研究論文

有限要素シミュレーションに基づく傾斜棒状 Ni/Mg₂Si 複合材料の熱電特性に及ぼす構造条件の影響に関する定量解析

伊藤 孝至*

名古屋大学大学院工学研究科化学システム工学専攻, 〒464-8603 名古屋市千種区不老町.

Quantitative Analysis on Influence of Structural Conditions on Thermoelectric Properties of Tilted Rod-Ni/Mg₂Si Composites Based on Finite Element Simulation

Takashi ITOH*

Dept. Chemical Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan.

Received September 9, 2018; Revised September 30, 2018; Accepted October 2, 2018

ABSTRACT

The rod-Ni/Mg₂Si composites with anisotropy in the thermoelectric properties were focused on, and the influence of the structural conditions (volume fraction and tilt angle of Ni rod) in the composites on the thermoelectric properties was investigated using a finite element simulation. The mixture laws in the thermoelectric properties were verified from the simulation results. The relations between the thermoelectric properties of the tilted rod-Ni/Mg₂Si composites and the structural conditions were quantitatively clarified. Furthermore, the thermoelectric performance of the tilted composites was calculated using the clarified quantitative relations, and the optimum structural conditions bringing the maximum thermoelectric performance were predicted.

KEY WORDS

finite element simulation, magnesium silicide, nickel, composite, thermoelectric properties

1 緒 言

Mg₂Si は、地球の地殻に豊富に存在し非毒性な元素である Si と Mg から成る n 型熱電化合物である。Mg₂Si を用いた高性能モジュールは、300~600°C の温度範囲での熱電発電用途に期待されている。従来の熱電モジュールは、p 型と n 型の熱電素子が電極を介して交互に直列に連結した Π 型構造を有している。n 型である Mg₂Si を用いて Π 型構造の熱電モジュールを製造する際には、Mg₂Si と同等な熱電性能と熱膨張係数を有する p 型材料が必要となる。p 型 Mg₂Si 系材料の研究は報告されているが¹⁻⁷⁾、十分な熱電性能を有する材料の開発に至っていないのが現状である。Mg₂Si の破壊靱性は、Al₂O₃ の約 20%、Bi₂Te₃ の約 60% 程度と低いため⁸⁾、Π 型熱電モジュールの製造時や使用時に熱応力による亀裂の発生が素子破壊の問題となる。

ところで、異なる性質を有する材料から構成される複合材料は、一般的に機械的特性や機能的特性を向上させるために

用いられる。脆性的な Mg₂Si を延性金属と組み合わせた複合材料では、機械的特性の向上が期待できる。また、逆蛍石型結晶構造を有する Mg₂Si 化合物は、その熱電特性（ゼーベック係数、電気抵抗率および熱伝導率）において等方的であるが、金属と Mg₂Si の複合材料では、その構造形態に応じて熱電特性に異方性を与えることが可能となる。例えば、熱電変換材料と金属が交互に積層した積層複合材料は、積層に平行および直角方向の熱電特性に異方性が現れる。異方性を有する熱電変換材料を傾斜させることによって、垂直方向に熱流を与えると横方向に熱起電力（電位差）が発生する現象（横方向熱電効果）に関する研究が多く報告されている⁹⁻¹⁹⁾。この現象を利用すれば、Π 型構造モジュールのような n 型と p 型の両方の材料を使用することなく、熱電特性に異方性を有するバルク体のみを使用する新しいタイプの熱電モジュールが期待できる。

ニッケルは、一般的に Mg₂Si 熱電材料と同等の線膨張係数 ($14 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)²⁰⁾ を有するため、金属/Mg₂Si 複合材料の製造における有望な材料の 1 つであり、n 型のゼーベック

