

令和元年5月29日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20098

研究課題名（和文）温度標準を内蔵した自動較正式電子体温計の開発

研究課題名（英文）Development of a novel standard-contained thermometer using low-melting point metal

研究代表者

田中 志信（Tanaka, Shinobu）

金沢大学・フロンティア工学系・教授

研究者番号：40242218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により以下の成果が得られた、即ち 汎用サーミスタの表面に金属ガリウムをコーティングすることでGa融点付近で温度平坦部が得られ、サーミスタの経年劣化を自動校正する方法に適用可能であること、上記構造の温度センサを具現化する方法を考案した、温度平坦部の計測精度向上のための方法を考案した、金属ガリウムのマイクロカプセル化に成功し、マイクロカプセル化Gaを用いても温度平坦部を高精度で計測可能であることを確認した。これらの知見により、当初目標であった「自動校正機能付きサーミスタ式体温計プロトタイプ試作」の設計指針が明確になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により汎用サーミスタ表面に金属ガリウムを被覆することでGa融点付近において温度平坦部が観察され、そのときの抵抗値からサーミスタの経年劣化を自動校正可能なサーミスタ式体温計を具現化可能であることが示された。また当該構造を持つ温度センサ作成方法を新規考案すると共に、平坦部の温度計測精度を向上する改良策を明確にした。これらの知見により、体温計測するたびに自動的にキャリブレーションを行い、サーミスタの経年劣化の影響を補償可能な新規サーミスタ式体温計の設計指針が明確になった。さらにこれが実用化されれば、医療分野以外にもさまざまな工業分野や農業、酪農など応用範囲の拡大が期待できる。

研究成果の概要（英文）：From this research, the following results were obtained. (1)The method for fabricating a pure gallium (Ga) coated thermistor was newly developed, (2) using this sensor for the body temperature measurement, a plateau at the melting point of Ga was clearly observed, and the availability of using this plateau region for "self-calibration" of the thermometer was confirmed, (3) the method for improving accuracy of the temperature measurement of the Ga melting point was investigated, (4) succeeded in fabricating the micro-encapsulated Ga (MC-Ga) coated thermistor sensor, and also (5) succeeded in obtaining the plateau region using the MC-Ga coated thermistor. These results clearly indicated the possibility of realizing "a standard-contained thermometer" which would be a quite useful means not only in medical field, but also in industry, agriculture, and so on.

研究分野：生体医工学

キーワード：電子体温計 サーミスタ 自動校正 低融点金属 金属ガリウム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

バイタルサインとしての体温計測の重要性は言を俟たない。事実、2007年矢野経済研究所の調べではセルフケア健康機器の所有率は体温計が90.8%と第1位で、第2位の体重計(42.2%)を大きく引き離している。特に近年では「水銀汚染防止法」の採択(2015年)により「水銀体温計」は激減し「電子体温計」への代替が広がっている。

市販電子体温計には赤外センサで鼓膜温度を非接触計測する「耳用赤外線体温計」と、サーミスタを用いて腋窩温や口腔温などを直接計測する「電子体温計」があり、その最大許容誤差はJISにより次のように規定されている。前者は35.5~42.0の範囲で±0.2、それ以外では±0.3であるのに対して、後者の「一般用」では30~43の範囲で±0.1、基礎体温計測用の「婦人用」に至っては35~38の範囲で±0.05(±50mK)という高精度が要求されている。

このような厳しい規格に則ったサーミスタ式体温計が流通しているわけだが、一方においてサーミスタ抵抗値に経年変化があることは工業計測の分野では周知の事実であり、定期的な再校正は常識となっている。しかし電子体温計のJIS規格では販売後の検査方法などは規定しているものの定期的な点検・再校正は義務付けておらず、販売後数年を経た製品の測定精度が担保されているとは言い難い。

2. 研究の目的

上記背景を受け、本研究では「サーミスタ抵抗値の経年変化」の問題を解決すべく、定期的な再校正を一切必要としない「自動校正機能付きサーミスタ式電子体温計」を具現化する。このような自動校正機能付きのサーミスタ温度計が実現できれば、医療分野における電子体温計だけでなく、一般工業計測における様々な温度計測分野への波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

