

# **茨城大学重点研究**

**「グリーンデバイス開発研究」**

## **茨城大学工学部附属 グリーンデバイス教育研究センター**

**2017年度**

**報告書**

茨城大学重点研究プロジェクト「グリーンデバイス開発研究」  
平成 29 年度報告書刊行にあたって

プロジェクト代表 池田 輝之

COP21 (国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議, パリ, 2015 年 12 月) において採択された決議「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに, 1.5 °C に抑える努力を追求する」を踏まえ, 各国がさまざまにエネルギー政策を掲げ, 具体的な取り組みがなされつつあります. しかし, 世界のエネルギー消費量はこれまで増加の一途を辿ってきた現状から, 今世紀中に二酸化炭素の排出を実質ゼロに抑制するという目標は, 容易ではありません. 特にアジアにおける経済活動の活発化にともなうエネルギー消費量の増加が著しく, この消費増加は石炭やガスの増産でまかなわれています. この状況に変革をもたらさうるのは, 科学に裏打ちされた世界的政策であったり, 画期的な科学的発見でしょう. 内閣府が発表したエネルギー・環境イノベーション戦略 (H28 年 4 月) の中で, 上記目標を実現するためのコア技術として「革新的センサー」にて開発が挙げられています.

茨城大学グリーンデバイス教育・研究センターでは, 低環境負荷社会の実現に向け, 材料・デバイス・回路・分析・シミュレーション技術の英知を結集し, 様々な人間の活動における省電力化, エネルギー利用の高効率化を目的とした研究を行っています. 本センターとも密接に関連する各種センサーの開発は, これからの IoT 社会や Big Data 利用社会の実現に向け, 大きな役割を果たすでしょう. いずれも, 温室効果ガスの削減に大きく寄与しう分野にあり, 今後, 益々世間の期待を受ける存在といえます.

本年度は, 主として次のような研究成果がありました.

- 1) 高性能熱電変換を実現するための多孔質化熱電材料の創製およびそれを使用した熱電変換デバイスの開発
- 2) 電流誘起磁壁移動の原理を用いた低消費電力磁気メモリ材料 TbFeCo における異常ホール効果の解明
- 3) YBCO 薄膜を用いた超伝導パラメトリック増幅器の実現を向けての測定系の構築とカイネティックインダクタンスの評価
- 4) これらの研究開発を効率よく推進するための実験的, 理論的支援ツールの開発

これらの成果は, 本成果報告書に加え, 査読付学術論文 11 編, 国内外における研究発表 46 件 (うち, 国際会議 9 件) などによって発表して参りました. また, 5 件の競争的外部資金 (科研費以外) 及び 6 件の科学研究費補助金を獲得し, それぞれ鋭意推進して参りました.

H30 年度も, 全力で研究開発に邁進して参ります. 引き続き, ご指導・ご支援を賜りますようお願い申し上げます.

「グリーンデバイス開発研究」

プロジェクト参加教員

1) 高性能熱電変換に関する研究

池田輝之（マテリアル工学科・教授）

小峰啓史（メディア通信工学科・准教授）

2) 低消費電力磁気メモリ材料に関する研究

小峰啓史（メディア通信工学科・准教授）

3) 超電導に関する研究

島影尚（電気電子工学科・教授）

4) 上記研究を効率よく推進するための実験的, 理論的支援ツールの開発

篠嶋妥（マテリアル工学科・教授）

太田弘道（マテリアル工学科・教授）

武田茂樹（メディア通信工学科・教授）

田代優（マテリアル工学科・准教授）

西剛史（マテリアル工学科・准教授）

永野隆敏（マテリアル工学科・講師）

## －目次－

### 1. 活動概要

－1－

### 2. 研究報告

1. 「多孔質熱電材料を用いた新しい高効率熱電変換デバイスの開発」  
池田輝之, 永野隆敏, 篠嶋 妥

－9－

2. 「低消費電力磁気メモリの開発」  
小峰啓史

－13－

3. 「熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸透率測定」  
西剛史, 大川萌里, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人

－15－

4. 「超伝導デバイス開発研究」  
島影 尚

－20－

### 3. プロジェクト業績

1. 活動実績

－21－

2. 業績一覧

－22－

## 1.活動概要

## グリーンデバイス教育研究センター 平成29年度活動計画・実施結果調書

### 1. 研究開発・資金獲得計画

#### ○実施計画

#### 1. 高性能熱電材料

- (1) 実施概要: 熱電材料の高性能化及びそれを用いた熱電変換デバイスの開発.
- (2) 実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3) 実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 太田弘道, 小峰啓史, 篠嶋妥, 西剛史, 永野隆敏, 長谷川靖洋(埼玉大学), 村田正行(産業技術総合研究所), 木植秀之(飛田理化硝子製作所)
- (4) 資金獲得計画:
  - ・ H27 年度エネルギー・環境新技術新技術先導プログラムに採択済み(H29 年度 10 月までの予定にて研究推進中)
  - ・ NEDO 関係の研究プログラムに応募予定
  - ・ 科学技術振興機構「さがけ」あるいは「CREST」に応募予定
  - ・ 科研費基盤(B)に採択済み(H29 年度～H31 年度の予定にて研究推進中)
- (5) 実施における課題: 特になし

#### 2. 電界効果による磁壁移動型デバイスの高速化

- (1) 実施概要: 界面のラッシュバ効果に着目し, 電界による磁気特性制御によって, ナノワイヤメモリのさらなる高速化を実現する
- (2) 実施予定時期: H29 年 4 月～H31 年 3 月
- (3) 実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 小峰啓史
  - ・ メンバ: 青野友祐, 長谷川靖洋(埼玉大), 原嘉昭(茨城高専)
- (4) 資金獲得計画: H28 に科研費基盤(B), 民間財団2件が採択済み. 民間財団への追加応募も検討
- (5) 実施における課題: ...研究推進するための人的資源, 研究環境整備が課題.

#### 3. 電界, 磁界を利用した新規熱電素子の創成

- (1) 実施概要: 熱電材料の界面における電界効果及び磁性体を利用した磁場効果によってゼーベック係数を増強し, 熱電性能の向上を図る
- (2) 実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3) 実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 小峰啓史
  - ・ メンバ: 池田輝之, 鶴殿治彦, 青野友祐, 長谷川靖洋(埼玉大), 原嘉昭(茨城高専)
- (4) 資金獲得計画: 民間財団2件が採択済み. 民間財団の他に, 挑戦的萌芽研究へ応募予定
- (5) 実施における課題: ...研究推進するための人的資源, 研究環境整備が課題.

#### 4. BSCCO 超伝導体を用いたテラヘルツ発振器の研究

- (1) 実施概要: BSCCO 超伝導体を用いたテラヘルツ発振器の研究
- (2) 実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3) 実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 島影尚
  - ・ メンバ: 川上彰(NICT)
- (4) 資金獲得計画: 科研費
- (5) 実施における課題: 特になし

## ○実施結果

### 1. 高性能熱電材料

- (1)実施概要: 熱電材料の高性能化及びそれを用いた熱電変換デバイスの開発.
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 太田弘道, 小峰啓史, 篠嶋妥, 西剛史, 永野隆敏, 長谷川靖洋 (埼玉大学), 村田正行 (産業技術総合研究所), 木植秀之 (飛田理化硝子製作所)
- (4)資金獲得計画:
  - ・ H30 年度エネルギー・環境新技術新技術先導プログラムに応募済み (結果待ち)
  - ・ H27 年度エネルギー・環境新技術新技術先導プログラムにて H29 年度 10 月まで研究遂行
  - ・ NEDO ベンチャー企業等による新エネルギー技術革新支援事業に採択, 研究遂行
  - ・ 科研費基盤(B)研究を推進中 (H29 年度～H31 年度の予定にて研究推進中)
- (5)実施における課題: 特になし

### 2. 電界効果による磁壁移動型デバイス的高速化

- (1)実施概要: 界面のラッシュバ効果に着目し, 電界による磁気特性制御によって, ナノワイヤメモリのさらなる高速化を実現する
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H31 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 小峰啓史
  - ・ メンバ: 青野友祐, 長谷川靖洋(埼玉大), 原嘉昭(茨城高専)
- (4)資金獲得計画: H28 に科研費基盤(B), 民間財団2件が採択済み. 研究推進中.
- (5)実施における課題: ...研究推進するための人的資源, 研究環境整備が課題.

### 3. 電界, 磁界を利用した新規熱電素子の創成

- (1)実施概要: 熱電材料の界面における電界効果及び磁性体を利用した磁場効果によってゼーベック係数を増強し, 熱電性能の向上を図る
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 小峰啓史
  - ・ メンバ: 池田輝之, 鶴殿治彦, 青野友祐, 長谷川靖洋(埼玉大), 原嘉昭(茨城高専)
- (4)資金獲得計画: 民間財団2件が採択済み. 研究推進中.
- (5)実施における課題: ...研究推進するための人的資源, 研究環境整備が課題.

### 4. BSCCO 超伝導体を用いたテラヘルツ発振器の研究

- (1)実施概要: BSCCO 超伝導体を用いたテラヘルツ発振器の研究
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 島影尚
  - ・ メンバ: 川上彰(NICT)
- (4)資金獲得計画: 科研費にて研究推進中
- (5)実施における課題: 特になし

## その他(参考資料、報告書など)

主な外部資金獲得状況 (H29 年度)

### 科学研究費

基盤研究 (B)「立体的熱界面制御と新しい高効率熱電変換システム」

代表: 池田輝之 (H29～H31)

基盤研究 (B)「電界制御ラッシュバ効果による磁壁移動型メモリの高速化」

代表: 小峰啓史 (H28～H31)

挑戦的萌芽研究「低次元制御量子ナノ構造をもつバルク熱電材料の創製」

代表: 池田輝之 (H28～H29)

基盤研究 (B)「電子構造・フォノン分散の精密制御に基づく環境調和型熱電材料の創製」(H29 年 4 月～H32 年 3 月) 4,160 千円, 研究代表者: 高際良樹

基盤研究(B)「酸化物系ランダム構造の領域分割と物性理解」, 分担 300 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者: 柴田浩幸

基盤研究(C)「鉛フリーはんだの大量生産に向けた共軸二重円筒回転粘度計による粘度測定に関する研究」,

代表 910 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者: 西剛史

### その他の主な獲得資金

H27 年度エネルギー・環境新技術新技術先導プログラム

「革新的ナノスケール制御による高効率熱電変換システムの実現」

代表: 池田輝之, 150,000 千円 (H29 年 10 月まで)

H29 年度 NEDO ベンチャー企業等による新エネルギー技術革新支援事業

「ロータス型ポーラス熱電材料を用いた流体透過型超高効率熱電変換装置の創製」

代表: 池田輝之, 4,709 千円 (H30 年 3 月まで)

戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業), 「IoT活用による遠隔地多品種少量生産対応型塗装システムの開発」, 200 千円, 2016 年度, 研究代表者: 永野隆敏(大学側代表者)

戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業), 「革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発」(H28.9.20～H29.3.31), 研究代表者: 池田輝之(大学側代表者)

平成29年度 公益財団法人村田学術振興財団 研究助成(自然科学), 「界面電界制御による低消費電力磁壁移動型デバイスの創成」, 1,200 千円, 2017 年度, 研究代表者: 小峰啓史

### 原著論文

- 1) Takatoshi Nagano, Kunihiro Tamahashi, Takashi Inami, Yasushi Sasajima, Jin Onuki, "Screening of Undesirable Elements Raising the Electrical Resistivity in Very Narrow Cu Wires by Ab Initio Calculation" J. Electrochem. Soc. Vol.164, iss.9, pp.D558-D563.
- 2) Jin Onuki, Kunihiro Tamahashi, Takashi Inami, Takatoshi Nagano, Yasushi Sasajima, Shuji Ikeda, "Nano-structure-controlled very low resistivity Cu wires formed by high purity electrolyte and optimized additives", 2017 IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM)
- 3) 堀川隼世, 川上彰, 兵頭政春, 島影尚, 中赤外光領域における金属材料特性に基づいた光検出器用アンテナ特性評価, 日本赤外線学会誌, 27 巻 1 号 74-79 (2017)
- 4) Bin Liu, Teruyuki Ikeda, Yasushi Sasajima, Phase-field simulation of the Si precipitation process in Mg<sub>2</sub>Si under an applied stress, Mater. Sci. Eng. B, 229 (2018), 65-69.
- 5) R. Ando, T. Komine, Geometrical contribution to anomalous Nernst effect in TbFeCo thin films, AIP Advances Vol. 8, 056326/pp.1-6 (2018).
- 6) R. Ando, T. Komine, S. Sato, S. Kaneta, Y. Hara, Novel behaviors of anomalous hall effect in TbFeCo

- thin films under high magnetic field, AIP advances Vol. 8, 056316/pp.1-7 (2018).
- 7) H. Nakayama, B.-R. Zhao, N. Furusato, S. Yamada, T. Nishi, H. Ohta, Effect of Amount of Chunky Graphite on Mechanical Properties of Spheroidal-Graphite Cast Iron, Material Transactions, **59**, 412-419, (2018)
  - 8) Shugo Miyake, Genzou Matsui, Hiromichi Ohta, Kimihito Hatori, Kohei Taguchi and Suguru Yamamoto, Wide-range measurement of thermal effusivity using molybdenum thin film with low thermal conductivity for thermal microscopes, Measurement Science and Technology, **28**, 075006, (2017).
  - 9) T. Nishi, H. Ohta, S. Sukenaga, H. Shibata, Estimation of thermal conductivity of silicate melts using three-dimensional thermal resistor network model, Journal of Non-Crystalline Solids, **482**, 9-13, (2018)
  - 10) T. Nishi, S. Yamamoto, M. Okawa, K. Hatori, T. Ikeda, H. Ohta, Thermal microscope measurement of thermal effusivity distribution in compositionally graded PbTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te alloy system, Thermochimica Acta, **659**, 39-43, (2018)
  - 11) 橋本康孝, 西 剛史, 太田弘道, 鉛フリーはんだの粘度測定の現状および今後の課題, 日本金属学会誌 **81**, 221-225, (2017)

