

冷却状態におかれた熱電発電素子の熱リーク特性

石山 俊彦 *

要 旨

熱電変換素子中の熱リークの影響を検討するため、室温雰囲気より低温状態に置かれた状態での熱電発電素子に着目、その発電特性をもとに熱リーク特性を評価した。実験開始時に低温状態におかれた素子と室温状態におかれた素子では、熱電変換の効率が低下するまでの時間は、低温状態におかれた素子の方がわずかに長い結果となった。実験開始時に低温状態におかれていた素子のほうが、熱リークが顕著になるまで温度が上昇する時間がかかったためと考えられる。

初期状態の温度を室温より低く設定することで熱リークを抑制させる手法は、実験開始後の短時間の間では有効であることが示された。

キーワード：熱リーク，熱電発電，過渡状態，熱伝導

Heat Leakage Characteristics of Thermoelectric Generator Placed in Low-temperature State

Toshihiko ISHIYAMA *

ABSTRACT

Heat leakage was investigated by using the thermoelectric generator, which was cooled before the experiment. Heat leakage appeared late when the thermoelectric device was cooled. The simulation results confirmed the phenomenon that heat leakage appeared late when initial temperature of the device was low. The simulation results also suggested that the temperature increased rapidly when the cooled device was used. These results suggested that the cooled thermoelectric device is effective to suppress heat leakage.

Keywords : *heat leakage, thermoelectric generator, transient state, heat conduction*

1. 緒言

熱電発電は、ゼーベック効果を利用した古くから利用されている発電技術である¹⁾。近年では、最高でも150℃程度の排熱（いわゆる「低温排熱」）への適用も検討されている²⁾。熱海や草津の温泉を利用した熱電発電などは、その一例である³⁾。

低温排熱を利用した熱電発電では、熱が熱電発電素子の高温側から低温側へと伝導する「熱リーク」がおり、発電特性を悪化させる。熱リークを抑制するには、ヒートパイプを熱電発電素子の低温側と冷却フィンの間に挿入し、熱の移動を促進することが有効であることが報告されている^{4) - 5)}。

熱電発電において、素子の低温側は実験環境の雰囲気中で冷却される。実験開始時の素子の低温側は実験環境の温度（多くの場合は室温）である。そうした場合、熱リークは室温状態から、素子を昇温する形で促進される。一方、実験開始時に、熱電発電素子が雰囲気より低温状態におかれていた場合、熱電発電素子の低温側は雰囲気温度より低温状態にある。その場合、熱電発電素子の低温側は素子の高温側からと冷却フィン側（室温状態）の両者からの熱移動が起これ、熱リークが促進されることが考えられる。一方で、通常的环境より温度差を大きくすることができるので、実験開始時には良好な発電特性を示すことも予想される。しかし、こうした発電特性は過渡的な現象がもとになっていることから、これまで検討されていない。

本稿では、室温雰囲気より低温状態に置かれた状態での熱電発電素子に着目し、その発電特性を評価した。さらに、温度評価をもとに、過渡的な状態にある素子の熱リーク特性を評価した。

2. 低温排熱と熱リーク

熱リークは熱発電モジュールの高温側と低温側の間の温度差が減少し、発電特性の低下を引き起こす現象である。これまで主として利用されてきた排熱回収では、300～400℃程度の排熱を熱源としていた。近年の150℃以下の低温排熱の利用では、もともと、熱発電モジュールの高温側と低温側の間の温度差が小さい。そのため、熱電発電特性に熱リークが影響を及ぼし易い。

熱リークを抑制するには、ヒートパイプの利用が有効であるが、小さな温度差を保つことに効果が限定される。低温排熱において、もとの温度差が小さいという点については改善する方法はない。一方で、低温排熱は膨大な量が排出されているものの、手つかずの状態で放置されている²⁾。低温排熱が排出される熱の膨大な部分を占めていることを考慮すると、ヒートパイプの他にも、小さな温度差を有効に使う手法が求められている。

3. 実験方法

初期状態の違いによる、熱電発電素子の熱リーク特性を評価した。あらかじめ低温状態に保管された熱電変換素子を用いて、素子の一端を熱することで温度差を設定、発電特性をもとに、熱リークの影響を評価した。

実験に用いた熱電発電素子は、冷凍庫により冷却された状態とした。通常、熱電発電素子の低温側は室温状態（20～30℃）で実験が開始されるが、本検討では、実験開始時における熱電発電素子の低温側は室温より低い状態（-20～0℃）とした。その後の熱電発電素子の低温側は、室温による冷却とした。

