

# 熱電デバイスの伝熱解析

## Heat Transfer Analysis of Thermoelectric Device

小林 公樹  
Hiroki KOBAYASHI

佐野 茂樹  
Shigeki SANÔ

藤田 道朝  
Michitomo FUJITA

箕輪 昌啓  
Masahiro MINOWA

中村 倫之  
Tomoyuki NAKAMURA

奥山 進  
Susumu OKUYAMA

熱電変換デバイスを効率良く機能させるため、コンピュータシミュレーションによる伝熱解析を検討している。工業炉に設置したデバイスの熱解析事例を紹介する。今回検討した平板受熱構造では輻射伝熱が主な伝熱経路であり、解析結果は実測値と良い一致を示した。熱電デバイス設計の支援技術としてシミュレーションの有用性を確認できた。

We are considering heat transfer analysis for improved efficiency operation of thermoelectric (TE) devices by computer simulation. We introduce a case of thermal analysis of TE devices installed in industrial furnace. Radiation heat transfer is primary heat transfer path in heat-receiving plate structure in this report. Results are well accorded with measured. We confirmed usefulness as assistive technology of the TE device.

### 1. はじめに

温度差を電気エネルギーに変換できる熱電変換デバイスは排熱の再利用による省エネルギー技術のひとつとして注目されている。

その潜在発電量は3.5 GWh/年とも言われている<sup>1)</sup>が、発電効率向上やコスト低減などいまだ多くの課題が存在し、開発が進められている<sup>2, 3)</sup>。

熱電変換デバイスを効率良く機能させるためには、使用部材の材質、構造、及び熱源に対する取り付け方法など多くの要因を調整する必要がある。

しかし実際に稼働している設備、たとえば工業炉や廃棄物焼却設備等では設備を停止させ予備検討を行える機会は限られている。また、対象とする熱源が数百度を超える高温の場合、安全性の観点から試験実施に対する制約が多い。

そのような理由により、実際に稼働する高温設備に対する適切な設計を行うのは非常に困難である。この問題に対応するため、当社ではコンピュータシミュレーションによる開発支援を進めている。

本報では当社所有工業炉で行った試験解析事例について紹介する。

### 2. 解析対象モデル

発電試験は当社三重事業所に設置されているディップフ

ォーミンググ式荒引線製造設備の予熱炉で行った。試験設備の解析モデルを図1に示す。

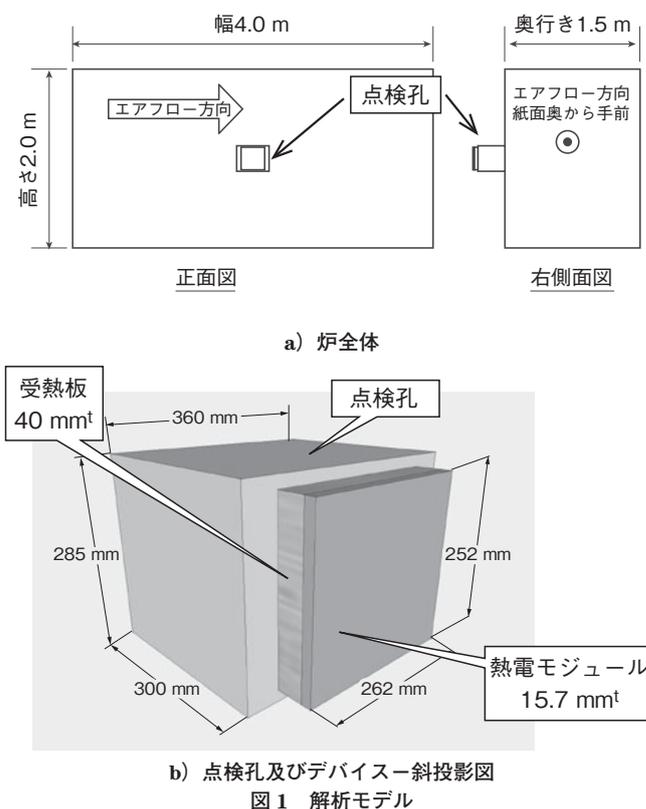


図1 解析モデル

炉は幅 4.0 m、奥行き 1.5 m、高さ 2.0 m の直方体とし、幅方向にエアフローが生じているものとした。

デバイスは炉側面の点検孔に取り付けた。点検孔は幅 360 mm、奥行き 300 mm、高さ 285 mm で、炉内側は開口しており、外側中央部にはデバイスが取り付けられている。デバイスは受熱板及び熱電モジュールの 2 部材で成り立っており、受熱板厚さは 40 mm、熱電モジュールの厚さは 15.7 mm とした。両者の幅は 262 mm、高さは 252 mm である。

