

非対角熱電発電素子のための 簡易熱流体解析ツールのプラットフォーム構築

清水 嘉

東北大学総合技術部 分析・評価・観測群

1. はじめに

クリーンな電力源として注目されている熱電発電モジュールの開発には、モジュール内部の温度分布をシミュレーションし、出力因子 PF を最大にする形状を探索、実際に試作することを繰り返す必要がある。本発表では、非対角熱電発電素子のための簡易熱流体解析ツールのプラットフォームを構築し、シミュレーション上で発電出力 P を算出、最適な素子構造を導き出すことを可能にした。この開発により、熱電発電モジュールの開発が加速することが期待される。

2. 開発の背景

熱電発電モジュール (図 1) は、上端を工場などから発生する高温排熱で加熱、下端を冷却することで電気が得られるので、エネルギー利用効率向上の観点から注目されている。熱電発電モジュールの開発においては、モジュール内部の温度分布をシミュレーションし、出力因子 $PF=S^2/\rho$ (S : ゼーベック係数, ρ : 電気抵抗率) を最大にする熱電素子形状を探索し、実際に試作することを繰り返す必要がある。従来のシミュレーション方法では、図 2 のように熱電素子内部の温度分布を線形近似する^[1]。しかし、支援先で開発に取り組んでいる非対角熱電発電素子 (図 3) においては、熱伝導率が異なる金属と熱電半導体を積層比 $a=t_M/(t_M+t_{TE})$ (t_M : 金属層の層厚, t_{TE} : 熱電半導体層の層厚), 傾斜角 θ で積層させた構造をとるため適応できない。そこで本発表では、非対角熱電発電素子のための熱電発電特性シミュレーション法を確立することを目的とした。

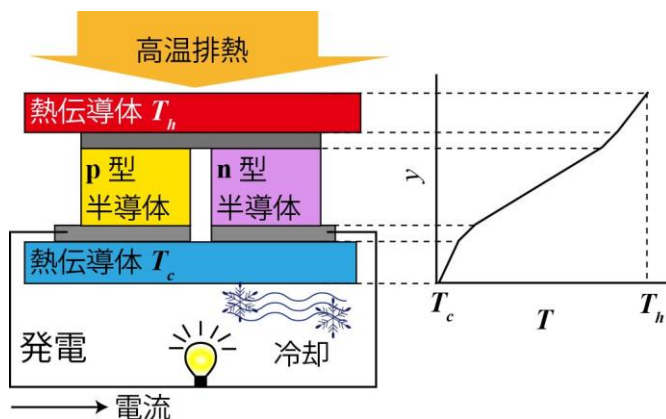


図1 排熱源を利用して発電する熱電発電モジュール

図2 熱電素子の温度分布の線形近似

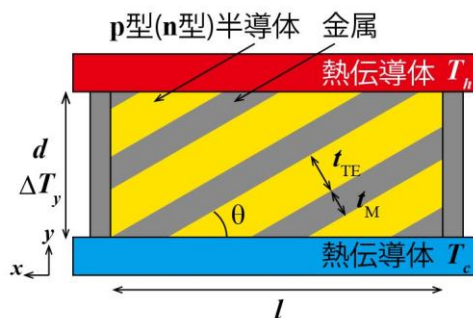


図3 非対角熱電発電素子模式図

3. 簡易熱流体解析ツールの開発

3.1 解析環境の構築

非対角熱電発電素子は、非対角熱電効果により上下方向 (y 方向) に印加する温度差 ΔT_y に対して垂直方向 (x 方向) に電圧 V_x (電流 $-I_x$) を生じる。そのときの発電出力 $P=V_x I_x$ および PF は、 ΔT_y , a および θ の値に依存し増減する。そこで、 ΔT_y を一定にし、 a および θ を変化させたモデルから、最大の PF が得られる構造を決定できる簡易熱流体解析ツールの開発を行った。

PF の導出には、温度分布解析と熱電発電素子内部に発生する電位分布の解析が必要であることから、熱流体解析が行える CAE ソフトを用いることとした。解析を行うためには、解析モデル中において異なる材料を定義できること、異種材料間の接合面の状態を定義できること、積層させる角度、積層比を容易に変更できること、という条件を満たす CAE ソフトを用いる必要がある。また、厚さ方向 (z 方向) の温度変化については一様であると考えて、2 次元でモデルを作成し解析熱流体解析法を検証した。

FreeCAD, ANSYS, Salome と Elmer を用いて、モデル作成および熱流体解析を試みた。FreeCAD ではモデル上に異種材料を定義できないことがわかり、解析を断念した。Salome と Elmer では、解析のためのソルバーを開発する必要があるが、条件の設定が困難であることが分かった。そこで今回は、CAE ソフトとして比較的操作が容易な ANSYS を用いることとした。

