

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：37301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26750235

研究課題名(和文) 痩身者にやさしい電子体温計の開発

研究課題名(英文) Development of a Clinical Electrical Thermometer for Emaciated Body

研究代表者

水野 裕志 (Mizuno, Yuji)

長崎総合科学大学・工学部・講師

研究者番号：30591234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、痩身者に簡単に使用できる予測式電子体温計の研究開発を目的とする。測温部に軟質性ボールをもち腋窩にもフィットする構造を持ちながらも、短時間且つ高精度で体温測定ができることを目標とする。軟質性ボールは、熱伝導率が低く、熱容量も大きいいため飽和温度に到達する時間が長くなる。課題を解決するために、測温部の構造体を物理・数学的なモデル化を行い、飽和時の体温を短時間で予測するメカニズムを開発した。結果、予測誤差 0.15 ± 0.16 、予測時間 253.5 ± 12.5 秒であった。本研究成果は軟質性ボールによる粘膜下でのやさしい体温測定、管理を実現でき、さらに動物医療にも応用できることを示した。

研究成果の概要(英文)：An evolutionary clinical electrical thermometer that fixes a soft material ball over a tip of a temperature probe to fit an axilla of him/her have been developed. The soft material ball allows them to hold the temperature probe more easily with weak power without causing deviation in a position of it in the axilla. On the other hand, as the size of the thermometer becomes larger while the soft material ball makes its thermal conductivity and capacity worse, it is much harder to measure an accurate temperature in a short time. Therefore, a temperature prediction mechanism that makes it possible to mathematically calculate an axillary temperature has been proposed. Developed evolutionary clinical electrical thermometer has been verified by comparing the error between measured value and predicted value in the axillary of him/her. As a result, the prediction error is 0.15 ± 0.16 , and 253.5 ± 12.5 seconds is denoted the prediction time.

研究分野：生体情報計測システム

キーワード：電子体温計 測温部 軟質性ボール モデル化 予測メカニズム 人腋窩温 予測精度 予測時間

1. 研究開始当初の背景

電子体温計を用いた体温測定は人のバイタル指標の一つとして重要である。一般的に用いられている電子体温計は腋窩方式が多く、現在は JIS T 1140 で標準化された腋窩式電子体温計(体温計)が家庭や医療施設で親しまれている。しかし、体温計は先端が細く、特に高齢者や疾患等で細く痩せ細った痩身者の腋窩では密着性が悪いため測定中にズレが発生し、誤差が生じてしまう。

慣習として実施されている体温測定には、実測値以外に予測値を測定している。予測機能は腋窩温度が上昇するメカニズムから予測するものであり、腋窩部の熱は、体温計の先端にある感温部の位置により異なるため常に一定速度で上昇するとは限らない。腋窩状況の異なる環境下として、測定開始時の腋窩下の初期温度に大きな差がある場合では、温度上昇が異なるため、飽和温度に到達するまでの時間や上昇変化に大きな差がある。

予測精度に関するアーチファクトには、汗などの影響で体温計の固定が困難なこと、検温中の体温計を挟む強さの変化、測温部のあたる強さを嫌がっての挟みなおし、腋窩密閉状態の不完全、挿入角度や位置のばらつきなど、体温上昇中の不安定な状況で発生し、そのタイミングと影響の強さは千差万別であることから、十分には排除できないことに留意しなければならない。

体温計の欠点はいくつか挙げられ、使用する場合は正確な測定方法の実施が必要であるとされている。予測精度のアーチファクトの問題を解決するような形状の体温計は未だ開発されていないのが現状である。高齢者がさらに増加し、看護業務における体温測定は支障をきたすばかりであると推察される。また、健常成人の心理的諸要因による自身の体重減少や体型のスリム化の瘦身願望による瘦身者が増加傾向にある。

以上のように、標準化されている腋窩式電子体温計の課題を解決できる幅広い年齢層に向けた新たな体温計の開発が急務であると考えられ研究に着手することとした。研究代表者は、瘦身者向けの体温計に関する特許を取得し、体温測定デバイスに関する基礎技術を有している。