この系におけるデバイスの最適形状を求めるための予備検討として、この系における主要伝熱経路の推定を行うこととした。

### 3. 解析条件設定

#### 3.1 メッシュモデル

今回のシミュレーションは放射を考慮した数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) で行った<sup>4)</sup>。

CFD では実モデルをメッシュ (格子) と呼ばれる微小区間に区切ったセルに分割し、離散化した上で解く。そのためメッシュの形状や密度に解が依存し、モデル化の際には十分な検討が必要である。

図 2 は点検孔及びデバイス部のメッシュ図である。格子状に区切られた部分が個々のメッシュに相当する。炉全体寸法に対しモジュール厚さは小さいことから、モジュール部では細かく、炉内部分では粗いメッシュとした。

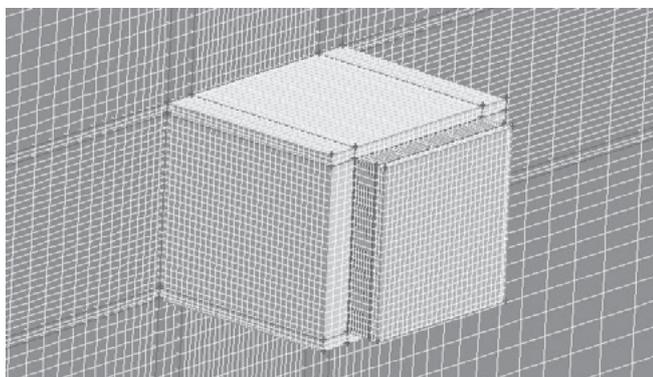


図 2 メッシュ例 (点検孔付近拡大)

#### 3.2 伝熱経路

このデバイスでは炉内空間に受熱面が露出しているため、伝熱経路としては ①空気による対流伝熱 ② (主として対向壁面からの) 放射伝熱、の 2 経路を想定した。

伝熱経路の概要図を図 3 に示す。

#### 3.3 境界条件

上記伝熱機構を考慮し、表 1 に示す境界条件設定を行った。

#### 3.4 評価位置

温度評価は、受熱板中央炉内側表面で行った。

### 4. 主伝熱経路推定

この設置環境において放射伝熱と対流伝熱のどちらが主

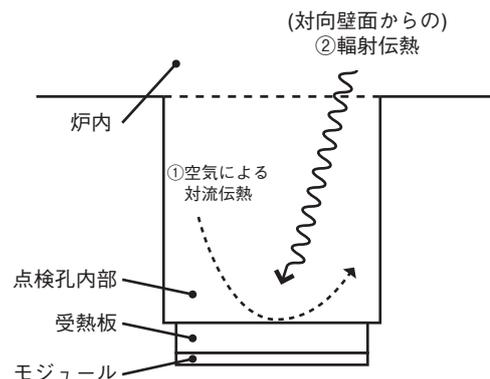


図 3 伝熱経路 (点検孔を上から見た図)

表 1 境界条件

項目	条件	備考
炉壁放射率	0.99[-]	-
炉壁温度	600 ~ 1000[°C] 100[°C] 刻み	-
炉内雰囲気温度	600 ~ 1000[°C] 100[°C] 刻み	-
炉内風速	0, 1, 2, 5[m/s]	-
受熱板熱伝導率	20°C : 20.5 ~ 800°C : 26.7[W/m·K]	温度依存性を考慮
モジュール熱伝導率	200°C : 2.12 400°C : 2.21[W/m·K]	-
点検孔壁面	断熱境界	-
モジュール低温側	20°C 定温境界	-

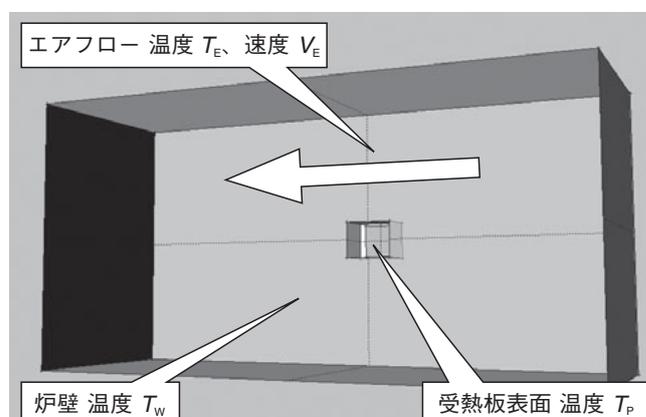


図 4 パラメータ説明 (炉内から点検孔を見た図)