#### 国際会議論文

- 1) T. Goto, M. Takeda, S. Saito and H. Shimakage, Calculations of superconducting parametric amplifiers performances, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012081 (2017)
- 2) R. Obara, J. Horikawa, H. Shimakage and A. Kawakami, Evaluation of detectable angle of mid-infrared slot antennas, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012080 (2017)
- 3) R. Hiwatashi, Y. Tamura and H. Shimakage, Simulations of chaos generation from Josephson junctions with various junction parameters, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012079 (2017)

#### 学会発表 (国内, 国際)

- 1) Babak Alinejad, Teruyuki Ikeda, High-thermoelectric performance of nanostructured doped Mg<sub>2</sub>Si, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)
- 2) 佐々木誠, Shiva Kumar Singh, 永野隆敏, 池田輝之, 井手拓哉, 中嶋英雄, 粒子法シミュレーションによる熱流体透過型多孔質熱電材料の温度分布評価, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)
- 3) 齊藤明子, 西峯広智, 池田亜矢子, 池田輝之, 高際良樹, 一方向凝固を利用した熱電材料の組織探索, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)
- 4) 菅原龍太郎, 渡部紘介, 池田輝之, Si 基熱電材料のキャリア濃度増大と耐用条件, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (ポスター)
- 5) 青野美南, 齊藤明子, 池田輝之, フラックス法による PbTe 及び Si の一方向凝固, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (ポスター)
- 6) 大川萌里, 西剛史, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人, 熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸透率測定, 熱物性シンポジウム, 2017, 11 月 7-9 日, つくば (口頭)
- 7) Teruyuki Ikeda and Babak Alinejad, Low temperature rapid fabrication of Mg<sub>2</sub>Si via activated reactive consolidation, TMS 2018 147rd Annual Meeting & Exhibition, Phoenix, Arizona, USA, March 11-15, 2018, (Invited)
- 8) Teruyuki Ikeda, Microstructure control of bulk thermoelectric materials via phase transformations, SPARCA 2018 (2018 SYMPOSIUM FOR THE PROMOTION OF APPLIED RESEARCH COLLABORATION IN ASIA), Ginowan, Okinawa, Japan, February 9-12, 2018 (Invited)
- 9) T. Ikeda, K. Watanobe, Y. Hong, "Nanostructuring and its effects on thermoelectric properties of Si base composites", IUMRS-ICAM 2017, Kyoto, Japan, August 27-September1, 2017, (Invited)
- 10) B.Alinejad, T. Ikeda, "Fabrication of highly pure, dense Mg<sub>2</sub>Si via single-step low temperature reactive consolidation", IUMRS-ICAM 2017, Kyoto, Japan, August 27-September1, 2017 (Oral)
- 11) リュウビン, 池田輝之, 篠嶋 妥, ロータスアルミニウム金属におけるポア成長のフェーズフィールドシミュレーション, 日本軽金属学会, 2017, 11 月 4-5 日, 宇都宮大学, 日本軽金属学会 (ポスター)
- 12) 齊藤明子, 青野美南, 西峯広智, 池田輝之, 高際良樹, 長谷川靖洋, 新規熱電材料の開発における一方向凝固法の有効性, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 13) 菅原龍太郎, 渡部紘介, 池田輝之, Si-Sb 熱電材料のナノ構造化とキャリア濃度および熱伝導率の関係, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 14) 渡辺英和, 池田輝之, パルス通電焼結法による高密度 Si 焼結体の作製, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 15) 山崎拓矢, 児島孝文, 井手拓哉, 池田輝之, 中嶋英雄, 一方向に孔の揃った多孔質シリコンの作製と熱電特性, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (口頭)

- 16) 井野崎崇, Babak Alinejad, 池田輝之, 低次元ナノ構造をもつバルク熱電材料の創製, 日本熱電学会, 2017, 9月11-13日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 17) Babak Alinejad, Teruyuki Ikeda, Microstructure tailoring of silicon-aluminum oxide nano-composite for thermoelectric applications, 日本金属学会秋期講演大会, 2017, 9月6-8日, 北海道大学, 日本金属学会 (口頭)
- 18) T. Ikeda, M. Murata, T. Komine, H. Kiue, and Y. Hasegawa, Macroscale thermoelectric materials with low dimensional nanoscale features, 36th annual international conference on thermoelectrics (ICT), Pasadena, CA, July 30 - Aug. 3, 2017.
- 19) 佐々木悠馬, 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  接合素子における量子・古典状態間遷移領域に関する研究 [5a-A504-12], 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017年9月5-8日.
- 20) 安藤亮, 小峰啓史, フェリ磁性  $\text{TbFeCo}$  における熱電効果の素子形状依存性 [7p-PB7-35], 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017年9月5-8日.
- 21) 三澤貴浩, 森澄人, 佐々木悠馬, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  ナノ接合素子の電気伝導特性 [8p-A412-9], 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017年9月5-8日.
- 22) R. Ando, T. Komine, S. Sato, S. Kaneta, Y. Hara, Novel behaviors of anomalous hall effect in  $\text{TbFeCo}$  thin films under high magnetic field (EU-01) 62nd Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Pittsburgh, PA, Nov. 6-10, 2017.
- 23) R. Ando, T. Komine, Geometrical contribution to anomalous Nernst effect in  $\text{TbFeCo}$  thin films (EU-05) 62nd Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Pittsburgh, PA, Nov. 6-10, 2017.
- 24) Y. Sasaki, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, J. Nishii, H. Kaiju, Study of  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  nanoscale junction devices utilizing thin-film edges The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo, Nov. 30 - Dec. 1, 2017
- 25) 佐々木悠馬, 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生 磁性薄膜エッジを利用した  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  ナノ接合素子に関する研究, 第53回応用物理学会北海道支部/第14回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学・学術交流会館, 2018年1月6-7日.
- 26) 安藤亮, 小峰啓史, 磁性薄膜における電極配置が異常ネルンスト起電力に及ぼす影響 [17p-P10-21], 第65回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学(西早稲田キャンパス/ベルサール高田馬場) 2018年3月17-20日.
- 27) 青野友祐, Peter Stano, 川村稔, 大野圭司, 小峰啓史, 面内磁場下の量子ポイントコンタクトにおける動的核スピン偏極, 日本物理学会 第73回年次大会(2018年), 東京理科大学(野田キャンパス), 2018年3月22-25日.
- 28) H. Shibata, S. Sukenaga, T. Nishi, H. Ohta, Thermal diffusivity measurement for metallic and oxide glasses using a laser flash method, European Conference on Thermophysical Properties 21st Graz, Austria, 2017/9/5
- 29) 橋本康孝, 太田弘道, 西 剛史, 溶融 Sn-Ag-Cu はんだの粘性率- 温度・Ag 添加量依存性の検討, 日本金属学会 2017年秋期(第161回)講演大会, 2017/9/7
- 30) 山野秀将, 高井俊英, 古川智弘, 江村優軌, 倉田正輝, 東 英生, 福山博之, 西 剛史, 太田弘道, 劉 曉星, 古谷正裕, ナトリウム冷却高速炉の炉心損傷事故時の制御棒材の共晶溶融挙動に関する研究(1)プロジェクト全体概要, 日本原子力学会 2017年秋の大会, 2017/9/15
- 31) 西 剛史, 太田弘道, 山野 秀将, ナトリウム冷却高速炉の炉心損傷事故時の制御棒材の共晶溶融挙動に関する研究(5) 5mass%B<sub>4</sub>C-SS 共晶溶融物の粘度測定, 日本原子力学会 2017年秋の大会, 2017/9/15
- 32) 西 剛史, 田中健登, 大沼克也, 眞子巧巳, 太田弘道, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> および B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> 融体の熱伝導率の B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率依存性, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 33) 大川萌里, 西 剛史, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人, 熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸透率測定, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 34) 篠原貴洸, 太田弘道, 西 剛史, 羽鳥仁人, 野口秀則, 神田昌枝, スポット周期加熱放射测温法による複合材料の熱拡散率評価および検討, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 35) 田中健登, 大沼克也, 眞子巧巳, 太田弘道, 西 剛史, 柴田浩幸, 助永壮平, 柿原敏明, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 融体の熱伝導率, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 36) 橋本康孝, 太田弘道, 西 剛史, 共軸二重円筒回転粘度計を用いた Sn-Ag-Cu はんだの粘度測定, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 37) 神戸健志郎, 太田弘道, 西 剛史, 勝又淳友, ゴォニョホアン, 示差走査熱量計を用いた鋳造用スリーブの発熱量評価, 第38回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/9
- 38) 勝又淳友, 神戸健志郎, ゴォニョホアン, 西 剛史, 太田弘道, 氷熱量計を用いた鋳造用発熱スリーブの発熱量

測定手法の開発,第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9

- 39) 羽鳥仁人, 栗野孝昭, 西 剛史, 太田弘道, 五十嵐誉廣, スポット周期加熱放射測温法による解析式を用いた2層材料の熱伝導率測定,第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9
- 40) ゴォニョホアン, 勝又淳友, 神戸健志郎, 西 剛史, 太田弘道, 鑄造用発熱鑄型材の炉内加熱による発熱挙動評価,第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9
- 41) 神戸健志郎, 西 剛史, 太田弘道, 勝又淳友, ゴォニョホアン, 示差走査熱量計とX線回折装置を用いた鑄造スリーブの発熱挙動評価,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 42) 林 健, 西 剛史, 太田弘道, 羽鳥仁人, 野口秀則, 高熱伝導放熱シートの熱拡散率分布測定,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 43) 眞子巧巳, 田中健登, 大沼克也, 太田弘道, 西 剛史, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明,  $\text{SiO}_2\text{-AlO}_{1.5}\text{-R}_2\text{O}$  ( $\text{R}=\text{Li}, \text{Na}$ ) 融体状態およびガラス状態の熱伝導率,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 44) 小久保宏紀, 太田弘道, 西 剛史, 山野秀将, 溶融ステンレス鋼を用いたるつぽ回転粘度測定装置の整備,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 45) 眞子巧巳, 田中健登, 大沼克也, 太田弘道, 西 剛史, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明,  $\text{SiO}_2\text{-AlO}_{1.5}\text{-R}_2\text{O}$  ( $\text{R}=\text{Li}, \text{Na}$ ) 融体状態およびガラス状態の熱伝導率,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 46) 森 賢太, 西 剛史, 太田弘道, 遠藤理恵, 須佐匡裕, 表面加熱・表面測温レーザーフラッシュ法による二層試料の熱物性測定法の開発,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19

#### 受賞等

- 1) Babak Alinejad, Award for Encouragement of Research, The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017, 2017 年 8 月 27 日-9 月 1 日に開催).
- 2) 受賞者名: 佐々木 悠馬(北大電子研), 三澤 貴浩 1, 森 澄人 1, 小峰 啓史 2, 星野 哲久 3, 芥川 智行 3, 藤岡 正弥 1, 西井準治 1, 海住 英生 1(北大電子研 1, 茨工大 2, 東北大多元研 3), 受賞名: 応用物理学会北海道支部発表奨励賞, 授与者: 第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道地区合同学術講演会 受賞日: 2018/1/10
- 3) 受賞者名: 西剛史 (テキスト「核燃料サイクル」編集委員会及び執筆者) 受賞名: テキスト「核燃料サイクル」の出版, 受賞日: 2018/3/28

#### 特許

- 1) 発明者: 池田輝之, 児島孝文, 永野隆敏, 井手拓哉, 村上政明, 沼田富行, 中嶋英雄, 出願人: 国立大学法人茨城大学, 株式会社ロータスマテリアル研究所, 発明の名称: 「熱電変換モジュール」, 出願番号: 特願 2018-052531.

