

〈一般研究課題〉 放熱速度のアクティブ制御を用いた
小型熱流束センサの開発
助成研究者 豊橋技術科学大学 松岡 常吉



放熱速度のアクティブ制御を用いた 小型熱流束センサの開発

松岡 常吉
(豊橋技術科学大学)

Development of heat flux sensor using active control of heat transfer from the detector

Tsuneyoshi Matsuoka
(Toyohashi University of Technology)

Abstract :

This paper proposed a measurement technique of the heat flux using a Peltier device which enables active control of heat transfer from the detector. A prototype of the Peltier-type heat flux sensor is developed to validate the measurement principle. A cone heater system which can supply known heat flux to an object 25 mm underneath the cone heater was also developed. Validation tests were then conducted under various heat fluxes from 3 to 23 kW/m² and the measurement value was compared with the setting value of cone heater. By using the temperature of the semiconductor constituting the Peltier device, the measurement values show good agreement with the setting values under the condition examined. Therefore, it is concluded that verification is well-confirmed.

1. はじめに

物体の着火限界や火災時の燃料領域が拡大する速度は熱流束によって決まるため、火災試験において正確な熱流束データを得ることは重要である。熱流束センサには、複数の熱電対により空間の温度差をサーモパイルなどで計測するものや、受熱部の温度履歴から熱流束を求めるスラグカロリメータなどがある[1,2]。前者のうち、火災試験では高温環境に暴露されることや様々な方向からの熱流束を感知する必要があるため、一般的に金属製のハウジング内にサーモパイルを有する

Schmidt-Boelter型やGardon型が用いられる。これらのセンサは高精度であるが、その感度と応答速度は感知面サイズに依存するため小型化が難しい。また、Schmidt-Boelter型やGardon型のセンサは通常冷却しながら使用されるが、冷却された計測器が系に挿入されることによって周囲の温度場が変化するため、真の値とは異なる値を計測することがある(これを取り付け誤差と呼ぶ)。

上述した原理上の欠点を有するにもかかわらず、Schmidt-Boelter型やGardon型熱流束センサは、これまで火災試験におけるデファクトスタンダードとして用いられている。その理由は、おそらく、熱源から激しい加熱を受ける大規模火災試験においてはさほど影響を与えないことと、それに代わるようなセンサがないからだと考えられる。しかし、大規模火災試験はコストや安全性の観点からは実施が容易ではないため、火災場の詳細なデータを得るにはスケールダウンした模型実験が行われるが、このような小規模火災試験では取り付け誤差の影響は無視できない。現象を理解し、精度の高い火災予測モデルを構築するには、小型で取り付け誤差の小さい熱流束センサが必要であろう。

センサによる取り付け誤差を低減するには、センサの温度とその近傍の温度を等しくすれば良い。センサの温度は入熱量と放熱量のバランスで決まるので、センサの受熱部からの放熱量を入熱量に合わせて適切に制御することができれば、センサの温度を制御すると同時に入熱量(または受熱部の表面積で除した入熱熱流束)も計測できるはずである。このことに着目し、本研究はペルチェ素子を用いて上記の条件、すなわち温度を任意かつ一定に保ちながら、熱流束を計測するセンサの開発を目指す。ここでペルチェ素子はP型半導体とN型半導体が直列に接続されたもので、電流を流すと一方の接合面から他方の接合面へ熱を運ぶことができる素子である。以下では、このセンサをペルチェ式熱流束センサと呼称する。ペルチェ式熱流束センサの最大の利点は、センサの温度を理想的には周囲と同じ温度とすることで取り付け誤差を低減できる点であるが、それ以外にもフィードバック回路などによりセンサの感度と応答速度を制御でき、また点接触型のペルチェ素子[3]を使うことで将来的には熱電対程度の大きさのセンサの開発も可能となると期待される。

ペルチェ素子を用いて抜熱速度を制御するというアイデアはShewenらによって提案されており、実際に検証も行われたようである[4]。その後、Haruyamaも同じくペルチェ素子を使って低温環境下での熱流束の計測を行っている[5]。しかし、Shewenらの論文では結果が示されておらず詳細が不明であり、さらには両者とも数 W/m^2 から数 $100W/m^2$ の熱流束をターゲットにしているため、火災場のような高熱流束の計測が可能かどうかは分かっていない。

本研究では小規模火災試験に適したペルチェ式熱流束センサの開発と実用化を目指し、その第一段階としてセンサ試作機の製作とそれを用いた原理検証実験を行う。はじめにペルチェ式熱流束センサによる熱流束の計測方法について検討し、それに基づいて試作機を製作した。次に検証実験を行うために必要な装置の開発を行い、試作機の性能評価を行った。

