

岩瀬英治研究室

(1) 折り紙型/切り紙型熱電発電デバイスにおける断面熱量変化のシミュレーション

本研究の目的は、折り紙型の熱電発電デバイス (Thermoelectric generator, TEG) において、熱電素子内部の熱流束変化をシミュレーションにより解析することである。近年、折り紙型/切り紙型 TEG を平面状から立体状に変形させた際に、熱電素子に大きな温度差が生じ、大きな出力電圧が得られることが報告されている。志々田らは有限要素法 (Finite Element Method, FEM) を用いて折り紙型 TEG における伝熱挙動を解析し、周囲空気との熱交換を考慮することで、立ち上げ変形に応じた熱電素子に生じる温度差を再現した。先行研究では、熱電素子に生じる温度差には、TEG 脚部と周囲空気間での放熱が影響していることが示唆されているが、定量的な議論はなされていない。そこで本研究では、断熱条件の有無を比較することで、熱電素子から周囲空気へ放熱する熱量の影響を解明する。

本研究で用いた折り紙型 TEG のシミュレーションモデルについて、図 1、図 2 に示す。TEG の折り上げ角は $\theta = 60^\circ$ でシミュレーションを行った。熱源であるホットブ

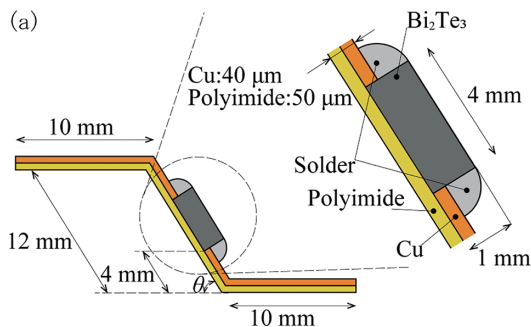


図 1 折り紙型熱電発電デバイスの概略図

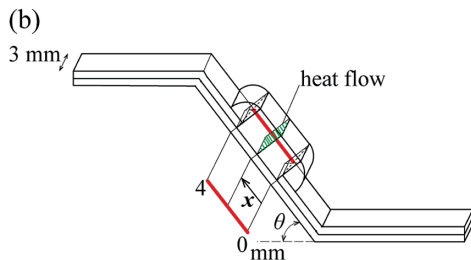


図 2 距離 x と起き上げ角度 θ の定義

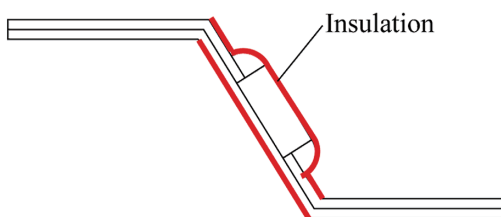


図 3 断熱条件を適用した境界

レートは一辺 90 mm の正方形とし、温度を 373.15 K に設定した。空気については、ホットプレート上方に一辺 120 mm の正方形、高さ 60 mm の領域とし、重力を考慮した自然対流をモデル化し、初期圧力を 1 atm とした。本研究では、図 2 の赤線上の温度分布を計測し、断面熱量を算出した。赤線は熱電素子部の中心を通る線である。熱電素子部下端を原点とし、脚部に沿って座標系を設定した。また断熱条件については、図 3 の赤線で示す空気接触部分へ適用した。

図 4 に断熱および断熱なし条件での熱電素子内部の温度を示す。このシミュレーションで得られた温度を基に熱量を計算したものを図 5 に示す。熱電素子下端からの距離 x [mm] での温度 $T(x)$ [K] から熱量 $Q(x)$ [W] は、 $Q = kA(\Delta T/\Delta x)$ の関係式から算出した。ここで、 k は熱伝導率であり、熱電素子部では $1.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ を用いた。また、 A は断面積であり、熱電素子部での面積は $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ である。図 5 において、断熱条件なしでの熱電素子内部の断面熱量は、熱電素子下端 ($x=0 \text{ mm}$) では、60.85 mW であり、熱電素子上端 ($x=4 \text{ mm}$) では、40.35 mW であるように、熱電素子下端から上端に向かうにつれて断面熱量が減少した。一方で断熱条件では、熱電素子下端 ($x=0 \text{ mm}$) で、40.26 mW であり、熱電素子上端 ($x=4 \text{ mm}$) で、41.79 mW であり、熱電素子内部での断面熱量の変化はわずかであった。この結果から、断熱なしの場合は断熱ありの場合に比べ、熱電素子内部を通過する熱量がほぼすべての位置で大きく