## 2. 人材育成

### ○実施計画

#### 1. 研究資金獲得を目指したミーティング

- (1)実施概要: 研究資金獲得を目指したミーティング
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 太田弘道, 小峰啓史, 篠嶋妥, 西剛史, 永野隆敏, 長谷川靖洋 (埼玉大学), 村田正行 (産業技術総合研究所), 木植秀之 (飛田理化硝子製作所)
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

#### 2. Bi 研究会

- (1)実施概要: Bi 研究会 (最先端の研究情報交換と学生の教育)
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 小峰啓史, 長谷川靖洋 (埼玉大学), 村田正行 (産業技術総合研究所)
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

#### 3. セミナーの開催

- (1)実施概要: セミナーの開催
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月～H30 年 3 月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 構成員全員
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

### ○実施結果

#### 1. 研究資金獲得を目指したミーティング

- (1)実施概要: 研究資金獲得を目指したミーティング
- (2)実施予定時期: 月に一度程度
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 太田弘道, 小峰啓史, 篠嶋妥, 西剛史, 永野隆敏, 長谷川靖洋 (埼玉大学), 村田正行 (産業技術総合研究所), 木植秀之 (飛田理化硝子製作所)
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

#### 2. Bi 研究会

- (1)実施概要: Bi 研究会 (最先端の研究情報交換と学生の教育)
- (2)実施予定時期: H29 年 4 月 21 日, H29 年 9 月 27 日
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバ: 小峰啓史, 長谷川靖洋 (埼玉大学), 村田正行 (産業技術総合研究所)
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

### 3. セミナー及び研究討論会の開催

- (1)実施概要: 外部研究者を招きセミナーを実施した。また、本学の研究内容の討論を行った。
- (2)実施予定時期: H30年2月27日, 28日
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 池田輝之
  - ・ メンバー: 構成員全員
  - ・ 招聘研究者: 中嶋英雄氏 ((公財) 若狭湾エネルギー研究センター), 井手拓哉氏 ((株)ロータスマテリアル研究所)
- (4)資金獲得計画: 特になし
- (5)実施における課題: 特になし

### その他(参考資料、報告書など)

なし

## 2.研究報告

## 多孔質熱電材料を用いた新しい高効率熱電変換デバイスの開発

池田輝之, 永野隆敏, 篠嶋 妥

茨城大学工学部付属グリーンデバイス教育研究センター

Teruyuki Ikeda, Takatoshi Nagano, Yasushi Sasajima

Green Device Education and Research Center, College of Engineering, Ibaraki University

### 1. 概要

本研究では、日本における重要な未利用熱源として知られる産業における温水廃熱や熱排気、温泉、燃料、LNG プラントの冷熱等の流体を熱源に想定し、その熱回収に有効な新しい高効率熱電変換システムの基礎的検討を行う。すなわち、熱電材料を多孔質化することにより、熱電材料と熱流体の界面を立体化し、界面熱流束を飛躍的に増大させ、エネルギー変換効率を向上させる。同様のシステムはペルティエ効果を利用して電流から温度差をつくる高効率冷却システムとしても応用可能である。

本研究では、まず熱電材料の多孔質化の検討を行った。採用した方法は、水素雰囲気中での一方向凝固である。この方法では、水素溶解度が固相より液相が高いと凝固時に溶解しきれない水素が気孔を生成することを利用する。材料としては、シリコン、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、コンスタンタンといった高性能を有する熱電材料の多孔質化に成功した。これらの材料は、それぞれ室温から高温域 ( $0\sim 1000^\circ\text{C}$ ) (シリコン)、中間温度域 ( $300\sim 500^\circ\text{C}$ ) ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )、室温から中間温度域 ( $0\sim 300^\circ\text{C}$ ) (コンスタンタン) での使用が想定される。上記材料の多孔質化成功により、室温に近い温度域の温排水や温泉水等から、高温の産業排熱や自動車の廃熱等の利用を想定した開発を推進できる態勢となった。

シリコンは、地球上に豊富に存在する元素であり環境への負荷がなく、人体に対しても無害であるため、熱電変換材料として理想的な材料の一つと考えられ近年注目が集まっている。そこで、シリコンに対して他の材料に比べて先行して実用化のための調査を行った。熱電材料としての使用にはドーピングによるキャリア濃度の調整が不可欠である。ホウ素ドーピングに対し孔形成が影響を受けず、熱電材料としての多孔質シリコンの製造に支障がないことが明らかとなった。また、本研究で採用したシリコンには水素が固溶しているが、その水素も熱電特性には影響を与えないことも分かった。これらの知見は、本研究で採用したロータス型シリコンが熱電材料としての実用に適していることを意味する。

さらに、ロータス型多孔質材料の孔形成シミュレーションに世界に先駆けて成功した。フェーズフィールド法を採用してアルミニウム中の孔形成を再

現している。このことにより、本シミュレーションを援用してロータス型多孔質材料の製造時の条件最適化や孔の制御 (孔径, 体積分率, 孔の長さ) を効率的に行うことができる目処がたった。

熱電変換デバイスの熱流と温度差に関する解析を行い、熱源の温度に対する熱電デバイス中温度差

が  $\frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} = \frac{1}{1+\frac{\kappa}{hc}}$  で与えられることがわかった。この解析

により、多孔質熱電材料を用いることの意義が熱伝達係数  $h$  を高めることにあるが分かり、デバイスの性能向上の指針が得られた。

上記の解析に基づき、多孔質熱電材料を用いた熱電変換デバイスの長所を最大限に生かすデバイスの形態を検討し、一つの好適形態を提案した。このデバイスの製造を実現するための金属電極との接合実験を行い、 $\text{Ag}$  が電極として適していること、および  $\text{Ag}$  を  $\text{Si}$  と接合するための条件を確立した。さらに、粒子法により熱流体と多孔質シリコンを用いた熱流動シミュレーションを行い、多孔質化シリコンの発電特性の有意性を確認した。

### 2. はじめに

世界で生産されるエネルギーの 60% 以上が、「廃熱」として捨てられている。熱電変換は熱エネルギーから電気エネルギーを取り出すという他に類を見ない優れた機能を持ち、持続可能な社会の実現に必要な環境維持のために中心的役割を果たすべき要素である。本研究では、日本における重要な未利用熱源として知られる産業における温水廃熱や熱排気、温泉、燃料、LNG プラントの冷熱等の流体を熱源に想定し、その熱回収に有効な新しい高効率熱電変換システムの基礎的検討を行う。

### 3. ロータス型ポーラス熱電材料の創製

シリコンを水素雰囲気下で溶解し、底面のみを水冷した鋳型に流し込み一方向凝固させた。得られたポーラスシリコンの凝固方向に対して垂直に切断した断面の概観を図 1 に示す。円形の孔が均一に生成していることがわかる。また、この断面に垂直な断面の観察により、孔は凝固方向に成長していることが確認された。さらに、シリコン以外にも、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  あるいはコンスタンタンといった優れた熱電特性

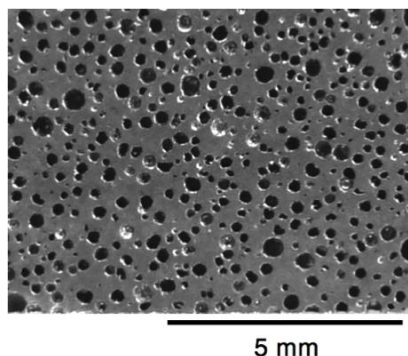


図 1 ポーラス Si 試料の孔の伸長方向に垂直な断面 [1] を示す材料についても水素雰囲気下での一方向凝固実験によりポアの形成が認められた。

次に、本方法で作製するポーラスシリコンを熱電材料として熱電変換システムに使用するためには、不純物元素の添加によるキャリア濃度の調整を行い、熱電特性を最適化することが必要である。そこで、シリコンに対する N 型の添加元素としてよく知られているボロンを添加した。この結果、ボロンの添加の有無により、平均直径ならびにポロシティに有意な差は現れないことが明らかになった。

また、本方法で作製した熱電材料は水素をある程度固溶しているものと考えられる。そこで、そのような水素が熱電特性に与える影響を調べた。各試料に対しホール効果測定を行った結果を表 1 に示す。測定結果よりボロンの添加により大きくキャリア濃度が変化するものの水素の有無によっては、有意なキャリア濃度の差は生じないことが分かる。

表 1 水素雰囲気下ならびにアルゴン雰囲気下一方向凝固により作製した無垢ならびに多孔質シリコンのキャリア濃度 [1]

|               | キャリア濃度 (cm <sup>-3</sup> ) |                      |
|---------------|----------------------------|----------------------|
|               | 多孔質 (水素固溶あり)               | 無垢 (水素固溶なし)          |
| B ドープなし       | $1.3 \times 10^{18}$       | $4.7 \times 10^{18}$ |
| B ドープ (1at.%) | $1.5 \times 10^{21}$       | $1.4 \times 10^{20}$ |

多成分・多相系を扱えるマルチフェーズフィールド法を用いて、一方向凝固時のアルミニウムにおけるポアの形成・成長過程をシミュレートした。フェーズフィールドとして  $\phi_i(\vec{r}, t)$ ,  $i=0$ (固相),  $1$ (液相),  $2$ (ポア) を設定した。それらは各々の相の体積分率として解釈することができ、拘束条件として

$$\phi_0(\vec{r}, t) + \phi_1(\vec{r}, t) + \phi_2(\vec{r}, t) = 1$$

を課せられている。

変分原理によって得られた、フェーズフィールド  $\phi_i(\vec{r}, t)$  の時間発展方程式を計算機で数値的に解く

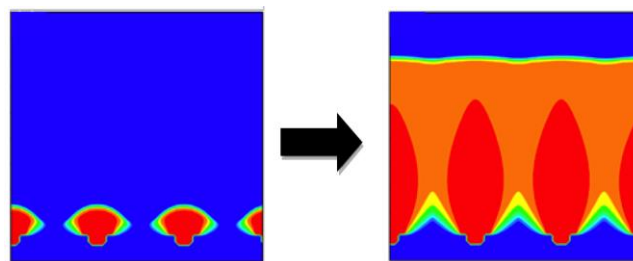


図 2 アルミニウムにおけるポア形成・成長過程のフェーズフィールドシミュレーション。

ことによって、ポア形態の時間変化が得られる。図 2 にロータスアルミニウム金属におけるポア形成・成長過程、すなわちポアのフェーズフィールドの時間変化を示す。系の大きさは  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  で、初期条件として過飽和液体中に 3 個のポア核を配置した。

時間の経過とともにポアが最初の球状から一方向に揃った紡錘形になることがわかった。その原因は溶融状態からの一方向凝固時における過飽和水素原子の析出に伴って、ポアが金属内に一方向に生成することによるものである。今後、実験結果を再現するより精密な計算モデルを作成し、それに基づいてロータス金属の製造条件の最適化を行っていく必要がある。

#### 4. 流体透過型熱電変換デバイスの開発

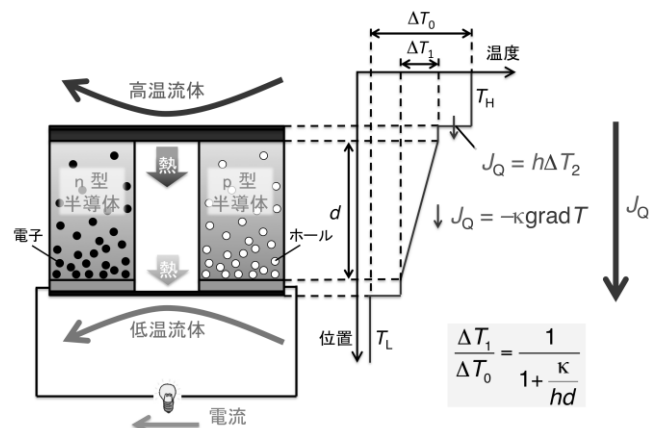


図 3 熱電デバイス中の熱伝導率  $\kappa$ , 熱伝達係数  $h$ , 温度分布の関係 [2]

図 3 のように流体を熱源とし温度差発電をするデバイスを考える。流体の温度差  $\Delta T_0$  と熱電素子中の

温度差  $\Delta T_1$  の比は、 $\frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} = \frac{1}{1 + \frac{\kappa}{hd}}$  で与えられる。 $\kappa$  は

熱伝導率、 $h$  は熱電材料と流体間の熱伝達率、 $d$  は熱電素子の温度勾配方向の長さである。この割合 ( $\Delta T_1/\Delta T_0$ ) が大きければ大きい発電電圧 ( $V = S\Delta T_1$ ) が得られる。この比を 1 に近づけるには、 $\kappa/hd$  の項を 1 に対してできるだけ小さくする必要がある。熱電材料をポーラス化し熱流体との界面積を増

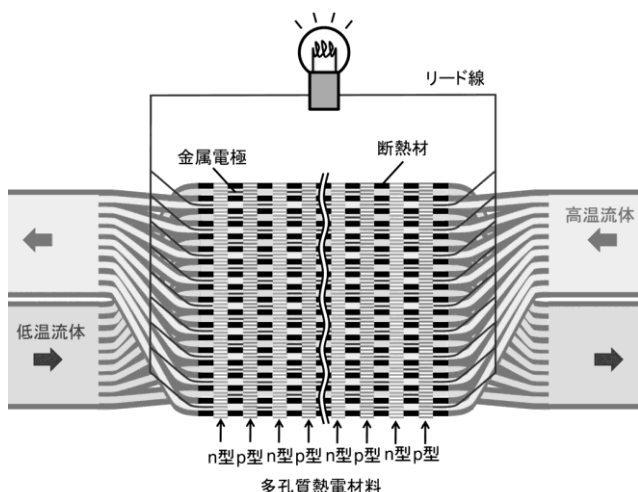


図4 熱界面の立体化による界面積の著しい増大を生かした熱電変換デバイスのデザイン例。n型、p型の多孔質熱電材料の板を交互に並べ、板に垂直な向きに板状の流路をつくる。その中で高温/低温流体を交互に流す。隣り合うn/p 多孔質熱電材料の板を電気的に結線する。大きければ実効的な $h$ が増し $\Delta T_1/\Delta T_0$ が向上する。このような多孔質化熱電材料の特長を有効に生かすデバイスを検討した。図4に概略を示す。N、P型のポーラス熱電材料を交互に配置し、それらの中を高温、低温流体が交互に透過する。流路は断熱材で区切り、隣り合う熱電材料間は金属電極で結合させる。

ポーラスシリコン熱電材料を用いて上記のような熱電変換デバイスを作製するにあたり、ポーラスシリコンと金属電極の接合が重要な要素技術である。そこで、金属電極の接合技術確立を図った。シリコンとの電極に用いる金属として、シリコンとの二元状態図の検討を経て、銀を選定した。接合方法の実験的検討の結果、シリコンと銀の接合面を接触させ、圧力を制御しながら加熱することにより拡散接合するのが最適であることが明らかになった(図5)。

