熱電発電モジュール形状が熱電発電ユニットの 発電特性に与える影響

正員 堀 康彦 (電力中研)

正員 伊藤 哲夫 (電力中研)

正員 葛間 泰邦 (電力中研)

Analysis on Thermoelectric Generating Characteristic influenced by Shape of module
Yasuhiko Hori, Member, Tetsuo Ito, Member, Yasukuni Kuzuma, Member
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

For utilizing waste heat effectively, a thermoelectric generation system that can directly convert heat energy into electric power has much possibility. In order to estimate the output power density and the efficiency of the system, it is needed to develop a simulation method of the thermoelectric generation mechanism and heat flow in the system.

First we made a thermal equivalent circuit in a thermoelectric generation unit as the basic unit of the thermoelectric generation system.

Second we developed a calculation program that can easily calculate the electric output power density and the efficiency. The radiation and the air conduction in the thermoelectric module also were considered. It was proved that the simulation method was appropriate, since the error by this method was in the range of 7% in electric power.

According to the above simulation, it can be made the several types of thermoelectric generator (ex. high efficiency-low power density type, high power density-low efficiency type) depending on thermal source conditions by changing the shape of module.

キーワード：熱電発電、シミュレーション、モジュール形状、出力密度、効率

1. まえがき

エネルギーの有効利用の観点から未利用エネルギーを活用できる技術の開発が望まれている。工場、発電所などから排出される未利用エネルギーは500 K程度以下の熱エネルギーが多く、それらのエネルギーを有効に利用することはエネルギー源の多くを海外に依存している日本にとって極めて重要なことである。それらの熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換できる技術の1つに熱電発電がある。

熱電発電のシステム化の研究は、海洋の温度差などの温度領域の熱源を対象とした検討⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾や高温側を353 K、低温側を293 Kの流体を熱源とした場合の検討⁽⁴⁾、近年ではゴミ焼却熱を熱源した場合の検討⁽⁵⁾などが行われている。これらの検討では、熱電素子と熱媒体の熱伝達部との組み合わせを考慮した発電特性の解析が行われている。例えば、J. Henderson は熱電素子と熱媒体の熱伝達部とを組み合わせた系において、素子温度を固定

しないで、熱源温度を固定し素子部の温度配分を決定する解析を行っている⁽¹⁾。また、B. Mathiprakasam らは、局所解析を進展させて熱交換器の流れ方向を考慮した解析を行っている⁽⁶⁾。さらに、梶川らは、海洋温度差発電(OTEC)を例として、システムの設計因子と熱電素子の性能因子とが、素子形状に及ぼす影響について解析を行っている⁽³⁾。これらの解析では、素子断面積/素子高さをパラメータとして素子の形状変化に対する発電特性(出力密度、効率)が解析されることが多い。またその場合、素子と熱源間の熱伝達を1つの熱伝達率で概略的に表している。しかしながら、想定される熱電発電システムは、素子と熱源間には多くの部材で構成されていることから、各部の温度落差を定量的に検討することが発電特性を評価するうえでより適切であると考えられる。

そこで、本研究では、熱電発電システムの発電特性を評価するために、高温側熱源から低温側熱源への伝熱を1次

元の熱等価回路で表し、素子と熱源間において構成される各部材での温度落差を定量的に考慮することによって、発電特性を求めるためのシミュレーションを構築した。また、熱電発電モジュールの発電特性の測定を行い本シミュレーションの妥当性について実験的に評価した。さらに、本シミュレーションを用いてモジュール形状の変化に対する発電特性への影響について検討した。

2. 発電特性に関するシミュレーションの構築

<2・1>熱電発電ユニットと熱等価回路

熱電発電システムは、熱電発電ユニットを基本単位として構成される。熱電発電ユニットを図1に示す。ユニットは熱電発電モジュール（以下 モジュールと記す）と高温側および低温側の伝熱板で構成し、モジュールはセラミック板で熱電素子を挟み込んだ構造とする。また、熱電発電ユニットの高温側熱源および低温側熱源はともに流体であると想定する。さらに、モジュールと伝熱板外壁とは直接接合されておらず、伝熱グリース等を介して圧接される構造とする。