な熱伝達経路を確認するため、炉壁温度、雰囲気温度、風速を変量し計算を行った。

炉内壁面温度を  $T_w$ 、炉内雰囲気温度 (エアフロー設定温度) を  $T_E$ 、エアフロー速度を  $V_E$ 、そして受熱板中央表面温度を  $T_p$  とする (図 4 参照)。

炉壁温度  $T_w$  と雰囲気温度  $T_E$  を変量し、受熱板中央温度  $T_p$  の変化を求めた。ここで炉内空気のエアフロー速度  $V_E$  は 1 m/s とした。結果を図 5 に示す。

$T_p, T_w, T_E$  [°C] について上記傾向の直線回帰式を求めたところ

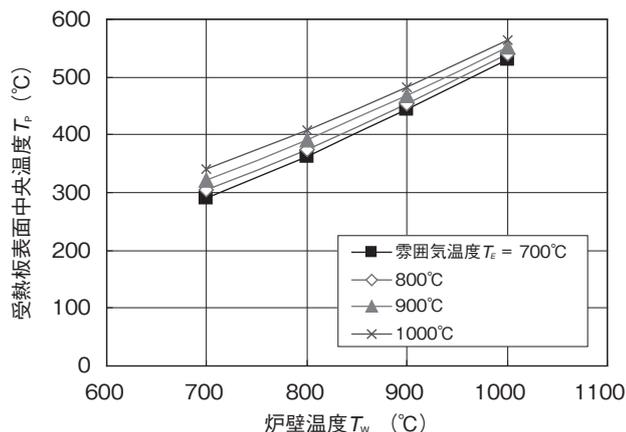


図5 炉壁温度，雰囲気温度依存性（風速 1 m/s）

$$T_p = 0.776 \times T_w + 0.141 \times T_e - 233$$

であり， $T_p$  は炉壁温度  $T_w$  の影響が大きいことが判った。

次に  $T_e$  を  $900^\circ\text{C}$  に固定し， $T_w$  と風速  $V_E$  を変量した時の  $T_p$  変化を求めた。結果を図6に示す。

