

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630490

研究課題名(和文) 斜体素子による熱電発電

研究課題名(英文) Thermoelectric Power Generation by Tilted Module

研究代表者

鈴木 亮輔 (SUZUKI, Ryosuke, O.)

北海道大学・工学研究研究院・教授

研究者番号：80179275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：通常は二種類の材料を直方体に切り出し、Pai型に接合してpn熱電素子対を形成し、それを多数直列につないでモジュールを完成させる。モジュールの上下端に温度差を熱流体で与えるとき、熱流体の円滑な移動を考慮すると二重螺旋構造がその解決策を与える。モジュールは螺旋にするため、直方体素子ではなく、斜方体になり、これを直列接合した斜体素子モジュールが有効となる。素子の温度依存性や輻射熱の移動も考慮して円筒座標系に数値シミュレーションを適用して数値計算を行ったところ、縦に長く引き延ばした長いピッチの斜体素子が出力最大を与えることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Normally two types of materials are cut in cuboid, welded in series as Pai-type shape to form a thermoelectric module. In order to give a temperature difference between two flat terminals in the module, a double spiral structure may solve this problem considering smooth flow of two fluids. To realize the spiral module, the TE cuboid should be tilted with orthorhombic symmetry, and they may form a tilted module. Evaluating numerically the temperature dependency of material properties and the radiation effects on the module using the cylindrical axis, the elongated tilted module can save the mechanical loss and give the maximum output.

研究分野：材料熱化学

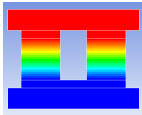
キーワード：熱電発電 計算機実験 熱伝導 電気伝導 素子設計 斜体素子 数値計算 内部抵抗

### 1. 研究開始当初の背景

熱電現象は約 200 年前の発見以来、物理現象としてはおもしろいが、実用に耐える材料は 1970 年ごろの水準が長く続いた。2000 年前後より ZT が 1 を越える物質が多数報告されるに至り、国内外で材料開発、薄膜化が精力的に進められ多くの材料研究者が次々と新材料探索の夢を追っていた。

一方、高性能材料を利用した熱電発電応用が現実味を帯びている。その中で申請者は早くも 1998 年には安価な Fe-Si 系材料等による経済的な熱電発電を真剣に考えるべきことを説いた。材料の素子化、モジュール化、最高性能の引き出し方、については世界的にごく少数の研究者が取り組んでいるに過ぎず、70 年前から続く型素子を踏襲しているのが現状であった。

申請者は材料開発と並んでモジュールとシステムの設計が同程度に重要であることを、熱電素子の応用面を通して主張してきた。熱流体利用、太陽熱利用、海洋冷熱、など型素子の温度分布解析(右図)の経験から、熱を伝えにくく電気は通しやすい構造のためには、直方体素子ではなく斜方体に変形する発案にいたった。



### 2. 研究の目的

直方体に代え斜方体形状の素子(斜体素子)を並べたモジュールを考案した(右図)。この有用性は、強い結晶方向の方位依存性を持つ材料および温度依存性を持つ材料に应用できること、最適な熱収支を考えるとモジュールの温度分布が型とは全く異なること、にある。



- (A) 計算機支援モジュール設計、
- (B) 実際のインゴットから切り出して熱電発電の熱効率向上を調査、
- (C) 磁場による熱流と電流方向の不一致による特性向上、
- (D) 熱流体用モジュールに斜体素子を適用、までを二年間で調査して今後の応用につなげる。とくに、従来にない形状を計算機シミュレーションするという意欲的な試みを成功させるためには丹念なプログラムのバグ出しが必要で、信頼置ける 3D 計算プログラムの完成も一つの重要な目的である。

### 3. 研究の方法

(A) 三次元の固体内部の熱伝導は有限要素法を用いて数値計算により解く。計算機支援設計では、熱電現象を考慮出来る伝熱ソフトウェア FLUENT に独自の熱電現象のサブルーチンを組み込む改造をして、斜体素子組み込み時の電圧や電流、電流密度、流体の対流や集熱フィンの効果、輻射効果、の設計問題に取り組む。

(B) 結晶の配向性の強い BiTe 系材料を選び実験する。実験と理論計算の両輪から斜体素

子の優劣を判断する。配向した材料を熱流方向と異なる方位に向け素子にする例は稀である。

(C) 外部磁場を印可して電流をローレンツ力でねじ曲げ、熱流方向と電流方向を一致させないという新構想を試す。

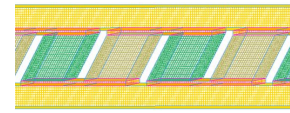
(D) 熱流体を用いる発電が最も実用化に近い。モジュールに熱流体を導入し発電特性を評価する。発電システムの最適化を行う。