本論文ではモジュール中に含まれる熱電素子の割合を素子占有率として定義する。具体的には、図2に示すモジュールの場合、素子占有率（ S_p ）は式（1）で表される。

$$S_p \text{ (\%)} = \frac{W \times L \times 16}{X_m \times Y_m} \times 100 \dots (1)$$

つまり、セラミック板上の半分の面積に素子が設置されている場合には、素子占有率は50%となる。なお、素子はセラミック板上に均一に配置されていると想定する。

図1の熱電発電ユニット中のモジュール形状（素子高さ、素子占有率）が発電特性に与える影響を計算するために、熱電発電ユニットの1次元の熱等価回路（図3）を導入した。本論文では出力密度をセラミック板の面積（ユニットの面積）当たりの発電電力として定義し、効率を入熱量

（ Q_{QQ1} ）に対する発電電力として定義する。各部の温度落差を定量的に検討するために、高温側流体から低温側流体までの熱流路で温度降下が発生すると考えられる部分をすべて熱抵抗に置き換えて図3の熱回路を構築した。各熱抵抗名は、高温側から、高温側境膜熱抵抗（高温側流体と伝熱板内壁間の熱抵抗）、高温側伝熱板熱抵抗、高温側接触熱抵抗、高温側セラミック板熱抵抗、素子熱抵抗、低温側セラミック板熱抵抗、低温側接触熱抵抗、低温側伝熱板熱抵抗、低温側境膜熱抵抗（低温側流体と伝熱板内壁間の熱抵抗）である。さらに、モジュール内で素子が設置さ

図2 熱電発電モジュールの断面図
Fig.2. Cross section of Thermoelectric module

図1 熱電発電ユニット
Fig.1. Thermoelectric generation unit

図3 熱電発電ユニットの熱等価回路図
Fig.3. Thermal circuit of thermoelectric generation unit

れていない空隙部の熱抵抗として、空気伝熱による熱抵抗と放射による熱抵抗を考慮した。また、素子部においては、熱伝導による熱量の他に素子部を流れる電流により発生するペルチエ吸・発熱および内部抵抗により発生するジュール熱も考慮した。

<2・2> 熱電発電ユニットにおける熱収支計算法

熱電発電ユニットにおいて、各構成部材の同一伝熱面の温度は均一であるとして計算を行う。

(1) 熱電素子部の熱伝導

熱電素子部の入熱量および放熱量は、素子内で発生するジュール熱の半分が低温側に、残り半分が高温側に流れると仮定すると式(2)、式(3)で表すことができる(7)。

$$QQ1 = (\alpha_p + |\alpha_n|) \cdot n \cdot THJ \cdot I - \frac{1}{2} \cdot (\rho_p + \rho_n) \cdot \frac{H}{W \cdot L} \cdot n \cdot I^2 + \frac{(\kappa_p + \kappa_n) \cdot W \cdot L \cdot n}{H} \cdot (THJ - TLJ) \quad \dots (2)$$

$$QQO = (\alpha_p + |\alpha_n|) \cdot n \cdot TLJ \cdot I + \frac{1}{2} \cdot (\rho_p + \rho_n) \cdot \frac{H}{W \cdot L} \cdot n \cdot I^2 + \frac{(\kappa_p + \kappa_n) \cdot W \cdot L \cdot n}{H} \cdot (THJ - TLJ) \quad \dots (3)$$

ここで、QQ1：素子部への入熱量

QQO：素子部からの放熱量

THJ：高温側素子温度、TLJ：低温側素子温度

α_p ：P型熱電素子のゼーベック係数

α_n ：N型熱電素子のゼーベック係数

ρ_p ：P型熱電素子の電気抵抗率

ρ_n ：N型熱電素子の電気抵抗率

κ_p ：P型熱電素子の熱伝導率

κ_n ：N型熱電素子の熱伝導率

$L \times W$ ：1素子の断面積、H：素子高さ

n：素子の対数、I：回路電流

また、モジュールの内部抵抗と発電電力を消費する外部抵抗が等しい場合の回路電流および発電電力は式(4)、式(5)で表すことができる。

$$I = \frac{W \cdot L \cdot (\alpha_p + |\alpha_n|) \cdot (THJ - TLJ)}{2 \cdot H \cdot (\rho_p + \rho_n)} \quad \dots (4)$$

$$P = QQ1 - QQO = \frac{W \cdot L \cdot n \cdot (\alpha_p + |\alpha_n|)^2 \cdot (THJ - TLJ)^2}{4 \cdot H \cdot (\rho_p + \rho_n)} \quad \dots (5)$$