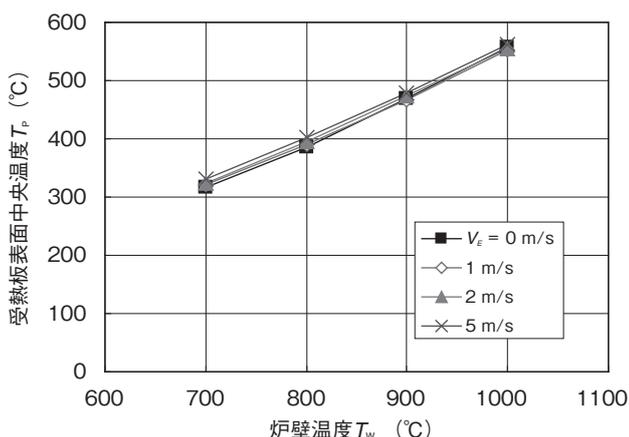


図6 炉壁温度，風速依存性

$T_p$  に対する  $V_E$  の影響はほとんどない。

これらの結果から，雰囲気から受熱板に対する熱の流入は少ない，すなわちデバイスに対する主な熱伝達経路は壁面からの輻射伝熱であるものと考えられる。

### 5. 実設備取付けデバイスとの比較

次に，この解析結果を検証するため，実設備でのデバイス温度測定結果との対比を行った。

デバイス及び取付け環境の温度測定点を図7に示す。

受熱板中央部分は受熱板の面内中心位置である。受熱板上端部は上端隅から縦横 10 mm 離れた点としている。なお，受熱板の材質は SUS430 である。

評価は

- a) 受熱板中央 炉内側表面
- b) 同 モジュール高温側
- c) 受熱板上端 炉内側表面
- d) 同 モジュール高温側

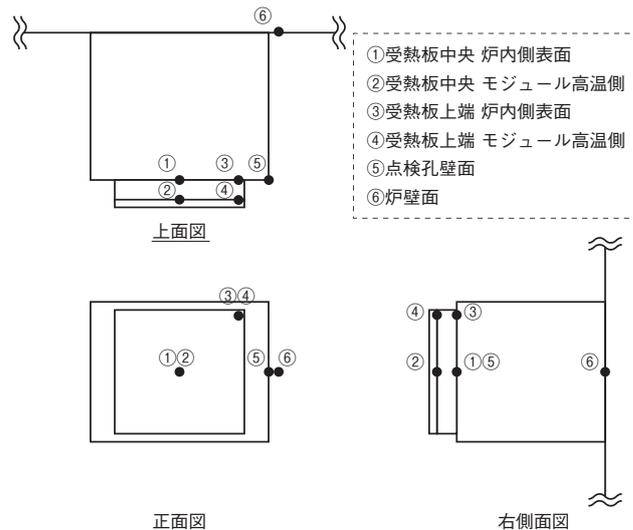


図7 温度測定点

e) 点検孔壁面

の5点で行った。

各点における比較結果を図8a)～e)に示す。

また，炉壁温度  $900^\circ\text{C}$ ，雰囲気温度  $900^\circ\text{C}$  のときの，デバイス近傍温度コンターマップを図9a)，b)に示す。

炉壁温度を基準にシミュレーションと実測値を比較したところ，受熱板表面，及びモジュール高温側温度に関しては良い一致を示した。

この結果より，点検孔に取り付けられたデバイスに対する伝熱機構は良好に模擬できているものと考えられる。

点検孔壁面温度は実測値に比べ  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  程度高い値となった。今回の解析で点検孔壁面は断熱境界としており，実際の壁面で生じている外界に対する伝熱は考慮していないため，その影響が現れたものと考えられる。

### 6. あとがき

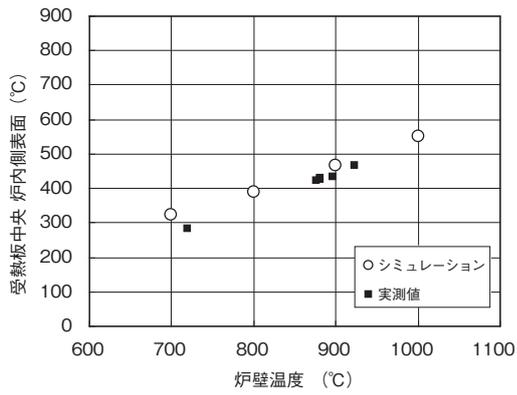
実設備（工業炉）を対象とし，熱電デバイスを取り付けた場合の温度推定をシミュレーションにより行った。

デバイス本体の中で発電に影響を与える受熱板温度，モジュール表面温度は良好に再現できており，熱伝達経路の模擬が行えたものと考えられる。これよりシミュレーションの有用性を確認できた。

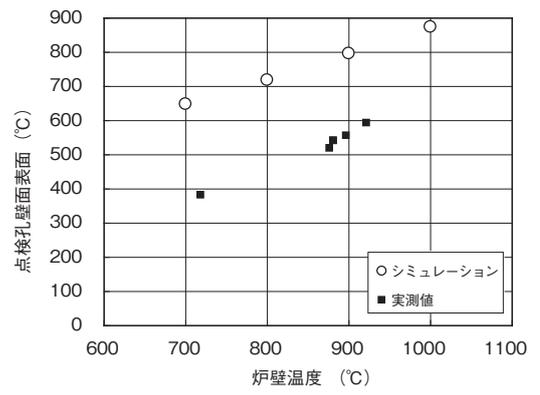
今後はデバイス構造検討・評価技術の一つとして，熱電デバイス実用化の支援につなげていく予定である。

### 参考文献

- 1) NEDO 再生可能技術白書，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010)
- 2) 日下 雅文，他：昭和電線レビュー，Vol.58, No.1, p.9 (2008)
- 3) 中村 倫之，他：昭和電線レビュー，Vol.58, No.1, p.5 (2008)
- 4) 成吉 郁馬，他：昭和電線レビュー，Vol.58, No.1, p.49 (2008)