2. 研究の目的

課題解決のために体温計の先端に軟質素材のボールを取付けることで、測温部の挿入角度やズレなどを意識せず腋窩にやさしくフィットできる電子体温計を開発する。本研究は、軟質性ボールを測温部にもつ電子体温計(軟質ボール付き体温計)の有効性について検証することを目的とする。

本研究の目的を以下に示す。

- (1) 3種の軟質性ボールを採用し、軟質ボール付き体温計を試作する。試作した測温部の構造から短時間で飽和温度を予測するための数値演算方法を測温部モデルから導出する。

- (2) モデルから腋窩温を短時間且つ高精度で予測できるメカニズムを開発し、接触抵抗の無い理想的な腋窩環境において、軟質ボール付き体温計が示す熱過渡特性に予測手法を適応させ、予測精度を評価する。
- (3) 人の腋窩温の実測値と予測演算値の誤差から軟質性ボール付き体温計の有効性について検証する。

3. 研究の方法

(1) 軟質ボール付き体温計と測温部モデル

図1は、3種の軟質ボールを採用し試作した軟質ボール付き体温計の写真である。写真内左から、市販されている電子体温計を参考に同形状に加工した体温計(一般体温計)、一般体温計にスポンジボールを取付けた体温計(スポンジ体温計)、同様にシリコンボールを取付けた体温計(シリコン体温計)、ゲルボールを取付けた体温計(ゲル体温計)である。3種とも直径30mmに球状加工している。形状は20代健常成人を対象に、直径20mm, 25mm, 30mmの中で最も腋窩にフィットする大きさについてヒアリング調査した結果から決定した。

軟質ボール付き体温計の構造については、感温素子であるサーミスタを、キャップ状に加工したステンレス内にエポキシを用いて固定し、円筒状の穴を形成した軟質ボールに液状化シリコンで固着している。スポンジ体温計については、衛生面を考慮し、汗(水分)や汚れを防ぐため、表面をシリコンでコーティングしている。測温部と本体のハウジングの形状は、一般体温計の形状と同等に加工している。試作した一般体温計は、先行研究で提案してきた温度校正の手法により、 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ の精度を達成している。また、30秒以内の応答特性であることから電子体温計の標準規格である JIS T 1140 に準拠した性能である。

熱伝導率の低い3種の軟質ボールでは、サーミスタに伝わるまでの熱伝達時間が長くなり、短時間の温度予測が必要となる。そこで、測温部を構成する各素材の熱抵抗 R と熱容量 C から RC ラダー回路でモデル化し、腋



図1 軟質ボール付き電子体温計

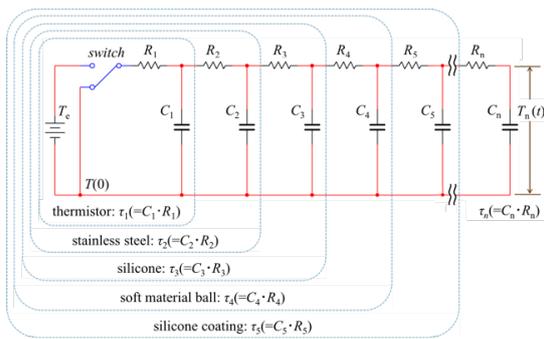


図2 測温部のモデル化

窩温がサーミスタに伝わるまでの温度変化を熱伝導方程式として解くことで予測演算式を導出する。

図2は、試作した軟質ボール付き体温計の測温部の構造を電気回路的手法でモデル化した回路図である。回路内の $C_i \cdot R_i$ はそれぞれサーミスタとエポキシを合わせた熱容量と熱抵抗を示しており、熱時定 $\tau_1 (= C_1 \cdot R_1)$ で表すことができる。同様に、ステンレスの熱時定数は $\tau_2 (= C_2 \cdot R_2)$ 、液状化シリコンの熱時定数は $\tau_3 (= C_3 \cdot R_3)$ 、軟質ボールの熱時定数は $\tau_4 (= C_4 \cdot R_4)$ 、コーティング用シリコンの熱時定数は $\tau_5 (= C_5 \cdot R_5)$ となる。モデルより4層から構成されるシリコン体温計とゲル体温計は4次でモデル化でき、5層で構成されるスポンジ体温計のモデルは5次で表すことができる。