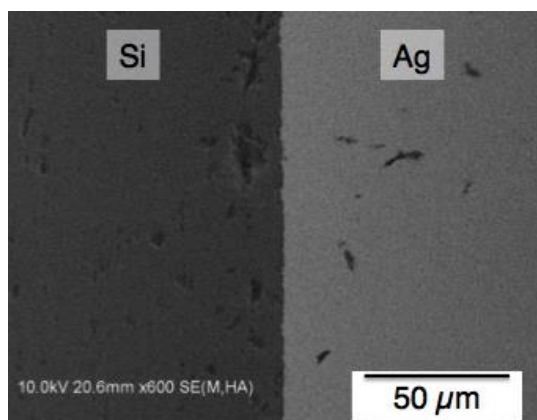


図5 一定応力下拡散接合によるSi-Agの接合界面

さらに、粒子法による計算機シミュレーションにより、多孔質熱電材料を用いて実効的な熱伝達係数 $h$ を高めた熱電変換デバイスの有効性を検証した。

図6にポロシティは同じで孔のサイズが小さい場合(0.4 mm)と大きい場合(2.9 mm)の(すなわち、界面積が異なる条件下での)熱電材料中の温度差(上述の $\Delta T_1$ )の違いを示す。 $\Delta T_1$ は孔が小さい方が65 K、大きい方が36 Kであり温度差に大きい違いが現れた。これは界面積の差による有効熱伝達係数 $h$ の違いに起因する。従来の $\pi$ 型素子では図6の孔の大きい場合(右)よりさらに小さい温度差しか得られない。

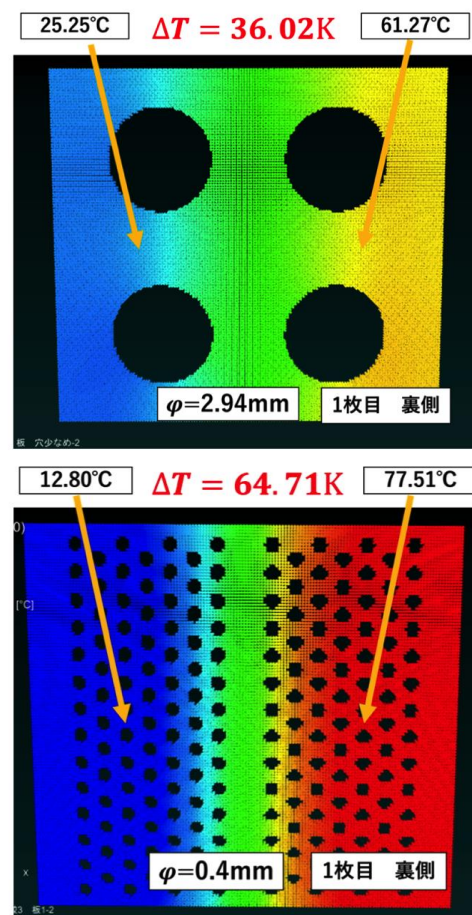


図6 粒子法により計算したポーラス熱電材料に流体を流した場合の温度分布。中央には図面縦方向に断熱材を配置。高温(右)、低温(左)流体の温度はともにそれぞれ $80^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ である。ポロシティは左右の図で同じ。

## 5. 結論

材料としては、シリコン、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、コンスタンタンといった高性能を有する熱電材料の多孔質化に成功した。これらの材料は、それぞれ室温から高温度域( $0\sim 1000^\circ\text{C}$ ) (シリコン)、中間温度域( $300\sim 500^\circ\text{C}$ ) ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )、室温から中間温度域( $0\sim 300^\circ\text{C}$ ) (コンスタンタン)での使用を想定している。上記材料の多孔質化成功により、さまざまな温度の熱源に対応できるため、室温に近い温度域の温排水や温泉水等から、高温の産業排熱や自動車の廃熱等の利用を想定した開発を推進できる態勢となった。

シリコンは、地球上に豊富に存在する元素であり環境

への負荷がなく、人体に対しても無害であるため、熱電変換材料として理想的な材料の一つと考えられ近年注目が集まっている。そこで、本研究では、シリコンに対して他の材料に比べて先行して実用化のための調査を行った。熱電材料としての使用にはドーピングによるキャリア濃度の調整が不可欠である。B ドープに対し孔形成が影響を受けないことが分かったことは、熱電材料としての多孔質シリコンの製造に支障がないことを意味する。また、本研究で採用したシリコンには水素が固溶しているが、その水素も熱電特性には影響を与えないことも分かった。これらの知見は、本研究で採用したロータス型シリコンが熱電材料としての実用に適していることを意味する。

さらに、ロータス型多孔質材料の孔形成シミュレーションに世界に先駆けて成功した。フェーズフィールド法を採用してアルミニウム中の孔形成を再現している。このことにより、本シミュレーションを援用してロータス型多孔質材料の製造時の条件最適化や孔の制御（孔径、体積分率、孔の長さ）を効率的に行うことができる目処がたった。今後、他材料やさまざまな条件（溶湯温度、凝固時の温度勾配の条件など）について調べていく必要がある。

熱電変換デバイスの熱流と温度差に関する解析を行い、熱源の温度に対する熱電デバイス中温度差が与えられることがわかった。この解析により、多孔質熱電材料を用いることの意義が熱伝達係数  $h$  を高めることにあるが分かり、デバイスの性能向上の指針が得られた。

上記の解析に基づき、多孔質熱電材料を用いた熱電変換デバイスの長所を最大限に生かすデバイスの形態を検討し、図 4 が一つの好適形態であるとの結論を得た。このデバイスの製造を実現するための金属電極との接合実験を行い、Ag が電極として適していること、および Ag を Si と接合するための条件を確立した。

さらに、粒子法により熱流体と多孔質シリコンを用いた熱流動シミュレーションを行い、多孔質化シリコンの発電特性の有意性を確認した。

## 6.おわりに

本研究により、実際に多孔質熱電材料が製造可能であること、熱源が流体である場合にそれらを使用した熱電変換デバイスが優位性をもつことが明らかになった。今後、多孔質熱電材料を使用した熱電変換デバイスを作製し、優位性の検証を行い、実用化へと結びつけていきたい。

## 【参考文献】

- 1) 山崎拓矢, 児島孝文, 井手拓哉, 池田輝之, 中嶋英雄, 第 14 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2017), 予稿.
- 2) 池田輝之, 児島孝文, 永野隆敏, 井手拓哉, 村上政

明, 沼田富行, 中嶋英雄 (出願人: 国立大学法人茨城大学, 株式会社ロータスマテリアル研究所), 「熱電変換モジュール」, 出願番号: 特願 2018-052531.

## 低消費電力磁気メモリの開発

Fundamental study of non-volatile magnetic memory with low power consumption

小峰啓史

グリーンデバイス教育研究センター

Takashi Komine

Green device education and research center

### 1. 概要

本研究では、電流誘起磁壁移動の原理を用いた低消費電力磁気メモリの実現に向け、メモリ構造及び構成材料を検討している。本磁気メモリは、不揮発性に加えて、低消費電力、高速動作が実現可能な次世代メモリとして期待されている。近年では、スピン軌道相互作用を積極的に利用した高速化技術が期待されている。

本稿では、スピン依存伝導現象のさらなる理解のため、スピン軌道相互作用の強い希土類-遷移金属合金フェリ磁性体である TbFeCo の異常ホール効果を調べた結果を報告する。

### 2. はじめに

情報量の爆発的な増大から、情報機器の省電力化、高速化は急務の課題である。スーパーハイビジョンのような映像情報を中心とする情報記憶装置の高速化が期待されている。本研究では、高速動作が期待されるシーケンシャルアクセスメモリとして、磁壁移動型メモリの研究開発を行う。メモリ動作に必要なデータ転送層及びそのデータの熱安定性を確保する安定化層からなる構造をすでに提案しており、今後、高速動作に関する技術開発が重要である。近年、スピン軌道相互作用を積極的に利用した新現象の発見が相次いでおり、本メモリ構造でもスピン軌道トルクによる高速動作の可能性がある<sup>1)</sup>。今年度は、スピン軌道相互作用の強い系として TbFeCo 薄膜の異常ホール効果を検討した<sup>2,3)</sup>。

### 3. 実験方法

本研究では、RF マグネトロンスパッタリング装置により、ガラス基板上に薄膜試料を堆積させた。薄膜構成は Glass/AlN(25nm)/TbFeCo( $t_{\text{TFC}}$ )/AlN(5nm)とした。AlN 層は TbFeCo の酸化を防ぐための保護層である。測定試料のホールバーは成膜時にメタルマスクを用いて形成した。Quantum Design の PPMS を用いて、膜面垂直方向に磁場を印加し、TbFeCo 層における異常ホール抵抗を測定することで、異常ホール効果の膜厚依存性と温度依存性を調べた。温度は 5K-400K、磁場は $\pm 9\text{T}$ の範囲で測定を行った。

TbFeCo 磁性層厚による異常ホール効果の符号反転温度が異なるという以前の結果に基づいて、磁性層界面が磁気特性に及ぼす影響および温度依存性を詳細に調べた。

### 4. 結果と考察

温度を変えて測定した TbFeCo 薄膜の異常ホール抵抗を Fig. 1(a)に示す。TbFeCo 薄膜はフェリ磁性体であり、補償組成近傍では異常ホール抵抗の符号が Tb 組成により異なることが知られている。一方、本研究における各試料は磁性層厚が異なるが、いずれも ICP 分析から RE-rich であることがわかっている。Fig.1(a)を見ると、膜厚の異なる試料で異常ホール効果の符号反転温度が異なることがわかる。さらに保磁力の温度依存性から調べた補償温度は符号反転温度と一致することもわかる。

分析組成が同じにも関わらず、補償温度が異なる原因を調べるため、抵抗率の温度依存性を調べた結果を Fig.1 (b)に示す。抵抗率の温度依存性は、金属材料であるにも関わらず、低温でわずかに上昇する。一方、その大きさは膜厚の減少に伴い増加するが、5nm 厚と 10nm 厚の試料ではその増加の割合が不連続であることがわかる。これは、AlN/TbFeCo 界面において、電気的、磁氣的に異なる性質を持つ相が形成されていると考えることが出来る。

室温で TM-rich な試料でも同様の符号変化が観測された。測定した TbFeCo 薄膜は、ICP 組成分析から補償組成よりも RE-rich であることがわかっており、本来は RE-rich に対応する符号の異常ホール抵抗が観測されるはずである。そこで、界面における磁気構造モデルを仮定することで理解を試みた。これらの挙動を説明するため、分子場近似を用いて、異常ホール効果の符号反転をシミュレートした。フェリ磁性体 TbFeCo では、2種類の磁気モーメントが混在する系としてモデル化出来、これら磁気モーメントは交換相互作用  $J$  と有効異方性磁場  $H_A$  の元で自己無撞着に決定される。本研究では、界面における Tb モーメントが AlN とのミキシングにより一定量低下するとして、下記の式の  $\sigma_{\text{RE}}$  の大きさをパラメータとした。

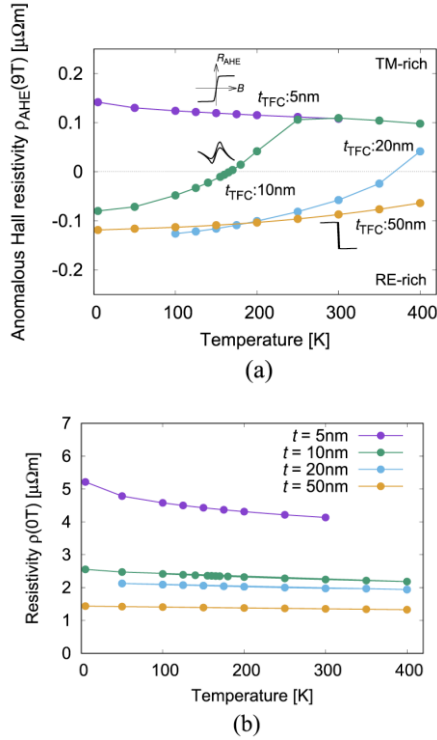


Fig.1 Temperature dependences of (a) AHE (at 9T), (b) resistivity (at the remanent state) in TbFeCo samples with various thicknesses. The representative hysteresis loops are also shown in the inset of (a).

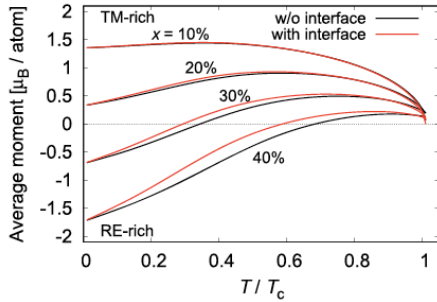


Fig.2 Magnetization curves as a function of temperature normalized to the Curie temperature for various Tb concentrations with and without interfacial mixing.

$$\mu_{TM} H_{TM}^{MFA} = \mu_{TM} H_{A, TM} + (1-x) J_{TM-TM} \sigma_{TM} + x J_{TM-RE} \sigma_{RE}$$

$$\mu_{RE} H_{RE}^{MFA} = \mu_{RE} H_{A, RE} + x J_{RE-RE} \sigma_{RE} + (1-x) J_{TM-RE} \sigma_{TM},$$

ここで、 $x$ はRE組成であり、組成を変えることで、界面層の有無による補償温度の違いを調べた。

Fig.2 に平均磁気モーメントの温度依存性を計算した結果を示す。組成による補償温度が定性的に再現でき

ることがわかる。さらに、Tb が実効的に減少することで補償温度が推移することもわかる。異種物質の界面ではミキシングが起こる可能性がある。特に異常ホール抵抗の符号は Tb 量と密接に関係しており、作製した試料の界面層は Tb が実効的に欠如した TM-rich 相として振舞っていると考えられる。異常ホール抵抗の符号は RE-site の磁気モーメントの向きによって決まっており、TM-rich 相では異常ホール抵抗は負になる。界面層は、いずれの薄膜試料でも一定層厚存在すると考えられるが、TbFeCo 層厚が薄くなるにつれて、界面層の電気/磁気特性が優位になったと考えれば、全ての測定結果を説明することが出来る。

また、フェリ磁性体において、RE-site, TM-site の磁気モーメントの温度依存性が異なることも計算から示唆されており、低温で RE-site, 高温で TM-site が優位であるとする、温度による異常ホール係数の符号反転も説明できる。

## 5. まとめ

TbFeCo 層厚を変えて異常ホール抵抗の符号の温度依存性を調べた。その結果、TbFeCo 層厚に対して、界面層が薄いときは TM-rich, 厚いときは RE-rich になっており、TbFeCo 層厚の増加に伴い反転する温度も上昇していることがわかった。一定層厚の界面層を仮定すると、これらの結果を全て説明出来ることから、温度による異常ホール抵抗の符号反転が薄膜の微細構造に起因することを見出した。薄膜微細構造の制御は界面におけるスピン構造の制御につながると考えられ、今後、歪みによる磁気特性制御や中性子を利用した界面スピンの観測を試みる予定である。さらなる系統的な研究によって、ナノ界面を制御した新規省電力スピンドバイス創成につながるものと期待される。

## 【参考文献】

- 1) S.-H. Yang, K. -S. Ryu and S. Parkin: Domain-wall velocities of up to 750 m s<sup>-1</sup> driven by exchange-coupling torque in synthetic antiferromagnets, *Nature Nanotech.* Vol. 10, pp. 221-226 (2015).
- 2) R. Ando, T. Komine, and Y. Hasegawa: Anomalous Nernst effect of perpendicularly magnetic anisotropy TbFeCo Thin films", *J. Elec. Mater.* Vol. 45(7), pp. 3570-3575, 2016.
- 3) R. Ando, T. Komine, S. Sato, S. Kaneta, Y. Hara, "Novel behaviors of anomalous hall effect in TbFeCo thin films under high magnetic field", *AIP advances* Vol. 8, 056316/pp.1-7, 2018.