金属ガリウム(Ga)の融点が29.7646°Cであることに着目した。この融点が高純度Gaでは非常に安定しており、かつ通常の体温計測の際には必ず通過する温度で、その融解熱は約80(J/g)と比較的大きい。ということは、サーミスタチップ表面に適量のGaを担持・包埋出来れば、室温で固体であったGaは体温計測開始と共に温度上昇し、融点に至った時点で相転移が始まる。相転移中は外部からの熱量は融解熱として奪われるため、サーミスタの指示温度は29.7646°Cで一定となり(図1参照)相転移終了後再度温度上昇し最終的に体温と平衡する。従って体温計測中にこの「温度平坦部」を検出すれば、その時の温度は常に「29.7646°C」であり、仮にサーミスタの抵抗値に経年変化があってもこの平坦部の情報を使う事で校正が可能となる。

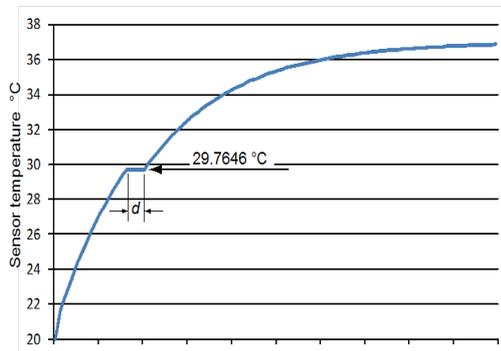


図1 ガリウム封入サーミスタの温度変化概念図

4. 研究成果

(1) 平坦部持続時間の試算: Ga担持サーミスタの試作に先立ち、Ga重量と平坦部持続時間との関係を試算した。図2のような断面構造を仮定し、表1に示す各パラメータを設定すると、平坦部の持続時間: dは赤枠内の式により求められる(Gaの潜熱を80J/gに設定)

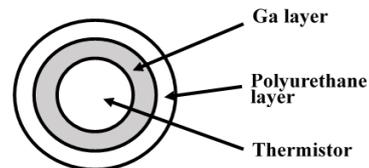


図2 ガリウム封入サーミスタ断面模式図

$$F = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} = \frac{kA\lambda t}{L}$$

$$Q = \int_0^d F dt = \frac{kA\lambda d^2}{2L}$$

$$\frac{kA\lambda d^2}{2L} = 80m$$

$$d = \left(\frac{160mL}{kA\lambda} \right)^{0.5}$$

表1 設定パラメータ一覧

F: heat flow	J/s
k: thermal conductivity	W/m·K
A: area	m ²
T1: sensor temperature	°C
T2: medium temperature	°C
T: time	s
L: Shell thickness	m
Q: heat gain	J
λ: rate of T2 rise	K/s
d: duration of plateau	s
m: mass of Ga	g

ここでセンサ部直径を2mm、長さを1mmと仮定すると断面積: A = 6.3 × 10⁻⁶mm²となる。またGa質量: m = 5mg、ポリウレタン層の厚み: L と熱伝導率: k をそれぞれ0.1mm、0.5W/m·K、センサ周囲媒質(生体組織)の温度: T2の上昇

率： $\dot{T} = 0.1\text{K/s}$ とすると、 $d = 16.3\text{sec}$ となり極めて少量のGaで10秒以上の平坦部が得られるものと推定された。

(2) Ga封入サーミスタの試作：液体Gaは大部分の金属を脆化させるうえに濡れ性が非常に高く、皮膚に強固に付着し取り扱いにくいという問題がある。そこで液体Gaをサーミスタ(NXFT15XH103FA2B050、(株)村田製作所)のガラスビーズヘッド部にディップ法を用いて付着させた後に冷却スプレーにより固化することで約15mgのGaがコーティングできた。さらに二液性ポリウレタンによりGa表面に保護層を作ることで皮膚に接触可能なGa封入サーミスタが具現化できた。試作したサーミスタの概観を図3左に、センサヘッド断面図を図3右にそれぞれ示した。断面図からサーミスタの周りのGa層がポリウレタンの層で封入されていることが確認できる。