2. ペルチェ式熱流束センサの原理

図1に提案するペルチェ式熱流束センサの概念図を示す。センサは受熱部、ペルチェ素子および放熱器で構成される。ここで、

- (i) 熱流束は受熱部に対して一様に流入する
- (ii) 受熱部内および放熱部内の温度は一定

(iii) 各層間の熱抵抗は無視できる

と仮定すると、受熱部を囲むコントロールボリュームについて以下の熱バランス式が成り立つ。

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = A_i \dot{q}_i - A_p \dot{q}_p \quad (1)$$

ただし、 ρ [kg/m³], C [J/kg K], A [m²], V [m³] は受熱部の密度、比熱、面積および体積である。添え字の*i*と*p*はそれぞれ受熱部の上面と下面(ペルチェ素子と接する面)を表し、 \dot{q}_i および \dot{q}_p [W/m²] はそれぞれ、受熱部上面から流入する熱流束とペルチェ素子による下面からの抜熱熱流束である。 \dot{q}_p はペルチェ素子の素子特性に温度依存性がなく、かつ半導体で発生した熱が均等に吸熱側と放熱側に分配され、さらに素子を構成する導体などの影響がないものとするれば、次式で与えられる[6]。

$$\dot{q}_p = SJT_i - K(T_o - T_i) - \frac{1}{2}RJ^2 \quad (2)$$

S [V/K] はゼーベック係数、 K [W/m² K] は単位断面積あたりの熱コンダクタンス、 R [$\Omega \cdot m^2$] は単位断面積当たりの抵抗、 J [A/m²] は半導体チップを流れる電流密度であり、 T_i と T_o [K] はそれぞれペルチェ素子の吸熱面および放熱面の温度である。

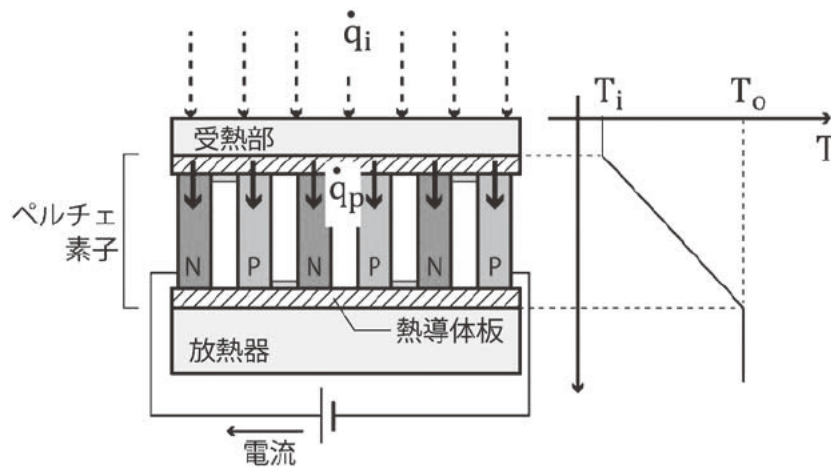


図1 A conceptual diagram of the Peltier-type heat flux sensor

ペルチェ式熱流束センサでは受熱部の温度が一定となるよう制御する。したがって、 $dT/dt = 0$ である。このとき、(2)式を(1)式に代入すれば流入熱流束 \dot{q}_i を表す式を得る。

$$\dot{q}_i = \frac{A_p}{A_i} \dot{q}_p = \frac{A_p}{A_i} \left[SJT_i - K(T_o - T_i) - \frac{1}{2}RJ^2 \right] \quad (3)$$

(3)式は、流入熱流束が電流密度 J と素子の両側の温度 T_i および T_o を計測することで求められることを示している。

検証実験を行うため、図1に示したセンサ構成をもとに熱流束センサを製作した。製作したセンサを図2に、その仕様を表1に示す。受熱部は厚さ2 mmのアルミニウム板であり、アルミニウム板の下にペルチェ素子。さらにはその下には素子を冷却するためのフィンおよびファンからなる放熱器が取り付けられた。なお、各層間の熱抵抗を小さくするため、受熱部、ペルチェ素子および放熱器の間は高性能シリコングリスを