## 熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸透率測定

Thermal Effusivity Measurement of Iron-based Alloy Thermoelectric Conversion Material using the thermal microscope

西剛史, 大川萌里\*, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人\*\*

茨城大学工学部, \*茨城大学大学院, \*\*ベテル

Tsuyoshi NISHI, Mori OKAWA\*, Teruyuki IKEDA, Hiromichi OHTA, Kimihito HATORI\*\*

Department of Material Science and Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan,

\*Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan,

\*\*Hudson Lab., Bethel co. ltd., Tsuchiura 300-0036, Japan

第 38 回日本熱物性シンポジウム つくば 2017/11/07 で一部発表

### 1. 概要

鉄基合金系において Al-Fe-Si 三元系合金中の  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3$  相は第一原理計算によりゼーベック係数が高いと予測されており、現在熱電変換材料として主流である  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  の代替となりうるとされている。本研究ではブリッジマン法により Al-Fe-Si 合金を試作し、局所的な熱物性測定が可能である熱物性顕微鏡を用いて本合金の熱浸透率を測定し、熱物性の立場から  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3$  相の特性を調査した。

実験では試料表面において SEM 観察を行い、試料が複数の相に分かれていることを確認した後、同箇所にて熱物性顕微鏡による熱浸透率測定を実施した。実験結果から、作製した Al-Fe-Si 三元系合金試料においてそれぞれ熱浸透率の異なる 3 つの相の熱浸透率を決定した。

### 2. はじめに

近年のエネルギー問題において、熱は非常に重要な位置を占める。世界で生産されるエネルギーの 6 割以上が廃熱として捨てられている現状があり、熱の有効利用が今日のエネルギー問題解決への糸口となる。熱電変換材料は、熱を電気に変換できる優れた特性を持つため、今後さらに重要性を増すものと期待される。

熱電変換材料の性能は無次元性能指数  $ZT$  ( $Z = S^2\sigma/\lambda$ ,  $S$ : ゼーベック係数,  $\sigma$ : 電気伝導率,  $\lambda$ : 熱伝導率) に依存する。 $ZT$  が 1 以上の材料が高  $ZT$  の熱電変換材料とされる。 $ZT$  を高くするためには電気伝導率を大きく、熱伝導率を小さくすることが必要である。

従来熱電変換材料に用いられるのは、ゼーベック係数が高い  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  などの半導体材料が主流である。しかし熱電変換材料をエネルギー問題解決への糸口とするならば、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  に近い性能を持ち、コストパフォーマンスが良く加工性にも優れた金属材料で熱電変換材料ができれば、より広く世界に流通することが可能であ

る。

これまで、鉄基合金系の中で Al-Fe-Si の三元系合金がゼーベック係数の大きい合金であろうと第一原理計算により予測されている。本研究では、最初のアプローチとして様々な金属間化合物で構成されている  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3$  合金を試作し、局所周期加熱法とサーモリフレクタンス法を組み合わせることにより局所的な熱物性測定を可能とした熱物性顕微鏡を用いることにより、本合金の熱浸透率を測定し、熱物性の立場から  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3$  合金の特性を調査した。

### 3. 測定原理

熱物性顕微鏡(図1)は、試料表面の周期加熱とサーモリフレクタンス法を組み合わせることで、マイクロスケールでの熱物性値測定が可能な装置である。サーモリフレクタンス法は、金属の反射率が温度に依存して変化する性質を利用した検温法である[1]。熱浸透率  $b$  は試料の熱伝導率、熱拡散率、密度、比熱をそれぞれ  $\lambda$ 、 $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $c$  とおくと Eq.(1) で表される。

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \rho c \sqrt{\alpha} \quad (1)$$

試料表面に金属薄膜をスパッタし、この金属薄膜を強度変調した加熱レーザにより周期加熱することを考える。試料の熱浸透率が大きいほど、金属薄膜の周期的な温度変化と加熱レーザの位相差が小さくなる。図2に測定原理を示す。薄膜表面に一定強度の検出レーザを照射し、その反射光強度から表面の温度変化を非接触で測定する。試料の局所的な熱物性は薄膜、基盤の 2 層モデルに基づいて計算することができる。図3に試料の表面温度とレーザの強度の模式図を示す。試料表面に加熱レーザを照射する。加熱レーザは正弦波で変調され、試料表面の熱流束  $F(t)$  は Eq.(2) で表される。

$$F(t) = \sin \omega t \quad (2)$$

ここで  $\omega$  は加熱レーザ変調の角周波数、 $t$  は時間である。

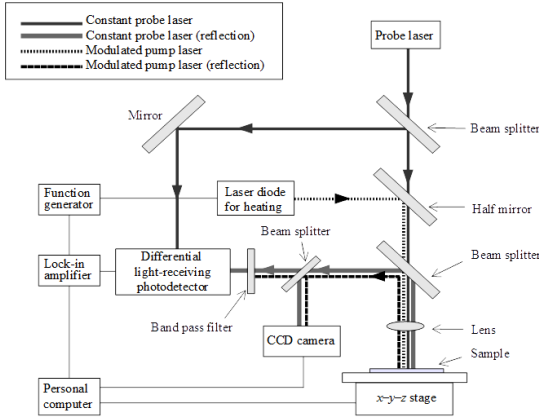


Fig. 1 Schematic diagram of Thermal Microscope (TM)

サーモリフレクタンス法により周期加熱による試料表面の温度変化が計測される。表面応答  $T(t)$  の交流成分は定常状態において Eq.(3) で表される。

$$T(t) = A \sin(\omega t - \delta) \quad (3)$$

このときの加熱光との位相差を測定し Eq.(4)、Eq.(5)、Eq.(6)、Eq.(7) を用いることで試料の熱浸透率を求めることができる。ここで、 $\delta$  は位相差、 $\tau_f$  は特性時間、 $d$  は膜厚、 $\alpha_f$  は薄膜の熱拡散率であり、添え字  $f, s$  はそれぞれ検温用の金属薄膜、試料を示す。

$$\delta = \frac{3}{4} \pi + \arctan \left( \frac{\cosh^2 \sqrt{\frac{\omega \tau_f}{2}} (\tanh \sqrt{\frac{\omega \tau_f}{2}} + \beta) (\tanh \sqrt{\frac{\omega \tau_f}{2}} + \beta^{-1})}{\cos^2 \sqrt{\frac{\omega \tau_f}{2}} (\beta - \beta^{-1}) \tan \sqrt{\frac{\omega \tau_f}{2}}} \right) \quad (4)$$

$$\tau_f = \frac{d^2}{\alpha_f} = \frac{d^2 \rho_f C_f}{\lambda_f} = \frac{d^2 \rho_f^2 C_f^2}{b_f^2} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{b_s}{b_f} = \frac{\sqrt{\lambda_s \rho_s C_s}}{\sqrt{\lambda_f \rho_f C_f}} \quad (6)$$

$$b_s = \sqrt{\alpha_s \rho_s C_s} = \sqrt{\lambda_s \rho_s C_s} \quad (7)$$

## 4. 実験

### 3.1 試料作製

本研究では測定試料を以下の手順により作製した。

- (1) Al:1.0431g, Fe:3.1938g, Si:1.6068g を石英管に入れ、真空にして封入した。
- (2) 炉内温度を 1050℃ に保ち 1 時間かけて熔融す

る。

- (3) 炉から取り出し空冷する。
- (4) 試料を石英管から取り出し、中央付近で切断する。
- (5) アクリル・ワン（一液性可視光硬化包埋樹脂）を用いて、直径 1cm の円状試料の断面が出るように樹脂埋め加工する。
- (6) 試料の切断面が鏡面になるよう #400, 800, 1000, 1500 のエメリ紙で研磨した後、粒度 5, 1, 0.04  $\mu\text{m}$  のアルミナ粉を用いてバフ研磨する。
- (7) 研磨面に約 100nm の厚さの薄膜になるよう Mo をスパッタする。

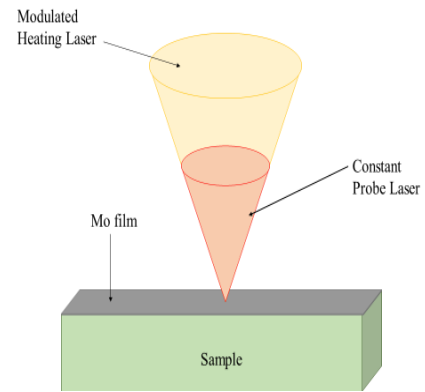


Fig. 2 Principle of TM

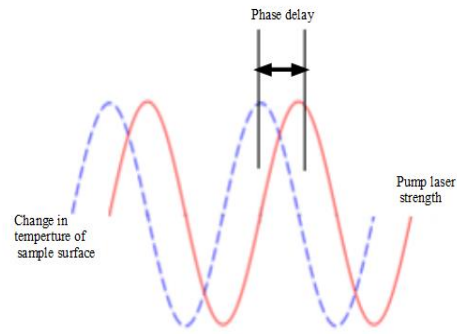


Fig. 3 Schematic diagram of laser intensity and surface temperature of sample

## 4. 測定

### 4.1 SEM 観察及び熱浸透率測定

作製した試料に関して、SEM 観察を実施した。図 4 にその測定箇所を示す。SEM 観察で得られた写真と同一箇所において熱浸透率測定を行うために、試料の左上隅を原点として SEM 測定箇所を座標で示した。図 5 に光学顕微鏡で撮影し合成した試料表面の全体図を示す。黒く影になっている部分は全て空隙で、これらは熱物性顕微鏡に搭載されている CCD カメラでも確認することができる。そのため、この空隙を目印にすることで SEM 観察と同一箇所での熱浸透率測定が可能である。座標の

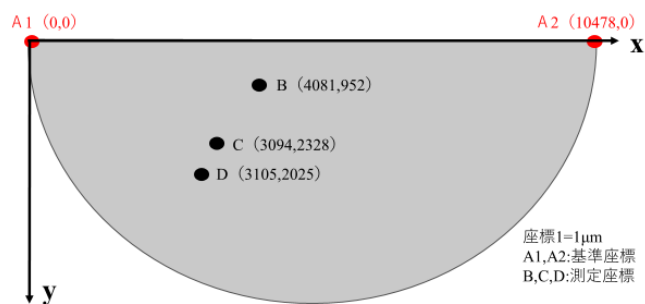


Fig. 4 Measurement points of Al-Fe-Si

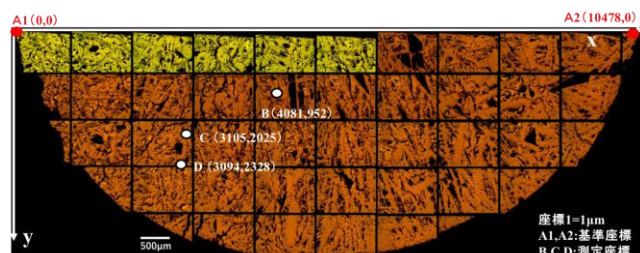


Fig. 6 General view of the sample's surface

1は実際の距離の1  $\mu\text{m}$  に相当する。A1及びA2は基準座標として試料の左上隅と右上隅を示しており、B,C,Dが測定した座標となっている。SEM観察は $64 \times 84 \mu\text{m}$ 四方を測定したものであり、測定座標はその四方の中心を示している。

次に熱物性顕微鏡を用いてSEM観察と同一箇所において熱浸透率測定を実施した。測定はSEM写真と同様に $64 \times 84 \mu\text{m}$ 四方を4  $\mu\text{m}$ ごとに行い、実験の再現性を高めるために同様の測定を1箇所につき3回実施した。図6に座標B,C,Dにて測定したSEM写真及び熱浸透率測定結果を示す。SEM写真では色の黒い部分と灰色の部分で相が分かれていることが確認できる。また熱浸透率測定結果から、SEM写真において黒い部分の相が白い部分の相よりも熱浸透率の値が高いことがわかる。

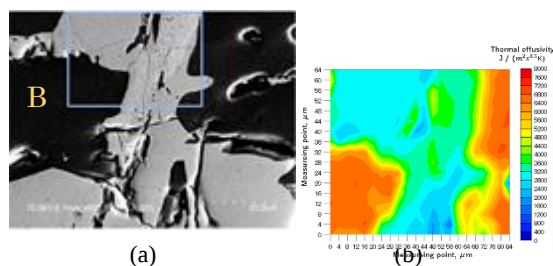
なお試料にはSEM観察の際表面にカーボンコートを散布しており、SEM観察が終了したのちそれを粒度0.05  $\mu\text{m}$ のアルミナ粉とコロダイルシリカを用いたバフ研磨により除去し、表面にモリブデン薄膜をスパッタし熱物性顕微鏡での観察を行った。