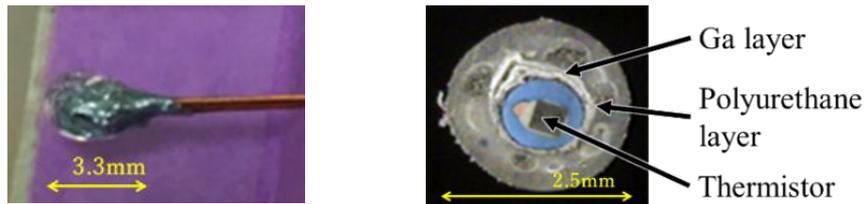


図3 試作Gaコーティングサーミスタ概観(左)とセンサチップ断面写真(右)

(3)平坦部確認実験：試作したGa封入サーミスタを冷蔵庫で冷却しGaを固化。計測直前に冷蔵庫から取り出し、Ga封入サーミスタヘッドを肘関節内側または腋窩部に挟み、その時の抵抗値変化をデジタルマルチメータ(DM7560、横河計測(株))により1秒間隔で計測し、所定の換算式により温度換算した。結果の一例を図4に示す。この結果からGaの相転移に起因する温度平坦部が約15秒間観察され、相転移による出力の平坦部分の検出が可能であることが確認された。しかし平坦部温度はGa融点の29.76より高めに計測され、かつ若干の傾き(以下、ドリフト)が観察された。そこでこの問題点を解決すべく以下の改良を行った。

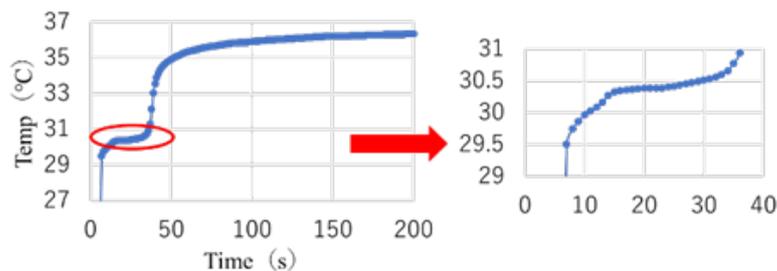


図4 試作Gaコーティングサーミスタの体温計測結果(左)と平坦部拡大図(右)

(4)温度平坦部の計測精度向上：上述したように温度平坦部に測定誤差とドリフトが見られ、校正の基準とするにはより正確で明瞭な温度平坦部の検出が必要となった。ドリフトの原因としてはサーミスタリード線部からの熱の流入が考えられた(図5)。すなわち温度測定過程においてGaが融点29.76で相転移する間、リード線は体温(約37)により温度上昇する。この時に生じる温度差によってリード線部からサーミスタチップへ熱が流入するため、平坦部の温度が高めに計測され、かつドリフトが生ずる可能性がある。

そこで実際にリード線を介した熱移動がどれだけ温度検出に影響を与えるか検討した。精密恒温水槽(BH401、ヤマト科学(株))と白金抵抗温度計(CENTER376、(株)佐藤商事)を用いて水槽内の水温を 29.76 ± 0.01 に調節した。サーミスタヘッドを水面から5mm、10mm、15mm、20mm、25mmと浸漬する深さを深くしていったところ、図6に示す様に15mmまでは抵抗値が徐々に低下したが、それ以上浸漬することでサーミスタの抵抗値はほぼ一定となった。従ってこの現象を勘案したセンサ構造とすることで温度計測精度の向上が可能と考えられた。

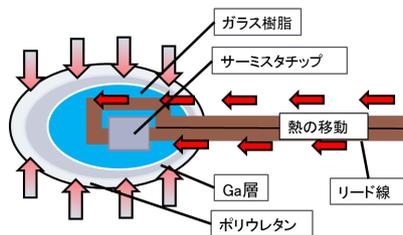


図5 リード線の熱伝導予想図

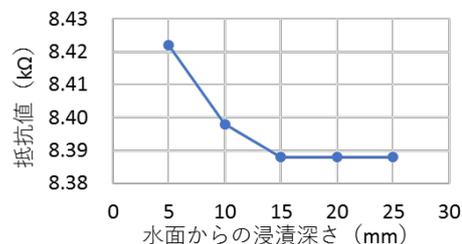


図6 ヘッド浸漬深さと抵抗値

(5)改良型 Ga 被覆サーミスタの作製：上述の結果を踏まえ、平坦部の温度計測精度向上及びドリフト低減を目指し次のような改良型センサを作成した。即ち、これまではサーミスタヘッド部のみを Ga コートしていたのに対して、改良型ではヘッド部だけでなくヘッドに繋がるリード線部分も含めて全長約 15mm を Ga コートした(図 7)。図 8 はこのセンサを用いて腋窩温計測した結果の 1 例で、改良前(上段)に比べて改良後(下段)では温度平坦部検出の精度が大幅に向上し、この平坦部分の情報を用いれば自動校正機能を有する高精度のサーミスタ式体温計が具現化可能との見込みが得られた。