図2の $T_n(t)$ (°C) はサーミスタに伝わる温度、 T_0 (°C) は腋窩温、 $T(0)$ (°C) は初期温度で腋窩と測温部が接触するまでの温度で通常は外気温を意味する。スイッチが $T(0)$ (°C) から T_0 (°C) に切り替わると、腋窩と測温部が接触して測定が開始したとする。サーミスタにより感温される腋窩温 T_0 (°C) を熱伝導方程式として解くと、 $T_n(t)$ (°C) は式(1)で表すことができる。ここで、 n は測温部を構成する素材の数である。

測温部モデルを検証するために、貯留型標準恒温槽“FLUKE社製7102、均一度 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ ” (恒温槽) を用いて測温部と腋窩間の接触抵抗の無い理想的な腋窩環境を模擬し、サーミスタが感温する熱過渡特性とモデルを比較する。方法は、恒温槽内の蒸留水温度を 35.0°C から 42.0°C 、 1.0°C 毎一定に設定し、恒温槽外で初期温度を測定後、軟質ボール付き体温計を浸漬させ、設定し、設定した温度に到達するまでの温度変化を1800秒間測定する。

(2) 腋窩温予測メカニズムと精度評価

図3は開発した予測メカニズムの説明図である。グラフ内の実線は、軟質ボール付き体温計で測定される温度変化を表す。腋窩温の予測方法は、サーミスタがある温度 $T_n(t=t_a)$ (°C) を感温した場合、例えば、 $a=32^\circ\text{C}$ 等に到達した時に腋窩温を予測する演算方法である。ここで、 t_a は T_n に到達した時間を

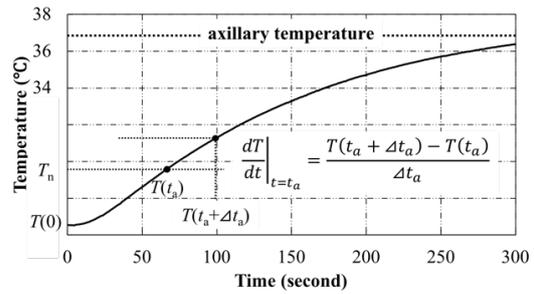


図3 予測メカニズム

表す。演算方法は、測温部モデルから導出できる熱伝導方程式(モデル式)を時間 t で微分し、初期温度 $T(0)$ (°C) を消去して表す演算式で腋窩温 T_0 (°C) が計算できる。 $T_n(t=t_a)$ (°C) に到達する時間、その時の微係数、そして、測温部を構成する素材の熱時定数が解れば予測演算できる。軟質ボール付き体温計は高次のモデルで表すことができるが、応答が緩やかなため、腋窩への測温部の接触を判別するのは難しい。このため、 T_0 (°C) の予測はできるだけ遅い時間に行ったほうが、精度向上が見込まれると考える。

軟質ボール付き体温計が示す熱過渡特性に腋窩温予測のメカニズムを用いて予測精度を評価し、最適な軟質ボールを検討する。方法は、恒温槽を用いた実測データとモデル式で解いた予測値を比較し、予測誤差と時間を評価する。予測条件は、一般体温計の測温範囲の下限値を参考に $T_n(t=t_a)$ (°C) ($a=32$) とする。

(3) 腋窩温の予測精度

軟質ボール付き体温計の有効性を検証するために、市販されている電子体温計の予測精度と比較する。

方法は、軟質ボール付き体温計および3社の実測と予測機能を有する電子体温計を用いて実測値と予測値を測定する。測定結果から予測誤差を算出し、予測精度について3社の体温計との差異を検証する。3社の体温計を用いた場合、実測が10分程度、予測が15秒程度の測定時間となる。軟質ボール付き体温計は腋窩温が安定するまでを実測時間とする。