## 5. 結論

Al-Fe-Si 三元系合金試料の SEM 観察及び熱浸透率測定の結果から、試料表面において相ごとに熱浸透率に差が生じていることがわかった。座標 B 及び D に関しては、多少のずれはあるものの SEM 写真で観察できる相と似た形状を熱浸透率測定でも得ることができた。座標 C に関しては、SEM 写真で確認できる相を熱浸透率測定で再現することができなかった。その原因として、座標 C は B、D に比べて細かな相が多数存在しており、今回の熱浸透率測定の分解能 4  $\mu\text{m}$  では細かな相の

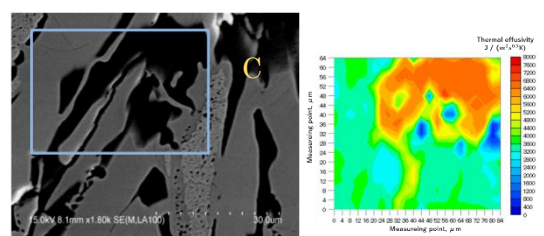
測定ができなかったと考えられる。

座標 B における SEM 観察写真(Fig.4.1)から、黒色の部分(以下相 X)、灰色の部分(以下相 Y)、薄い灰色で細かい斑点がある部分(以下相 Z)の3つの相に分かれていることが確認できる。同様に座標 B における熱浸透率測定の結果でもグラフのオレンジ色及び黄色の部分、水色及び青色の部分、緑色の部分の3つに分かれており、この位置関係は SEM 観察写真における相 X、Y、Z と一致する。また、座標 D における SEM 観察写真(Fig.4.2)についても同様に3つの相が確認でき、位置関係に



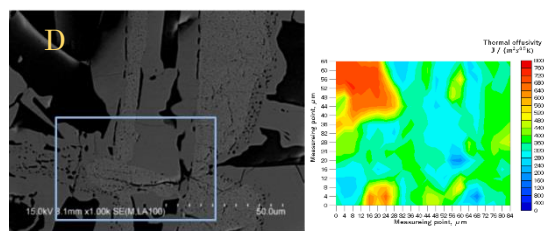
(a)

(b)



(a)

(b)



(a)

(b)

Fig. 6 Points photographed by Scanning Electron Microscope (a) and experimental result of Thermal effusivity (b)

についても SEM 観察写真と熱浸透率結果とで対応していることが確認できる。相 X が Si の単相、相 Y と相 Z が、Si に Al や Fe が含まれた相だと予想される。今後の研究で詳しい組成や各相の特性をより詳細に調べていく。

## 【参考文献】

- [1] H. Ohta, K. Hatori, G. Matsui, T. Yagi, S. Miyake, T. Okamura, R. Endoh, R. Okada, K. Morishita, S. Yokoyama, K. Taguchi, H. Kato, Meas. Sci. Technol. 27 (2016) 115002.

## 超伝導デバイス開発研究

Investigation on superconducting devices

島影 尚

グリーンデバイス教育・研究センター

H. Shimakage

Green Device Education and Research Center, Ibaraki University

### 1.概要

本研究では、テラヘルツ帯域で動作が可能な超伝導パラメトリック増幅器[1]の実現に向け、高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO)を用いたコプレーナラインの作製と特性評価および測定系の構築を行った。超伝導パラメトリック増幅器は、広帯域動作や高いダイナミックレンジ、量子限界に迫る雑音性能など非常に高い性能を有する増幅器であり、電波天文分野での応用が期待されている。しかしながら、超伝導パラメトリック増幅器の動作周波数は超伝導体の臨界温度に依存するため、テラヘルツ動作させるためには臨界温度の高い超伝導体を使用しなければならない。そこで、本研究では、高温超伝導体 YBCO を用いた超伝導パラメトリック増幅器の実現を目標とした。超伝導パラメトリック増幅器は超伝導伝送線路固有のカイネティックインダクタンスを非線形媒質として用いた 3 次非線形効果からなる。したがって、超伝導体 YBCO を用いたパラメトリック増幅器の実現のためには、YBCO コプレーナラインにおけるカイネティックインダクタンスの評価が重要である。カイネティックインダクタンスは電流印加時に非線形的に変化する特性を持つ。そのため、本研究では、ネットワーク・アナライザを用いて、YBCO コプレーナラインの電流印加時における位相変化量を測定することでカイネティックインダクタンス評価を行った。構築した測定系では、測定素子を 20 K まで冷却した状態で、周波数 1 ~ 4 GHz の電磁波での位相変化量の測定が可能である。測定素子である YBCO コプレーナラインの作製にあたり、YBCO 薄膜の製膜を行った。YBCO 薄膜は 10 × 10 mm の MgO 基板上に、YAG レーザーを用いた PLD 法により製膜した。製膜した薄膜の抵抗-温度特性を 4 端子法により測定したところ、77 K で超伝導転移を確認した。次に、YBCO 薄膜をフォトリソグラフィによるパターンニングとスパッタエッチングにより、線路幅 8  $\mu\text{m}$ 、ギャップ幅 8  $\mu\text{m}$ 、線路長 5 mm のコプレーナライン状に加工した。同様に、作製した YBCO コプレーナラインの抵抗-温度特性を測定したところ、超伝導転移を確認した。また、電流印加時の位相変化量の測定を行ったところ、微小ではあるが、カイネティックインダクタンスに起因すると考えられる位相の変化を確認した。

### 2.はじめに

ジョセフソン効果デバイスを始めとする超伝導デバイスは、高感度な磁場検出器や電磁波検出器の検出部に使用されており、それぞれは、医療現場における脳磁場計測や、電波天文学における電磁波観測で活躍している。それらの応用で使われている超伝導材料は Nb 系超伝導材料(臨界温度:9K)であり、すでに 20 年以上の実績を有している。また、超伝導体デバイスは高感度性だけでなく、低消費電力の特徴を持ち、グリーンデバイスの一つとしての側面も持っている。しかし、Nb 系超伝導材料を用いたジョセフソン接合では、動作温度が液体ヘリウム温度(4.2K)と低く、汎用的使用ができない。そこで、我々の研究グループでは、動作温度が液体窒素温度(77K)以上の高温超伝導体を用いたデバイスの開発研究を行っている。研究内容としては、1)BSCCO 高温超伝導薄膜の研究、2)BSCCO 高温超伝導体ジョセフソン素子の作製研究、3)YBCO 高温超伝導体ジョセフソン素子の作製研究、4)BSCCO ジョセフソン素子からのテラヘルツ放射に関する研究、5)YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の研究、6)ナノアンテナを集積化した中赤外光検出器の研究などを行っている。本年度の研究報告では、5)の、YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の研究を取り上げ、その進捗状況について報告する。

### 3.超伝導パラメトリック増幅器の数値計算と設計

超伝導パラメトリック増幅器は超伝導伝送線路固有のカイネティックインダクタンスを非線形媒質として用いた 3 次非線形効果からなる。したがって、超伝導体 YBCO を用いたパラメトリック増幅器の実現のためには、YBCO コプレーナライン(以下 CPW)におけるカイネティックインダクタンスの評価が重要である。カイネティックインダクタンスは電流印加時に非線形的に変化する特性を持つ。そのため、本研究では、YBCO-CPW の作製を行い、ネットワーク・アナライザを用いて電流印加時における位相変化量を測定することでカイネティックインダクタンス評価を行った。

まず、YBCO-CPW の設計指針を立てるために、超

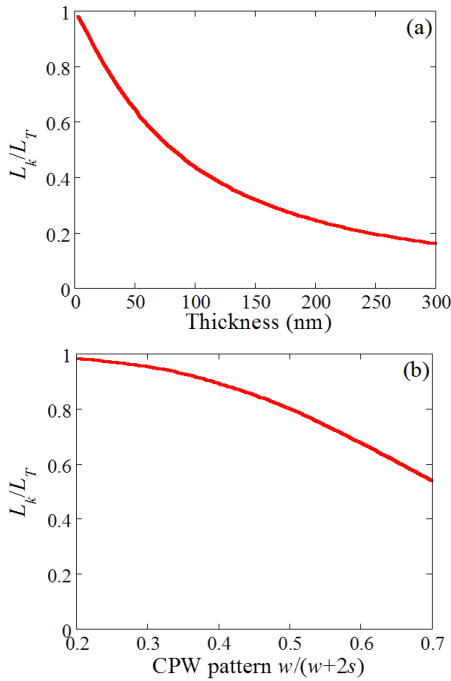


Fig.1. 数値計算によって求めた、コプレーナラインとカイネティックインダクタンスの関係 (a)膜厚依存性 (固定値  $w = 4 \mu\text{m}$ ,  $s = 2 \mu\text{m}$ ) (b)形状依存性 (固定値  $d = 40 \text{ nm}$ )

伝導 CPW の理論式を用いて数値計算を行った。超伝導 CPW において、全インダクタンス  $L_T$  は、マグネティックインダクタンス  $L_m$  と超伝導体固有のカイネティックインダクタンス  $L_k$  の和である。理論式より、 $L_m$  と  $L_k$  はそれぞれ、 $L_m = \mu_0 K(k)/4K(k)$ 、 $L_k = (\mu_0 \lambda^2/dw)g(s, w, d)$  である。この式で、 $\mu_0$  は真空の透過率、 $\lambda$  は超伝導体の磁場侵入長、 $w$  は CPW の芯線の線路幅、 $s$  は CPW のギャップ幅、 $d$  は CPW の膜厚である。また、 $K(k)$  及び  $K(k')$  は第一種完全楕円積分であり、 $g(s, w, d)$  は CPW の幾何学因子である。したがって、マグネティックインダクタンスは CPW 形状のみに依存し、カイネティックインダクタンスは CPW 形状と超伝導体の磁場侵入長に依存する。ここで、超伝導パラメトリック増幅器は、カイネティックインダクタンスの非線形を触媒としているため、全インダクタンスにおいて、カイネティックインダクタンスが支配的にならないといけない。以上の式より、線路幅とギャップ幅の比  $w/(w + 2s)$  が小さく、伝送線路の膜厚を薄くすることで、全インダクタンスにおいてカイネティックインダクタンスが支配的になることがわかった。以上の結果と、当研究室での作製環境を考慮し、線路幅  $8 \mu\text{m}$ 、ギャップ幅  $8 \mu\text{m}$ 、線路長  $5 \text{ mm}$  の CPW を設計した[2]。

#### 4.YBCO コプレーナラインの位相変化量測定

次に、作製した YBCO-CPW に電磁波を流した場合の入出力での位相変化量の測定を行うため、測定系の

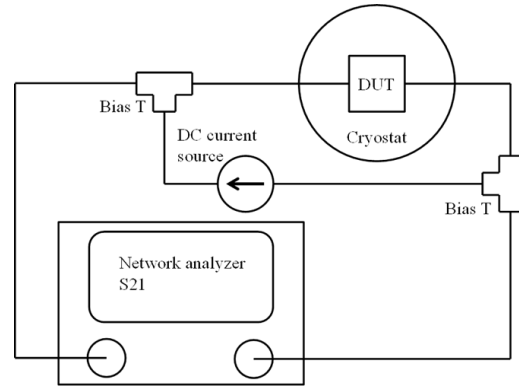


Fig.2. 位相変化量の測定系

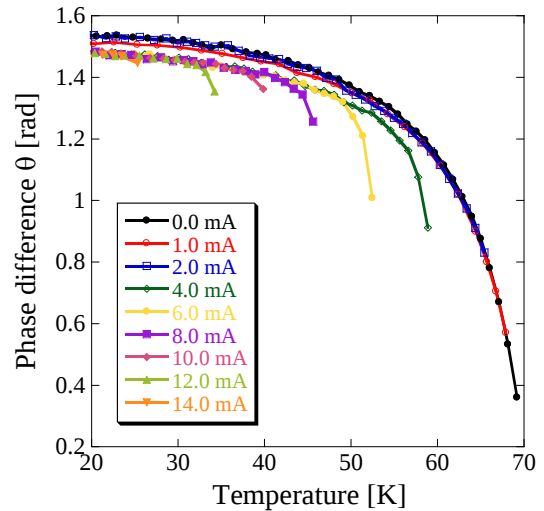


Fig.3. 各バイアスでの位相-温度依存性

構築を行った。ここで、位相変化量とは CPW 中を伝送した電磁波において、入力時と出力時での位相の差である。位相変化量の測定系を Fig.2 に示す。この測定系では、バイアス T を通すことで伝送線路に電流を印加することができ、ネットワーク・アナライザを用いて電流印加時の位相変化量を測定することができる。また、測定系の一部として、マイクロ波入出力用の治具を新たに作製した。この治具を用いることで、極低温状態で  $1 \sim 4 \text{ GHz}$  での伝送特性評価が可能であることを確認した。位相変化測定実験に先立ち、作製した YBCO-CPW の測定温度  $18 \text{ K}$  における挿入損失 (S21) を測定した。その結果、作製した測定系においては挿入損失の最小周波数は  $4 \text{ GHz}$  付近であった。このことから、位相変化量の測定周波数は  $4 \text{ GHz}$  として、CPW にバイアス T で電流を印可し、位相変化量の測定を行った。Fig.3 に印加電流を  $0 \text{ mA}$  から  $14 \text{ mA}$  まで変化させた時の位相変化量の温度変化を示す。それぞれの電流印加時での振る舞いは温度が上がると、位相変化量は減少していく傾向がある。これは、温度による、カイネティックインダクタンスの変化によるものと予想している。また、超伝導転移温度付近で位相変化量