3.2 シミュレーション手法の確立

熱電効果による発電により $\Delta V = S \Delta T$ が得られる。解析に際しては、非対角熱電素子に印加する ΔT_y と、各層の物性値 S , σ , κ (熱伝導率) の温度変化を入力し、発生する ΔV_x を得ることができる。計算を行うにあたり、短時間で多くの解析が行えるように、室温近傍での条件を考えることにした。図4に示すように、 $\Delta T_y = 1\text{K}$ となる解析条件を与え、 x 方向に印加する電流値 I_x を 0 から増加させたときの $x = l$ (デバイス長さ) の電位 V_l を求めた。 V_l および $P = V_l I_x$ を図5のようにグラフにプロットすることで、最大出力 P_{MAX} が得られた。 a および θ を規則的に変化させたときの P_{MAX} を算出し、比較検討することを可能にした。この一連のシミュレーションの手順を詳細に示したマニュアルを作成した。モデルの作成方法、解析条件の入力手順、解析の実施の仕方とデータの取得方法を明示し、CAE ソフトを操作したことのない人でも容易に解析が行えるようにした。

3.3 成果

このシミュレーション手法を用いて、フルホイスラー合金 $\text{Fe}_2\text{V}(\text{Al}_{0.9}\text{Si}_{0.1})$ と銅を積層した非対角熱電素子の熱電発電性能の計算結果を図6^[2]に示す。 a および θ を規則的に変化させ、得られた解放電圧 V_0 より、 S の非対角項 $S_{xy} = d/l(\Delta V_0/\Delta T_y)$ (d : デバイス高さ), ρ の x 方向成分 $\rho_{xx} = A/l(\Delta V_x/\Delta I_x)$ (A : デバイス表面積) を算出し、出力因子 $\text{PF}_{xy} = S_{xy}^2/\rho_{xx}$ を求めた。この結果、 $a = 0.9$, $\theta = 30^\circ$ のとき PF_{xy} が最大となる 8.7mW/mK^2 を得た。この値は構成材料である $\text{Fe}_2\text{V}(\text{Al}_{0.9}\text{Si}_{0.1})$ の PF の約 3 倍の値となることが分かった。そこで、 $a = 0.9$, $\theta = 30^\circ$ の構造を持つ非対角熱電発電素子を実際に作製し、物性値を測定したところ、 $\text{PF}_{xy} = 0.210\text{ mW/mK}^2$ を得た。これは計算値の約 2% の値であった。計算値と測定値の差を小さくするためには、計算手法または試作方法を改善する必要があることが分かった。

4. まとめ

非対角熱電発電素子のための簡易熱流体解析ツールの開発を行った。ANSYS を用いたシミュレーション手法を確立し、その操作マニュアルを作成して、誰でも熱流体解析から最大出力 P_{MAX} の値が求められるようになった。操作マニュアルを活用して P_{MAX} を求め出力因子 PF 算出を行い、非対角熱電発電素子と単体材料での PF を比較した。今後、熱流体解析から PF を一連の操作で算出できる簡易熱流体解析ツールの開発が求められる。

参考文献

- [1] 小川吉彦, 熱電変換システム設計のための解析, 森北出版株式会社(1998).
- [2] N. Kodaira, et al., J. Appl. Phys. 126 (2019) 045108.

謝辞

本報告を作成するにあたりご助言を賜りました東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻宮崎教授, 林准教授に、心より御礼申し上げます。モジュール作製の一連の測定データを提供くださった東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻修了生 小平氏に、心より御礼申し上げます。本報告は平成 31 年度東北大学工学研究科・工学部技術職員技術開発助成を受けて行った成果であり、ここに謝意を表します。

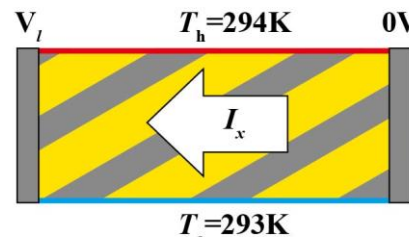


図4 計算に用いた解析条件

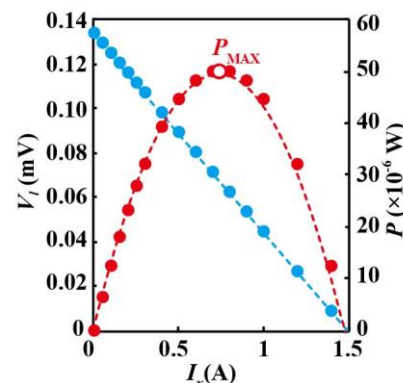


図5 計算に用いた解析条件

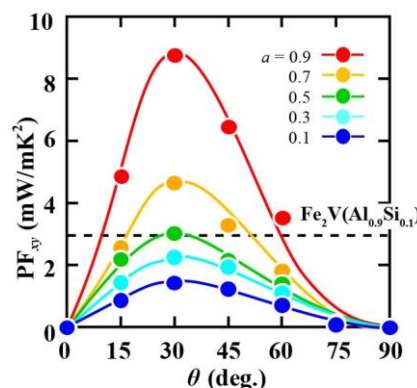


図6 計算によって得られた PF_{xy} ^[2]