予測条件は予測時間の改善を図る目的で、 $T_n(t=t_a)$ (°C) ($a=30, 31, 32$) の場合の精度を検証する。測定条件として、対象者には全ての体温計に対して日常で使用している通り腋窩へ挿入し、安静座位で測定するように指示する。対象者は健康成人男性4名と女性3名の合計7名とし、平均年齢 \pm 標準偏差(歳)(範囲)は 20.9 ± 1.4 歳(19~22歳)であり、7名中男性1名と女性3名が $\text{BMI} > 18.5 \text{kg/m}^2$ である。

ここで、瘦身は一般論として言うとは体格の判断基準として体重(kg)から身長(m)²を除いて算出されるBMI (Body Mass Index) 指標で判

断される。本論においても、WHO (World Health Organization) や日本肥満学会で基準とされている BMI $18.5\text{kg}/\text{m}^2$ を瘦身の定義とする。

4. 研究成果

(1) 軟質ボール付き体温計と測温部モデル

図4は、3種の軟質ボール付き体温計で測定された実測データ(黒色)とモデル式を、最小二乗法を用いて実測値にフィッティング(桃色)した結果である。一例ではあるが、実測データは恒温槽内の蒸留水温度を 36.0°C に設定した場合の結果を示した。初期温度は、平均初期温度 $\pm\text{SD} (^{\circ}\text{C})=26.5\pm 0.12^{\circ}\text{C}$ であった。グラフ内の①はスポンジ体温計、②はシリコン体温計、③はゲル体温計での検証結果である。結果より、測温部モデルは実測データをたいへん良く再現しており、スポンジ体温計の応答性が最良であることがわかる。3種の軟質ボール付き体温計では、飽和温度に到達するまでに約800秒間以上の測定時間を要するため、モデルを用いて数値演算的に腋窩温を演算し、短時間で測定できるメカニズムが必要であることがわかる。

(2) 腋窩温予測メカニズムと精度評価

図5と図6は、恒温槽内の蒸留水温度を 35.0°C から 42.0°C 、 1.0°C 毎に設定した場合の予測誤差と時間の評価結果である。初期温度は平均初期温度 $\pm\text{SD} (^{\circ}\text{C})=24.31\pm 1.15^{\circ}\text{C}$ であった。3種の軟質ボール付き体温計の予測誤差は、接触抵抗もない理想的な腋窩環境において、JIS規格で標準とされている予測誤差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内を達成した。

予測時間については、スポンジ体温計は平均予測時間 $\pm\text{SD}(\text{秒})=131\pm 33.0$ 秒、シリコン体温計は平均予測時間 $\pm\text{SD}(\text{秒})=230\pm 38.6$ 秒、ゲル体温計は平均予測時間 $\pm\text{SD}(\text{秒})=376\pm 67.4$ 秒で飽和温度が高くなるほど短時間で予測可能であるが、市販されている体温計と比較するとさらなる短縮化が必要である。

表1は、望ましい病室環境とされている冬季 21.0°C と夏季 26.0°C の室温を初期温度とした場合の予測精度の評価である。恒温槽内の飽和温度を日本人の平常体温に近い 37.0°C に調節した場合の結果である。評価結果として、シリコン体温計が最も予測誤差が少なく、ゲル体温計同様に構造も簡単では