* Corresponding author, E-mail: itoh.takashi@material.nagoya-u.ac.jp

ク係数も有する。以前の研究^{18,19)}では、熱電特性に異方性を有する傾斜 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Ni}$ 積層複合材料に注目して、複合材料の熱電特性に対する構造条件 (Mg_2Si 層の厚さと積層の傾斜角度) の影響を、3次元有限要素シミュレーション (FES) を用いて調査した。本研究では、 Mg_2Si マトリックス中に Ni 棒を一方向に配置した棒状 $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 複合材料に着目した。この構造形態の複合材料に着目した理由としては、傾斜積層複合構造の素子に比べて粉末冶金プロセスでの製造が比較的容易であること、使用環境下での Mg_2Si と Ni の接合界面経由の酸化に伴う性能劣化の防止に有利であることが挙げられる。また、この構造形態は、積層構造のものと同様に熱電特性に異方性をもたらすが、その熱電特性に関してはほとんど解明されていないのが現状である。そこで、棒状 $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 複合材料の熱電特性に及ぼす構造条件 (Ni 棒の体積分率および傾斜角度) の影響について FES を用いて調査し、その結果に基づいて最大の熱電性能となるこの複合材料の構造条件を予測した。

2 実験方法

棒状 $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 複合材料の熱電特性を評価するために、伝熱と電気の連成解析を可能にする3次元有限要素解析ソフトウェア (ANSYS Release 18.0) を使用した。棒状 $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 複合素子モデル (Fig. 1) および Ni ^{21,22)} と Mg_2Si ²³⁾ の熱電特性の温度依存性データを、素子モデルの開放起電力と内部抵抗を見積もるために用意した。Fig. 1 のモデル A および B は、熱電特性における複合則および構造条件 (Ni 棒の体積分率および傾斜角度) の影響をそれぞれ調べるためのものである。2種類の素子モデルは、同じ寸法 (幅: $w = 40 \text{ mm}$, 高さ: $h = 10 \text{ mm}$, 厚さ: $t = 2 \text{ mm}$) を有する。両素子モデルにおいて、素子の横両側面での電極板との接合を想定し、平行に並ぶ正方形 Ni 棒の中心線間の距離 (d) は、素子モデルの厚さ (t) と同じであるという条件 (即ち $d = t = 2 \text{ mm}$) に固定

Fig. 1 Two models of rod- $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ composites for FES; (a) Model A and (b) Model B. (HC: heat current, EC: electric current)

した。また、両素子モデルに与える温度差 (ΔT) は、 400°C (高温側: 500°C , 低温側: 100°C) に固定した。傾斜角度 (θ) は、素子の Ni 棒と水平面との間の角度である。Ni 棒の体積分率 (v_f) は、以下のように素子モデルの幾何形状に基づいて定義される。

$$v_f = \frac{b^2}{td} = \frac{b^2}{t^2}, \quad (1)$$

ここで、 b は正方形 Ni 棒の辺の長さ (厚さ) である。

Fig. 2 に、FES を用いて 400°C の温度差を与えて得られた素子モデル表面の電圧分布の例を示す。温度差を与える方向 (熱流の方向) は、モデル A では横方向、モデル B では縦方向である。モデル B (Fig. 2 (c)) では、いわゆる横方向熱電効果が発現することが分かる。素子内の電位差と電流との線形関係から、素子の開放起電力 (V_o) と内部抵抗 (R) を見積もることができる。所定の温度差における素子の見掛け上のゼーベック係数 (S) と電気抵抗率 (ρ) は、それぞれ次式¹⁸⁾で算出した。

$$\begin{cases} S = -\left(\frac{V_o}{\Delta T}\right) & (\text{Model A}) \\ S = -\left(\frac{V_o}{\Delta T}\right)\left(\frac{h}{w}\right) & (\text{Model B}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho = R\left(\frac{ht}{w}\right) \quad (\text{Models A \& B}) \quad (3)$$

3 結果および考察

3.1 棒状 $\text{Ni}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 複合材料の熱電特性における複合則

Ni 棒の体積分率 (v_f) と素子モデル A における Ni 棒に平行方向のゼーベック係数 $S_{\parallel}$ と直角方向のゼーベック係数 $S_{\perp}$ との関係、 v_f と異方性 ($S_{\perp}/S_{\parallel}$) との関係とともに Fig. 3 に示す。この図中のそれぞれの記号は、異なる v_f における素子モデル A の式 (2) で算出した FES の結果である。 $S_{\parallel}$ の絶対値は、 v_f が 0.1 まで急激に減少しその後はわずかに減少した。一方、 $S_{\perp}$ の絶対値は、 v_f とともに減少しその減少率は増大し

Fig. 2 Voltage distributions of three types of composite elements with volume fraction of Ni rod of 0.2; (a) Model A with tilt angle of 0° , (b) Model A with tilt angle of 90° and (c) Model B with tilt angle of 50° .