式(5)より、発電電力は、1素子の断面積($L \times W$)に比例し、また素子間温度差($THJ - TLJ$)の2乗に比例する。

なお、素子高さおよび素子断面積はP型、N型とも同じとし、n対の素子を電気的には直列に、熱的には並列に接続している。

(2) 熱源と素子間の伝熱

ここでは、図3の熱電発電ユニットの熱等価回路の高温側流体(高温側熱源)と素子間および素子と低温側流体(低温側熱源)間の熱抵抗を考慮する。高温側熱源から低温側熱源への熱流路のうち素子部の断面積は他の部材よりも小さいため、ユニット内の熱流路断面積は一定ではない。熱流路断面積とは、各部材の伝熱面積のことである。そこで、図4のように各部材の熱流路を近似し熱抵抗の計算を行った。セラミック板部の熱流路断面積を変化させたのは、材質が α -アルミナで他の部材に比べて熱伝導率が小さく、ここでの熱流束の変化が生じやすいと考えたためである。なお、電極部の温度落差は、他の部材に対して薄く熱伝導率の大きい材料を用いていると想定し無視した。以下に、高温側熱源と素子間の熱抵抗を式(6)～式(9)に、低温側熱源と素子間の熱抵抗を式(10)～式(13)に示す。

$$RH1 = \frac{1}{\lambda_H \cdot S} \quad \dots (6)$$

$$RH2 = \frac{t_{alH}}{\kappa_{al} \cdot S} \quad \dots (7)$$

$$RH3 = \frac{R_{th}}{S} \quad \dots (8)$$

$$RH4 = \frac{t_{ce}}{\kappa_{ce} \cdot S \cdot \sqrt{S_p}} \quad \dots (9)$$

$$RL1 = \frac{1}{\lambda_L \cdot S} \quad \dots (10)$$

$$RL2 = \frac{t_{alL}}{\kappa_{al} \cdot S} \quad \dots (11)$$

$$RL3 = \frac{R_{th}}{S} \quad \dots (12)$$

$$RL4 = \frac{t_{ce}}{\kappa_{ce} \cdot S \cdot \sqrt{S_p}} \quad \dots (13)$$

図4 高温側流体から低温側流体までの熱流路

Fig.4. Model of heat flow from hot source to cold source

図5 計算フローチャート図
Fig.5. Simulation programming flow chart

ここで、RH1: 高温側境膜熱抵抗
RH2: 高温側伝熱板熱抵抗
RH3: 高温側接触熱抵抗
RH4: 高温側セラミック板熱抵抗
RL1: 低温側境膜熱抵抗
RL2: 低温側伝熱板熱抵抗
RL3: 低温側接触熱抵抗
RL4: 低温側セラミック板熱抵抗
 λ_H : 高温側流体熱伝達率
 λ_L : 低温側流体熱伝達率
S: ユニットの面積
 t_{a1H} : 高温側伝熱板の板厚
 t_{a1L} : 低温側伝熱板の板厚
 κ_{al} : 伝熱板の熱伝導率
Rth: 接触熱抵抗
 t_{ce} : セラミック板の板厚
 κ_{ce} : セラミック板熱伝導率
 S_p : 素子占有率

(3) 空隙部の伝熱

モジュール内の素子が設置されていない空隙部では放射および空気伝熱による高温側から低温側への伝熱が考えられる。モジュール内の放射伝熱は、高温側セラミック板と低温側セラミック板が平行で接近しているので形態係数は