### 4. 研究成果

異方性の強い BiTe 系半導体を例にとり、物性値は信頼できるデータ集から採取した。初年度は計算機環境を整備した上で、独自の関数を組み込み、その信頼性について試験した。数値計算を系統的に行った。

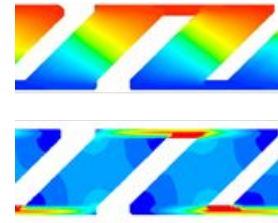
初年度 2 ヶ月で計算環境を整備する。

等方的な計算関数であった組み込み関数を異方的な結晶物性に対応できる関数に差し替えた。現状では温度依存性をオプションとしていたのを標準仕様とし、異方性を標準で考慮する関数とした。C 言語で書きコンパイルした。物性値は別ファイルから読み込む。



正常動作を通常の II 型モジュールで確認した。

数値計算にはメッシュの切り方が重要である。右図は最も簡単な、メッシュを素子の傾きと同一にした場合を示した。作成の



仕方については JSPS 外国人研究者として来日中の Meng 博士の指導を受けた。

温度、電流密度の計算を実行する。右中図、下図はそれぞれを近似で解いた場合の等高線図である。斜体素子の特徴がよく表れている。温度場は連続的段階的に変化するが、電流は最も短いルートを通る。電極材料の物性と熱電材料の物性値の相違がもたらす効果と併せ検討した。

傾き、寸法、ふくれ、素子個数、段数等を計算して出力と効率を最適化し、モジュール最適設計を示した。また数値計算の有効性を示すため、熱輻射の効果を取り入れた。傾いた素子の斜面からの熱輻射により、効率的な熱の利用のためにはあまりに傾けた斜方素子は芳しくない。ジグザクに流れる電流が素子端部で流れる方向を大きく変えるので、抵抗が発生する。斜体素子はこの抵抗を小さくすることが出来た。よって、斜体に傾ける角度は素子の形状に対応してここに定める必要があり、その最適解は数値計算によって与えられる。直方体から僅かに傾けた形状で最適な出力と効率が得られた。

斜体素子の多くのバリエーションを計算

したが、その応用例を示すため、中央に多角形のパイプをおいたモジュールを提案し、設計してその出力を計算で見積もった。意外に傾きを変えても出力と効率はあまり変わらなかった。輻射による放散熱を抑えることが出来るので、斜体素子からなるモジュールでは有効に使える熱量は増加した。斜体形の組み合わせの方法は多々存在するが、輻射熱を最小にする形状で良好な結果を得た。

モジュールの上下端に温度差を熱流体で与えるとき、熱流体の円滑な移動を考慮すると二重螺旋構造がその解決策を与える。モジュールは螺旋にするため、直方体素子ではなく、斜方体になり、これを直列接合した斜体素子モジュールが有効となる。素子の温度依存性や輻射熱の移動も考慮して円筒座標系に数値シミュレーションを適用して数値計算を行ったところ、縦に長く引き延ばした長いピッチの斜体素子が出力最大を与えることが分かった。

電極、絶縁体、接合材料などの効果を取り入れて計算したところ、メモリ容量の大きな計算となって熱電素子数を減らすなど収束に技術を要した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

X. Meng, R.O. Suzuki, "Helical configuration for thermoelectric generation", Applied Thermal Engineering, 査読有, 99, 25 April 2016, pp.352-357.

DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.061

T. Barbier, E. Combe, R. Funahashi, T. Takeuchi, M. Kubouchi, Y. Miyazaki, E. Guilmeau, R. O. Suzuki, "Structural Investigation and Indium Substitution in the Thermoelectric  $Mn_{2.7}Cr_{0.3}Si_4Al_{2-x}In_x$  Series", 査読有, J. Electr. Mater., 45 [3] (2016) 1992-1999. DOI:10.1007/s11664-016-4365-0

R.O. Suzuki, K.O. Ito, S. Oki, "Analysis of the performance of thermoelectric module under concentrated radiation heat flux", 査読有, J. Electr. Mater., 45 [3] (2016) 1827-1835. DOI:10.1007/s11664-015-4237-z

S. Oki, K.O. Ito, S. Natsui, R.O. Suzuki, "Numerical Optimization of Trapezoidal Thermoelectric Elements for Double-Pipe-Shaped Module", 査読有, J. Electr. Mater., 45 [3] (2016) 1358-1364. DOI:10.1007/s11664-015-4034-8

鈴木亮輔, "巻頭言 熱電発電を実用化するには", 査読無, 日本熱電学会誌, 12(1) (Aug, 2015) p.1.