実験装置は、4 cm × 4 cm の熱電発電素子を2枚直列に接続、ヒートシンクありの状態で検討した（図1）⁶⁾。これまでの検討から、ヒートパイプの利用が熱リークの抑制に有効であることが示されている^{4) - 5), 7) - 8)}。本検討では、初期状態の違いによる熱リーク特性を評価するため、ヒートパイプは利用していない。また、5.6 Ω の抵抗を負荷として使用した。実験において、ヒータを入れた湯を熱源として利用した（図2）。実験の間、湯はヒータにより、一定の温度（96℃）に保たれた。実験中の熱電変換素子の温度については、放射温度計により測定した。

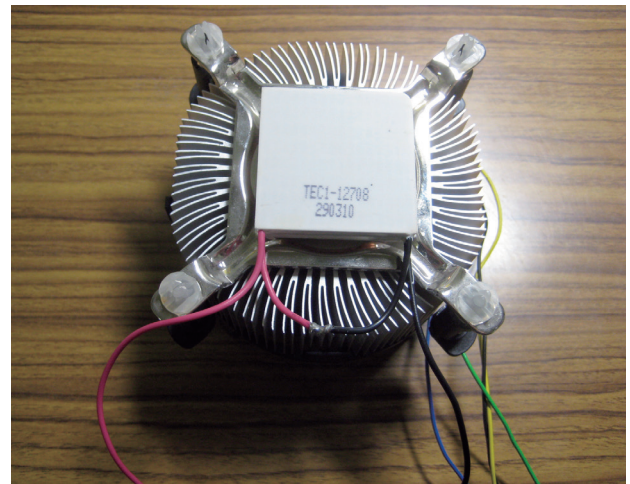


図1 冷却フィンを装着した熱電発電素子

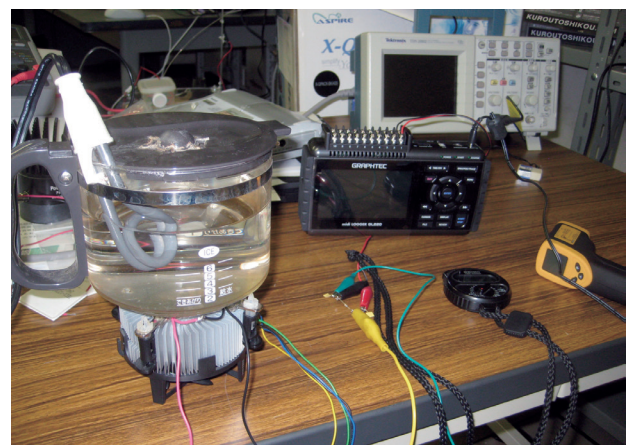


図2 ヒータと湯を熱源とした熱電発電の実験

実験結果を検討するため、熱電変換素子の伝熱解析をおこなった。伝熱解析では、熱電導素子の高温側を100℃とし、冷却のための環境を室温(20℃)とした(図3)。図の中心部の3×3ブロックが熱電変換素子である。図は、初期状態として素子の内部温度は20℃(=室温)に設定した場合である。シミュレーション中は、素子の周囲を室温(20℃)とし、上面を高温側(100℃)とした。シミュレーション中、熱電変換素子の高温側温度(100℃)と環境温度(20℃)は一定とした。

図3に示した素子モデルに対する伝熱状態を、2次元のCrank-Nicolson法により解いた⁹⁾。解析する素子は4cm×4cm、厚さ9mmとした。実際の素子の厚さは8mm(4mm厚の熱電変換素子を2枚重ね)であるが、収束性に問題があり、上記のサイズとした。熱電変換素子の内部はp形、n形素子が樹脂で覆われているが、シミュレーションでは素子の内部は全てエポキシ樹脂で充填されているものとした。なお、通常の熱電変換素子では、冷却を目的としたフィンが装着されている。本稿では、初期温度に対する依存性を検討するため、フィンの冷却効果を排除した形で検討した。そのため、フィンを装着しない条件でシミュレーションを実施した。