どちらの方向も1として計算する。また、セラミック板の素子側の大部分には銅電極が接合されていると想定し、銅電極間で放射伝熱すると考える。なお、素子側面からの放射の影響は少ないと想定し考慮しなかった。さらに、空隙部の空気伝熱は、高温側と低温側の幅の狭い空間の場合には対流を考慮しない空気の熱伝導として扱うことができる⁽⁸⁾。そこで、対流を考慮しない空気の熱伝導のみの伝熱として計算する。これらのことを考慮し、モジュール内空隙部の放射伝熱および空気伝熱は、式(14)、式(15)で表すことができる⁽⁸⁾。

$$QQ2 = \frac{S1 \cdot \sigma \cdot (THJ^4 - TLJ^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon} - 1\right)} \dots (14)$$

$$QQ3 = \kappa_{air} \cdot (THJ - TLJ) \cdot \frac{S1}{H} \dots (15)$$

ここで、QQ2: 放射伝熱
QQ3: 空気伝熱
 $S1 = S \times (1 - S_p)$
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$
: Stefan-Boltzmann定数
 ϵ : 銅の放射率
 κ_{air} : 空気の熱伝導率

＜2.3＞発電特性に関するシミュレーション

式（2）～式（15）を基に、発電特性を計算するためのシミュレーションを構築した。シミュレーションの計算フローチャートを図5に示す。本シミュレーションは熱電発電ユニットの発電特性を評価するために、素子と熱源間において構成される各部材での温度落差を定量的に考慮し、各モジュール形状に対する発電特性を求めることができる。モジュール形状に関するパラメータは、素子占有率と素子高さである。

計算は、素子占有率、素子高さ、熱源温度、各部材の熱抵抗、接触熱抵抗、インピーダンス条件および素子物性値等を入力し、繰り返し計算により熱平衡状態時の出力密度および効率を求める方法で行う。本計算では、素子および構成部材の温度依存性も考慮しており、計算開始時に室温における素子物性値および構成部材の物性値を入力し、繰り返し計算時に補正を行っている。また、素子部についても、素子の高温側と低温側とで温度差が大きいので、素子を分割して分割部分ごとに温度依存性を考慮した素子物性値を求め、計算している。

3. 実験による検討

＜3.1＞供試モジュールと発電特性測定法

発電特性に影響を与えるパラメータとして素子占有率と素子高さの2つがある。熱計算を行う場合に、素子高さをパラメータとした場合には、素子熱抵抗は高さに比例し、比較的簡易に計算できる。一方、素子占有率をパラメータとした場合には、式（9）、式（13）～式（15）からわかるように、素子熱抵抗の他に放射伝熱、空気伝熱やセラミック板熱抵抗の影響をより考慮する必要がある。そこで、汎用性が高いと考えられる素子占有率をパラメータとしたモジュールを試作し、シミュレーションの妥当性を実験的に評価するために、発電特性の測定を行う。

試作したモジュールの仕様を図6に示す。試作したモジュールは、3種類あり、セラミック板の大きさと素子高さ、対数が同じで1素子の断面積だけが異なっている。式（1）に従って計算される試作モジュールの各素子占有率は、大きい方から53%、39%、17%である。

これら3種類のモジュールを図7に示す測定装置に供試して発電特性を測定する。この測定装置は、ヒータブロックから熱を供給し、熱量測定板、モジュール、熱量測定板を介して水冷されている冷却板で放熱する構造である。測定は、同種のモジュール2個を中央のヒータブロックの上下に配置し行う。モジュールと熱量測定板間には良好な熱伝達を得るために、接触部分に伝熱グリース（信越化学 KS-612）を塗布し、さらに押さえ付け治具によりモジュールを圧接する。実験では、モジュールのセラミック板の面積当たりの圧力が0.4～0.5 MPa程度になるように調整した。また、モジュールによって発生する発電電力は、モジュールごとに電子負荷装置（富士通電装製 EUL-150 αB）で消費する。

図6 試作した熱電発電モジュールの仕様
Fig.6. Specifications of thermoelectric module

図7 熱電発電モジュール特性測定装置
Fig.7. Principal constitution of measurement apparatus for thermoelectric module

＜3.2＞測定装置内の伝熱の検討

図7の測定装置における発電電力の実験値と図5のシミュレーションによって得られる計算値との比較を行うために、シミュレーションが適用できるように測定装置のモデル化を行う。シミュレーションによって計算値を得るためには、図3の各熱抵抗および高温側熱源温度、低温側熱源温度、構成部材の物性値等を代入する必要がある。