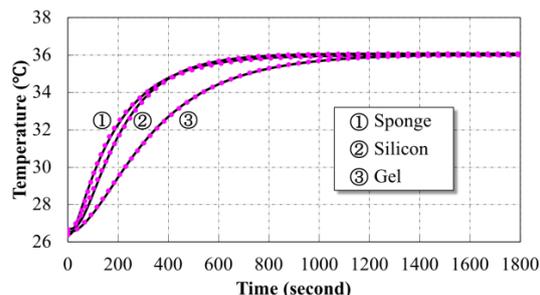


図4 実測とモデルの比較

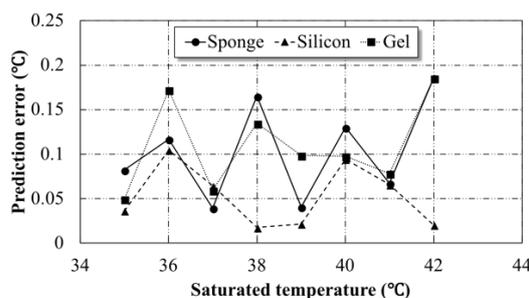


図5 予測誤差

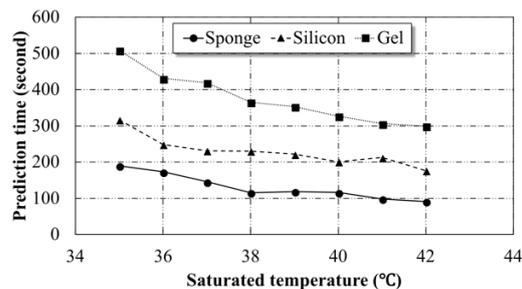


図6 予測時間

表1 病院を模擬した予測精度

Material	Sponge	Silicone	Gel
Initial temperature ($^{\circ}\text{C}$)	21.0/26.0		
Prediction error ($^{\circ}\text{C}$)	within ± 0.2		
Prediction time (second)	199 /152	251 /192	406 /296
Structure (parts)	5	4	4

あるが、予測時間に欠点がある。スポンジ体温計は他の2種と比較しても構造は複雑であるが、最も短時間で高精度予測を実現していることから、測温部に取付ける軟質ボールの素材はスポンジボールが最適であると考えられる。

次節の腋窩温の予測精度の検証結果においては、スポンジ体温計に限定し、人の腋窩温の実測値と予測演算値の誤差から軟質ボール付き体温計の有効性について述べる。

(3) 腋窩温の予測精度

表2は、C社、O社、T社それぞれの体温計の予測精度の検証結果である。実測値と予測値から算出した平均予測誤差 \pm 標準偏差($^{\circ}\text{C}$)と予測時間(秒)をまとめた。

表3は、スポンジ体温計の予測精度の検証結果である。予測演算は、腋窩温が 30°C 、 31°C 、 32°C に到達した場合のそれぞれの予測誤差を算出しまとめた。検証結果より、スポンジ体温計の予測誤差は、 $T_n(t=t_a)$ が 31°C の場合で、JIS規格で標準とされている予測誤差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内を達成していることがわかる。3社の体温計と比較してもバラツキも少なく

高精度な結果を得た。一方、予測時間については、平均初期温度±標準偏差(°C) = 22.82±0.96°Cの低温度の環境条件から31°Cに到達するまでに平均予測時間±標準偏差(秒) = 253.4±12.4秒必要であった。

結果として、予測時間に課題は残ったが、BMI>18.5kg/m²である痩身な対象者では、±0.1°C以内の予測精度を達成できていることを確認した。また、対象者へのスポンジ体温計の挿入感や測定中のズレについて違和感や腋窩での挟む強さの変化を与えることなく検温を提供できることも確認できた。

表2 市販体温計の予測精度

Material	Mean prediction error ± SD(°C)	Prediction time(second)
C	0.20 ± 0.16	15
O	0.30 ± 0.19	
T	0.20 ± 0.11	

表3 軟質ボール付き体温計の予測精度

T _n (t = t _a) (°C)	Mean prediction error ± SD (°C)	Mean prediction time ± SD (second)
30	0.27 ± 0.12	213.6 ± 13.2
31	0.15 ± 0.16	253.4 ± 12.5
32	0.45 ± 0.27	300.3 ± 13.8