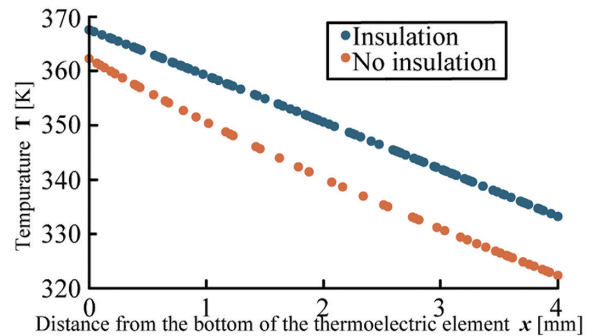


図 4 熱電素子底部からの距離と温度の関係

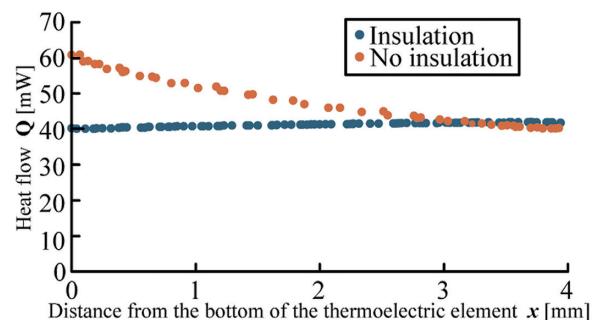


図 5 熱電素子底部からの距離と熱流の関係

なっていることがわかる。これは、熱電素子部での放熱によって、熱電素子内部の熱量が増えていることを示している。

(2) ポリイミド銅基板を用いたRES構造の垂直圧縮に対する回復性の評価

本研究の目的は、図6に示すような回転によって平面から立体化する切り紙構造である rotational erection system (RES) 構造に関して、電子デバイスで利用可能なポリイミド銅基板を用いた際の垂直圧縮に対する回復性を評価することである。熱電発電において、切り紙型熱電発電デバイスは平面から垂直方向に立ち上げることで熱電素子により温度差が付き大きな電力を取り出せるため研究が行われている。切り紙構造は平面から立体化することが可能であるが、従来の切り紙型熱電発電デバイスに用いられている切り紙構造は、外力を除荷すると平面に戻ってしまう。一方で、RES構造は、以下の2つの性質があることが報告されている。1つ目は、双安定構造であるため外力を除荷しても立体形状を保つ性質であり、2つ目は、図6に示すように立体化したRES構造に垂直荷重をかけた際に平面化とは別の方向に変形するため、垂直荷重をかけても元の立体形状に戻りやすい性質である。2つ目の性質は、例えば動物や人に踏まれても形状回復することが示唆される。すなわち、上記2つの性質は共に切り紙型熱電発電デバイスに適した性質であるため、本研究では切り紙型熱電発電

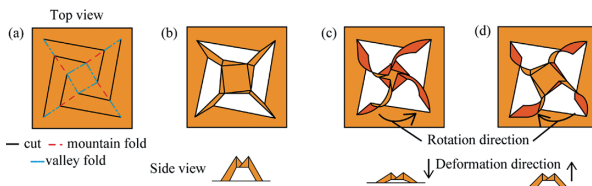


図6 RES構造の変形過程

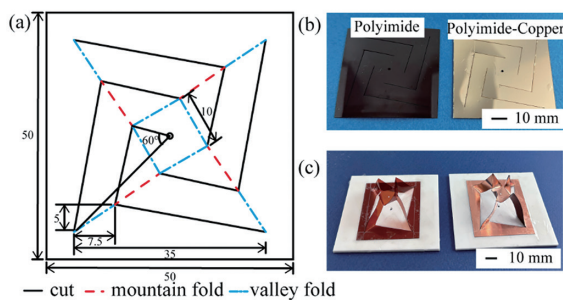


図7 熱電素子底部からの距離と熱流の関係

デバイス作製時に使用するポリイミド銅基板を対象として評価を行った。

図7に本研究で適用したカットパターン（図7(a)）と製作した試験片（図7(b), (c)）を示す。試験片は、基板のサイズを50 mm×50 mmとし、厚み150 μm のポリイミド基板および厚み10 μm の銅基板を用いた。ポリイミド基板と銅基板は20 μm の両面粘着テープを用いて接着し、UVレーザーで加工した後、平面から立体化させた。試験片を逆さの状態で治具に固定し、ナイロン糸を用いて垂直上方向に引っ張った。試験片が潰れ、試験片上部が治具まで到達したら、変位を下げ、垂直荷重を除荷をする。この一連のプロセスにおける荷重-変位線図を測定した。