熱源温度は、図7に示すようにモジュールの上下にある熱量測定板の表面に設置されている熱電対の温度を用いる。これらの温度を、図3の高温側伝熱板外壁温度（TH3）と低温側伝熱板外壁温度（TL3）と考え、TH1 = TH3およびTL1 = TL3とする。つまり、図7の測定装置のモデルの場合、RH1、RH2、RL2、RL1はすべてゼロとなる。

表1 シミュレーションに用いた物性値

Table 1 Calculating conditions

熱電素子のゼーベック係数 (μ V/K)	$\alpha_p = -353.95 + 2.5652 \times T - 2.634 \times 10^{-3} \times T^2 - 2.2456 \times 10^{-7} \times T^3$ $ \alpha_N = -2478.1 + 18.498 \times T - 4.0842 \times 10^{-2} \times T^2 + 2.844 \times 10^{-5} \times T^3$
熱電素子の電気抵抗率 (Ω m)	$\rho_p + \rho_N = \{1.9863 + 1.7766 \times 10^{-2} \times (T - 273.15) - 3.2111 \times 10^{-5} \times (T - 273.15)^2\} \times 10^{-5}$
熱電素子の熱伝導率 (W/m K)	$\kappa_p + \kappa_N = \{1.2621 + 1.9366 \times 10^{-3} \times (T - 273.15)\} \times 2$
空気の熱伝導率 (W/m K)	$\kappa_{air} = 6.6645 \times 10^{-5} \times (T - 273.15) + 0.024517 \quad (9)$
セラミック板の熱伝導率 (W/m K)	$\kappa_{ce} = 86.041 \times 10^{(-1.1777 \times 10^{-3} \times T)}$ (10)

: T (K)

次にRH3、RH4、RL4、RL3の各熱抵抗の算出を行う。RH3およびRL3は熱的な接触状態を表す接触熱抵抗である。そこで、以下に接触熱抵抗の算出手順を示す。まず電子負荷装置へ電流を流さない状態を非発電時、電流を流して発電している状態を発電時と定義する。接触熱抵抗を求めるために、ヒータへの入力電力を一定にして、非発電時で装置全体が定常状態に達した後にモジュールの起電力とTH3とTL3の熱源温度を測定する。起電力と予め測定した素子物性値から素子間温度差を求め、この素子間温度差と素子熱伝導率により回路電流 $I=0$ として式(2)に代入し素子部の伝熱量を求める。一方、モジュール内の空隙部の伝熱量は、式(14)と式(15)より求める。計算に使用した物性値を表1に示す。なお、銅の放射率は $\epsilon = 0.8$ ⁽⁸⁾ とした。また、空気の熱伝導率は温度依存性を考慮した ⁽⁹⁾。それら合計の伝熱量が、RH3、RH4、RL4、RL3の熱抵抗を通過する。なお、供試モジュールの側面からの放熱量はモジュールへの入熱量に対して微少と想定し考慮しなかった。RH3+RH4+RL4+RL3の合計の熱抵抗は、式(16)になる。

$$RH3+RH4+RL4+RL3 = \frac{(TH3 - TL3) - (THJ - TLJ)}{QQ1+QQ2+QQ3 \dots (16)}$$

式(16)で求めた熱抵抗値のうち、半分がRH3+RH4、残り半分がRL4+RL3になると想定した。また、RH4、RL4は、図4で想定した熱流路に基づき、式(9)および式(13)より算出した。なお、セラミック板(材質α-アルミナ)の熱伝導率は温度依存性を考慮した ⁽¹⁰⁾。以上の方法により、非発電時のRH3、RH4、RL4、RL3の各熱抵抗を求めることができる。

ところで、シミュレーションによる発電電力の計算値を求めるためには、発電時の接触熱抵抗を求める必要がある。熱的な接触状態を表す接触熱抵抗は、温度による部材の熱膨張等の影響を受けると考えられる。実際の測定は各種モジュールについて、TH3の温度が約360K、約

