

高精度で長時間計測可能なウェアラブル非侵襲深部体温計の開発

Development of a wearable deep body thermometer with high accuracy for long-term measurement

2041012



研究代表者

奈良先端科学技術大学院大学

特任助教

黄

銘

[研究の目的]

概日リズムは、最も重要なバイオリズムの一つであり、深部体温の変動と同期する。この概日リズムを簡単に計測できると、概日リズムに合わせた人に優しい照明や室温制御など人と機械とが調和した快適な生活環境を作ることが可能になる。また、体温計を装着する人の日常生活を妨げることなく深部体温を常に監視することが可能となる。そして高齢者に多発する熱中症の危険度の監視や、発症率が増加傾向にある低体温症の防止に重要な役割を果たすことができ、高齢者の見守りや人々の健康増進に大きく貢献できる。

しかし、従来の非侵襲型深部体温計は検温プローブにヒータを必要とし、装置も高消費電力、大型で重い構成となっているため、日常生活を妨げずに長時間に渡る連続計測は不可能であり、長時間皮膚に装着し測定すると低温やけどを与える恐れがある。したがって、主として、管理の行き届いた病院内において使われている。

本研究は、上述のように現在は病院で拘束された状態でしか計測できない深部体温計を改善し、日常生活を妨げずに長時間連続計測できることを目指し、ヒータレスで小型、軽量、低消費電力、長時間計測及びリアルタイム・フィードバック可能な非侵襲深部体温計の開発を目標とした。

[研究の内容、成果]

従来の加熱型深部体温計の計測原理は、熱流補償法を応用し、体表面からの熱の放散を見かけ上ゼロにするため、検温プローブにヒータを用い体表面と体深部を熱平衡状態にする。その状態で体表面温度を測ることにより、深部と同じ温度を計測できるというものである。しかし、従来方式ではすでに説明したように、高消費電力かつ大型になるという問題があった。そのため、本研究ではまずヒータが不要な双熱流法という原理に基づき、ウェアラブル化を可能にさせた。さらに、本開発の目標を達成するため、次に示す三つのプロセスにより、研究を進めた。

- (1) ヒータレスを採用しながらも測定精度を保つこと
- (2) 長時間データの保存やリアルタイム・フィードバックができる電子回路の開発
- (3) 開発した試作機に対する実験検証に分けた。

これら三つのプロセスに対して、以下のよう
な手順により取り組んだ。

1. ヒータレス深部体温計の開発・設計

高精度非侵襲深部体温計の設計は、体温計のプローブとプローブに接触する皮膚の内部における温度の分布、熱流の動向、熱量の状態など

細かい情報を把握することが必要となる。よって、まず体温計の3次元モデル(図1)を構築し、有限要素法を用いてシミュレーションを実施した。これにより、深部体温計の計測精度に影響がある要素を洗い出し素材および構造を決定した。

シミュレーション結果として、まず、水平方向に熱流があったことで、計測誤差が出るという状況(図2)を確認した。

さらに、プローブ寸法の影響を考察するため、シミュレーションでは、プローブ半径を11 mmから66 mmまで変更し、さらに高さは4.5 mmから29 mmまで変更した。以上のサイズの組み合わせで、水平の熱流の強さはプローブの直径や高さに影響され、直径が短いあるいは高さが高いほうが強いことが分かった(図4)。