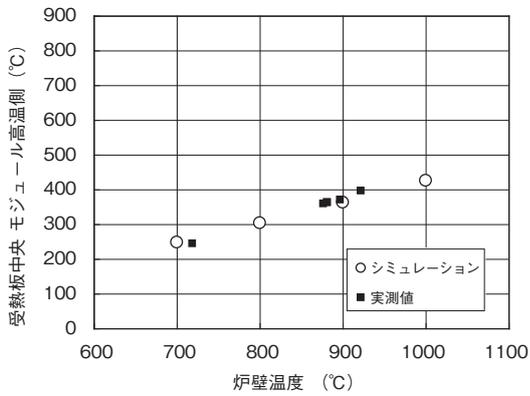


a) 受熱板中央, 炉内側表面温度比較

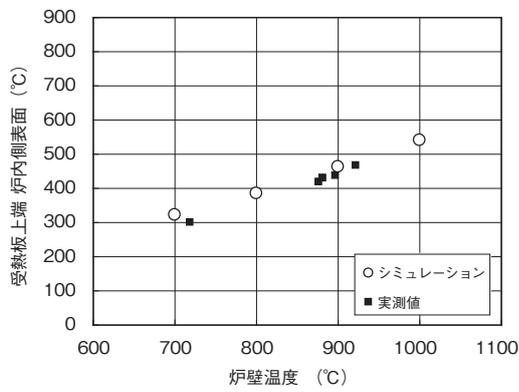


e) 点検孔壁面温度比較

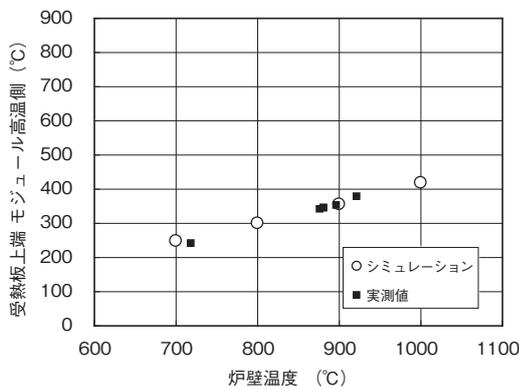
図8 実測値と計算値の比較



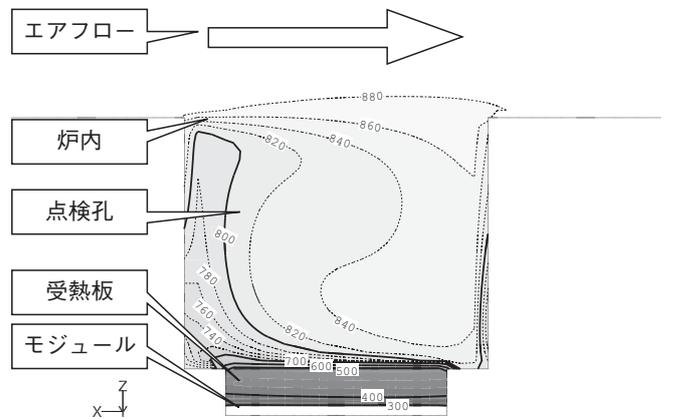
b) 受熱板中央, モジュール高温側温度比較



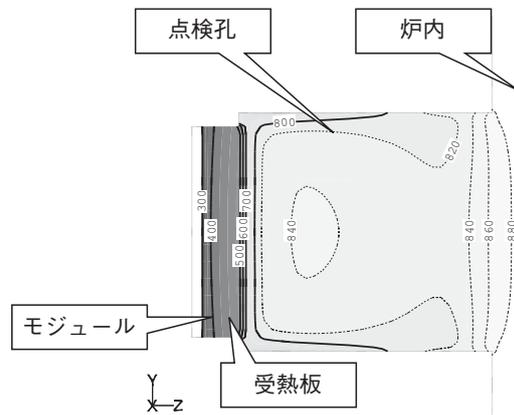
c) 受熱板上端, 炉内側表面温度比較



d) 受熱板上端, モジュール高温側温度比較



a) 中心面温度分布 (水平面)



b) 中心面温度分布 (垂直面)

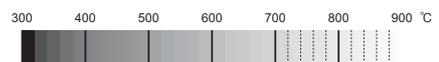


図9 デバイス近傍温度コンターマップ

昭和電線ケーブルシステム(株)

小林 公樹 (こばやし ひろき)

技術開発センター 有機材料開発グループ 主査

ケーブル部品, 材料の製造に関する

シミュレーションおよび開発業務に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

佐野 茂樹 (さの しげき)

技術開発センター 有機材料開発グループ 主査

ケーブル部品, 材料の製造に関する

シミュレーションおよび開発業務に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

藤田 道朝 (ふじた みちとも)

技術開発センター 有機材料開発グループ長

ケーブル部品, 材料の製造に関する

シミュレーションおよび開発業務に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

箕輪 昌啓 (みのわ まさひろ)

技術開発センター デバイス開発グループ長

熱電変換素子, 熱電変換モジュールと

熱電変換デバイスの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

中村 倫之 (なかむら ともゆき)

技術開発センター デバイス開発グループ

熱電変換素子, 熱電変換モジュールと

熱電変換デバイスの研究・開発に従事

昭和電線ビジネスソリューション(株)

奥山 進 (おくやま すずむ)

生産技術部 三重製造技術課