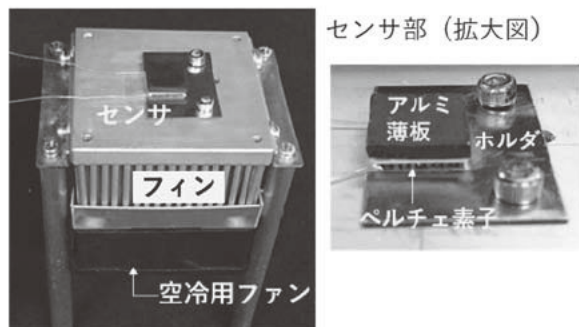


図2 Peltier-type heat flux sensor developed in this study

塗布し密着した 図2に示したように、試作したセンサは放熱器を含めると小さいとは言えないが、小さいペルチェ素子を用いるとともに、放熱器を最適設定することで小型化が可能である。

表1 センサ諸元

センササイズ	11.2 x 12.1 x 3.65 mm (冷却部を除く)
受熱部	アルミニウム (厚さ約 2 mm)
ペルチェ素子	フェローテック社製 20021/065/018M
最大吸熱流束*	69 kW/m ²
冷却方式	空冷

* 使用したペルチェ素子の最大吸熱量を素子の表面積で除して求めた[7]

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

開発した熱流束センサを用いて熱流束計測が可能かどうかを検証するため、所定の熱流束を与えることができるコーンヒータを用いて検証実験を行った 図3に実験装置の概念図を示す。コーンヒータとは円錐型の金属カバーの内部に螺旋状の電熱ヒータを取り付けたもので、電圧を印加することでカバー下端から 25 mmの位置に印加電圧に応じた熱流束を与えることができるものである。なお、コーンヒータにより与える熱流束の大きさは、市販の熱流束センサ(Captherm, Captec Enterprise社)を用いて校正した。

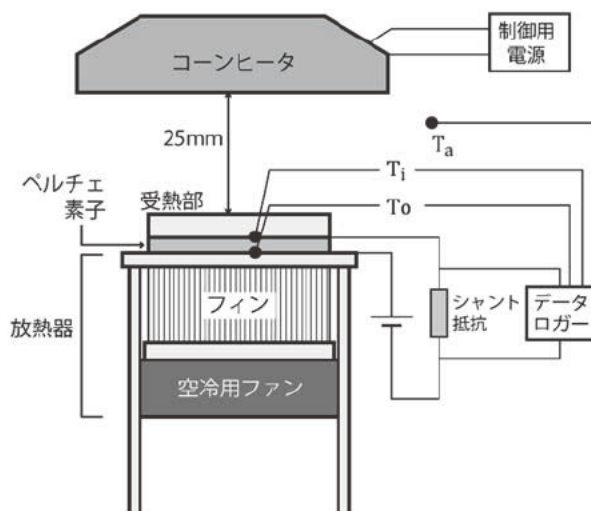


図3 A schematic diagram of experimental setup

ペルチェ素子の吸熱面温度 T_i と放熱面温度 T_o は、T型熱電対をそれぞれ受熱部と素子の吸熱面の間、フィンと素子の放熱面の間に差し込んで計測した。計測に用いたT型熱電対は直径0.1 mmの銅素線およびコンスタンタン素線をバーナーで溶着させて自作した。また、コーンヒータの下方にシース型K型熱電対を設置し、実験中の雰囲気温度 T_a も計測した。

素子に流れる電流密度 J [A/m²] は、ペルチェ素子と電源の間にシャント抵抗と呼ばれる電流検出用抵抗器を挿入し、その両端電圧から(4)式により求めた。

$$J = \frac{E}{RA_c} \quad (4)$$

ここでシャント抵抗の抵抗を R [Ω]、両端電圧を E [V]、ペルチェ素子を構成する半導体チップの断面積を A_c [m²] とした。シャント抵抗には抵抗値0.2 Ω、許容電力量25 Wのメタルクラッド抵抗を用い、半導体チップの断面積はペルチェ素子全体の面積からペルチェ素子を構成する半導体の個数で割ることで $A_c = 1.04 \times 10^{-6}$ m²と見積もった。

3.2 実験方法

コーンヒータの中心かつ25 mm下の位置に、製作したセンサを設置した。なお、センサの表面に輻射を吸収しやすいよう黒体スプレーを塗布した。コーンヒータからの熱流束が定常となった後、5分以上計測を行った。サンプリングレートは10 Hzとし、コーンヒータの設定値を3 kW/m²から23 kW/m²まで変化させて実験を行った。

