

# ウェアラブル深部体温計の開発

時澤 健\*1, 土基博史\*2, 志牟田 亨\*2

本研究では、パッチ型で皮膚表面の熱流束データを用い、双熱流法の原理を応用して深部体温を推定し、侵襲的な測定による深部体温と比較すること目的とした。健康成人男性を対象に、室温 35℃（相対湿度 50%）において、5 km/h の歩行を 1 時間行った。食道温(Te)を侵襲測定としてモニターし、パッチ型センサを左鎖骨下 3cm に貼り付けた。パッチ内のデータ（2 点の熱流束、4 点の温度）から最適なアルゴリズムを決定し推定深部体温(Tp)を求めた。1 時間の運動により Te は 37.1±0.1℃(平均値±標準偏差)から 38.0±0.3℃まで、Tp は 37.3±0.2℃から 37.9±0.2℃まで上昇した。運動時 5 分毎にプロットした Te と Tp の誤差は 0.04±0.18℃であった。シンプルなウェアラブル機器として優れており、作業に支障のない形態での熱中症リスク管理システムに貢献する可能性がある。

**キーワード:** 暑熱環境, 深部体温, ウェアラブル

## 1. はじめに

近年のウェアラブル機器の発展により、労働現場でも生体情報のリアルタイムモニターによって熱中症を予知する取組みが現実味を帯びてきた。しかしながら、深部体温を測定可能なウェアラブル機器は実用化されておらず、新たな開発が必要とされている。そこで、双熱流法<sup>1)</sup>の原理を応用したパッチ型体温計の評価を行った。深部体温の侵襲測定として、食道温および直腸温を同時に計測し、実験室内で暑熱ばく露および作業負荷条件を設定し、パッチ型体温計の推定値と各指標との誤差および相関性を検証する。

## 2. 方法

### 1)対象

健康成人男性 14 名（年齢：37 ± 7 歳，身長：174.2 ± 5.8 cm，体重：69.1 ± 4.1 kg）を対象とした。

### 2)実験プロトコル

14 名の被験者のうち 7 名は作業服を、残り 7 名は防護服を着用した。被験者は実験室に入室後、室温 25℃，相対湿度 50%の環境で安静を 30 分間維持した。その後、センサー等の取り付けおよび着替えをし、さらに 30 分間座位安静を保った。本測定としてそのまま 15 分間安静状態を保ち、その後室温を室温を 35℃に上げた（相対湿度は 50%のまま）。15 分座位安静の後、トレッドミルでの歩行を 4~5km/h のスピードで 60 分間行った。終了後 15 分間は室温 35℃のまま座位

安静とし、引き続き室温 25℃に下げ 15 分間安静とした。

### 3)測定項目

深部体温の指標として、食道温および直腸温をそれぞれ熱電対およびサーミスタプローブを用いて測定した。パッチ型センサ（51mm×79mm，厚さ 10mm）を鎖骨下 3 cm に両面テープで貼り付けた。また皮膚温を胸部においてサーミスタプローブを用いて測定した。双熱流法を参考とし、パッチ型センサ内では皮膚側に 2 点およびそれぞれの点の上部にさらに 1 点サーミスタセンサを配置（計 4 点）して深部体温の推定値を求めた。実際の食道温の値と推定値との誤差を小さくするシミュレーションから最適な推定式を求めた。



図 1. パッチ型センサの測定部位

インフォームドコンセントは実験開始前に口頭および書面で実施した上で同意を得た。本研究は独立行政法人労働安全衛生総合研究所研究倫理委員会の承認を得た。

## 3. 結果

図 2 に作業服を着用して行ったグループの食道温，直腸温，そしてパッチ型センサによる深部体温の推定値の変化を示した。食道温は運動後から上昇を始め，運動終了時に 0.9℃まで上昇した。運動終了後から速やかに下降した。直