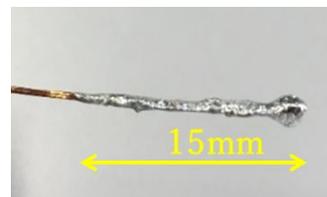


図 7 改良型センサ概観

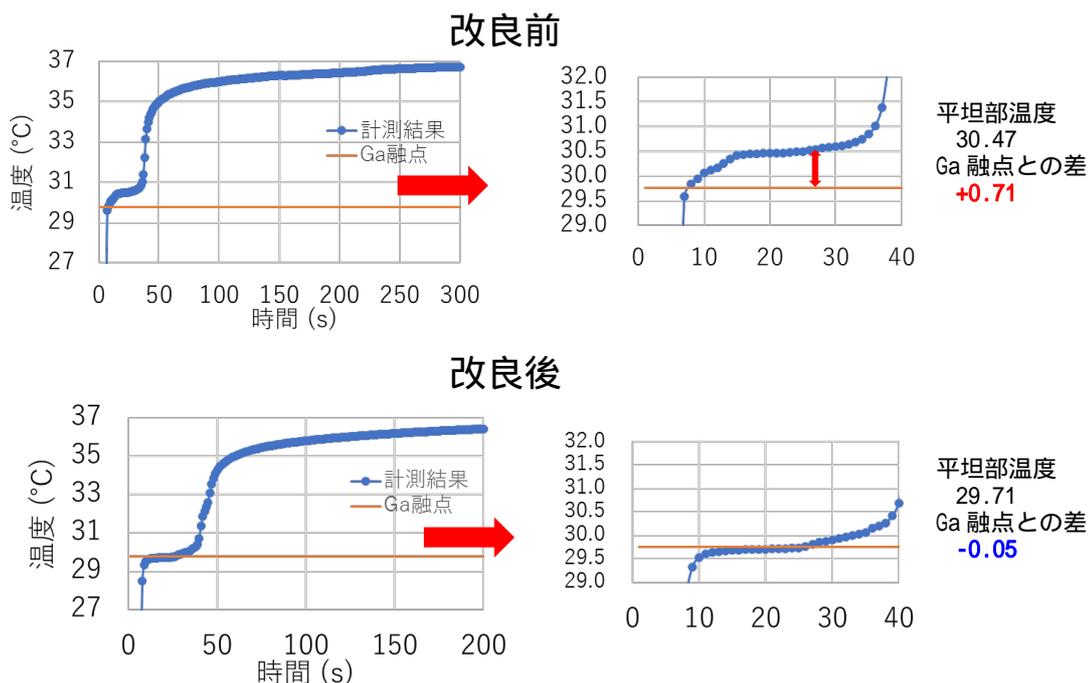


図 8 センサ改良前・後での体温計測結果比較例

(6)Ga のマイクロカプセル化とセンサ試作：ディップ法による Ga 封入サーミスタの作製過程において、液体 Ga の濡れ性が原因で所望量の Ga をサーミスタにコーティングすることが困難であったことからマイクロカプセル(以下、MC)化を試みた。MC 化により液体を固体粉末として扱うことが可能となり、Ga の取り扱いが容易になるものと期待できる。また MC 膜素材によって不純物混入による Ga 融点の変化を防ぐことができ、高い精度を保つことが可能と考えられる。先行研究 [Blaiszik, B. J., *et al.*, J. Microencapsulation, 31(4), pp.350-354, 2014]では Ga-In 合金を MC 化しており、このレシピを参考に Ga の MC 化を試みた。具体的にはカプセル被膜材を連続攪拌下に液体 Ga を滴下。温度制御ホットプレート(小池精密機器製作所)を用いて 55 で 4 時間攪拌状態を維持した。カプセル化終了後、得られたスラリーを液体窒素中で凍結し、凍結乾燥機(FDU-1200、東京理化工機(株))で凍結乾燥し乾燥カプセル粉末を得た(図 9)。得られた MC 化 Ga の所定量を 2 液性ポリウレタンに混合し、図 10 に示すような MC-Ga 被覆センサを試作した。このセンサを用いて腋窩温計測を試みたところ、図 11 に示すように Ga コートセンサと同様に Ga 融点付近で温度平坦部が確認でき、MC 化 Ga を用いても自動校正機能付きのサーミスタ体温計が具現化可能であることが示された。