X. Meng, R.O. Suzuki, "Performance Analysis of Thermoelectric Modules Using Polyhedron Elements", 査読有, Materials Transactions, 56 (7) (2015) 1092-1095.

DOI:10.2320/matertrans.E-M2015808

R. Funahashi, Y. Matsumura, T. Barbier, T. Takeuchi, R.O. Suzuki, S. Katsuyama, A. Yamamoto, H. Takazawa, E. Combe, "Durability of silicide-based thermoelectric modules at high temperatures in air", 査読有, J. Electronic Materials, 44 (8) (2015) 2946-2952. DOI:10.1007/s11664-015-3784-7

X. Meng, R.O. Suzuki, "Simulation Analysis of Tilted Polyhedron-Shaped Thermoelectric Elements", 査読有, J. Electr. Mater., 44 [6](2015) 1469-1476.

DOI:10.1007/s11664-014-3418-5

R. O. Suzuki, T. Fujisaka, K.O. Ito, X.Meng and H.-T. Sui, "Dimensional Analysis of Thermoelectric Modules under a Constant Heat Flux", 査読有, J. Electr. Mater., 44 (1) (2015) 348-355. DOI:10.1007/s11664-014-3314-z

K.O. Ito, H.-T. Sui, H. Hakozaki, H. Kinoshita, R.O. Suzuki, "Using a Water Lens for Light Concentration in Thermoelectric Generation", 査読有, J. Electr. Mater., 43 [6] (2014) 2086-2093.

DOI:10.1007/s11664-013-2965-5

X. Meng, T. Fujisaka, K.O. Ito, R.O. Suzuki, "Simulation of a thermoelectric module having parallelogram elements", 査読有, Materials Transaction, 55 (8) (2014) 1219-1225. DOI:10.2320/matertrans.E-M2014822

K.O. Ito, H.-T. Sui, H. Hakozaki, H. Kinoshita, R.O. Suzuki, "Light-Concentration Characteristic of Water Lens and its Application to Thermoelectric Generation", 査読有, Key Engineering Materials, 617 (2014) 247-250. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.617.247

R.O. Suzuki, T. Fujisaka, "Optimization of Module Shape in Thermoelectric Power Generation", 査読有, Key Engineering Materials, 617 (2014) 251-255. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.617.251

X. Meng, T. Fujisaka, K.O. Ito, R.O. Suzuki, "Thermoelectric Analysis for a Three-Dimensional Power Generator in Helical", 査読有, Key Engineering Materials, 617 (2014) 260-264.

DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.617.260

X. Meng, T. Fujisaka, K.O. Ito, R.O. Suzuki, "Thermoelectric Analysis for Pai-type Thermoelectric Module with Tilted Elements", 査読有, Materials Research Innovations, 18, Suppl.4 (2014) S4-116-121. DOI:10.1179/1432891714Z.000000000654

X. Meng, T. Fujisaka, R.O. Suzuki, "Thermoelectric Analysis for Helical Power Generation Systems", 査読有, J. Electron. Mater., 43 [6] (2014) 1509-1520. DOI:10.1007/s11664-013-2768-8

[学会発表](計 15 件)

“台形柱熱電素子によるパイプ型熱電発電

モジュール”, 大木沙英, 鈴木亮輔, 第十二回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2015), 九州大学筑紫地区, 2015年9月7-8日

“台形柱熱電素子によるパイプ型熱電発電モジュールの最適化”, 大木沙英, 伊藤圭太, 夏井俊悟, 鈴木亮輔, 日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同サマーセッション, 2015年7月17日(金) 室蘭工業大学

“Performance analysis of the thermoelectric modules under concentrated radiation heat flux and water cooling,” R.O. Suzuki, K. O. Ito, S. Oki, 34th Ann. Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2015) & 13th Europ. Conf. on Thermoelectrics (ECT2015), 28 June - 2 July 2015, Dresden, Germany