シミュレーション条件として、熱電変換素子の内部の温度を30℃～-20℃の間で変化させ、素子の中心部の温度の時間変化を検討した。また、熱電導に関する素子のパラメータは充填剤として想定したエポキシ樹脂で代替した。エポキシ樹脂の伝熱パラメータを、密度 $\rho = 1850.00$ [kg/m³]、比熱 $c = 1100.0$ [J/kg/K]、熱電導率 $\lambda = 0.3000$ [W/mK]とした¹⁰⁾。

初期温度(t=0) [°C]	20.0	20.0	20.0	20.0
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

図3 伝熱解析シミュレーションモデル
(図中の太枠内部が熱電変換素子)

4. 結果と考察

図4に、熱電変換素子の初期設定温度を変えた場合の熱電変換特性を示す。実験では、室温状態においた素子の熱電変換特性と比較した。

いずれも、出力電圧は実験開始直後から増加、最大値を示した。その後、出力電圧は減少した。-9.2℃に冷却した熱電変換素子と室温(26℃)におかれた素子では、実験開始直後は出力電圧に明確に差が見られた。しかし、時間の経過とともに、出力電圧の差は減少した。熱電変換素子の初期設定温度が低いことから、温度差を大きく取ることができる。そのため、実験開始直後には、常

温に置かれた素子に比べ、大きな出力電圧を示した。

実験開始時に低温状態におかれた素子と通常的环境(室温状態)におかれた素子では、熱電変換の効率が低下するまでの時間は、低温状態におかれた素子の方がわずかに長い結果となった。実験開始時に低温状態におかれていた素子のほうが、熱リークが顕著になるまで温度が上昇する時間がかかったためと考えられる。

図5に、実験の間での、熱電変換素子の低温側の温度を示す。熱電変換素子の側面の低温側に近い部分の温度を測定することで、熱電変換素子の低温側の温度とした。図から、低温状態におかれた熱電変換素子は、実験開始時直後から、急激な温度の上昇を示した。しかし、低温状態におかれた素子のほうが、室温状態におかれた素子と同じ温度に達するまでに、長い時間を要した。この結果は、熱電変換素子を低温状態におくことで、熱リークが影響するまでの時間を長くできることを示している。

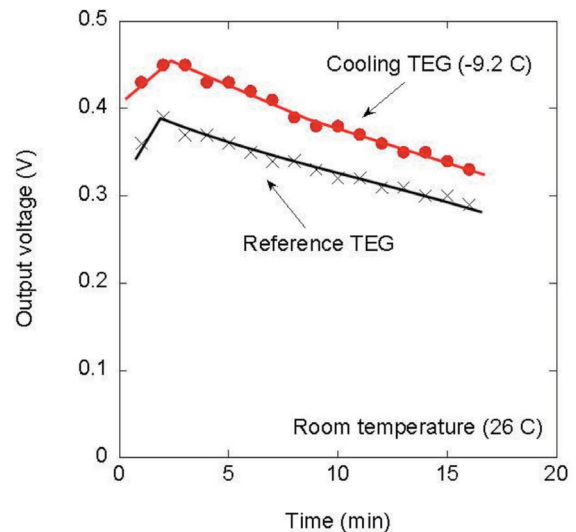


図4 初期設定温度を変えた場合の熱電変換特性

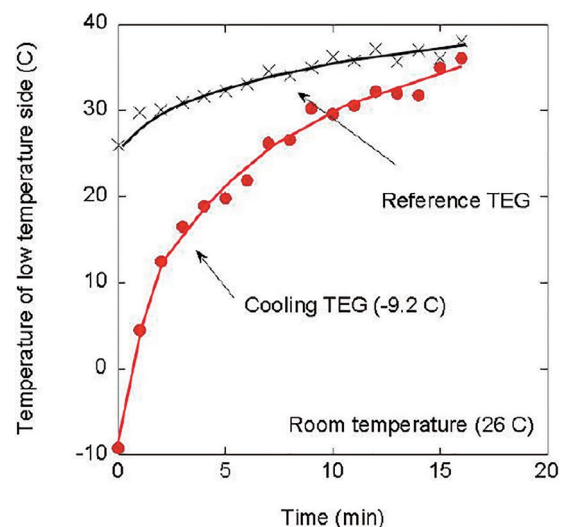


図5 熱電変換の過程での素子低温側の温度変化

熱電変換素子内部への熱の伝わり方を検討するため、伝熱解析シミュレーションを実施した。図6に、素子内部での温度変化を示す。シミュレーション条件として、素子の初期設定温度を30℃～-20℃、熱源を100℃、冷却を兼ねた室温を20℃とした。シミュレーションは、1sごとの計算を、十分な時間が経過（～16分）するまで実施した。