Fig. 3 Changes of Seebeck coefficients of orthogonal and parallel directions and anisotropy for volume fraction of Ni rod.

た。ゼーベック係数の異方性は、 v_f が約0.5で最大値をとり、その値は8.5に達した。

体積分率 v_f に対する電気抵抗率 $\rho_{||}$ と $\rho_{\perp}$ の変化を異方性 ($\rho_{\perp}/\rho_{||}$) とともに Fig. 4 に示す。この図中のそれぞれの記号は、異なる v_f における式 (3) で算出した FES の結果である。電気抵抗率 $\rho_{||}$ の値は、ゼーベック係数 $S_{||}$ と同様に v_f が 0.1 まで大きく低下しその後は徐々に減少した。 $\rho_{\perp}$ の値は、 v_f とともにほぼ直線的に減少し、その変化は $S_{\perp}$ の変化と大きく異なっていた。電気抵抗率の異方性 ($\rho_{\perp}/\rho_{||}$) は、 v_f が約 0.4 で最大となり、その値は 17.4 に達した。棒状 Ni/Mg₂Si 複合材料は、電気抵抗率の異方性も大きいことが確認された。

以前の研究¹⁸⁾では、Mg₂Si/Ni 積層複合材料の熱電特性がそれらの複合則によく従うことを報告した。積層複合材料の場合を参考にすると、棒状 Ni/Mg₂Si 複合材料のゼーベック係数および電気抵抗率の複合則は、この複合材料の構造に基づいて以下のようにそれぞれ表される。

$$\begin{cases} S_{||}(v_f) = \frac{v_f \rho_{MS} S_N + (1-v_f) \rho_N S_{MS}}{v_f \rho_{MS} + (1-v_f) \rho_N} \\ S_{\perp}(v_f) = \frac{\sqrt{v_f} \rho_{MS} \left\{ \frac{\sqrt{v_f} \kappa_{MS} S_N + (1-\sqrt{v_f}) \kappa_N S_{MS}}{\sqrt{v_f} \kappa_{MS} + (1-\sqrt{v_f}) \kappa_N} \right\} + (1-\sqrt{v_f}) \left\{ \sqrt{v_f} \rho_N + (1-\sqrt{v_f}) \rho_{MS} \right\} S_{MS}}{\sqrt{v_f} \rho_{MS} + (1-\sqrt{v_f}) \left\{ \sqrt{v_f} \rho_N + (1-\sqrt{v_f}) \rho_{MS} \right\}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho_{||}(v_f) = \frac{\rho_N \rho_{MS}}{v_f \rho_{MS} + (1-v_f) \rho_N} \\ \rho_{\perp}(v_f) = \frac{\left\{ \sqrt{v_f} \rho_N + (1-\sqrt{v_f}) \rho_{MS} \right\} \rho_{MS}}{(1-\sqrt{v_f} + v_f) \rho_{MS} + (\sqrt{v_f} - v_f) \rho_N} \end{cases}, \quad (5)$$

ここで、 κ は熱伝導率であり、添字 MS および N は材料 Mg₂Si および Ni をそれぞれ意味する。以前の研究¹⁸⁾で同じ温度条件で $v_f = 0$ と 1 におけるモデル A での FES から見積もった Mg₂Si と Ni の各単体の熱電特性 (S, ρ, κ) から、 $S_{||}$ 、 $S_{\perp}$ 、 $\rho_{||}$ および $\rho_{\perp}$ を式 (4) および (5) を用いて算出した。Mg₂Si と Ni の各単体の熱電特性 (S, ρ, κ) を Table 1 に示す。Fig. 3 中の 2 つの実線は、式 (4) で示されるゼーベック係数の複合則を表しており、破線は、ゼーベック係数の異方性を表している。

Table 1 TE properties of Mg₂Si and Ni obtained from FES (Model A)¹⁸⁾

Material	S (μ V/K)	ρ ($\mu\Omega$ m)	κ (W/mK)
Mg ₂ Si	-229.4	21.90	4.25
Ni	-21.1	0.22	67.20

Fig. 4 Changes of electrical resistivities of orthogonal and parallel directions and anisotropy for volume fraction of Ni rod.