\*1 労働安全衛生総合研究所 人間工学研究グループ

\*2 棚村田製作所。

連絡先：〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所人間工学研究グループ 時澤健\*1

E-mail: tokizawa@h.jniosh.johas.go.jp

腸温はやや遅れて運動による上昇が起り、運動終了 10 分後に最高値となる 1.0℃の上昇を示した。推定値は食道温とほぼ同じ変化を示した。

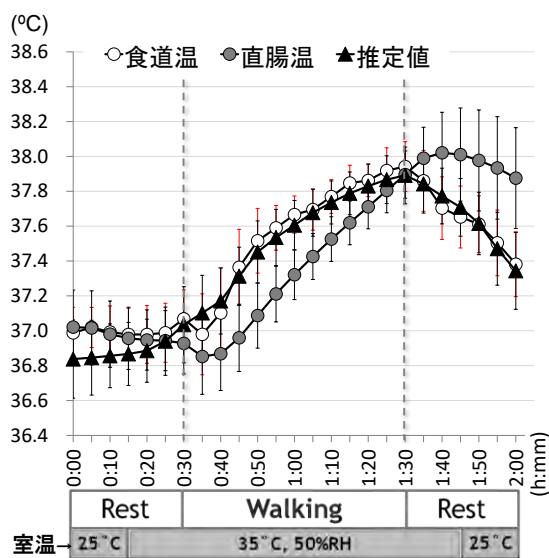


図2. 作業服着用時の食道温，直腸温およびパッチ型センサによる推定値の変化(平均値±標準偏差, n=7)。

図3に防護服を着用して行ったグループの食道温，直腸温，そしてパッチ型センサによる深部体温の推定値の変化を示した。食道温は運動により 1.2℃上昇した。直腸温は 1.0℃の上昇となり，作業服の場合とほぼ同じ変化であった。推定値は，運動中には食道温と直腸温の間の値となり，運動後には食道温に似た下降となった。

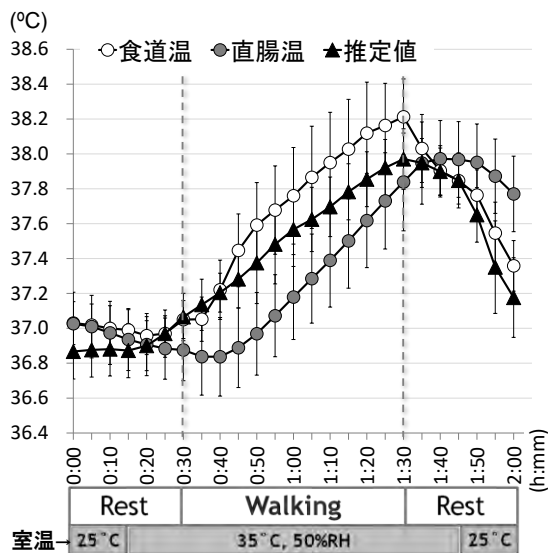


図3. 防護服着用時の食道温，直腸温およびパッチ型センサによる推定値の変化(平均値±標準偏差, n=7)。

図4に、侵襲測定値と推定値の誤差を示すため作業服着用時の食道温と推定値の Bland-Altman プロットを運動中 5 分毎の個々人のデータを使用して示した。37℃付近の誤差が大きく 38℃付近では誤差が小さくなる傾向にあるが，誤差の平均値は-0.02℃，標準偏差は 0.18℃であった。

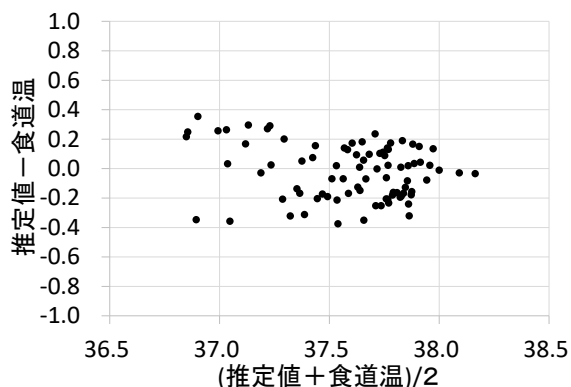


図4. 作業服着用時の食道温と推定値の Bland-Altman プロット. 運動中の 5 分毎のデータを使用。

図5に防護服着用時の食道温と推定値の Bland-Altman プロットを運動中 5 分毎の個々人のデータを使用して示した。37℃から 38℃にかけて誤差の程度は変わらず，誤差の平均値は-0.18℃，標準偏差は 0.26℃であった。