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 水野裕志, 山本弘夢, 田中義人, “軟質ボールを測温部にもつ電子体温計を用いた腋窩温予測,” 日本福祉工学会誌(2018)[掲載決定]
- ② Yuji Mizuno, Kazuhide Okada and Masafumi Matsumura, “Optimum Conditions of Temperature Prediction Mechanism by Thermal Behavior Model Using Electric Circuit,” Transaction on Pacific Area Longevity Medical Society (PALMS), No. 9, pp. 19-26, June 2017.
- ③ Yuji Mizuno, and Masafumi Matsumura, “An Axillary Temperature Prediction Using a Temperature Probe with an Elastic Sponge,” Transaction on Pacific Area Long-life Medical Society (PALMS), No. 1, pp. 61-65, September 2016.
- ④ Yuji Mizuno, Tomonari Kawamoto, Kazuhide Okada and Masafumi Matsumura, “Development of a New Prediction Type Clinical Electrical Thermometer for Neck Surface Temperature,” Transaction on Pacific Area Long-life Medical Society (PALMS), No. 3, pp. 64-69, November 2016.
- ⑤ 水野裕志, 山口拓哉, 田中義人, “体温計測回路の一設計と検証,” 電気学会論文誌C, Vol.136 No.7 pp.1007-1008 DOI: 10.1541/ieejieiss.136.1007 (2016)
- ⑥ 水野裕志, 宮原優介, 松村雅史, “ネックバンド型体温計測デバイスの有効性の検証,” 電気学会論文誌C, Vol.136, No.7, pp. 1009-1010, DOI: 10.1541/ieejieiss.136.1009 (2016)
- ⑦ 水野裕志, 後田堯嗣, 松村雅史, 谷山紘太郎, “ネックバンド型電子体温計の開発,” 電気学会論文誌C, Vol. 135, No. 5, pp. 481-487, DOI:10.1541/ieejieiss.135.481 (2015)

[学会発表] (計11件)

- ① 山本弘夢, 水野裕志, “痩身者にやさしい体温計測温部の有効性比較,” 日本福祉工学会第2回九州支部大会2017, 2017年11月18日(土), ポスターセッション, 北九州国際会議場
- ② 水野裕志, 軟質性ボール付き体温計測温部による温度予測の精度評価, 平成29年第5回看護理工学会学術集会, 2017年10月14日(土), 一般演題(口演形式), 金沢大学
- ③ 水野裕志, 痩身者にやさしい電子体温計, 平成29年第5回看護理工学会学術集会, 2017年10月15日(日), 看護アイデア用品(用品展示形式), 金沢大学
- ④ 山本弘夢, 水野裕志, 軟質性ボールを用いた体温計測温部の提案, 平成29年第25回電子情報通信学会九州支部(学生講演会), D-29, 2017年9月26日(水), 一般演題 セッションD-VI, 琉球大学
- ⑤ 田浦和哉, 水野裕志, 電気回路技術を用いた熱挙動モデルによる温度予測方法の提案と評価, 電子情報通信学会, 信学技報, vol. 116, No. 429, EE2016-63, pp. 81-84, 2017年1月26日(木), 長崎大学
- ⑥ 川本智也, 藤田惇平, 水野裕志, 災害における低体温症予防システムの検討, 平成28年第24回電子情報通信学会九州支部(学生講演会), D-26, 2016年9月28日(水), 一般演題 セッションD-VI, 宮崎大学
- ⑦ 水野裕志, スポンジ付き体温計測温部を用いた腋窩温予測, 平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会, MC3-3, 2016年9月1日(木), 大会委員会企画セッション(大会委員会企画セッション) 生体計測情報とその応用, 神戸大学
- ⑧ 山口拓哉, 水野裕志, 田中義人, 体温計測回路の一設計と検証, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会, PS5-3, 2015年8月26日(水), ポスターセッション(生体医工学・福祉工学), 長崎大学

- ⑨ 宮原優介, 水野裕志, 松村雅史, ネットワーク型体温計測デバイスによる運動時の無拘束モニタリング, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会, PS5-6, 2015 年 8 月 26 日(水), ポスターセッション(生体医工学・福祉工学), 長崎大学
- ⑩ 水野裕志, 松尾圭右, 矢ヶ部嘉毅, 体温計測温部のモデル化による予測アルゴリズムの検証, 平成 26 年第 67 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 02-1P-03, 2014 年 9 月 18 日(木), 一般講演(生体工学), 鹿児島大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- ① 水野裕志 “コロンブスの卵！！検温がやめられない！おもしろおかしい体温計の開発,” 九州地域技術シーズ集, 経済産業省, 九州経済産業局, pp. 32, (2018)
- ② 長崎総合科学大学 工学部工学科医療工学コース 水野研究室
<http://www.med.nias.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 裕志 (Mizuno Yuji)
長崎総合科学大学・工学部・講師
研究者番号：30591234