Fig. 5 Changes of Seebeck coefficient estimated from FES for tilt angle of Ni rod with different volume fraction of Ni rod.

同様に、Fig. 4 中の 2 つの実線および破線は、式 (5) で示される電気抵抗率の複合則および異方性をそれぞれ表している。2 種類の Ni 棒を配向した複合材料の FES から見積もられる見掛け上のゼーベック係数および電気抵抗率は、それらの複合則によく従うことが分かる。

3.2 傾斜棒状 Ni/Mg₂Si 複合材料の特性に及ぼす構造条件の影響

Fig. 5 は、体積分率の異なる素子 (モデル B) の傾斜角度に対するゼーベック係数の変化を表す。この図中のそれぞれ記号は、異なる体積分率 v_f における式 (3) で見積もられた FES の結果である。ゼーベック係数の絶対値は、傾斜角度 0° と 90° でほぼゼロに等しく、Ni 棒の体積分率に関わらず約 50° の傾斜角度で最大になった。ゼーベック係数と構造条件 (体積分率と傾斜角度) との間の理論的關係は、以前の研究¹⁸⁾で報告したように一般的に以下の式で表される。

$$S(v_f, \theta) = \{S_{\perp}(v_f) - S_{\parallel}(v_f)\} \cos \frac{\pi}{180} \theta \cdot \sin \frac{\pi}{180} \theta \quad (6)$$

式(6)を次のように変形すると、左辺は傾斜角度のみの関数となる。

$$\frac{S(v_f, \theta)}{S_{\perp}(v_f) - S_{\parallel}(v_f)} = \cos \frac{\pi}{180} \theta \cdot \sin \frac{\pi}{180} \theta \quad (7)$$

$S/(S_{\perp} - S_{\parallel})$ と θ との関係プロットした結果を Fig. 6 に示す。素子モデル B を用いた FES の結果を示すこの図のすべての記号は、傾斜角度の関数として 1 つの曲線上に存在したが、それらは式(7)で示される破線から大きく逸脱する結果となった。FES の結果と理論的な関係の違いは、複合材料の構造や電極接続の形態に起因するものと考えられる。しかし、その原因は十分には明らかではなく、更なる調査が必要である。FES から見積もられるゼーベック係数と傾斜角度との関係を定量的に表現できるように、式(7)の修正を試みた。理論的根拠はないが、式(7)の右辺に比例定数と傾斜角度の冪乗の修正項を乗じて得られる式(8)を採用した。式(8)に含まれる比例定数と傾斜角度の冪乗の修正項は、複合材料素子の構造に由来する物理的な意味を持つものではなく、経験的に決定された。比例定数は、FES で求まる $S/(S_{\perp} - S_{\parallel})$ と理論値との差異を補正するための 1 以下の数値で、傾斜角度の冪乗については、 $(\theta/90)$ として 0~1 の範囲で変化する無次元化した変数の冪乗の形式で表現することで、 θ に対する $S/(S_{\perp} - S_{\parallel})$ の変化が理論式の関係より低角領域で低めに抑えられるように補正を加えている。

$$\frac{S(v_f, \theta)}{S_{\perp}(v_f) - S_{\parallel}(v_f)} = 0.882 \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.330} \cdot \cos \frac{\pi}{180} \theta \cdot \sin \frac{\pi}{180} \theta \quad (8)$$

式(8)中の比例定数と傾斜角度の冪指数は、最小二乗法に基づく逐次近似により決定した数値である。式(8)の関係は、Fig. 6 中の実線で表される。傾斜棒状 Ni/Mg₂Si 複合材料のゼーベック係数は、修正式(8)を用いて定量的に表すことができる。

Fig. 6 Change of $S/(S_{\perp} - S_{\parallel})$ for tilt angle of Ni rod with different volume fraction of Ni rod together with two curves expressed with Eqs. (7) (broken line curve) and (8) (solid line curve).