図8 発電電力の計算値と実験値との比較

Fig. 8 Comparison between experimental output power and calculated one

400K、約430Kになるようにヒータの入力電力を調整し、空気で行った。各温度での非発電時にはTH3、TL3および起電力を測定し、発電時にはTH3、TL3および発電電力を測定した。なお、これらの測定は、ともに定常状態で行った。発電時のTH3の温度と非発電時のTH3の温度との差が小さく、また発電時のTL3の温度と非発電時のTL3の温度との差が小さい場合には、部材の熱膨張等による接触状態の変化が小さいと考えられるので、非発電時に算出した接触熱抵抗を、発電時にも適用できると想定した。

そこで、発電特性の計算値は、定常状態での熱量測定板表面に設置されている熱電対の温度をTH3、TL3に代入し、前述の方法で求めたRH3、RL3の接触熱抵抗、

表2 計算条件

Table2 Calculating conditions for simulation

熱源温度	高温側	$TH1 = 473\text{ K}$
	低温側	$TL1 = 303\text{ K}$
流体熱伝達率	高温側	$\lambda H = 5000\text{ (W/m}^2\text{K)}$
	低温側	$\lambda L = 5000\text{ (W/m}^2\text{K)}$
性能指数		$Z = 2.5 \times 10^{-3}\text{ (1/K)}$
ゼーベック係数 電気抵抗率 熱伝導率		$\alpha_P = \alpha_N = 200\text{ (}\mu\text{V/K)}$ $\rho_P = \rho_N = 1.30 \times 10^{-5}\text{ (}\Omega\text{ m)}$ $\kappa_P = \kappa_N = 1.23\text{ (W/m K)}$
伝熱板の板厚	高温側	15 mm
	低温側	10 mm
セラミック板厚		1.0 mm
インピーダンス条件		内部抵抗=外部抵抗
接触熱抵抗		$1.0 \times 10^{-4}\text{ (m}^2\text{K/W)}$ ⁽¹¹⁾

RH4、RL4のセラミック板熱抵抗および実験時に設定した電子負荷装置の抵抗値を代入し図5のシミュレーションのフローチャートに基づき求めた。

一方、発電電力の実験値は、最大発電電力が得られるように電子負荷装置の抵抗値を、内部抵抗とほぼ同等に設定し、定常状態で発電電力を測定した。

<3.3>実験値と計算値との比較

モジュール測定装置での発電電力の実験値とシミュレーションによって得られる計算値との比較を図8に示す。図8の高温側熱源温度は、モジュールのヒートブロック側に設置されている熱量測定板の熱電対の温度である。図8より、熱源温度が変化しても発電電力の計算値/実験値の比は0.93～1.00の範囲にあり、実験値と計算値が良く一致していることがわかる。また、素子占有率の異なる3種類のモジュールについても、素子占有率による大きな相違は認められず、計算値と実験値とは良く一致している。

以上の結果からモジュール形状の異なる種々の熱電発電ユニットに対して本シミュレーションは適用可能であると判断できる。

4. モジュール形状が発電特性に与える影響

本シミュレーションを用いて、モジュール形状である素子高さおよび素子占有率の変化に対する発電特性への影響について検討する。

図1の熱電発電ユニットを検討モデルとする。熱源温度、インピーダンス条件、素子物性値等の計算条件を表2に示す。熱源媒体は流体を想定し、高温側熱源温度473 K、低温側熱源温度303 Kで一定とする。伝熱板内壁と熱源媒体である流体間の熱伝達率は、高温側、低温側ともに5000 W/m²Kで一定とする。伝熱板には、熱伝導率が高いアルミニウムを用い、板厚は高温側15 mm、低温側10 mmとする。なお、高温側伝熱板の板厚は、高温側流体として高温加圧水(473 K、1.6 MPa)を想定し

表3 計算結果例

(素子高さ3 mm、素子占有率60%の場合)

