 - 非正常状態における生理現象を踏まえた体温変化分析 -
3. 学会等名 日本ヒートアイランド学会第16回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史
2. 発表標題 屋内外の空間移動に伴う温熱環境および運動量のステップ変化が身体の温熱生理に与える影響 その5：非正常時の深部体温予測に向けた温熱生理現象の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会（北海道）学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史
2. 発表標題 夏期における歩行後の足裏冷却の有効性に関する実験的検討
3. 学会等名 日本ヒートアイランド学会第18回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 袴田華帆、浅輪貴史、関根壮吾
2. 発表標題 夏期における床冷却システムを用いた歩行後の裸足の床面接触冷却効果に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会（東京）学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------