シミュレーションの結果より、素子内部では熱電変換開始後の早い段階で温度上昇が始まる。シミュレーションの方が、冷却用のフィンを着着していないので、温度上昇や素子内部の飽和温度に達するまでの時間が早くなった。実験で用いた熱電変換素子には冷却用のフィンが装着されているので、実際の条件では、温度上昇は緩やかに進んだ（図5）。

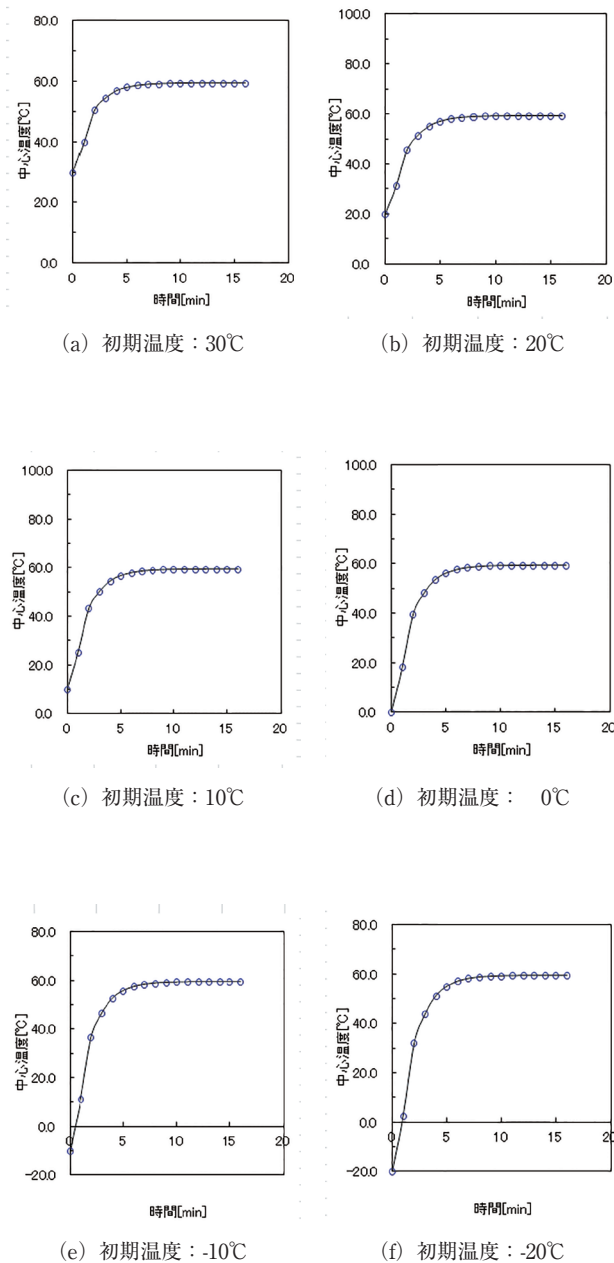


図6 熱電変換素子中心部の温度変化シミュレーション

素子の初期条件にかかわらず、十分に時間が経過した後は、素子内部の温度は60℃程度で一定となった。冷却フィンを装着していないことから、シミュレーション結果では、実験結果より熱リーク現象が早く現れているものの、実験結果をよく説明している。

図7に、実験開始後1～3分の熱電変換素子中心部の温度のシミュレーション結果を示す。実験開始時（初期状態）の温度が低い素子のほうが、中心部まで熱が伝わる時間がかかる。実験開始の初期段階では、素子の温度を室温より低く設定することで、熱リークが熱電変換特性を劣化させるまでの時間を長くできることが確認された。

熱電変換素子の内部の温度は、時間の経過とともに、初期設定温度が低い素子の方が、急激な上昇を示す。本稿でのシミュレーションでは、初期状態として周辺環境に比べ、最大で40℃程度の低温状態を設定しているが、この範囲の温度設定では、数分間程度、熱リークの進行を抑えられることが示された。