しかし、寸法の最適化のみでは、一定の精度(例えば0.5℃)を保持するにはウェアラブル化に向かないが、大きな面積にするか、極薄の構造にする必要があった。

この問題を克服するため、寸法の最適化に加

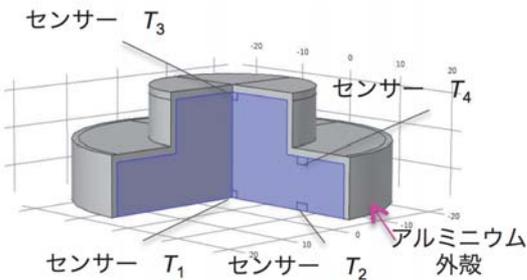


図1 深部体温計の3次元モデル

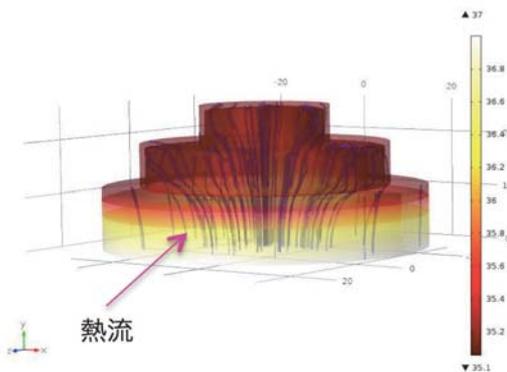


図2 深部体温計内部の熱流の状況

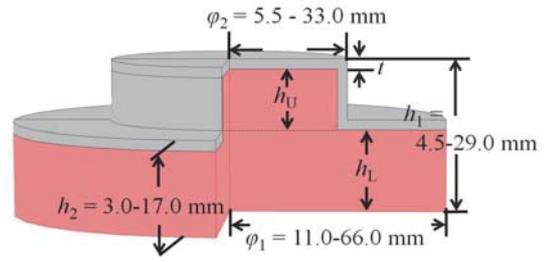


図3 深部体温計の本来の設計のモデル

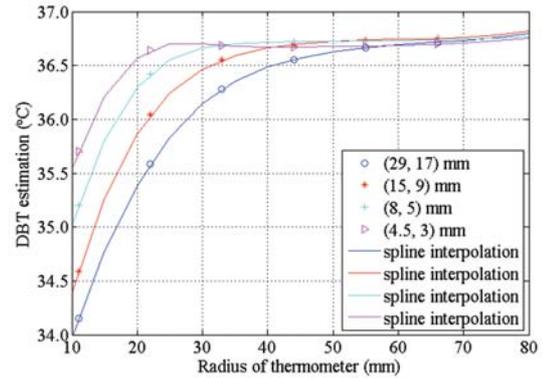


図4 本来の設計の計測精度

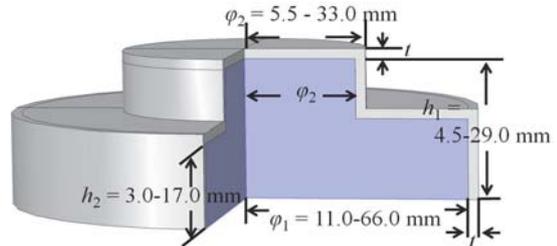


図5 深部体温計の改良設計のモデル

え、アルミニウム外殻を追加することにした(図1, 5)。1 mm厚のアルミニウム外殻を追加するだけで、精度を大幅にあげられることはシミュレーションの結果から分かった(図6)。

2. プローブの試作や計測回路の開発

シミュレーションの結果に従い、プローブの試作を実施した。ウェアラブル化を考慮したため、半径は22 mmにし、高さは15 mmの標準型と9 mmの薄型を試作した(図7)。内蔵する複数の温度センサは、小型低消費電力を考慮し、デジタルセンサ LM73 (11-14 bit; Texas Instruments, Dallas, TX)を使用した。プローブ本体はクロロプレン・ゴムで充し、外殻は

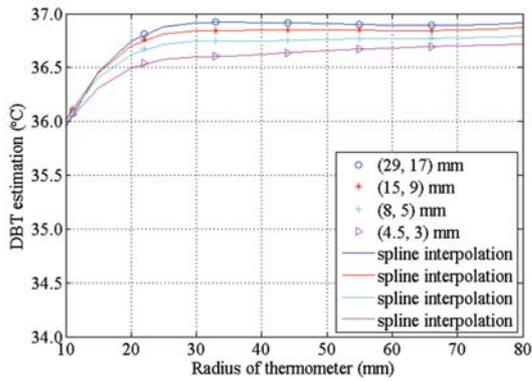


図6 改良設計の精度



図7 プローブ本体

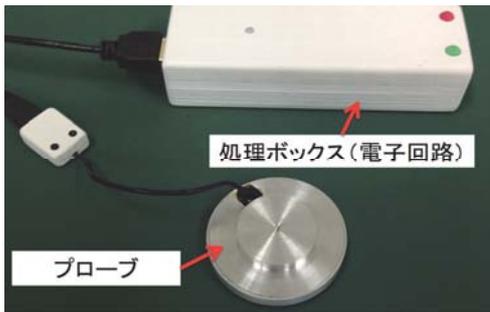


図8 ローカルシステム

アルミニウム合金 2017 を用いた。

一方、体温を連続的に図るため、相応しいボックス型の電子システムを開発した。低消費電力の MPU (ATmega164A, Atmel RISC Micro-controller; Amtel, San Jose, CA) を中心にして、計測の継続 (3日間可能) や計測データの保存 (8Mb Flash memory) ができる実装とした。また、保存した計測データは CSV フォーマットで PC に読み出すこともできるようにした。

3. 試作機の実験検証

試作機の機能を検証するため、模擬実験と実測実験を実施した。

模擬実験では、恒温室において機器の精度を確認した。図9のような基礎実験システムを構築した。試作機はゴム・シート (皮膚とみなす) の上に乗せ、計測値と恒温水槽の水温 (深部体温とみなす) を比較した。この実験は、アルミニウム外殻が付いている状態と、ついていない状態の両方で実施し、その結果、カバーが付いている状態の方が精度向上が図れることを確認した。