Table 3 Calculation results

出力密度	2.65 kW/m ²
効率	5.27 %
THJ	452.3 K
TLJ	321.1 K
QQQ1	50234 W/m ²
QQ1	49201 W/m ²
QQ2	472 W/m ²
QQ3	561 W/m ²
RH1=RL1	$2.0 \times 10^{-4}\text{ (K/W)}$
RH2	$6.35 \times 10^{-5}\text{ (K/W)}$
RL2	$4.23 \times 10^{-5}\text{ (K/W)}$
RH3=RL3	$1.0 \times 10^{-4}\text{ (K/W)}$
RH4	$5.13 \times 10^{-5}\text{ (K/W)}$
RL4	$3.58 \times 10^{-5}\text{ (K/W)}$

但し、ユニットの面積1 m²当たりの計算結果

図9 モジュール形状と出力密度との関係

Fig.9. Relation between the shape of module and power density

ていることから、耐圧性を考慮し低温側よりも厚くしている。また、モジュールと伝熱板は直接接合されていないので接触熱抵抗を考慮する。また、熱電素子の性能指数は、モジュール形状の変化による発電特性への影響について検討するため、すべての温度領域で $Z = 2.5 \times 10^{-3}\text{ (1/K)}$ ⁽¹²⁾とする。これらの計算条件をもとに図5のフローチャートに基づき計算を行った。なお、セラミック板(材質: α -アルミナ)の熱伝導率 ⁽¹⁰⁾ および伝熱板(材質: アルミニウム)の熱伝導率 ⁽⁹⁾ は温度依存性を考慮した。

計算結果の1例を表3に示す。表3は、素子高さ3 mm、素子占有率60%の場合のユニットの面積1 m²

図10 モジュール形状と効率との関係
Fig.10. Relation between shape of module and efficiency

当たりの発電特性と各熱流束および各部の熱抵抗をまとめたものである。なお、ユニットの面積 1 m^2 の場合に素子占有率が60%であるので、全素子断面積は 0.6 m^2 となる。便宜上、対数を $n = 5000$ 対 (P型素子とN型素子の対)、1素子の断面積を $L \times W = 0.6 / (2 \times n) = 6.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ として計算を行った。表3に示したモジュール形状では、放射伝熱 (QQ2) および空気伝熱 (QQ3) はQQ1に対して微少であるため、放射伝熱および空気伝熱の影響は無視できる。

図9にモジュール形状と出力密度との関係を示す。出力密度は素子占有率に対して上に凸となり、素子高さが高いほど極大値は高占有率側に移動することがわかった。また、素子高さ0.5 mmの場合、素子占有率が40%より大きくなると出力密度は低下する傾向にある。この要因は、式(5)を用いて説明できる。素子占有率が大きくなると、式(5)中の「 $W \times L \times n$ 」の項が大きくなるが、「 $(T_H J - T_L J)^2$ 」の項は逆に小さくなる。従って、発電電力の増減は、これらの項の値の増減によって決定される。素子高さ0.5 mmの場合では、素子占有率が40%より大きい領域において、「 $(T_H J - T_L J)^2$ 」の項の減少が、「 $W \times L \times n$ 」の項の増加に勝るために、占有率の増加とともに、出力密度は減少する結果となる。

図10にモジュール形状と効率との関係を示す。素子占有率の大きいところでは、素子高さが高いほど、素子占有率が小さいほど、効率は高い傾向にある。また、素子占有率20%以下で素子高さの高いほど効率の低下は大きい。これは、図11に示すように、素子占有率20%以下の場合には素子高さが高いほどユニットへの入熱量 (QQQ1) に対して素子部への入熱量 (QQ1) の割合が小さくなり、逆に放射伝熱 (QQ2) や空気伝熱 (QQ3) による発電に寄与しない熱量の割合が多くなるためである。図11の熱流束は、式(2)、式(14)お

※ () 内は、各モジュール形状での素子間温度差
図11 素子占有率10%の場合の素子高さの相違による熱流束と素子間温度差の変化

Fig.11. Relation between element height and heat flux

図12 効率と出力密度との関係

Fig.12. Relation between efficiency and power density

よび式(15)により求めることができる。図11において、素子高さを変数とした場合には、図中に示すように素子間温度差 ($T_H J - T_L J$) も同時に変化するため、図11に示す熱流束の割合となる。

