

[研究助成 (A)]

ウェアラブル深部体温センサの暑熱対策応用に向けた実用化研究

2251029

研究代表者
(助成金受領者)

東京科学大学 工学院機械系

助教 橋 本 優 生

[研究の目的]

温暖化に伴い熱中症リスクが高まる現代において、その対策は喫緊の社会課題である。熱中症は高温多湿環境に長時間曝されることで、体温調節機能のバランスが崩れ、体内に熱がこもった状態である。熱中症は発症過程で身体内部の温度（深部体温）が上昇することから、深部体温は暑熱対策に有効な指標とされており、ウェアラブルセンサにより、活動中に負担のない形でモニタする技術の開発が期待されている。

本研究に関連した熱流変化から深部体温を推定する主な手法として、熱流補償法 (Fox et al., *Br. Med. J.*, 1973), 熱流束法 (Gunga et al., *J. Therm. Biol.*, 2008; Tokizawa et al., *J. Therm. Biol.*, 2022) が報告されている。熱流補償法は、2つの温度センサとヒーターを備えたプローブを皮膚に接触させ、ヒーター加熱により皮膚と皮膚直下の内部を等温に制御し、深部体温を推定する。当該手法は外乱の影響が小さく、測定精度が高い一方、消費電力が大きく、ウェアラブルセンサには不向きである。熱流束法は、貼り付け型センサを用いて皮膚表面の熱流変化から深部体温を推定する手法であり、ウェアラブル計測に適した手法の1つとして注目されているが、環境変化による計測誤差の発生が実用上の課題であった。申請者は、解決手法として、高熱伝導材料をプローブカバーとして用いる手法 (Hashimoto et al., *Sens. Actuators A Phys.*, 2024) を開発し、安静時に限定されるが環境変

化にロバストな深部体温計測を実現した。本研究課題は、当該手法を、激しい活動が想定される暑熱対策へ応用する上で必要不可欠な、発汗に伴う計測誤差の低減を実現するという位置づけであり、管見の限り、このような研究は見当たらない。

本研究では、①ヒトの発汗機能特性に着目し計測誤差を低減するアプローチと②深部体温センサ周辺の発汗量から計測誤差を補正するアプローチを試みる。

【アプローチ①】一般的にウェアラブルセンサは皮膚が圧迫された状態で使用される。皮膚圧迫は様々な生体情報に影響を与えることが知られている。発汗もその1つであり。脚部や体幹部を局所的に圧迫することで圧迫部の発汗が抑制されることが報告されている (Frei et al., *J. Therm. Biol.*, 2019)。本研究では、この現象に着目し、計測時の皮膚圧迫により局所的な発汗を抑制し、当該誤差を低減することを検討する。

【アプローチ②】深部体温センサの周囲の発汗量が分かれば、図1で示した汗の蒸発熱を見積もることができ、当該計測誤差を低減できるのではないかと考え、発汗量を計測可能な発汗センサを追加で実装し、計測部周辺の発汗量を用いた計測誤差補正技術を検討する。

[研究の内容、成果]

1. 臨床実験用ウェアラブルセンサの試作

当該センサの想定測定部位（胸部、額部、手

首、上腕)での装着に伴う装着圧、発汗量、深部体温の計測誤差との関係を定量化するため、先行研究 (Hashimoto et al., *Sens. Actuators A Phys.*, 2024) で開発したウェアラブル深部体温センサ (図1) に、装着圧モニタ用に市販の感圧センサを追加実装したプロトタイプを試作した。

2. 装着圧範囲把握のための予備実験

臨床実験における、被験者、想定測定部位 (胸部、額部、手首、上腕) に応じた装着圧範囲把握のための予備実験を行う。具体的には、健康な被験者 10 名程度を対象に、研究Ⅰの試作機を装着し、バンドを締め装着圧を段階的に変化させた際における、被験者、測定部位ごとの装着圧の上限を決定した。研究Ⅲの臨床実験では、予備実験で得られた被験者、装着部位ごとの装着圧の上限を基準に、バンドの穴の位置をずらし装着圧を下げることで、装着圧の水準を、装着レベル 1: 密着性を保つ程度の加圧、装着レベル 2: 加圧レベル小、装着レベル 3: 加圧レベル中、装着レベル 4: 加圧レベル大 (装着圧の上限に相当) の 4 段階で装着圧を変化させることとした。また、予備実験結果を元に、全ての被験者の装着圧範囲に対応できるように、バンドの改良試作を実施した。