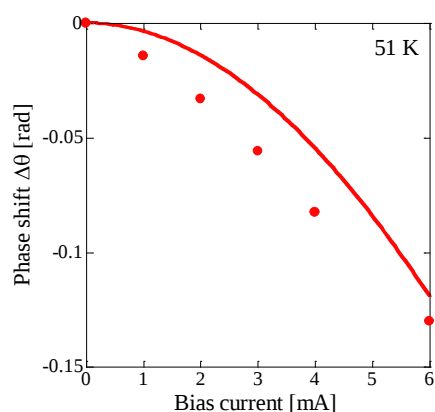


Fig.4. 51K での位相変化量-電流依存性

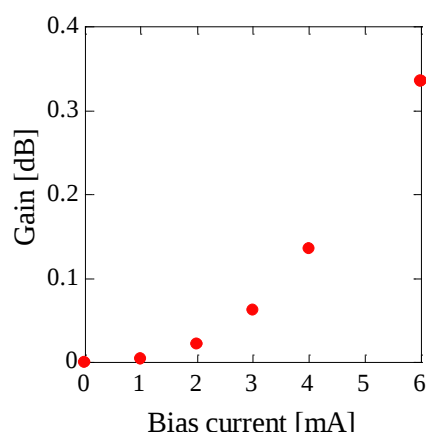


Fig.5. 51K での位相変化量から計算した増幅利得

の大きい変化が観測された。次に、測定温度 51 K におけるバイアス電流と位相変化量のグラフを Fig.4 に示す。ここで、縦軸は、0.0 mA で位相変化量を 0.0 rad としてプロットを規格化している。6.0 mA の電流を印加した場合、-0.12 rad 程度の位相変化が見られることがわかる。また、図中に線で描かれたものは、今回作製した YBCO-CPW の形状から数値計算した位相変化量である。実験結果と非常に良い一致を示しており、本測定で得られた位相変化量は電流印加によるカイネティックインダクタンスの変調に起因するものだと考えられる。また、本測定で得られた、位相変化量から、測定温度 51 K における増幅利得を算出した結果を Fig.5 に示す。最大で 0.33dB の利得が得られることがわかった。実際の増幅器としての使用を考えると、より大きな増幅利得が必要であるが、線路幅を細くすることや、伝送線路を長くすることなどで、より大きな増幅利得が期待できる。

## 5. おわりに

本研究では、YBCO 薄膜を用いた超伝導パラメトリック増幅器の実現を向けての測定系の構築とカイネティックインダクタンスの評価を行った。51K の動作温度において、位相変化量が理論から計算した値とよく一致した。また、増幅率の見積もりを行った結果、現状の素子形

状において、増幅率が最大 0.33dB の利得が見積もられた。実際の増幅器として動作させるためには、パラメトリック増幅器としては、位相整合を実現させなければならない。本研究では、位相整合はまだ考慮していない。位相整合の実現に向けても、現在研究を行っており、それらの技術を組み合わせることにより、将来的には、汎用性のある数 10K 程度の動作温度をもつ増幅器の実現が可能であると考えられる。

## 【参考文献】

- [1] B. Ho Eom, P. K. Day, H. G LeDuc, and J. Zmuidzinas , Nat. Phys. 8,623-627(2012).
- [2] T. Goto, M. Takeda, S. Saito and H. Shimakage, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012081 (2017).

### 3.プロジェクト業績

## 活動実績

グリーンデバイス研究教育センターでは、構成員の研究情報収集、研究領域拡大、学生の教育等を目的に、外部の研究者を招へいし、セミナー及び研究ディスカッション会を行っている。招へいした研究者には、初学者にも理解できるレベルから最先端の研究成果までをセミナーでご講演頂くとともに、別に時間を取って頂き、本学の研究者や学生より本学で遂行中の個々の研究を紹介し、それらの成果や現状を題材にディスカッションをして頂いている。本年度は、お二人の研究者をお招きした。

### セミナーの概要

日時:2018年2月27日(火) 14:30～

場所:W3棟 403室

題目:多孔質が創る材料と機能

講師:中嶋英雄 氏 ((公財)若狭湾エネルギー研究センター所長)

概要:自然界には樹木、葉、茎、動物の骨などのように実に多くのポーラス材料が存在する。ポーラス材料内の孔は物質の供給源、軽量化、高強度化、流体の透過性、保温などの機能を果たしている。本講演では、自然界の多くはポーラス構造であることを紹介し、泡立てた金属、木材や蓮根のように孔のそろった金属の作り方や特性を解説する。さまざまな形状の気孔という無の空間が生み出す材料特性を紹介する。

日時:2018年2月27日(火) 15:30～

場所:W3棟 403室

題目:ロータス型ポーラス金属の実用化展望

講師:井手拓哉 氏 ((株)ロータス・サーマル・ソリューション 代表取締役社長)

概要:蓮根のような多数の円柱状の気孔が一方向に配列したロータス型ポーラス金属は、巨大表面積、高い流体透過性および機械的強度を有する。そのような特性を利用した冷却器、衝撃吸収材料、熱電変換材料等は、大学からの着想、基礎研究を経て(進行中も)、実用化段階や実用化開発に差し掛かっている。それらの研究開発プロセスや最新の実用化開発動向を紹介しつつ、大学発材料系ベンチャーとしてのイノベーションの創出に向けた我々の活動を紹介する。

### 研究ディスカッションの概要

日時:2018年2月27日(火)～28日(水)

場所:W3棟

参加者:外部 中嶋英雄 氏 ((公財)若狭湾エネルギー研究センター所長)

井手拓哉 氏 ((株)ロータス・サーマル・ソリューション 代表取締役社長)

センター構成員

## 活動実績

グリーンデバイス研究教育センターでは、構成員の研究情報収集、研究領域拡大、学生の教育等を目的に、外部の研究者を招へいし、セミナー及び研究ディスカッション会を行っている。招へいした研究者には、初学者にも理解できるレベルから最先端の研究成果までをセミナーでご講演頂くとともに、別に時間を取って頂き、本学の研究者や学生より本学で遂行中の個々の研究を紹介し、それらの成果や現状を題材にディスカッションをして頂いている。本年度は、お二人の研究者をお招きした。

### セミナーの概要

日時:2018年2月27日(火) 14:30～

場所:W3棟 403室

題目:多孔質が創る材料と機能

講師:中嶋英雄 氏 ((公財)若狭湾エネルギー研究センター所長)

概要:自然界には樹木、葉、茎、動物の骨などのように実に多くのポーラス材料が存在する。ポーラス材料内の孔は物質の供給源、軽量化、高強度化、流体の透過性、保温などの機能を果たしている。本講演では、自然界の多くはポーラス構造であることを紹介し、泡立てた金属、木材や蓮根のように孔のそろった金属の作り方や特性を解説する。さまざまな形状の気孔という無の空間が生み出す材料特性を紹介する。

日時:2018年2月27日(火) 15:30～

場所:W3棟 403室

題目:ロータス型ポーラス金属の実用化展望

講師:井手拓哉 氏 ((株)ロータス・サーマル・ソリューション 代表取締役社長)

概要:蓮根のような多数の円柱状の気孔が一方向に配列したロータス型ポーラス金属は、巨大表面積、高い流体透過性および機械的強度を有する。そのような特性を利用した冷却器、衝撃吸収材料、熱電変換材料等は、大学からの着想、基礎研究を経て(進行中も)、実用化段階や実用化開発に差し掛かっている。それらの研究開発プロセスや最新の実用化開発動向を紹介しつつ、大学発材料系ベンチャーとしてのイノベーションの創出に向けた我々の活動を紹介する。

### 研究ディスカッションの概要

日時:2018年2月27日(火)～28日(水)

場所:W3棟

参加者:外部 中嶋英雄 氏 ((公財)若狭湾エネルギー研究センター所長)

井手拓哉 氏 ((株)ロータス・サーマル・ソリューション 代表取締役社長)

センター構成員

## 業績一覧

### 【原著論文】

- 1) Takatoshi Nagano, Kunihiro Tamahashi, Takashi Inami, Yasushi Sasajima, Jin Onuki, “Screening of Undesirable Elements Raising the Electrical Resistivity in Very Narrow Cu Wires by Ab Initio Calculation” J. Electrochem. Soc. Vol.164, iss.9, pp.D558-D563.
- 2) Jin Onuki, Kunihiro Tamahashi, Takashi Inami, Takatoshi Nagano, Yasushi Sasajima, Shuji Ikeda, “Nano-structure-controlled very low resistivity Cu wires formed by high purity electrolyte and optimized additives”, 2017 IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM)
- 3) 堀川隼世, 川上彰, 兵頭政春, 島影尚, 中赤外光領域における金属材料特性に基づいた光検出器用アンテナ特性評価, 日本赤外線学会誌, 27 巻 1 号 74-79 (2017)
- 4) Bin Liu, Teruyuki Ikeda, Yasushi Sasajima, Phase-field simulation of the Si precipitation process in Mg<sub>2</sub>Si under an applied stress, Mater. Sci. Eng. B, 229 (2018), 65-69.
- 5) R. Ando, T. Komine, Geometrical contribution to anomalous Nernst effect in TbFeCo thin films, AIP Advances Vol. 8, 056326/pp.1-6 (2018).
- 6) R. Ando, T. Komine, S. Sato, S. Kaneta, Y. Hara, Novel behaviors of anomalous hall effect in TbFeCo thin films under high magnetic field, AIP advances Vol. 8, 056316/pp.1-7 (2018).
- 7) H. Nakayama, B.-R. Zhao, N. Furusato, S. Yamada, T. Nishi, H. Ohta, Effect of Amount of Chunky Graphite on Mechanical Properties of Spheroidal-Graphite Cast Iron, Material Transactions, **59**, 412-419, (2018)
- 8) Shugo Miyake, Genzou Matsui, Hiromichi Ohta, Kimihito Hatori, Kohei Taguchi and Suguru Yamamoto, Wide-range measurement of thermal effusivity using molybdenum thin film with low thermal conductivity for thermal microscopes, Measurement Science and Technology, **28**, 075006, (2017).
- 9) T. Nishi, H. Ohta, S. Sukenaga, H. Shibata, Estimation of thermal conductivity of silicate melts using three-dimensional thermal resistor network model, Journal of Non-Crystalline Solids, **482**, 9-13, (2018)
- 10) T. Nishi, S. Yamamoto, M. Okawa, K. Hatori, T. Ikeda, H. Ohta, Thermal microscope measurement of thermal effusivity distribution in compositionally graded PbTe–Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–Ag<sub>2</sub>Te alloy system, Thermochemica Acta, **659**, 39-43, (2018)
- 11) 橋本康孝, 西 剛史, 太田弘道, 鉛フリーはんだの粘度測定の現状および今後の課題, 日本金属学会誌 **81**, 221-225,(2017)

### 【国際会議論文】

- 1) T. Goto, M. Takeda, S. Saito and H. Shimakage, Calculations of superconducting parametric amplifiers performances, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012081 (2017)
- 2) R. Obara, J. Horikawa, H. Shimakage and A. Kawakami, Evaluation of detectable angle of mid-infrared slot antennas, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012080 (2017)
- 3) R. Hiwatashi, Y. Tamura and H. Shimakage, Simulations of chaos generation from Josephson junctions with various junction parameters, J. Phys.: Conf. Ser. 871 012079 (2017)

### 【学会発表 (国内, 国際)】

- 1) Babak Alinejad, Teruyuki Ikeda, High-thermoelectric performance of nanostructured doped Mg<sub>2</sub>Si, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)

- 2) 佐々木誠, Shiva Kumar Singh, 永野隆敏, 池田輝之, 井手拓哉, 中嶋英雄, 粒子法シミュレーションによる熱流体透過型多孔質熱電材料の温度分布評価, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)
- 3) 齊藤明子, 西峯広智, 池田亜矢子, 池田輝之, 高際良樹, 一方向凝固を利用した熱電材料の組織探索, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (口頭)
- 4) 菅原龍太郎, 渡部紘介, 池田輝之, Si 基熱電材料のキャリア濃度増大と耐用条件, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (ポスター)
- 5) 青野美南, 齊藤明子, 池田輝之, フラックス法による PbTe 及び Si の一方向凝固, 日本金属学会 2018 年春期講演大会, 2018 年, 3 月 19-31 日, 千葉工業大学新習志野キャンパス, 日本金属学会 (ポスター)
- 6) 大川萌里, 西剛史, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人, 熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸透率測定, 熱物性シンポジウム, 2017, 11 月 7-9 日, つくば (口頭)
- 7) Teruyuki Ikeda and Babak Alinejad, Low temperature rapid fabrication of  $Mg_2Si$  via activated reactive consolidation, TMS 2018 147rd Annual Meeting & Exhibition, Phoenix, Arizona, USA, March 11-15, 2018, (Invited)
- 8) Teruyuki Ikeda, Microstructure control of bulk thermoelectric materials via phase transformations, SPARCA 2018 (2018 SYMPOSIUM FOR THE PROMOTION OF APPLIED RESEARCH COLLABORATION IN ASIA), Ginowan, Okinawa, Japan, February 9-12, 2018 (Invited)
- 9) T. Ikeda, K. Watanobe, Y. Hong, "Nanostructuring and its effects on thermoelectric properties of Si base composites", IUMRS-ICAM 2017, Kyoto, Japan, August 27-September1, 2017, (Invited)
- 10) B.Alinejad, T. Ikeda, "Fabrication of highly pure, dense  $Mg_2Si$  via single-step low temperature reactive consolidation", IUMRS-ICAM 2017, Kyoto, Japan, August 27-September1, 2017 (Oral)
- 11) リュウビン, 池田輝之, 篠嶋 妥, ロータスアルミニウム金属におけるポア成長のフェーズフィールドシミュレーション, 日本軽金属学会, 2017, 11 月 4-5 日, 宇都宮大学, 日本軽金属学会 (ポスター)
- 12) 齊藤明子, 青野美南, 西峯広智, 池田輝之, 高際良樹, 長谷川靖洋, 新規熱電材料の開発における一方向凝固法の有効性, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 13) 菅原龍太郎, 渡部紘介, 池田輝之, Si-Sb 熱電材料のナノ構造化とキャリア濃度および熱伝導率の関係, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 14) 渡辺英和, 池田輝之, パルス通電焼結法による高密度 Si 焼結体の作製, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 15) 山崎拓矢, 児島孝文, 井手拓哉, 池田輝之, 中嶋英雄, 一方向に孔の揃った多孔質シリコンの作製と熱電特性, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (口頭)
- 16) 井野崎崇, Babak Alinejad, 池田輝之, 低次元ナノ構造をもつバルク熱電材料の創製, 日本熱電学会, 2017, 9 月 11-13 日, 大阪大学, 日本熱電学会 (ポスター)
- 17) Babak Alinejad, Teruyuki Ikeda, Microstructure tailoring of silicon-aluminum oxide nano-composite for thermoelectric applications, 日本金属学会秋期講演大会, 2017, 9 月 6-8 日, 北海道大学, 日本金属学会 (口頭)
- 18) T. Ikeda, M. Murata, T. Komine, H. Kiue, and Y. Hasegawa, Macroscale thermoelectric materials with low dimensional nanoscale features, 36th annual international conference on thermoelectrics (ICT), Pasadena, CA, July 30 - Aug. 3, 2017.
- 19) 佐々木悠馬, 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生  $Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$  接合素子における量子・古典状態間遷移領域に関する研究 [5a-A504-12], 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017 年 9 月 5-8 日.
- 20) 安藤亮, 小峰啓史, フェリ磁性  $TbFeCo$  における熱電効果の素子形状依存性 [7p-PB7-35], 第 78 回 応用物理

学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017 年 9 月 5-8 日.