ペルチェ素子に流す電流(あるいは電流密度)は熱流束を求めるための計測値であると同時に実験者が設定する制御値でもあることに注意されたい。ペルチェ式熱流束センサは、その吸熱面側の温度が最大のとき、すなわち吸熱面と放熱面の温度差 $\Delta T = T_o - T_i$ が最小のとき、周囲からの対流の影響が小さくなり計測値の精度が向上すると考えられる。そこで予備実験により、各熱流束条件において $\Delta T = 0$ となる電流をあらかじめ求めておき、本実験ではペルチェ素子に流れる電流がその値となるように調整して、電圧 E [V]および T_o , T_i を計測した。各熱流束条件における計測データから(3)式を用いて q_i を求め、コーンヒータの設定値と比較した。

4. 結果および考察

4.1 検証実験の結果

検証実験結果の例として、図4にコーンヒータからの熱流束が23 kW/m²のときの結果を示す。上段が温度データ(T_i , T_o , T_a)、下段がペルチェ素子に流れた電流密度(J)である。若干の変動は見られるものの、計測時間の間、得られた温度および電流密度はほとんど一定となっていることが確認できた。ただし、上で述べたように、本研究では $\Delta T = 0$ となる条件で実験を行ったため、 T_i と T_o のデータはほとんど重なっていることに注意されたい。

(3)式から熱流束を計算するには、ゼーベック係数などペルチェ素子の特性値が必要である。これらの値は、販売元から入手したペルチェ素子の吸熱-電流特性データより見積もった。具体的には、吸熱特性はある温度における吸熱量と電流の関係として与えられるため、まず元のデータから抜熱流束と電流密度の関係に変換したデータを作成した。次にそれを電流密度の2次関数としてフィッティングし、(2)式と比較したときの係数の値から、ゼーベック係数 S 、単位面積あたりの熱コンダクタンス K および抵抗 R を求めた。得られた値を表2にまとめる。

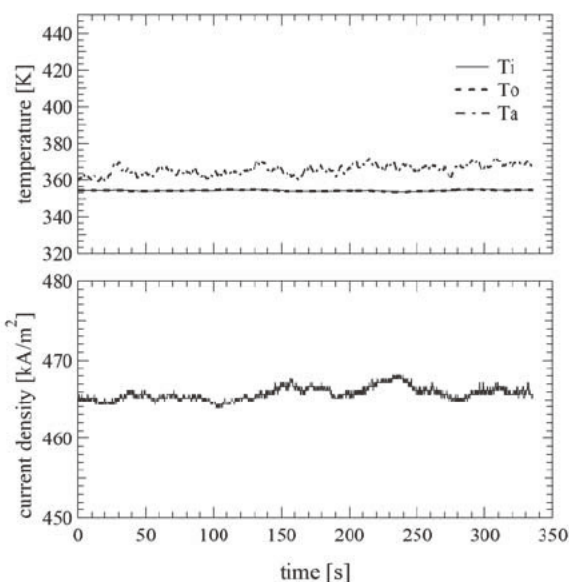


図4 (upper) A typical example of time histories of the temperatures and (bottom) the current density. The setting $q_i = 23$ kW/m²

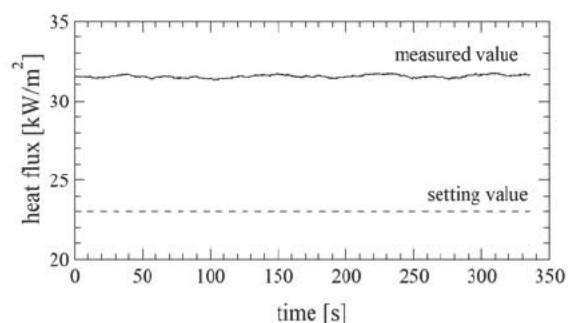


図5 An example of time history data of measured heat flux. The setting $q_i = 23$ kW/m²

表2 ペルチェ素子 (20021/065/018M) の特性値

ゼーベック係数, S	$2.15 \times 10^{-4} \text{ V/K}$
単位断面積あたりの熱コンダクタンス, K	$4.37 \times 10^2 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$
単位断面積当たりの抵抗, R	$3.64 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}^2$

得られた計測データと表2に示す素子の特性値から、(3)式を用いて計算した熱流束の時系列データを示す。コーンヒータの設定は図4と同様 23 kW/m^2 であるため、図5の結果からコーンヒータにより与えた熱流束と計測された値には大きな差があることが分かる。以下では計測時間内の平均値を代表データとして扱い、設定値と計測値の差について詳細に検討する。

