

## 熱電変換材料の変換効率と形状についての研究

The influence of the configuration to the performance of thermoelectric elements

○学 角田 直樹 (静岡大)

Naoki TSUNODA, Shizuoka University, 3-5-1, Johoku, Hamamatu, Shizuoka

正 辻 知章 (中央大工)

正 野田 直剛 (静岡大)

正 石原 正行 (静岡大)

Tmoaki TSUJI, Chuuou University

Naotake NODA, Shizuoka University

Masayuki ISHIHARA, Shizuoka University

## 論文要旨

## 1. 緒言

熱電発電技術は、ゼーベック効果として知られる異種導体(金属または半導体)の接合部に温度差を与えると起電力が発生するという効果を利用したものである。その発電システムは可動部が無く最も簡単に熱源のあるその場で直接電力に変換できるという特徴を持っている。しかし、発電量や変換効率が低いために特殊用途に限られているのが現状である。これまでに素子の幅や長さを変化させることによって素子の最適形状を求めてきた<sup>1)</sup>が、本研究では素子の冷端部を部分的に細くすることによって出力、変換効率がどのように変化するかを検討し、高効率及び高電気出力が得られる最適形状について調査した。

## 2 解析モデルおよび計算方法

## 2-1 解析モデル

図1に素子の解析モデルを示す。

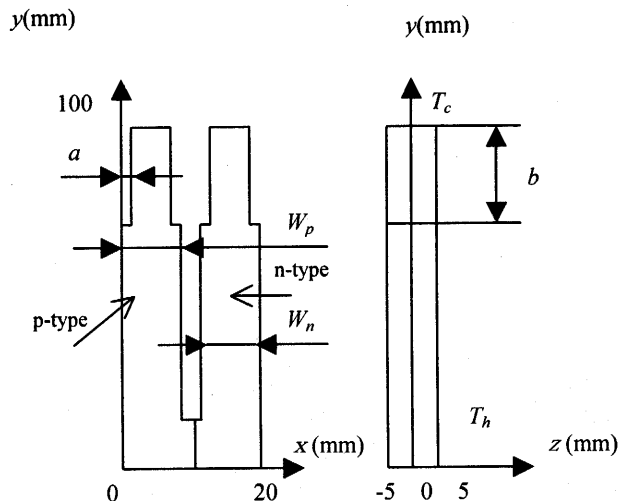


Fig.1 Simulation model

熱電素子は SiGe 半導体であり、幅 20mm、長さ 50mm、厚さ 10mm、スリット 2mm で、p, n 型半導体の幅をそれぞれ  $W_p$ ,  $W_n$  とおいた  $\pi$  型形状を持ち、x 方向、y 方向の切り込み長さをそれぞれ  $a, b$  とする。今回の解析ではこれらの値を種々変化させることにより素子形状の最適化を行った。境界条件は素子の高温部温度  $T_h$  を 1100K で一定とし、冷温部温度  $T_c$  を 300K で一定もしくは自然対流とし、その他はすべて断熱

とした。

## 2-2 基礎方程式

電流密度  $J$ , 熱流速  $q$  に関して<sup>2)</sup>

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho}(\nabla\phi + \alpha\nabla T) \quad (1)$$

$$\vec{q} = \alpha T \vec{J} - \kappa \nabla T \quad (2)$$

ここで、 $T, \phi, \kappa, \alpha, \rho$  はそれぞれ、温度、電位、熱伝導率、ゼーベック係数、電気伝導率である。加熱温度が高温であるため、上記の物性値は温度に依存するものとする<sup>1)</sup>。非定常状態では以下の式が成立する。

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla T) - T \nabla \alpha \cdot \vec{J} + \rho \vec{J} \cdot \vec{J} = \omega c_p \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (4)$$

上式において左辺第 1 項は熱伝導、第 2 項は熱電効果、第 3 項はジュール発熱に対応している。 $\psi, c_p$  は密度、比熱である。式(1),(2),(3),(4)より

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \frac{T}{\rho} \nabla \alpha \cdot (\nabla \phi + \alpha \nabla T) + \frac{1}{\rho} (\nabla \phi + \alpha \nabla T)^2 = \omega c_p \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho} (\nabla \phi + \alpha \nabla T) \right) = 0 \quad (6)$$