図 9 MC 化 Ga 粉末概観

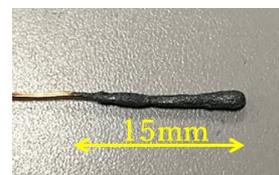


図 10 MC-Ga センサ概観

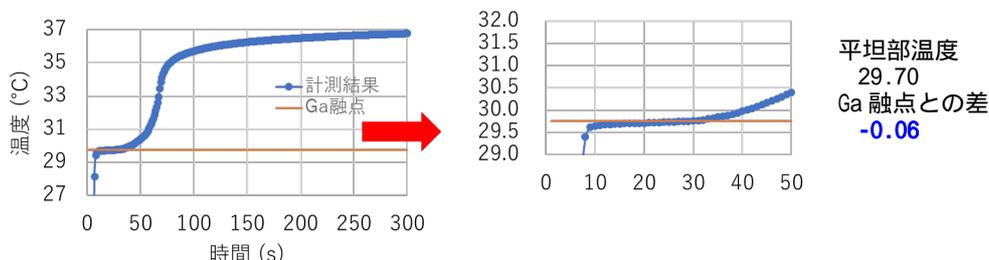


図 11 MC-Ga 被覆サーミスタの腋窩温計測結果例

(7)まとめ：本研究により下記新知見が得られた。

汎用サーミスタの表面に金属ガリウムをコーティングすることで Ga 融点付近で温度平坦部が得られ、サーミスタの経年劣化を自動校正する方法に適用可能であること。

上記サーミスタを具現化する方法を考案した。

温度平坦部の計測精度向上のための方法を考案した。

金属ガリウムのマイクロカプセル化に成功すると共に、MC 化 Ga を用いても温度平坦部を高精度で計測可能であることを確認した。

上記により、最終目標である「自動校正機能付きサーミスタ式体温計プロトタイプ開発」の設計指針が明らかとなった。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

- (1) 西村和也、千原竣也、野川雅道、内藤 尚、根本 鉄、戸川達男、田中志信：低融点金属の相転移現象を利用した自動校正機能付き体温計の開発、平成 30 年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会 (2019 年)
- (2) S. Tanaka, K. Nishimura, M. Nogawa, H. Naito, T. Nemoto and T. Togawa: Development of a novel self-calibration thermometer using low melting-point metal., 2018 World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (招待講演)(2018 年)
- (3) 西村和也、野川雅道、内藤 尚、根本 鉄、戸川達男、田中志信：校正機能内蔵サーミスタ体温計の開発、日本生体医工学会北陸支部大会 (2018 年)
- (4) 西村和也、野川雅道、内藤 尚、根本 鉄、戸川達男、田中志信：金属 Ga の相転移を利用した自動校正機能付き体温計の開発、生体医工学シンポジウム 2018 (2018 年)
- (5) 西村和也、野川雅道、内藤 尚、根本 鉄、戸川達男、田中志信：校正機能内蔵サーミスタ体温計の開発、平成 29 年度日本生体医工学会北陸支部大会 (2017 年)

〔その他〕

ホームページ等

金沢大学理工研究域 人間適応制御研究室 研究紹介

<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/biomed/research/bodytemp.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：野川 雅道

ローマ字氏名：Masamichi NOGAWA

所属研究機関名：公立小松大学

部局名：保健医療学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：40292445

(2)研究協力者

研究協力者氏名：戸川 達男

ローマ字氏名：Tatsuo TOGAWA

研究協力者氏名：根本 鉄

ローマ字氏名：Tetsu NEMOTO

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。