図8と9に各試験片の荷重-変位線図を示す。ポリイミド基板単体、ポリイミド銅基板の試験片ともに約16 mmの高さであり、ポリイミド基板単体の試験片の除荷後の残留変位は約1.6 mmなのに対し、ポリイミド銅基板の試験片の残留変位は2.1 mmであった。この結果は垂直荷重で押しつぶされた際に基板の一部が塑性変形した影響によると考えられる。

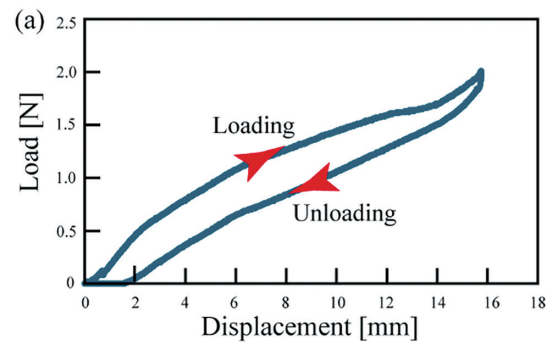


図8 垂直方向変位に対する荷重特性（ポリイミドシートを材料とした場合）

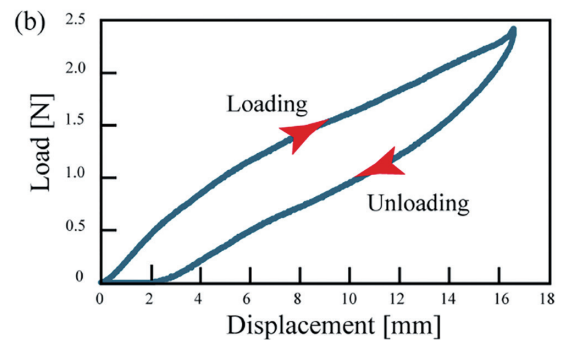


図9 垂直方向変位に対する荷重特性（ポリイミド銅シートを材料とした場合）

著書・論文

S. Terashima, M. Ohnishi, J. Shiomi and E. Iwase Pop-up Kirigami Thermoelectric Generator with High Stretchability with Conformable Thermal interfaces npj Flexible Electronics, 9 (2025), 105 (11 pages).
R. Nagahiro, B. Xu, S. Terashima, Y. Li, Y. Li, Y. Liao, Z. Fang, C. Shao, M. Ohnishi, S. Kato, E. Iwase and J. Shiomi Module-scale Silicon 3D Softened Nanoarchitectures for Eco-friendly Thermoelectric Energy Harvesting Materials Today Physics, 57 (2025), 101798 (11 pages).

講演・発表

ポリイミド銅基板を用いたRES構造の垂直圧縮に対する回復性の評価 第42回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 2025. 一般
高変形能と高発電性能を兼備した切り紙型熱電発電デバイス 日本機械学会 第16回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 招待
自己修復型金属配線における気泡発生の抑制方法の検討および評価 日本機械学会 第16回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 一般
自己修復型金属配線における修復形態の分類に関する検討 日本機械学会 第16回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 一般
折り紙型/切り紙型熱電発電デバイスにおける断面熱量変化のシミュレーション 日本機械学会 第16回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 一般
自己修復型金属配線における配線インピーダンスの計測 日本機械学会 第16回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025. 11. 10－13, 一般
折り紙・切り紙・切り折り紙構造を用いた伸縮電子デバイス 応用物理学会 第85回秋季学術講演会, 2025. 9. 7－10, 招待
折り紙型/切り紙型熱電発電デバイスの伝熱シミュレーション 令和7年度 電気学会E部門 総合研究会, 2025. 5. 29－30, 一般