$T$  と  $\phi$  に関する式(5),(6)の連立非線形微分方程式を差分法を用いて数値シミュレーションを行う。

## 2-3 変換効率

変換効率  $\eta$  は負荷抵抗  $R_L$  と電流  $I$  により求められる<sup>3)</sup>。

$$\eta = \frac{V_S I - R I^2}{Q_1 + Q_2} \quad (7)$$

ここで、 $Q_1$  と  $Q_2$  をそれぞれペルチェ効果と熱伝導による熱吸収とすると、 $Q_1 + Q_2$  は温接点における吸収エネルギーである。 $Q_1$  と  $Q_2$  は次式より求められる。

$$Q_1 = \{\alpha_p(T_h) - \alpha_n(T_h)\} T_h I \quad (8)$$

$$Q_2 = \sum_{i=p,n} \left| A_i \kappa_i(T) \frac{dT_i}{dx} \right|_{T=T_h} \quad (9)$$

また  $V_S$  は素子両端のゼーベック起電力であり、次式より求められる。

$$V_S = \int_{T_c}^{T_h} \{\alpha_p(T) - \alpha_n(T)\} dT \quad (10)$$

$R$  は素子の内部抵抗であり、次式より求められる。

$$R = \sum_{i=p,n} \frac{1}{A_i} \int_0^{l_i} \rho_i(T) dx + \sum_{i=p,n} \frac{S}{2As} \int_0^{l_i} \rho_i(T) dx \quad (11)$$

内部抵抗が求められると、モデルの回路中を流れる電流  $I$  と電気出力  $P$  が次式より求められる。ただし  $R_L$  は負荷抵抗である。

$$R_L + R = \frac{V_s}{I} \quad (12)$$

$$P = I \cdot d\phi \quad (13)$$

### 3 解析結果と考察

今回の解析では式 (4), (5) をそれぞれ温度  $T$ , 電位  $\phi$  について定常状態で解いた。図 2 に  $a=0, b=0$  の場合の素子内部の温度分布と電位を示す。

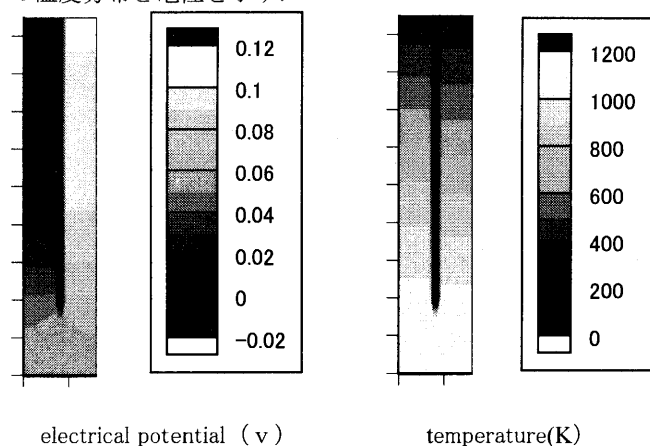


Fig.2 Temperature and electrical potential

図 3 は素子長、素子幅、スリット一定として切れ込みを入れない状態 ( $a=b=0$ ) で  $W_p$  を変化させていった場合の変換効率と電気出力の関係を示している。 $W_p=0.80\text{mm}$ ,  $W_n=0.10\text{mm}$  のとき電気出力が、 $W_p=0.85\text{mm}$ ,  $W_n=0.95\text{mm}$  のとき変換効率が最大値をとる。一般的にこの素子は  $W_p=W_n$  として使われているためその設計指針は妥当であると思われる。また、グラフより各素子の幅を変化させることによって変換効率、電気出力が大きく影響を受けることが分かった。

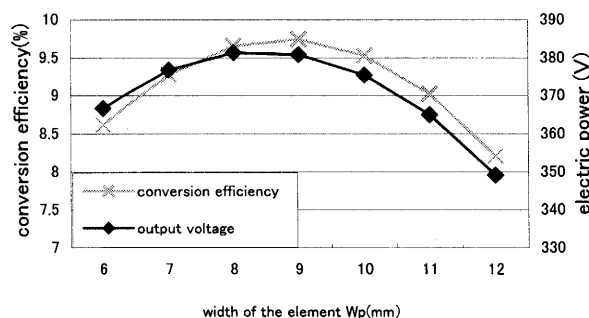


Fig.3 Relationship among the width of the element  $W_p$ , electric power and conversion efficiency