Fig. 7 は、体積分率の異なる素子（モデル B）の電気抵抗率と傾斜角度との関係を示す。電気比抵抗は、体積分率に関わらず傾斜角度とともに増加し、傾斜角度の全範囲にわたって体積分率の増加に伴って減少した。以前の研究¹⁸⁾でも報告したように、以下の式は電気抵抗率と構造条件（体積分率と傾斜角度）との間の理論的關係を一般的に表している。

$$\rho(v_f, \theta) = \rho_{\parallel}(v_f) \cdot \cos^2 \frac{\pi}{180} \theta + \rho_{\perp}(v_f) \cdot \sin^2 \frac{\pi}{180} \theta \quad (9)$$

式(9)を変形した次式の左辺は、傾斜角度のみの関数となる。

$$\frac{\rho(v_f, \theta) - \rho_{\parallel}(v_f)}{\rho_{\perp}(v_f) - \rho_{\parallel}(v_f)} = \sin^2 \frac{\pi}{180} \theta \quad (10)$$

式(10)の左辺と傾斜角度との関係を Fig. 8 に示す。この図の破線は、式(10)で示される理論的關係を表している。素子モデル B における FES の結果を示す全ての記号は、この図ではほぼ同一の曲線上にあるが、理論的關係から明らかに逸脱していることが分かる。FES から見積もった電気抵抗率と傾斜角度との関係を定量的に表現するために、ゼーベック係

Fig. 7 Changes of electrical resistivity estimated from FES for tilt angle of Ni rod with different volume fraction of Ni rod.

Fig. 8 Change of $(\rho - \rho_{\parallel})/(\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})$ for tilt angle of Ni rod with different volume fraction of Ni rod together with two curves expressed with Eqs. (10) (broken line curve) and (11) (solid line curve).

数の場合と同様に式(10)の右辺に比例定数と傾斜角度の冪乗を乗じることによって修正した。修正式における比例定数および傾斜角度の冪指数は、最小二乗法に基づく逐次近似によって得た。その修正式は、次のように表される。

$$\frac{\rho(v_r, \theta) - \rho_{\parallel}(v_r)}{\rho_{\perp}(v_r) - \rho_{\parallel}(v_r)} = 0.829 \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.292} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{180} \theta \quad (11)$$

式(11)の関係は、Fig. 8中の実線で表される。傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の電気抵抗率は、修正式(11)を用いて定量的に表すことができる。

3.3 傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の最大熱電性能を得るための最適構造条件の予測

出力因子(PF)は、熱電性能を表す指標の1つで、特に熱電発電性能の評価に用いられる。それは、次式で定義される。

$$PF \equiv \frac{S^2}{\rho} \quad (12)$$

本研究では、体積分率および傾斜角度を有する傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の出力因子は、2種類の方法で式(12)を用いて見積もることが可能である。一つはFESに基づく方法であり、もう一つは式(4), (5), (8)および(11)を用いて計算で求める方法である。Fig. 9は、2種類の方法から式(12)を用いて見積もった出力因子の比較を示している。FESと計算から推定された出力因子は、比較的良好な一致を示し、二乗平均誤差は0.07 mW/mK²であることが分かった。

計算から出力因子を見積もることは、傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の最大出力因子が得られる最適な構造条件を見出すことを容易にする。そこで、複合材料の出力因子に対する体積分率および傾斜角度の影響を、計算法を用いて調査した。出力因子を、体積分率0.01間隔および傾斜角度1°間隔で求めた。体積分率および傾斜角度が出力因子に及ぼす影響を、等高線図としてFig. 10に示す。この等高線図中において⊗で示された位置は、2.18 mW/mK²の最大出力因子をもたらした最適構造条件($v_r = 0.81$ および $\theta = 38^\circ$)である。最適構造条件を有する傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料は、体積分率でわずか19%のMg₂Siを含むだけであるが、複合材料の出力因子はMg₂Si単体のそれ(2.40 mW/mK²)の91%の値となった。この傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の最適な傾斜角度は、構造形態が異なる傾斜Mg₂Si/Ni積層複合材料^{18,19)}の場合の最適な傾斜角度と同じであったことは興味深い結果である。この研究で得られた知見は、傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の粉末冶金プロセスを用いた実際の製造に有効な指針を与えるものになる。

4 結 言

この研究では、棒状Ni/Mg₂Si複合材料の熱電特性を、FESを用いて調査した結果、次のような知見を得た。

- (1) 体積分率に対する熱電特性(ゼーベック係数および電気抵抗率)の変化は、傾斜角度がそれぞれ0°および90°に相当する複合材料において導出される複合則によく従った。

Fig. 9 Comparison between power factors obtained from FES and calculation.