図6は各設定熱流束における計測値をプロットしたものである。同条件における試行回数は4回であり、エラーバーはStudentのt分布における信頼区間を95%として算出した。計測値と設定値の差は、コーンヒータの設定熱流束が大きいほど大きくなった。

この理由として対流による影響とペルチェ素子の熱導体板の影響が考えられるが、前者については雰囲気温度とセンサの温度差が小さいことから、その影響は後者に比べ小さいと考えられる。そこで本研究では、ペルチェ素子の熱導体板の影響について検討する。

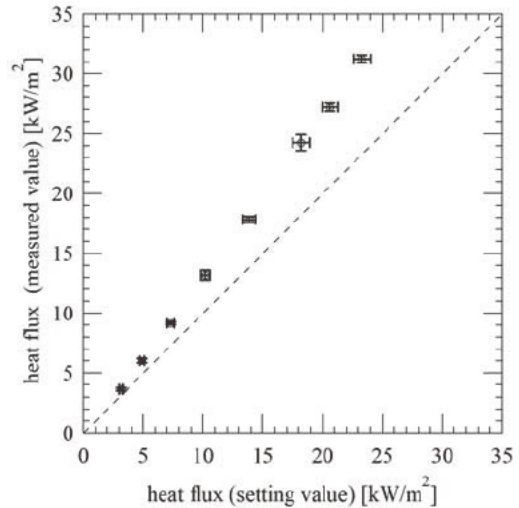


図6 Comparison between measured heat flux and setting heat flux

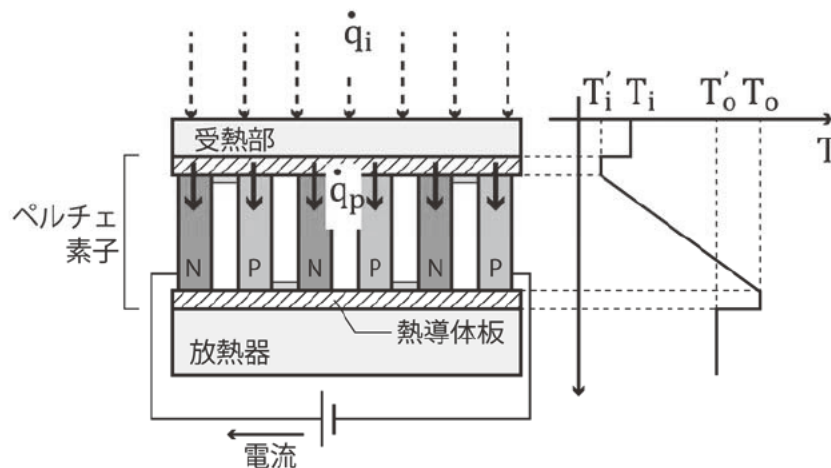


図7 A schematic diagram of temperature profile in a Peltier device

ペルチェ素子は直列に接続された半導体を熱導体板(図1左の斜線部)で挟んだ構造となっており、熱導体板の熱コンダクタンスのため、熱導体板と半導体には図7に示すような温度差が生じる。実験で得られた温度(T_i , T_o)はこの熱導体板表面の温度であるが、小川によれば本来(3)式で指定される温度は半導体の温度である[6]。図6では熱導体板と半導体チップの温度が違うことを考慮せずに求めたため、計測値と設定値に差が生じたと考えられる。次節では熱導体板の温度から半導

体チップの温度を見積もる方法について述べ、それを用いて計算した熱流束を設定値と比較する。

4.2 半導体チップの温度を用いた熱流束の再検証

小川は熱電磁場現象に関するボルツマン輸送方程式から電流密度、熱流密度(熱流束)の式と半導体内部の温度に関する支配方程式を導出し、さらに熱コンダクタンスなどの素子特性を一定と見なして線形近似することでペルチェ素子の吸熱流束が(2)式と同じ表式で与えられることを示した[8]。ただし、このとき(2)式に含まれる T_i および T_o は、半導体チップの温度 T'_i および T'_o (図7参照)に置き換えられる。ここで T'_i および T'_o はペルチェ素子の表面温度 T_i および T_o を用いて、