- 21) 三澤貴浩, 森澄人, 佐々木悠馬, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生  
 $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  ナノ接合素子の電気伝導特性 [8p-A412-9], 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会,  
福岡国際会議場/福岡国際センター/福岡サンパレスホテル, 2017 年 9 月 5-8 日.
- 22) R. Ando, T. Komine, S. Sato, S. Kaneta, Y. Hara, Novel behaviors of anomalous hall effect in TbFeCo thin films  
under high magnetic field (EU-01) 62nd Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Pittsburgh,  
PA, Nov. 6-10, 2017.
- 23) R. Ando, T. Komine, Geometrical contribution to anomalous Nernst effect in TbFeCo thin films (EU-05) 62nd Annual  
Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Pittsburgh, PA, Nov. 6-10, 2017.
- 24) Y. Sasaki, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, J. Nishii, H. Kaiju, Study of  
 $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  nanoscale junction devices utilizing thin-film edges The 18th RIES-HOKUDAI International  
Symposium, Châtoraishé Gateaux Kingdom Sapporo, Nov. 30 – Dec. 1, 2017
- 25) 佐々木悠馬, 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 西井準治, 海住英生 磁性薄膜エ  
ッジを利用した  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{Alq}_3/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  ナノ接合素子に関する研究, 第53回応用物理学会北海道支部/第14回  
日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学・学術交流会館, 2018 年 1 月 6-7 日.
- 26) 安藤亮, 小峰啓史, 磁性薄膜における電極配置が異常ネルンスト起電力に及ぼす影響 [17p-P10-21], 第 65 回  
応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学(西早稲田キャンパス/ベルサール高田馬場) 2018 年 3 月 17-20 日.
- 27) 青野友祐, Peter Stano, 川村稔, 大野圭司, 小峰啓史, 面内磁場下の量子ポイントコンタクトにおける動的核スピン  
偏極, 日本物理学会 第 73 回年次大会(2018 年), 東京理科大学(野田キャンパス), 2018 年 3 月 22-25 日.
- 28) H. Shibata, S. Sukenaga, T. Nishi, H. Ohta, Thermal diffusivity measurement for metallic and oxide glasses using a  
laser flash method, European Conference on Thermophysical Properties 21st Graz, Austria, 2017/9/5
- 29) 橋本康孝, 太田弘道, 西 剛史, 溶融 Sn-Ag-Cu はんだの粘性率- 温度・Ag 添加量依存性の検討, 日本金属学会  
2017 年秋期(第 161 回)講演大会, 2017/9/7
- 30) 山野秀将, 高井俊英, 古川智弘, 江村優軌, 倉田正輝, 東 英生, 福山博之, 西 剛史, 太田弘道, 劉 曉星, 古谷  
正裕, ナトリウム冷却高速炉の炉心損傷事故時の制御棒材の共晶溶融挙動に関する研究(1)プロジェクト全体概要,  
日本原子力学会 2017 年秋の大会, 2017/9/15
- 31) 西 剛史, 太田弘道, 山野 秀将, ナトリウム冷却高速炉の炉心損傷事故時の制御棒材の共晶溶融挙動に関する研  
究(5) 5mass%B<sub>4</sub>C-SS 共晶溶融物の粘度測定, 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 2017/9/15
- 32) 西 剛史, 田中健登, 大沼克也, 眞子巧巳, 太田弘道, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> および  
B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> 融体の熱伝導率の B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率依存性, 第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 33) 大川萌里, 西 剛史, 池田輝之, 太田弘道, 羽鳥仁人, 熱物性顕微鏡を用いた鉄基合金系熱電変換材料の熱浸  
透率測定, 第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 34) 篠原貴洸, 太田弘道, 西 剛史, 羽鳥仁人, 野口秀則, 神田昌枝, スポット周期加熱放射測温法による複合材料の  
熱拡散率評価および検討, 第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 35) 田中健登, 大沼克也, 眞子巧巳, 太田弘道, 西 剛史, 柴田浩幸, 助永壮平, 柿原敏明, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 融体の  
熱伝導率, 第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/7
- 36) 橋本康孝, 太田弘道, 西 剛史, 共軸二重円筒回転粘度計を用いた Sn-Ag-Cu はんだの粘度測定, 第 38 回日本熱  
物性シンポジウム, 2017/11/7
- 37) 神戸健志郎, 太田弘道, 西 剛史, 勝又淳友, ゴォニウホアン, 示差走査熱量計を用いた鋳造用スリーブの発熱量  
評価, 第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017/11/9
- 38) 勝又淳友, 神戸健志郎, ゴォニウホアン, 西 剛史, 太田弘道, 氷熱量計を用いた鋳造用発熱スリーブの発熱量測

定手法の開発,第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9

- 39) 羽鳥仁人, 栗野孝昭, 西 剛史, 太田弘道, 五十嵐菅廣, スポット周期加熱放射測温法による解析式を用いた2層材料の熱伝導率測定,第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9
- 40) ゴォニョホアン, 勝又淳友, 神戸健志郎, 西 剛史, 太田弘道, 鑄造用発熱鑄型材の炉内加熱による発熱挙動評価, 第 38 回日本熱物性シンポジウム,2017/11/9
- 41) 神戸健志郎, 西 剛史, 太田弘道, 勝又淳友, ゴォニョホアン, 示差走査熱量計と X 線回折装置を用いた鑄造スリーブの発熱挙動評価,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 42) 林 健, 西 剛史, 太田弘道, 羽鳥仁人, 野口秀則, 高熱伝導放熱シートの熱拡散率分布測定,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 43) 眞子巧巳, 田中健登, 大沼克也, 太田弘道, 西 剛史, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明,  $\text{SiO}_2\text{-AlO}_{1.5}\text{-R}_2\text{O}$  ( $\text{R}=\text{Li,Na}$ ) 融体状態およびガラス状態の熱伝導率,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 44) 小久保宏紀, 太田弘道, 西 剛史, 山野秀将, 溶融ステンレス鋼を用いたるつぼ回転粘度測定装置の整備,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 45) 眞子巧巳, 田中健登, 大沼克也, 太田弘道, 西 剛史, 助永壮平, 柴田浩幸, 柿原敏明,  $\text{SiO}_2\text{-AlO}_{1.5}\text{-R}_2\text{O}$  ( $\text{R}=\text{Li,Na}$ ) 融体状態およびガラス状態の熱伝導率,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19
- 46) 森 賢太, 西 剛史, 太田弘道, 遠藤理恵, 須佐匡裕, 表面加熱・表面測温レーザフラッシュ法による二層試料の熱物性測定法の開発,日本金属学会 2018 年春期(第 162 回)講演大会,2018/3/19

#### 【受賞等】

- 1) Babak Alinejad, Award for Encouragement of Research, The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017, 2017 年 8 月 27 日-9 月 1 日に開催).
- 2) 受賞者名: 佐々木 悠馬(北大電子研), 三澤 貴浩 1, 森 澄人 1, 小峰 啓史 2, 星野 哲久 3, 芥川 智行 3, 藤岡 正弥 1, 西井準治 1, 海住 英生 1(北大電子研 1, 茨工大 2, 東北大多元研 3), 受賞名: 応用物理学会北海道支部発表奨励賞, 授与者: 第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道地区合同学術講演会 受賞日: 2018/1/10
- 3) 受賞者名: 西剛史 (テキスト「核燃料サイクル」編集委員会及び執筆者), 受賞名: 日本原子力学会 再処理・リサイクル部門 業績賞(テキスト「核燃料サイクル」の出版), 受賞日: 2018/3/28

#### 【特許】

- 1) 発明者: 池田輝之, 児島孝文, 永野隆敏, 井手拓哉, 村上政明, 沼田富行, 中嶋英雄, 出願人: 国立大学法人茨城大学, 株式会社ロータスマテリアル研究所, 発明の名称: 「熱電変換モジュール」, 出願番号: 特願 2018-052531.

#### 【競争的資金獲得】

1. 申請した競争的資金等の外部資金
- 1) NEDO H30 年度エネルギー・環境新技術先導プログラム (H30 年 5 月~H31 年 5 月) 21,420 千円, 研究代表者: 高際良樹
- 2) 平成29年度 公益財団法人村田学術振興財団 研究助成 (自然科学), 「界面電界制御による低消費電力磁壁移動型デバイスの創成」, 1,200 千円, 2017 年度, 研究代表者: 小峰啓史
- 3) 公益財団法人 谷川熱技術振興基金「鉛フリーはんだ粘度測定システムの開発」代表 西剛史 1,000 千円
- 4) A-Step (H29-H32 ステージ II) 「周期加熱法による高速で試料形状自由度の高い熱抵抗測定技術の開発」分担 西剛史 20,280 千円

## 2. 申請した科学研究費補助金

- 1) 平成 30 年度 基盤研究 (B), 「熱延鋼板の冷却制御のための酸化スケールの熱物性値測定法の開発と鋼の冷却機構の解明」, 分担 4,630 千円, 2018 年度～2020 年度, 研究代表者: 遠藤理恵
- 2) 平成 30 年度 基盤研究 (B), 「複合材料の界面熱物性を正確に実測するためのアプローチ」, 代表 4,750 千円, 2018 年度～2020 年度, 研究代表者: 太田弘道
- 3) 平成 30 年度 基盤研究 (B), 「放射性廃棄物ガラス固化体の膨張と伝熱」, 代表 18,840 千円, 2018 年度～2020 年度, 研究代表者: 太田弘道

## 3. 採択された競争的資金等の外部資金

- 1) 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン事業), 「IoT活用による遠隔地多品種少量生産対応型塗装システムの開発」, 200 千円, 2016 年度, 研究代表者: 永野隆敏 (大学側代表者)
- 2) 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン事業), 「革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発」 (H28.9.20～H29.3.31), 研究代表者: 池田輝之 (大学側代表者)
- 3) NEDO H29 年度ベンチャー企業等による新エネルギー技術革新支援事業 (H29 年 5 月～H30 年 3 月) 4,709 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 4) NEDO H27 年度エネルギー・環境新技術先導プログラム (H27 年 10 月～H29 年 10 月) 149,900 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 5) 平成29年度 公益財団法人村田学術振興財団 研究助成 (自然科学), 「界面電界制御による低消費電力磁壁移動型デバイスの創成」, 1,200 千円, 2017 年度, 研究代表者: 小峰啓史

## 4. 採択された科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 科学研究費 基盤研究 (B), (H29 年 4 月～H32 年 3 月) 18,590 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 2) 文部科学省 科学研究費 基盤研究 (B) 「電界制御ラッシュバ効果による磁壁移動型メモリの高速化」, 12,900 千円, 研究代表者: 小峰啓史 (H28～H31)
- 3) 文部科学省 科学研究費 挑戦的萌芽研究, (H28 年 4 月～H30 年 3 月) 3,640 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 4) 文部科学省 科学研究費 基盤研究 (B), (H29 年 4 月～H32 年 3 月) 4,160 千円, 研究代表者: 高際良樹
- 5) 文部科学省 科学研究費 基盤研究 (B) 「酸化物系ランダム構造の領域分割と物性理解」, 分担 300 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者: 柴田浩幸
- 6) 文部科学省 科学研究費 基盤研究 (C) 「鉛フリーはんだの大量生産に向けた共軸二重円筒回転粘度計による粘度測定に関する研究」, 代表 910 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者: 西剛史

茨城大学重点研究

「グリーンデバイス開発研究」

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

2017 年度報告書

発行日 平成 30 年 5 月

発行者 茨城大学 工学部 物質科学工学科

教授 池田 輝之

〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1

Tel: 0294-38-5066 Fax: 0294-38-5226

※禁無断転載

茨城大学重点研究

<http://www.ibaraki.ac.jp/generalinfo/activity/researching/juuten/>

茨城大学工学部附属教育研究センター

<http://www.eng.ibaraki.ac.jp/research/centers/index.html>

グリーンデバイス教育研究センター

<http://www.eng.ibaraki.ac.jp/research/centers/device/index.html>