図1 プロトタイプ写真

3. 試作センサを用いた臨床実験

2 と同一の、健康な被験者 10 名を対象に、想定測定部位に試作機を装着し運動を行った際の発汗量への装着圧依存性や深部体温計測誤差との関係を調べた。具体的には、夏季シーズンを想定した、環境温度 32° C、相対湿度 50% の人工気象室内において、数分間のベースライン計測後、最大心拍数の 50% に相当する自転車運動を 15 分間×4 セット実施した。第 1 セットは、装着レベル 1 で運動を実施し (介入なしに相当)、第 2～4 セットは、ランダムに装着レベル 2～4 の装着圧を負荷し運動を行った。各被験者、各測定部位における各装着レベルにおける装着圧は研究Ⅱの予備実験により決定した。実験中の被験者の体調管理及び収集データの多角的分析のため、実験中は、プロトタイプによる計測に加え、市販機器による、被験者の直腸温度、食道温度、皮膚温度、心拍数、皮膚血流量の計測及び各セット終了時に自覚的運動強度 (RPE) を Borg Scale で収集した。なお、実験の頻度、条件としては、各被験者に対し、約 1 週間間隔で 2 回、測定部位及び圧迫部位をランダムに実施した。

図 2 に、異なる装着圧の場合における、局所

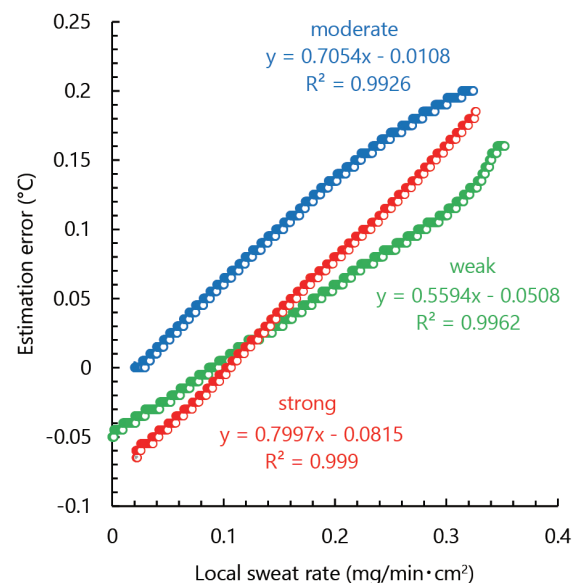


図2 異なる装着圧の場合における局所発汗量と深部体温計測誤差との関係の一例

発汗量深部体温計測誤差の関係を分析した結果の一例を示す。装着圧を弱 (0.83 ± 0.24 kPa), 中 (2.72 ± 0.62 kPa), 強 (7.55 ± 2.35 kPa) の場合に関して, 共通して, 局所発汗量と深部体温計測誤差に線形関係 ($R^2 > 0.99$) があることが確認され, 装着圧が増加すると, その傾きが増加する傾向にあることが確認された。

4. まとめ

本研究では, 深部体温の非侵襲計測法として注目されている手法の1つである熱流束法における実用上の課題の1つである発汗に伴う計測誤差の低減に向け, 測定部位周辺の発汗量と深部体温計測誤差との関係を実験的に調べた。

その結果, 今回の実験条件の範囲では, 局所

発汗量と深部体温計測誤差との間に線形関係が確認された。さらに, その傾きは, 装着圧と比例関係にあることが確認された。この結果は, 装着圧をモニタリングすることで, 発汗に伴う深部体温計測誤差を低減できる可能性を示すものである。

一方で, 本研究では被験者数が少なく, 環境条件や運動条件も限定的であるため, 一般化することには注意が必要であり, 今後, 多様な被験者や実験条件での調査が必要であると考えている。

[成果の発表, 論文など]

橋本優生, ウェアラブル深部体温計の実用化研究, 令和8年度電気学会全国大会, 仙台, 2026年3月.