$$T'_i = \frac{K'_o q_i + K q_o}{K_D^2} \quad (5)$$

$$T'_o = \frac{K q_i + K'_i q_o}{K_D^2} \quad (6)$$

ただし、

$$K'_i = K_i + K + SJ \quad (7)$$

$$K'_o = K_o + K - SJ \quad (8)$$

$$K_D^2 = K'_i K'_o - K^2 \quad (9)$$

$$q_i = K_i T_i + \frac{1}{2} R J^2 \quad (10)$$

$$q_o = K_o T_o + \frac{1}{2} R J^2 \quad (10)$$

であり、 K [$W/m^2 K$], K_o [$W/m^2 K$] はそれぞれ吸熱面側と放熱面側の熱導体板の単位面積あたりの熱コンダクタンスである。

(5)式および(6)式を用いて T'_i と T'_o を計算するには K_i と K_o を定めなければならないが、市販のペルチェ素子ではその材質や厚みが不明な上に、本実験ではグリスを介してフィンやアルミ板などが取り付けられているため、その実効値を正確に評価することは困難である。そこで本研究では、これらの値がセラミック系の低熱伝導体のものと同程度であると仮定し、 $K_i = 2 \times 10^3 W/m^2 \cdot K$, $K_o = 1 \times 10^4 W/m^2 K$ と見積もり、半導体チップの温度を計算した。

T'_i と T'_o を用いて求めた熱流束を図8に示す。修正した計測値が設定値とほぼ一致しており、ペルチェ熱流束センサによる熱流束の計測が可能であることが示された。今後は熱導体板の熱コンダクタンスを実測するとともに、対流の影響についても評価して結果の妥当性をさらに検証する。またセンサの動特性や熱解析を基にした最適設計を行いセンサの実用化を目指す。

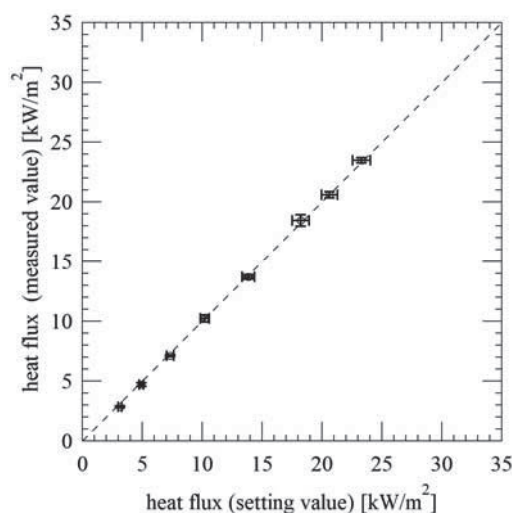


図8 Comparison between measured heat flux and setting heat flux. The measured data was calculated using T'_i and T'_o

結論

受熱部からの抜熱速度をペルチェ素子により制御するペルチェ式熱流束センサを提案し、試作機の製作と原理検証実験を行った。はじめにペルチェ式熱流束センサによる熱流束評価方法について検討し、それに基づいてセンサの試作機を製作した。次に原理検証実験を行うためのコーンヒータを用いた試験装置を開発し、それを用いてセンサの検証実験を行った。コーンヒータからの熱流束を3 kW/m²から23 kW/m²までの範囲で変化させ、センサによって計測された熱流束とコーンヒータの設定値を比較した。その結果、ペルチェ素子を構成する半導体チップの温度を適切に推定することで、実験誤差の範囲内で計測値と設定値が一致することが示され、ペルチェ式熱流束センサによる熱流束計測が可能であることが分かった。

参考文献

- [1] Diller T.E., Advances in Heat Flux Measurements, *Advances in Heat Transfer*, **23** (1993), pp. 279-368.
- [2] Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A., Heat flux measurement techniques, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **213** (1999), pp.655-677.
- [3] 安齋徹, 山口栄雄, 点接触型ペルチェ素子の先端温度過渡特性, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **52** (2009), pp.111-113.
- [4] Shewen E.C., Hollands K.G.T., Raithby G.D., The Measurement of Surface Heat Flux Using the Peltier Effect, *Journal of Heat Transfer*, **111** (1989), pp.798-803.
- [5] Haruyama T., Performance of Peltier elements as a cryogenic heat flux sensor at temperatures down to 60 K, *Cryogenics*, **41** (2001), pp.335-339.
- [6] 小川吉彦, 熱電変換システム設計のための解析—ペルチェ冷却・ゼーベック発電 (1998), pp. 51-131, 森北出版株式会社.
- [7] 株式会社フェロテックHP, ミニチュアサーモモジュール, available from <<http://www.ferrotec.jp/products/thermo/mini>> (参照日 2019年5月30日).
- [8] Ogawa Y., Ueda K., Theoretical analysis of Peltier cooling system, *Journal of Advanced Science*, **7** (1995), pp.145-147.