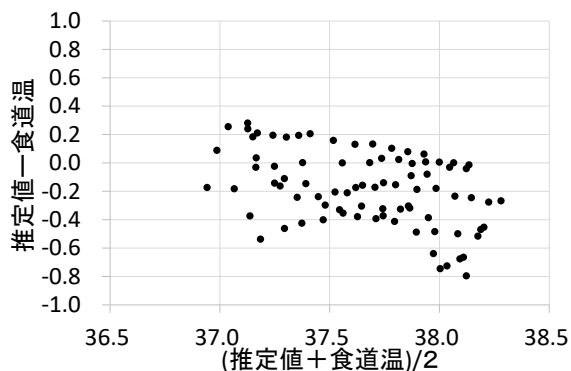


図5. 防護服着用時の食道温と推定値の Bland-Altman プロット. 運動中の 5 分毎のデータを使用。

#### 4. 考察

非侵襲的に深部体温を推定する手法としては，有線型で前額において熱流補償法の原理から推定する方法や<sup>2)</sup>，心拍数，皮膚温，活動量から推定する方法も近年改良が進んでいる<sup>3)</sup>。これらと比較して本研究による推定値の誤差はほぼ同等であったが，シンプルなウェアラブル機器として優れており，作業に支障のない形態での熱中症リスク管理システムに貢献する可能性がある。

防護服着用によって食道温と推定値の誤差が大きくなり，また高温の局面で推定値が過小評価される傾向にあった。しかしながら，深部体温の指標である食道温と直腸温との間の差が大きくなっており，深部体温の推定値としては両者の間をとるものとして評価できる。

本研究では環境温度を 35℃で実施したが，体温よりも環境温度が高くなる状況や，より低い環境温度でも

推定式が適用できるかどうか今後検討する必要がある。  
また体格、運動強度・形態などの影響も検討の余地がある。

ISO12894<sup>4)</sup> や米国労働衛生専門家会議(ACGIH)の許容限界値 (TLV)<sup>5)</sup> では暑熱下作業における深部体温を 38.0°C以下にすることを定めている。これまで深部体温を現場でモニターすることは容易ではなかったため、あまり注目されない数値ではあったが、ウェアラブルに正確な値を計測することが可能になれば、暑さ指数 (WBGT) と併せて熱中症リスク管理の要となすであろう。暑熱耐性には大きな個人差があることは良く知られており、暑さに強い人であっても日々の体調変化 (睡眠不足、疲労、軽い風邪など) によってリスクが高まる場合がある。また WBGT が「危険」となる状況においても作業を行わざるをえない場合もある。そのようなときに、作業をどのタイミングで中断し、休憩後にいつ作業を再開するかの目安として、ウェアラブル深部体温計は作業員および管理者にとって有効に機能すると考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) Kitamura et al. Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater. *Med. Eng. Physics*. 32:1-6, 2010.
- 2) Fox and Solman. A new technique for monitoring the deep body temperature in man from the intact skin surface. *J. Physiol*. 212:8-10, 1971.
- 3) Laxminarayan et al. Individualized estimation of human core body temperature using non-invasive measurements. *J. Appl. Physiol*. 124:1387-1402, 2018.
- 4) International Organization for Standardization (ISO) 12894. Ergonomics of the thermal environment - Medical supervision of individuals exposed to extreme hot or cold environments. ISO, Geneva, 2001.
- 5) The American Conference of Governmental and Industrial Hygienists (ACGIH): Heat stress and strain. In Documentation of the Threshold Limit Values for Physical Agents Documentation. ACGIH, Cincinnati, 2007.