“Numerical optimization of trapezoidal thermoelectric elements for double-pipe shape module,” S. Oki, K. O. Ito, S. Natsui, R. O. Suzuki, 34th Ann. Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2015) & 13th Europ. Conf. on Thermoelectrics (ECT2015), 28 June - 2 July 2015, Dresden, Germany

“Recent advances in the thermoelectric Mn-Si-Al systems,” T. Barbier, R. Funahashi, E. Combe, T. Takeuchi, R. O. Suzuki, A. Kosuga, 34th Ann. Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2015) & 13th Europ. Conf. on Thermoelectrics (ECT2015), 28 June - 2 July 2015, Dresden, Germany

“Merit of helical configuration for thermoelectric generation,” X. Meng, R. O. Suzuki, 34th Ann. Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2015) & 13th Europ. Conf. on Thermoelectrics (ECT2015), 28 June - 2 July 2015, Dresden, Germany

“Development and application of oxide and silicide thermoelectric modules,” R. Funahashi, Y. Matsumura, T. Barbier, S. Iwaoka, S. Katsuyama, R. O. Suzuki, and A. Kosuga, 34th Ann. Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2015) & 13th Europ. Conf. on Thermoelectrics (ECT2015), 28 June - 2 July 2015, Dresden, Germany

“輻射を考慮した熱電発電モジュールの最適化”, 大木沙英, 伊藤圭太, 鈴木亮輔, 日本鉄鋼協会・日本金属学会北海道支部合同平成26年度冬季講演大会, 室蘭工業大学, 2015年1月29-30日

“輻射熱利用型熱電発電システムの最適化”, 伊藤圭太, 鈴木亮輔, 日本鉄鋼協会・日本金属学会北海道支部合同平成26年度冬季講演大会, 室蘭工業大学, 2015年1月29-30日

“Performance analysis of thermoelectric modules using polyhedron elements,” X. Meng, R. O. Suzuki, 日本熱電学会第11回学術講演会(独)物質材料研究機構(つくば市), 2014年9月29~30日

“Development of oxide and silicide thermoelectric materials and modules,” R. Funahashi, Y. Matsumura, R. O. Suzuki, S.

Katsuyama, T. Takeuchi, E. Combe, T. Barbier, 5th Intern. Congr. on Ceramics (ICC5), Beijing, 18th August, (2014).

“一定の入熱量が供給される条件下での熱電発電の形状最適化”, 伊藤圭太, 鈴木亮輔, 日本金属学会・日本鉄鋼協会北海道支部両支部合同サマーセッション, 北海道大学, 2014年7月28日

“Development of new silicide thermo-electric modules,” R. Funahashi, Y. Matsumura, R. O. Suzuki, S. Katsuyama, T. Takeuchi, E. Combe, T. Barbier, Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2014) July 6-10, 2014, Nashville, Tennessee, USA

“Dimension of thermoelectric power generation module under constant heat flux,” K. O. Ito, R. O. Suzuki, Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2014) July 6-10, 2014, Nashville, Tennessee, USA

“Simulation analysis for thermoelectric elements having the tilted polyhedron shape,” X. Meng, R. O. Suzuki, Intern. Conf. on Thermoelectrics (ICT2014) July 6-10, 2014, Nashville, Tennessee, USA

#### 〔図書〕(計 1 件)

R. Funahashi, C. Wan, F. Dang, H. Anno, R. O. Suzuki, T. Fujisaka, K. Koumoto, "Advanced Materials for Clean Energy", Chapter 4, "Development of Thermoelectric Technology from Materials to Generators", Edited by Q. Xu, K. Jo, T. Kobayashi, CRC Press (2015) pp.83-142, Print ISBN: 978-1-4822-0578-7, eBook ISBN: 978-1-4822-0580-0, DOI:10.1201/b18287-5

#### 〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

#### 〔その他〕

ホームページ

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/ecopro/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

鈴木 亮輔 (SUZUKI, Ryosuke)

北海道大学 大学院工学研究院材料科学部門・教授

研究者番号: 80179275

##### (2)研究分担者 なし

##### (3)連携研究者 なし

##### (4)研究協力者

伊藤 圭太 (ITO, Keita)

北海道大学 大学院工学院修士課程・学生

大木 沙英 (OKI, Sae)

北海道大学 大学院工学院修士課程・学生  
Xiangning MENG  
中国 東北大学 工学部金属材料工程学院・准  
教授  
舟橋良次(FUNAHASHI, Ryoji)  
産業技術総合研究所・材料科学領域 無機機  
能材料研究部門 機能調和材料グループ・上  
級主任研究員