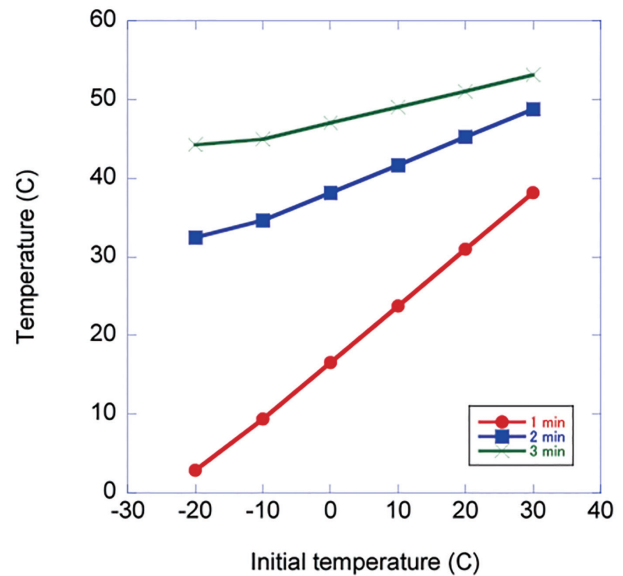


図7 熱電発電素子内部の温度上昇

実験開始時（初期状態）の温度が室温より低く設定されても、熱リークを遅らせる効果は時間の経過とともに薄れていく。実験開始時（初期状態）の素子の温度が低い場合であっても、時間の経過とともに、室温に近づいていくためである。そのため、本稿で示した初期状態の温度を室温より低く設定することにより、熱リークを遅らせる効果は、実験開始後の短時間の間では有効な手法である。長時間にわたり熱リークを本格的に抑えるには、文献^{4)・5)}で述べられているように、ヒートパイプを用いるなどの手法を用いるべきである。

5. 結言

熱電変換素子中の熱リークの影響を検討するため、室温雰囲気より低温状態に置かれた状態での熱電発電素子に着目し、その発電特性から熱リークの特性を評価した。

実験では、熱電変換素子の初期設定温度を低く設定することで、温度差を大きく取ることができた。そのため、実験開始直後には、常温に置かれた素子に比べ、大きな出力電圧を得ることができた。実験開始時に低温状態におかれた素子と室温状態におかれた素子では、熱電変換の効率が低下するまでの時間は、低温状態におかれた素子の方がわずかに長い結果となった。実験開始時に低温状態におかれていた素子のほうが、熱リークが顕著になるまで温度が上昇する時間がかかったためと考えられる。

さらに、素子の温度測定とシミュレーションをもとに、過渡的な状態にある素子の熱リーク特性を評価した。その結果、低温状態におかれた素子のほうが、室温状態におかれた素子と同じ温度に達するまでに、長い時間を要した。この結果は、熱電変換素子を低温状態におくことで、熱リークが影響するまでの時間を長くできることを示した。

本稿で示した初期状態の温度を室温より低く設定することで熱リークを抑制させる手法は、実験開始後の短時間の間では有効であることが示された。

参考文献

- 1) 野澤哲生:「廃熱や振動からの発電技術が実用化へ」, 日経エレクトロニクス, 日経 BP 社, 2008.12.15, pp. 97-105, 2008.
- 2) 新藤尊彦 他: 未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム, 東芝レビュー, Vol. 63 (2), pp. 7-10, 2008.
- 3) 武藤佳恭: 熱海温泉での温度差発電, 日本熱電学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 11-14, 2011.
- 4) Y. Takefuji, Known and unknown phenomena of nonlinear behaviors in the power harvesting mat and the transverse wave speaker, Proc. of international symposium on nonlinear theory and its applications, sept. 7-10, 2008.
- 5) T. Ishiyama et al., Energy Harvesting Technology for Self-contained Wireless Telemetry Using Thermoelectric Generators, Proc. 16th Int. Conf. Elec. Eng. (ICEE2010), PS-EH-03, July 11-14, (2010).
- 6) 武藤佳恭: ペルチェ素子を使った温度差発電, エレキジャック, No. 5, pp. 156-160, 2008.
- 7) J. Legierski et al., Measurements and simulations of transient characteristics of heat pipes, Microelectronics Reliability Vol. 46, pp. 109-115, 2006.
- 8) B. Saengchandr and N. Afzulpurkar, A Novel Approach for Cooling Electronics Using a Combined Heat Pipe and Thermoelectric Module, Am. J. of Eng. And Appl. Sci., Vo. 2, pp. 603-610, 2009.
- 9) 岩井裕 他: エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション 第2版, 丸善(株), pp. 67-70, 135-136, 2010.
- 10) 各種物質の性質: 非金属固体の性質 <http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01010.htm>