図 4, 5 に  $x$  軸方向の切り込み長さ  $a=1.0\text{mm}$  で一定とし  $y$  軸方向の切り込み長さ  $b$  を変化させていったときの結果を示す。図 4 より切り込み  $b$  を長くするにつれて変換効率、起電力が増加することが分かる。低温部  $T_c=300\text{K}$  で一定の場合は起電力も一定となるが低温部を熱伝達とした場合は  $T_c$  が約  $500\text{K}$  と高温になるため変換効率、起電力とも下がる。

図 5 では切り込み長さ  $b$  に対する電気出力と内部抵抗の関

係を示す。内部抵抗はほぼ同じ直線を示したが電気出力は長さ  $b$  が增大するにつれて低温部温度一定の時は減少し、熱伝達の場合は増加しているのが分かる。これは切り込み長さ  $b$  を増加させたことにより内部抵抗が増加したため低温部一定の場合は出力が下がったのに対し、熱伝達の場合は切り込み長さ  $b$  を増加させたことにより熱の移動が抑制されたため低温部温度の上昇を抑えることができ、起電力が上昇したために起こったと思われる。

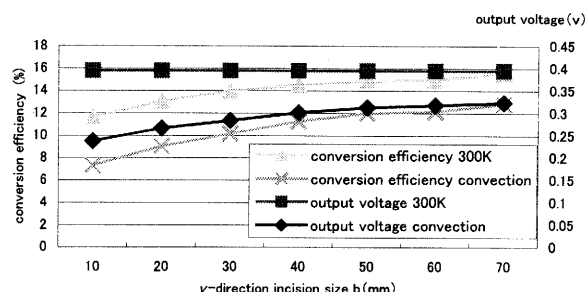


Fig.4 Relationship among  $y$ -direction incision size  $b$ , output voltage and conversion efficiency

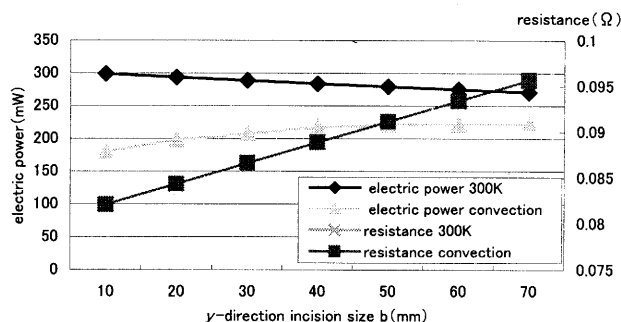


Fig.5 Relationship among  $y$ -direction Incision size  $b$ , electric power and resistance

### 4 結言

本研究では以下の結果を得た。

(1) 切れ込みを入れない状態 ( $a=b=0$ ) では、 $W_p=0.80\text{mm}$ ,  $W_n=0.10\text{mm}$  のとき電気出力が、 $W_p=0.85\text{mm}$ ,  $W_n=0.95\text{mm}$  のとき変換効率が最大値をとる。

(2)  $a=1.0\text{mm}$  で一定とし切り込み  $b$  を増加させていくと、電気出力は  $T_c=300\text{K}$  の場合は減少し、熱伝達の場合は増加する。

- 参考文献
- (1) 辻知章, 野田直剛, SiGe p 型と n 型半導体を焦結接合により製作した熱電変換素子の形状が効率に及ぼす影響, 日本機械学会 2003 年次大会講演論文集, Vol.1, P221-222, (2003).
  - (2) 小川, 渡辺, 酒井, 都能, 熱電変換素子による熱電発電の解析, 電子情報通信学会論文誌(C-II), Vol.J77-C-II, No.1 p 34-43, (1994).
  - (3) 小川, 武笠, 長尾, 木谷, 白川, 鶴沼, 熱電素子冷却に関する一考察, 電子情報通信学会論文誌(C-II), Vol.J75-C-II, No. 8, p 416-424, (1992).