さらに、モジュール形状を変化させたときの出力密度と効率との関係を図12に示す。図12より出力密度と効率が同時に最大となるモジュール形状はないことが分かる。また、対象とする熱源の条件に応じてモジュール形状を変えることで、低出力密度・高効率の発電器や高出力密度・低効率の発電器が設計可能であると考えられる。

5. まとめ

(1) 熱電発電システムの発電特性を評価するために、素子と熱源間において構成される各部材での温度落差を定

量的に考慮し、熱電発電ユニット内の各モジュール形状に対する発電特性を求めるためのシミュレーションを構築した。

(2) 構築したシミュレーションの妥当性を評価するために、素子占有率の異なる3種類のモジュールを試作し、高温側熱源温度を変化させた場合の発電電力について比較を行った。その結果、発電電力の計算値/実験値の比は0.93~1.00の範囲にあり計算値と実験値とは良く一致し、モジュール形状の異なる種々の熱電発電ユニットに対して本シミュレーションは適用可能であると判断できる。

(3) 本シミュレーションを用いてモジュール形状の変化に対する発電特性への影響について検討した結果、対象とする熱源の条件に応じてモジュール形状を変えることで、低出力密度・高効率の発電器や高出力密度・低効率の発電器が設計可能であると考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり素子性能の測定にご協力頂いた湘南工科大学 梶川武信教授、勝部 泉氏に深く感謝いたします。

(平成9年11月4日受付、同10年3月27日再受付)

文献

- (1) Jon Henderson : "ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER-THERMOELECTRIC GENERATOR SYSTEM", 14th IECEC, 1835 (1979)
- (2) 梶川、宮田、太田、平林 : 「低温落差利用熱電発電」、電子技術総合研究所調査報告 第208号 (1983)
- (3) 梶川、太田、宮田 : 「低温落差エネルギー利用の熱電素子の形状因子」、電子技術総合研究所彙報 第48巻 第3号 (1984)
- (4) K.Matsuura, et al. : "DESIGN OPTIMIZATION FOR A LARGE SCALE, LOW TEMPERATURE THERMOELECTRIC GENERATOR", 11th ICT, 10 (1992)
- (5) 梶川、伊藤、勝部 : 「焼却施設の燃焼熱利用熱電発電」、電気学会研究会資料、ESC-94-13 (1994年)
- (6) B.Mathiprakasam, et al. : "ANALYTICAL MODEL FOR PREDICTING THE PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC GENERATORS", 4th ICTEC, 61 (1982)
- (7) 菅 : 「熱電半導体」、槇書店、p260, (1966)
- (8) 西川、藤田 : 「伝熱学」 理工学社 (1992)
- (9) 日本機械学会編 : 「伝熱工学資料 (改訂第4版)」、丸善、p314 (1989)
- (10) 日本熱物性学会編 : 「熱物性ハンドブック」、養賢堂、p260 (1990)

- (11) J.G.Stockholm and P.M.Schlicklin : "INDUSTRIAL THERMOELECTRIC COOLING IN THE KILOWATT RANGE", 6th ICTEC, 83 (1983)
- (12) R.S.Caputo, V.C.Truscillo : "TWO-WATT RADIOISOTOPE POWER GENERATORS FOR UNDERWATER APPLICATIONS", 9th IECEC, 637 (1974)

堀 康彦

(正員) 1966年9月9日生。1989年3月筑波大学第三学群基礎工学類卒業。1991年3月筑波大学大学院工学研究科中退。同年4月(財)電力中央研究所入所。現在、同所横須賀研究所電力部主任研究員。熱電変換に関する研究に従事。

伊藤 哲夫

(正員) 1948年1月22日生。1966年3月横須賀工業高校電気科卒業。同年4月(財)超高压電力研究所入所。1977年7月(財)電力中央研究所入所。現在、同所横須賀研究所電力部主任研究員。電力ケーブル線路等の熱解析に関する研究に従事。

葛間 泰邦

(正員) 1945年3月29日生。1969年3月関東学院大学工学部二部電気工学科卒業。1963年(財)超高压電力研究所入所。1977年7月(財)電力中央研究所入所。主として、送電・変電・配電設備の大電流に関する研究に従事。現在、短絡試験担当兼電力部上席研究員。