Fig. 10 Influences of volume fraction and tilt angle of Ni rod on power factor (contour map of power factor).

- (2) ゼーベック係数および電気抵抗率とNi棒の傾斜角度との関係は、いずれも理論的な関係から逸脱していたが、理論式に修正を加えた関係式でどちらも定量的に表すことができた。
- (3) 傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の最大出力因子をもたらす最適構造条件(Ni棒の体積分率および傾斜角度)は、理論式の修正式に基づく計算法を用いて予測することができた。

以上のように本研究で得られた知見は、傾斜棒状Ni/Mg₂Si複合材料の粉末冶金プロセスを用いた実際の製造に有効な指針を与えるものになる。

文 献

- 1) M. Akasaka, T. Iida, A. Matsumoto, K. Yamanaka, Y. Takanashi, T. Imai, N. Hamada: J. Appl. Phys., **104** (2008) 013703/1-8.

- 2) Y. Isoda, S. Tada, T. Nagai, H. Fujiu, Y. Shinohara: *Mater. Trans.*, **51** (2010) 868-871.
- 3) H. Ihou-Moukoa, C. Mercier, J. Tobola, G. Pont, H. Scherrer: *J. Alloy. Compd.*, **509** (2011) 6503-6508.
- 4) G. Jiang, L. Chen, J. He, H. Gao, Z. Du, X. Zhao, T. M. Tritt, T. Zhu: *Intermetallics*, **32** (2013) 312-317.
- 5) W. Liua, K. Yina, X. Sua, H. Lia, Y. Yana, X. Tanga: *Intermetallics*, **32** (2013) 352-361.
- 6) D. Berthebaud, F. Gascoin: *J. Solid State Chem.*, **202** (2013) 61-64.
- 7) X. Tang, Y. Zhang, Y. Zheng, K. Peng, T. Huang, X. Lu, G. Wang, S. Wang, X. Zhou: *Appl. Therm. Eng.*, **111** (2017) 1396-1400.
- 8) R. D. Schmidt, X. Fan, E. D. Case, P. B. Sarac: *J. Mater. Sci.*, **50** (2015) 4034-4046.
- 9) Th. Zahner, R. Förg, H. Lengfellner: *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 1364-1366.
- 10) A. Kyarad, H. Lengfellner: *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 5613-5615.
- 11) A. Kyarad, H. Lengfellner: *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 192103/1-3.
- 12) A. A. Snarskii, L. P. Bulat: *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, Ed. by D. M. Rowe, CRC press, Chapter 45 (2006).
- 13) T. Kanno, S. Yotsuhashi, A. Sakai, K. Takahashi, H. Adachi: *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2009) 061917/1-3.
- 14) K. Takahashi, A. Sakai, T. Kanno, H. Adachi: *Appl. Phys. Lett.*, **95** (2009) 051913/1-3.
- 15) S. A. Ali, S. Mazumder: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **62** (2013) 373-381.
- 16) B. Qian, F. Ren: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **95** (2016) 787-794.
- 17) B. Qian, F. Ren: *Energies*, **10** (2017) 1006/1-11.
- 18) T. Itoh: *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy*, **64** (2017) 501-509.
- 19) T. Itoh: *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy*, **65** (2018) 154-157.
- 20) Japan Soc. Mechanical Engineers: *JSME Data Book: Heat Transfer 5th Edition*, Maruzen, (2009) 282.
- 21) M. V. Vedernikov, N. V. Kolomoets: *Soviet Physics-Solid State*, **2** (1961) 2420-2427.
- 22) Japan Inst. Metals: *Metal Databook 4th Edition*, Maruzen, (2004) 14.
- 23) T. Itoh, A. Tominaga, T. Jinushi, Z. Ishijima: *J. Jpn. Soc. Powder Power Metallurgy*, **61** (2014) 324-328.