図10や11は、標準型や薄型の実験結果であり、Aはアルミニウム外殻があり、Nはなしと指す。室温は Comb1=20°C, Comb2=20°C および Comb3=30°C。

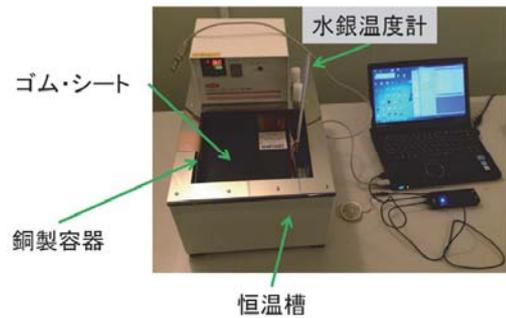


図9 基礎実験システム

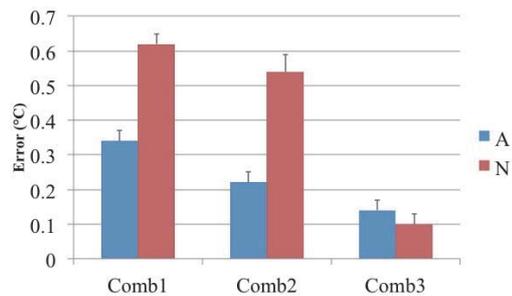


図10 標準型の実験結果

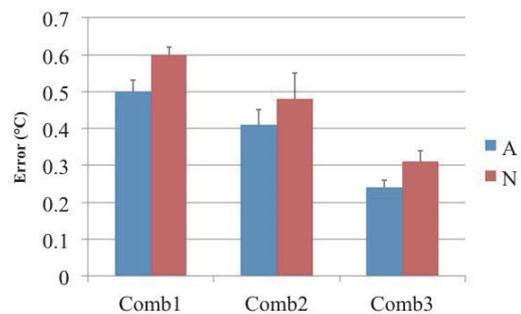


図11 薄型の実験結果



安静座位 運動状態
図 12 実測実験の風景

実測実験は、既存の医療用に使われている高精度の深部体温計であるテルモ社のコアテンプと比較を行った。実験は1人の被験者に対して55分間の深部体温を測定記録した。体温を変化させるため、15分の自転車エルゴメーターの運動負荷をかけた。

12人の実験結果によると、一旦初期応答が安定すると、標準型、薄型の両方において体温の変化に迅速に応答した。12名の学生の結果によって、薄型はコアテンプとの平均差が 0.06°C 、95% CI: $[-0.31, 0.20]^{\circ}\text{C}$ 、標準型は平均差が 0.04°C 、95% CI: $[-0.24, 0.17]^{\circ}\text{C}$ の精度を示した。

短時間の実測実験で精度を確認した後、終日(48時間、室内)の着用実験で、さらに日常生活における機器の性能を確認する実験も実施した。被験者数はまだ十分ではないが(3人計144時間)、これまでのところ、0.98の相関で、平均差 0.14°C となった。

[今後の研究方向, 課題]

本研究は、人間の深部体温の非侵襲的な計測方法の確立に、良好な結果をもたらした。改良した深部体温体温計はウェアラブルセンサにとって基本的な要素であり、低消費電力、非侵襲性、日常生活に耐えるなど、要求仕様を満たすことを示した。熱中症の予防、バイオリズムの算出における活用を期待する。

これらの成果をもとに、今後は以下の三つの方向に取り組む予定である。

まず、長時間着用のためシステムの改良及び小型化。特にセンサの取り付け方式の改良及び電子回路の小型化を進め、さらに、無線通信でローカル・システムをスマートデバイスに繋げるシステムを構築し、最後は、システムのエビデンスをさらに蓄積していく。24時間の実測実験を続けるが、さらに侵襲的な計測方法との比較も実施する予定である。

[成果の発表, 論文等]

1. 黄銘, 田村俊世, 陳文西, 金谷重彦: Evaluation of structural and thermophysical effects on the measurement accuracy of deep body thermometers based on dual-heat-flux method, *Journal of Thermal Biology*, 47巻, 26-31頁, 2015
2. 黄銘, 田村俊世, 唐尊一, 陳文西, 金谷重彦: Structural Optimization of a wearable deep body thermometer: From theoretical simulation to experimental verification, *Journal of Sensors*, 2015 (投稿した)
3. 黄銘, 田村俊世, 唐尊一, 陳文西, 吉田正樹, 金谷重彦: Dynamic Experimental Verification for a New Noninvasive Wearable Deep Body Thermometer based on In-vivo Comparison, 国際学会: uHealthcare2014, 2014